

Fakulta strojního inženýrství  
Ústav konstruování  
Odbor Reverzního inženýrství a aditivních technologií

Faculty of Mechanical Engineering  
Institute of Machine and Industrial Design  
Department of Reverse engineering and additive technologies

# Měření a vyhodnocování přímosti osy rotačních výkovek pomocí fotogrammetrie a analýzy obrazu

[Dizertační práce]  
[PhD Thesis]

Autor práce: **Ing. Aneta Zatočilová**  
Author







VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# MĚŘENÍ A VYHODNOCOVÁNÍ PŘÍMOSTI OSY ROTAČNÍCH VÝKOVKŮ POMOCÍ FOTOGRAMMETRIE A ANALÝZY OBRAZU

MEASUREMENT AND EVALUATION OF AXIS STRAIGHTNESS OF ROTARY FORGINGS  
USING PHOTOGRAMMETRY AND IMAGE ANALYSIS

DISERTAČNÍ PRÁCE  
DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. ANETA ZATOČILOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Doc. Ing. JAN BRANDEJS, CSc.

BRNO 2014



---

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá návrhem metodiky měření tvaru a rozměrů rotačně symetrických výkovků. Většina dostupných bezdotykových systémů není možné pro tuto aplikaci použít zejména z důvodu vysoké teploty a velkých rozměrů měřených polotovarů. V současné době existuje pouze několik komerčních systémů, které jsou určeny pro toto specifické měření. Tyto systémy jsou založeny na principu vyhodnocování časové odezvy vyslaného modulovaného signálu. Odborné prameny uvádějí také další přístupy k měření založené na principu triangulace a analýzy obrazu. Výhodou systému založeného na těchto principech by měla být především rychlost měření a zásadně nižší cena. V práci je popsán aktuální stav výzkumu a vývoje a navržen vlastní přístup, který je založen na pasivní fotogrammetrii a analýze obrazu. Hlavní část práce je věnována návrhu dílčích metod a jejich zavedení do programovacího jazyka v prostředí Matlab. Funkčnost metodiky a softwaru byla ověřena měřením válcových trubek malých rozměrů v laboratorních podmínkách. Na základě statistické analýzy výsledků jsou diskutovány a hodnoceny dílčí metody a navrženy kroky, které zajistí zvýšení přesnosti a snížení rozptylu výsledků. Optimalizace a další vývoj této metodiky by mohli vést k sestavení profesionálního měřicího systému určeného pro tuto vysoce specifickou aplikaci.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Výkovek, kování, detekce hran, fotogrammetrie, měření přímosti osy, optické metody měření, detekce hran, analýza obrazu.

## **ABSTRACT**

The thesis deals with methodology proposal for shape and dimension measurement of rotationally symmetric forgings. Most of available non-contact systems are not possible to use for this purpose, mainly due to high temperatures and large dimensions of forgings. Only a few commercial systems which are designed for this specific measurement are currently in the market. These systems are based on a principle of evaluating time response of posted modulated signal. However, scientific literature shows also other approaches to the measurement, which are based on principle of triangulation and methods of image analysis. Advantage of systems based on these principles should be especially measurement speed and significantly lower price. The paper describes current state of research and development in this area and proposes a new approach which is based on passive photogrammetry and image analysis. The core of the work is devoted to the design of partial methods and their implementation in the Matlab programming language. Functionality of the methodology and the software has been verified by measuring cylindrical tubes of small dimensions in laboratory conditions. The designed methods were discussed and evaluated based on statistical analysis of the measurement results, and further steps to increase the accuracy and reduce the spread of results were suggested. Optimization and further development of this methodology could lead to the design a professional measuring system intended for this specific application.

## **KEY WORDS**

Forging, edge detection, photogrammetry, axis straightness measurement, optical measurement methods, detekce hran, analýza obrazu.

---

---

---

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZATOČILOVÁ, A., *Měření a vyhodnocování přímosti osy rotačních výkovků pomocí fotogrammetrie a analýzy obrazu*. Brno: Vysoké Učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 128 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Jan Brandejs CSc.

---

---

---



---

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracovala samostatně na základě uvedené literatury a za podpory školitele doc. Ing. Jana Brandejse CSc.

V Brně dne: .....

.....  
podpis





---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych poděkovala svému školiteli doc. Janu Brandejsovi a především doc. Davidovi Palouškovi za odborné vedení v průběhu celého doktorského studia a cenné rady a připomínky při řešení disertační práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Miroslavu Kalovi za expresní školení programování a za to, že se mnou vždy ochotně a se zájmem rozebíral problémy související s mojí disertací a existencí vesmíru. Děkuji také svojí rodině.

V Brně dne .....

---



**OBSAH**

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
1.1 Motivace .....	13
1.2 Předběžné cíle práce .....	14
1.3 Přístup .....	14
1.4 Přínos práce .....	15
<b>2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....</b>	<b>16</b>
2.1 Optické metody měření tvaru objektů .....	16
2.2 Fotogrammetrie – základní pojmy, rozdělení a aplikace.....	20
2.2.1 Rozdělení dle použití zdroje světla – pasivní a aktivní fotogrammetrie ...	20
2.2.2 Rozdělení dle počtu snímků .....	21
2.2.3 Rozdělení dle posloupnosti kalibrace, orientace a měření .....	21
2.2.4 Aplikace fotogrammetrie v průmyslu.....	22
2.3 Metody měření tvaru výkovek s vysokou teplotou .....	24
2.3.1 Dotykové měření .....	24
2.3.2 Bezdotykové měření založené na aktivní fotogrammetrii a TOF.....	24
2.3.3 Bezdotykové měření založené na aktivní fotogrammetrii a triangulaci ...	28
2.3.4 Bezdotykové měření založené na pasivní fotogrammetrii a triangulaci...	31
2.3.5 Testování vlivu teploty na funkci 3D skeneru.....	33
2.4 Matematické principy blízké fotogrammetrie .....	33
2.4.1 Parametry vnitřní orientace .....	35
2.4.2 Parametry vnější orientace .....	37
2.4.3 Základní rovnice analytické fotogrammetrie.....	38
2.5 Kalibrace kamer.....	39
2.5.1 Provedení kalibrace z hlediska vnějších podmínek .....	41
2.5.2 Kalibrace z hlediska volby matematického modelu .....	42
2.6 Zpracování obrazu v oblasti blízké fotogrammetrie.....	45
2.6.1 Rozpoznávání a lokalizace objektů v digitálním obraze .....	45
2.6.2 Detekce hran .....	46
<b>3 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA .....</b>	<b>47</b>
<b>4 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ.....</b>	<b>49</b>
<b>5 MATERIÁL A METODY .....</b>	<b>50</b>
5.1 Analytický návrh způsobu řešení .....	51
5.2 Rozvaha nad rozlišením a přesností navrhovaného systému.....	52
5.3 Návrh metody kalibrace.....	55
5.3.1 Volba modelu pro výpočet parametrů nelineárního zkreslení kamery.....	56
5.3.2 Volba modelu pro výpočet parametrů vnitřní a vnější orientace kamery..	58
5.3.3 Volba metody pro výpočet polohy referenčních bodů ve snímku.....	60
5.4 Návrh metody detekce hran.....	62
5.4.1 Algoritmus iniciální detekce (Init Detection).....	62
5.4.2 Algoritmus hlavní detekce (Main Detection 1) .....	64

---

5.4.3 Algoritmus detekce na eliptických koncích (Main Detection 2) .....	68
5.5 Prostorová orientace – složení informací ze snímků do 3D .....	70
5.5.1 Prostorová orientace dat extrahovaných ze snímků .....	70
5.5.2 Výpočet měřítka .....	71
5.5.3 Korekce perspektivního zkreslení .....	74
5.6 Výpočet informací o tvaru a geometrii výkovku .....	75
5.7 Softwarová realizace navržené metodiky v prostředí Matlab .....	78
5.7.1 Uživatelské rozhraní pro kalibraci (GUI - Calibration.m) .....	79
5.7.2 Uživatelské rozhraní pro detekci hran (GUI - Detection.m) .....	80
5.7.3 Uživatelské rozhraní pro měření (GUI - Measurement.m) .....	82
5.8 Experimentální ověření navržené metodiky měření .....	84
5.8.1 Měřicí aparatura a měřené vzorky .....	84
5.8.2 Postup měření dle navržené metodiky a softwaru .....	86
5.8.3 Měření kalibrační scény pomocí systému Tritop .....	89
5.8.4 Komparační měření tvaru a rozměrů testovaných vzorků .....	90
<b>6. ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ .....</b>	<b>93</b>
6.1 Statistická analýza výsledků měření .....	93
6.1.1 Statistická analýza výsledků měření vzorků s pokojovou teplotou .....	95
6.1.2 Interpretace výsledků měření vzorků s teplotou okolí .....	100
6.1.3 Statistická analýza výsledků měření vzorků v zahřátém stavu .....	104
6.1.4 Interpretace výsledků měření vzorků v zahřátém stavu .....	108
6.2 Zhodnocení navržené metodiky a interpretace výsledků měření .....	109
<b>7 ZÁVĚR .....</b>	<b>113</b>
<b>SEZNAM LITERATURY .....</b>	<b>115</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN .....</b>	<b>120</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ .....</b>	<b>121</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>126</b>
<b>PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE .....</b>	<b>127</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>129</b>

## 1 ÚVOD

Účelem kapitoly je vysvětlit motivaci k řešení této práce a představit její cíle. Tato kapitola uvede čtenáře do problematiky, vysvětlí, co bude autor na dalších stránkách řešit a představí předběžné cíle práce, tak jak byly stanoveny na začátku výzkumu. Na závěr kapitoly je uveden očekávaný přínos práce.

### 1.1 Motivace

Rožměrné výkovky rotačního tvaru jsou výchozími polotovary, které slouží k výrobě komponent zejména pro lodní, jaderný nebo petrochemický průmysl. Polotovary se kovají při teplotě 850 až 1300 °C v otevřené formě pomocí hydraulických lisů s tlakem, který odpovídá až 10 000 tunám. Po kování obvykle probíhá kontrola tvaru a rozměrů. V případě výkovků rotačně symetrického tvaru jsou nároky kladeny zejména na válcovitost a přímou osu. Součástí výrobního procesu bývá často proces rovnání pomocí tříbodového ohybu na hydraulickém lisu.

Tato práce se zabývá návrhem metodiky měření přímosti osy těchto polotovarů. Měření musí být prováděno přímo po kovacím procesu na výkovicích v zahřátém stavu, z důvodu eliminace opakovaného ohřevu pro následovné rovnání. Podnět k řešení tohoto tématu vychází z reálných problémů, které řeší v současné době např. společnost Žďas a.s (projekt MPO<sup>1</sup>). Nicméně problematiku bezdotykového měření polotovarů s vysokou teplotou je možné generalizovat na celý ocelářský průmysl. Důvody nutnosti a potřeby řešení této problematiky v daném čase jsou zmíněny v následujících bodech:

- Důsledkem rostoucích nároků na efektivitu výroby jsou také vyšší nároky na tvarovou a rozměrovou přesnost produkovaných polotovarů. Z toho vyplývají požadavky na přesné, rychlé a bezpečné měření tvaru a rozměrů.
- Dosud se běžně řeší měření rozměrných výkovků s vysokou teplotou pomocí etalonů či velkých posuvných měřidel ručně nebo dokonce na základě vizuální kontroly zkušeného zaměstnance (viz Žďas). Obsluha se tak musí pohybovat v blízkosti žhavého výkovku, což může být příčinou úrazů. Navíc jsou získány pouze neúplná a nepřesná data. Dotykové měření výkovků neposkytuje dostatečnou flexibilitu, přesnost ani rychlost měření.
- Běžné bezdotykové optické měřicí systémy, nejsou pro účel měření výkovků aplikovatelné, zejména z důvodu vysoké teploty a velkých rozměrů.
- Publikace v kapitole 2.3 dokazují, že problematika měření rozměrných polotovarů s vysokou teplotou je aktuální. Na základě provedené rešerše bylo zjištěno, že výzkum a vývoj se ubírá několika směry, z nichž každý má kromě předností, také své nedostatky.
- V současné době existuje několik komerčních měřicích systémů, jejichž cena se pohybuje v řádech milionů korun. Tyto systémy jsou založeny na metodě aktivní fotogrammetrie s laserovým skenováním. Systémy založené na dalších optických metodách nebyly dosud komercializovány, nicméně z průzkumu odborných publikací je zřejmé, že jejich výzkum a vývoj je rovněž aktivní.

---

<sup>1</sup> Projekt FR-TI1/183 - Technologie automatického rovnání tyčí velkého průměru. (2009-2011, MPO/FR) - <http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=FR-TI1%2F183>.

## 1.2 Předběžné cíle práce

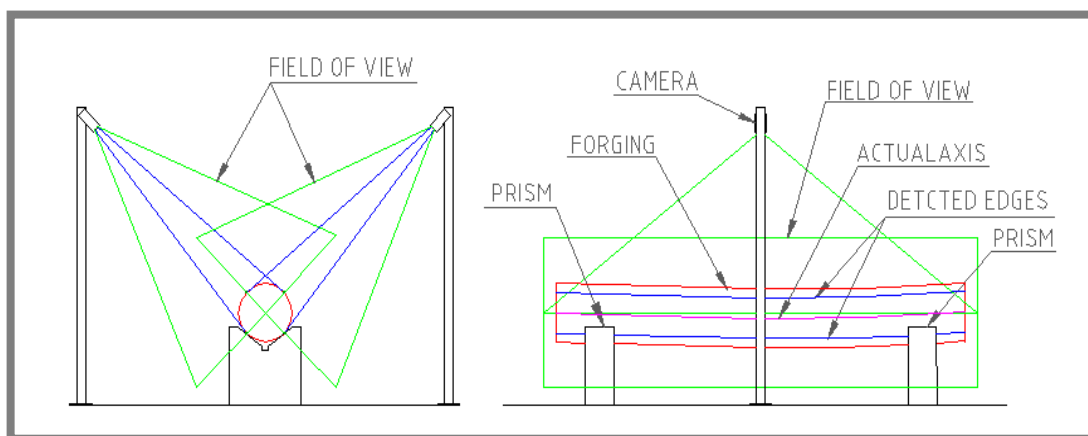
Cílem práce je navrhnout vlastní metodiku měření přímosti osy rotačních výkovků na základě podmínek, které vyplývají z reálného využití v průmyslové praxi. Navržená metodika by měla poskytnout potřebné informace o ose výkovku pro rovnací linku, která zajistí jeho rovnání pomocí tříbodového lisu. Sestavení aparatury a softwaru umožní experimentálně ověřit funkčnost navržené metodiky a zhodnotit její aplikovatelnost v reálných podmínkách.

Hlavní cíle tohoto výzkumu lze shrnout v těchto bodech:

- Navrhnout metodiku měření na základě předem stanovených podmínek
- Navrhnout prostředí a podmínky pro testování a ladění metodiky
- Vytvořit software, který umožní ověření funkčnosti celé metodiky
- Navrhnout způsob hodnocení výsledků měření
- Popsat hlavní vlivy na dosaženou přesnost a porovnat výsledky měření vzorku pokojové a vysoké teploty
- Zhodnotit aplikovatelnost navrženého systému v reálných podmínkách

## 1.3 Přístup

První fáze práce je zaměřena na průzkum možných přístupů k řešení tohoto problému. Na základě provedené rešerše byl navržen vlastní přístup, založený na metodě vícesnímkové pasivní fotogrammetrie. Přístup vychází z předpokladu, že skutečný tvar osy válcových výkovků je možné určit (v nejjednodušším případě) pomocí minimálně čtyř hraničních křivek, které leží ve dvou vzájemně kolmých rovinách (viz obr. 1-1). Dvě hraniční křivky výkovku budou získány ze snímků pomocí vhodné metody detekce hran. Tato základní myšlenka bude zakomponována do komplexní metodiky měření.



Obr. 1-1: Konfigurace fotogrammetrického systému se dvěma kamerami [65].

Při návrhu celého systému je třeba zajistit přesně vymezené a kontrolované podmínky s vyloučením intervenujících proměnných. Z toho důvodu bude probíhat návrh a testování v laboratorních podmínkách na vzorcích malých rozměrů. Výsledky řešení budou v závěru práce zhodnoceny z hlediska užítosti pro reálné



podmínky stanovené společností Žďas a.s. Přístup k řešení práce je možné logicky rozdělit na dvě hlavní části, jejich řešení však probíhá souběžně:

- ***Návrh a optimalizace metody kalibrace, detekce hran, vyhodnocování dat a zavedení těchto metod do softwaru.***

Při návrhu dílčích metod jsou uvažovány reálné podmínky a nároky na rychlost a požadovanou přesnost měření, současně musí být systém funkční pro laboratorní testy s dostupným vybavením.

- ***Experimentální měření pro ověření přesnosti systému a jeho optimalizaci z hlediska stanovených cílů.***

Pro experimentální měření a testování funkčnosti bude postaven stend, který bude umožňovat ustavení kamer dle konfigurace navržené v této práci. Pro porovnání přesnosti měření bude využit profesionální průmyslový 3D skener.

## **1.4 Přínos práce**

---

**1.4**

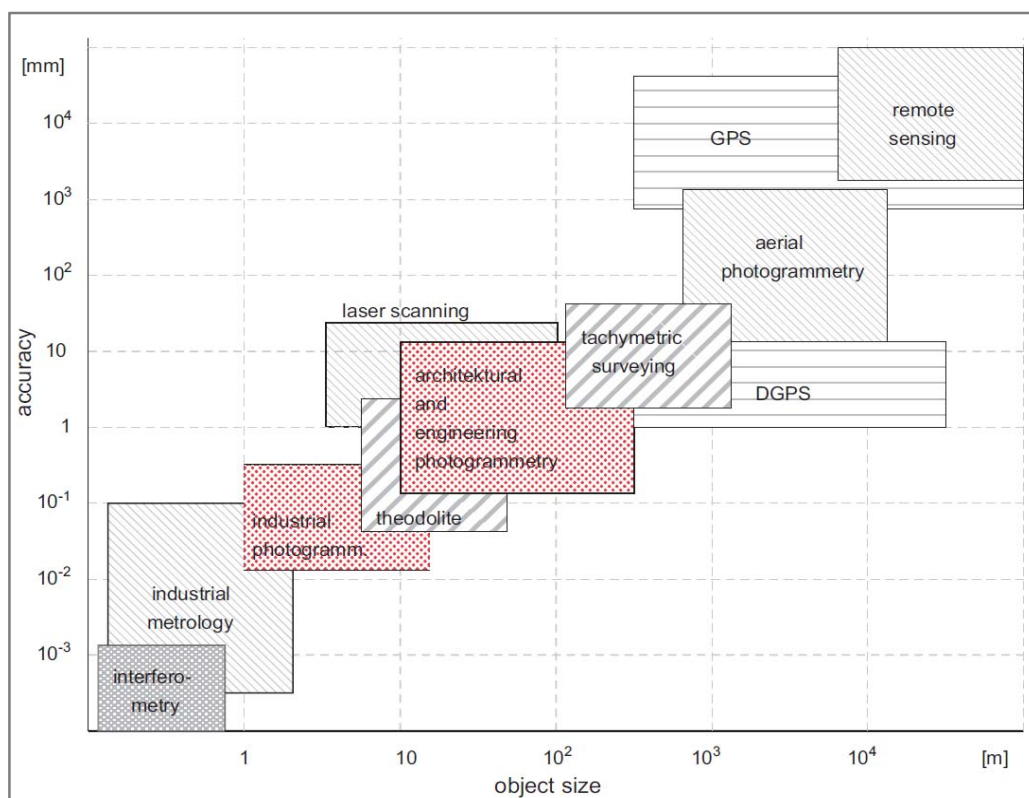
Disertační práce by měla přinést nový způsob řešení problematiky měření rotačních výkovků. Výhodou navrženého způsobu měření by měla být zásadně nižší cena při porovnání se systémy založenými na jiných principech. Práce by měla ověřit, zda navržený přístup může splňovat nároky na přesnost a rychlost měření, která je skutečně požadovaná pro průmyslové měření. Současně by měla poukázat na možnosti další optimalizace a vývoje metodiky, které by měly vést k sestavení profesionálního měřicího systému určeného pro tuto vysoce specifickou aplikaci.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Přehled současného stavu poznání je v práci rozdělen do několika částí. První kapitola uvede čtenáře do obecné problematiky měření tvaru objektů pomocí optických metod. Druhá kapitola blíže objasňuje rozdělení fotogrammetrických metod měření a vymezuje základní pojmy. Třetí kapitola shrnuje literární prameny z oblasti měření tvaru rotačních polotovarů za tepla. Následující kapitoly seznámí čtenáře se základními matematickými principy z oblasti průmyslové fotogrammetrie, s metodami kalibrace kamer a metodami zpracování obrazu.

### 2.1 Optické metody měření tvaru objektů

Základním prvkem fotogrammetrických systémů je obrazový snímač. Vývoj CCD<sup>2</sup> čipu, společně se zdokonalováním počítačů, elektro-optických komponent, laseru a dalších optických zdrojů umožnil úspěšné zavedení optických metod měření a vyhodnocování v mnoha vědních oborech.



Obr. 2-1: Vztah mezi dosahovanou přesností měření a velikostí měřeného objektu u různých bezdotykových měřících metod [2]<sup>3</sup>.

<sup>2</sup>CCD (charge-coupled device) - snímač obrazové informace

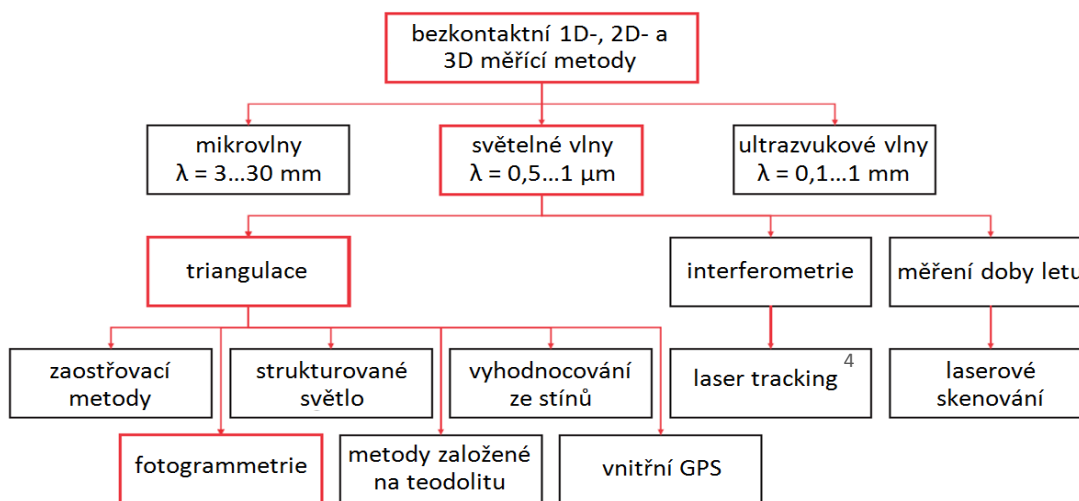
<sup>3</sup>Interferometry – interferometrie; industrial metrology – průmyslová metrologie; industrial photogrammetry – průmyslová fotogrammetrie; theodolite – teodolit; laser scanning – laserové skenování; architectural and engineering photogrammetry – fotogrammetrie aplikovaná na architektonické památky a na speciální technické oblasti v inženýrské geodesii); tachymetric surveying – tachymetrický průzkum (rychlé měření délek a vodorovných a svislých úhlů); DGPS (differential global positioning system) - diferenciální GPS; aerial photogrammetry – letecká fotogrammetrie; remote sensing - dálkový průzkum Země.

Optické metody měření mají z hlediska rozmanitosti aplikací interdisciplinární charakter. Jsou úzce spojeny s metodami počítačového zpracování obrazu, počítačovou grafikou, s metodami CAD<sup>4</sup>, ale také se základními vědami jako je matematika, fyzika a informatika. V posledních patnácti letech došlo ke značnému pokroku ve vývoji technologií měření tvaru prostorových objektů a to zejména díky sjednocení poznatků z oblastí počítačového vidění a počítačové grafiky. V současné době existuje široká škála metod měření tvaru objektů (obr. 2-1). Liší se kromě principu funkce, zejména dosahovanou přesností a pracovní vzdáleností, z čehož vyplývá také oblast jejich aplikace [1, 2].

Metody trojrozměrné digitalizace se často rozdělují na aktivní a pasivní. Označení aktivní se používá pro systémy, které pracují na principu interakce mezi objektem či jeho okolím a nějakým snímačem. Ta může nastat:

- fyzickým kontaktem mezi snímačem a objektem (kontaktní 3D skenery),
- emisí světla (strukturovaného nebo bílého) a následným snímáním světelné stopy vzniklé na objektu optickým systémem,
- emisí elektromagnetické vlny [3].

Jsou-li metody označovány jako „optické bezkontaktní“ znamená to, že pracují pouze s elektromagnetickým zářením. Obrázek 2-2 ukazuje rozdělení metod podle vlnové délky, která je snímačem vyhodnocována [2].

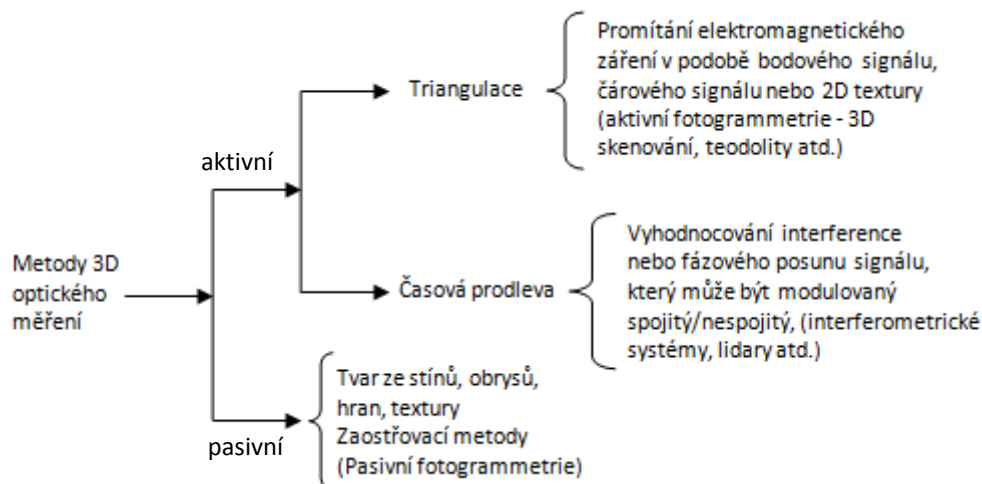


Obr. 2-2: Rozdělení bezkontaktních optických metod měření dle vyhodnocované vlnové délky<sup>5</sup> [2].

Často se uvádí rozdělení podle principu získávání třetího rozměru (tj. vzdálenosti měřeného bodu od obrazové roviny snímače). Třetí rozměr může být vyhodnocen pomocí triangulace nebo některou z metod měření časové prodlevy [2] (viz obr. 2-3).

<sup>4</sup> CAD (Computer aided design) – počítačem podporované navrhování

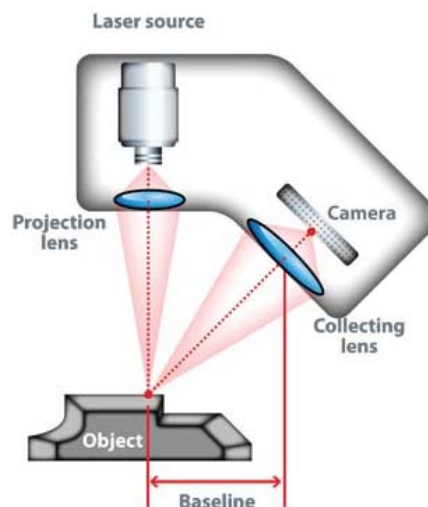
<sup>5</sup> Laser tracking – metoda optického měření, založená na interferometrickém měření časové odezvy laserového signálu



Obr. 2-3: Bezkontaktní metody měření tvaru objektů založené na obrazových snímačích, podle [3].

### • *Triangulace*

Výpočet vzdálenosti metodou triangulace vyžaduje znalost tří bodů v prostoru, které tvoří pomyslný trojúhelník. Jeden z bodů trojúhelníku je vždy měřeným bodem, jehož vzdálenost od obrazové roviny snímače hledáme. Další dva body mohou být tvořeny buď průmětem tohoto bodu do dvou obrazových rovin, nebo průmětem bodu do jedné obrazové roviny a zdrojem světla (projektorem). Pokud je uvažován světelný zdroj, metoda je označována jako aktivní triangulace [4, 5].

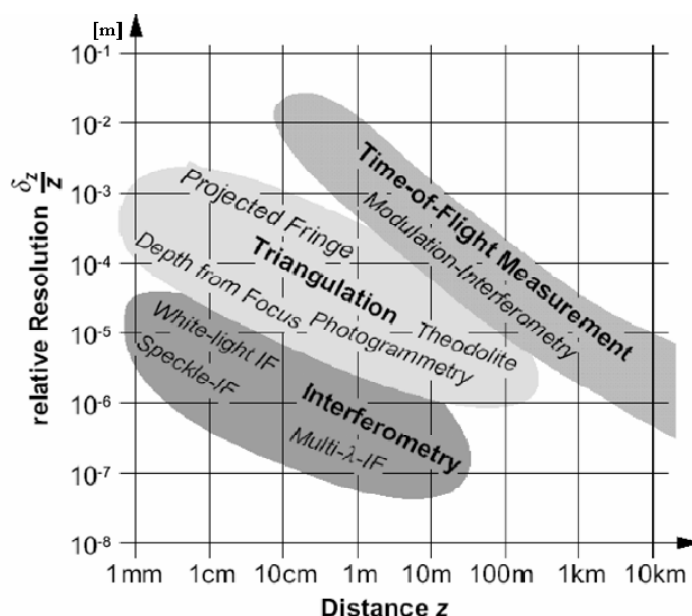


Obr. 2-4: Aktivní triangulace [4].

V případě pasivní triangulace musí být měřeným bodem výrazný bod ve scéně, který je možné ve snímku rozpoznat a lokalizovat bez přidaného osvětlení (viz kapitola 2.6). Triangulační trojúhelník potom tvoří měřený bod ve scéně a jeho průměty do dvou obrazových rovin; ty mohou být reprezentovány buď jednou nebo dvěma kamerami ve dvou různých pozicích. Metodu triangulace využívají různé typy aktivních (teodolity, 3D skenery atd.) i pasivních (zaostřovací metody, metody vyhodnocování ze stínů, průmyslová fotogrammetrie atd.) fotogrammetrických měřicích systémů [4, 5].

- **Měření časové prodlevy**

Existuje mnoho rozličných bezdotykových metod měření, které jsou založeny na vyhodnocování časové prodlevy. Metody je možné rozdělit podle toho, jakou veličinu vyhodnocují a podle typu použitého signálu. V případě nespojitých metod je analyzována časová prodleva, která uplyne mezi vysláním pulzního signálu a jeho návratem zpět k detektoru. Spojité metody vyhodnocují fázový posun spojitě modulované vlny. Široká škála měřicích metod je založená na principu interference. Ačkoliv je možné pomocí interferometrie za ideálních podmínek měřit absolutní vzdálenost přes několik desítek metrů s rozlišením v nanometrech (laser tracking), používá se především pro velmi přesná měření na krátké vzdálenosti (holografická interferometrie, skvrnová interferometrie, interferometrie s bílým světlem atd.) [5]. Skenovací systémy založené na měření časové odezvy se nazývají LIDARy (LaserDetection And Ranging). Jedná se v podstatě o dálkoměry, které pracují s laserovým modulovaným signálem. Schopnost skenování pomocí LIDARu potom zajišťuje přesné a plynulé natáčení skenovací hlavy, která vysílá signál. Systémy založené na modulaci signálu získaly označení TOF (time of flight). Nevýhodou TOF systémů je jejich vysoká cena vyplývající z nutnosti vysoce přesného měření signálu v čase. Jsou určeny pro vyšší pracovní vzdálenost, jejich přesnost je nižší než v případě systémů založených na triangulaci. Nejčastější využití lidarů je v oblasti dálkového průzkumu a mapování Země [5].



Obr. 2-5: Dosahované rozlišení a pracovní vzdálenost hlavních metod vyhodnocování třetího rozměru<sup>6</sup>[6].

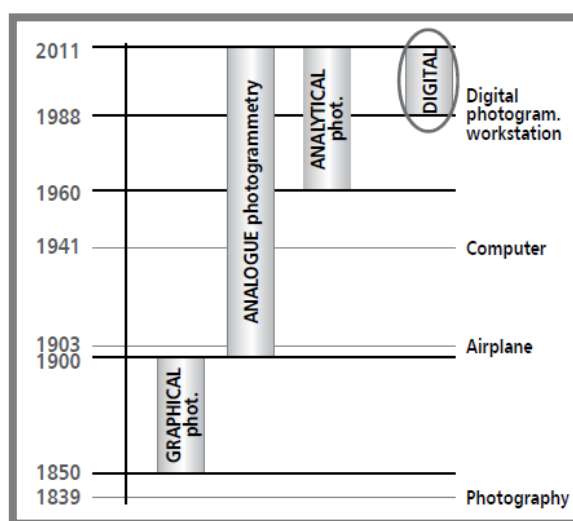
Přehled optických metod používaných pro měření prostorových objektů publikoval v roce 2000 Chen at al. [7].

<sup>6</sup> Time-of-flight (TOF) - měření doby letu vysílaného impulzu; triangulation – triangulace; interferometry – interferometre.

## 2.2 Fotogrammetrie – základní pojmy, rozdělení a aplikace

Fotogrammetrie je metoda optického měření, která je založena na zpracování a vyhodnocování informací z fotografických snímků. Americká fotogrammetrická společnost (ASPRS) definovala v roce 1980 pojem: „*Fotogrammetrie je umění, věda a technika, která se zabývá získáváním informací o fyzických objektech a prostředí na základě procesu zaznamenávání, měření a interpretace fotografických snímků, vzorů elektromagnetického záření a dalších jevů*“ [8].

Vzhledem ke svému dlouhému vývoji se stala fotogrammetrie rozsáhlým souborem měřicích metod s širokou škálou aplikací. Pro průmyslové měření, kterým se zabývá tato práce, se zpravidla využívá digitální blízká fotogrammetrie<sup>7</sup>. Dále je třeba specifikovat fotogrammetrickou metodu z hlediska provedení, počtu použitých snímků atd. Účelem této kapitoly je objasnit možné přístupy k fotogrammetrickému měření, vymezit pojmy a objasnit rozdíly mezi aktivní a pasivní fotogrammetrií.



Obr. 2-6: Historický vývoj fotogrammetrie [2].

### 2.2.1 Rozdělení dle použití zdroje světla – pasivní a aktivní fotogrammetrie

Pasivní fotogrammetrie byla známá přibližně o 150 let dříve než fotogrammetrie aktivní. V roce 1851 vydal francouzský důstojník, zeměměřič, kartograf, vědec a fotograf Aimé Laussedat svou teoretickou práci *Métrophotographie* a v roce 1861 jako první použil fotografie Země k výrobě topografických map. Pasivní fotogrammetrie využívá k měření pouze fotografické snímky bez jakékoli přidaného zdroje světla. Odpovídající si pixely ve snímcích jsou nalezeny na základě výrazných entit ve scéně – ty mohou být jak přirozené nebo cíleně rozmístěné v měřeném prostoru (viz kap. 2.6.1) [9, 10, 11].

Aktivní fotogrammetrie se začala v průmyslu využívat až koncem 20. století, což souviselo s rozvojem digitální fotografie a výpočetní techniky. Interakce mezi optickým snímačem a měřeným objektem je zajištěna pomocí uměle vytvořené

<sup>7</sup> Za blízkou fotogrammetrií je považováno měření objektu ze vzdálenosti  $h < \text{cca } 300\text{m}$  (např. v případě letecké fotogrammetrie platí  $h > \text{cca } 300\text{ m}$ , satelitní  $h > \text{cca } 200\text{ km}$  atd). Digitální fotogrammetrie využívá výhradně digitální snímky a zpracování pomocí počítače.

elektromagnetické vlny. Světelný zdroj promítaný na povrch objektu slouží identifikaci odpovídajících si (homologických) pixelů v jednotlivých snímcích. Při použití dvourozměrného světelného vzoru umožňuje tento princip měřit současně pixely v celé ploše. Aktivní fotogrammetrické systémy získaly označení 3D skenery. Podle doslovné citace (1997): „3D skener je zařízení, které analyzuje reálné objekty nebo prostředí za účelem sběru dat o jejich tvaru, případně i vzhledu (např. barvě). Data mohou být využita k vytvoření digitálních trojrozměrných modelů“ [1]. Nejčastěji se bezdotykové 3D skenery dělí podle použitého zdroje záření. V průmyslu jsou nejčastěji zastoupeny laserové 3D skenery (laser scanner) a optické 3D skenery (optical 3D scanner, structured-light 3D scanner, fringe projection scanner) [9, 10, 11].

### 2.2.2 Rozdělení dle počtu snímků

Dle počtu snímků se dělí fotogrammetrie na jednosnímkovou, vícesnímkovou a stereofotogrammetrii. Trojrozměrná rekonstrukce z jediného snímku je možná pouze v případě, že jsou známé informace o geometrii měřeného objektu. Dosahovaná přesnost měření je při této konfiguraci závislá primárně na měřítku zobrazení [11].

Rekonstrukce z více snímků zpravidla využívá algoritmy pro vícesnímkovou triangulaci, např. algoritmus „Bundle adjustment“ (viz kapitola 2.5). Na základě použitého matematického algoritmu je určen minimální počet snímků a referenčních bodů potřebných pro automatický výpočet polohy fotoaparátu. V oblasti blízké fotogrammetrie je vícesnímková konfigurace nejobvyklejší. Výhodou je možnost pořídit prakticky neomezený počet snímků z libovolných pozic a směrů což zajišťuje vyšší přesnost [11].

Stereo konfigurace je typická pro 3D optické skenery. Tuto konfiguraci je možné dále rozdělit dle uspořádání optických os: na standardní uspořádání – optické osy jsou paralelní nebo téměř paralelní a obrazové roviny jsou kolineární; konvergentní uspořádání – optické osy konvergují; posunuté uspořádání – optické osy jsou paralelní nebo téměř paralelní a obrazové roviny nejsou kolineární [11].

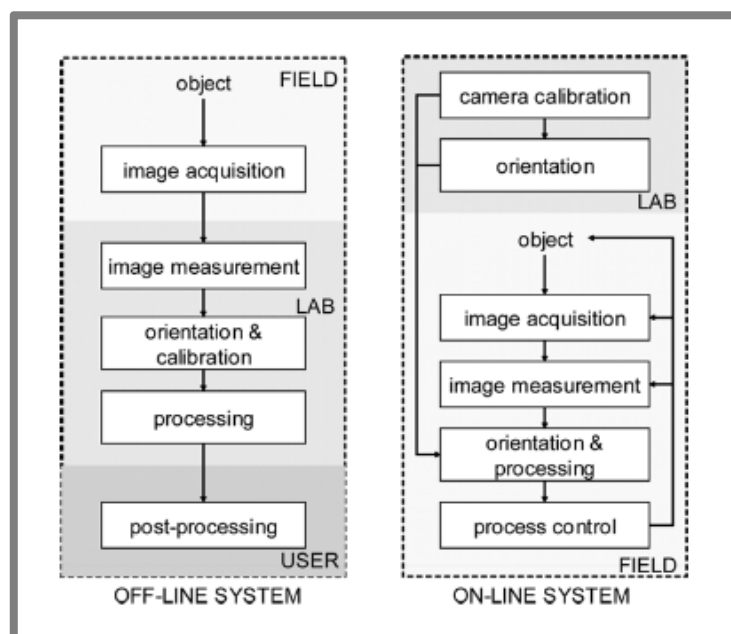
### 2.2.3 Rozdělení dle posloupnosti kalibrace, orientace a měření

Fotogrammetrické systémy je možné rozdělit na off-line nebo on-line. Off-line systémy se vyznačují tím, že nejdříve probíhá snímkování pomocí minimálně dvou snímků, při použití jednoho nebo více fotoaparátů. Následuje fáze orientace z celé sady snímků. K orientaci a vyhodnocení 3D souřadnic hledaných bodů nejčastěji využívá samokalibraci (viz kap. 2.6). Zmíněné kroky mohou probíhat v různý čas případně i na různých místech. Off-line systémy jsou určeny pro univerzální měření mnoha různých průmyslových aplikací. Jejich univerzalita spočívá zejména v tom, že nejsou omezeny danou konfigurací kamer – jejich polohou a počtem, volbou objektivů. Na rozdíl od on-line systémů mohou být použity také analogové fotoaparáty a klasické fotografie. Obecně dosahují off-line systémy vyšší přesnosti než systémy online (podle [9] okolo 0,05 mm) [9, 10, 11].

On-line fotogrammetrie umožňuje průběžné měření 3D souřadnic na objektu podobně jako souřadnicové měřicí stroje (CMM). On-line systém se obvykle skládá alespoň ze dvou synchronizovaných kalibrovaných kamer s předem známou polohou a orientací vzhledem ke stanovenému souřadnému systému. Často se tato konfigurace využívá pro sledování polohy dotykové sondy. Zásadním rozdílem

oproti off-line fotogrammetrii je tedy schopnost měření a vyhodnocení v reálném čase. Přesnost on-line systémů bývá obvykle nižší než přesnost off-line systémů, neboť jsou omezeny počtem snímků [9, 10, 11].

Speciálním typem on-line systému jsou *Stacionární vicesnímkové systémy určené pro kontrolu kvality* [11]. Tyto systémy bývají součástí výrobní linky, kde slouží ke kontrole kvality. Jsou vybaveny několika kamerami nebo fotoaparáty s neměnnou polohou. Z toho vyplývá omezený měřicí prostor. Na druhou stranu mohou být tyto systémy přizpůsobeny pro konkrétní úlohy měření, což umožňuje určitý stupeň automatizace. Fotoaparáty zůstávají v daných podmínkách kalibrované delší časové období. Kalibrace může probíhat automaticky pomocí pevného a předem známého kalibračního pole. Tyto systémy umožňují rychlé měření v aktuálním čase, za kterým následuje analýza požadovaných parametrů a přenos výsledků přímo pro kontrolu zařízení ve výrobní lince [11].



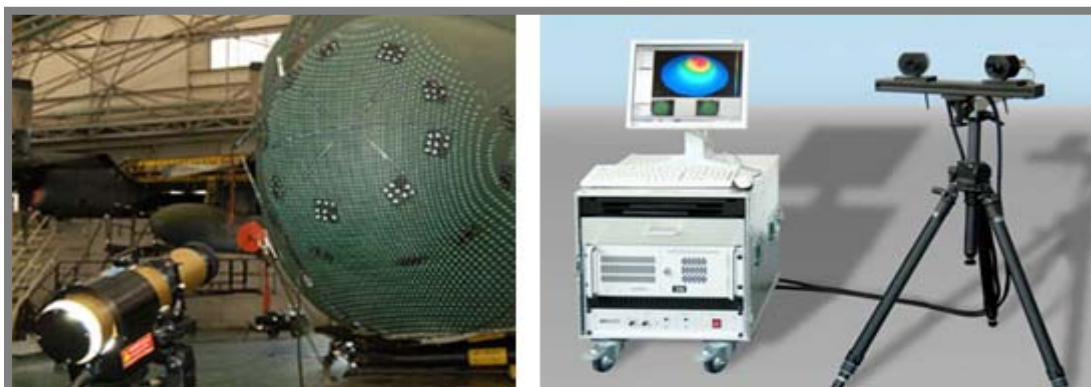
Obr. 2-7: Proces on-line a off-line fotogrammetrického měření v průmyslu [9].

#### 2.2.4 Aplikace fotogrammetrie v průmyslu

Nejběžnější aplikací aktivní průmyslové fotogrammetrie je *měření ploch*, tedy měření tvaru objektu ve 3D. V současné době umožňují 3D skenery získat kompletní informace o povrchu trojrozměrného objektu ve formě mračna bodů s přesností na desetiny až setiny milimetrů. Rozsah měřených objektů je od několika centimetrů až metrů dle typu zařízení. Omezení těchto metod jsou především dána pracovním prostředím a typem měřeného objektu. Další aplikací aktivní fotogrammetrie je *měření dynamické scény* – například měření deformací při trhacích zkouškách. Kamera sleduje specifickou texturu na povrchu deformovaného objektu a hodnotí posun jednotlivých pixelů (systém Pontos od společnosti GOM) [9, 10, 11].

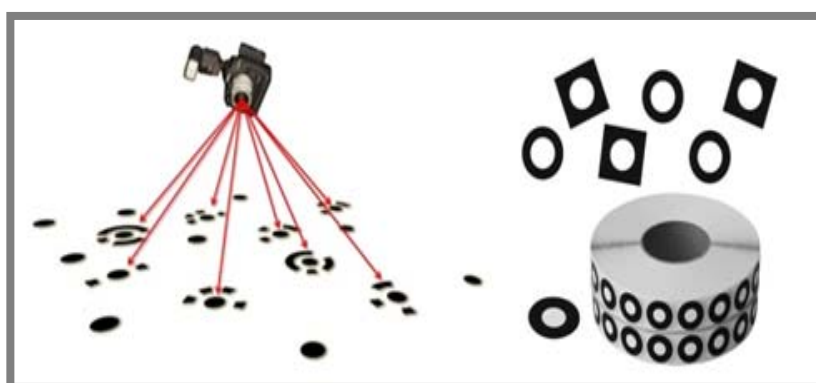
V oblasti pasivní fotogrammetrie je v průmyslu patrně nejběžnější aplikací *přesná lokalizace a digitalizace diskrétních bodů*, tzn. změření polohy bodů předem aplikovaných na objekt. Jedná se nejčastěji o off-line systémy využívající jeden fotoaparát s vysokým rozlišením, referenční značky a algoritmus „bundle adjustment“ (viz kap. 2.5) [11].





Obr. 2-8: Vlevo: projekce vzoru a fotogrammetrické měření systémem PRO-SPOT [12], vpravo: fotogrammetrický systém určený k měření deformací od firmy GOM [13].

Principy digitalizace diskretních bodů pomocí off-line systému jsou popsány v článku [14]. Další aplikací pasivní fotogrammetrie je *sledování pozice a orientace dotykové sondy*. Měření pomocí dotykové sondy se provádí ručním nebo strojním polohováním. Systémy se strojním polohováním se nazývají 3D souřadnicové měřicí stroje („coordinate measurement machine“ - CMM). Tyto systémy se dále dělí na analogové a diskretní. Diskretní CMM měří jednotlivé body na povrchu objektu postupně přemisťováním sondy, přičemž je měřena poloha sondy mechanicky. Analogové CMM měří tvar objektu v celé ploše - sonda plynule kopíruje celý měřený povrch. Pohyb sondy je v tomto případě, stejně jako v případě ručního polohování sondou, snímán optickým systémem. Ten nepřetržitě zaměřuje orientaci a polohu hrotu sondy pomocí značek, které jsou umístěny na jejím těle. Fotogrammetrický systém může být složen pouze z jednoho optického snímače, ale i ze dvou nebo více snímačů. Obvykle platí, že čím více snímačů sleduje pohyb sondy, tím přesnější výsledky měřicí systém dosahuje [11].



Obr. 2-9: Vlevo: fotogrammetrické měření pomocí tzv. kódovaných a nekódovaných značek, vpravo: příklad nekódovaných fotogrammetrických značek [13].

Pasivní fotogrammetrie se využívá také při *měření kvazistatických deformací*, tj. deformací mezi jednotlivými zátěžnými stavy. Častými aplikacemi jsou např. měření deformací karoserie při „crash testech“ nebo při měření funkce airbagů při nárazu [9]. Nevětšími prodejci průmyslových fotogrammetrických systémů jsou firmy GOM [13], Reinshaw [15], Metronor [16], AICON [17] nebo Nikon Metrology [18].

## 2.3 Metody měření tvaru výkovků s vysokou teplotou

Následující kapitola shrnuje literární prameny týkající se vývoje a výzkumu metod a měřicích systémů, které jsou určeny pro specifické podmínky měření rozměrných polotovarů s vysokou teplotou. První kapitola zmiňuje vývoj automatizovaných dotykových měřicích systémů. Další tři kapitoly jsou zaměřeny na metody bezdotykového měření a jsou rozděleny dle principu měření: na aktivní fotogrammetrii a vyhodnocování vzdálenosti pomocí TOF; aktivní fotogrammetrii a vyhodnocování vzdálenosti pomocí aktivní triangulace; pasivní fotogrammetrii a vyhodnocování vzdálenosti pomocí pasivní triangulace. Poslední kapitola se zabývá vlivem tepelné emise na přesnost optických měřicích systémů.

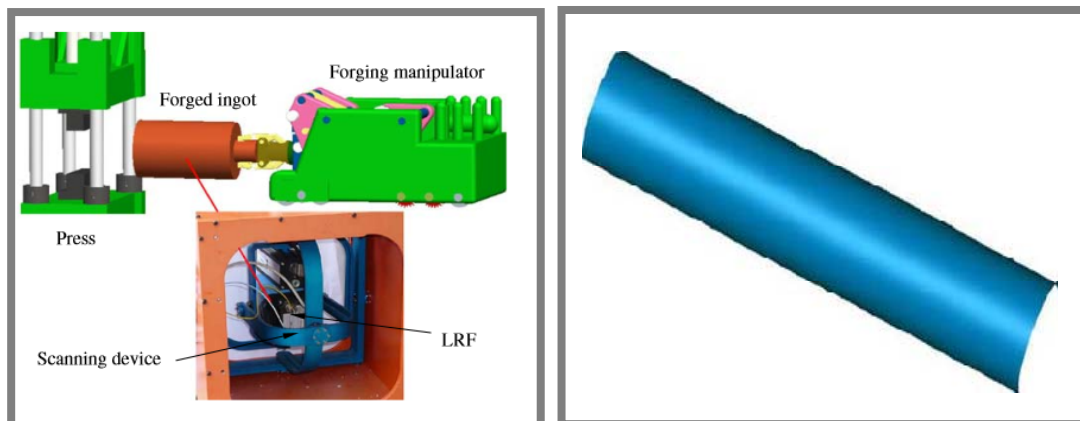
### 2.3.1 Dotykové měření

I přesto že v současné době existuje široká škála bezdotykových skenovacích systémů, měření tvaru rozměrných výkovků s vysokou teplotou se stále provádí nejčastěji ručně pomocí jednoduchých přípravků. Běžné bezdotykové optické měřicí systémy nejsou v případě měření výkovků aplikovatelné zejména z důvodu vysoké teploty a velkých rozměrů. Ruční měření je pomalé, obsluha se musí pohybovat v blízkosti žhavého výkovku, což může být příčinou úrazů. Navíc jsou získány pouze neúplná a nepřesná data. Kromě ručních dotykových měřidel bylo také vyvíjeno několik automatizovaných dotykových měřicích systémů. Již v roce 1986 Siemer [19] popsal ve svém článku dotykový systém, který byl závislý na otáčivém pohybu výkovku při kování. Systém vykazoval dobré výsledky v laboratorních podmínkách, nicméně byl špatně implementovatelný do průmyslové výroby. Nye at al. [20] v roce 2001 publikoval studii, která popisuje specifický dotykový měřicí systém, který byl zabudován do manipulátoru. Systém však nebyl flexibilní a neumožňoval získat komplexní rozměry výkovku.

### 2.3.2 Bezdotykové měření založené na aktivní fotogrammetrii a TOF

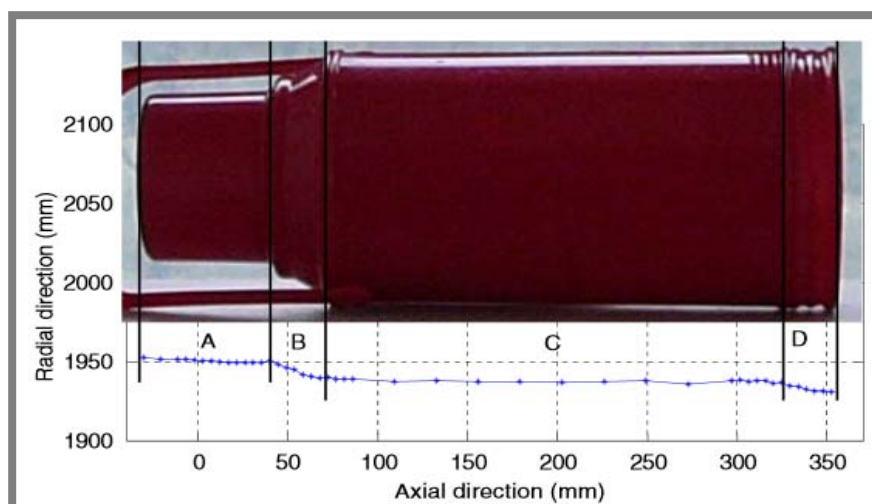
- **Zhisong Tian, Feng Ga, Zhenlin Jin, Xianchao Zhao 2009 - Dimension measurement of hot large forgings with a novel time-of-flight system [21].**

Tento článek navazuje na studii publikovanou v roce 1993: *Profiling of hot surfaces by pulsed time-of-flight laser range finder techniques*. Kari Määtta, Juha Kostamovaara, and Risto Myllylä [22]. Popsaný systém se skládá z vyhodnocovací stanice TOF, skenovacího zařízení se dvěma stupni volnosti a sféricko-parallelního mechanismu se dvěma motory, který může být také považován za dva teodolity. Systém je určen k vyhodnocování průměru a délky rozměrných výkovků při maximální teplotě 1600 °C ze vzdálenosti 20 m (viz obr. 2-10). Systém umožňuje komplexní skenování části povrchu ve viditelném směru (viz obr. 2-10 vpravo). Nicméně digitalizace celého povrchu vyžaduje zpracování velkého množství dat a měření je pomalé. Proto byl systém upraven tak, aby absolvoval pouze několik cyklů přes geometrii výkovku a vyhodnocoval tak pouze délku a průměr. Tím se zásadně snížila doba měření i zpracování dat. Systém navíc umožňuje nastavení velikosti kroku mezi jednotlivými skenovanými řezy, čímž je ovlivněna rychlost, ale i přesnost měření.



Obr. 2-10: Vlevo: schéma navrženého TOF systému; vpravo: 3D model části povrchu válcového výkovku, jehož délka je 10 m, průměr 2 m, a váha 245 tun [21].

Obrázek 2-11 znázorňuje experimentální měření vakuové lahve, které probíhalo v laboratorních podmínkách. Z tabulky 2-1 je patrné, že přesnost měření je závislá na velikosti kroku. V oblasti C dosahuje odchylka průměru 2.7 mm, odchylka celkové délky je 4,5 mm. Systém byl také testován v továrně při měření ingotů s délkou přes 7 metrů.



Obr. 2-11: Zobrazení výsledku měření vakuové lahve v laboratorních podmínkách [21].

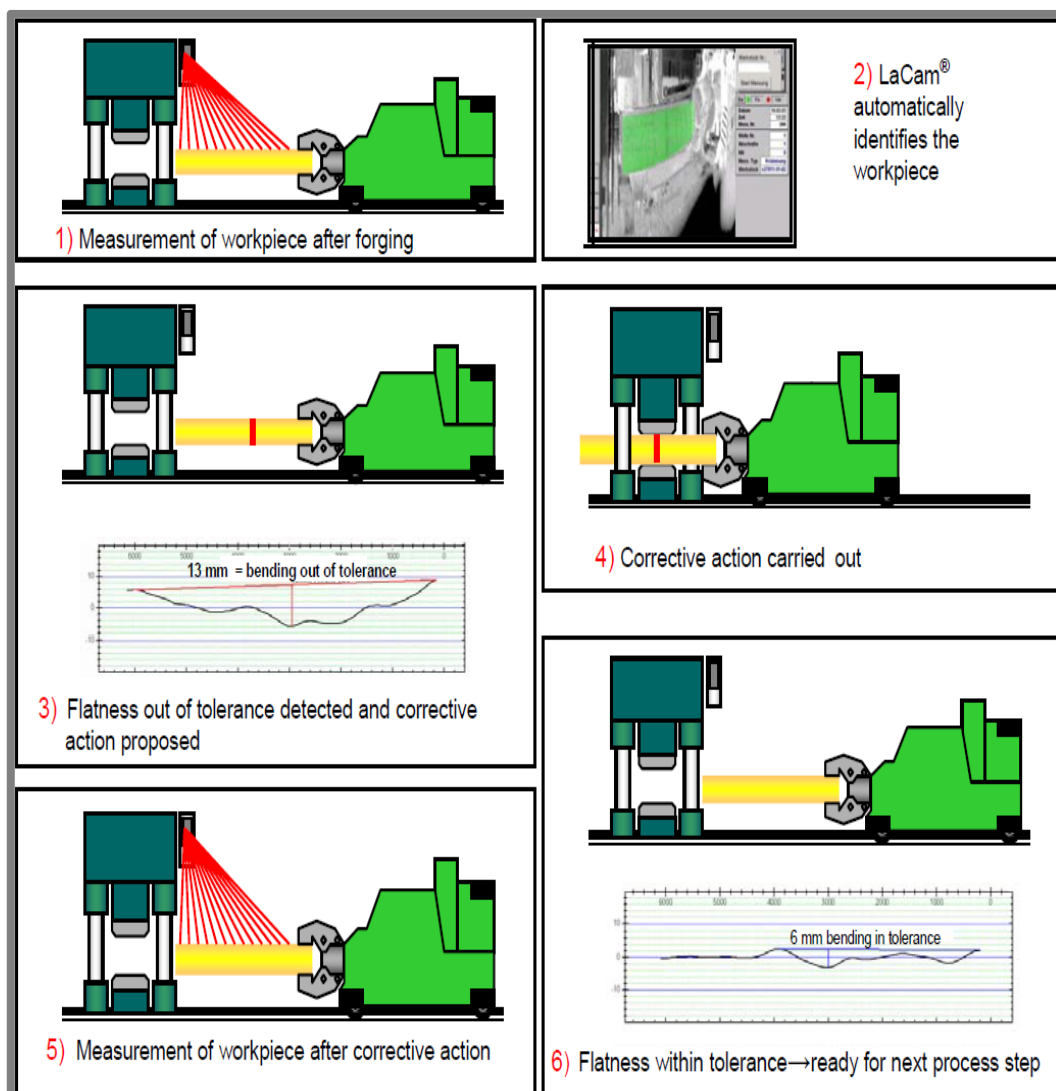
Tabulka 2-1: Porovnání výsledků měření délky a průměru vakuové lahve v laboratorních podmínkách se skutečnými hodnotami [21].

	Segment A	Segment B	Segment C	Segment D	Celkem
Změřený průměr	50.5		74.7		
Skutečný průměr	52		76		
Změřená délka	70.1	32.3	243.4	36.8	382.5
Skutečná délka	70	32	250	35	387

Z článku vyplývá, že systém vykazuje dobrý potenciál pro měření výkovků s vysokou teplotou. Přesnost systému se pohybuje v řádech milimetrů, v článku bohužel není uveden celkový čas měření jednoho dílu.

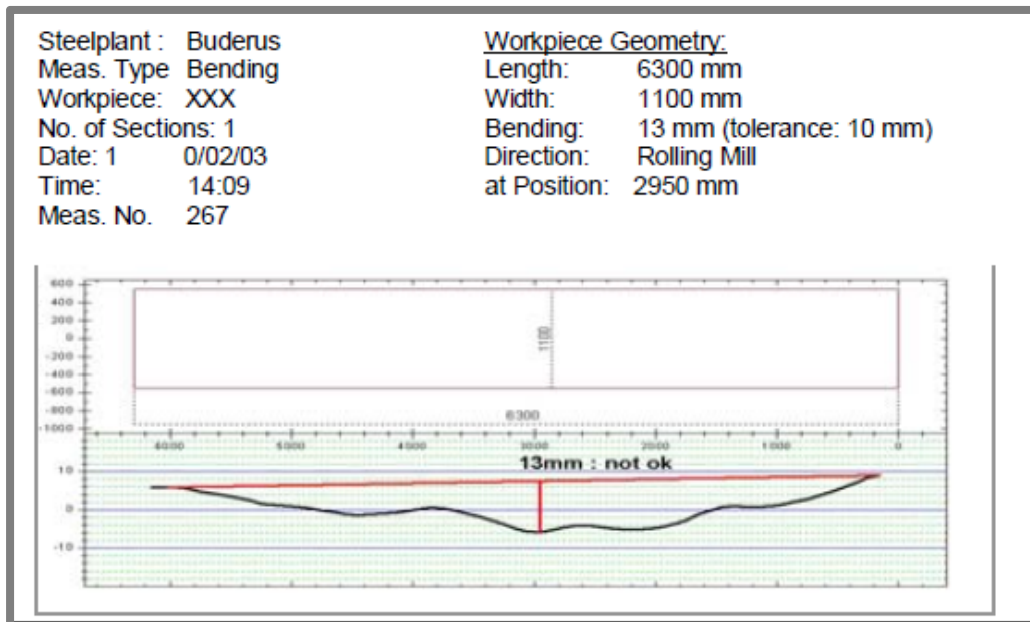
- **LaCam Forge od firmy Ferrotron a Menteq Technologies Inc. [23].**

Společnost Ferrotron a Menteq Technologies vyvinula systém Lacam Forge, který je rovněž založen na principu LIDARU. Tento systém umožňuje měření délky výkovku bez nutnosti přerušení výrobního procesu a díky tomu softwarově optimalizovat proces kování. Po kování je možné zobrazit finální rozměry, přímost osy a válcovitost. Standardní proces kování s využitím měření pomocí LaCamForge systému je zobrazen na obr. 2-12.



Obr. 2-12: Proces optimalizace tvaru výkovku pomocí laserového systému LaCam od firmy Ferrotron [14].

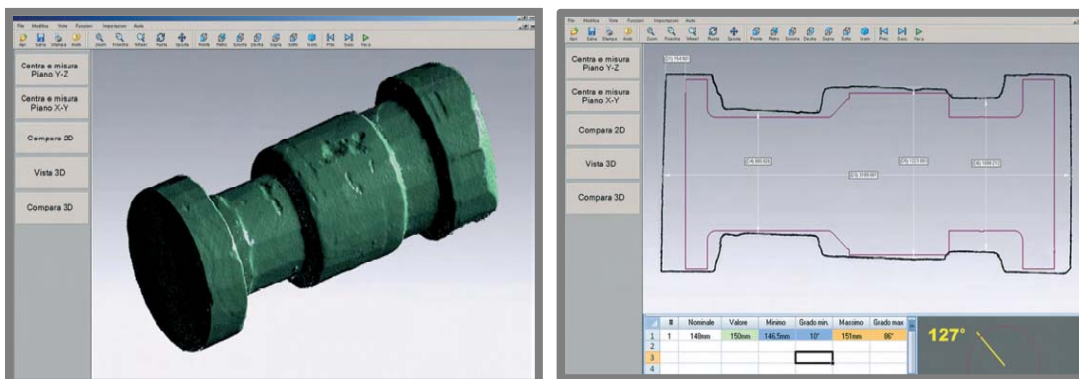
Obr. 2-13 zobrazuje výstupní protokol měření. Z protokolu je patrné, že přesnost měření se pohybuje v řádech milimetrů. Vzhledem k tomu že se jedná o komerční systém, nepodařilo se získat hlubší technické specifiky ani cenu systému.



Obr. 2-13: Protokol z měření pomocí systému LaCam [14].

- **TopScan od firmy Tecnogamma [24].**

System od společnosti Tecnogamma se skládá z laserového projektoru, spektrálně-selektivní videokamery a přijímače. Projektor promítá na povrch výkovku laserové pruhy s různými vlnovými délkami. Odražené paprsky zpět do přijímače jsou následně analyzovány z hlediska fázového posunu. System je určen k měření výkovků o teplotě 350 až 1150 °C a maximálních rozměrech 7 m. Je schopen zaznamenat až 120 000 bodů za sekundu. Umožňuje rekonstrukci komplexní geometrie, měření průměru, délky výkovku, excentricity nebo přímosti osy. Software umožňuje také porovnání naměřených dat s CAD modelem (viz obr. 2-14). Tento system na rozdíl od předchozích dvou využívá promítání kontrastních pruhů a skenuje celý povrch výkovku při jeho otáčení. Otáčení je zajištěno pomocí manipulátoru. V prospektech je uvedena přesnost měření  $\pm 5$  mm při měření délky, ve sférických souřadnicích  $\pm 3$  mm. V článku není uveden celkový čas potřebný na měření výkovku ani cena systému.

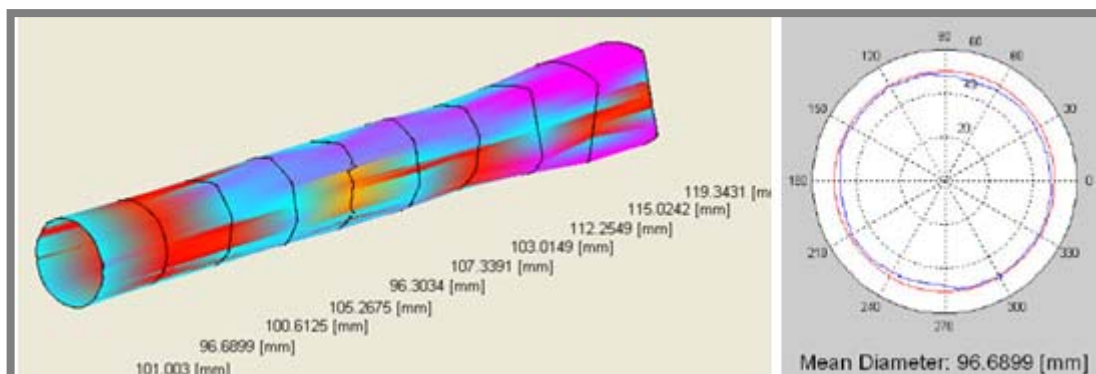


Obr. 2-14: Výstupní data získaná měřením žhavého výkovku laserovým systémem TopScan, který nabízí firma Tecnogamma [15].

### 2.3.3 Bezdotykové měření založené na aktivní fotogrammetrii a triangulaci

- **Laserový systém vyvinutý ve spolupráci firem IMEGO, Mefos a SINTEF [25].**

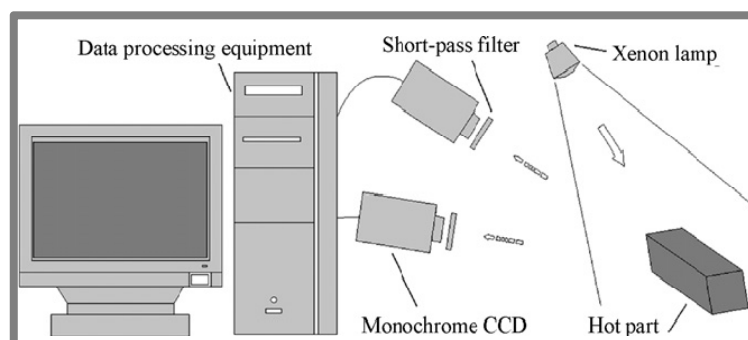
Vývoj toho systému začal již v roce 2005 díky spolupráci tří švédských ocelářenských společností. Systém se skládá z laserového projektoru, a spektrálně-selektivní kamery. Vyhodnocování dat je založeno na metodě aktivní 3D triangulace. Při měření manipulátor otáčí s výkovkem a kamera vytvoří několik překrývajících se snímků s vysokým rozlišením. Snímky slouží k sestavení 3D modelu (viz obr. 2-15). Systém umožňuje měření průměru, délky, křivosti osy a odchylek od požadovaného tvaru. Tento systém je stále ve fázi vývoje, z toho důvodu se nepodařilo získat další informace.



Obr. 2-15: Výsledky měření pomocí systému od firem IMEGO, Mefos a SINTEF. Vlevo: výsledný 3D model výkovku s odchylkami od požadovaného tvaru, vpravo: řez výkovkem [25].

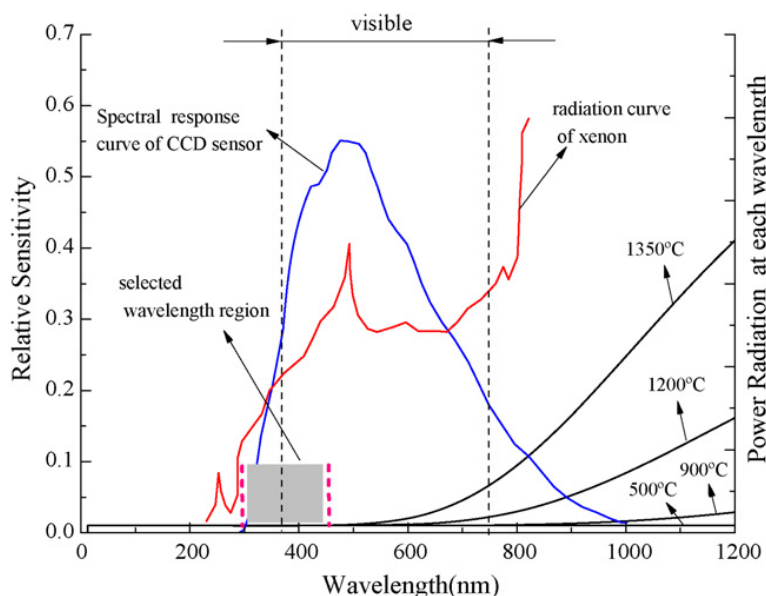
- **Zhenyuan Jia, Bangguo Wang, Wei Liu, Yuwen Sun. 2009 - An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts [26].**

Systém se skládá ze dvou monochromatických CCD, xenonové lampy a obslužného počítače (viz obr. 2-16). CCD snímače jsou vybaveny filtry, které propouští pouze úzké spektrum kratších vlnových délek.



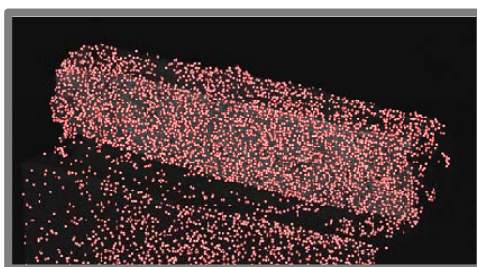
Obr. 2-16: Prvky optického systému s xenonovým světlem [26].

V článku je poprvé popsáno využití spektrálně selektivní metody a metody triangulace pro účely měření výkovků s vysokou teplotou. Princip spektrálně selektivní metody spočívá v selekci spektra, ve kterém nejsou CCD ovlivněny radiací výkovku a současně jsou citlivé na xenonové světlo (viz obr. 2-17).



Obr. 2-17: Princip spektrálně-selektivní metody. Levá svislá osa udává rozsah citlivosti CCD snímače. Pravá osa udává sílu radiace dokonale černého tělesa. Vodorovná osa udává vlnovou délku. Šedá oblast znázorňuje spektrum, které bude snímačem detekováno [26].

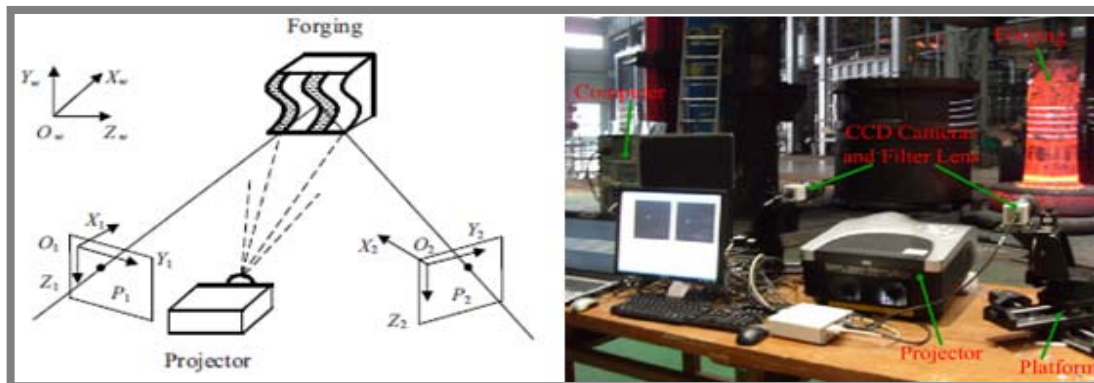
Na povrch výkovku je promítáno xenonové světlo, které se odráží k CCD snímačům, přičemž IR záření emitované výkovkem je odfiltrováno. Díky tomu mohou být na povrchu výkovku extrahovány body, které slouží ke složení výsledného 3D modelu ze stereosnímků (obr. 2-18). Článek se zaměřuje na popis navržené metodiky měření a zpracování dat, neuvádí však výsledky experimentů, které by objasnily přesnost a rychlost měření. Studie z následujících let uvádí, že extrakce tak velkého množství bodů vede k nízké rychlosti systému, z důvodu výpočetní náročnosti. Na tento výzkum navazuje Liu [27], který prezentoval vývoj 3D skeneru proužkovou projekcí xenonového světla.



Obr. 2-18: Výsledek extrakce bodů na povrchu výkovku [26].

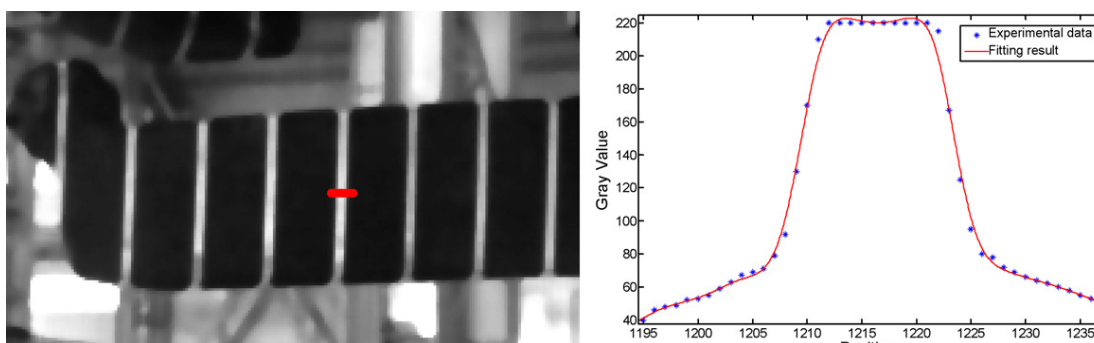
- **Wei Liu, Xinghua Jia, Zhengyuan Jia, Shuangjun Liu, Bangguo Wang, Jian Du. 2011 - Fast dimensional measurement method and experiment of the forgings under high temperature [27].**

System byl oproti [26] upraven pro vyhodnocování promítaného světelného vzoru. Skládá ze dvou CCD kamer s IR filtry, projektoru a obslužného počítače, jak ukazuje následující obrázek. K detekci promítaných pruhů byl použit modifikovaný Gaussův model a spektrálně selektivní metoda popsána již v roce 2009 v [26].

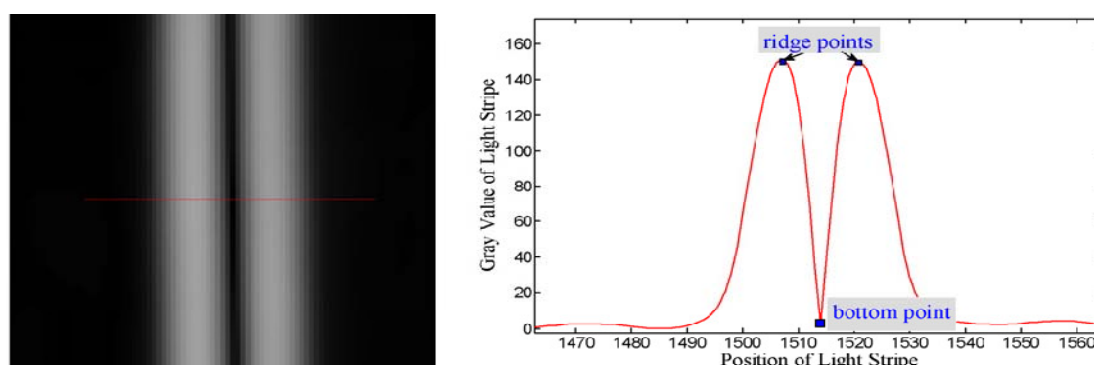


Obr 2-19: Vlevo: schéma optického stereo systému, vpravo jeho reálná podoba [27].

Intenzita světelných pruhů v kolmém směru nemá na povrchu žhavého objektu typické Gaussovo rozložení. Oproti běžnému průběhu křivky má křivka za podmínek vysoké teploty zploštělý tvar vrcholu, jak ukazuje obr. 2-20 vpravo.



Obr. 2-20: Modifikovaný Gaussův model aplikovaný na světelné pruhy promítané na žhavý výkovek [27].



Obr. 2-21: Aplikace první derivace na obraz výkovku. Vlevo: detail světelných pruhů po konvoluci, vpravo: výsledná funkce představující profil světelného pruhu [27].

Pomocí první derivace intenzity byla získána funkce, která je zobrazena na obr. 2-16 vpravo. Následně byla druhá derivace této funkce položena rovno nule. Výsledkem jsou kořeny funkce („ridge points“ na obr. 2-21). Poloha středových pixelů promítaných pruhů („bottom point“ na obr. 2-21) byla na závěr vypočítána Newtonovou iterativní metodou se subpixelovou přesností pomocí dvou kořenů funkce. Dále bylo nutné určit polohu hraničních bodů na měřeném objektu.



V článku jsou popsány dva přístupy. První přístup je založen na skutečnosti, že intenzita šedi je v pozadí výkovku značně odlišná, druhý ze skutečnosti, že na rozhraní výkovku a pozadí mají promítané pruhy významnou změnu křivosti. Systém byl testován v laboratorních i reálných podmínkách. Odchylka rozměrů čtyř desek měřených v laboratorních podmínkách je nižší než 0.8%.



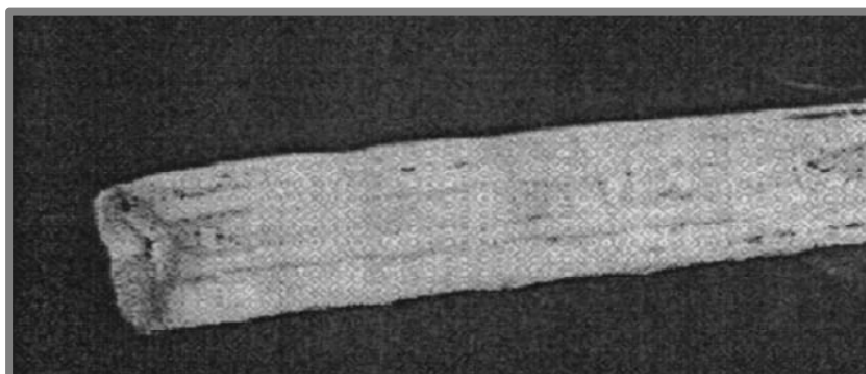
Obr. 2-22: Hraniční body detekované na ocelové desce v horizontálním a vertikálním směru [27].

### 2.3.4 Bezdotykové měření založené na pasivní fotogrametrii a triangulaci

- S. B. Dworkin, T. J. Nye. 2004 - *Image processing for machine vision measurement of hot formed parts* [28].

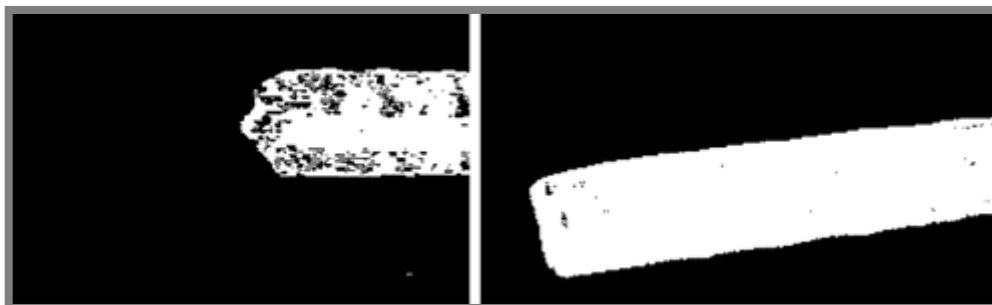
Studie popisuje metodu měření základních rozměrů výkovku vysoké teploty pomocí adaptivního prahování a detekce hran. Přitom je testována přesnost měření u různých typů vstupních snímků: monochromatické snímky ve viditelném spektru, barevné snímky ve viditelném spektru a monochromatické snímky s IR filtrem<sup>8</sup>.

Z článku vyplývá, že nejlepší vlastnosti pro prahování a detekci hran mají monochromatické snímky s IR filtrem. Článek uvádí, že běžné CCD snímače bez filtru nejsou schopny vytvořit vhodné snímky pro detekci hran prahováním a přesné měření rozměrů výkovku. Na následujícím obrázku je monochromatický snímek výkovku o teplotě 900 až 1300 °C, který byl pořízen s IR filtrem. Na obr. 2-14 jsou zobrazeny výsledky prahování.



Obr. 2-23: Monochromatický snímek žhavého výkovku při použití IR filtru [28].

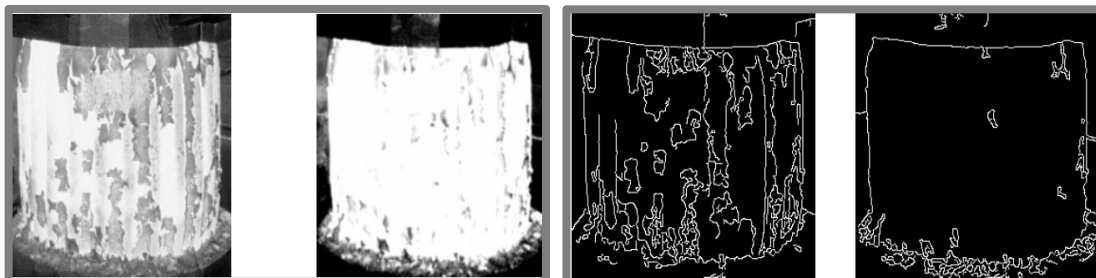
<sup>8</sup> IR filtr - propouští pouze IR paprsky o vlnové délce vyšší než specifikace daného filtru.



**Obr. 2-24:** Výsledné prahování snímků. Vlevo monochromatický bez IR filtru, vpravo s IR filtrem [28].

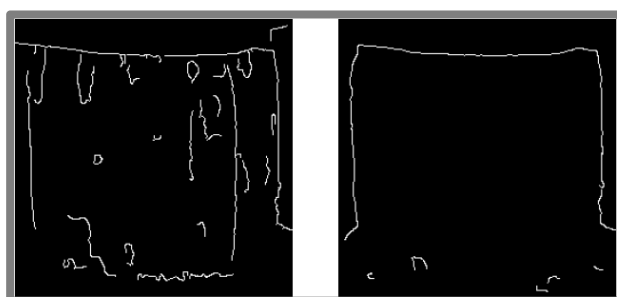
- *Ch. Hu, B. Liu, X. Song. 2008 - A novel edge detection approach used for online dimensional measurement of heavy forging[29].*

Článek představuje novou metodu detekce hran, která překonává problémy ostatních detektorů při aplikaci na výkovky s vysokou teplotou. Jednotlivé kroky zpracování obrazu byly navrženy tak, aby byly co nejlépe splněny podmínky Cannyho algoritmu (viz kap. 2.6). Celý proces detekce výkovků s vysokou teplotou je v článku rozdělen do tří hlavních kroků – předzpracování snímku, hlavní detekce hran a finální zpracování snímků za účelem validace hran. Ve fázi předzpracování obrazu byl nejdříve barevný 24 bitový obraz převeden na 8 bitový. Intenzita pixelů byla rozšířena na celou oblast 0 až 255 a světlost obrazu byla zvýšena. Následně byl obraz upraven adaptivním prahováním. Výsledky předzpracování obrazu jsou zobrazeny na obr. 2-25.



**Obr. 2-25:** Zleva: původní snímek žhavého výkovku ve stupních šedi; předzpracovaný snímek; detekované hrany pomocí standardního Cannyho detektoru; detekované hrany pomocí navržené metody bez předzpracování snímku [29].

Hlavní fáze detekce je založena na modifikovaném Cannyho detektoru. Na předzpracovaný obraz byla aplikována gradientní metoda detekce hran. Za účelem zlepšení výsledků detekce byl nejdříve použit filtr s dolní propustí pro odstranění aditivního šumu. V první fázi tedy byla provedena konvoluce obrazu ve dvou směrech pomocí jádra s Gaussovým rozložením. Ve druhé fázi byl aplikován filtr s horní propustí – diferenciální operátor, který slouží k nalezení hran v obraze. Na obr. 2-26 vlevo je zobrazen výsledek navržené detekce hran bez finálního kroku validace hran. Je patrné, že uvnitř výkovku jsou nalezeny nežádoucí hrany, nicméně většina hran na okujích byla eliminována, zatímco většina obrysových hran byla zachována beze změny polohy. V posledním kroku byla provedena validace hran na základě testování okolních pixelů každého hranového bodu. Finální výsledek navržené metody detekce hran je zobrazen na obr. 2-26 vpravo.



**Obr. 2-26:** Vlevo: detekované hrany pomocí navržené metody bez validace finální hran, vpravo: výsledek detekce pomocí navržené metody [29].

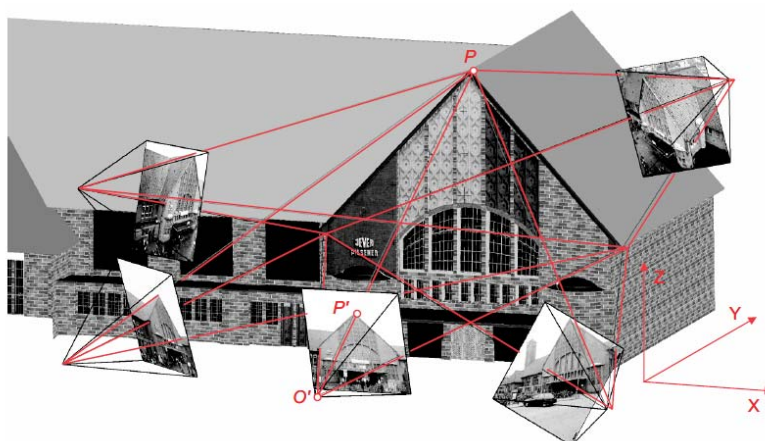
### 2.3.5 Testování vlivu teploty na funkci 3D skeneru

Pokud je autorce známo, dosud bylo publikováno pouze málo studií zabývajících se vlivem teploty na přesnost, efektivitu a funkčnost optických měřicích systémů nebo optických snímačů. Yamauchi [30] ve svém článku experimentálně a teoreticky analyzuje chyby měření laserového skeneru KONICA MINOLTA VIVID 9i způsobené tepelně ovlivněnou oblastí válcového tvaru, která se nachází mezi měřeným objektem a 3D skenerem. V článku je popsána metoda pro teoretický výpočet chyby měření a výsledky jsou porovnány s experimentálním měřením. Z výsledků vyplývá, že skutečná chyba měření je přibližně čtyřikrát menší než vypočtená, a že s rostoucí teplotou se mění naměřené hodnoty v záporném směru, tzn., že naměřené rozměry i vzdálenost klesá.

## 2.4 Matematické principy blízké fotogrammetrie

## 2.4

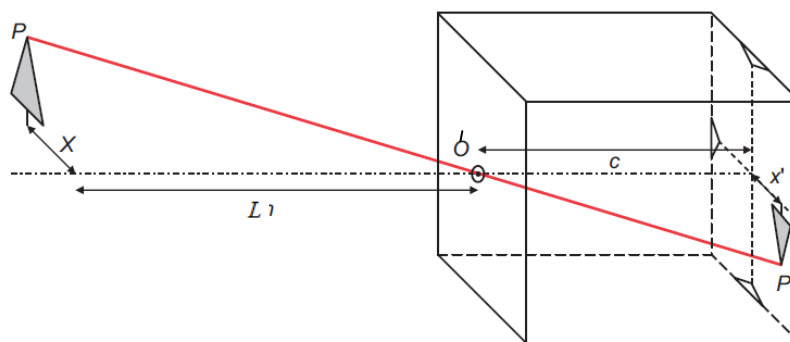
Fotografický snímek objektu je jeho centrální projekcí, přičemž středem promítání je střed objektivu a obrazovou rovinou je obrazový snímač (v případě digitální fotogrammetrie). Tvar a pozice objektu je získána na základě rekonstrukce svazku paprsků [2].



**Obr. 2-27:** Princip fotogrammetrického měření [2].

Prostorová orientace každého paprsku je dána obrazovým bodem  $P'$ , příslušným středem perspektivy  $O'$  a odpovídajícím objektovým bodem  $P$ . Pokud je známá geometrie fotoaparátu a jeho poloha v objektovém souřadném systému, potom je možné definovat také každý paprsek dopadající na obrazový snímač. Na základě průniku alespoň dvou odpovídajících si prostorově nezávislých paprsků může být určena poloha objektového bodu v prostoru [2].

Základním parametrem fotogrammetrického snímku je jeho měřítko obrazu  $m$ . Měřítko definuje vztah mezi konstantou kamery  $c$  a vzdáleností objektu  $L$ , případně mezi vzdáleností v rovině objektu  $X$ , jejíž směr je rovnoběžný s odpovídající vzdáleností  $x'$  v obrazové rovině [2].



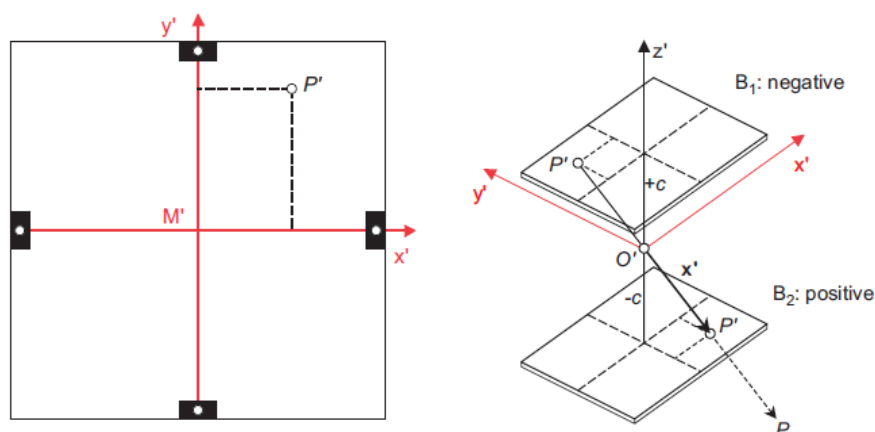
Obr. 2-28: Princip dírkové komory [2].

Měřítko obrazu je rozhodujícím faktorem při odhadu detailů ve snímku, ale také při odhadu přesnosti měření. Každá chyba v obrazovém souřadném systému se promítne v objektovém souřadném systému jako násobek měřítka obrazu. Samozřejmě je třeba uvažovat nominální nebo průměrnou hodnotu měřítka obrazu, neboť komplexní objekty mají různé měřítko vzhledem k poloze v obraze. V následující rovnici  $m$  vyjadřuje měřítko obrazu,  $c$  je konstanta kamery (ohnisková vzdálenost zvětšená o vzdálenost při zaostření),  $X$  je poloha bodu v ose  $x$  v objektovém prostoru a  $x'$  poloha bodu v ose  $x$  v obrazové rovině [2].

$$m = \frac{L}{c} = \frac{X}{x'} \quad (1)$$

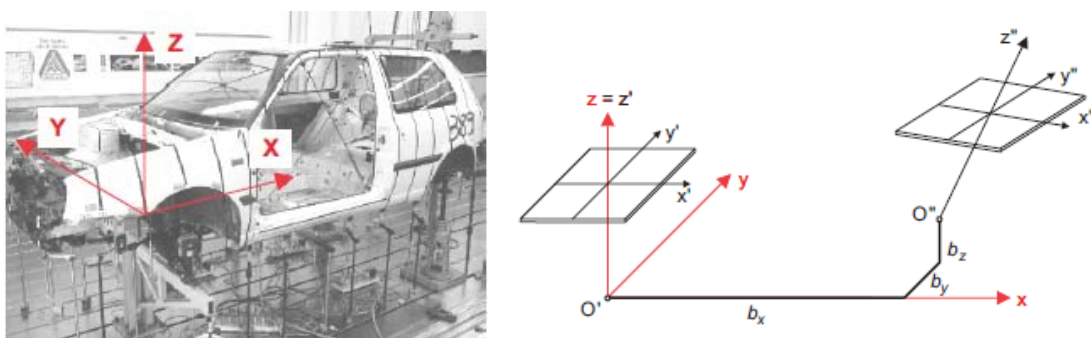
Základním předpokladem pro fotogrammetrické měření je znalost parametrů vnitřní a vnější orientace kamery (internal/external orientation – IO/EO). V obou případech vycházejí matematické vztahy z modelu dírkové komory. Pro odvození těchto vztahů je nutné definovat základní souřadné systémy:

- **Souřadný systém snímku (Image coordinate system)**  
Dvojrozměrný s označením  $x'y'$ . V případě digitálních fotoaparátů je daný středem matice zobrazovacího snímače, u klasických fotoaparátů bývá definován vztahnými značkami, které jsou po vyvolání na snímku viditelné (obr. 2-29) [32].
- **Souřadný systém kamery/fotoaparátu**  
Trojrozměrný s označením  $x'y'z'$ . Jeho počátek leží ve středu promítání. Obrazová rovina  $x'y'$  je posunuta do středu promítání ve směru  $z'$ , který přibližně odpovídá optické ose kamery. Vzdálenost mezi souřadným systémem kamery a obrazu je rovna konstantě kamery  $c$  (viz kap. 2.4.1, obr. 2-29) [32].



Obr. 2-29: Vlevo: souřadný systém snímku, vpravo: souřadný systém kamery [32].

- **Souřadný systém objektu (také světový souřadný systém)**  
Trojrozměrný s označením XYZ, je definovaný geometrií objektu nebo jeho částí (obr. 2-30) [32].
- **Lokální souřadný systém (také modelový souřadný systém)**  
Trojrozměrný s označením xyz. Slouží k popisu relativní polohy a orientace dvou nebo více snímků (obr. 2-30) [32].

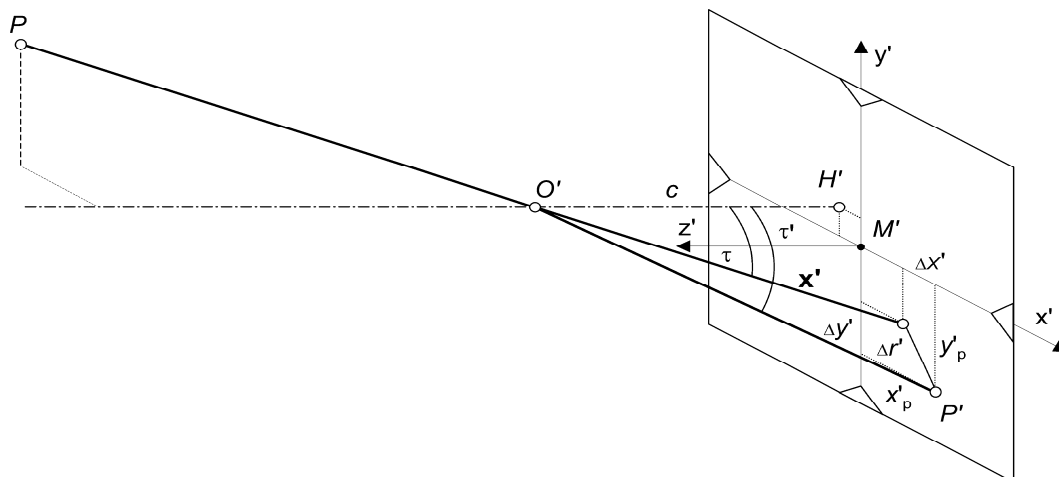


Obr. 2-30: Vlevo:světový souřadný systém, vpravo: lokální souřadný systém [32].

#### 2.4.1 Parametry vnitřní orientace

Parametry vnitřní orientace definují rozdíly mezi skutečnou optickou soustavou fotoaparátu a ideálním modelem dírkové komory. Jsou to:

- **Střed zobrazení  $H'$  (principal point)**  
Průsečík hlavní optické osy s obrazovou rovinou, tedy nadir středu promítání. Uvádí se v souřadnicích obrazového souřadného systému  $(x'_0, y'_0)$ . Pro standardní fotoaparáty je přibližně totožný se středem snímku  $H' \approx M'$  [32].
- **Konstanta kamery  $c$  (principal distance)**  
Vzdálenost mezi středem promítání a obrazovou rovinou v záporném směru osy  $z$ . Konstanta kamery je přibližně rovna ohniskové vzdálenosti při zaostření do nekonečna, tedy  $c \approx f$  [32].
- **Konstanty funkce popisující zobrazovací chybu**  
V praxi se často do výpočtů zahrnuje pouze dominující radiální zkreslení  $\Delta r'$  [32].



Obr. 2-31: Vnitřní orientace kamery [32].

Poloha a vzdálenost středu promítání  $O'$  a odchylky středu zobrazení jsou vztaženy k souřadnému systému snímku. Ve skutečnosti je střed zobrazení posunutý vůči počátku obrazového souřadného systému, což je způsobeno nedokonalou konstrukcí zobrazovacího systému. Pokud jsou parametry vnitřní orientace známy, je možné zapsat polohu libovolného bodu  $P'$  vzhledem ke středu promítání pomocí vektoru  $\mathbf{x}'$  „bezchybně“ [32]:

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_p - x'_0 - \Delta x' \\ y'_p - y'_0 - \Delta y' \\ -c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Kde  $x'_p, y'_p$  je souřadnice obrazového bodu  $P'$ ,  $x'_0, y'_0$  souřadnice středu zobrazení  $H'$  a  $\Delta x', \Delta y'$  jsou korekční konstanty zkreslení obrazu pro obě souřadné osy. Nedokonalá konstrukce čoček a celého zobrazovacího systému způsobuje nelineární geometrické zkreslení snímku. Hlavní složky zkreslení jsou:

- **Radiální zkreslení (radial-symmetric)**

Představuje hlavní zobrazovací chybu u většiny fotografických systémů. Nedokonalá křivost čoček způsobuje, že paprsky z krajních oblastí čočky nesměřují přesně do ohniska. Z tohoto důvodu má obraz různé zvětšení, což se projevuje jako posun bodu na snímku o radiální vzdálenost<sup>9</sup>. U kvalitních objektivů dosahuje 4 až 10  $\mu\text{m}$ . V případě standardních objektivů však v rozích snímku může dosahovat radiální zkreslení až stovky  $\mu\text{m}$  [32].

Zkreslení je možné aproximovat pomocí polynomické nebo racionální funkce s koeficienty  $k_1$  až  $k_n$ . Nejčastěji se používá aproximace polynomem sudého řádu<sup>10</sup>. Pro většiny typů čoček může rozklad končit druhým nebo třetím řádem bez výrazné ztráty přesnosti. V následující rovnici představuje  $r$  korigovanou

<sup>9</sup> Radiální zkreslení nezávisí pouze na konstrukci objektivu a čoček, ale také na zvolené ohniskové vzdálenosti a vzdálenosti objektu při konstantním zaostření.

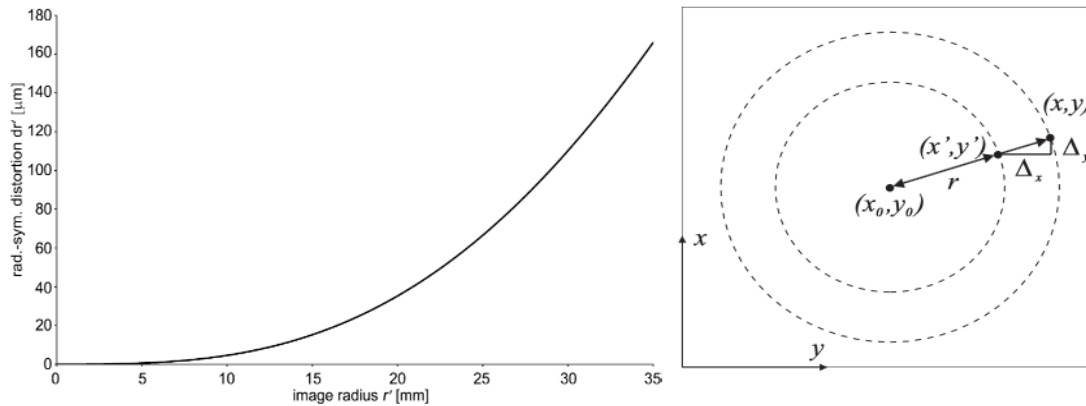
<sup>10</sup> Sudý řád polynomu – při aproximaci pomocí Taylorova polynomu jsou mocniny polynomu pouze sudé pro sudé funkce a liché pro liché funkce. Radiální zkreslení má osově souměrný charakter podle osy  $y$  – tedy funkce sudá.

euklidovskou vzdálenost od středu zobrazení,  $\hat{r}$  je zkreslená vzdálenost,  $\Delta\hat{r}$  je konstanta zkreslení pro dané  $r$  a  $k_1...k_n$  jsou neznámé parametry zkreslení [32].

$$\hat{r} = f(r, k) = r(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (3)$$

$$\hat{r} = r + \Delta r' = r + k_1r^3 + k_2r^5 + k_3r^7 \quad (4)$$

$$\Delta\hat{r} = k_1r^3 + k_2r^5 + k_3r^7 \quad (5)$$



Obr. 2-32: Funkce odpovídající radiálnímu zkreslení ve snímku.

- **Tečné zkreslení (radial-asymmetric nebo také tengencial či decentring)**  
Je způsobené převážně vzájemným naklopením čoček a jejich nesouosostí. U kvalitních objektivů je velikost tečného zkreslení přibližně 10x menší než radiální zkreslení, a proto se často zanedbává [32].
- **Afinní zkreslení (affinity and shear)**  
Popisuje zkreslení způsobené nekolmostí a rozdílným měřítkem obrazových souřadných os. Stejně jako tečné zkreslení se často zanedbává [32].

#### 2.4.2 Parametry vnější orientace

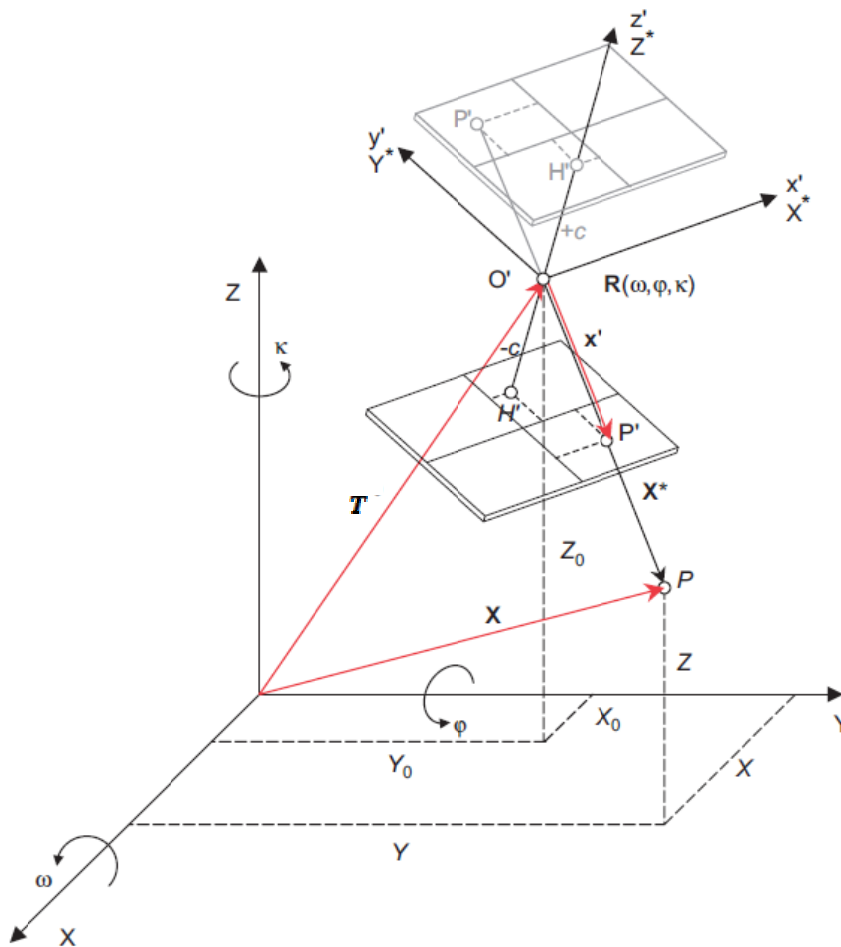
Popisují polohu fotoaparátu v prostoru a vyjadřují vztah mezi světovým souřadným systémem a souřadným systémem fotoaparátu. Souřadný systém fotoaparátu  $x'y'z'$  se nachází v jeho středu promítání a vůči světovému souřadnému systému  $XYZ$  je definován translační vektorem  $T$  a rotační maticí  $R$ . Na obr. 2-28 je zobrazeno šest parametrů vnější orientace kamery:  $X_0, Y_0, Z_0$  jsou souřadnice středu promítání vůči světovému souřadnému systému a  $\omega, \varphi, \kappa$  jsou úhly natočení souřadného systému kamery vzhledem ke světovému souřadnému systému. Šest parametrů se zapisuje v podobě translačního vektoru  $T$  a rotační matice  $R$  [35]:

$$T = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R = R_\omega R_\varphi R_\kappa = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Rotační matice je složená z komponent natočení kolem osy X, Y, Z. Vztah mezi prvky rotační matice a úhly natočení  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$  vyjadřuje následující rovnice [32]:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa - \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (8)$$



Obr. 2-33: Vnější orientace kamery [35].

### 2.4.3 Základní rovnice analytické fotogrammetrie

Šest parametrů vnější orientace je možné vyjádřit skrze průmět bodu P do obrazové roviny. Polohu bodu P v objektovém souřadném systému je možné vyjádřit pomocí vektoru polohy středu promítání  $T$  a vektoru polohy bodu P od středu promítání  $X^*$  [35]:

$$X = T + X^* \quad (9)$$



Kde  $\mathbf{X}^*$  je vektor polohy bodu P rovněž v souřadném systému kamery. Pokud jsou známé vnitřní parametry kamery, je také známý průmět bodu P do obrazové roviny. Potom může být poloha bodu P vyjádřena ve světovém souřadném systému jako  $\mathbf{X}^* = m\mathbf{R}\mathbf{x}'$  a rovnici (9) je možné vyjádřit ve tvaru [35]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T} + m\mathbf{R}\mathbf{x}' \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Při použití pouze jednoho snímku je možné odvodit pouze směr vektoru k bodu P', nikoli absolutní polohu v prostoru. K odvození absolutních souřadnic polohy bodu P' je nutné použít alespoň dva průměty prostorově známých elementů (tzn. buď průsečík s druhým paprskem z jiného snímku, nebo průsečík v jednom snímku s dalším známým bodem v prostoru). Z toho důvodu je použit střed zobrazení snímku (principle point), tedy bod H ( $x_0, y_0$ ). Poloha bodu H je korigována pomocí parametrů zkreslení  $\Delta\mathbf{x}'$ . Vztah (12) a (13) potom definuje průmět vektoru  $\mathbf{x}'$  (tedy O'P') do obrazové roviny (vektor HP') [35].

$$\mathbf{x}' - \mathbf{x}'_0 - \Delta\mathbf{x}' = \frac{1}{m}\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{X} - \mathbf{T}) \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} x' - x'_0 - \Delta x' \\ y' - y'_0 - \Delta y' \\ z' \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Měřítka  $m$  je pro každý objektový bod rozdílné. Faktor neznámého měřítka je možné eliminovat podělením první a druhé rovnice (13) rovnicí třetí [35].

$$x' = x'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \quad (14)$$

$$y' = y'_0 + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y' \quad (15)$$

Tyto rovnice vyjadřují transformaci ze světového (objektového) souřadného systému ( $X, Y, Z$ ) do souřadného systému kamery ( $x', y'$ ) jako funkci parametrů vnitřní orientace ( $x'_0, y'_0, c, \Delta x', \Delta y'$ ) a parametrů vnější orientace fotoaparátu ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ ). Rovnice 14 a 15 jsou považovány za základní rovnice analytické fotogrammetrie. Z těchto rovnic vycházejí prakticky všechny modely pro výpočet kalibrace kamer [35].

## 2.5 Kalibrace kamer

Kalibrace kamery je proces, jehož cílem je nalezení parametrů vnitřní a vnější orientace kamery. Je zpravidla založena na průmětu konkrétních pozorovaných

objektů do obrazové roviny, přičemž je skutečná aparatura nahrazena modelem dírkové komory. Uvažujeme konečný počet  $u$  neznámých (hledaných) parametrů kamery a  $n$  počet pozorovaných parametrů, které jsou reprezentovány souřadnicemi referenčních bodů v prostoru a ve snímku. Vztah pozorovanými parametry a neznámými popisuje následující soustava rovnic:

$$\hat{l} = l + v = A\hat{x} \quad (16)$$

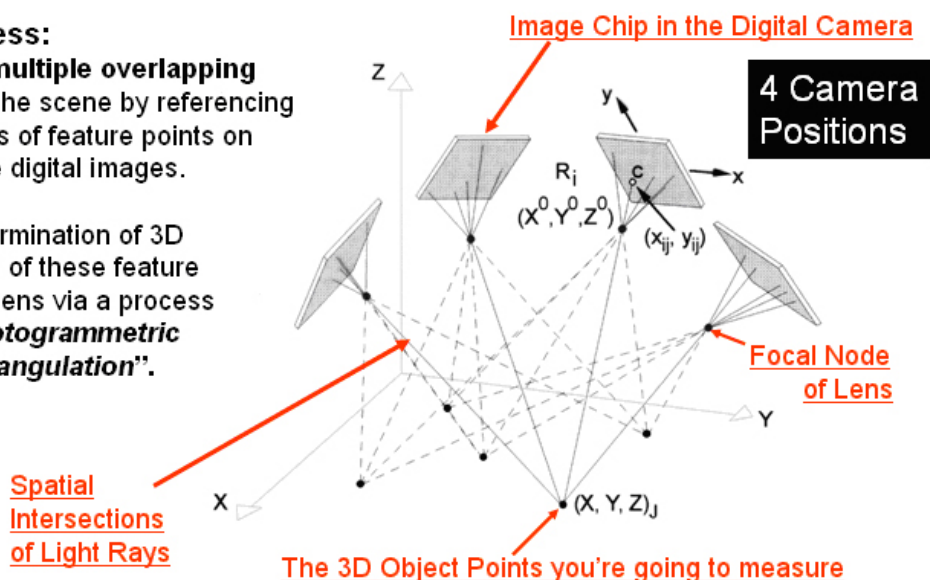
Kde  $\hat{l} (n, l)$  je vektor pozorovaných parametrů (souřadnic referenčních bodů ve snímku).  $A (n, u)$  je Jacobiho matice, která obsahuje diferenciální podíly popisující funkční vztah mezi parametry. Matice  $A$  obsahuje pro každý pozorovaný bod dva řádky a počet sloupců je roven počtu neznámých.  $\hat{x} (u, l)$  je vektor neznámých. Řešení této soustavy rovnic může být lineární, nelineární či iterativní.

Patrně nejpopulárnější výpočetní model je označován jako „Bundle adjustment“. V oblasti blízké fotogrammetrie je známý již od 70. let minulého století (Granishaw 1980 [36], Liu [37]). Název vychází z představy paprsků světla („bundle“), které se odrážejí od 3D struktury a konvergují v obrazovém středu každého fotoaparátu. Klasické „bundle adjustment“ algoritmy jsou iteračními metodami, které se řeší jako nelineární problém nejmenších čtverců. K jednoznačnému řešení tohoto modelu stačí znalost minimálně pěti vázacích bodů<sup>11</sup> (Stewenius 2005 [38], Nistér [39]). Cílem celého algoritmu je nalézt globálně konzistentní skupinu parametrů, které minimalizují chybu registrace mezi všemi páry snímků. Minimalizace se často řeší metodou Lavenberg-Marquardt (Lorkanis 2005 [40]), nebo Sampsonovou aproximací (Liu 2003[37]).

### The Process:

1. Record **multiple overlapping images** of the scene by referencing 2D positions of feature points on two or more digital images.

2. The determination of 3D coordinates of these feature points happens via a process called “**Photogrammetric Bundle Triangulation**”.



Obr. 2-34: Orientace snímků pomocí algoritmu „Bundle adjustment“ [39].

<sup>11</sup> Označení referenční bod (reference point) je používáno pro body nalezené ve snímku, které odpovídají středům referenčních značek rozmístěných ve scéně, jejichž poloha vůči světovému souřadnému systému je známá. Pokud poloha značek vůči světovému s.s. známá není, odpovídající body ve snímku jsou označovány jako vázací body (tie points).

Z hlediska zájmu o výzkum analytických metod kalibrace kamer v oblasti blízké fotogrammetrie byly nejvýznamnější 80. léta, ačkoli i dnes je tento směr výzkumu v menší míře stále aktivní. Přehled a porovnání kalibračních metod publikoval např. Remondino a Fraser (2006) [41]. Při volbě kalibrační metody pro konkrétní aplikaci jsou na jedné straně uvažovány nároky na výstupy kalibrace, které jsou kladeny především:

- *na rychlost – online, offline měření,*
- *přesnost,*
- *a stupeň automatizace,*

na druhé straně musí provedení kalibrace korespondovat s dostupným vybavením a prostředím, v němž má probíhat.

### **2.5.1 Provedení kalibrace z hlediska vnějších podmínek**

Způsob provedení kalibrace souvisí především:

- *s počtem snímků a snímkovacích poloh, které je možné pro kalibraci použít*
- *s dostupnými informacemi o 3D scéně – např. jsou-li ve scéně přímé linie, referenční body apod., v případě ref. bodů potom hraje roli jejich pravidelné/nepravidelné rozmístění, počet a distribuce ve 2D nebo 3D*
- *s typem použitých kamer – tj. metrické/nemetrické.*

V zásadě se rozlišují dva typy kamer - měřičské a neměřičké. Označení měřičská kamera (metric camera) se používá pro fotogrammetrické kamery, které mají stabilní optomechanickou konstrukci. Obvykle mají objektiv s pevným ohniskem s minimálním zkreslením, mohou mít zabudované mechanické rovnání obrazové roviny (tlakově nebo vakuově). Přesnost analogových metrických kamer se pohybuje v rozmezí cca 2 a 10  $\mu\text{m}$ . V případě neměřičských kamer, digitálních zrcadlových fotoaparátů apod. se vnitřní parametry mění s časem, ať už cíleně nebo v důsledku přirozené funkce zařízení. Neměřičské kamery a fotoaparáty je vhodné kalibrovat před každým měřením nebo sérií měření, zatím co měřičské zařízení se kalibrují dle předepsaných časových nebo provozních kritérií.

Z hlediska způsobu provedení kalibrace a nároků na kalibrační scénu je možné rozdělit metody na Laboratorní kalibraci, Metrickou a Nemetrickou kalibraci [42].

#### • **Laboratorní kalibrace**

Tento druh kalibrace se provádí výhradě v případě měřičských kamer. Interní parametry jsou určeny pomocí úhloměřů, kolimátorů, nebo jiných metod optického měření, které určí směr zobrazení, nebo úhel světelných paprsků skrze objektiv fotoaparátu. Laboratorní kalibraci obvykle nemůže provádět běžný uživatel, proto je z hlediska aplikovatelnosti v oblasti blízké fotogrammetrie využívána méně [42].

#### • **Kalibrace s testovacím polem (metrická kalibrace)**

Metrická kalibrace využívá vhodné kalibrační (testovací) pole se značkami, jejichž vzájemná poloha je známá. Kalibrační pole může být přirozené, nebo uměle vytvořené, mobilní nebo stacionární. Pokud je požadováno pomocí kalibrace eliminovat také nelineární zkreslení, je nutné, aby testovací pole bylo viditelné v celém snímku a značky byly rozmístěny v pravidelném rastru. Metrická kalibrace je založena na srovnávání polohy značek ve zkresleném obraze s jejich předem známou skutečnou polohou. Během kalibrace musí být ohnisková vzdálenost a zaostření neměnné. Kalibrace pomocí přirozené scény vyžaduje, aby se ve scéně nacházely přímé linie, jako například v případě hrany budov a podobně. V případě

stacionárních systémů mohou být značky cíleně rozmístěny v měřené scéně a předem změřeny jejich souřadnice vůči zvolenému světovému souřadnému systému. Tímto způsobem vznikne přirozené stacionární kalibrační pole, které bude trvale součástí měřené scény. Pro tento typ kalibrace se používá označení „*pracovní kalibrace*“ (on- the-job calibration) [42].

- ***Samokalibrace (nemetrická kalibrace)***

Samokalibrace je označení pro metody, které využívají stejné snímky pro měření i kalibraci a kalibrace je řešena pomocí algoritmu „Bundle adjustment“. Využívá stejně jako metrická kalibrace pole se značkami, nicméně v tomto případě jsou značky náhodně rozmístěny v prostoru scény a jejich vzájemná poloha není známá. Měřítka scény se určí pomocí jedné nebo více referenčních vzdáleností, které jsou předem známé. Obvykle se pro určení měřítka používají tzv. měřítkové tyče, na nichž se nacházejí referenční značky s přesnou vzdáleností, která se zadává do měřicího softwaru. Samokalibrace může být obecně méně přesná než kalibrace metrická, nicméně umožňuje kalibraci velkých zorných polí a nevyžaduje dodržování přesných snímkovacích poloh, je tedy mnohem flexibilnější. Tento typ kalibrace využívají off-line průmyslové fotogrammetrické systémy [42].

## 2.5.2 Kalibrace z hlediska volby matematického modelu

Na základě zhodnocení nároků na kalibraci a možností provedení je třeba zvolit vhodný matematický model. Ty je možné rozlišovat především podle toho, zda jsou:

- *založené na perspektivní projekci nebo projektivní geometrii*
- *zda umožňující kalibraci všech parametrů kamery nebo kalibraci pouze lineárních/nelineárních parametrů,*
- *výpočet je lineární, nelineární či iterativní,*
- *vyžadující pouze jeden snímek/dva snímky/více než dva snímky.*

Z matematického hlediska jsou všechny kalibrační modely založeny buď na principech projektivní geometrie, nebo na principu perspektivního promítání.

- ***Model založený na rovnicích kolinearit – prostorová resekce***

V případě tohoto modelu je minimálním požadavkem známá a neměnná ohnisková vzdálenost. Analytický výpočet vychází z rovnic kolinearit. Obecně vyžadují modely založené na rovnicích kolinearit minimálně pět referenčních bodů a minimálně dva snímky. Linearizaci je možné provést aproximovanými hodnotami pomocí Taylorova rozvoje a řešit metodou nejmenších čtverců. Příkladem může být jednosnímkové nelineární řešení založené na prostorové resekci. Toto řešení poprvé popsal Albertz a Kreiling (1989) [46]. V případě, že jsou známé přibližné hodnoty parametrů vnitřní orientace, jako je střed zobrazení  $x'_0, y'_0$ , zkreslení  $\Delta x, \Delta y$  a konstanta kamery  $c$ , vyžaduje toto řešení pouze tři referenční body (tabulka 2-2).

- ***Model založený na projektivních vztazích***

Tyto modely umožňují kalibraci s proměnnou ohniskovou vzdáleností. Vyžadují minimálně šest až osm referenčních bodů. Modely založené na projektivních vztazích obvykle neumožňují ošetření nelineárních parametrů kamery. V oblasti počítačového vidění jsou příkladem modely, jejichž název vyplývá z charakteristické matice, kterou k výpočtu využívají - Fundamentální nebo Esenciální. V oblasti fotogrammetrie je nejznámějším řešením metoda Přímé lineární transformace (DLT). Jedná se o jednosnímkovou lineární metodu, která vyžaduje k výpočtu znalost

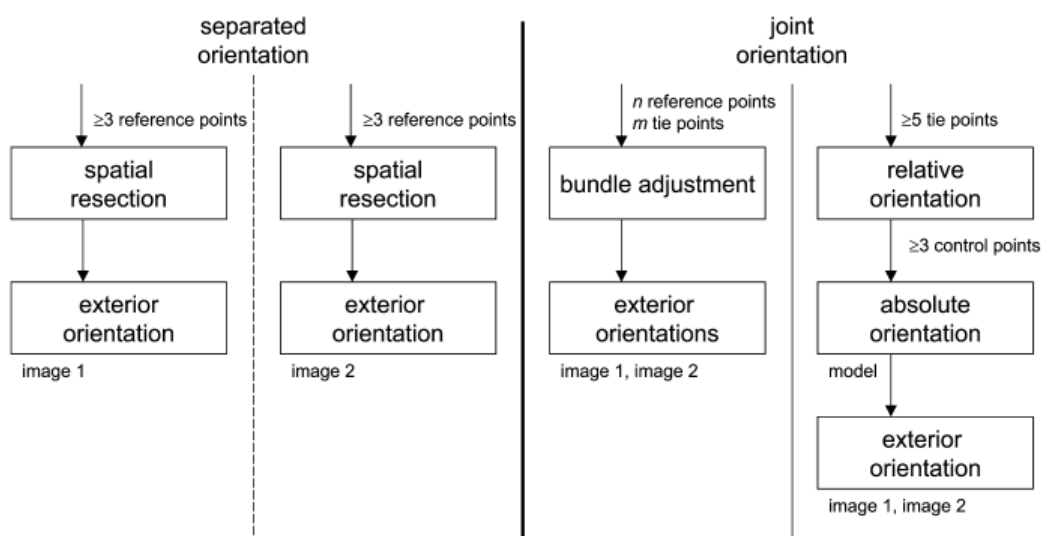
minimálně šesti referenčních bodů. (Abdel-Aziz a Karara 1971 [43]). DLT se využívá také k předběžnému výpočtu parametrů vnější orientace jednotlivých snímků, které jsou následně použity k vícesnímkové kalibraci pomocí algoritmu „Bundle adjustment“.

Tabulka 2-2: Vztah mezi počtem neznámých, počtem pozorovaných bodů a celkovým počtem rovnic funkčního modelu, podle [42].

	Počet neznámých	Neznámé	Minimální počet bodů	Celkový počet rovnic
Prostorová resekce se známými parametry vnitřní orientace	6	$X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa$	3	6
Prostorová resekce s neznámými parametry vnitřní orientace, známé radiální zkreslení	9	$X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa, x'_o, y'_o, c$	5	10
Prostorová resekce s neznámými parametry vnitřní orientace	11	$X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa, x'_o, y'_o, c, \Delta x', \Delta y'$	6	11

• **Jednosnímkové versus vícesnímkové modely**

Existují matematické modely, které umožňují výpočet většiny parametrů kamery pouze pomocí jednoho snímku. Mohou být lineární i nelineární a provádí se některou z metod prostorové resekce [41, 42]. Vícesnímkové metody kalibrace jsou založeny na principu epipolární geometrie a rovnicích kolinearity. Nejznámějším řešením vícesnímkové kalibrace je již zmíněný algoritmus “Bundle adjustment“. V případě stereopáru se používá kombinace relativní a absolutní orientace. Vícesnímková samokalibrace je běžná ve fotogrammetrické praxi, zatímco kalibrace pomocí jednotlivých snímků je běžná v oblasti robotiky nebo počítačového vidění [41, 42].



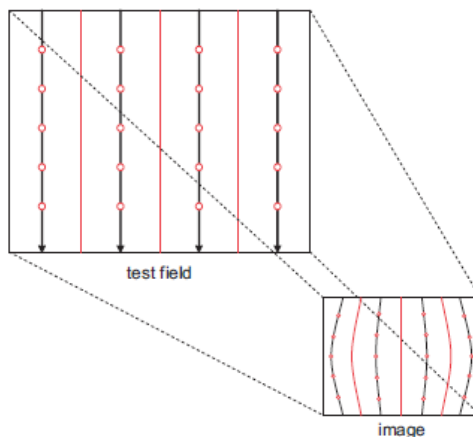
Obr. 1-35: Metody vnější orientace pro stereo snímky [35].

- **Lineární, nelineární, iterativní modely**

Lineární výpočetní modely jsou jednoduché a rychlé, ale obecně nejsou příliš dobře schopné řešit zkreslení objektivu. Vždy vyžadují referenční body se známými souřadnicemi vůči světovému s.s. Z hlediska výpočetního zjednodušení jsou tyto metody obvykle méně přesné než metody nelineární [41, 42]. Příkladem je metoda Přímé lineární transformace (Abdel Azziz a Karara 1971 [43]), která je v podstatě ekvivalentní jako řešení pomocí Esenciální matice [44]. Nelineární modely jsou založeny na rovnicích kolinearit. Rovnice kolinearit jsou také základem samokalibračních technik pomocí algoritmu „Bundle adjustment“ (Brwn 1976 [45]). Existují také metody, které v první fázi využívají lineární model k výpočtu přibližných hodnot. Ty jsou následně použity jako vstup pro iterativní výpočet výsledků. Kombinované metody byly postupně nahrazeny přesným a spolehlivějším řešením pomocí algoritmu „Bundle adjustment“, který je principiálně také dvoufázovým řešením [41, 42].

- **Kalibrace nelineárních parametrů kamery**

Pro většinu aplikací je z hlediska přesnosti dostačující, pokud je korigováno pouze dominující radiální zkreslení, které je více jak 10x větší než ostatní složky (viz kapitola 4.2.1). Jednou z nejstarších metod kalibrace radiálního zkreslení je Olovnicová metoda, kterou představil již v roce 1966 Brown a Conrady [48, 49]. Tato metoda umožňuje určit konstantu fotoaparátu, střed zobrazení, a konstanty zkreslení snímku pomocí přímých linií ve scéně. Patrně nejpoblárnější řešení kalibrace radiálního zkreslení popsal v roce 1987 Tsai [50] – viz rovnice 5.3. Dodnes vzniklo mnoho algoritmů, které vycházejí z tohoto modelu. Tsai model funguje téměř pro všechny typy běžných objektivů, selhává však v případě širokouhlých objektivů tzv. rybí oko. Pro tyto typy objektivů byly vytvořeny specifické modely, jako např. [51].

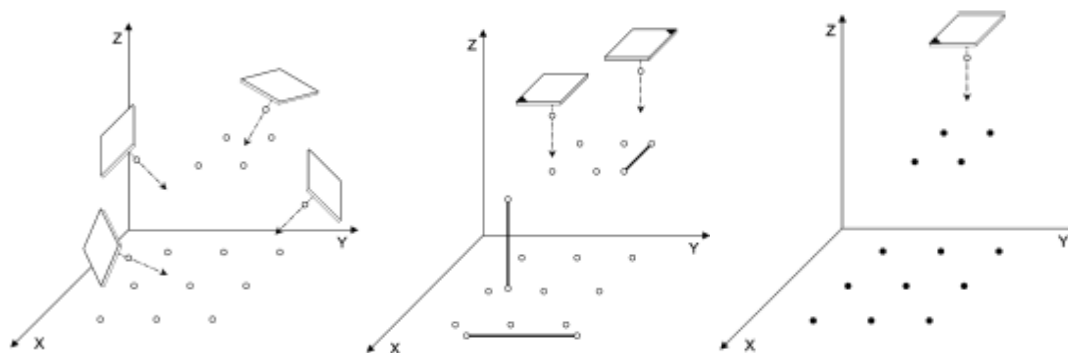


**Obr. 2-36:** Kalibrace nelineárních parametrů kamery pomocí olovnicové metody [54].

Existuje mnoho metod, které řeší současně kalibraci všech parametrů kamery, tedy nelineárních i lineárních. Tyto metody zpravidla vyžadují více snímků a pevnou scénu s referenčními značkami, které pokrývají většinu zorného pole kamery. Pokud je k dispozici trojrozměrné kalibrační pole, potom další požadavky vyplývají z toho, zda je poloha referenčních značek známá a kolik snímků, resp. snímkovacích poloh je k dispozici. Při použití více snímků a různých snímkovacích poloh nemusí být

poloha referenčních značek známá. Minimálním požadavkem jsou čtyři snímky z čtyř různých úhlů. Pokud se počet snímků sníží na dva a jejich obrazové roviny jsou rovnoběžné, musejí být do scény přidány minimálně tři známé referenční vzdálenosti (měřítkové tyče). V případě použití jednoho snímku a jedné snímkovací polohy, je zpravidla vyžadováno referenční kalibrační pole s referenčními značkami, jejichž vzájemná poloha je známá [53]. Automatickou kalibraci všech parametrů kamery pomocí kalibračního pole publikoval např. [54] a [55].

V některých případech však vnější podmínky neumožňují, aby bylo v zorném poli vhodné kalibrační pole. Proto byly vytvořeny také modely, které umožňují kalibraci radiálního zkreslení pomocí jediného snímku. Metodu měření, která je vhodná i pro nemetrické kamery a nevyžaduje prakticky žádné informace o 3D scéně prezentuje ve svém článku Vass a Perlaki (2011) [52]. Automatizace této metody vyžaduje přímé linie v měřené scéně nebo známou polohu několika referenčních značek. Výpočet koeficientů zkreslení je řešen iterativním způsobem.



Obr. 2-37: Kalibrace pomocí kalibračního pole. Vlevo kalibrace pomocí čtyř snímků a vázacích bodů. Uprostřed kalibrace pomocí dvou snímků, vázacích bodů a měřítkových tyčí. Vpravo kalibrace pomocí referenčních bodů a jednoho snímku [54].

## 2.6 Zpracování obrazu v oblasti blízké fotogrammetrie

2.6

Metody zpracování digitálního obrazu byly vyvíjeny již v 60. letech 20. století, zejména pro účely satelitního a lékařského snímkování, ale také za účelem zlepšování vizuálních vlastností digitální fotografie. Do 70. let bránila vývoji těchto metod špatná dostupnost počítačů i jejich výkonnost. Značná pozornost byla již od počátku věnována rozpoznávání objektů v digitálním obraze. Dosud jsou algoritmy pro rozpoznávání objektů v obraze a jejich lokalizaci patrně nejběžnějším problémem v oblasti blízké fotogrammetrie [53].

### 2.6.1 Rozpoznávání a lokalizace objektů v digitálním obraze

V případě hledání a lokalizace odpovídajících si objektů ve dvou nebo více snímcích mohou nastat následující problémy:

- díky okluzi nemá obrazový bod  $P_{ij}$  (bod  $i$  v obraze  $j$ ) homologický bod  $P_{ik}$ ,
- vzhledem k nejednoznačnosti hledaného objektu existuje několik kandidátů  $P_{ik}$  pro obraz bodu  $P_{ij}$ ,
- špatná distribuce hledaných bodů ve snímku způsobí náchylnost k chybnému výpočtu orientace snímku apod. [56].

Z toho důvodu se pro zvýšení úspěšnosti rozpoznání objektu ve snímcích používá v oblasti aktivní fotogrammetrie projektor (zvýšení kontrastu, barevné kódování pixelů apod.). V případě pasivní fotogrammetrie se do měřené scény rozmisťují referenční značky, které mají nejčastěji kruhový tvar a kontrastní barvu vůči pozadí. Běžnou úlohou je potom rozpoznání těchto značek a lokalizace jejich středů. Obecně se rozpoznání konkrétních objektů v obraze řeší např. některým z následujících způsobů:

- *výpočtem z předem známých souřadnic v obraze a známého natočení obrazové roviny vůči analyzovanému objektu,*
- *manuálním nastavením kurzoru ve snímku,*
- *rozpoznáváním vzoru (segmentace obrazu) při předzpracování snímku, tj. hledání příslušných schématu ve snímku [56].*

Rozpoznání fotogrammetrických značek se řeší zpravidla pomocí segmentace obrazu. Pomocí stanovených kritérií pro nalezené oblasti se eliminují zdánlivé a chybně nalezené oblasti, které nereprezentují značky. Následuje hledání středů těchto oblastí pomocí některého z algoritmů pro jednobodovou lokalizaci, jako např. metodou těžiště [56], prokládáním vzoru metodou nejmenších čtverců nebo pomocí některé ze strukturálních metod (star operátor – Luhmann 1986 [57], Zhou operator - Zhou 1986 [58]).

### **2.6.2 Detekce hran**

Mechanismy detekce je možné rozdělit podle matematických principů, které používají: založené na první derivaci, založené na druhé derivaci, nepracující s derivací, nebo detektory pracující ve frekvenční oblasti. Velká skupina metod aproximuje derivaci pomocí konvoluce s vhodným jádrem. Mezi nejznámější operátory patří: Sobel, Prewitt, Roberts a Laplacian. V současné době je stále považováno za optimální řešení detekce hran Cannyho algoritmus [59], který nejlépe splňuje tři základní kritéria:

- *Minimální chybovost* - poměr mezi množstvím detekovaných hran a množstvím šumu musí být co nejmenší.
- *Lokalizace* – poloha detekované hrany musí být co nejbliže její skutečné poloze v obraze.
- *Jednoznačná odezva* – operátor musí detekovat pouze jednu odezvu na každou hranu.

Optimalizacím Cannyho algoritmu se v posledních letech věnoval např. Ding a Goshtasby [60] nebo Medina-Carnicer at al. [61]. Detekce hran pomocí Cannyho detektoru dosahuje pouze pixelové přesnosti. V posledních letech jsou vyvíjeny metody, jejichž cílem je sub-pixelová detekce. Přehled metod detekce hran v digitálním obraze publikoval v roce 1975 Davis [62], v roce 1982 Peli a Malah [63] a v roce 1996 Zioua Tabbone [64]. Problematice detekce hran v digitálním obraze je stále věnována pozornost. Studie se v posledních letech zabývají především optimalizací algoritmů pro konkrétní specifické úlohy detekce, jako je např. také detekce hran na výkvcích s vysokou teplotou.



### 3 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

Rožměrné výkovky rotačního tvaru jsou výchozími polotovary, které slouží k výrobě komponent zejména pro lodní, jaderný nebo petrochemický průmysl. Polotovary se kovají při teplotě 850 až 1300 °C v otevřené formě pomocí hydraulických lisů s tlakem až 10 000 tun. Po kování obvykle probíhá kontrola tvaru a rozměrů. V případě výkovků rotačně symetrického tvaru jsou nároky kladeny zejména na válcovitost a přímou osy. Součástí výrobního procesu bývá často rovnání výkovku pomocí tříbodového ohybu na hydraulickém lisu.

Dosud se běžně řeší měření rozměrných výkovků s vysokou teplotou pomocí jednoduchých přípravků ručně. Dotykové měření však neposkytuje dostatečnou flexibilitu, bezpečnost, rychlost a přesnost měření. Vzhledem k tomu, že se jedná o cenově velmi nákladnou, často malosériovou až kusovou produkci, nároky na efektivitu výroby se neustále zvyšují, což znamená také vyšší nároky na tvarovou a rozměrovou přesnost výkovků. Z toho vyplývají požadavky na přesné, rychlé a bezpečné měření. Jak uvádějí aktuální literární prameny, v době digitálních technologií již byl ruční způsob měření výkovků překonán. Literární prameny je možné rozdělit do tří kategorií, podle způsobu provedení a způsobu vyhodnocování dat:

- měření založené na aktivní fotogrammetrii a metodách TOF,
- měření založené na aktivní fotogrammetrii a metodách aktivní triangulace,
- měření založené na pasivní fotogrammetrii a metodách pasivní triangulace.

Všechny zmíněné metody mají své výhody i nedostatky. Obecnou nevýhodou TOF systémů je jejich vysoká cena vyplývající z nutnosti vysoce přesného měření signálu v čase. LIDARy jsou určeny pro vysokou pracovní vzdálenost, jejich přesnost je nižší než v případě systémů založených na triangulaci. V oblasti měření výkovků je pracovní vzdálenost kolem 20 m a přesnost v řádech mm.

V případě systémů založených na vyhodnocování vzdálenosti metodou aktivní triangulace byl zpočátku řešen problém s dosažením dostatečného kontrastu promítaného vzoru na povrchu výkovku, který má vysokou intenzitu jasu. Tento problém byl vyřešen implementací spektrálně selektivní metody a použitím xenonového osvětlení. V případě pasivní fotogrammetrie může být naopak výhodou vysoká intenzita jasu na povrchu výkovku, neboť zajistí vysoký kontrast mezi polotovarem a pozadím.

Obecnou nevýhodou triangulace je omezená viditelnost v otvorech a konkávních oblastech. Při požadavku na zachycení celé geometrie, je nutné použití více kamer nebo otáčení s měřeným objektem. Otáčení polotovaru pomocí manipulátoru by do měření vnášelo chybu. V případě rotačně-symetrických objektů však stačí k plnému určení jejich tvaru pouze informace o tvaru osy, délce a průměru. Díky tomu je možné značně zjednodušit celý měřicí proces.

Pokud je autorce známo, v současné době neexistují pro měření výkovků s vysokou teplotou komerční měřicí systémy založené na pasivní fotogrammetrii. Důvodem může být právě problematika analýzy obrazu. Publikace v kapitole 2.3.4 však dokazují, že i tímto směrem se ubírá výzkum. Články jsou zaměřeny spíše na dílčí úlohy analýzy obrazu a zmiňují aplikovatelnost navržených metod pro účely měření rozměrů výkovků.

Problémem který je společný u všech zmíněných metod je tepelné proudění vzduchu v okolí objektu s vysokou teplotou, které způsobuje rozdílný lom světla. Tím mohou

vznikat odchylky polohy i měřítka měřených entit. Jak uvádí Yamauchi [30], na základě experimentálního měření vlivu teploty na přesnost 3D skeneru bylo zjištěno, že s rostoucí teplotou se mění naměřené hodnoty v záporném směru, tzn. naměřené rozměry i vzdálenost klesá. Při zjištění charakteristiky odchylek je možné řešit korekci těchto odchylek matematicky. Korekce má však smysl pouze při nárocích na odchylky v řádech setin mm, což v oblasti ocelářského průmyslu nebývá běžné. Při měření výkovků je třeba počítat s nerovnosti na povrchu měřeného polotovaru, které jsou způsobeny přítomností okují. Z toho důvodu nebývají nároky na přesnost měření vyšší jak v řádech mm (např. požadavek společnosti Žďas na přesnost do  $\pm 5$  mm) a metody subpixelové detekce hran, které se využívají zejména v oblasti aktivní fotogrammetrie, se jeví jako zbytečné.

Po zhodnocení kladů a záporů jednotlivých metod, byl zvolen princip pasivní fotogrammetrie pro řešení zmíněné problematiky. Výhodami měřicího systému založeného na pasivní fotogrammetrii by měla být jednoduchost, rychlost měření a vyhodnocování a především zásadně nižší cena ve srovnání s aktivními fotogrammetrickými systémy. Z hlediska nároků na reálný provoz vyplývají kritéria, které by měl splňovat specifický bezdotykový měřicí systém pro měření rotačních výkovků s vysokou teplotou:

- *Umístění kamer v dostatečné vzdálenosti od zdroje tepelné emise (eliminace vlivu IR emisí výkovku).*
- *Kalibrace kamer musí být proveditelná z velké vzdálenosti a pro velké zorné pole.*
- *Systém musí umožňovat „real-time“ měření a vyhodnocování, bez nutnosti zásahu do výrobního cyklu výkovku (viz kap. 2.2.3).*

## 4 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ 4

---

Cílem disertační práce je návrh vlastní metodiky měření přímosti osy rotačních výkovků a její experimentální ověření v laboratorních podmínkách. Navržená metodika by měla poskytnout potřebné informace o ose výkovku pro rovnací linku, která zajistí jeho rovnání pomocí třibodového lisu. Hlavním kritériem při návrhu metodiky je aplikovatelnost v podmínkách reálného provozu a implementovatelnost do výrobního cyklu.

Hlavní cíl:

- *Návrh vlastní metodiky bezdotykového měření přímosti osy rotačních výkovků*
- *Experimentální ověření funkčnosti navržené metodiky*
- *Popis vlivů na dosahovanou přesnost měření včetně návrhů na optimalizaci*

Dílčí cíle:

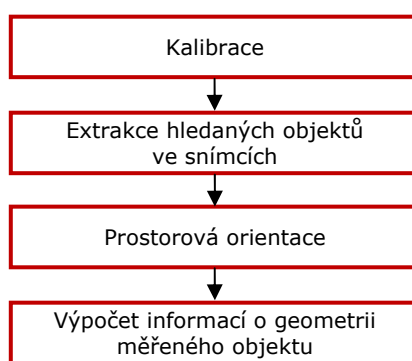
- *Návrh experimentální měřící aparatury*
- *Vytvoření softwarové aplikace, která umožní testování metodiky*
- *Návrh metody pro komparační měření včetně realizace*
- *Realizace experimentálních měření pro ověření funkčnosti navržené metodiky v laboratorních podmínkách*

## 5 MATERIÁL A METODY

Téma této disertační práce bylo formulováno na základě, reálných problémů, které řeší v současné době ocelářské společnosti. Po návštěvě výroby těžkých polotovarů ve společnosti Žďas, byla stanovena základní kritéria, která musí být uvažována při návrhu měřicího systému:

- *Vyhodnocení odchylky přímosti osy s přesností na  $\pm 5$  milimetrů*
- *Měření bez přerušení výrobního cyklu*
- *Minimální vzdálenost kamer 6 metrů, maximální 12 metrů*
- *Maximální délka výkovků 20 metrů (typická délka 6 metrů)*

Kapitola Materiál a metody se zabývá návrhem konkrétní metodiky měření, uvádí realizované softwarové řešení a popisuje provedené experimenty. V první fázi návrhu je třeba specifikovat konkrétní přístup řešení. Následuje rozvaha nad dosažitelným rozlišením a přesností systému. V další fázi jsou zvoleny konkrétní dílčí metody. Následující obrázek znázorňuje typický proces měření pomocí optického fotogrammetrického systému.



Obr. 5-1: Hlavní kroky v procesu fotogrammetrického měření.

Na základě výstupů kalibrace jsou nalezené extrahované body ve snímcích transformovány do světového souřadného systému ve správném měřítku – tím je dokončena fáze rekonstrukce geometrie objektu. Následuje výpočet hledaných informací o měřeném objektu. V případě výkovku jsou to informace o rozměrech výkovku a informace o tvaru jeho osy:

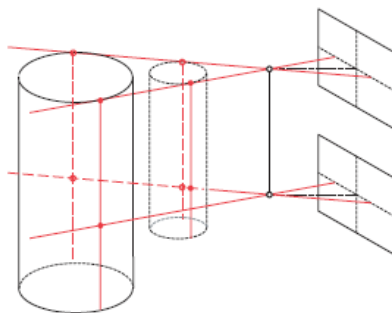
- *Průměr výkovku*
- *Délka výkovku*
- *Místo maximálního průhybu*
- *Úhel směru zakřivení osy*
- *Velikost maximálního průhybu*
- *Oblast, která splňuje požadavky pro maximální průhyb*

Cílem této práce není vytvoření profesionálního softwaru pro fotogrammetrické měření, ale návrh metodiky měření rotačních výkovků, která je založena na principu pasivní fotogrammetrie. Především z důvodu ověřitelnosti navržené metodiky byl vytvořen aplikační software. Pro vytvoření softwaru bylo zvoleno prostředí Matlab, a to zejména z důvodu rozsáhlých matematických knihoven.

### 5.1 Analytický návrh způsobu řešení

Způsob měření byl navržen na základě zmíněných kritérií s ohledem na charakteristický rotačně symetrický tvar výkovků. Fotogrammetrické měření vždy vyžaduje výpočet měřítka ve snímku pro každý analyzovaný bod. Standardně se měřítko počítá podle vztahu (1) ze vzdálenosti bodu v prostoru od středu promítání kamery a ohniskové vzdálenosti (viz kapitola 2.4). Vzdálenost bodu v prostoru od středu promítání se počítá nejčastěji metodou triangulace. Ta však vyžaduje nalezení homologických bodů minimálně ve dvou snímcích. Pomocí pasivní fotogrammetrie by bylo prakticky nemožné nalézt na povrchu výkovku jednoznačně rozpoznatelné body. Nicméně v případě rotačně-symetrických objektů není nutné rekonstruovat geometrii celoplošně. K plnému určení geometrie ideálního válce stačí znalost minimálně pěti parametrů (souřadnice bodu na ose, směrový vektor a poloměr).

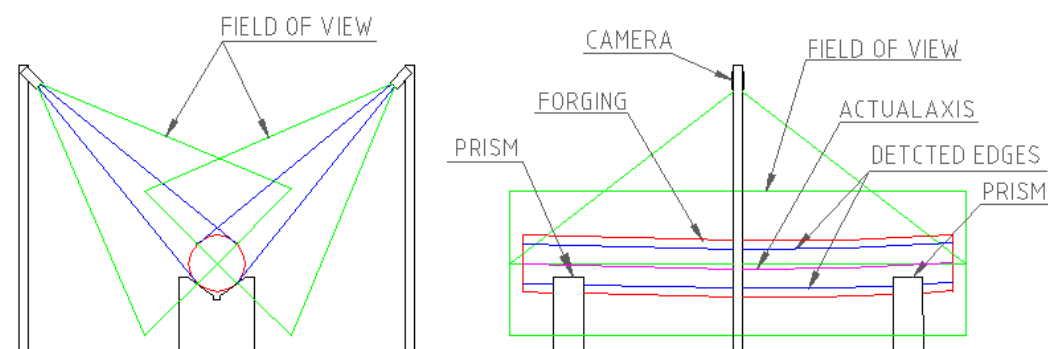
Ve snímku je válec reprezentován rovnoběžnými hranovými úsečkami, které vzniknou průmětem rovin, které prochází středem promítání a jsou tečné k válcové ploše. Osu ideálního válce je možné rekonstruovat z jednotlivého snímku pomocí dvou podélných hran. V případě skutečného objektu rotačního tvaru není osa v trojrozměrném prostoru reprezentována jako úsečka, ale jako 3D křivka. K plnému určení tvaru válcového výkovku je tedy potřeba minimálně dvou snímků a známého měřítka v obou snímcích.



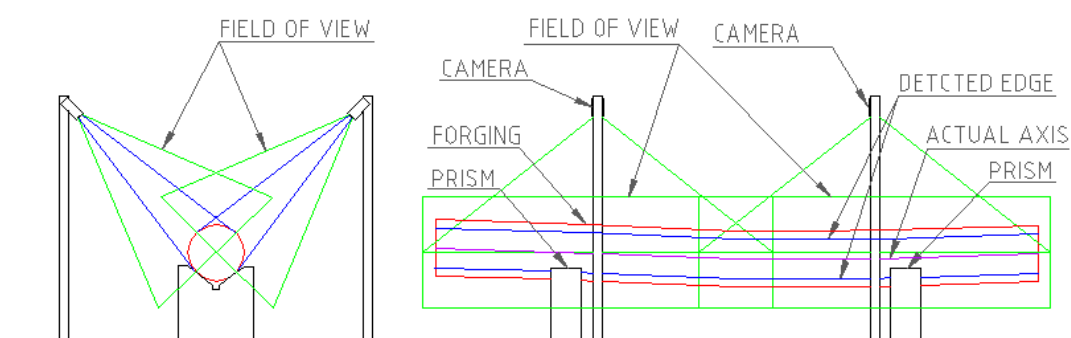
**Obr. 5-2:** Průmět válce do obrazové roviny – pokud je osa obrazové roviny všech kamer rovnoběžná s osou válce, není možné určit měřítko ve snímcích a vypočítat skutečný průměr válce.

Princip měření je tedy založen na předpokladu, že skutečný tvar osy rotačních výkovků je možné určit (v nejjednodušším případě) z minimálně čtyř hraničních křivek, které leží ve dvou vzájemně kolmých rovinách (viz obr. 5-3). Dvě hraniční křivky výkovku budou získány ze snímků pomocí vhodné metody detekce hran. V případě výkovků s velkou délkou by bylo možné použít paralelní konfiguraci kamer a provést měření po částech a následně složit výsledky do jednoho souřadného systému (viz obr. 5-4). Navrhovaný optický systém je možné definovat jako (viz kapitola 2.2):

- *Založený na digitální blízké fotogrammetrii*
- *Pasivní (nevyužívá přidané osvětlení)*
- *Vícesnímkový*
- *Stacionární*
- *On-line (viz kap. 2.2.3 - Stacionární vícesnímkové systémy)*



Obr. 5-3: Konfigurace fotogrammetrického systému se dvěma kamerami [64].



Obr. 5-4: Konfigurace fotogrammetrického systému se čtyřmi kamerami [64].

Výhodou navrhované metody by měla být především nízká cena, jednoduchost a také rychlost měření. Měření pomocí popsané metody však principiálně nemůže dosahovat takové přesnosti jako běžné fotogrammetrické metody a to zejména z toho důvodu, že není možné přesně určit měřítko všech hranových bodů ve snímcích. Všechny hranové body ležící v rovině rovnoběžné s rovinou snímače mají ve snímku konstantní měřítko. V případě popsané metody musí rovina, v níž se hledané body nacházejí, procházet osou výkovku. Vzhledem k tomu, že skutečná osa výkovku je prostorová, nemůže být tato podmínka prakticky splněna.

## 5.2 Rozvaha nad rozlišením a přesností navrhovaného systému

Přesnost systému je dána citlivostí měření a odchylkami měření, jako jsou např. odchylky vzniklé při detekci hran, při kalibraci parametrů kamery atd. V případě systémů založených na obrazovém snímači je minimální měřitelná vzdálenost závislá na rozlišení snímku. Rozlišení snímku je dáno rozlišením obrazového snímače a velikostí zorného pole v objektové rovině. Ta závisí na vzdálenosti mezi měřeným objektem a obrazovou rovinou a na ohniskové vzdálenosti použitého objektivu. Minimální vzdálenost kamer je omezena tepelnou emisí výkovku, maximální vzdálenost prostorem, v němž má měření probíhat. Na základě návštěvy výroby výkovků ve firmě Žďas byla stanovena přibližně minimální vzdálenost kamery od výkovku na 6 metrů, maximální 12 metrů.

Pro reálné podmínky musí být voleny průmyslové kamery, které jsou teplotně odolnější, robustnější konstrukce, monochromatické. V současné době je čipem

s nejvyšším rozlišením v této řadě čip KAI-29050<sup>12</sup> s 28,8 Mpix [12]. Například průmyslové monochromatické kamery JAI AM-1600 GE<sup>13</sup>, nebo Allied Vision Technology Pike F-1600<sup>14</sup> s čipem Kodak KAI-16000 mají rozlišení 16 Mpix mohou pracovat při teplotách -5 °C až 45 °C (viz obr. 6-9 a 6-10).



**Obr. 5-5:** Vlevo: Průmyslová monochromatická kamera AM-1600 GE s čipem Kodak KAI-16000 (JAI). Vpravo: Průmyslová monochromatická kamera Pike F-1600 s čipem Kodak KAI-16000 (Allied Vision Technology).

Vývoj metodiky měření nemůže probíhat přímo v reálných podmínkách, jedním z důvodů je zajištění stacionárních podmínek pro měření. Pro laboratorní testy jsou k dispozici zrcadlové fotoaparáty Canon EOS 500D. Následující tabulka ukazuje parametry profesionální měřičské kamery a digitální DSLR<sup>15</sup>.

**Tabulka 5-1:** Profesionální měřičské kamery Kodak KAI-16000 a digitální DSLR

	Kodak KAI-16000	Canon EOS 500D
<b>Typ</b>	CCD	CMOS
<b>Rozlišení [pixel]</b>	4872 x 3248 (15,8 Mpix)	4752x3168 (15,1 Mpix)
<b>Aktivní velikost čipu (h×v)[ mm]</b>	36,05 x 24,0	22,3 x 14,9
<b>Velikost pixelu [µm]</b>	7,40 × 7,40	4,69 × 4,70

Tabulka 5-2 na následující straně ukazuje rozlišitelnost měření při použití kamery Kodak Kai-16000, při požadavku na měření výkovku s maximální délkou, tj. 21 metrů v závislosti na počtu paralelních kamer. V tabulce jsou uvedeny výsledky pro objektivy s různými ohniskovými vzdálenostmi, které jsou na trhu k dispozici k danému typu kamery. S množstvím použitých kamer samozřejmě roste cena optického systému. Rozlišitelnost udává pouze teoreticky dosažitelnou maximální přesnost měření, která v praxi nemůže být nikdy dosažena. V případě navrženého systému bude největší chyba patrně způsobena aproximací měřítka a vlivem nepřesné registrace dat ze snímků.

<sup>12</sup> CCD čipy Kodak KAI, viz <http://www.truesenseimaging.com/markets/machine-vision>

<sup>13</sup> monochromatická kamera JAI AM-1600 GE, viz <http://eshop.integrays.com/imaging-and-video/category-4/model/16mp-en.html>

<sup>14</sup> Allied Vision Technology Pike F-1600, viz <http://www.alliedvisiontec.com/us/products/cameras/firewire/pike.html>

<sup>15</sup> DSLR (Digital Single-Lens Reflex camera) – Zkratka pro digitální zrcadlové fotoaparáty

**Tabulka 5-2:** Rozlišitelnost měření s kamerami Kodak Kai-16000 v závislosti na počtu paralelních kamer a použitím objektivu při měření zorného pole o délce 21 m.

Počet kamer	Ohnisková vzdálenost [mm]	Velikost zorného pole jedné kamery [m]	Vzdálenost obrazové roviny [m]	Rozlišitelnost [mm]
1	18	21	10485	3,34
	28		8155	
2	35	10,5	10194	2,15
	35		7766	
3	40	7	6796	1,43
	...		5,25	

Uvažujeme výkovek o průměru 1200 mm s max. průhybem 100 mm, vzdálenost kamery k vypočtené rovině 7776 mm a ohniskovou vzdálenost 35 mm. Bude-li směr maximálního průhybu rovnoběžný s optickou osou jedné kamery, vznikne maximální možná chyba měřítka v obraze této kamery 2,85 (podle vztahu (1)). Za předpokladu, že v daném místě je průmět průhybu do druhé kamery ve stejném místě nulový, bude také nulová chyba měřítka v obraze druhé kamery. Velikost chyby měřítka se skutečně projeví až po rekonstrukci obrazu z počtu pixelů ve snímku. Uvažujeme-li konkrétní případ, např. zpětný výpočet velikosti průměru výkovku. Podle vztahu (1) představuje průměr o velikosti 1200 mm 729,9 pixelů v kameře se správným měřítkem. V kameře s chybou měřítka předsazuje 729,9 pixelů 1215,4 mm. Výsledná chyba změřeného průměru výkovku v místě s průhybem 100 mm by se tedy mohla pohybovat od 0 až do 15,4 mm. Chybu na průměru je možné upravit statisticky na základě výpočtu průměrů v různých řezech po délce výkovku. V případě průhybu, který má velikost 100 mm (60,825 pix.), by byla maximální chyba při zpětném výpočtu  $\pm 1,28$  mm. Samozřejmě se jedná o teoretický odhad chyby a skutečnou chybu měření bude třeba zjistit porovnáním výsledků s přesnějším měřicím systémem.

**Tabulka 5-3:** Teoretický odhad chyby měření průhybu způsobené aproximací měřítka pro různé vstupní hodnoty.

Kamera	Ohnisková vzdálenost [mm]	Velikost pixelu [mm]	Max. průhyb osy [mm]	Max. a min. vzdálenost k ose [mm]	Měřítka [ ]	Skutečný/vypočtený rozměr [mm]	Chyba rekonstrukce [mm]
Kodak KAI-16000	35	0,0074	100	7776	222.172	1200/1215,4	0 až 15,4
				7876	225.029	100/102.56	0 až 2,56
Canon EOS 500D	18	0,0047	20	650	36.111	20/20,62	0 až 0,62
				670	37.222	10/10,307	0 až 0,30



### 5.3 Návrh metody kalibrace

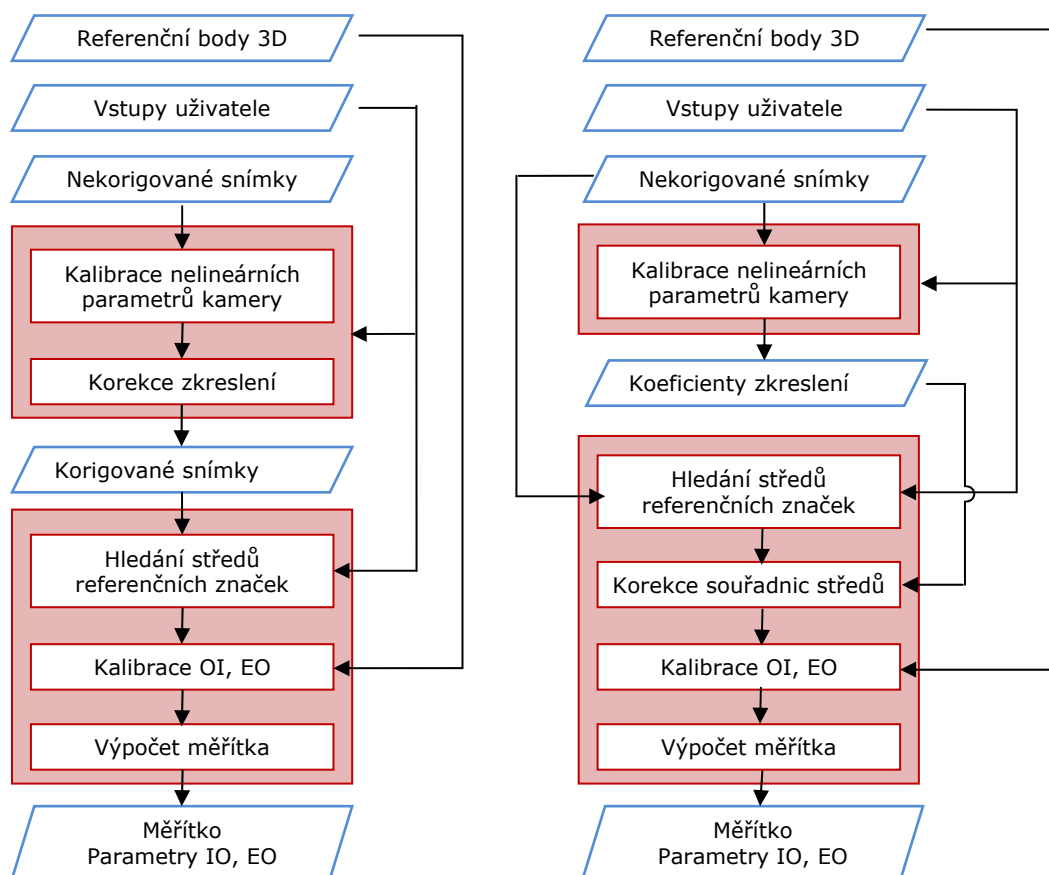
Celá kalibrace musí být řešena v několika krocích – viz obr. 5-1. Volbou dílčích metod kalibrace se zabývají následující kapitoly, jsou to především:

- *Volba modelu pro výpočet parametrů vnitřní a vnější orientace kamery*
- *Volba modelu pro výpočet parametrů nelineárního zkreslení ve snímku*
- *Volba metody pro výpočet polohy referenčních značek ve snímcích*

Metoda kalibrace byla volena na základě vnějších podmínek a nároků na výsledky kalibrace. Kritéria pro volbu metody kalibrace jsou shrnuty v následujících bodech:

- *Počet snímků - 2*
- *Velké zorné pole kamer (několik metrů v reálných podmínkách)*
- *Automatická kalibrace (ideálně bez vstupu uživatele)*
- *Stacionární kamery (teoreticky pouze posun ve vertikálním směru)*
- *Nároky na přesnost nižší (v desetínách mm)*
- *Použití i pro nemetrické kamery (z důvodů laboratorních testů)*

Ze zmíněných kritérií jednoznačně vyplývá, že z hlediska provedení se musí jednat o tzv. pracovní kalibraci, která se používá pro Stacionární vícesnímkové systémy sloužící pro kontrolu kvality (viz kapitola 2.5.1).



Obr. 5-6: Uvažované přístupy k řešení korekce zkreslení ve snímcích.

Matematické modely, které řeší současně výpočet koeficientů nelineárního zkreslení i parametrů kamery, zpravidla vyžadují buď použití více snímků, nebo pravidelný rastr značek, který pokrývá většinu zorného pole kamery. To však v reálných podmínkách nemůže být splněno z důvodu velkých rozměrů zorného pole. Kalibrace lineárních a nelineárních parametrů kamery musí být tedy řešena odděleně. V průběhu řešení této práce byly uvažovány následující možnosti, jak korekci zkreslení začlenit do celého měření:

- 1) Na počátku celého měření nejdříve zkorigovat snímky celoplošně. Korigované snímky následně použít pro výpočet lineárních parametrů kamery a všechny následující operace s obrazem.
- 2) Pomocí známých koeficientů zkreslení dle rovnice (5) ve všech použitých algoritmech pracujících se souřadnicemi ve snímku korigovat pouze souřadnice analyzovaných bodů.

Zmíněné přístupy se liší zejména z hlediska časových nároků v jednotlivých krocích a z hlediska přístupu k programování. Druhý přístup by prodlužoval výpočet u každého algoritmu v průběhu celého měření. V prvním případě by trvala korekce snímků delší čas vždy na začátku samotného měření. Na základě souvislosti s řešením výpočtu nelineárních parametrů kamery byla zvolena první varianta (viz kapitola 5.2.2).

### 5.3.1 Volba modelu pro výpočet parametrů nelineárního zkreslení kamery

V následující kapitole jsou popsány dva rozdílné přístupy k řešení zkreslení kamery. První navržený přístup se nepodařilo aplikovat na DSLR, nicméně pro měřičské kamery je z hlediska přesnosti i časové náročnosti vhodnějším řešením než druhý popsáný přístup. Zhodnocení obou navržených metod je popsáno na konci této kapitoly.

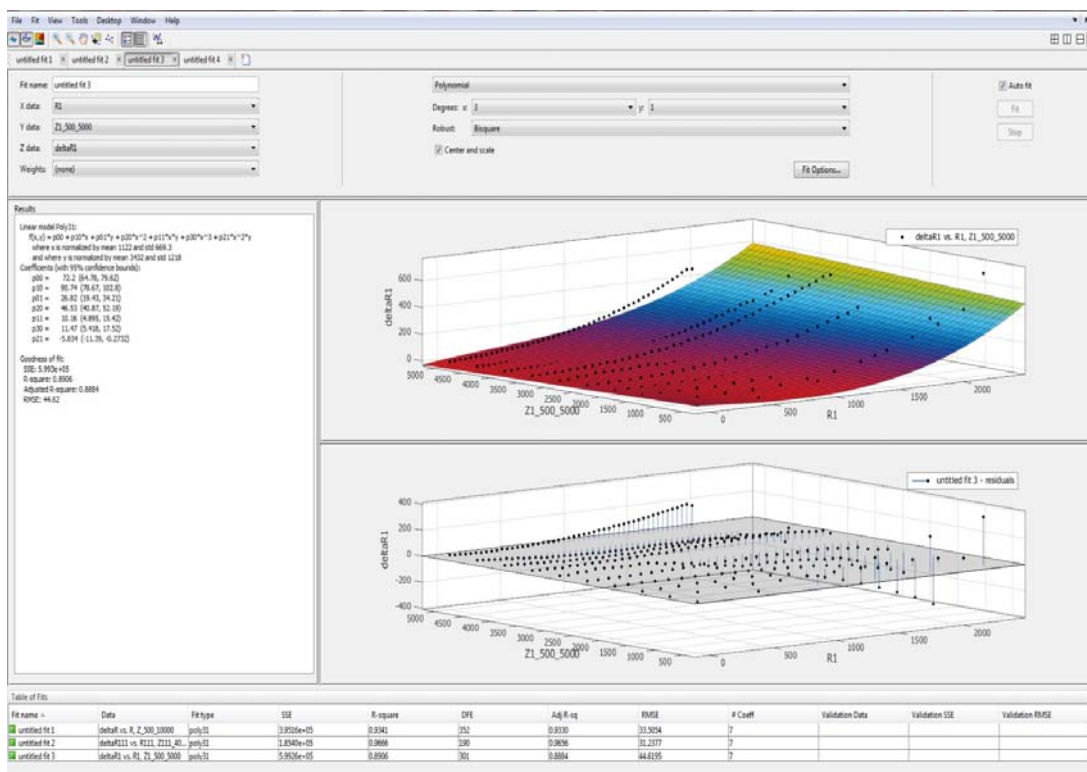
#### Model vytvořený na základě regresní analýzy z naměřených dat

Model zkreslení je možné pro konkrétní kameru a objektiv vytvořit předem. Toto řešení vyžaduje vytvoření trojrozměrného modelu, který by popisoval závislost velikosti nejen na vzdálenosti od středu snímku, ale také vzdálenosti měření, která ovlivňuje doostření objektivu a tedy i konstantu kamery. Trojrozměrný model je možné vytvořit interpolací naměřených dat pomocí dvojnásobné regresní analýzy. Proto je třeba vytvořit dostatečné množství vstupních dat provedením série měření z různých vzdáleností. Jednotlivá měření je možné realizovat v nejjednodušším případě pomocí jednoho snímku, jehož rovina je rovnoběžná s rovinou 2D rastru (viz obdoba olovnicové metody- obr. 2.35). Při měření z velkých vzdáleností je možné použít pouze jednorozměrné pole značek.

Za účelem sběru dat pro vytvoření modelu zkreslení byla provedena měření ze vzdálenosti 2 až 10 metrů, po 0,5 metrech a měření ze vzdálenosti 0,4 m až 1,4 m po 0,1 metrech. Zkreslené souřadnice jednosměrného pole byly ve snímcích nalezeny pomocí jednoduché metody detekce hran. Příklad výsledného trojrozměrného modelu, který byl vytvořen na základě změřených dat v softwaru Matlab, je zobrazen na obr. 5-7.

Kalibrace využívající předem známý model by byla řešena iteračně. Nejdříve by byl proveden výpočet parametrů orientace kamer ze zkreslených snímků. Z vypočtené vzdálenosti kamer by byly určeny koeficienty nelineárního zkreslení každé kamery.

Následoval by opět výpočet parametrů orientace již s vypočtenými koeficienty zkreslení a tento proces by se opakoval, dokud by změna ve výsledcích nebyla dostatečně malá. V celém procesu kalibrace by byl potom časově nejnáročnější proces hledání středů elips, který je nutný pro výpočet orientace kamer. (V softwaru Matlab trvá proces hledání elips v obou snímcích cca 20 sekund).



Obr. 5-7: Model zkreslení vytvořený na základě série měří pro použité DSLR.

### Inverzní model zkreslení

Pokud neexistuje předem vytvořený model zkreslení, je nutné model získat pomocí vhodné kalibrační metody real-time z aktuálních snímků. Kalibrační metodu je nutné volit s ohledem na kritéria popsána v kapitole 2.5.1. Navrhovaný měřicí systém je dvou snímkový se dvěma snímkovacími polohami. Z hlediska skutečné podoby měřené scény bylo třeba zhodnotit, jaké objekty ve scéně je možné ke kalibraci využít. Rozpoznatelnými objekty jsou nepravidelně rozmístěné referenční značky a kontrastní výkovek. Dále by se ve scéně mohly nacházet přímé linie, představované sloupy, rohy stěn (v případě laboratorního měření hrana měřicího stolku) apod. Na základě podmínek zmíněných v kapitole 2.5.2 a na základě studia literatury zabývající se metodami kalibrace, byla nalezena vyhovující kalibrační metoda založená na inverzním modelu zkreslení [52]. Tato metoda sice řeší pouze zkreslení radiální, nicméně s ohledem na zmíněné nároky na přesnost je korekce dominujícího radiálního zkreslení dostačující. Uvažujme, že koeficienty zkreslení (viz rovnice 3) jsou na počátku známy. Potom je možné eliminovat skutečné zkreslení snímku pomocí transformační funkce s opačným účinkem:

$$r = f^{-1}(\hat{r}, k) \quad (25)$$

Je-li koeficient zkreslení známý, je možné vypočítat posun každého pixelu ve snímku. Pokud se aplikuje na každý obrazový bod příslušný posun v opačném směru, dojde k eliminaci zkreslení. Nalezení inverzní funkce  $f^{-1}(\hat{r}, k)$  je třeba řešit iteračně, např. Newtonovou iterační metodou.

Je-li možné vytvořit obraz s libovolným zkreslením, potom je možné porovnat různé snímky s různými koeficienty a najít tak nejlepší řešení – tzn. nezkraslený snímek. Hledání nejlepšího koeficientu může být založené pouze na odhadu uživatele. Samozřejmě je možné řešit nalezení nejvhodnějšího koeficientu také automaticky iteračně (viz algoritmus v příloze na str. P3).

### **Zhodnocení navržených metod**

Model vytvořený na základě předem naměřených dat by byl patrně ideálním řešením pro měření v reálných podmínkách s profesionální metrickou kamerou. Při použití digitálních DSLR se však neosvědčil. Výsledná 3D plocha vytvořená pomocí regresní analýzy vykazovala vysoké odchylky při nízkém stupni polynomu, při vyšších stupních byla plocha zvlněná. Tato metoda korekce byla zhodnocena jako nevhodná pro použité digitální fotoaparáty z důvodu složité mechaniky objektivu s proměnným ohniskem, která nelineárně ovlivňuje ohniskovou vzdálenost. Navíc v případě větších vzdáleností měření mohlo dojít k nepřesnému nastavení obrazové roviny fotoaparátu.

Metoda založená na inverzním modelu byla navržena zejména s ohledem na použití digitálních fotoaparátů a možnost použití této metody jak pro měření v laboratorních podmínkách, tak pro případné testování v reálných podmínkách. Obecně je výhodou inverzního modelu především minimální požadavek na počet snímků a na informace o měřené scéně. Navíc umožňuje korigovat i silně zdeformované snímky. Metoda sice řeší pouze zkreslení radiální, nicméně s ohledem na zmíněné nároky na přesnost je korekce dominujícího radiálního zkreslení dostačující. Umožňuje jak nastavení korekčního parametru uživatelem, tak i automatický iterační výpočet nejvhodnějšího parametru. Korekce jednoho snímku s rozlišením 15,1 Mpix trvá v softwaru Matlab cca 30 sekund. Automatický výpočet by byl časově náročnější z důvodu nutnosti celoplošné transformace snímků s různými hodnotami zkreslení. V této práci je korekce všech použitých snímků řešena pomocí tohoto inverzního modelu. Uživatel na dané snímky aplikuje různé koeficienty zkreslení a sleduje střední kvadratickou odchylku souřadnic referenčních bodů zpětně vypočtených pomocí parametrů vnitřní orientace kamer, které byly získány z kalibrací z těchto korigovaných snímků. Snímky s nejmenší chybou jsou nejlépe zkorigovány.

### **5.3.2 Volba modelu pro výpočet parametrů vnitřní a vnější orientace kamery**

Volba modelu pro výpočet soustavy rovnic (17) musí vyplývat z kritérií popsanych na začátku kapitoly 5.2. Z hlediska počtu snímků a snímkovacích poloh je možné použít některou z metod pro kalibraci stereopárů (např. kombinaci relativní a absolutní orientace založenou na epipolární geometrii a rovnicích kolinearit), nebo některou z metod pro jednosnímkovou kalibraci. Z hlediska výpočetní jednoduchosti byla zvolena jednosnímková kalibrace pomocí *prostorové resekce*. Kalibraci pomocí prostorové resekce je možné řešit dvěma způsoby – nelineárním výpočtem pomocí rovnic kolinearit, nebo lineárně pomocí projektivních vztahů. V této práci byla použita výpočetně méně náročná lineární metoda - konkrétně *Přímá lineární*

**transformace** (DLT). Tato metoda aproximuje soustavu rovnic (16) nahrazením vektoru  $\hat{\mathbf{x}}(u, 1)$  neznámých parametrů kamery, 11ti DLT parametry. Vztah mezi pozorovanými parametry a neznámými je odvozen z rovnic kolinarit (15), (16). Transformační rovnice DLT je zapsána ve tvaru [35]:

$$x = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (17)$$

$$y = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (18)$$

Kde  $x, y$  jsou souřadnice ve snímku;  $X, Y, Z$  souřadnice ve světovém souřadném systému a  $L_I$  až  $L_{III}$  DLT parametry, které odpovídají třem parametrům vnitřní orientace a šesti parametrům vnější orientace, zbylé dva parametry vyjadřují naklopení a měřítko afinní transformace. Úpravou rovnic (17) a (18) vzniknou následující lineární rovnice:

$$L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4 - xL_9X - xL_{10}Y - xL_{11}Z - x = 0 \quad (19)$$

$$L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8 - yL_9X - yL_{10}Y - yL_{11}Z - y = 0 \quad (20)$$

Matice  $A(n, u)$ , která obsahuje diferenciální podíly popisující funkční vztah mezi parametry, má díky linearizaci následující podobu [35]:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -x_1Y_1 & -x_1Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_1 & Z_1 & 1 & -y_1X_1 & -y_1Y_1 & -y_1Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_2X_2 & -x_2Y_2 & -x_2Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & -y_2X_2 & -y_2Y_2 & -y_2Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_nX_n & -x_nY_n & -x_nZ_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -y_nX_n & -y_nY_n & -y_nZ_n \end{bmatrix} \quad (21)$$

Vyřešením soustavy rovnic  $\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$  je získáno 11 DLT parametrů, ze kterých je možné vypočítat parametry vnitřní a vnější orientace podle následujících vztahů. Parametry IO jsou souřadnice středu zobrazení  $x'_0, y'_0$  a konstanta kamery v obou osách  $c_x, c_y$  [35]:

$$x'_0 = L^2(L_1L_9 + L_2L_{10} + L_3L_{11}), \quad y'_0 = L^2(L_5L_9 + L_6L_{10} + L_7L_{11}) \quad (21)$$

$$c_x = \sqrt{L^2(L_1^2 + L_2^2 + L_3^3) - x'_0{}^2}, \quad c_y = \sqrt{L^2(L_5^2 + L_6^2 + L_7^3) - y'_0{}^2} \quad (22)$$

Parametry EO jsou členy rotační matice  $r_{11} \dots r_{33}$  a translačního vektoru  $X_0, Y_0, Z_0$ :

$$r_{11} = \frac{L(x'_0L_9 - L_1)}{c_x} \quad r_{12} = \frac{L(y'_0L_9 - L_5)}{c_y} \quad r_{13} = LL_9$$

$$\begin{aligned}
 r_{21} &= \frac{L(x'_0 L_{10} - L_2)}{c_x} & r_{22} &= \frac{L(y'_0 L_{10} - L_6)}{c_y} & r_{23} &= LL_{10} \\
 r_{31} &= \frac{L(x'_0 L_{11} - L_3)}{c_x} & r_{32} &= \frac{L(y'_0 L_{11} - L_7)}{c_y} & r_{33} &= LL_{11}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

Kde  $L$  je:

$$L = \frac{-1}{\sqrt{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}} \tag{24}$$

### 5.3.3 Volba metody pro výpočet polohy referenčních bodů ve snímku

K řešení přímé lineární transformace je zapotřebí minimálně šesti referenčních bodů, které neleží v jedné rovině (tj. šest bodů u nich je známá jejich poloha v prostoru vůči jednomu souřadnému systému). Ve snímku jsou značky reprezentovány jako bílé eliptické oblasti na černém pozadí. Jak uvádí kapitola 2.6.1, rozpoznání těchto značek se provádí nejčastěji pomocí segmentace obrazu. Obraz se dle zadané prahové hodnoty převede na binární (černobílý). U vzniklých oblastí se analyzují jejich vlastnosti, jako je tvar, počet pixelů v oblasti apod. Následuje eliminace oblastí, které nerepresentují značky na základě kritérií pro velikost oblasti a její tvar. V této práci byla použita čtyři kritéria pro rozpoznání oblastí:

- *Maximální velikost oblasti (počet pixelů) – parametr BigArea*
- *Minimální velikost oblasti (počet pixelů) – parametr SmallArea*
- *Poměr počtu pixelů v oblasti vůči počtu pixelů v konvexní obálce oblasti – parametr Convar.*
- *Poměr počtu pixelů eliptické oblasti počítané z poloos původní oblasti vůči počtu pixelů v původní oblasti – parametr EllipseParam*

Následuje určení středu oblasti. V této práci byla použita nejjednodušší a výpočtově nejméně náročná metoda Těžiště (podle [56]). Tato metoda je schopna měřit středy i velmi malých oblastí ( $\emptyset < 5$  pix) i oblastí s neostrými okraji. Nicméně přesnost výsledku závisí výhradně na rozložení pixelů v oblasti, proto je metoda těžiště použitelná pouze pro symetrické homogenní oblasti. Prakticky může metoda těžiště dosahovat přesnosti 0.03 až 0.05 pixelů při měření středů bílých kruhových značek na černém pozadí. Těžiště oblasti se počítá pomocí následujícího vztahu:

$$x_M = \frac{\sum_{i=1}^n x_n T g_i}{\sum_{i=1}^n T g_i} \quad y_M = \frac{\sum_{i=1}^n y_n T g_i}{\sum_{i=1}^n T g_i} \tag{23}$$

Kde  $T$  představuje hodnotu pixelu v analyzovaném okně (tj. 0 nebo 1),  $n$  je počet pixelů v okně a  $g_i$  je index pozice pixelu v daném okně (tj.  $x_i, y_i$ ).

V prostředí Matlab je možné celý algoritmus popsat v následujících bodech:

- 1) Převod obrazu do stupňů šedi pomocí funkce *rgb2gray* a následně na binární obraz podle nastavené prahové hodnoty - funkce *im2bw*

- 2) Nalezení spojitých oblastí v binárním obraze (segmentace) – funkce *bwconncomp*
- 3) Výpis informací o nalezených oblastech do proměnné *stats* pomocí funkce *regionprops* ('Area', 'ConvexArea'). 'Area' vypíše počet pixelů v oblasti, 'ConvexArea' vypíše počet pixelů v konvexní obálce oblasti.
- 4) Výběr oblastí, které mohou představovat referenční značku na základě prvních tří výše zmíněných kritérií pomocí následujícího cyklu:

```
for k = 1:length(stats)
    if ((stats(k).Area / stats(k).ConvexArea) > Convar
        & stats(k).Area > SmallArea
        & stats(k).Area < BigArea)
        Idx2 = horzcat(Idx2, k);
    end;
end;
```

- 5) Výpis informací u oblastí, které splnily podmínky do proměnné *s* pomocí funkce *regionprops* ('Orientation', 'MajorAxisLength', 'MinorAxisLength', 'Eccentricity', 'Centroid', 'Area', 'ConvexImage', 'ConvexArea')
- 6) Nalezení polohy hranových bodů každé oblasti a výpočet polohy těžiště vůči souřadnému systému v levém horním rohu snímku:

```
phi = linspace(0,2*pi,50); * vytvoří vektor, který dělí číslo 2pi na 50 stejných dílů
cosphi = cos(phi);
sinphi = sin(phi);

for k = 1:length(s)
    xbar = s(k).Centroid(1);
    ybar = s(k).Centroid(2);
    a = s(k).MajorAxisLength/2;
    b = s(k).MinorAxisLength/2;
    heta = pi*s(k).Orientation/180;
    R = [ cos(theta)  sin(theta)
          -sin(theta)  cos(theta)];
    xy = [a*cos(phi); b*sin(phi)];
    xy = R*xy;
    x = xy(1,:) + xbar;
    y = xy(2,:) + ybar;
end
```

- 7) Porovnání oblastí z hlediska posledního zmíněného kritéria - poměru počtu pixelů eliptické oblasti počítané z poloos původní oblasti vůči počtu pixelů v původní oblasti, pomocí následujícího cyklu:

```
if ((pi*a*b)/(s(k).Area)) < ElipseParam
    plot(x,y,'r','LineWidth',2);
end;
```

## 5.4 Návrh metody detekce hran

Metoda detekce hran navržená je založena na předpokladu, že díky jednoduchému rotačnímu tvaru výkovků, je přibližná poloha hledaných hran předem známá. S ohledem na charakter analyzovaného obrazu byl navržen algoritmus více krokové detekce, jehož hlavní kroky jsou shrnuty v následujících bodech:

- 1) Proměření polohy konců výkovku a stanovení mezí pro detekci
- 2) Základní detekce podélných hran
- 3) Nalezení počátečních bodů pro opravu chybně detekovaných hranových bodů
- 4) Oprava chybně detekovaných hranových bodů
- 5) Detekce hran na eliptických koncích výkovku a určení konců výkovku

Celá detekce byla rozdělena do tří algoritmů, které na sebe funkčně navazují. Jsou to:

- *Init Detection (krok 1)*
- *Main detection 1 (krok 2, 3 a 4)*
- *Main detection 2 (krok 5)*

Funkce každého algoritmu je podrobně popsána v následujících kapitolách. Základními nástroji, které byly v algoritmech použity, jsou:

- **Mediánový filtr**  
Mediánový filtr zajistí odolnost vůči impulznímu šumu, který je v ploše výkovku reprezentován okujemi apod.
- **Prahování**  
Na základě stanoveného prahu v kombinaci s mediánovým filtrem jsou nalezeny přibližné polohy hranových bodů
- **Jednosměrné hledání gradientu v oblasti hran výkovku**  
Finální poloha hranových bodů je nalezena jako maximální gradient v blízké oblasti přibližně nalezených bodů
- **Kontrola návaznosti detekovaných pixelů na hranách**  
Eliminuje chybně nalezené hranové body, kontrolou polohy okolních bodů
- **Vyhlazení nalezených hran**  
Upraví polohu nalezených hranových bodů interpolací pomocí zvolené metody vyhlazení.

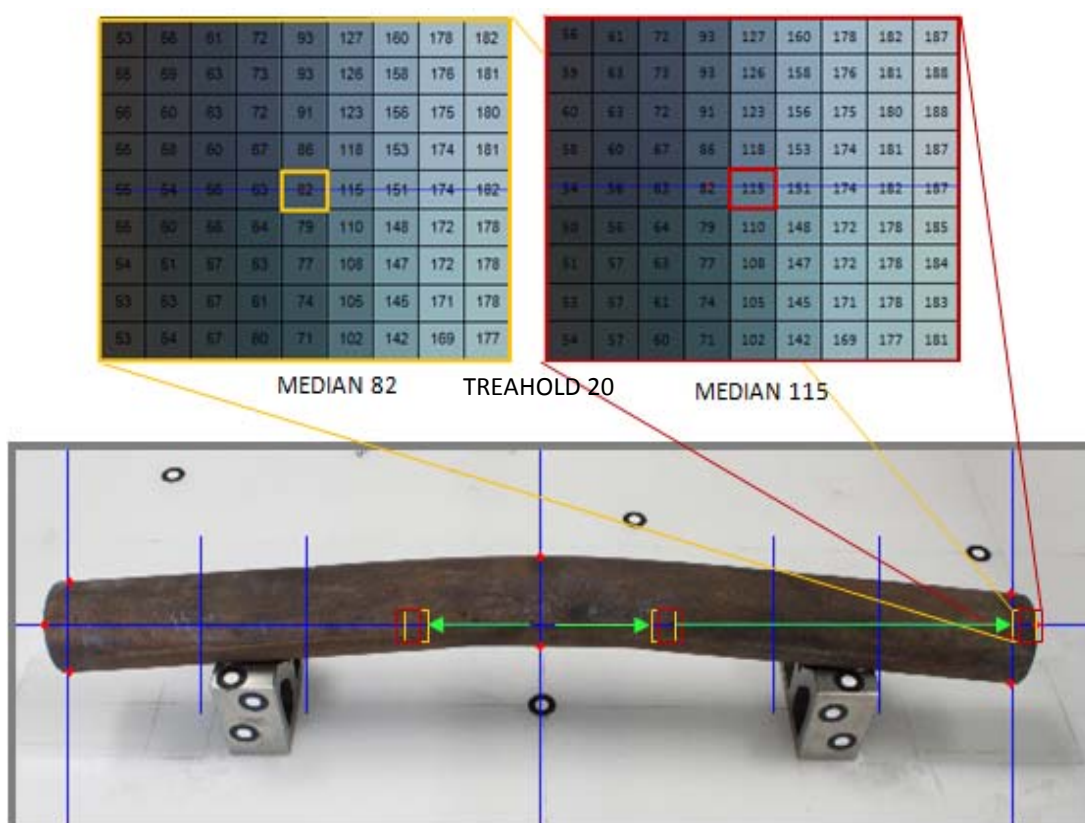
### 5.4.1 Algoritmus iniciální detekce (Init Detection)

Iniciální detekce slouží k nalezení počátku a konce výkovku. Cílem je dosáhnout vysoké spolehlivosti nalezení správné hrany, nikoli vysoké přesnosti. Detekce tedy musí být odolná zejména vůči impulznímu šumu v oblasti uvnitř výkovku. Nalezené body slouží k automatickému nastavení hranice pro hlavní detekci na podélných hranách – viz dlouhé modré úsečky na obr. 5-8. Vzdálenost odsazení hranic od nalezených bodů je v softwarovém rozhraní nastavitelná. Stejně jako šířka a poloha hranic, mezi nimiž se nacházejí v-bloky (viz krátké modré úsečky na obr. 5-8). V těchto oblastech detekce na spodní hraně neprobíhá (viz kapitola 5.4.1). Celý algoritmus se nachází v příloze na str. P4).

Algoritmus iniciální detekce je založen na porovnání mediánu dvou oken, které se pohybují horizontálním směrem od středu snímku ke koncům výkovku. Velikost čtvercového okna je nastavitelná v uživatelském rozhraní (viz parametr *Setup median filter width*, viz kapitola 5.7.2). Hranový bod je nalezen, pokud dojde k překročení



prahové hodnoty, která je také nastavitelná v uživatelském rozhraní (viz parametr *Setup threshold*). Má-li výkovek velký průhyb a současně malý průměr může nastat situace, kdy horizontální středová osa snímku, po níž se mediánová okna pohybují, přímo neprotíná eliptický konec výkovku, ale podélnou hranu. V tomto případě není hranový bod nalezen, neboť se medián při průchodu okna přes podélnou hranu s mírným sklonem mění postupně. Tato situace byla ošetřena změnou výšky horizontální linie, po níž okno postupuje. Pokud není hranový bod nalezen, poloha výchozího bodu se posunuje vždy střídavě o kladné a záporné násobky 10 pixelů a hledání pokračuje na nových horizontálních liniích, dokud není bod nalezen.



Obr. 5-8: Schéma algoritmu iničiální detekce hran.

Experimentální měření vzorků ohřátých na vysokou teplotu ukázala, že vyšší odolnost vůči impulznímu šumu zajistí větší vzdálenost mediánových oken. V případě měření vzorků v nezahřátém stavu postačovala původně nastavená vzdálenost 1 pixel. U vzorků s vysokou teplotou jsou změny intenzity způsobené okujemi mnohem výraznější. Vzdálenost mediánových oken byla nastavena na šířku jednoho okna. Díky tomu je možné použít několikanásobně vyšší prahovou hodnotu.



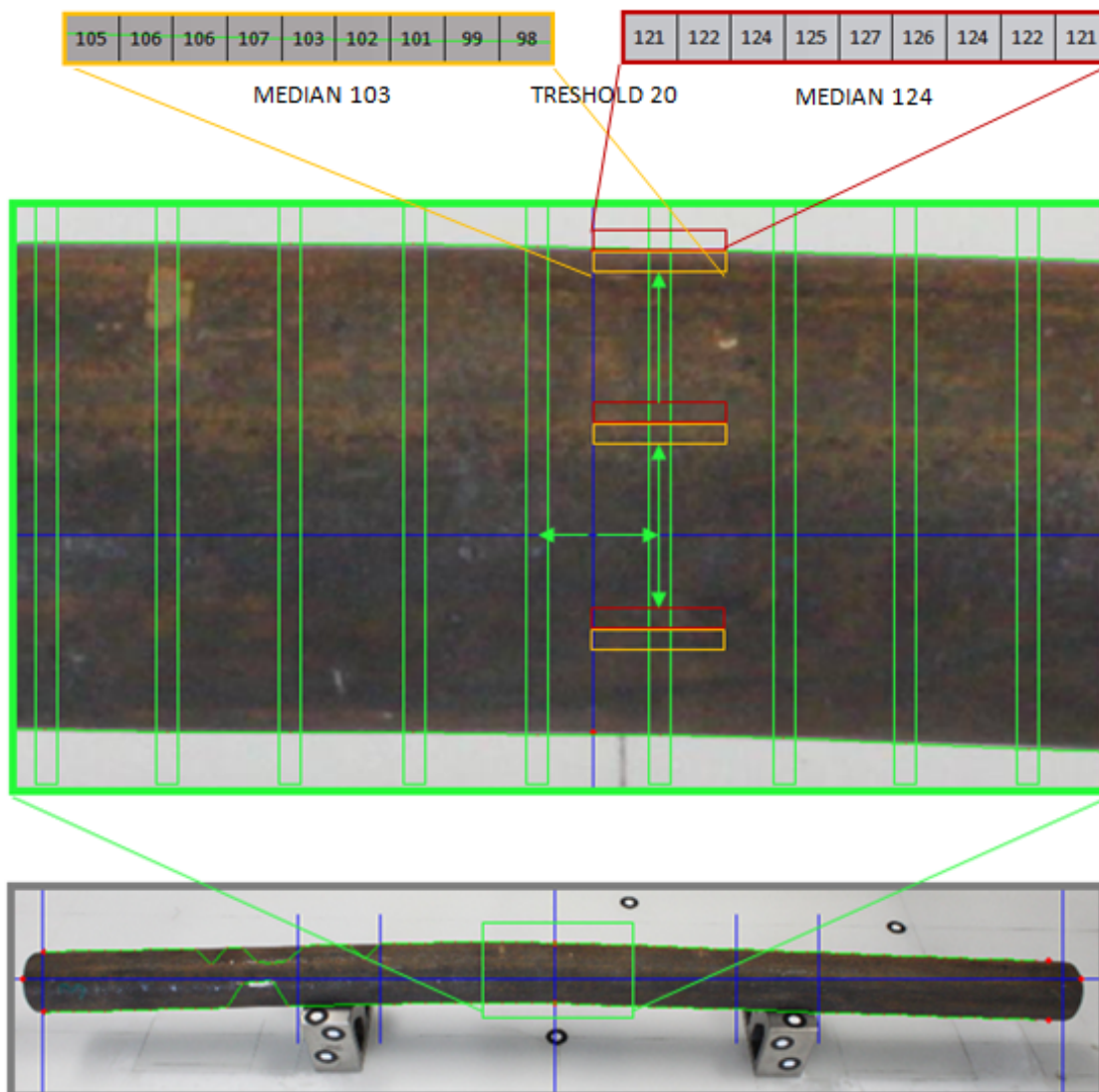
Obr. 5-9: Výsledek algoritmu iničiální detekce na zahřátém výkovku. I přes velmi výrazné okuje je při vhodném nastavení nalezena hledaná hrana (prahová hodnota 145, šířka mediánového okna 16 pixelů).

#### 5.4.2 Algoritmus hlavní detekce (Main Detection 1)

Cílem hlavní detekce je nalezení podélných hran na výkovku. V tomto případě je snaha o co nejpřesnější nalezení hrany (v pixelovém rozlišení). Algoritmus byl rozdělen do několika fází:

- **1. fáze - Nalezení hranových bodů**

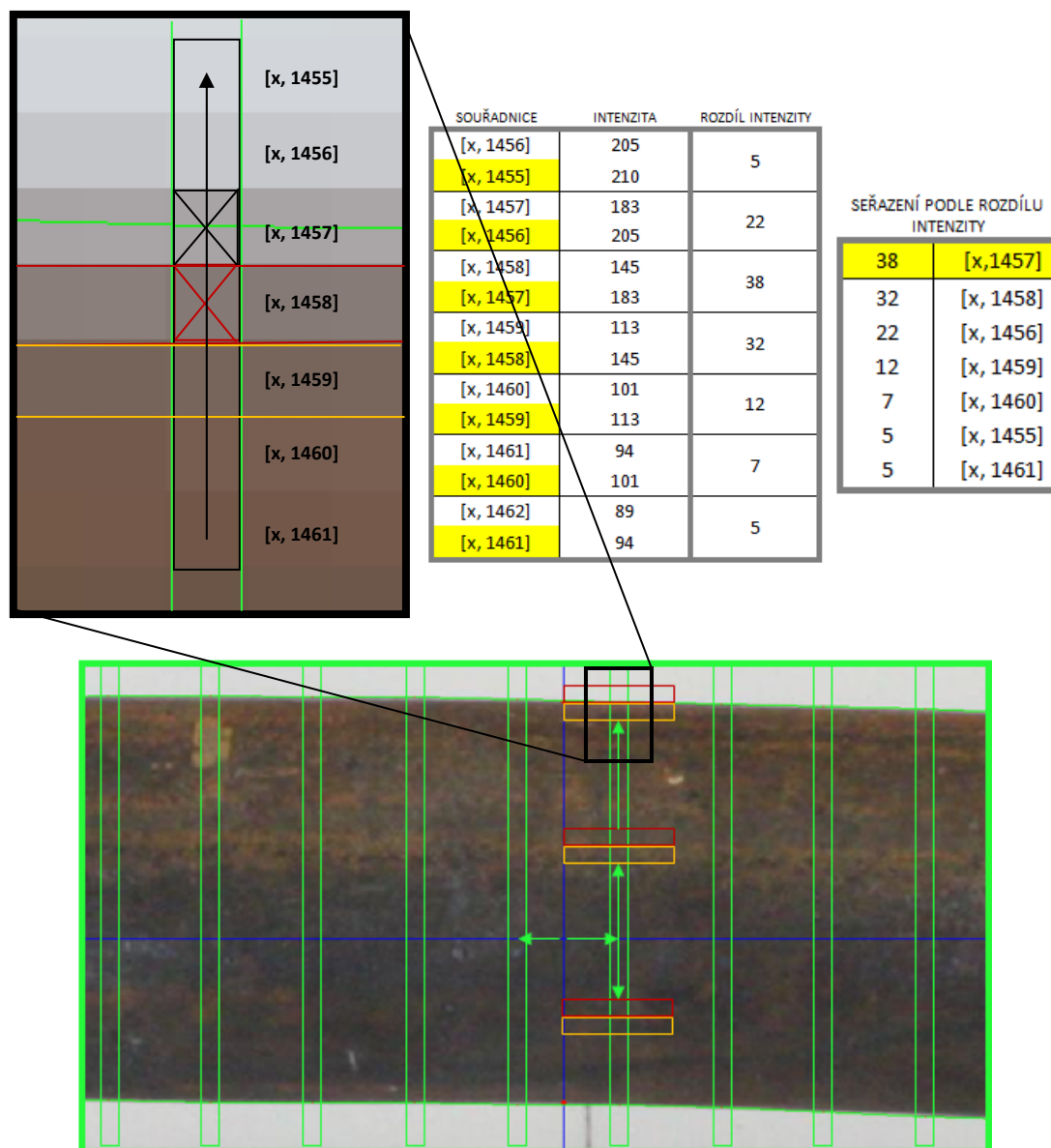
Algoritmus prohledává vertikální řezy, jejichž vzdálenost je možné měnit v uživatelském rozhraní. V každém řezu se pohybují dvě horizontální plovoucí okna směrem od horizontální osy snímku k vnějším okrajům. Obě okna jsou vzájemně posunuta vertikálně o jeden pixel. Z pixelů v každém okně se počítá medián. Následně se počítá rozdíl mediánů z obou oken a hodnota tohoto rozdílu se porovnává s prahovou hodnotou. Pokud rozdíl překročí prahovou hodnotu, prostřední pixel v prvním okně je označen jako hranový. V této fázi jsou nalezené body ovlivněny šířkou mediánového oka a velikostí prahové hodnoty. Pokud je nastavena nižší prahová hodnota a v oblasti řezu se nachází výraznější plochy s nižší intenzitou, může být hrana nesprávně identifikována uvnitř výkovku. Naopak při vyšších prahových hodnotách a rozmazané hraně výkovku může algoritmus hranu přejít a pokračovat v hledání mimo výkovek. Potom je buď nalezen hranový bod nesprávně, nebo vůbec. V druhém případě je hledání zastaveno podmínkou v blízkosti konce snímku. Chybně nalezené hranové body jsou následně opraveny v třetí fázi detekce (obr. 5-12 a 5-13).



Obr. 5-10: Schéma první fáze hlavní detekce – hledání hranových bodů po délce výkovku.

- **2. fáze – Úprava polohy hranových bodů**

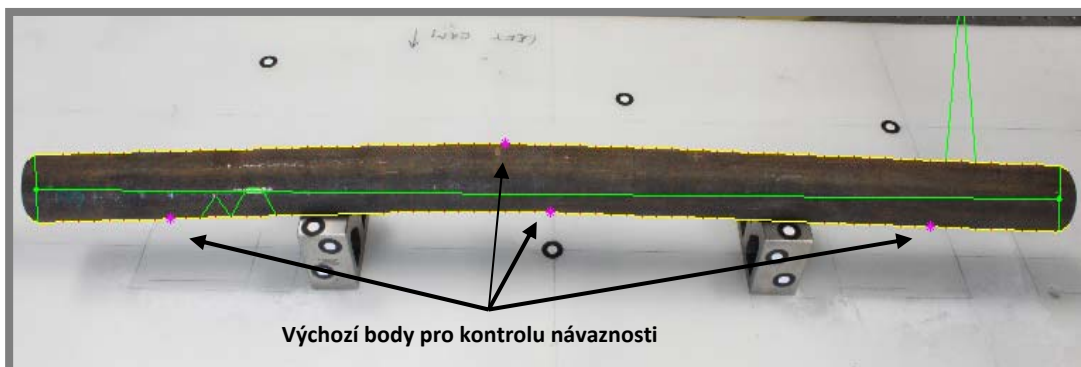
Ve druhé fázi detekce probíhá úprava polohy každého nalezeného hranového bodu. Na každý bod je vloženo statické okno o velikosti 1x7 pixelů tak, že původní bod leží uprostřed okna. V tomto okně je počítán rozdíl intenzity mezi sousedními pixely. Následně jsou rozdíly seřazeny podle velikosti. Nový hranový bod má souřadnici která odpovídá prvnímu ze dvou sousedních pixelů, u kterých byl zjištěn největší rozdíl intenzity (ve skutečnosti by ležela hrana mezi těmito pixely). Tento krok zajistí nezávislost nalezených hran na uživatelem zvolené prahové hodnotě a šířce mediánového okna. Schéma tohoto algoritmu je na obr. 5-10.



Obr. 5-11: Schéma druhé fáze hlavní detekce – zpřesnění polohy nalezených hranových bodů.

• **3. fáze – Nalezení počátečních bodů pro kontrolu návaznosti**

V této fázi je třeba najít několik bodů, které skutečně leží na hraně výkovku. Tyto body slouží jako výchozí body pro algoritmus, který kontroluje spojitost nalezených hranových bodů. Navržená metoda pro nalezení správně detekovaných hranových bodů vychází z předpokladu, že takový bod bude s největší pravděpodobností ležet v nejdelší spojitě oblasti, tzn. v nejdelší oblasti kde je poloha y-íonové souřadnice hranových bodů přibližně stejná. Algoritmus nejdříve porovnává y-íonovou souřadnici sousedních hranových bodů. Pokud je rozdíl mezi sousedními body vyšší než stanovený práh, uloží polohu bodu a pokračuje v kontrole. Tímto rozdělí hranové body do pomyslných podoblastí s přibližně stejnou souřadnicí y. Na spodní hraně, která je rozdělena na tři části, z důvodů přítomnosti prizmat, probíhá tento proces na všech třech částech nezávisle. Následuje porovnání délky oblastí. Hledané body jsou definovány jako body, které leží nejblíže prostřednímu řezu v nejdelší spojitě oblasti. Ve snímku jsou zobrazeny jako růžové značky hvězdy.



**Obr. 5-12:** Finální zobrazení výsledků hlavní detekce: Žluté hrany s červenými tečkami představují výsledek kompletního algoritmu. Zelené hrany jsou výsledkem první fáze algoritmu. Růžové hvězdy představují polohu bodu, od kterého jsou původní hranové body z hlediska návaznosti (čtvrtá fáze algoritmu). Zelené úsečky jsou výsledkem detekce na eliptických koncích výkovku, který je popsán v kapitole 5.4.3.

- **4. fáze – Oprava chybně nalezených bodů**

První část tohoto algoritmu je podobná jako v případě 3. fáze celé detekce. Algoritmus hledá rozdíly mezi y-novou souřadnicí sousedních bodů. V tomto případě však algoritmus probíhá směru od růžové značky hvězdy na obě strany. Pokud tedy dojde k překročení limitu na y-ovou souřadnici, je již známo, který ze sousedních bodů leží na hraně a který je třeba opravit. V řezu, kde byl nalezen chybný bod se provede oprava pomocí algoritmu, který byl popsán jako fáze 2, s tím rozdílem, že statické okno je vloženo do řezu tak, že jeho prostřední bod má souřadnici y stejnou jako již zkontrolovaný sousední bod. Výsledek je patrný z obr. 5-12 (zelené hrany jsou původně nalezené a žluté jsou opravené hrany) a 5-13 (modré hrany jsou původně nalezené a bílé jsou opravené). Růžová značka hvězdy v obrázcích ukazuje výchozí bod pro opravu kontrolu návaznosti. Vzhledem k předpokladu různých defektů a nerovností na povrchu výkovku, je na závěr nutné na nalezené hrany aplikovat vyhlazení – viz kapitola 5.4.4.

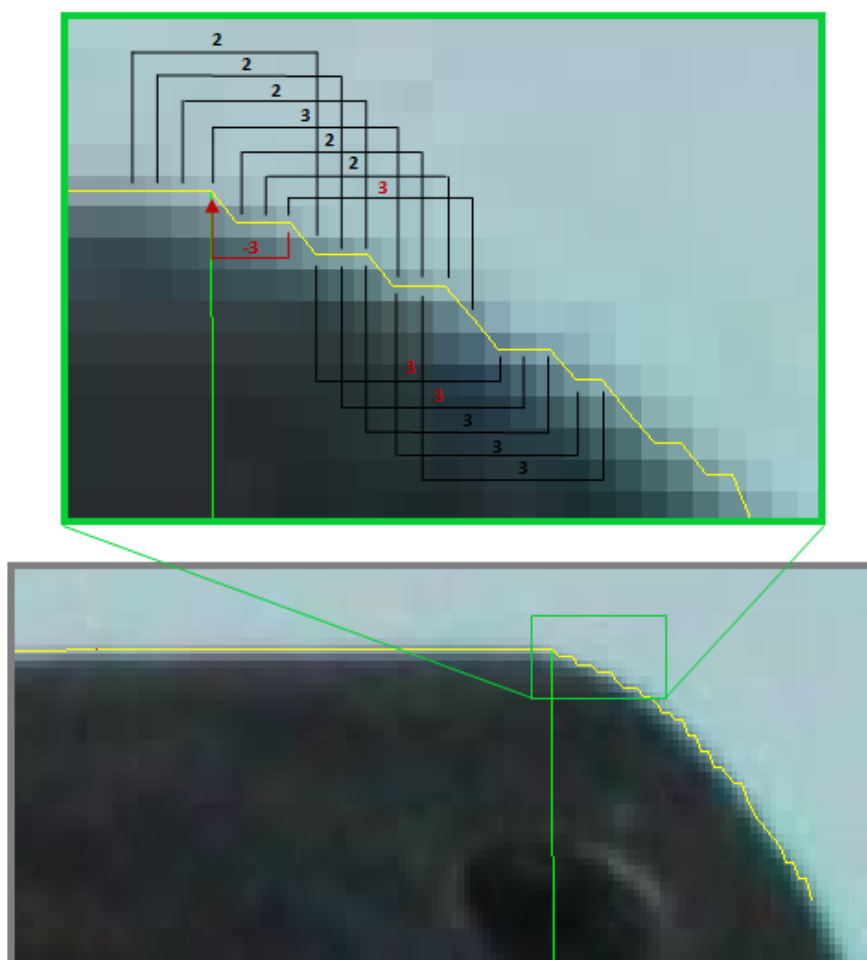


**Obr. 5-13:** Zobrazení výsledku 1. (modré hrany) a 2. (bílé hrany) fáze hlavní detekce včetně výchozího bodu pro kontrolu návaznosti (růžová hvězda). Je zřejmé, že z důvodu nastavené nízké prahové hodnoty bylo velké množství bodů v první fázi detekce nalezeno chybně uvnitř výkovku. Druhý krok zajistil správnou opravu všech chybných bodů..

### 5.4.3 Algoritmus detekce na eliptických koncích (Main Detection 2)

Cílem tohoto algoritmu je nalezení přibližné polohy, kde podélná hrana přechází v eliptický konec. Nejdříve je tady nutné najít v této oblasti hranové body. Algoritmus je rozdělen na čtyři části, protože probíhá odděleně na obou stranách výkovku na spodní a horní hraně. Detekce každé ze čtyř částí navazuje na souřadnici krajního hranového bodu nalezeného v hlavní detekci a postupuje směrem k eliptickému konci. Oblast hledání hran má ve směru x omezenou délku na 3/4 vzdálenosti od krajního bodu na podélné hraně k bodu detekovanému v iniciální detekci.

První část algoritmu je stejná jako v druhé fázi hlavní detekce, pouze s tím rozdílem že okno se posouvá ve směru x po jednom pixelu a ve směru y je okno umístěno tak, že prostřední bod okna leží na souřadnici, která byla označena jako hranová v předchozím řezu. Tímto způsobem jsou nalezeny hranové body v oblasti, kde podélná hrana přechází v eliptický konec. Následně je na každé ze čtyř hran hledán bod zlomu. Opět je porovnávána y-ová poloha nalezených bodů. V tomto případě je nejdříve počítán rozdíl mezi polohou  $i$ -tého pixelu a  $i+7$  pixelu. Na základě testování bylo stanoveno, že hrana je nalezena pokud rozdíl několika sousedních analyzovaných dvojic je větší jak tři (rozdíl pět byl použit v případě výkovků s vysokou teplotou). Nalezení zlomových bodů slouží jako skutečná hranice pro detekci na podélných hranách (viz obr. 5-14).



Obr. 5-14: Schéma detekce hran na eliptických koncích výkovku.

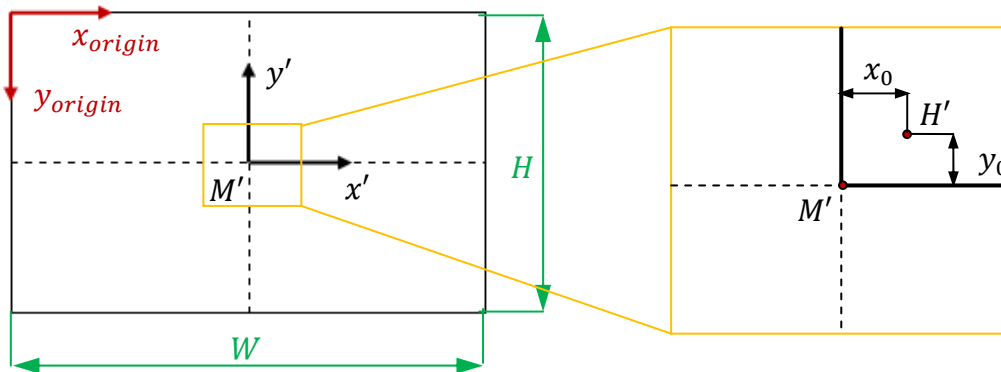
#### 5.4.4 Finální úprava nalezených hran

Posledním krokem, který se týká detekce hran ve snímcích, je doplnění chybějících bodů v oblasti prizmat na spodní hraně a vyhlazení obou hran. Doplnění bodů bylo jednoduše provedeno pomocí 1D interpolace chybějících y-ových souřadnic, podle x-ových souřadnic všech řezů. V softwaru Matlab byla použita funkce *Interp1* a metoda *Spline*. Vyhlazení y-ových souřadnic na obou hranách bylo následně provedeno pomocí funkce *Smooth*. Volba vhodné vyhlazovací metody a velikost vyhlazení může mít markantní dopad na výsledky. V softwaru Matlab je možné použít některou z následujících metod: klouzavý průměr (moving), Savitzky-Golay filtr (sgolay), lokální regrese polynomu 1. nebo 2. řádu pomocí vážené metody nejmenších čtverců (lowess, loess), nebo její robustní varianta, která eliminuje lokální extrémny (rlowess, rloess).

V současné verzi navrženého softwaru byla použita metoda klouzavého průměru (moving) na detekované hrany a metoda Savitzky-Golay (sgolay) na výslednou osu. Metoda Savitzky-Golay je obdobou metody klouzavého průměru (moving), kde koeficienty filtru jsou vypočteny pomocí regrese polynomického modelu daného řádu metodou nejmenších čtverců. Stupeň vyhlazení byl použit 0.15 a stupeň polynomu 2. V průběhu návrhu aplikace byly testovány také ostatní možnosti vyhlazování. Kromě metody sgolay dávala při vhodném velmi podobné výsledky metoda (rlowess). Při vhodném nastavení byly výsledky různých metod vyhlazování velmi podobné, případně se lišily v řádech setin mm, což je z důvodu následného zaokrouhlování nepodstatné. Velký vliv na výsledky má spíše velikost vyhlazení.

### 5.5 Prostorová orientace – složení informací ze snímků do 3D

Prostorová orientace je proces transformace bodů extrahovaných z jednotlivých snímků do skutečného měřítka v milimetrech a do světového souřadného systému. Ve snímcích jsou souřadnice nalezených hran vztaženy k souřadnému systému, který leží v levém horním rohu (viz obr. 5-15 [ $x_{origin}, y_{origin}$ ]). Jedná se o souřadný systém pevně daný v programovacím prostředí softwaru Matlab pro 2D matice. Z tohoto souřadného systému, je třeba přenést data nejdříve do souřadného systému snímku následně do souřadného systému kamery a nakonec do světového souřadného systému. Poloha a orientace světového souřadného systému se volí tak, aby logicky korespondoval s měřeným objektem nebo scénou. Počátek tohoto souřadného systému byl zvolen symetricky mezi v-bloky na desce pracovního stolu. Osa  $Z$  je kolmá k pracovní desce ( $+Z$  směrem od stolu nahoru), kladná osa  $Y$  směřuje k pravé kameře a osa  $X$  směřuje podélně s osou výkovku.



Obr. 5-15: Souřadný systém snímku.

#### 5.5.1 Prostorová orientace dat extrahovaných ze snímků

Uvažujme označení souřadného systému snímku  $\mathbf{x}' = [x', y']$  souřadného systému kamery  $\mathbf{x}' = [x', y', z']$  a světového souřadného systému  $\mathbf{X} = [X, Y, Z]$ . Následující rovnice popisují transformaci hranového bodu ze souřadného systému v rohu snímku do souřadného systému snímku (podle vztahu (2)):

$$x'_{Edge} = \left( x_{origin_{Edge}} + \frac{W}{2} \right) \cdot pix_{size}W - x_0 \quad (24)$$

$$y'_{Edge} = \left( -y_{origin_{Edge}} + \frac{H}{2} \right) \cdot pix_{size}H - y_0 \quad (25)$$

$H$  a  $W$  je počet pixelů ve snímku (podle anglického Hight a Width).  $pix_{size}H$  a  $pix_{size}W$  je velikost pixelu v odpovídajícím směru a  $x_0, y_0$  jsou posuny skutečného středu snímku vypočtené pomocí Přímé lineární transformace. V souřadném systému kamery mají hranové body následující podobu (viz kapitola 2.4.1):

$$\mathbf{x}'_{Edge} = [x'_{Edge}, y'_{Edge}, -c]^T \quad (26)$$



Kde  $c$  je konstanta kamery. Transformace ze souřadného systému kamery do světového souřadného systému a správného měřítka se provádí podle rovnice (10):

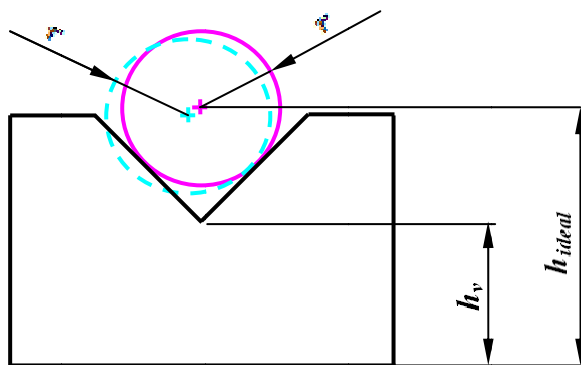
$$\mathbf{X}_{Edge} = \mathbf{T} + m\mathbf{R} \cdot \mathbf{x}'_{Edge} \quad (27)$$

Kde  $\mathbf{T}$  je vektor souřadnic středu promítání kamery,  $\mathbf{R}$  je rotační matice,  $m$  měřítko ve snímku a  $\mathbf{x}'_{Edge}$  je vektor se souřadnicemi extrahovaných bodů v souřadném systému kamery a jednotkách milimetrů.

### 5.5.2 Výpočet měřítka

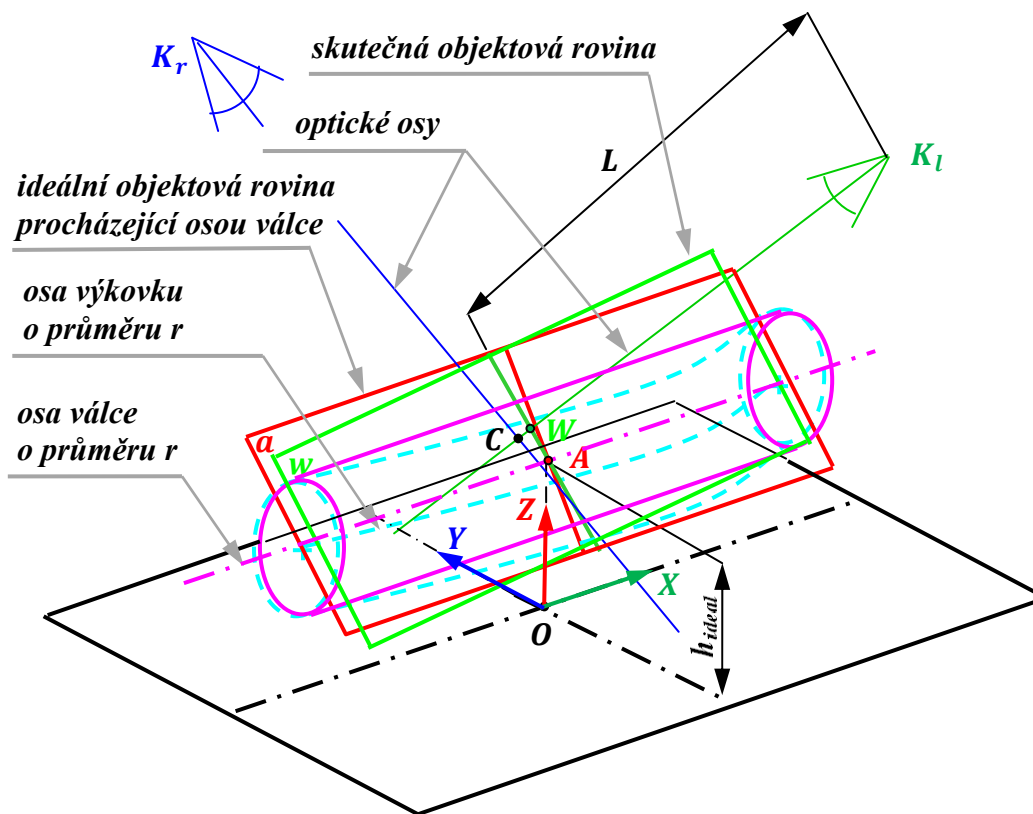
Platí-li pro výpočet měřítka vztah  $m = L/c$  (viz kapitola 2.4), potom také platí, že všechny body ležící v jedné rovině rovnoběžné s obrazovou rovinou, mají stejné měřítko. Při průmětu výkovku do obrazové roviny je třeba najít správnou vzdálenost  $L$  objektové roviny od středu promítání, v níž leží hranové body. Vzhledem k tomu, že výkovek není válec a jeho osa je prostorová křivka, není možné najít takovou objektovou rovinu, v níž by měly všechny body promítnuté do snímku stejné měřítko. Při aplikaci konstantního měřítka na všechny hranové body výkovku tedy dochází k aproximaci. Jednotné měřítko musí být voleno tak, aby chyba vlivem aproximace byla co nejmenší. Výpočet měřítka byl založen na představě, že existuje válec, který má stejný průměr jako výkovek a leží ve stejných prizmatech (viz obr. 5-16). Výšku osy tohoto válce je možné vypočítat ze známé geometrie prizmat a průměru výkovku:

$$h_{ideal} = h_v + r \cdot \sqrt{2} \quad (28)$$



Obr. 5-16: Odvození polohy ideální osy výkovku pomocí válce se stejným poloměrem  $r$  na základě známé geometrie v-bloků.

Uvažujme, že světový souřadný systém je umístěn v bodě  $O$  (viz obr. 5-17) - leží symetricky mezi v-bloky na desce pracovního stolu (v reálných podmínkách na zemi). Osa  $Z$  je kolmá k pracovní desce (+ $Z$  směrem od stolu nahoru), kladná osa  $Y$  směřuje k pravé kameře a osa  $X$  směřuje podélně s výkovkem.



**Obr. 5-17:** Schéma znázorňující polohu ideálního válce (růžová) a skutečného výkovku (tyrkysová), vůči světovému souřadnému systému.  $h_{ideal}$  představuje výšku ideálního válce, který leží ve stejných prizmotech jako výkovek a má stejný průměr. Teoretický průsečík optických os je označen jako  $C$ . Objektové roviny jsou označeny jako  $a$  a  $w$ ; průsečík optické osy s rovinou  $w$  je označen jako  $W$ .

Průsečík teoretické osy s rovinou  $XZ$  je označen jako  $A$ , jeho souřadnice jsou  $[0, 0, h_{ideal}]^T$ . Díky kalibraci je poloha obou kamer  $[X_0, Y_0, Z_0]^T$  a orientace  $\omega, \varphi, \kappa$  známá. Středů promítání kamer jsou označeny jako  $K^r$  a  $K^l$  (hodnoty pro levou kameru mají index  $l$  a pro pravou kameru index  $r$ ). V nejjednodušším případě by výpočet měřítka vycházel z předpokladu, že horizontální osy obou kamer jsou rovnoběžné a  $X_0^l = X_0^r = , Y_0^r = -Y_0^l , Z_0^l = Z_0^r$  a  $\varphi^r = \varphi^l = \kappa^l = \kappa^r = 0$  a  $\omega^l = -\omega^r$ . Průsečík optických os  $C$  by ležel na ose  $Z$  světového souřadného systému a hledaná objektová vzdálenost  $L$  by byla rovna vzdálenosti průsečíku optických os od středu promítání kamery. Všechny hranové body by tedy ležely v rovině  $a$ . Tyto podmínky je možné dosáhnout pouze při velmi přesné montáži kamer, která by byla provedena v reálných podmínkách, kde se předpokládá stacionární poloha kamer. Vzhledem k tomu, že testovací měření s DSLR musí probíhat na různých místech (měření vzorků vysoké teploty, měření vzorků pokojové teploty atd.), není možné provést před každým měřením přesnou montáž kamer. Zjednodušení podmínek by v takovém případě způsobovalo chyby na měřítku, jejichž důsledkem by mohly být velké chyby měření. Ve skutečnosti se s nejvyšší pravděpodobností optické osy vůbec neprotnou. Za přibližný průsečík je možné považovat střed spojnice, která odpovídá nejkratší vzdálenosti mezi osami v prostoru. Tento bod má obecnou polohu  $C = [C_X, C_Y, C_Z]$ . Objektovou vzdálenost

je potom možné definovat jako vzdálenost středu promítání od průsečíku optické osy s rovinou  $w$ , která je rovnoběžná s obrazovou rovinou a prochází bodem  $A$ . Hledaná vzdálenost  $L$  se vypočte podle vztahu:

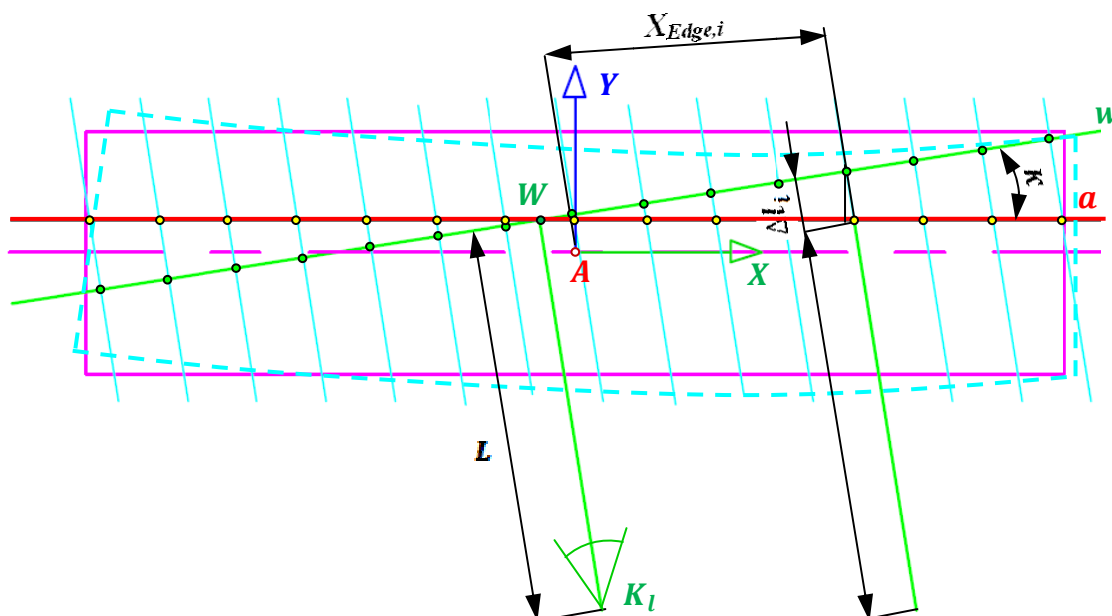
$$L = \sqrt{KW_X^2 + KW_Y^2 + KW_Z^2} \quad (29)$$

Kde  $KW_X, KW_Y, KW_Z$  je rovno:

$$\begin{bmatrix} KW_X \\ KW_Y \\ KW_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} W_X \\ W_Y \\ W_Z \end{bmatrix} \quad (30)$$

K výpočtu polohy teoretické osy je tedy třeba znát průměr výkovku. Ve fázi kontroly tvaru a rozměrů je průměr výkovku již známý. Nicméně měřicí systém by byl závislý na vstupní informaci o průměru. Tu by mohl uživatel při každém měření zadat manuálně, nebo by mohla být importována z kovacího stroje (pokud takovou informaci ve vhodné podobě má). Velikost průměru je možné automaticky měřit pomocí kamery, jejíž obrazová rovina je přibližně rovnoběžná s čelní plochou výkovku. Výkovek by musel být vložen do prizmat a opřen o čelní zarážku, tak aby poloha čela vůči přidané kameře byla známá. Následovala by analýza obrazu založená na detekci hran, proložení detekované hrany kružnicí a výpočet průměru ze známého měřítka.

Vzhledem k tomu, že cílem této práce je spíše návrh metodiky než kompletní realizace softwarového i hardwarového řešení, bude testování navrženého softwaru zjednodušeno uživatelským zadáním velikosti průměru.



**Obr. 5-18:** Horní pohled na řez výkovkem (tyrkysová) a válcem (růžová), který ilustruje hranové body ležící v objektové rovině  $w$  a korigované body v rovině  $a$ . Natočení roviny  $w$  kolem osy  $Z$  je  $\kappa$ .

### 5.5.3 Korekce perspektivního zkreslení

Body z každého snímku leží v objektové rovině  $w$ , která je rovnoběžná s obrazovou rovinou kamery, prochází bodem  $A$ , a od středu perspektivy je vzdálena  $L$ . Natočení obrazové roviny kolem osy  $Z$  však způsobuje rozdílnou perspektivu ve snímku. Na straně výkovku kde je rovina  $w$  blíž ke středu promítání, jsou vypočtené průměry největší, na opačné straně naopak menší než je jejich skutečná velikost. Z důvodu korekce perspektivního zkreslení bylo zavedeno individuální měřítko  $m_{corr,i}$ , pro každý analyzovaný řez  $i=1 \dots n$  (podle vztahu (1)):

$$m_{corr,i=1}^n = \frac{L + \Delta l_i}{c} \quad (31)$$

Kde  $\Delta l_i$  je malá korekční vzdálenost, která v každém řezu odpovídá vzdálenosti mezi rovinou  $a$  rovinou  $w$  ve směru optické osy. Uvažujme pomocný souřadný systém  $X^a$  jehož počátek leží v bodě  $A$ , a je natočený kolem osy  $X$  světového souřadného systému o úhel  $\omega$  (jeho osa  $X^a$  a  $Z^a$  leží v rovině  $a$ ). Poloha hranových bodů vůči tomuto souřadnému systému se vypočte podle následujícího<sup>16</sup>:

$$X_{Edge}^a = \begin{bmatrix} X_{Edge} \\ Y_{Edge} \\ Z_{Edge} - h_{ideal} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\omega) & \sin(-\omega) \\ 0 & -\sin(-\omega) & \cos(-\omega) \end{bmatrix} \quad (32)$$

Pomocí rotace kolem osy  $Z^a$  o úhel  $\kappa$  jsou hranové body přesunuty z roviny  $w$  do roviny  $a$ :

$$X_{Edge,corr}^a = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) & 0 \\ \sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{Edge}^a \\ Y_{Edge}^a \\ Z_{Edge}^a \end{bmatrix} \quad (33)$$

Rozdíl v poloze původních hranových bodů a korigovaných v každém řezu  $i=1 \dots n$  je roven:

$$\begin{bmatrix} \Delta l_{X,i} \\ \Delta l_{Y,i} \\ \Delta l_{Z,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{Edge,corr,i}^a \\ Y_{Edge,corr,i}^a \\ Z_{Edge,corr,i}^a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{Edge,i}^a \\ Y_{Edge,i}^a \\ Z_{Edge,i}^a \end{bmatrix} \quad (35)$$

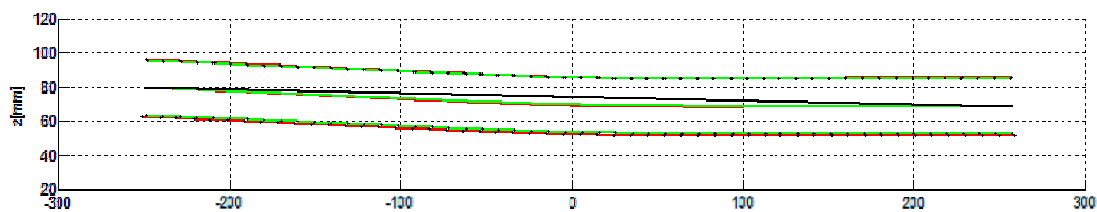
Výsledná korekční vzdálenost je tedy:

$$\Delta l_{i=1}^n = \sqrt{\Delta l_{X,i}^2 + \Delta l_{Y,i}^2 + \Delta l_{Z,i}^2} \quad (34)$$

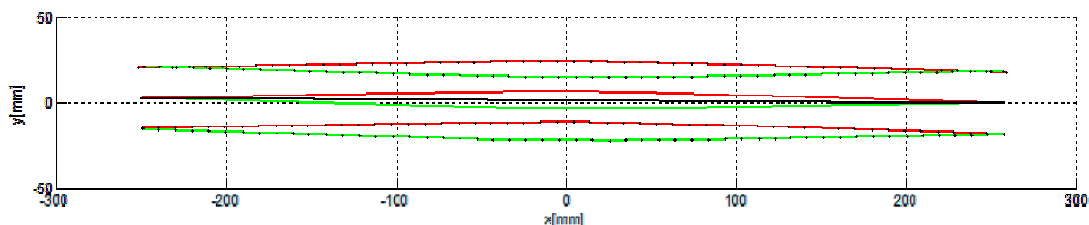
Posledním krokem je zpětná transformace z pomocného souřadného systému do světového souřadného systému:

$$X_{Edge,corr} = \begin{bmatrix} X_{Edge,corr}^a \\ Y_{Edge,corr}^a \\ Z_{Edge,corr}^a + h_{ideal} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \sin(\omega) \\ 0 & -\sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix} \quad (36)$$

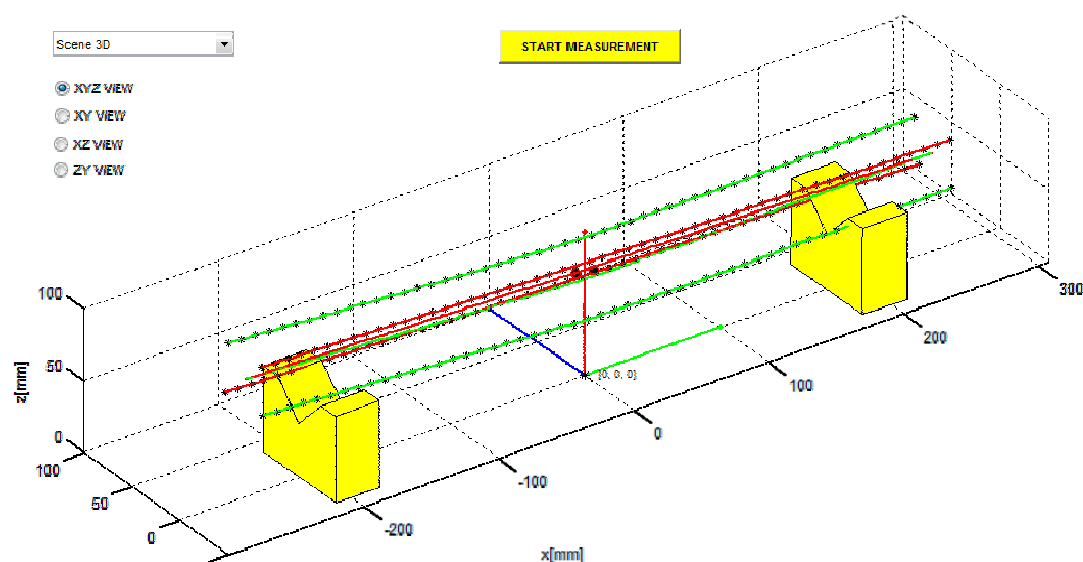
<sup>16</sup> aplikace prostorových transformací (viz kapitola 2.4.2) na jednotlivé příčné řezy, podle [32].



Obr. 5-19: Pohled na hrany výkovku vynesené do světového souřadného systému v rovině XZ.



Obr. 5-20: Pohled na hrany výkovku vynesené do světového souřadného systému v rovině XY.



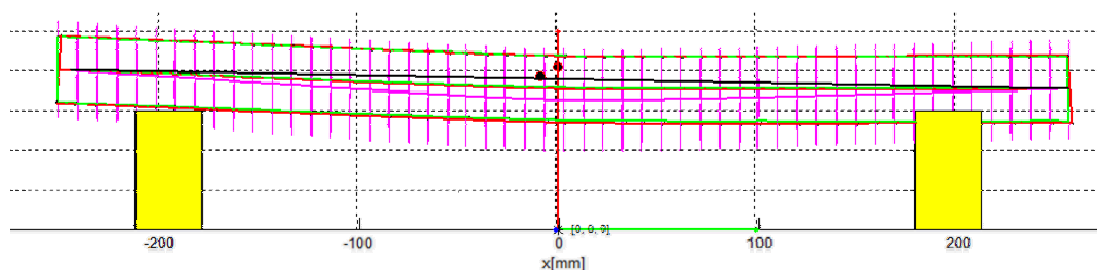
Obr. 5-21: ISO pohled na hrany výkovku vynesené do světového souřadného systému.

## 5.6 Výpočet informací o tvaru a geometrii výkovku

5.6

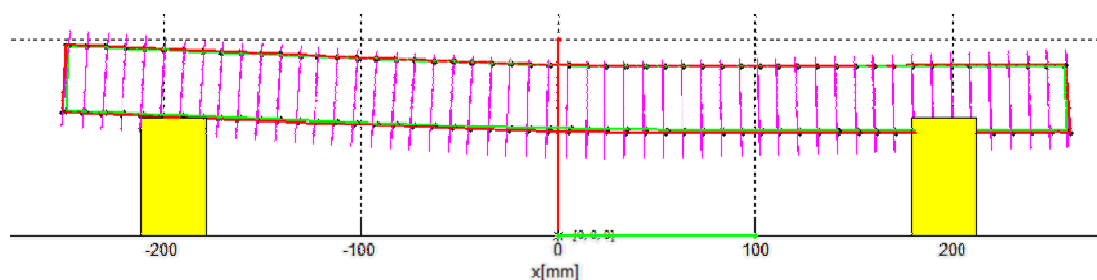
Díky prostorové orientaci leží všechny hranové body ve světovém souřadném systému. Spojením bodů, které náleží jedné hraně ve snímku, vzniknou čtyři křivky, které jsou na povrchu výkovku vzájemně pootočené zhruba o 90°. Nejjednodušším způsobem jak získat osu výkovku z těchto křivek, je proložení bodů, které náleží jednomu příčnému řezu, pomocí kružnic. V ideálním případě by však měly být řezy kolmé na osu výkovku. Z toho důvodu bylo prokládání kružnic hranovými body řešeno ve dvou krocích. V prvním kroku byly využity body z příčných řezů, které jsou rovnoběžné s rovinou yz. Prokládání kružnic bylo řešeno pomocí metody známé jako Taubin method<sup>17</sup>. Středů kružnic představují body na ose výkovku.

<sup>17</sup> Byl využit skript *CircleFitByTaubin* volně dostupný v databázi Matlab Central na <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22678-circle-fit--taubin-method>



Obr. 5-22: Boční pohled na kružnice proložené detekovanými body v rovině XZ – v prvním kroku jsou normály kružnic kolmé na rovinu YZ.

V druhém kroku jsou body na ose výkovku využity k vytvoření normálových vektorů a nových řezových rovin. Následně byly nalezeny průsečíky všech křivek s těmito rovinami a proces prokládání kružnic byl zopakován. Tento proces by mohl být řešen iteračně, dokud by změna polohy bodů na ose výkovku nebyla dostatečně malá. Jelikož se ukázalo, že natočení řezů nemá na výsledky měření zásadní vliv, byly v aktuální verzi softwaru použity pouze dva kroky.



Obr. 5-23: Boční pohled na kružnice proložené detekovanými body v rovině XZ – v druhém kroku jsou normály kružnic kolmé na osu výkovku.

### Rozměry výkovku

Délka byla vypočtena jako přímá vzdálenost mezi středem první a poslední kružnice. Průměr byl počítán jednak v každém řezu samostatně, ale také jako hodnota mediánu ze všech řezů. V jednotlivých řezech nemůže být hodnota průměru brána z výsledku prokládání kružnic, ale jako průměrná vzdálenost hranových bodů z obou snímků.

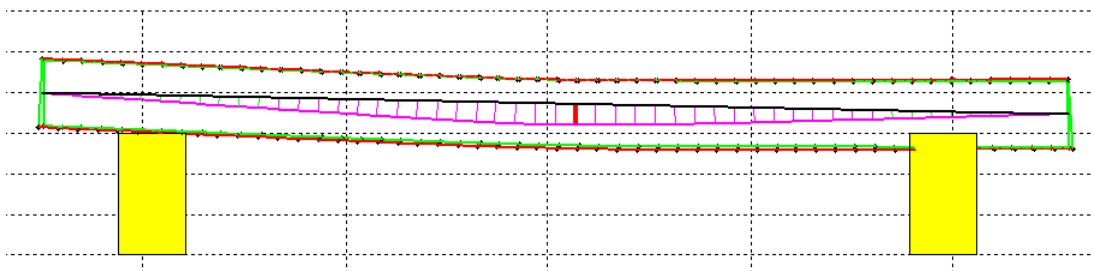
### Parametry osy

Odchylku přímosti osy je třeba vztáhnout ke konkrétní ideálně přímé ose. V této práci byly uvažovány dva přístupy:

- Porovnání s osou, která vznikne spojením středů koncových kružnic
- Porovnání s osou, která vznikne lineární regresi středových bodů všech kružnic

Velikost průhybu je v každém příčném řezu rovna vzdálenosti ideální osy od skutečné osy, tj.  $|o_{\text{ideal}} - o_{\text{real}}|$  (viz obr. 5-24 a 5-26)<sup>18</sup>. Úhel natočení směru průhybu je počítán na základě kvadrantu, ve kterém se nachází skutečná osa výkovku vůči souřadnému systému, který je umístěn na ideální ose (viz obr. 5-25).

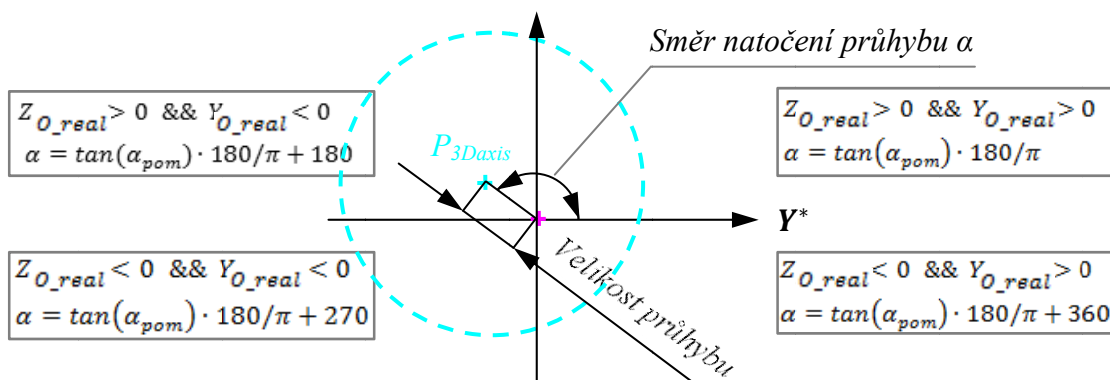
<sup>18</sup> Výpočet vzdálenosti dvou křivek resp. přímky a křivky byl řešen pomocí skriptu *dist2curves* volně dostupného v Databázi Matlab Central na <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34869-distance2curve>.



Obr. 5-24: Vzdálenost osy výkovku od ideální osy, která vznikne spojením koncových kružnic.

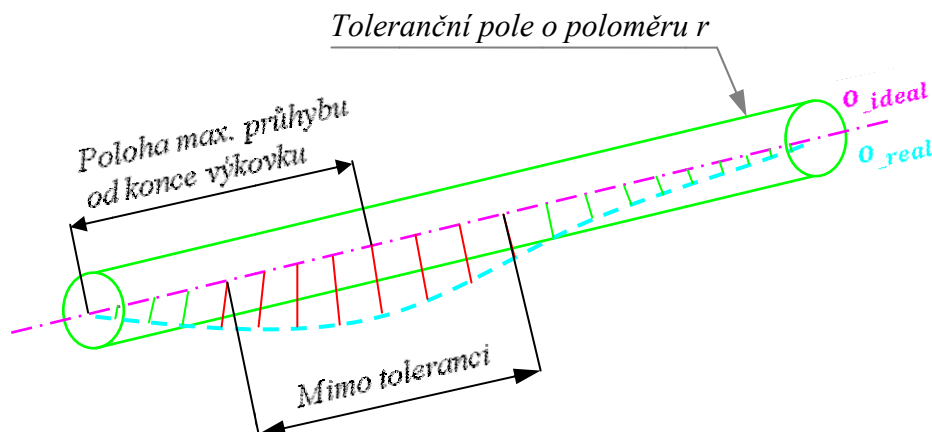
Vztah pro výpočet úhlu natočení průhybu výkovku v daném řezu.

$$\alpha_{pom} = \frac{Z_{PO_{real}} - Z_{PO_{ideal}}}{Y_{O_{real}} - Y_{O_{ideal}}} \quad (37)$$



Obr. 5-25: Směr natočení průhybu a velikost průhybu osy výkovku.

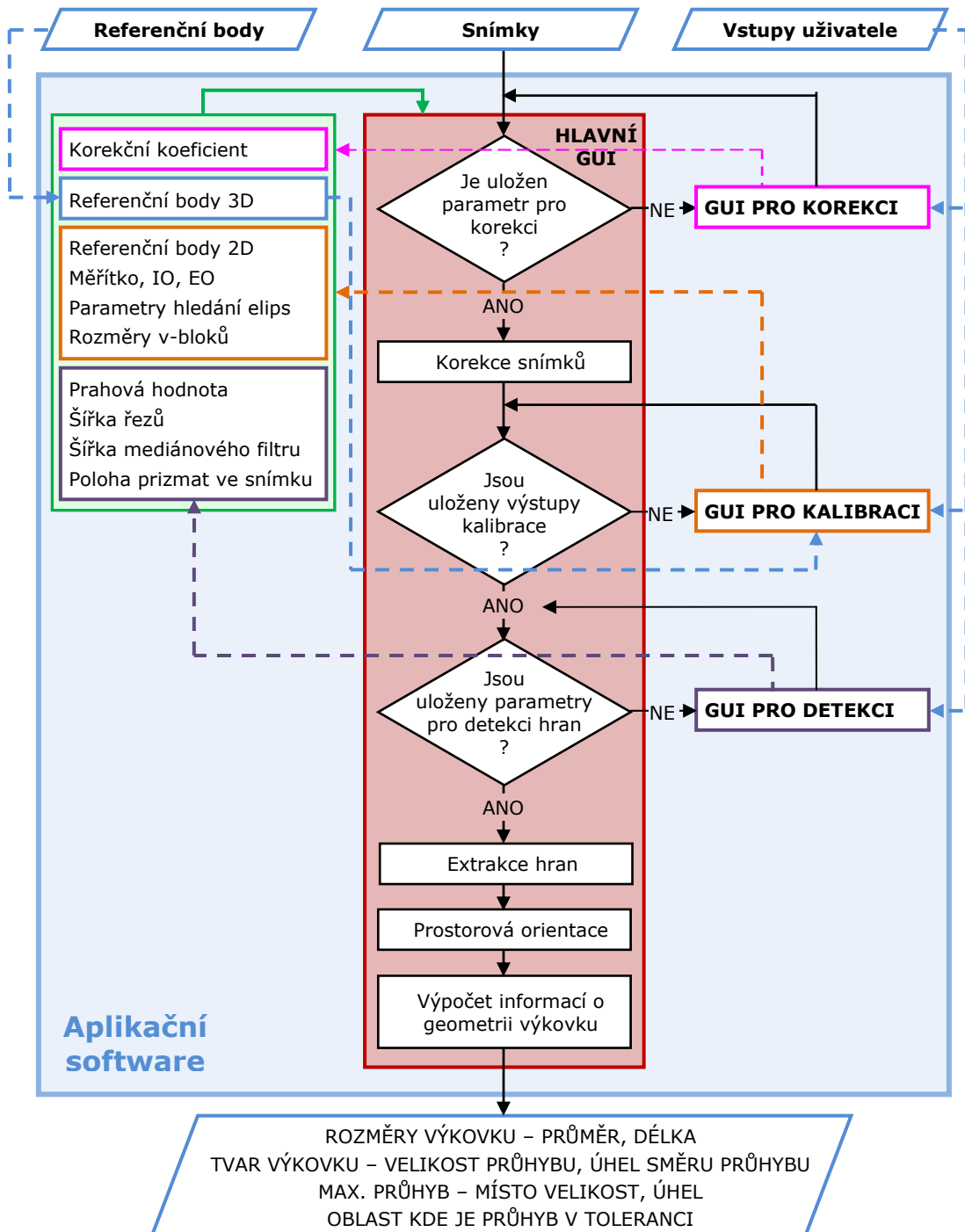
V aplikaci je také možné zadat velikost tolerančního pole, které představuje válcovou obálku ideální osy. Software graficky znázorní oblast, v níž osa překračuje toleranci a vypíše její polohu vůči konci výkovku, včetně místa maximálního průhybu a jeho velikosti.



Obr. 5-26: Hodnocení tvaru osy z hlediska tolerance přímosti a polohy maximálního průhybu.

### 5.7 Softwarová realizace navržené metodiky v prostředí Matlab

Schéma na obrázku 5-27 ukazuje strukturu navrženého aplikačního softwaru. Aplikace je složena ze čtyř uživatelských rozhraní (GUI), které umožňují vstupy uživatele do procesu kalibrace, detekce hran a korekce zkreslení snímků. Všechny nastavené a vypočtené parametry se ukládají do externího souboru, z něhož se následně opět načítají do příslušných GUI po spuštění. Na vstupu aplikace musejí být vždy dva snímky a soubor s daty o souřadnicích referenčních bodů, které se nacházejí ve scéně. Výstupem jsou informace o tvaru a rozměrech výkovku.

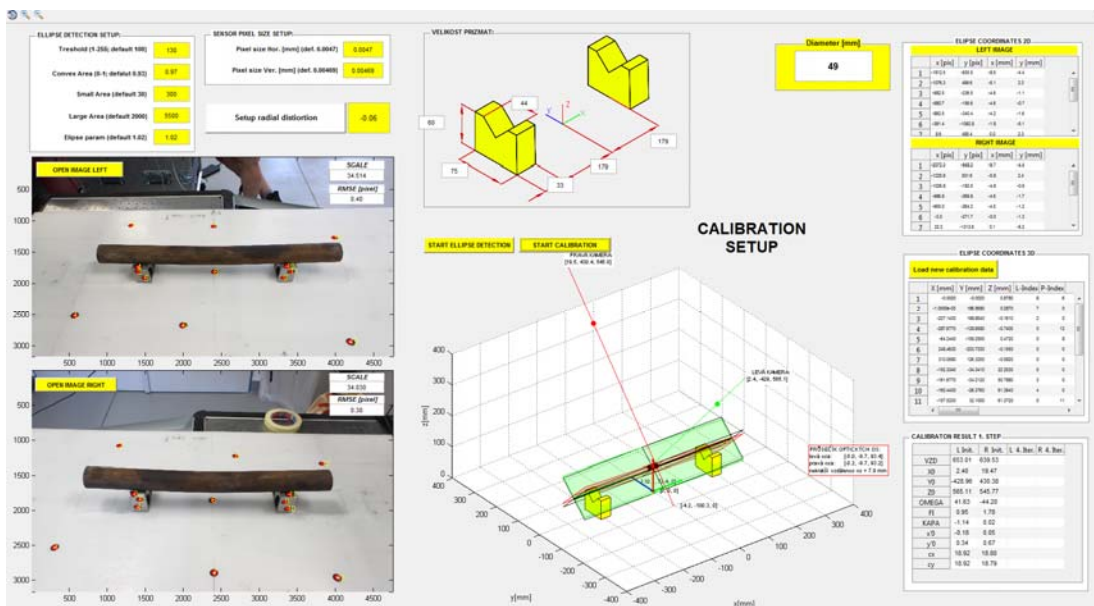


Obr. 5-27: Schéma navrženého aplikačního softwaru.



### 5.7.1 Uživatelské rozhraní pro kalibraci (GUI - Calibration.m)

Toto uživatelské rozhraní slouží k výpočtu parametrů vnitřní a vnější orientace kamer. Umožňuje nastavení parametrů pro hledání středů referenčních značek. Dále je možné nastavit rozměry a pozici v-bloků a velikost pixelů použitého typu snímáče. V případě grafického znázornění v-bloků se jedná spíše o doplněk pro vizuální porovnání správnosti výsledků kalibrace. Po ukončení rozhraní jsou všechny nastavené a vypočtené parametry uloženy do externího souboru. Dokud se kalibrační scéna nezmění, nebo se zásadně nezmění např. podmínky osvětlení apod., není prakticky nutné kalibraci opakovat.



Obr. 5-28: Uživatelské rozhraní pro kalibraci kamer.

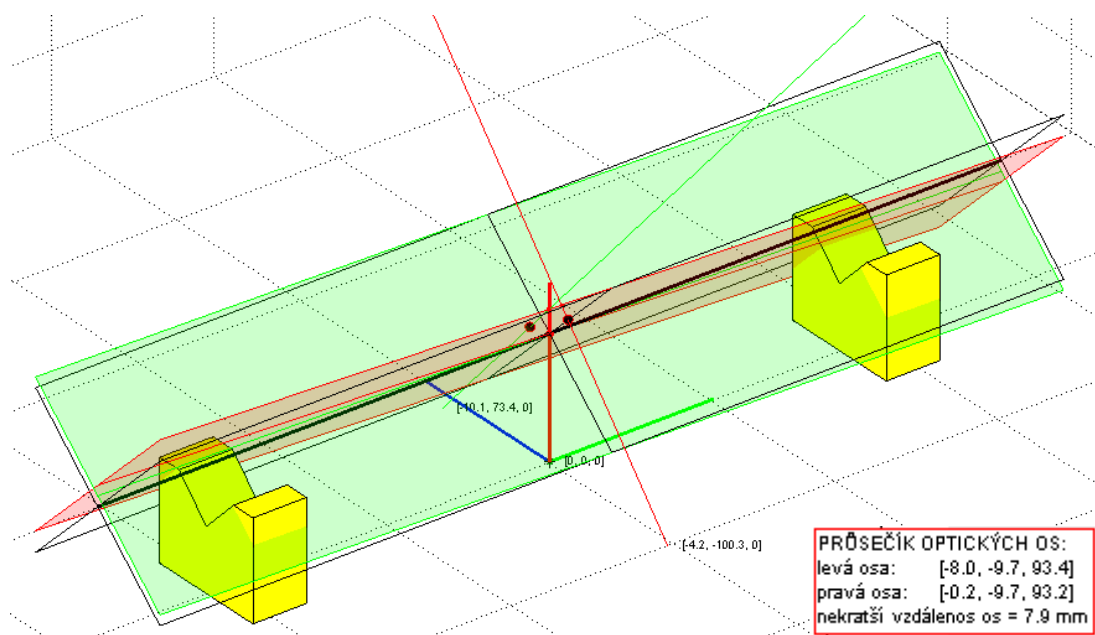
#### Zobrazení výsledků

Výsledky výpočtu parametrů vnitřní a vnější orientace kamery jsou zobrazeny v tabulce *Calibration results*. Pro každou kameru je to:

- *Vzdálenost středu promítání od objektové roviny*
- *Tři souřadnice středu promítání kamery vůči světovému souřadnému systému*
- *Tři úhly natočení obrazové roviny kamery*
- *Dvě hodnoty posunu středu zobrazení vůči s.s. snímku pro směr x a y*
- *Dvě hodnoty konstanty kamery v měřítku pro směr x a y*

Po dokončení kalibrace je v rozích obou snímků zobrazena střední kvadratická odchylka všech detekovaných bodů a měřítko snímku (viz obr. 5-28). V 3D grafu jsou vykresleny uživatelem definované v-bloky a po výpočtu parametrů orientace kamery se zobrazí také optické osy obou kamer. Dále jsou vykresleny objektové roviny odpovídající orientaci kamer (roviny  $w$  - viz kapitola 5.5.2). Černě ohraničené roviny představují objektové roviny, které odpovídaly ideální orientaci kamer:  $\varphi^r = \varphi^l = \kappa^r = \kappa^l = 0$  a  $\omega^l = -\omega^r$  (roviny  $a$  - viz kapitola 5.5.2). Poloha středu promítání obou kamer je vypsána u počátku optických os v podobě souřadnic.

Červené okno obsahuje informace o průsečiku optických os. V místech, kde obě optické osy protínají příslušnou rovinu  $w$ , jsou zobrazeny černé body.



**Obr. 5-29:** Zobrazení výsledku kalibrace v 3D grafu – černá a červená rovina představuje vypočtenou objektovou rovinu odpovídající orientaci kamer (roviny  $w$  viz kapitola 5.4.2). Černé roviny představují objektové roviny, které odpovídali ideální orientaci kamer:  $\varphi^r = \varphi^l = \kappa^l = \kappa^r = 0$  a  $\omega^l = -\omega^r$  (roviny  $a$  viz kapitola 5.5.2). V červeném okně jsou vypsány informace o vzdálenosti optických os.

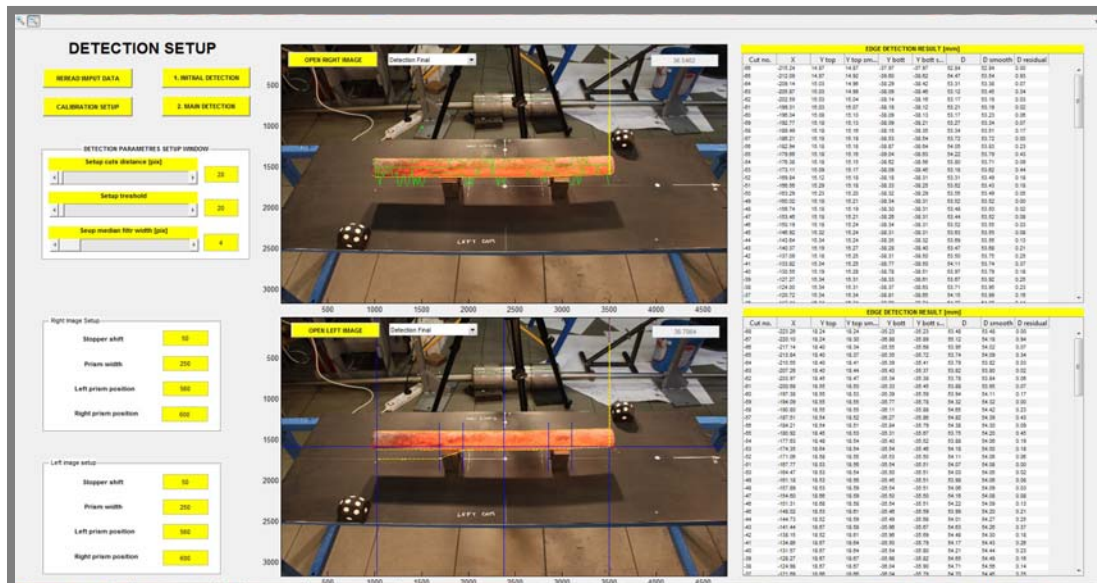
### 5.7.2 Uživatelské rozhraní pro detekci hran (GUI - Detection.m)

Toto rozhraní slouží k nastavení parametrů pro detekci hran. Uživatel nastavuje parametry hranic v nichž má detekce probíhat. Jsou to:

- *Stopper shift* - Nastavení velikosti odsazení hranice pro hlavní detekci (viz delší vertikální modré linie v obr. 5-8 a 5-10). Jedná se o vzdálenost od hranových bodů, které byly nalezeny pomocí iniciální detekce na eliptických koncích výkovku. Prism Width - Nastavení šířky prizmat ve snímku v jednotkách pixelů. Parametr udává velikost oblasti, v níž nemá detekce na spodní hraně probíhat.
- *Left/Right Prism Position* - Nastavení pozice oblasti o šířce Prism Width vůči středu snímku ve směru  $x$  (viz kratší vertikální modré linie na obr. 5-8 a 5-10).

Při návrhu metody detekce hran pro specifickou aplikaci, jako jsou právě výkovky s vysokou teplotou, bylo třeba počítat s různými vstupními podmínkami – různé osvětlení, ostrost hran, intenzita pixelů, různé množství impulzního šumu apod. Proto je toto uživatelské rozhraní navrženo tak, aby umožňovalo testování parametrů, které ovlivňují úspěšnost detekce. Jsou to:

- *Setup cuts distance* - nastavení vzdálenosti vertikálních řezů, v nichž má detekce hran probíhat.
- *Setup threshold* - nastavení velikosti prahové hodnoty.
- *Setup median filter width* - nastavení šířky okna mediánového filtru.



Obr. 5-30: Uživatelské rozhraní pro nastavení parametrů detekce hran.

### Zobrazení výsledků

Po dokončení hlavní detekce se v grafických oknech zobrazí pop-up menu (viz obr. 5-33 vlevo), které umožňuje přepínat zobrazení různých dílčích nebo finálních výsledků. Na výběr jsou následující možnosti zobrazení:

- *Detection Final* – ve snímcích jsou zobrazeny finální detekované hrany zvýrazněné žlutou barvou (algoritmus z kapitoly 5.4.2 i 2.4.3). Konkrétní detekované body (algoritmus z kapitoly 5.4.2) jsou reprezentovány červenými body. Zobrazeny jsou také modré úsečky, které představují hranice, mezi nimiž detekce probíhá.
- *Detection 1. 2. step* – ve snímcích jsou zobrazeny finální detekované hrany zvýrazněné žlutou barvou, navíc je zelenou barvou vykreslen výsledek první části algoritmu *Main\_detection\_1* (tj. nalezené hranové body bez opravy pomocí kontroly návaznosti). Dále jsou zelenou barvou zobrazeny hlavní osy na obou eliptických koncích výkovku a spojnice mezi středy těchto os. Na podélných hranách jsou také zobrazeny purpurové hvězdy (vždy jedna na horní hraně a tři na spodní), které ukazují polohu výchozího bodu pro algoritmus kontrolující návaznost hranových bodů (algoritmus z kapitoly 5.4.2 - fáze 3).
- *Detected edges smooth* – zobrazení vyhlazených hran výkovku na bílém pozadí ve skutečném měřítku v jednotkách milimetrů a v souřadném systému snímku – tzn. pohled z kamery na hrany výkovku v reálných rozměrech.

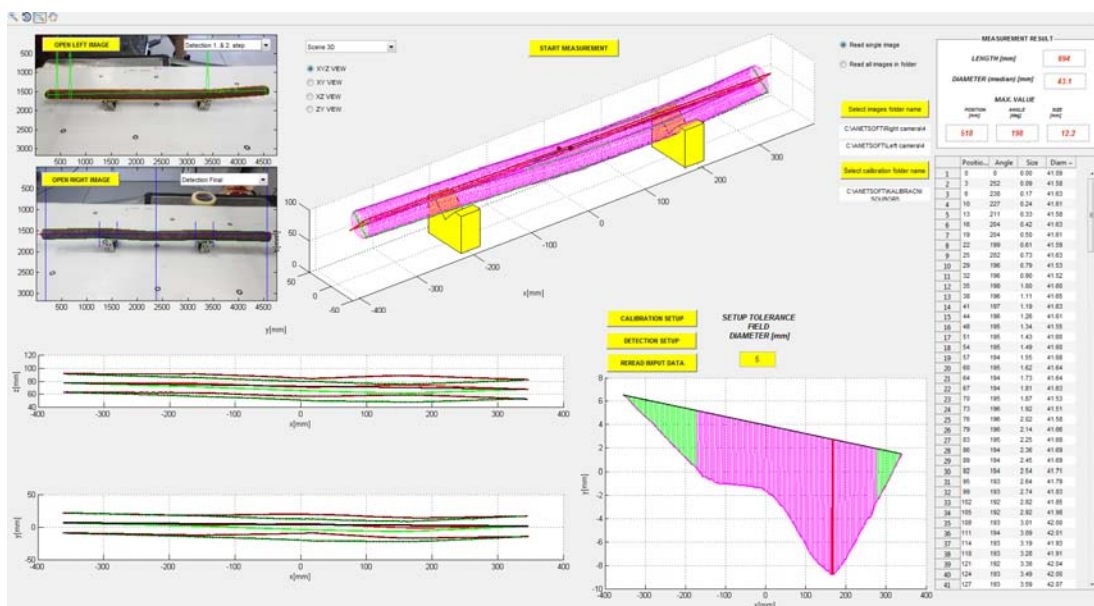
Výsledky detekce jsou také zobrazeny v tabulkách *Edge Detection Results*. V prvním sloupci tabulky jsou zobrazeny indexy řezů. V dalších sloupcích jsou výsledky detekce převedeny do skutečného měřítka v jednotkách milimetrů vůči souřadnému systému snímku. Ve druhém sloupci je x-ová souřadnice každého řezu. Další sloupce obsahují y-onové souřadnice detekovaných bodů na spodní a horní hraně vždy původní a upravené pomocí vyhlazovací funkce. V pátém a šestém sloupci je průměr vypočtený v každém řezu z normálních a vyhlazených dat. Poslední sloupec obsahuje rozdíly na průměrech počítaných z původních a vyhlazených dat.

EDGE DETECTION RESULT [mm]								
Cut no.	X	Y top	Y top sm...	Y bott	Y bott s...	D	D smooth	D residual
-39	-246.62	29.84	29.84	-19.10	-19.10	48.94	48.94	0.00
-38	-240.16	30.16	30.21	-18.63	-18.63	48.79	48.84	0.05
-37	-233.70	30.63	30.63	-18.16	-18.22	48.79	48.85	0.08
-36	-227.24	31.10	31.01	-17.84	-17.81	48.94	48.82	0.13
-35	-220.78	31.42	31.42	-17.37	-17.40	48.79	48.82	0.03
-34	-214.32	31.73	31.82	-17.06	-16.99	48.79	48.82	0.03
-33	-207.87	32.20	32.23	-16.58	-16.58	48.79	48.82	0.03
-32	-201.41	32.67	32.64	-16.11	-16.17	48.79	48.82	0.03
-31	-194.95	33.15	33.08	-15.80	-15.73	48.94	48.82	0.13
-30	-188.49	33.46	33.49	-15.32	-15.32	48.79	48.82	0.03
-29	-182.03	33.93	33.90	-14.85	-14.94	48.78	48.84	0.08
-28	-175.57	34.25	34.31	-14.54	-14.54	48.78	48.85	0.07
-27	-169.11	34.72	34.72	-14.20	-14.15	48.92	48.87	0.05
-26	-162.65	35.19	35.13	-13.80	-13.76	48.99	48.89	0.11
-25	-156.19	35.51	35.57	-13.36	-13.33	48.86	48.90	0.04

Obr. 5-31: Zobrazení výsledků detekce v tabulce.

### 5.7.3 Uživatelské rozhraní pro měření (GUI - Measurement.m)

Toto uživatelské prostředí slouží ke spuštění celého měření a k přehlednému zobrazení kompletních výsledků. Po spuštění měření pomocí tlačítka *Start measurment* nejdříve proběhne kompletní proces detekce hran (nyní již bez zásahu uživatele) na základě posledně nastavených parametrů v GUI pro detekci a na základě výsledků kalibrace. Následně dojde ke složení extrahovaných hran do světového souřadného systému a výpočtu informací o tvaru a rozměrech výkovku.



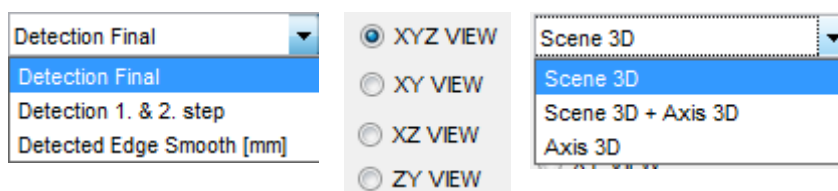
Obr. 5-32: Uživatelské rozhraní pro měření.

### Zobrazení výsledků

Zobrazení dílčích i konečných výsledků měření je zajištěno pomocí šesti grafických oken, textového okna a jedné tabulky. Dvě okna vlevo nahoře zobrazují výsledky

samotné detekce hran ve stejné podobě jako v prostředí GUI pro detekci. Přepínání výsledků je zajištěno pomocí pop-up menu, jehož funkce byla popsána v předchozí kapitole. Dvě grafická okna vlevo dole zobrazují hrany výkovku ve skutečné velikosti a jednotkách milimetrů v pohledu na rovinu XZ a XY světového souřadného systému. Hlavní grafické okno uprostřed GUI umožňuje kompletní zobrazení výsledků v podobě 3D nebo 2D grafu díky možnosti přepínání pomocí pop-up menu a butonů (viz obr. 5-33). Butony umožňují přepínání směru pohledu, pop-up menu nabízí následující možnosti vykreslení výsledků:

- *Scene 3D* - vizualizace detekovaných hran. Hranové body jsou propojeny splajny a proloženy kružnicemi.
- *Scene 3D + Axis 3D* – oproti předchozímu zobrazení nejsou vykresleny kružnice, navíc je vykreslena osa výkovku a ideální osa.
- *Axis 3D* – vizualizace samotné osy výkovku, ideální osy a spojnic mezi těmito osami.



Obr. 5-33: Možnosti vykreslování výsledků v uživatelském rozhraní pro měření. Vlevo: pop-up menu pro zobrazení výsledků detekce. Uprostřed a vpravo: možnosti vykreslení výsledků měření v hlavním grafickém okně.

V tabulce jsou zobrazeny textové výsledky popisující tvar výkovku v každém řezu tj. polohu každého analyzovaného řezu ve směru osy x, úhel směru průhybu, velikost průhybu a průměr výkovku. Hlavní výsledky, které popisují rozměry výkovku a maximální hodnoty na ose, jsou zobrazeny v textovém okně v pravém horním rohu GUI.

MEASUREMENT RESULT				
<b>LENGTH [mm]</b>		<b>501</b>		
<b>DIAMETER (median) [mm]</b>		<b>49.6</b>		
<b>MAX. VALUE</b>				
<b>POSITION [mm]</b>	<b>ANGLE [deg]</b>	<b>SIZE [mm]</b>		
<b>247</b>	<b>274</b>	<b>9.7</b>		
	<b>Positio...</b>	<b>Angle</b>	<b>Size</b>	<b>Diam ~</b>
38	241	273	9.71	49.59
39	247	273	9.71	49.61
40	254	274	9.68	49.65
41	261	274	9.60	49.70
42	267	274	9.52	49.78
43	274	274	9.39	49.83
44	280	274	9.23	49.92
45	287	274	9.04	50.01
46	293	275	8.83	50.06
47	300	275	8.59	50.11

Obr. 5-34: Vlevo: Textové pole zobrazující informace o rozměrech výkovku a maximálních hodnotách na ose. Vpravo: tabulka s výsledky v každém analyzovaném řezu.

## 5.8 Experimentální ověření navržené metodiky měření

Cílem této kapitoly je vysvětlení průběhu experimentů, které byly realizovány za účelem ověření navržené metodiky měření. Testy opakovatelnosti měření byly provedeny v laboratorních podmínkách na malých vzorcích před, i po zahřátí na teplotu 1000 až 1200 °C. V této kapitole je také popsáno komparační měření a vyhodnocení výsledků, které slouží k porovnání přesnosti měření pomocí navržené metodiky.

### 5.8.1 Měřicí aparatura a měřené vzorky

Za účelem testování navržené metodiky v laboratorních podmínkách byl vyroben stend, který slouží vymezení polohy a orientace fotoaparátů vůči měřeným vzorkům (dle schématu na obr 5.3 a 5.4). V průběhu řešení disertace byly vytvořeny dvě varianty stendu pro měření vzorků s pokojovou teplotou (obr. 5-35) a jeden stend pro měření vzorků s vysokou teplotou (obr. 5-36). Základními komponentami měřicí aparatury jsou:

- Dva fotoaparáty Canon EOS 500D (viz tabulka 5-1)
- Dva objektivy 18 až 55 mm
- Pracovní stůl
- Kruhové kontrastní referenční značky
- Dva v-bloky (prizmata)
- Lift s vertikálním posuvem nebo dva fotografické stativy

#### Stend pro měření vzorků s pokojovou teplotou

Základní komponentou stendu je stůl vyrobený z bílého plastu, který slouží jako pracovní scéna s kontrastním pozadím vůči měřeným vzorkům. Uchycení fotoaparátů původně zajišťovala konstrukce, připevněná na rám stolku. Druhá varianta stendu využívá pro uchycení fotoaparátů rámovou konstrukci upevněnou na lift s vertikálním posuvem (lift je součástí vybavení skenovacího systému Atos TripleScan). Díky tomu je možné jednoduše nastavit výšku kamer pomocí počítače. Měřený vzorek se umísťuje do dvou v-bloků, které leží symetricky vůči světovému souřadnému systému. Z důvodu kalibrace kamer jsou na pracovním stolku a v-blocích umístěny kruhové referenční značky.



Obr. 5-35: Dvě realizované verze laboratorního stendu. Vlevo: stend s pevnými rameny. Vpravo: stend využívající lift, díky němuž je možný posun kamer ve vertikálním směru.

### Stend pro měření vzorků s vysokou teplotou

Pracovní stůl je v tomto případě vyroben z kovu a ošetřen nástřikem žáruvzdornou barvou. Z důvodu testování vlivu barvy pozadí výkovku na výsledky detekce hran, byla jedna strana stolu opatřena bílým nástřikem a druhá černým. Na stůl byly namontovány dva kovové hranoly, na nichž byly pomocí šablony a žáruvzdorného spreje vytvořeny kontrastní kruhové značky, které slouží jako referenční body pro kalibraci kamer. Světový souřadný systém leží opět ve středu stolku a v-bloky jsou umístěny symetricky vůči tomuto souřadnému systému. Z důvodu snadné mobility není k rámu stolu připevněna konstrukce pro uchycení fotoaparátů. Ty jsou při měření vždy upnuty a ustaveny pomocí standardních stativů.

### Měření vzorky

Měřenými vzorky pro laboratorní testy jsou válcové trubky s délkami cca 700 a 500 mm a průměrem v rozsahu mezi 42 a 50 mm (viz tabulka 5-5 na straně 92). V tabulce i v následujícím textu jsou vzorky očíslovány vzestupně podle velikosti deformace. Vlivem cílené deformace trubek pomocí lisu mohlo dojít ke zploštění tvaru. Z toho důvodu je v tabulce 5-5 uvedena přibližná hodnota průměru. Trubky s délkou 500 mm byly použity jak pro testy za studena i za tepla. Pro ohřev trubek s délkou 700 mm nebyla k dispozici pec dostatečných rozměrů.



Obr. 5-36: Měření výkovků s vysokou teplotou.

## 5.8.2 Postup měření dle navržené metodiky a softwaru

### 1) Příprava měření a snímkování

Fotoaparáty byly pomocí USB kabelů připojeny k počítači, následně byly ovládány vzdáleně pomocí softwaru Digital Photo Professional, který se dodává společně s fotoaparáty Canon. Před samotným měřením musí být nastavena výška fotoaparátů tak, aby při zaostření mířil středový bod snímku mezi spodní a horní hranu tyče. V průběhu celého měření je vypnuto automatické ostření a nastavena konstantní ohnisková vzdálenost, expozice a clona. Pro každou sérii měření je nastaven adresář pro uložení snímků<sup>19</sup>. Měřený vzorek je uložen do v-bloků, přibližně symetricky vůči oběma prizmatům s libovolným natočením vůči kamerám.

### 2) Snímkování

#### • Vzorky s pokojovou teplotou

V případě měření nezahřátých vzorků byla nastavena časová prodleva mezi snímkováním. Po spuštění již probíhalo měření automaticky a mezi jednotlivými snímky byl vzorek vždy ručně pootočen kolem své osy o libovolný úhel. Tím bylo získáno 10 párů snímků každého vzorku s různým natočením a různou polohou v prizmatech. Výška kamer byla před měřením každého vzorku mírně upravena, což se následně ukázalo jako zbytečné. Ve všech případech se vzdálenost kamer od průsečíku optických os pohybovala mezi 630 až 670 mm. Této vzdálenosti nejlépe odpovídala korekce radiálního zkreslení -0,06. Z důvodu úpravy polohy kamery před měřením nového vzorku bylo také nutné před vyhodnocením výsledků vždy znovu provést kalibraci. Kalibrace byla vypočtena ve všech případech pomocí osmi až deseti referenčních bodů. Střední kvadratická odchylka zpětně vypočtených souřadnic těchto bodů ve snímcích byla ve všech případech menší než 1 pixel. Pro všechna provedená měření byla použita totožná vstupní data se souřadnicemi referenčních bodů v prostoru získaná pomocí systému Tritop – viz kapitola 5.8.4 (calib\_white.xls). Následující tabulka uvádí typické nastavení vstupních parametrů při měření vzorků s pokojovou teplotou.

Měření:	za studena	za tepla	Měření:	Za studena	Za tepla		
<b>GUI kalibrace – parametry hledání elips:</b>			<b>GUI detekce - hranice pro detekci:</b>				
Prahová hodnota	130.00	130.00	Snímek	Levý	Pravý	Levý	Pravý
Konvexní oblast	0.97	0.97	Posun hranice pro detekci	80	75	80	75
Min. velikost elipsy	300.00	300.00	Šířka mezery na prizmatech	300	350	300	350
Max. velikost elipsy	5500.00	5500.00	Poloha prizma-levá strana	920	920	920	920
Parametr elipsy	1.02	1.02	Poloha prizma-pravá strana	950	950	950	950
<b>GUI kalibrace - velikost pixelu:</b>			<b>GUI detekce - parametry pro detekci hran:</b>				
Ve směru x	0.00470	0.00470	Šířka midánového filtru	6		6	
Ve směru y	0.00469	0.00469	Prahová hodnota	20		20	
			Šířka řezů	60		60	

Tabulka 5-4: Typické nastavení parametrů při měření vzorků s normální i vysokou teplotou.

<sup>19</sup> Např. 5. snímek z levé kamery třetího vzorku: Left camera \3 \0005



- ***Vzorky v zahřátém stavu***

V případě měření ohřátých vzorků nebylo možné postupovat stejným způsobem, neboť docházelo k rychlému chladnutí vzorků. Navíc bylo třeba pořídit z důvodu testování metodiky několik snímků s různým expozičním časem. Z toho důvodu byly vytvořeny vždy čtyři snímky s různou expozicí a následně byl vzorek vložen zpět do pece. Tento proces byl zopakován desetkrát pro každý vzorek. Celkem bylo vytvořeno 120 snímků pro tři různé vzorky s délkou cca 500 mm – č. 2, 3 a 6. Pomocí navrženého softwaru bylo vyhodnoceno 8 párů snímků pro každý vzorek. Poloha kamer v průběhu kompletního měření zůstala neměnná. Pomocí kalibrace byla vypočtena vzdálenost kamer 662 a 684 mm a korekční koeficient byl nastaven na velikost -0,04. Střední kvadratická odchylka zpětně vypočtených souřadnic referenčních bodů byla v tomto případě až 3 pixely (větší odchylka je zřejmě způsobena menší ostrostí hran referenčních značek, které byly na kovovém stolku vytvořeny pomocí šablony a žáruvzdorného spreje). Pro všechna provedená měření byla použita totožná vstupní data se souřadnicemi referenčních bodů v prostoru získaná pomocí systému Tritop – viz kapitola 5.8.4 (calib\_black.xls).

Získání výsledků měření bylo zásadně pracnější než v případě měření vzorků s pokojovou teplotou. Hlavním důvodem jsou výrazné změny intenzity světla na povrchu měřených vzorků, které způsobilo velmi rychlé chladnutí okují. V případě reálných výkovků, které jsou tvořeny plným materiálem, je chladnutí několikanásobně pomalejší. Navržený software nebyl zcela optimalizován na podmínky měření za tepla. Na rozdíl od měření vzorků s pokojovou teplotou, musely být parametry detekce nastaveny individuálně téměř pro každou dvojici snímků.



Obr. 5-37: Ohřev vzorků v indukční peci na 1200 °C.

### 3) Vyhodnocování výsledků pomocí navrženého softwaru

Nastavení parametrů pro vyhodnocení výsledků je uloženo v souborech s názvem *Init.xls*. Postup vyhodnocování reflektují následující odstavce. Výsledky všech měření jsou uloženy v souborech *Result.xls*; v práci jsou uvedeny v příloze na straně P1 a P2.

- **Kalibrace**

Snímky je možné načítat buď automaticky z příslušného adresáře nebo pomocí tlačítek *Open image right/left*. Pomocí tlačítka *Setup radial distortion* je možné otevřít uživatelské rozhraní, které slouží k nastavení a testování parametru korekce nelineárního zkreslení<sup>20</sup>. Po té co jsou nastaveny všechny editovatelné parametry v oknech *Ellipse Detection Setup* a *Sensor Pixel Size Setup* může být spuštěno hledání elips ve snímcích pomocí tlačítka *Start Elipse Detection*. Souřadnice nalezených středů elips, včetně jejich indexů se zobrazí v tabulce *Elipse Coordinates 2D*. Detekované elipsy jsou také zvýrazněny ve snímcích červenou barvou s číselným indexem. Po dokončení procesu hledání elips se zobrazí tlačítko *Start Calibration*, kterým je možné spustit výpočet parametrů orientace kamery a měřítka. Při první kalibraci nové scény, je nejdříve nutné načíst soubor s informacemi o poloze referenčních bodů vůči světovému souřadnému systému (viz kapitola 5.8.4) a zapsat indexy detekovaných elips do tabulky k příslušnému řádku odpovídající referenční značky. Tím je zajištěno spárování 2D a 3D souřadnic. K načtení kalibračního souboru slouží tlačítko *Load New Calibration Data*.

Manuální přiřazení bodů není nutné provádět při každém novém měření. Všechny informace které uživatel nastaví, jsou uloženy do externího souboru a při otevření rozhraní jsou znovu načteny. Proces hledání elips trvá cca 20 sekund, výpočet parametrů kamery trvá méně než sekundu.

- **Nastavení parametrů detekce**

V rozhraní pro detekci hran uživatel nejdříve nastaví parametry v oknech *Right/Left Image Setup* a *Detection Parameters Setup*. Následně testuje detekci hran pomocí tlačítek *Init Detection* a *Main Detection*. Změna polohy hranic pro detekci se projeví při spuštění vstupní detekce pomocí tlačítka *Initial Detection*. Dokud neproběhne vstupní detekce v pořádku, tlačítko pro hlavní detekci hran není zobrazeno. Pokud při otevírání celého uživatelského prostředí dojde k tomu, že v externím souboru nejsou nalezena potřebná data – tj. např. velikost pixelu, měřítko apod. znamená to, že systém není kalibrován a zobrazí se varovná informace. Proto se v rozhraní pro detekci nachází také tlačítko pro otevření rozhraní kalibrace – *Calibration Setup* – a tlačítko pro načtení kalibračních dat – *Reread imput data*.

- **Měření a ukládání výsledků**

Ke spuštění měření slouží tlačítko *Start measurement*. Uživatel nejdříve zvolí adresář se souborem, do něhož byly uloženy data z kalibrace a detekce (*Init.xls*<sup>21</sup>), a adresář odkud budou fotografie načítány. Pokud je zapnuta volba *Single image*, uživatel načítá snímky manuálně pomocí tlačítek *Read left/right image*. Pokud je zapnuta

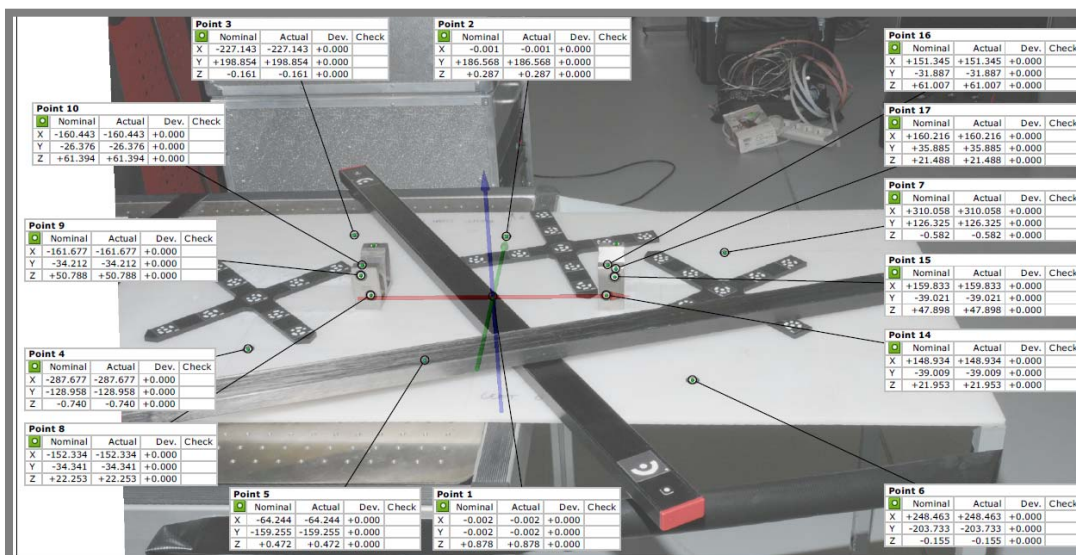
<sup>20</sup> V aktuální verzi softwaru není korekce snímků zařazena do procesu kalibrace z důvodu úspory času při testování softwaru. Všechny snímky byly nejdříve zkorigovány a uloženy pomocí GUI pro korekci. Následně jsou již do GUI pro kalibraci a měření načítány snímky nezkreslené.

<sup>21</sup> Např. *Init5.xls* obsahuje data z kalibrace měření pátého vzorku.

volba *Read all images in folder*, potom je při spuštění tlačítka *Start Measurement* automaticky načten vždy následující pár snímků z daného adresáře. Tato funkce také zajišťuje automatické ukládání výsledků z měření do souboru *Result.xls*<sup>22</sup>. Při každém měření proběhne postupně celý proces detekce tak, jak byl popsán v kapitole 5.4 a proces prostorové orientace podle kapitoly 5.5. Uživatel může kontrolovat výsledky provedené detekce hran přímo ve snímcích. V případě, že detekce proběhne chybně, může se pomocí tlačítka *Detection setup* vrátit do rozhraní pro nastavení parametrů detekce. Po úpravě parametrů je třeba uzavřít toto rozhraní a v rozhraní pro měření načíst znovu data za souboru *Init* pomocí tlačítka *Reread input data*.

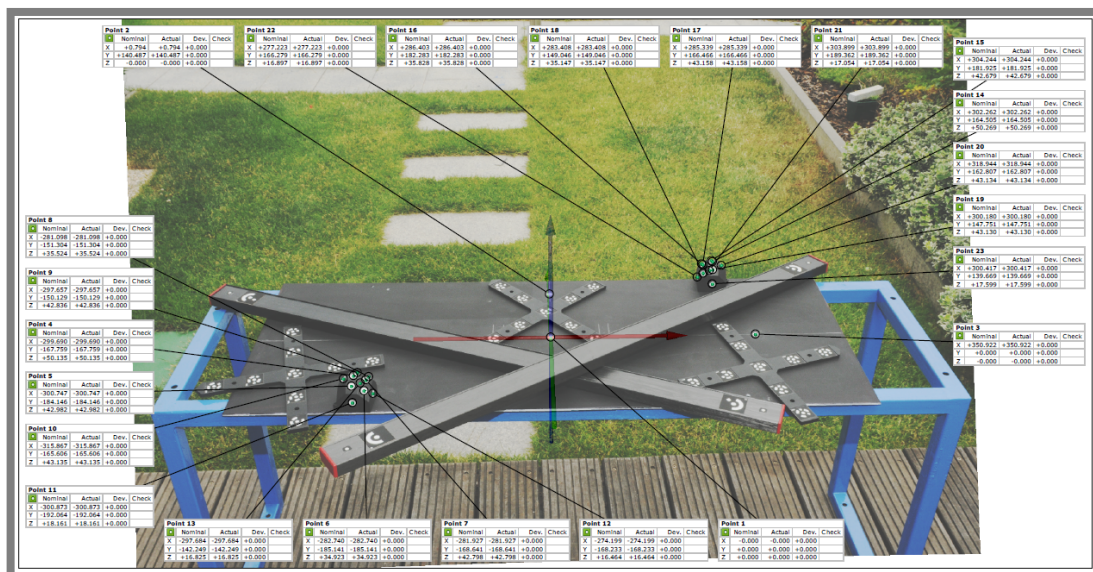
### 5.8.3 Měření kalibrační scény pomocí systému Tritop

Navržená metoda kalibrace vyžaduje import souřadnic referenčních značek rozmístěných v měřené scéně. Poloha těchto značek musí být změřena od počátku světového souřadného systému. Ten byl vytvořen přesným rozmístěním tří referenčních značek na ploše pracovního stolu. Dvě značky byly umístěny tak, že jejich středy leží na stolku v ose x a y, třetí značka představující počátek souřadného systému byla umístěna symetricky mezi v-bloky. Další značky sloužící ke kalibraci byly rozmístěny náhodně ve scéně - na pracovní stůl a v-bloky tak, aby byla splněna podmínka prostorového rozmístění. Poloha všech bodů byla měřena pomocí pasivního fotogrammetrického systému Tritop. Měření pomocí tohoto systému dosahuje přesnosti v řádech setin milimetrů. Souřadný systém byl ustaven pomocí softwarové funkce *3-2-1 alignment*. Výsledné souřadnice všech bodů byly exportovány do souboru *calib.xls* a následně importovány do navrženého softwaru (možné je tako použití formátu *\*.txt* a dalších).



Obr. 5-38: Výsledek měření referenčních bodů na stendu pro měření studených vzorků.

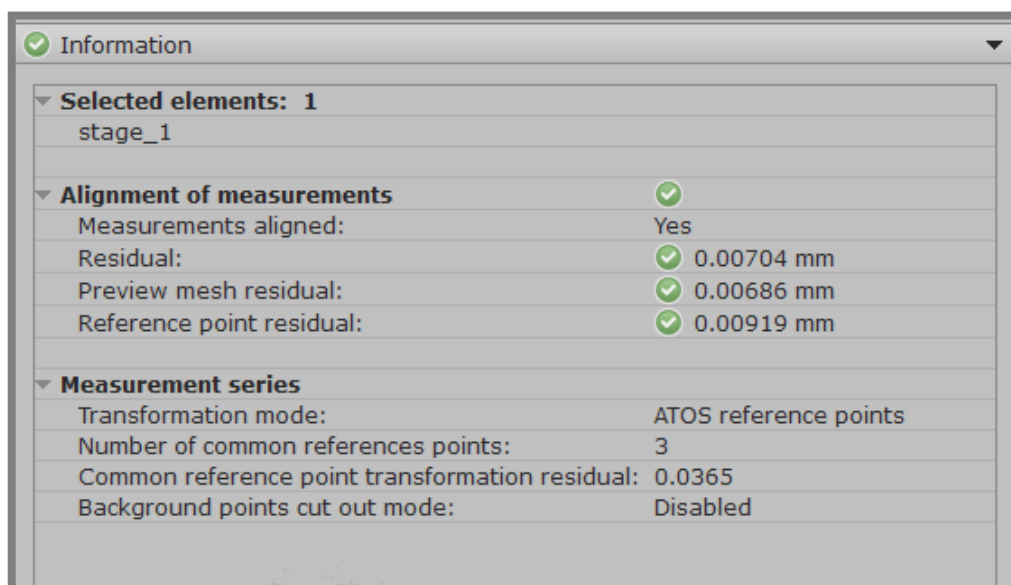
<sup>22</sup> Např. výsledky na pátém listě v souboru *Result3* jsou výsledky měření třetího vzorku z páté dvojice snímků.



Obr. 5-39: Výsledek měření referenční bodů na stendu pro měření vzorků s vysokou teplotou.

### 5.8.4 Komparační měření tvaru a rozměrů testovaných vzorků

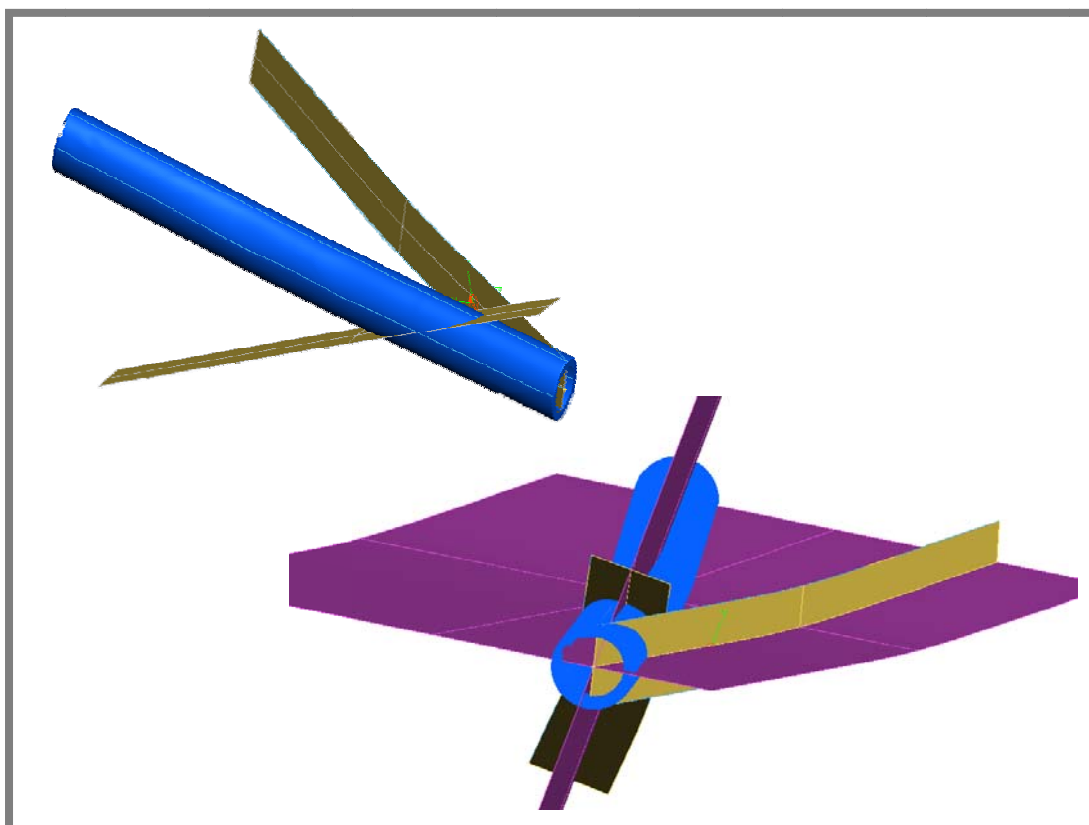
V praxi je termín přesnost (accuracy) široce používán pro obecné hodnocení kvality. Podle [32] je prakticky možné použít tento termín pouze v případě, že je provedeno porovnání výsledků s daty získanými přesnějším měřením. Proto bylo provedeno měření tvaru a rozměrů všech vzorků pomocí systému Atos III Triple Scan. Jedná se o optický 3D skenovací systém využívající proužkovou projekci. Při měření tyčí byla použita optika, jejíž zorné pole má rozměry 320x240x240 mm a citlivost měření je 0.104 mm. V případě všech měřených vzorků byla dosažena přesnost měření (podle normy VDI 2634<sup>23</sup>) vyšší jak 0,005 mm (viz obr. 5-40).



Obr. 5-40: Přesnost měření tvaru válcové tyče pomocí optického 3D skeneru Atos III Triple Scan.

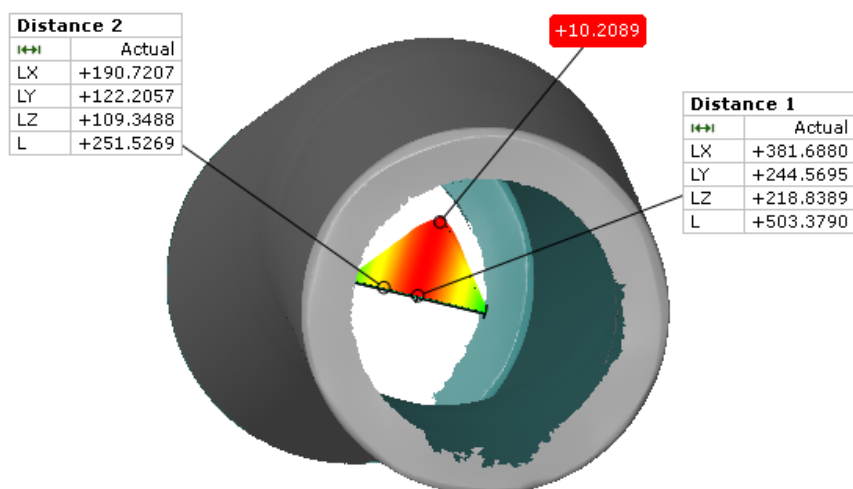
<sup>23</sup> Norma uvádí podmínky a postupy pro stanovení přesnosti 3D skenovacích systémů.

Pomocí 3D skenování byl získán pouze tvar tyčí. Následně bylo třeba softwarově vyhodnotit hledané parametry, tzn. rozměry, velikost maximálního průhybu a jeho polohu. Standardně se inspekce geometrie získané pomocí systému Atos provádí v softwaru Atos Professional, nicméně pro rekonstrukci prostorové osy nemá tento software vhodné nástroje. Vhodné řešení bylo po konzultaci ve firmě Mcae systems nalezeno pomocí nástrojů softwaru Tebis. Hrany výkovku byly promítnuty do dvou rovin souřadného systému pomocí nástroje *Silhou* (obr. 5-41 hrany žlutých ploch). Následně byla mezi nimi vytvořena plocha pomocí nástroje *Blend* (obr. 5-41 - žluté plochy). V kolmém směru od každé plochy byla vytažena středová křivka (isoparametra) pomocí nástroje *Move*, čímž vznikly dvě plochy (obr. 5-41 - růžové plochy). Průsečík těchto dvou ploch je prostorovou osou výkovku. Vytvořená prostorová křivka byla importována zpět do softwaru Atos. Zde byly změřeny parametry osy podle prvního zmíněného přístupu v kapitole 5.5, tedy vůči ose která je vytvořena spojením konců 3D křivky. Výsledek měření vzorku číslo 2 je zobrazen na obr. 5-42.



Obr. 5-41: Rekonstrukce tvaru osy testovaného vzorku v softwaru Tebis.

Délka výkovku byla měřena jako přímá vzdálenost obou konců skutečné osy tyče. Změřený průměr se v různých místech liší z důvodu deformace způsobené ohybem, proto je uvedena průměrná hodnota. Výsledky měření všech vzorků jsou zobrazeny v tabulce 5-5.



Obr. 5-42: Čelní pohled na měřenou tyč a její osu v softwaru Atos Professional.

Tab. 5-5: Rozměry a tvar výkovku změřené pomocí 3D skeneru Atos III Triple Scan. Hvězdička u indexu znamená, že tato tyč byla použita pro testy za studena i za tepla.

Index	Velikost max. průhybu [mm]	Poloha max. průhybu od konce tyče [mm]	Délka [mm]	Průměr ~ [mm]
1	~0.3	~334	699.3	44.4
2 *	7.8	331.5	503.4	44.5
3 *	10.2	251.5	503.4	49
4	11.59	369.5	699.9	44,5
5	13.42	501.3	698.8	42
6 *	18.26	250.9	504.9	49
7	21.08	234.	699.2	42

## 6. ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

Obecné závěry a hodnocení navržené metodiky byly formulovány na základě statistické analýzy výsledků měření, která byla provedena pomocí softwaru Minitab. V následujících odstavcích jsou hodnoceny výsledky měření čtyř parametrů: maximální průhyb, jeho poloha vůči konci vzorku, průměr vzorku a jeho délka. Celkem byly zkoumány tyto parametry na sedmi vzorcích s teplotou okolí a na třech vzorcích zahřátých na teplotu 1000 až 1200 °C. Za účelem porovnání výsledků získaných pomocí navržené metodiky a softwaru bylo provedeno měření vzorků pomocí profesionálního systému Atos III TripleScan. Tento systém dosahuje řádově vyšší přesnosti než navržená metodika, neumožňuje však měření vzorků v zahřátém stavu. Výsledky získané Atosem jsou ve statistické analýze uvažovány jako referenční pro hodnocení přesnosti měření vzorků s pokojovou teplotou. Při hodnocení výsledků měření vzorků v zahřátém stavu je nutné uvažovat tepelnou roztažnost. Vliv tepelné roztažnosti na velikost průhybu a jeho polohu není možné jednoznačně a exaktně stanovit pomocí jiného dostupného způsobu měření. Z toho důvodu nebylo možné přesnost měření těchto parametrů na vzorcích s vysokou teplotou objektivně zhodnotit. Referenční hodnoty rozměrových parametrů byly vypočítány podle vztahu 38. Přibližná teplota vzorků před ohřevem byla 20°C, v ohřátém stavu 1100 °C ( $\Delta t = 1130$  K). Výchozí rozměr  $l_0$  je rozměr změřený systémem Atos. Koeficient tepelné roztažnosti pro běžnou ocel je  $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]^{24}$ .

$$l_1 = l_0(1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (38)$$

Tab. 6-1: Vypočtené hodnoty rozměrů vzorků při teplotě cca 1150 °C.

Vzorek č.:	2		3		6	
	délka	průměr	délka	průměr	délka	průměr
Změřené rozměry Atos - $l_0$ [mm]	503,4	44,5	504,3	49	504,9	49
Vypočtené rozměry - $l_1$ [mm]	~510	~45	~511	~49,6	~511	~49,6

### 6.1 Statistická analýza výsledků měření

Základním krokem statistické analýzy je hodnocení souboru dat z hlediska charakteristiky polohy, variability a souměrnosti. Charakteristiky polohy vyjadřují střed celé skupiny údajů, kolem kterého všechny hodnoty kolísají. Charakteristiky variability udávají rozptýlení (variabilitu) hodnot kolem zvoleného středu skupiny.

Na následujících stranách jsou výsledky popisné statistické analýzy zobrazeny v podobě krabicových grafů. Na prvním z dvojice grafů je možné pozorovat charakteristiky polohy i variability pro jednotlivé vzorky. Při hodnocení výsledků je však nejpodstatnější vzdálenost naměřených dat od nominální hodnoty a rozpětí naměřených hodnot. Tyto parametry jsou dobře viditelné na druhém z dvojice grafů

<sup>24</sup> Koeficient tepelné roztažnosti viz <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/37-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-kovu>

(obr. 6.2, 6.4, 6.6 a 6.8), kde je faktor polohy eliminován a červená čára ve středu stupnice ukazuje nominální hodnou.

Statistická významnost pozorovaných výsledků se hodnotí pomocí parametrických či neparametrických statistických testů. Zda použít parametrický či neparametrický test se rozhoduje na základě výsledků testu normality. Test normality poskytuje informaci o tom, zda soubor dat sledované náhodné veličiny odpovídá Gaussovu (normálnímu) rozdělení pravděpodobností, či nikoli. Gaussovu distribuci plně charakterizují dvě konstanty: **střední hodnota**  $\mu$  a **rozptyl**  $\sigma^2$ . Větší hodnoty rozptylu indikují, že hodnoty náhodné veličiny se nacházejí dále od střední hodnoty. V softwaru Minitab byl pro testování hypotézy o normalitě rozdělení použit **Anderson-Darling(AD)** test. Zamítnutí či nezamítnutí hypotézy se hodnotí pomocí  $p$ -hodnoty (***p-value***). Je-li výsledkem testu hodnota spolehlivosti  **$p < 0,05$** , znamená to, že nulová hypotéza o normálním rozdělení se zamítá (data mají nenormální rozdělení). V případě nenormálního rozdělení se následná analýza dat provádí např. **Wilcoxonova testu** nebo **Znaménkového testu**. V případě normálního rozdělení se nejčastěji používá **Studentův t-test**. Testy závislosti se standardně provádí pomocí jednoduché **korelační analýzy**, **lineární** či **nelineární regrese**. Pokud není splněna normalita reziduí, používá se např. **Spearmanův test** pořadové korelace pro určování míry závislosti, **Chi-kvadrát test** pro testování nezávislosti dat a další.

Dalším krokem bylo testování statistické významnosti chyby měření, které říká, zda se s danou pravděpodobností jedná o chyby náhodné či systematické. Obecné závěry je však třeba vynášet s ohledem na skutečné podmínky měření a nároky na přesnost jednotlivých parametrů. Předpokládané nároky na přesnost řádově korelují se skutečnou velikostí analyzovaných parametrů:

- měření velikosti průhybu a průměru v řádu desetin mm
- měření polohy maximálního průhybu a délky v řádu mm

Interpretace chyb měření byla provedena pomocí testování hypotéz o závislosti přesnosti a rozpětí výsledků na charakteristikách měřeného vzorku – jeho tvaru a délce, ale také na natočení maximálního průhybu vůči kamerám.

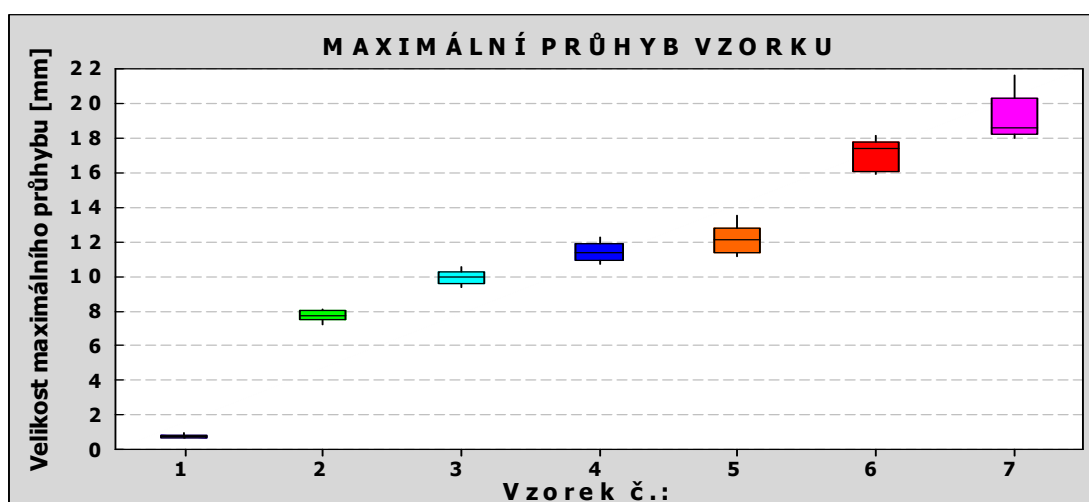


## 6.1.1 Statistická analýza výsledků měření vzorků s pokojovou teplotou

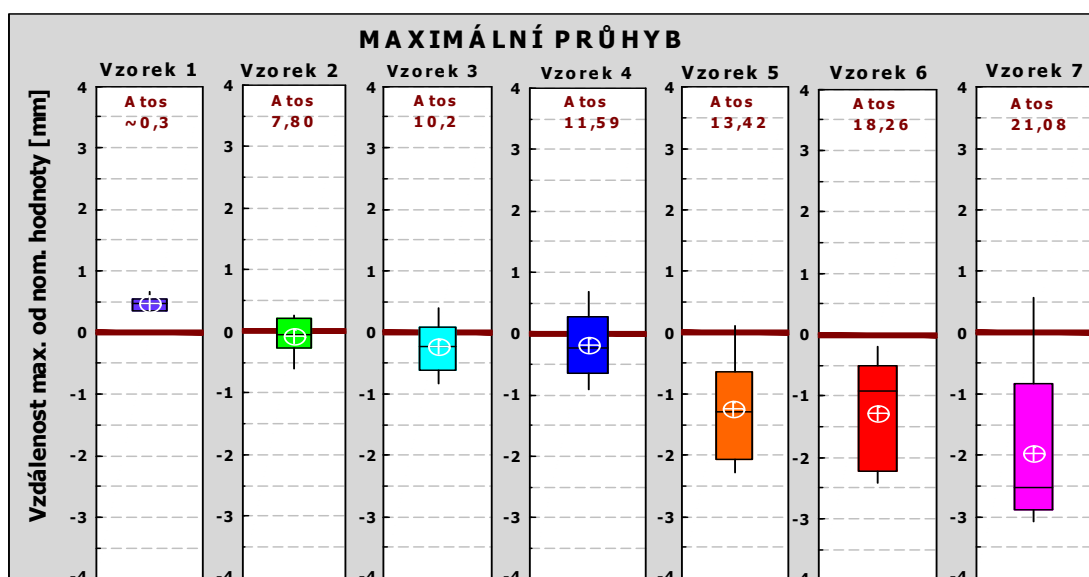
- *Velikost maximálního změřeného průhybu*

Tab. 6-2: Výsledky měření maximálního průhybu sedmi různých vzorků v nezahřátém stavu.

Vzorek	ATOS	Min	1. Kvartil	Median	3. Kvartil	Max	Rozpětí	Median-Atos
1	0,30	0,65	0,66	0,77	0,85	0,97	0,32	-0,47
2	7,80	7,20	7,53	7,76	8,01	8,07	0,87	0,05
3	10,20	9,37	9,58	9,97	10,28	10,59	1,22	0,23
4	11,59	10,68	10,94	11,37	11,86	12,28	1,60	0,22
5	13,42	11,13	11,35	12,14	12,80	13,55	2,42	1,28
6	18,25	15,87	16,06	17,39	17,79	18,11	2,24	0,66
7	21,08	18,01	18,20	18,55	20,26	21,65	3,64	2,53



Obr. 6-1: Kráčkový graf znázorňující charakteristiku polohy a variability naměřených dat maximálního průhybu u jednotlivých vzorků.

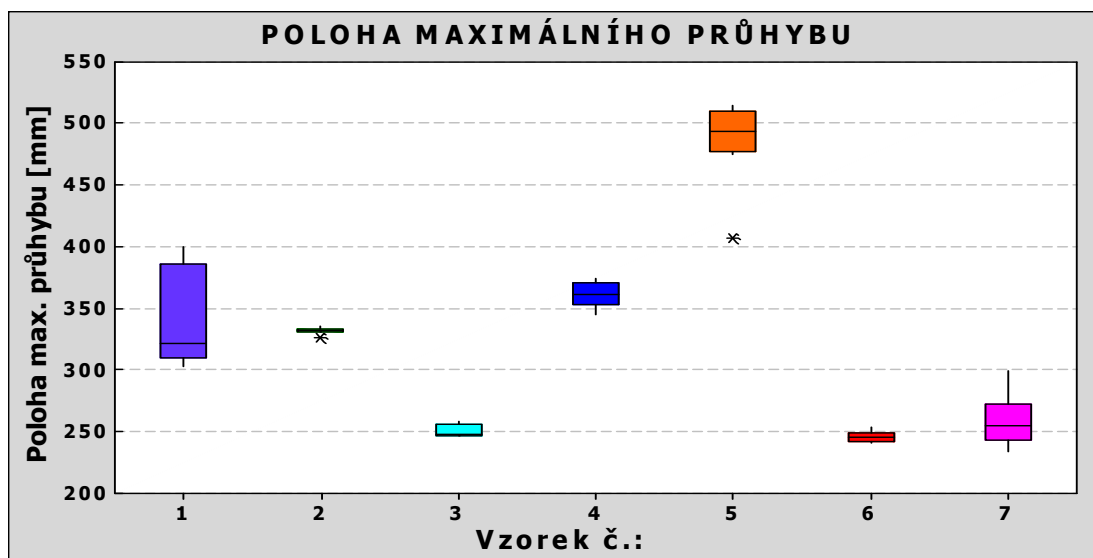


Obr. 6-2: Kráčkové grafy měření maximálního průhybu tyče s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření pomocí systému Atos.

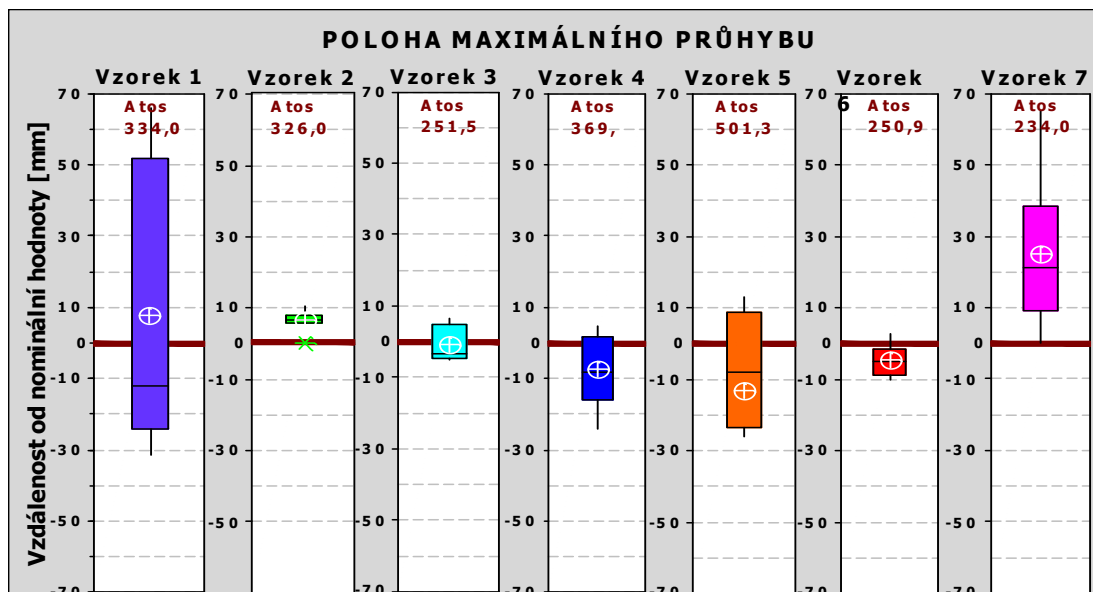
- *poloha maximálního průhybu (vzdálenost vůči konci)*

Tab. 6-3: Výsledky měření polohy maximálního průhybu sedmi různých vzorků v nezahřátém stavu.

Vzorek	ATOS	Min	1. Kvartil	Median	3. Kvartil	Max	Rozpětí	Median-Atos
1	334	302,46	309,99	322,00	385,69	400,14	97,68	-12,00
2	331,5	325,96	331,20	332,30	333,72	336,18	10,22	0,80
3	251,5	246,34	247,13	248,23	256,65	258,12	11,78	-3,28
4	369,5	345,51	353,56	361,29	371,21	374,1	28,59	-8,21
5	501,3	(407,3) 475	477,91	493,26	510,32	514,36	39,11 (107)	-8,04
6	250,9	240,9	242,23	245,78	249,30	253,75	12,85	-5,13
7	234	234,36	243,29	255,21	272,42	299,19	64,83	21,21



Obr. 6-3: Krabicový graf zobrazující charakteristiky výsledků měření polohy max. průhybu vzorků.

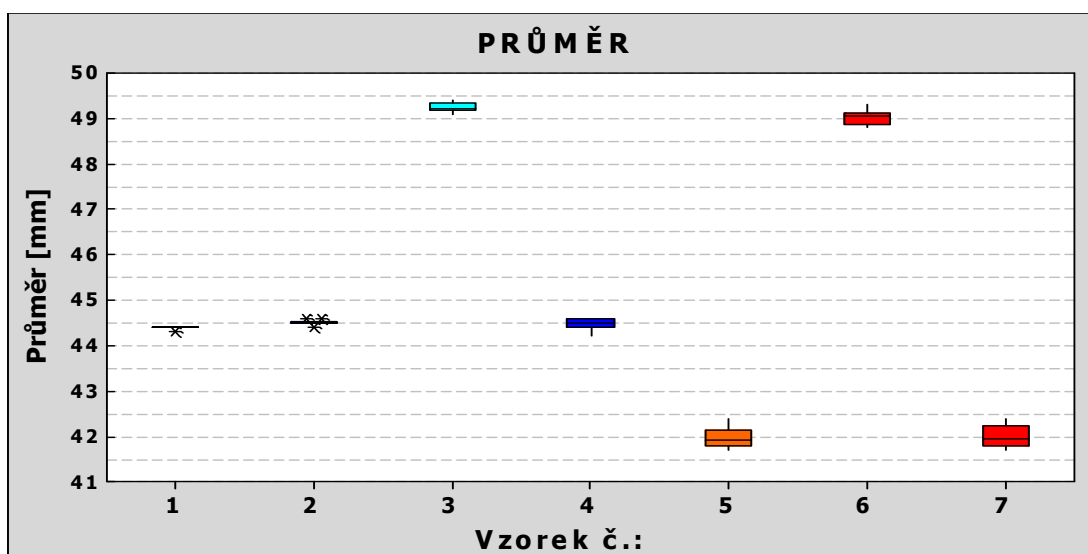


Obr. 6-4: Krabicové grafy měření maximálního průhybu tyče s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření.

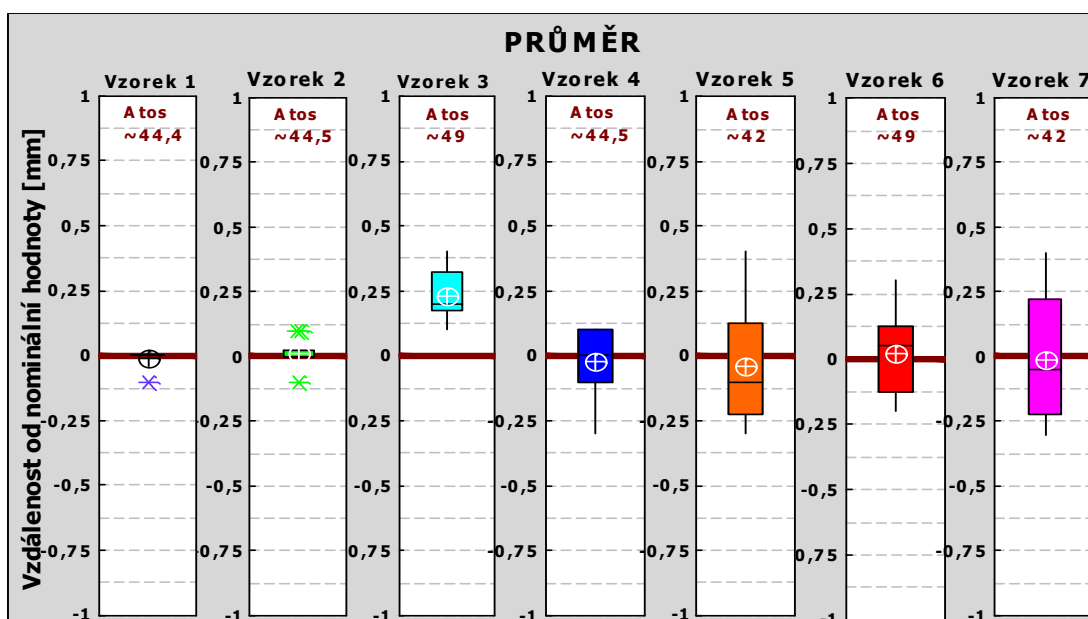
- *Průměr*

Tab. 6-4: Výsledky měření průměru sedmi různých vzorků v nezahřátém stavu.

Vzorek	ATOS	Min	1. Kvartil	Median	3. Kvartil	Max	Rozpětí	Median-Atos
1	~44,5	44,3	44,4	44,4	44,4	44,4	0,1	0,1
2	~44,5	44,4	44,5	44,5	44,525	44,6	0,2	-0,1
3	~49	49,1	49,175	49,2	49,325	49,4	0,3	-0,4
4	~44,5	44,2	44,4	44,5	44,6	44,6	0,4	-0,1
5	~42	41,7	41,775	41,9	42,125	42,4	0,7	-0,4
6	~49	48,8	48,875	49,05	49,125	49,3	0,5	-0,3
7	~42	41,7	41,775	41,95	42,225	42,4	0,7	-0,4



Obr. 6-5: Krabicový graf zobrazující charakteristiky výsledků měření průměru vzorků.

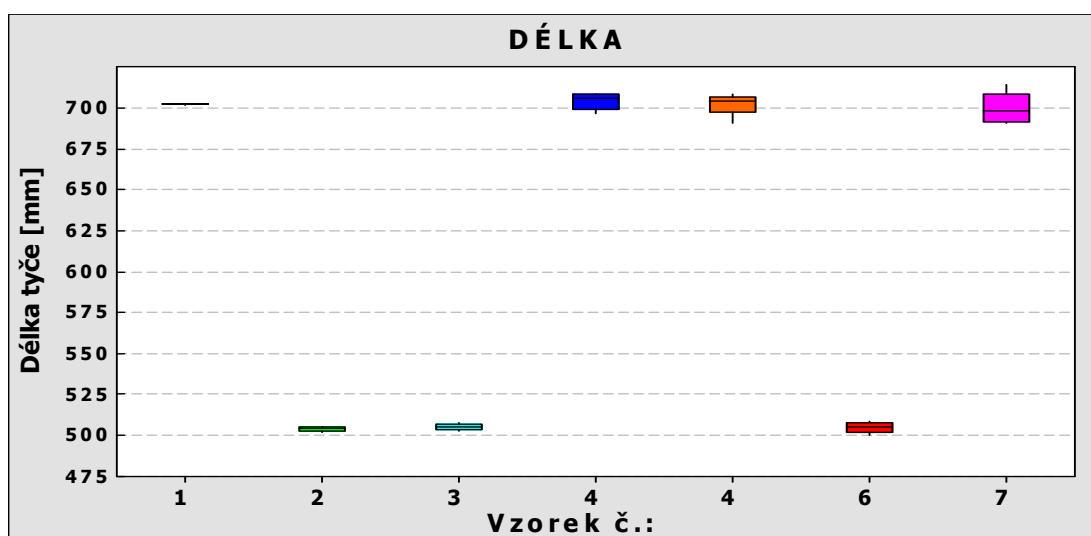


Obr. 6-6: Krabicové grafy měření maximálního průhybu tyče s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření.

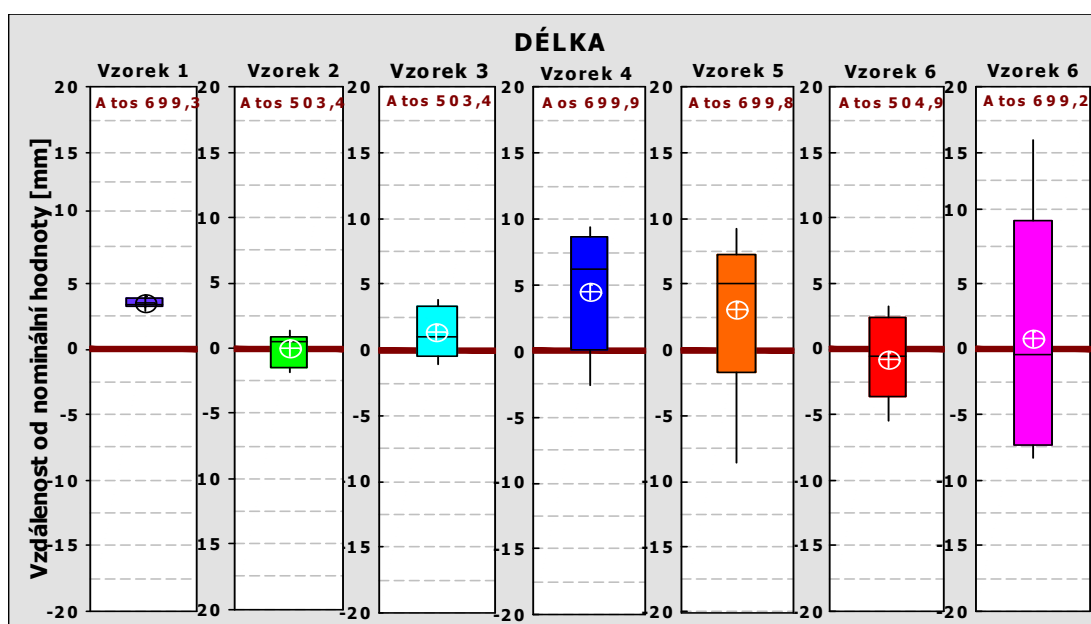
- *Délka*

Tab. 6-5: Výsledky měření délky sedmi různých vzorků v nezahřátém stavu.

Vzorek	ATOS	Min	1. Kvartil	Median	3. Kvartil	Max	Rozpětí	Median-Atos
1	699,3	702,4	702,6	702,7	703,1	703,2	0,6	3,4
2	503,4	501,6	502,0	503,9	504,3	504,8	2,9	0,5
3	503,4	502,3	502,9	504,4	506,7	507,2	4,3	1,0
4	699,9	697,3	700,0	706,1	708,5	709,2	9,3	6,2
5	698,8	691,2	698,1	704,9	707,0	709	10,9	6,1
6	504,9	499,4	501,3	504,4	507,3	508,1	6,8	-0,5
7	699,2	690,9	691,8	698,8	709,0	715,1	23,3	-0,4



Obr. 6-7: Krabicový graf zobrazující charakteristiky výsledků měření délky vzorků.



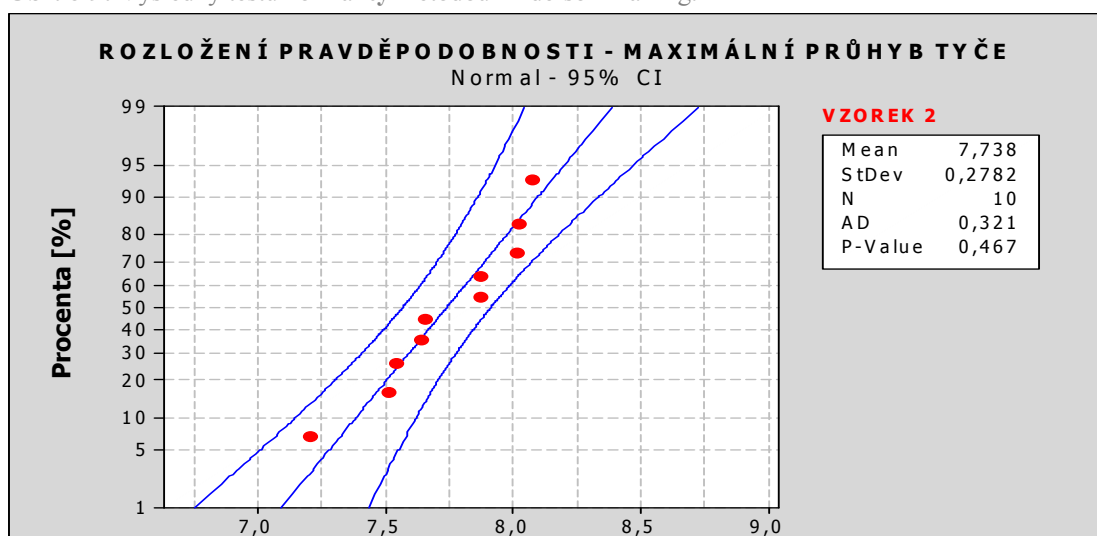
Obr. 6-8: Krabicové grafy měření délky tyče s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření.

Z výsledků analýzy je patrné, že velikost chyby měření (rozdíl změřené a nominální hodnoty) a rozpětí naměřených hodnot jednotlivých vzorků je závislá na charakteru měřeného vzorku – na jeho skutečné délce a velikosti deformace. Další závěry vyplývající z kompletních výsledků statistické analýzy se nacházejí v kapitole 6.2.

### Analýza normality dat

Na obrázku 6-9 je graf zobrazující výsledek testu normality dat z měření velikosti průhybu u druhého vzorku metodou Anderson-Darling. Výsledky testů všech čtyř parametrů pro všech sedm měřených vzorků se nachází v tabulce 6-6.

Obr. 6-9: Výsledky testu normality metodou Anderson-Darling.



MAXIMÁLNÍ PRŮHYB TYČE						POLOHA PRŮHYBU					
Vzorek	Mean	St Dev	N	AD	P	Vzorek	Mean	St Dev	N	AD	P
1	0,773	0,1140	10	0,394	0,304	1	341,6	39,84	10	0,738	<b>0,036</b>
2	7,738	0,2782	10	0,321	0,467	2	332,2	2,822	10	0,561	0,109
3	9,965	0,3944	10	0,186	0,874	3	250,9	4,766	10	0,866	<b>0,016</b>
4	11,40	0,5313	10	0,167	0,910	4	362,0	9,664	10	0,227	0,749
5	12,18	0,8031	10	0,218	0,780	5	488,0	31,70	10	0,874	<b>0,016</b>
6	17,03	0,9069	10	0,728	<b>0,039</b>	1	246,2	4,378	10	0,257	0,638
7	19,12	1,296	10	0,963	<b>0,009</b>	7	259,0	19,35	10	0,248	0,672

PRŮMĚR TYČE						DÉLKA TYČE					
Vzorek	Mean	St Dev	N	AD	P	Vzorek	Mean	St Dev	N	AD	P
1	44,39	0,0316	10	3,208	<b>&lt;0,005</b>	1	702,8	0,287	10	0,406	0,283
2	44,51	0,0568	10	1,419	<b>&lt;0,005</b>	2	503,3	1,194	10	0,602	0,085
3	49,23	0,1059	10	0,753	<b>0,033</b>	3	504,8	1,874	10	0,423	0,256
4	44,48	0,1317	10	0,637	0,068	4	704,4	4,659	10	0,561	0,110
5	41,96	0,2366	10	0,437	0,234	5	702,9	5,667	10	0,427	0,249
6	49,02	0,1687	10	0,302	0,512	1	504,1	3,062	10	0,232	0,728
7	41,99	0,2514	10	0,300	0,515	7	700,0	8,712	10	0,417	0,265

Tab. 6-6: Výsledky testů normality u čtyř analyzovaných parametrů.

Analýza ukázala, že pouze výsledky měření délky splňují u všech testovaných vzorků hypotézu o normálním rozdělení. Z důvodu zachování jednotného postupu bude další testování všech parametrů provedeno pomocí neparametrických testů.

### Test statistické významnosti chyby měření

Výsledky testu jsou uvedeny v tabulce 6-7. Červeně jsou označeny hodnoty  $p < 0,05$ , které říkají, že chyba měření je statisticky významná (systematická).

VELIKOST PRŮHYBU					POLOHA PRŮHYBU				
Vzorek	Atos	Odhad mediánu <sup>25</sup>	Wilcoxon statistic	P	Vzorek	Atos	Odhad mediánu <sup>22</sup>	Wilcoxon statistic	P
1	~0.30	0,77	55,0	0,003	1	334	341,7	32,0	0,683
2	7.80	7,76	54,0	0,008	2	331.5	332,1	39,0	0,262
3	10.20	9,97	12,0	0,126	3	251.5	251,5	27,0	1,000
4	11.59	11,39	17,0	0,308	4	369.5	362,1	8,0	0,053
5	13.42	12,17	1,0	0,008	5	501.3	493,7	14,0	0,185
6	18.25	16,99	0,0	0,006	6	250.9	246,6	4,0	0,019
7	21.08	18,7	2,0	0,011	7	234	257,6	55,0	0,006

PRŮMĚR					DÉLKA				
Vzorek	Atos	Odhad mediánu <sup>22</sup>	Wilcoxon statistic	P	Vzorek	Atos	Odhad mediánu <sup>22</sup>	Wilcoxon statistic	P
	~44,5	44,4	0,0	0,006	1	699.3	702,8	55,0	0,006
	~44,5	44,5	4,0	0,789	2	503.4	503,3	25,0	0,838
	~49	49,2	55,0	0,006	3	503.4	504,8	45,5	0,074
	~44,5	44,5	16,0	0,834	4	699.9	704,5	48,0	0,041
	~42	41,95	16,5	0,515	5	698.8	703,5	45,5	0,093
	~49	49,0	25	0,813	6	504.9	504,3	18,5	0,386
	~42	42,0	21,5	0,953	7	699.2	700,1	30	0,838

Tab. 6-7: Wilcoxonův test souboru dat čtyř analyzovaných parametrů.

Z analýzy vyplývá, že výsledky měření mohou být zatíženy systematickou chybou. Příčinou systematických chyb se zabývá následující kapitola. V případě hodnocení navržené metodiky je třeba uvažovat závažnost těchto chyb z hlediska skutečných požadavků na přesnost při reálné aplikaci.

### 6.1.2 Interpretace výsledků měření vzorků s teplotou okolí

Z výsledků provedené analýzy vyplývá, že velikost chyby měření (rozdíl změřené a nominální hodnoty) a rozpětí naměřených hodnot jednotlivých vzorků je závislá na charakteru měřeného vzorku – na jeho skutečné délce a velikosti deformace. Míra závislosti na těchto dvou veličinách se u jednotlivých měřených parametrů liší. Závislost je možné popsat pomocí dvourozměrné regresní analýzy. Pokud by byl nalezen dostatečně přesný model popisující chyby měření, bylo by možné výsledky

<sup>25</sup> Medián není u Wilcoxonova testu v softwaru Minitab počítán podle standardního vzorce. Algoritmus pro výpočet je popsán v článku: D.B. Johnson and T. Mizoguchi (1978). "Selecting the Kth Element in  $X + Y$  and  $X_1 + X_2 + \dots + X_m$ ," SIAM Journal of Computing 7, pp.147–153.

korigovat. Nicméně vytvoření kvalitního modelu by vyžadovalo měření většího počtu vzorků s rovnoměrně rozdělenými hodnotami průhybu a délky. Následující odstavce uvádějí obecné hodnocení kvality výsledků s ohledem na způsob měření a požadavky na přesnost.

- **Maximální průhyb a délka**

V současné verzi softwaru je měření těchto dvou parametrů řešeno v příčných řezech, jejichž vzdálenost je nastavitelná. Uživatel může volit šířku řezů ve snímku mezi 20 až 100 pixely, což odpovídá při dané konfiguraci kamer rozpětí 3,3 až 16,7 mm v reálném měřítku. Při experimentálním měření byla nastavena šířka řezů 60 pixelů, tj. ve skutečnosti 10 mm. Z toho vyplývá, že v ideálním případě by maximální odchylka těchto dvou parametrů měla ležet v toleranci  $\pm 10$  mm od nominální hodnoty. V případě měření délky je tento předpoklad u všech vzorků splněn. Výsledky měření polohy maximálního průhybu ukazují, že v toleranci se pohybují pouze vzorky s délkou 500 mm. V případě měření polohy má patrně délka větší vliv na kvalitu výsledků než velikost deformace.

Z výsledků je patrné, že vzorek č. 1 ukazuje několikanásobně vyšší hodnoty rozpětí výsledků měření polohy maximálního průhybu než ostatní vzorky. Příčinou je téměř nulový průhyb (cca 0,3 mm), jehož přesná velikost i poloha je již těžko měřitelná. Podle požadavků definovaných ve společnosti Žďas by měl být navrhovaný systém schopen měřit průhyb s minimální velikostí 10 mm na výkovku o délce 6 m. Pro tyto hodnoty je poměr délky a velikosti průhybu roven číslu 600, což je téměř 4x více než v případě nejmenšího testovaného průhybu. Chybu měření velmi malých průhybů by bylo třeba dále ověřit na větším počtu vzorků.

- **Průměr**

Z výsledků analýzy významnosti chyby měření vyplývá, že měření vzorku č. 1 a 3 vykazuje statisticky významné chyby. Při hodnocení těchto chyb je však nutné brát v úvahu několik aspektů:

- 1) Průměr se na různých místech vzorku liší (viz kapitola 5.8.1) a nominální hodnota průměru každého vzorku je pouze přibližná.
- 2) Hodnota průměru měřená navrženou metodikou je počítaná jako medián z průměrů změřených v každém příčném řezu.

Je tedy zřejmé, že jak nominální hodnota, tak i výsledná hodnota získaná měřením pomocí navržené metodiky je pouze přibližná a výsledky v toleranci  $\pm 0,5$  mm jsou zcela dostačující. Navíc se jedná pouze o výsledky kontrolní, neboť velikost průměru musí být na začátku měření již známá (z kovacího stroje).

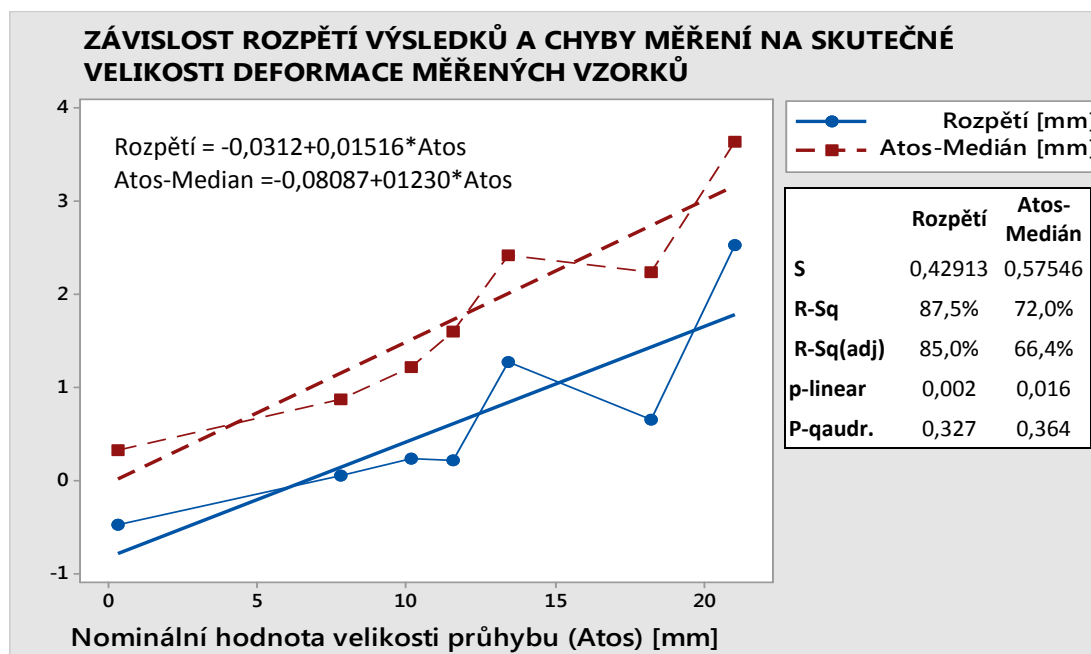
- **Velikost maximálního průhybu**

Z krabicových grafů je jednoznačně pozorovatelná závislost chyby měření i rozpětí naměřených hodnot na skutečné velikosti deformace vzorku. Přítomnost systematické chyby u většiny měřených vzorků potvrzuje také Wilcoxonův test. Závislost výsledků na velikosti deformace (bez ohledu na délku vzorku) byla testována pomocí korelační analýzy metodou Spearman pro nenormálně rozdělená data – viz tabulka 6-7 na následující straně. Hodnoty pravděpodobnosti  $p < 0,05$  potvrzují hypotézu o této závislosti. Pomocí regresní analýzy byl testován model, který nelépe odpovídá závislosti obou parametrů (viz obr. 6-10). Tabulka v tomto obrázku ukazuje výsledky regresní analýzy. Pravděpodobnost  $p > 0,05$  v případě

v případě kvadratické závislosti poukazuje na to, že použití modelu vyššího řádu bude mít na kvalitu modelu pouze malý vliv. Proto byla použita regrese lineární. V tabulce je uvedena *směrodatná odchylka (S)* a *míra úspěšnosti proložení dat (R-Sq)*.

Tab. 6-8: Korelační analýza metodou Spearman.

Korelace – Spearman:	Max. průhyb (ATOS) & Rozpětí	Max. průhyb (ATOS) & Atos - Medián
Spearman	0,964	0,929
P	0.000	0.003



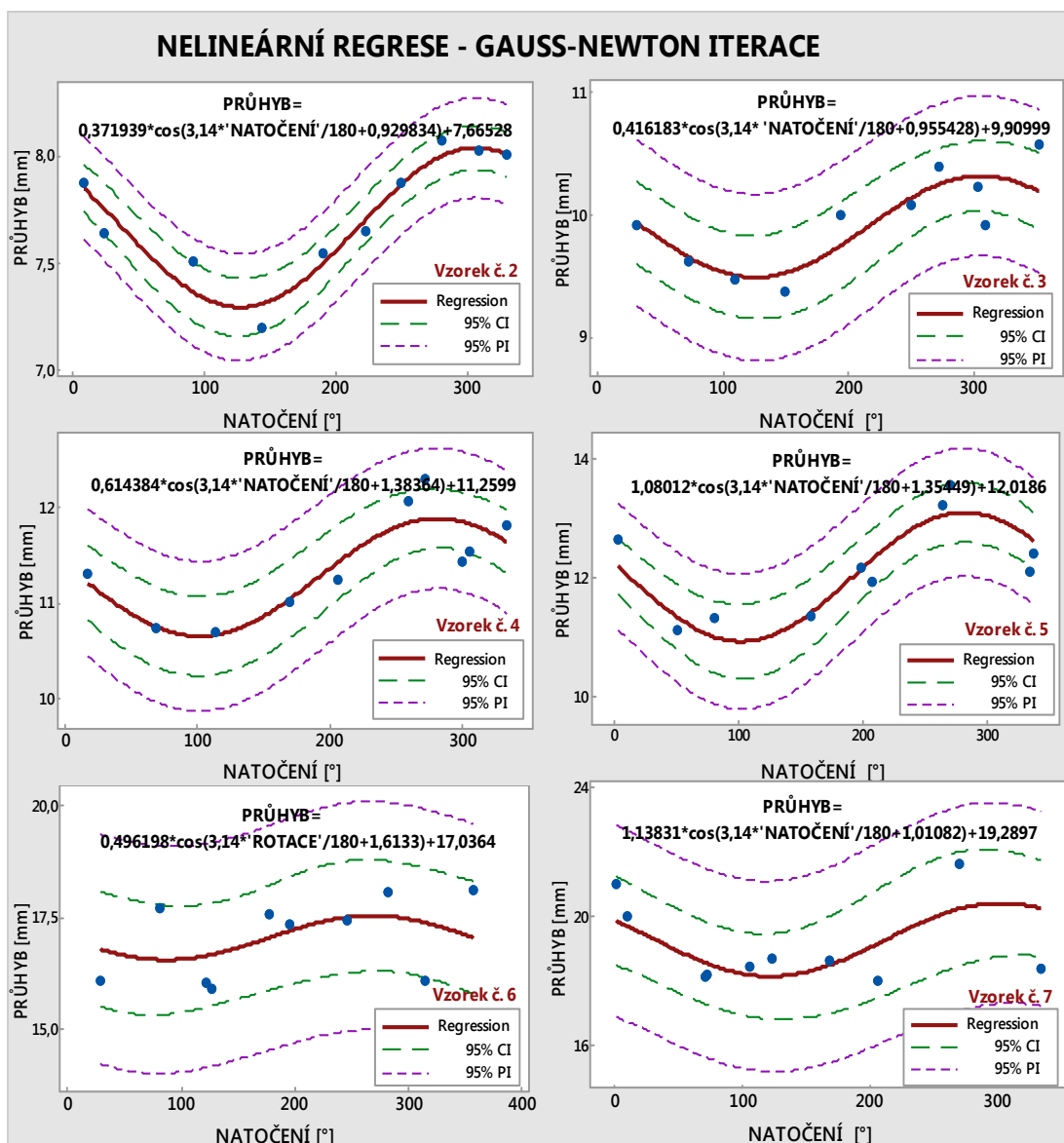
Obr. 6-10: Regresní analýza zobrazuje závislost výsledků měření maximálního průhybu na jeho skutečné velikosti.

Dále byla testována hypotéza o sinové závislosti výsledků měření maximálního průhybu na směru natočení tohoto průhybu vůči kamerám. Grafy na obrázku 6-11 znázorňují provedenou regresní analýzu. Parametry sinové funkce byly vypočteny pomocí Gauss-Newtonovy iterační metody. V tabulce 6-8 jsou zobrazeny výsledky analýzy, které ukazují úspěšnost proložení dat zvolenou křivkou - součet čtverců residuí (SSE), střední kvadratickou odchylku (MSE), směrodatnou odchylku (S) a počet provedených iteračních kroků.

Tab. 6-9: Výsledky regresní analýzy sinové funkce pomocí Gauss-Newtonovy metody.

	2	3	4	5	6	7
Iterations	5	5	5	5	5	5
Final SSE	0,0550833	0,436522	0,552670	1,12518	6,20051	8,79030
MSE	0,0078690	0,0623603	0,0789529	0,160740	0,885788	1,25576
S	0,0887076	0,249721	0,280986	0,400924	0,941163	1,12061





**Obr. 6-11:** Regresní analýza zobrazuje závislost výsledků měření maximálního průhybu na úhlu jeho natočené vůči kamerám.

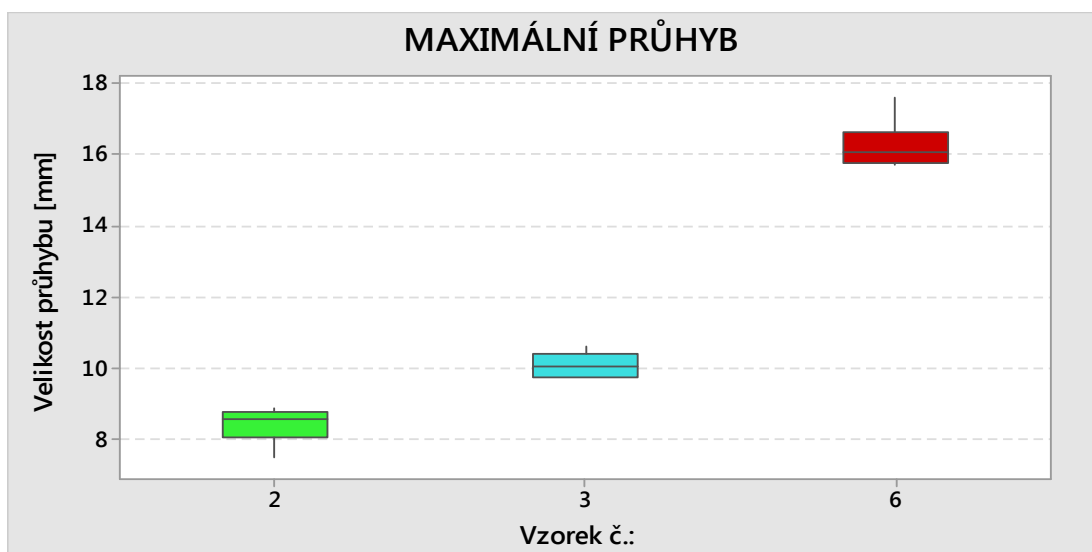
Z výsledků je patrné, že maxima a minima funkce odpovídají u všech vzorků přibližně stejnému úhlu natočení. Tento fakt poukazuje na to, že příčinou rozptylu naměřených hodnot může být nesymetrické ustavení kamer a nedostatečně přesná kalibrace, která způsobí nepřesný výpočet měřítka. Pokud je vzorek natočen tak, že jeho maximální průhyb leží v rovině rovnoběžné s obrazovou rovinou jedné kamery, potom je výpočet velikosti tohoto průhybu závislý pouze na měřítku v této kameře. Nepřesně vypočtená měřítka v jednotlivých kamerách potom způsobí výkyvy ve výsledcích při konkrétních úhlech natočení průhybu vůči kamerám.

## 6.1.3 Statistická analýza výsledků měření vzorků v zahřátém stavu

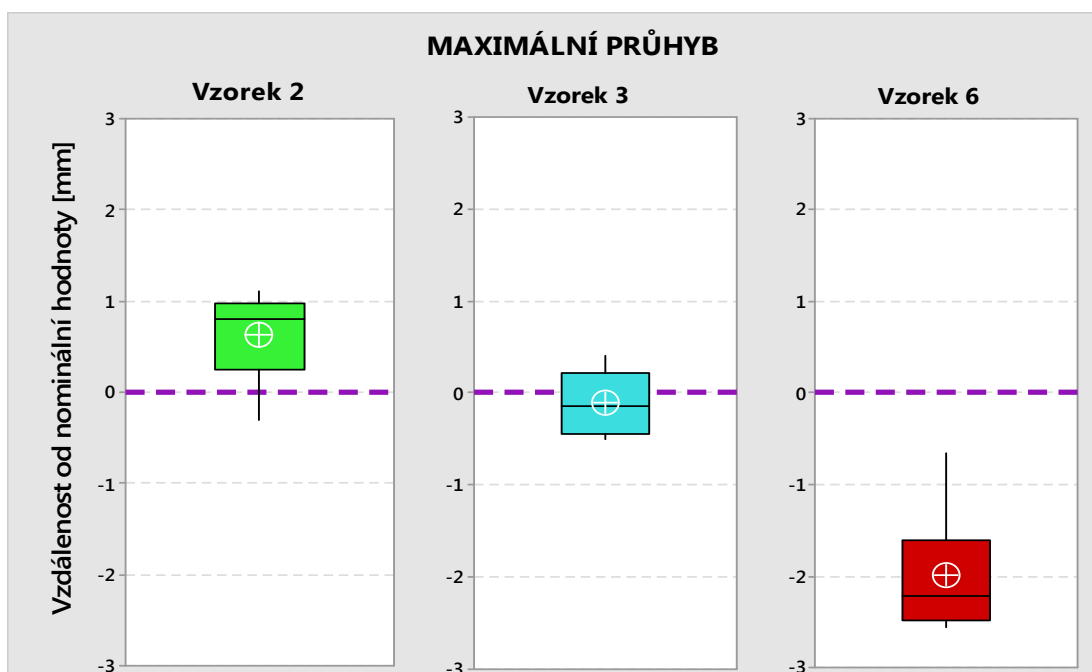
- *Velikost maximálního změřeného průhybu*

Tab. 6-10: Výsledky měření velikosti max. průhybu tří různých vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.

Vzorek	ATOS původní	Min	1. Kvartil	Median	3. Kvartil	Max	Rozpětí	Median-Atos
2	~7,8	7,5	8,050	8,60	8,775	8,9	1,4	0,8
3	~10,2	9,7	9,750	10,05	10,425	10,6	0,9	-0,2
6	~18,26	15,7	15,775	16,05	16,650	17,6	1,9	-2,3



Obr. 6-12: Krabicový graf zobrazující charakteristiky výsledků měření velikosti max. průhybu vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.

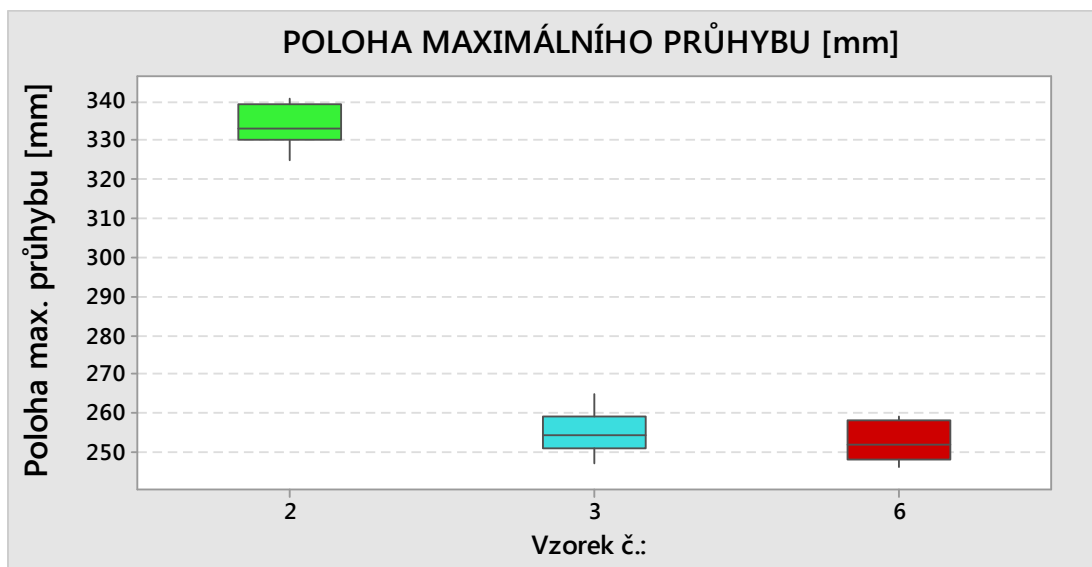


Obr. 6-13: Krabicové grafy výsledky měření max. průhybu vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření.

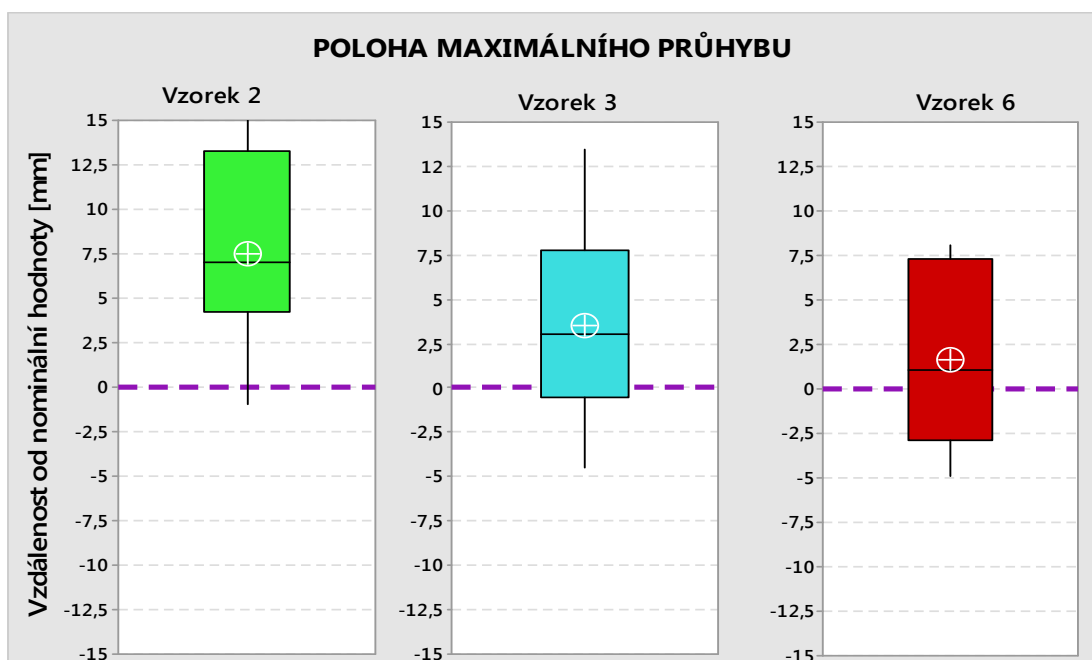
- *Poloha maximálního průhybu (vzdálenost od konce)*

Tab. 6-11: Výsledky měření polohy max. průhybu tří různých vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.

Vzorek	ATOS původní	Min	1. Kvartil	Median	3. Kvartil	Max	Rozpětí	Median-Atos
2	~325	325	330,25	333,0	339,25	341	16	8
3	~251,5	247	251,00	254,5	259,25	265	18	3
6	~250,9	246	248,00	252,0	258,25	259	13	1,1



Obr. 6-14: Krabicový graf zobrazující charakteristiky výsledků měření polohy max. průhybu vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.

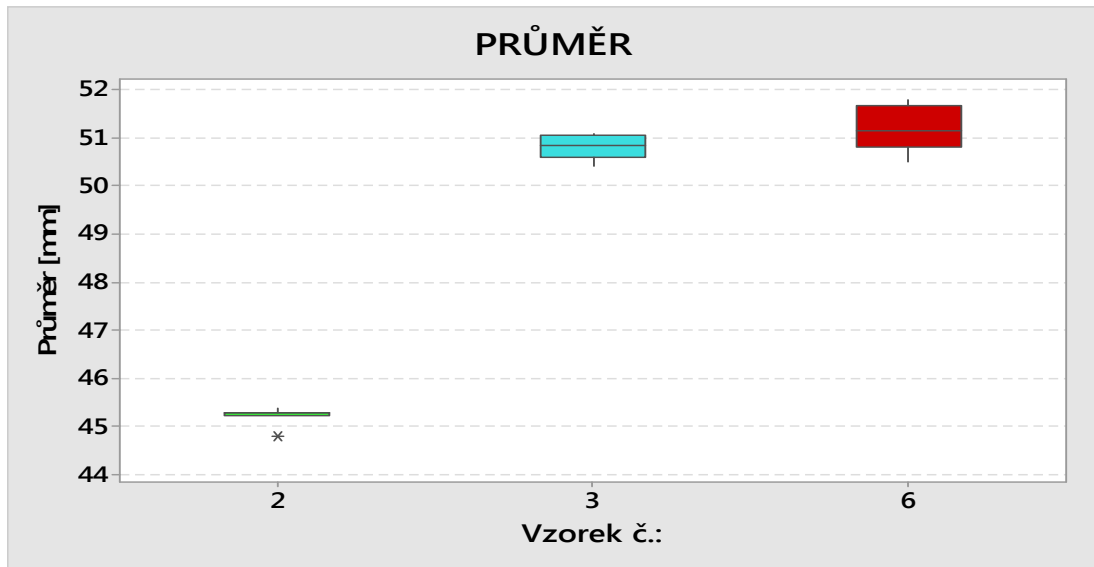


Obr. 6-15: Krabicové grafy výsledky měření polohy max. průhybu vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření.

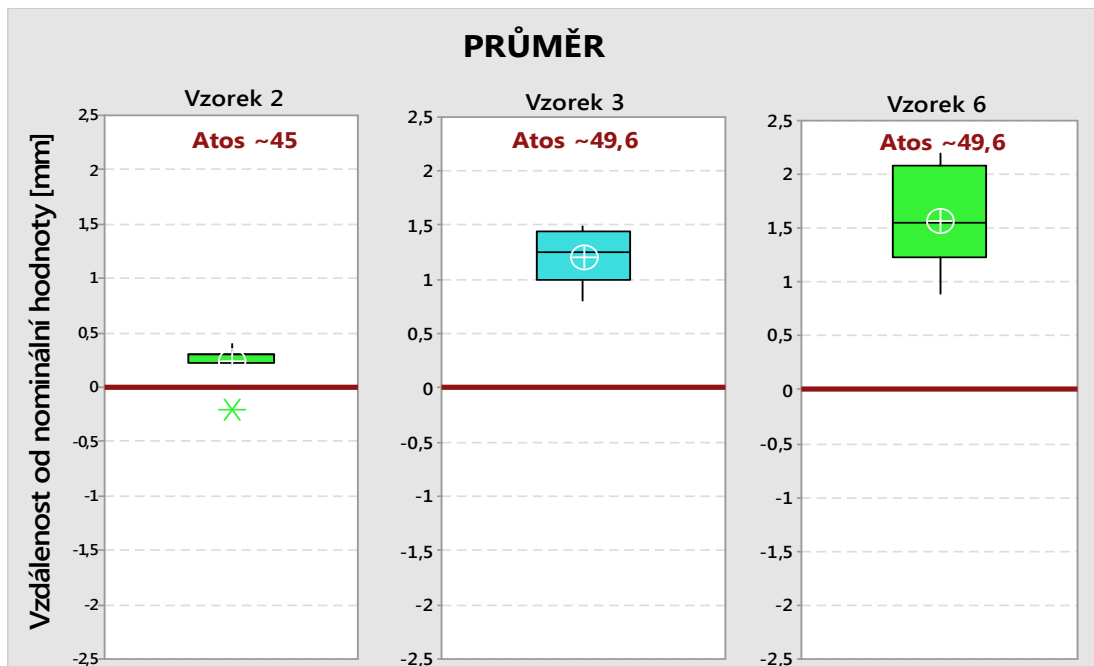
- *Průměr*

Tab. 6-12: Výsledky měření průměru tří různých vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.

Vzorek	ATOS	Min	1. Kvartil	Median	3. Kvartil	Max	Rozpětí	Median-Atos
2	~45	44,80	45,23	45,30	45,30	45,40	0,60	-0,30
3	~49,6	50,40	50,60	50,85	51,05	51,10	0,70	-1,25
6	~49,6	50,50	50,83	51,15	51,68	51,80	1,30	-1,55



Obr. 6-16: Krabicový graf zobrazující charakteristiky výsledků měření průměru vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.

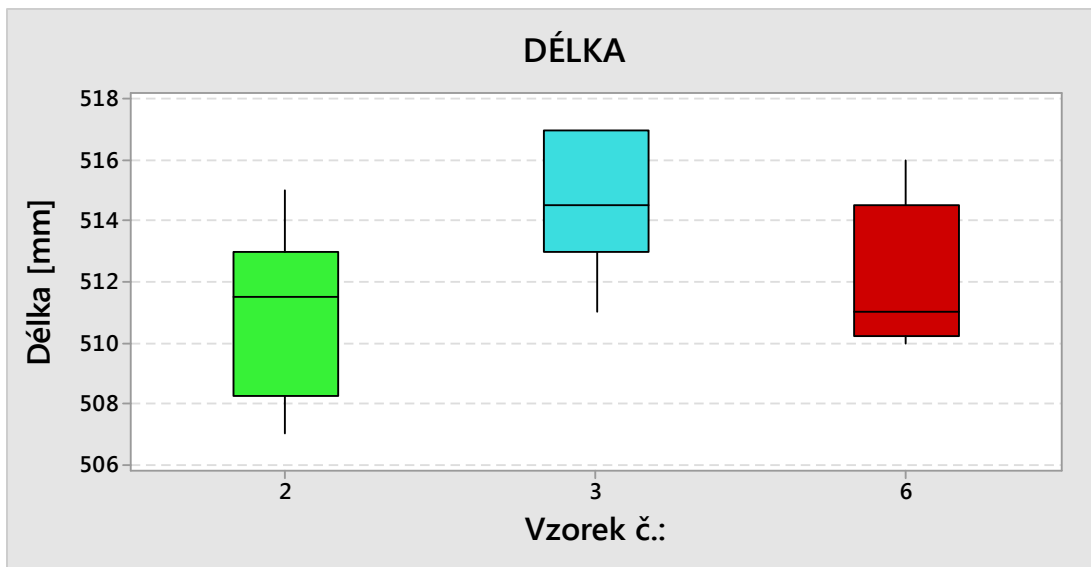


Obr. 6-17: Krabicové grafy výsledky měření průměru vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření.

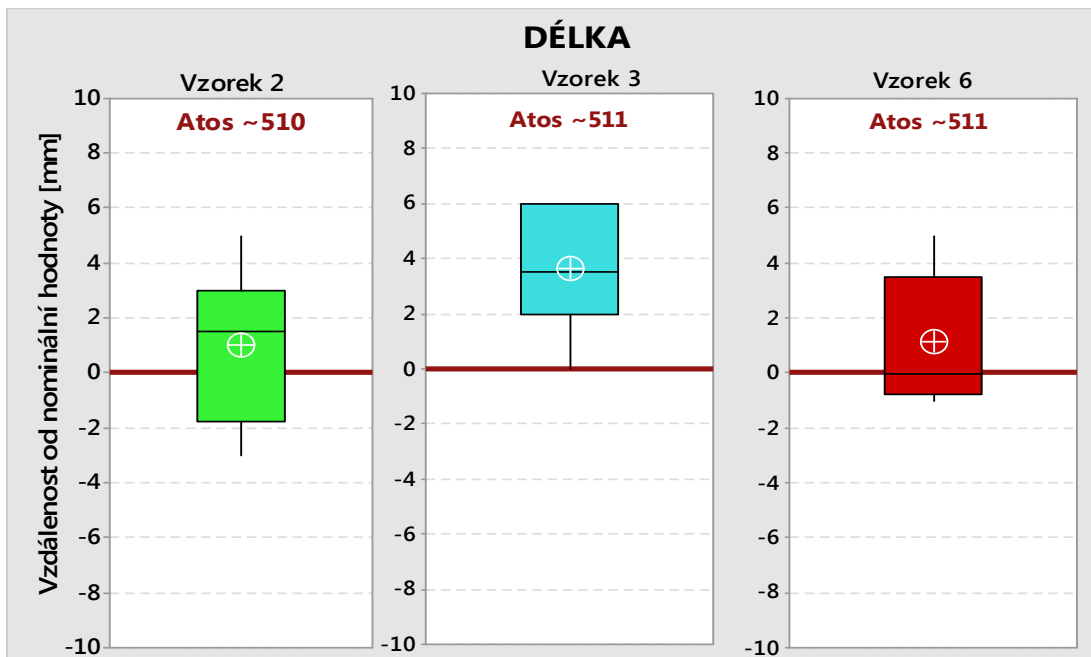
- *Analýza výsledků měření délky*

Tab. 6-13: Výsledky měření délky tří různých vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.

Vzorek	ATOS	Min	1. Kvartil	Median	3. Kvartil	Max	Rozpětí	Median-Atos
2	~510	507	508,25	511,5	513,0	515	8	-1,50
3	~511	511	513,00	514,5	517,0	517	6	-3,50
6	~511	510	510,25	511,0	514,5	516	6	0,00



Obr. 6-18: Krabicový graf zobrazující charakteristiky výsledků měření délky vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.



Obr. 6-19: Krabicové grafy výsledky měření délky vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření.

#### 6.1.4 Interpretace výsledků měření vzorků v zahřátém stavu

Již statistická analýza vzorků s normální teplotou okolí ukázala přítomnost systematických chyb. Je tedy zřejmé, že tyto chyby se budou vyskytovat také u výsledků měření vzorků v ohřátém stavu. Z toho důvodu nebude na těchto výsledcích proveden test normality a test statistické významnosti chyby měření. Následující odstavce uvádějí obecné hodnocení získaných výsledků, uvažují a hodnotí možné vlivy na přesnost a rozptyl. Komplexní závěry jsou uvedeny v kapitole 6.2.

- **Délka**

Stejně jako v případě měření vzorků s pokojovou teplotou se všechny výsledky měření délky pohybují v toleranci  $\pm 10$  mm. Maximální změřená odchylka od referenční hodnoty je -3,5 mm u vzorku číslo 3.

- **Průměr**

Odchylka od referenční hodnoty je ve srovnání s výsledky měření vzorků před ohřevem více jak trojnásobná. Pohybuje se mezi 0,3 a 1,5 mm (před ohřevem: 0,1 až 0,4 mm). Tento fakt však není překvapivý. Ohřevem dojde k zvětšení rozměrů a následnému smrštění při rychlém chladnutí. Vypočtené referenční hodnoty nemusejí zcela odpovídat skutečnosti z důvodu možných nehomogenit v materiálu. Dalším zásadním důvodem vyššího rozptylu naměřených hodnot i vyšší odchylky jsou okraje, které na povrchu vzorku způsobují nerovnosti. Ty se projeví také na detekovaných hranách.

- **Velikost maximálního průhybu a jeho poloha**

Uvažujeme-li porovnání výsledků měření polohy maximálního průhybu s referenční hodnotou, největší změřená chyba je 8 mm u vzorku číslo 2. Všechny výsledky měření polohy průhybu se pohybují v toleranci  $\pm 10$  mm. V případě měření velikosti maximálního průhybu, byla naměřena maximální odchylka od referenční hodnoty 2,3 mm u vzorku číslo 6, což je hodnota více jak trojnásobně vyšší než v případě měření tohoto vzorku před ohřevem. Obecné hodnocení výsledků měření průhybu je však třeba brát pouze orientačně, protože přesné referenční hodnoty nejsou k dispozici.

## 6.2 Zhodnocení navržené metodiky a interpretace výsledků měření

Experimenty prokázaly funkčnost softwaru a poukázaly na přítomnost systematických chyb. Interpretace těchto chyb umožní cílenou modifikaci softwaru a tím jeho optimalizaci. Základní vliv na dosaženou přesnost měření má samozřejmě rozlišení ve snímku. Do jisté míry je tedy přesnost měření možné ovlivnit volbou kamery a vzdálenosti měření. Další vliv na výsledky měření má přesnost kalibrace, přesnost prostorové orientace, ale také např. způsob interpolace dat a vyhlazení detekovaných hran, nebo natočení řezných rovin, z nich je počítána skutečná osa výkovku. Následující body se zabývají vhodností použití jednotlivých metod, jejich vlivem na přesnost a možnostmi optimalizace.

- **Kalibrace lineárních parametrů kamery**

Výpočet parametrů kamery byl řešen pomocí lineárního modelu, konkrétně metodou Přímé lineární transformace (DLT). Obecně je lineární řešení kalibrace výpočetně jednoduché a rychlé, ale méně přesné než metody nelineární (viz kapitola 2.5.2). Malá odchylka referenčního bodu detekovaného ve snímku může způsobit velké změny výsledků. Problémem je přeürčení soustavy rovnic. V systému DLT rovnic s jedenácti neznámými je pouze deset z nich nezávislých. Řešení tohoto problému představuje Modifikovaná přímá lineární transformace (MDLT), kterou navrhl Hatze (1988)<sup>26</sup>. Další možností je použití některé z nelineárních metod, které jsou založeny na rovnicích kolinearity.

- **Kalibrace nelineárních parametrů kamery**

Vzhledem k použití neměřické kamery na experimentální testování metodiky byla zvolena metoda korekce zkreslení pomocí inverzního modelu podle [52]. Algoritmus byl převzat z volně dostupné databáze Matlab Central<sup>27</sup>. Korekční parametr byl volen uživatelem na základě sledování střední kvadratické odchylky polohy referenčních bodů, které byly zpětně vypočteny pomocí výsledků DLT na korigovaných snímcích. Střední kvadratická odchylka při použití nekorigovaných snímků dosahovala více než 10 pixelů, v případě korigovaných obvykle méně jak 1 pixel. Tato metoda se pro účely testování metodiky jeví jako dostatečně přesná. Kvalita korekce by mohla být ověřena porovnáním s výsledky výpočtu DLT na snímcích korigovaných např. pomocí softwaru Digital Photo Professional. V případě měření v reálných podmínkách s metrickými kamerami by bylo třeba vytvořit přesný dvojrozměrný či trojrozměrný model zkreslení pro danou kameru a objektiv (viz kapitola 5.2.1).

- **Detekce hran**

Algoritmus detekce hran byl testován především na vzorcích v nezahřátém stavu. Měření, při němž bylo vyhodnoceno 70 párů snímků, prokázalo, že navržený algoritmus pracuje s minimálními vstupy uživatele – během vyhodnocování nebylo ve většině případů nutné měnit nastavitelné parametry. Problémy nastávaly, pokud byl měřen vzorek s velkým průhybem. Jelikož je kontrola návaznosti řešena v řezech, bylo nutné zvolit vhodné okrajové podmínky pro daný rozsah šířky řezů, při jejichž porušení bude hranový bod opraven. Nastavené podmínky však

<sup>26</sup> Hatze, H. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach. *J. Biomechanics*, 1988 Vol. 21, s. 533-538.

<sup>27</sup> <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/37980-barrel-and-pincushion-lens-distortion-correction>

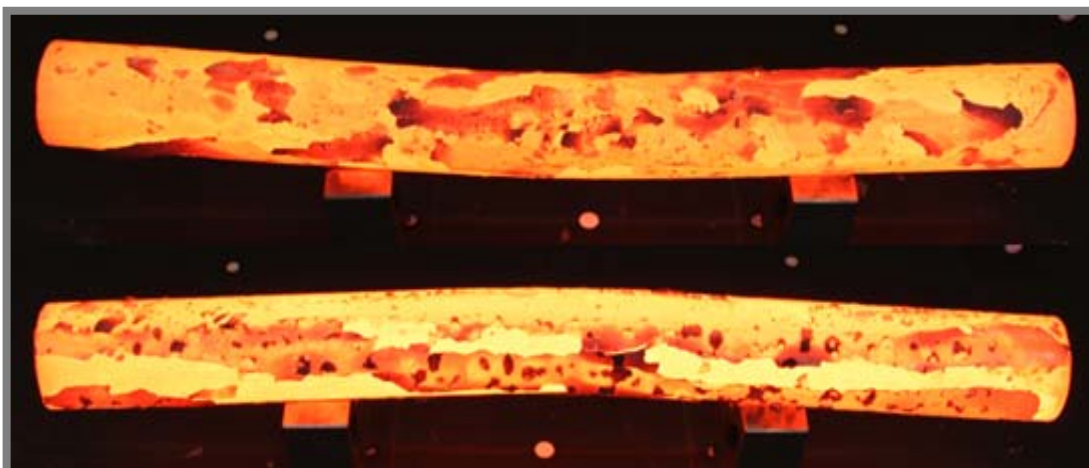
u některých snímků vzorků s největším průhybem způsobovaly chybnou opravu hrany. Nicméně tak velký poměr deformace k délce by se na skutečných rotačních výkovech nevyskytoval.

Navržený algoritmus detekce hran byl testován také na 30ti párech snímků se vzorky v zahřátém stavu. U vzorku číslo 2 nevznikaly při ohřevu výrazné a rychle chladnoucí okuje, díky tomu byla intenzita povrchu poměrně rovnoměrná. Při těchto podmínkách fungovala kompletní detekce hran spolehlivě – vstupní parametry nebylo téměř nutné měnit.



**Obr. 6-6:** Příklad snímků vzorku číslo 2 ohřátého na teplotu 1200 °C. Expoziční čas 1/40 s., ohnisková vzdálenost 18 mm, clona F7.1.

V případě vzorků číslo 2 a 6 byly okuje mnohem výraznější. Parametry detekce musely být nastavovány individuálně u jednotlivých párů snímků. Nalezení vhodné prahové hodnoty a šířky mediánového filtru bylo problematické především v případě vstupní detekce, která slouží k nalezení konců vzorku v horizontálním směru. Algoritmus vstupní detekce tedy musí být upraven, tak aby pracoval bez vstupu uživatele spolehlivě při širším spektru podmínek.



**Obr. 6-6:** Příklad snímků vzorku číslo 3 a 6 ohřátého na teplotu 1200 °C. Expoziční čas 1/40 s., ohnisková vzdálenost 18 mm, clona F7.1.



Navržený algoritmus hlavní detekce s opravou chybně detekovaných hran fungoval ve většině případů spolehlivě. Při vhodném nastavení prahové hodnoty a mediánového filtru byla správná hrana nalezena se 100% úspěšností.

Pro zvýšení robustnosti celé detekce hran, by bylo vhodné zajistit rovnoměrnost intenzity osvětlení v okolí kolem měřeného dílu i v jednotlivých snímcích. Řešením by mohla být kombinace různě exponovaných snímků.

- ***Prostorová orientace***

Statistická analýza ukázala, že změřené hodnoty průhybu oscilují kolem nominální hodnoty v závislosti na směru natočení vůči kamerám (změřená maxima i minima odpovídala u více vzorků přibližně stejnému úhlu natočení). Tento fakt poukazuje na to, že příčinou rozptylu naměřených hodnot může být nesymetrické ustavení kamer a nedostatečně přesná kalibrace, která způsobí nepřesný výpočet měřítka. Tento problém je možné eliminovat přesnou montáží kamer a zavedením sofistikovanější metody kalibrace.

Dále byla ověřena hypotéza o závislosti chyby měření průhybu na skutečné velikosti tohoto parametru - s rostoucí velikostí deformace tyče, roste také velikost chyb měření (rozdíl změřené a referenční hodnoty). Tento jev byl uvažován a teoreticky popsán v kapitole 5.2 již při návrhu metodiky. Pro konfiguraci, která odpovídala podmínkám provedených experimentů, byla velikost chyby teoreticky stanovena na 0,3 mm u vzorku s průhybem 10 mm a 0,6 mm u vzorku s průhybem 20 mm (viz tabulka 5-2 str. 54). Podobný průhyb má vzorek č. 2 (10,2 mm) a vzorek číslo 6 (18,25 mm). U vzorku č. 2 byl výsledný rozdíl mediánu a nominální hodnoty 0,23 mm, v případě vzorku č. 6 byla tato hodnota 0,66 mm. Hodnoty mediánu tedy přibližně odpovídají predikci. Vzhledem k tomu, že předpokládanou závislost velikosti chyby měření na velikosti měřeného průhybu potvrdilo experimentální měření, dalším krokem ke zvýšení přesnosti měření by bylo zavedení korekčního modelu.

- ***Vyhlazení hran***

V současné verzi navrženého softwaru byla použita metoda klouzavého průměru (moving) na detekované hrany a metoda Savitzky-Golay (sgolay) na výslednou osu. Metoda Savitzky-Golay je obdobou metody klouzavého průměru (moving), kde koeficienty filtru jsou vypočteny pomocí regrese polynomického modelu daného řádu metodou nejmenších čtverců. Stupeň vyhlazení byl použit 0.15 a stupeň polynomu 2. V průběhu návrhu aplikace byly testovány také ostatní možnosti vyhlazování. Kromě metody sgolay dávala při vhodném velmi podobné výsledky metoda (rflowess). Při vhodném nastavení byly výsledky různých metod vyhlazování velmi podobné, případně se lišily v řádech setin mm, což je z důvodu následného zaokrouhlování nepodstatné. Velký vliv na výsledky má spíše velikost vyhlazení. Budoucí optimalizace softwaru, by měla počítat s nastavitelným parametrem velikosti vyhlazení.

- ***Natočení řezných rovin rovnoběžně se směrníci osy***

V současné verzi softwaru, je osa měřeného vzorku počítána pomocí detekovaných hranových bodů v jednotlivých řezech iteračně - v prvním kroku jsou normály řezných rovin rovnoběžné s osou x světového souřadného systému. Hranové body ležící v těchto řezech jsou proloženy kružnicí. Středů kružnic představují body na

hledané ose. Následně jsou vypočteny nové řezné roviny, jejichž normála je rovnoběžná se směrnici osy a v těchto rovinách jsou nalezeny nové hranové body. V současné verzi softwaru je nastaven výpočet pouze jednoho iteračního kroku. Hlavním důvodem je výpočetní zpomalení procesu měření a také poměrně malý vliv na výsledky (v rádech desetin mm).

### **Shrnutí vlivů na dosaženou přesnost měření průhybu:**

*Hlavní vlivy:*

- *Rozlišení ve snímcích*
- *Přesnost kalibrace – výpočet parametrů kamery a měřítka*
- *Prostorová orientace - eliminace asymetrického ustavení kamer a eliminace lineární závislosti velikosti chyby měření na velikosti průhybu (aproximace měřítka)*
- *Spolehlivost detekce hran - hrubé chyby náhodného charakteru*

*Další vlivy:*

- *Metoda vyhlazení detekovaných hran a metoda interpolace dat*
- *Natočení řezných rovin, v nichž je počítána výsledná osa*

### **Shrnutí hlavních bodů pro další optimalizaci softwaru:**

- *Implementovat modifikovanou metodu přímé lineární transformace*
- *Eliminovat nesymetrickou polohu kamer přesnou montáží*
- *Zavést korekci aproximace měřítka (závislost velikosti chyby měření na velikosti průhybu)*
- *Zvýšit odolnost vstupní detekce a předzpracovat snímky tak, aby byla intenzita osvětlení rovnoměrná*
- *Umožnit volbu velikosti vyhlazení hran, případně volbu výpočetní funkce přímo v GUI pro měření*
- *(Umožnit nastavitelnost parametrů detekce přímo v GUI pro měření)*
- *(Vyřešit automatické přiřazení detekovaných referenčních bodů při kalibraci)*

### **Návrh dalších experimentů:**

- *Vytvořit komplexnější hodnocení výsledků pomocí měření většího počtu vzorků s různými charakteristikami - např. vzorky s deseti různými průhyby, pro každý průhyb např. pět různých délek a deset různých natočení (tj. až 500 měření).*
- *Provést měření v reálných podmínkách*

## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce byl *návrh metodiky měření přímosti osy rotačních výkovků*, dle stanovených kritérií. Na základě analýzy odborných zdrojů, byla navržena metodika měření založená na pasivní fotogrammetrii a analýze obrazu. Systém založený na těchto principech dosud nebyl popsán, ačkoli na možnost jejich využití pro zmíněnou aplikaci poukazují některé publikace v kapitole 2.3. Optický systém založený na pasivní fotogrammetrii a analýze obrazu by mohl konkurovat již zavedeným systémům především rychlostí měření a cenou. První fáze řešení práce spočívala ve volbě a návrhu dílčích metod a jejich zavedení do programovacího jazyka. V práci byl navržen vlastní algoritmus pro detekci hran, prostorovou orientaci a výpočet hledaných parametrů. Dílčí metody byly sestaveny do komplexní softwarové aplikace, která umožňuje vyhodnotit odchylku přímosti osy, i rozměry měřených dílů, během několika vteřin.

Dalším hlavním cílem práce bylo *experimentální ověření funkčnosti navržené metodiky*. Pro tyto účely byla navržena a vyrobena měřicí aparatura. Testování probíhalo v laboratorních podmínkách na vzorcích malých rozměrů. Nejdříve bylo realizováno měření na vzorcích bez ohřevu, následně na vzorcích s teplotou 1000 až 1200 °C. Výsledky měření vzorků v nezahřátém stavu byly porovnány s výsledky, které byly získány 3D skenováním a následným softwarovým zpracováním dat v softwaru Tebis a Atos.

V reálných podmínkách jsou měřeny výkovky s poměrem průhybu k délce, který odpovídá vzorkům číslo 2, 3, 4 (přibližně 10x větší měřítko). Výsledky měření průhybu u těchto vzorků vykazují chybu mediánu z deseti měření 0,05 až 0,23 mm. Poloha průhybu a délka zmíněných vzorků byla ve všech případech změřena s odchylkou do 10 mm, tedy s menší odchylkou než je šířka příčných řezů, která byla v softwaru nastavena. Chyba měření na průměru u vzorků měřených před ohřevem se pohybuje do 0,4 milimetru. V případě vzorků měřených za tepla je odchylka přibližně trojnásobná. Příčinou je přítomnost okují na povrchu vzorku. Přesto, že byly dosud provedeny pouze testy v laboratorních podmínkách na vzorcích malých rozměrů, výsledky poukazují na to, že dosažitelná přesnost navržené metodiky bude vyhovující také v reálných podmínkách. Experimentální měření ověřilo funkčnost navržené metodiky a softwaru, statistická analýza následně poukázala na možnosti optimalizace jednotlivých částí softwaru.

Všechny *analyzované vlivy na dosahovanou přesnost měření včetně návrhů na optimalizaci* jsou popsány v kapitole 6.2. Statistická analýza potvrdila závislost odchylky měření na skutečné velikosti průhybu, tak jak bylo predikováno v kapitole 5.2. Řešením tohoto problému je zavedení korekčního modelu, který by byl vytvořen na základě většího počtu měření vzorků s různým tvarem a rozměry. Dalším doporučeným optimalizačním krokem je nahrazení použité kalibrační metody některou z nelineárních metod. Tím dojde ke zvýšení přesnosti a snížení rozptylu výsledků. Zkvalitnění výsledků měření by zajistila také přesná montáž profesionálních měřičských kamer. Spolehlivost navržené metody detekce hran se projevila zejména při vyhodnocování měření vzorků s vysokou teplotou. Ukázalo se, že není možné provést vyhodnocení celé série snímků se stejnými parametry detekce. Algoritmus pro detekci hran je třeba upravit tak, aby dosahoval vyšší spolehlivosti při větším rozpětí nastavených parametrů. Prvním krokem by mělo být zajištění

rovnoměrné intenzity osvětlení jak v jednotlivých snímcích, tak i uvnitř snímků samotných.

Další experimentální měření, která se přiblíží reálným podmínkám, a postupná optimalizace dílčích kroků metodiky, by měla vést k sestavení profesionálního optického měřicího systému určeného pro tuto vysoce specifickou aplikaci. Na následující straně jsou v bodech zmíněny konkrétní výstupy práce, které reflektují všechny stanovené cíle práce.

**Konkrétní výsledky, které odpovídají stanoveným cílům práce, jsou:**

- *vlastní metodika měření navržená dle stanovených kritérií*
- *výsledky experimentálního měření vzorků v nezahřátém i zahřátém stavu*
- *popis vlivů na dosahovanou přesnost měření, včetně návrhů na optimalizaci softwaru a návrhu dalších experimentů*
- *postup komparačního měření a vyhodnocení výsledků pomocí profesionálního fotogrammetrického systému,*

**Výstupem této práce je také:**

- *softwarová aplikace*
- *měřicí aparatura*
- *článek publikovaný ve sborníku *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII*, publikovaný na konferenci SPIE v Mnichově v roce 2013*
- *článek publikovaný ve sborníku a na konferenci v Mikulově *International Conference of Mechine Desing Departments* v roce 2012.*

Všechny vytyčené cíle jsou autorkou považovány za splněné.

**SEZNAM LITERATURY****Optické metody měření tvaru objektů**

- [1] BERNARD, A. Reverse engineering for rapid product development: a state of the art. In: *International Conference on Optical Instruments and Technology: Three-Dimensional Imaging, Optical Metrology, and Inspection. Proc. of SPIE 1999*, vol. 3835, s. 50-63.
- [2] LUHMANN, Thomas, et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Fundamental methods, s. 1-25. ISBN 978-184995-057-2.
- [3] REMONDINO, F.; EL-HAKIM, S. Image-Based 3D Modeling: A review. *The photogrammetric Record*. September 2006, vol. 115, no. 21, s. 269–291.
- [4] SNIDERMAN, Debbie. 3D Scanning 101. In: *Desktop Engineering* [online]. December 14, 2010 [cit. 2014-08-05]. Dostupné z: <<http://www.deskeng.com/de/3d-scanning-101/>>.
- [5] KALOVÁ, Ilona a Karel HORÁK. Optické metody měření 3D objektů. In: *Elektro revue* [online]. 12. 4. 2005 [cit. 2014-08-05]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap2.1.4>>.
- [6] VOJÁČEK, Antonín. PMD senzor & 3D měření vzdálenosti - 1. část "Princip". In: *Automatizace.hw.cz* [online]. 2006-07-03 [cit. 2011-06-23]. Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2006070301>>.
- [7] CHEN, F., BROWN, G. M. AND SONG, M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *Optical Engineering*, 2000, vol. 39, no. 1, s. 10-22.

**Fotogrammetrie – základní pojmy, rozdělení a aplikace**

- [8] MATTHEWS, N. and T. NOBLE, Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation and Preservation. [online]. *Denver Federal Center: BLM, Technical Note 428*, 2008 [cit. 2011-06-23]. Dostupné z: <<http://www.blm.gov/nstc/library/pdf/TN428.pdf>>.
- [9] LUHMANN, Thomas. Close range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, vol. 65, no. 6, s. 558-569.
- [10] FRASER, C.S. State of the art in industrial photogrammetry. *IAPRS*, Kyoto, 1988, vol. 27, p. 166-181.
- [11] LUHMANN, Thomas, et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Photogrammetric measuring systems, s. 401-438. ISBN 978-184995-057-2.

- [12] Géodésie Maintenance Services. *Géodésie Maintenance Services* [online]. 1998 [cit. 2011-06-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.geodesie-maintenance.com/us/>>.
- [13] GOM. *GOM: Optical Measurement Techniques* [online]. 2011 [cit. 2011-06-28]. Dostupné z: <<http://www.gom.com/>>.
- [14] JIANDONG, Z., LIYAN, Z. AND XIAOYU, D. Accurate 3D Target Positioning in Close Range Photogrammetry with Implicit Image Correction. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, vol. 22, no. 6, s. 649-657.
- [15] Renishaw. *Renishaw* [online]. 2001-2011 [cit. 2011-06-28]. Dostupné z: <<http://www.renishaw.com/en/renishaw-touch-probes-rotary-encoders-linear-encoders-angle-encoders-laser-calibration-dental-cad-cam-raman-spectroscopy-and-surgical-robots--1030>>.
- [16] Metronor. *Metronor* [online]. 2007 [cit. 2011-06-28]. Dostupné z: <<http://www.metronor.com/>>.
- [17] AICON. *AICON* [online]. 2011 [cit. 2011-06-28]. Dostupné z: <<http://www.aicon3d.de/en/start.html>>
- [18] Nikon Metrology. *Nikon Metrology NV* [online]. 2011 [cit. 2011-06-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.nikonmetrology.com/products>>.

### Metody měření tvaru výkovků s vysokou teplotou

- [19] SIEMER, E., NEISCHWITZ, P., KOPP, R. Quality optimized process control in open die forging. *Stahl und Eisen*, 1986. Vol. 106, no. 8, s. 383–388.
- [20] NYE, T. J., ELBADAN, A. M., BONE, G. M. Real-time process characterization of open die forging for adaptive control. *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, 2001, vol. 123, no. 4, s. 511–516.
- [21] TIAN, Z. at al. Dimension measurement of hot large forgings with a novel time-of-flight system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 44, no. 1, p. 125-132.
- [22] MÄTTÄ, K., KOSTAMOVARA, J. AND MYLLYL, R. Profiling of hot surfaces by pulsed time-of-flight laser range finder techniques. *Applied optics*, 1993, vol. 32, no. 27, s. 5334-5347.
- [23] MITEQ. *FERROTRON A MINTEQ DIVISION* [online]. c2011 [cit. 2011-07-25]. LaCamForge. <[http://www.minteq.com/fileadmin/user\\_upload/minteq/PDF/M-FE-30-PDF-Forge\\_Jan2011\\_.pdf](http://www.minteq.com/fileadmin/user_upload/minteq/PDF/M-FE-30-PDF-Forge_Jan2011_.pdf)>.
- [24] MERMEC GROUP. *MERMEC GROUP* [online]. c2009 [cit. 2011-07-25]. Open DieForgings. <[https://www.mermecgroup.com/download.php?f=/mermec-incorso/images/File/newsletter/InsightSteel\\_vol1\\_n1\\_eng.pdf](https://www.mermecgroup.com/download.php?f=/mermec-incorso/images/File/newsletter/InsightSteel_vol1_n1_eng.pdf)>.
- [25] SINTEF. *SINTEF* [online]. November 19. 2008 [cit. 2011-07-25]. Measuring 3D shape of steel shafts during forging. <<http://www.sintef.no/home/Information-and-Communication-Technology->

ICT/Optical-measurement-systems-and-data-analysis-/Projects/Measuring-3D-shape-of-steel-shafts-during-forging/ >.

- [26] JIA, Z. at al. An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, no. 2, s. 267-271.
- [27] LIU, W. at al. Fast dimensional measurement method and experiment of the forgings under high temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011. vol. 211, Issue 2, s. 237–244.
- [28] DWORKIN, S.B. AND NYE, T.J. Image processing for machine vision measurement of hot formed parts. *Journal of materials processing technology*, 2006, vol. 174, no. 1-3, s. 1-6.
- [29] Ch. Hu, B. Liu, X. Song. A novel edge detection approach used for online dimensional measurement of heavy forging. In: *International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Applications*, Proc. of SPIE 2008, vol. 7160.
- [30] YAMAUCHI, M. Errors in optical shape measurement caused by a high-temperature atmosphere. *Opt. Eng.*, Sep 02, 2009, vol. 48, no. 9.

### **Matematické princípy blízke fotogrammetrie**

- [32] LUHMANN, T., et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Mathematical fundametalns, s. 31-94. ISBN 978-184995-057-2.
- [33] HARTLEY, R. AND ZISSERMAN, A. *Multiple view geometry in Computer Vision*. Edtion ed.: Cambridge university press, 2000. ISBN 0-521-54051-8.
- [34] LUHMANN, Thomas, et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Imaging technology, s. 97-195. ISBN 978-184995-057-2.
- [35] LUHMANN, T., et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Analytical methods, s. 201-315. ISBN 978-184995-057-2.

### **Kalibrace kamer**

- [36] GRANSHAW, S. I. Bundle adjustment methods in engineering photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 1980, vol. 10, no. 56, s. 181–207.
- [37] STEWÉNIUS, H. at al. A minimal solution for relative pose with unknown focal length. *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005*. In: *CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on*, 2005, vol. 2, s. 789-794.
- [38] NISTÉR, D. An efficient solution to the five-point relative pose problem. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE Transactions on, 2004, Vol. 26, no. 6, p. 756-770.

- [39] LOURAKIS, M.I.A. and ARGYROS, A.A. Is Levenberg-Marquardt the most efficient optimization algorithm for implementing bundle adjustment? Oct. 2005. Vol. 2, s. 1526 – 1531. DOI: [10.1109/ICCV.2005.128](https://doi.org/10.1109/ICCV.2005.128)
- [40] LIU, B., et al. Accelerated Bundle Adjustment in Multiple-View Reconstruction. In: *7th International Conference, KES 2003, Proceedings*. Oxford, UK: Springer Berlin Heidelberg, September 2003, s. 1195-1201. Part II. ISBN: 978-3-540-45226-3
- [41] REMONDINO, F. AND FRASER, C. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *IPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2006, vol. 36, no. 5, s. 266-272.
- [42] LUHMANN, T., et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Measurement concepts and solutions in practice, s. 441-467 ISBN 978-184995-057-2.
- [43] ABDEL-AZIZ, Y. I. and KARARA, H. M. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry. In: *Proc. Symposium on Close-Range Photogrammetry*, Falls Church, U.S.A 1971, s. 1-18.
- [44] LUONG, Q.T. AND FAUGERAS, O.D. The fundamental matrix: Theory, algorithms, and stability analysis. *International Journal of Computer Vision*, 1996, vol. 17, no. 1, s. 43-75.
- [45] BROWN, D. C., The bundle adjustment-progress and prospects. *Int. Archives Photogrammetry*, 1976. vol. 21, no. 3, s. 3–33.
- [46] ALBERTZ, J. and KREILING, W. *Photogrammetric guide*. 4th edition, Wichmann Verlag, Karlsruhe, Germany.
- [48] D. C. BROWN, Decentering distortion of lenses, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1966, no. 24, p. 555–566.
- [49] D. C. BROWN, Close-range camera calibration, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1971, no. 42, p. 855–866.
- [50] TSAI, R. Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Int. Journal Robotics and Automation*, 1987, vol. 3(4), s. 323-344
- [51] BASU, A. and S. LICARDE. Alternative models for fish eye lenses. *Pattern recognition Letters*, vol. 16, s. 433-441
- [52] VASS, G. And T. PERLAKI. Applying and removing lens distortion in post production. In: *Proceedings of 2nd Hungarian Conference on Computer Graphics and Geometry*. 2003
- [53] LUHMANN, T., et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Measurement concepts and solutions in practice, s. 441-467. ISBN 978-184995-057-2.



- [54] KRAUS, K at al. Advanced Methods and Applications. *In: Photogrammetry*, Vol. 2.1997. ISBN-10 3427786943
- [55] ZHENGYOU Z. A flexible new technique for camera calibration, *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *In: IEEE Transactions on*, vol. 22, no.11, pp.1330,1334, Nov 2000 DOI: 10.1109/34.888718

### **Zpracování obrazu v oblasti blízké fotogrammetrie**

- [56] LUHMANN, T., et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Digital image processing, s. 319-397. ISBN 978-184995-057-2.
- [57] LUHMANN, T. Automatic point determination in a réseau scanning system. *In: Symposium ISPRS Commission V*, Ottawa, 1986, s. 400-408.
- [58] Zhou, G. *Accurate determination of ellipse centers in digital imagery*. ASPRS Annual Convention, Vol. 4, March 1986, s. 256–264.
- [59] CANNY J. A computational approach to edge detection. *In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine intelligence*. 1986; vol. 8, no. 6, s. 679-698.
- [60] DING, L. and GOSHTASBY, A. On the Canny edge detector. *Pattern Recognition*, 2001, vol. 34, no. 3, p. 721-725.
- [61] MEDINA-CARNICER, R. at al. A novel method to look for the hysteresis thresholds for the Canny edge detector. *Pattern Recognition*, Jun 2011, vol. 44, no. 6, p. 1201-1211.
- [62] DAVIS, L. S. A survey of edge detection techniques. *Computer Graphics and Image Processing*, 1975, vol. 4, no. 3, p. 248-270.
- [63] PELI, T. AND MALAH, D. A study of edge detection algorithms. *Computer Graphics and Image Processing*, 1982, vol. 20, no. 1, p. 1-21.
- [64] ZIOU, D. AND TABBONE, S. Edge detection techniques-an overview. *International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis*, 1998. s. 41

### **Materiál a metody**

- [65] ZATOČILOVÁ, A.; POLIŠČUK, R.; PALOUŠEK, D.; BRANDEJS, J.: Photogrammetry based system for the measurement of cylindrical forgings axis straightness, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII*, pp.87881L-1-88781L-10, ISBN 9780819496041, (2013), *In: Proc. SPIE: SPIE Optical Metrology 2013, Mnichov, 13.05.2013-16.05.2013*.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

L	[mm]	vzdálenost objektové roviny od obrazové roviny
c	[mm]	konstanta kamery (principal distance)
m	[-]	měřítko zobrazení
f	[mm]	ohnisková vzdálenost
$\Delta\hat{r}$	[ $\mu\text{m}$ ]	konstanta zkreslení pro danou vzdálenost r ve snímku
$\omega, \varphi, \kappa$	[ $^\circ$ ]	úhel natočení kolem osy x,y a z světového souřadného systému
X, Y, Z	[mm]	souřadnice bodu ve světovém souřadném systému
x',y',z'	[mm]	souřadnice bodu v souřadném systému kamery
X <sub>0</sub> , Y <sub>0</sub> , Z <sub>0</sub>	[mm]	souřadnice středu promítání kamery
r <sub>11</sub> ...r <sub>33</sub>	[-]	složky rotační matice
x' <sub>0</sub> , y' <sub>0</sub>	[mm]	souřadnice středu zobrazení ve směru osy x a y
$\Delta x', \Delta y'$	[ $\mu\text{m}$ ]	složky zkreslení ve snímku ve směru x,y
c <sub>x</sub> , c <sub>y</sub>	[mm]	složky konstanty kamery ve směru x,y
$\alpha$	[K <sup>-1</sup> ]	tepelná roztažnost
O'		střed perspektivy
H'		střed zobrazení
<b>R</b>		rotační matice
<b>X</b>		vektor polohy bodu v objektovém souřadném systému
<b>X'</b>		vektor polohy bodu v souřadném systému kamery
<b>T</b>		translační vektor se souřadnicemi středu promítání kamery
$\Delta\mathbf{x}'$		vektor parametrů zkreslení kamery
k <sub>1</sub> ...k <sub>n</sub>		parametry zkreslení – koeficienty funkce popisující zkreslení
<b>l</b>		vektor pozorovaných parametrů (souřadnic ref. bodů ve snímku)
<b>A</b>		matice popisující funkční vztah mezi body v obrazovém a objektovém souřadném systému
$\hat{\mathbf{x}}$		vektor neznámých parametrů
L1...L11		DLT parametry
CMM		souřadnicové měřicí stroje (coordinate measurement machine)
CAD		počítačově podporované navrhování (computer aided design)
CCD		typ obrazového snímače (Charge-Coupled Device)
CMOS		typ obrazového snímače (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)
IO		vnitřní orientace (internal orientation) – označení parametrů kamery
EO		vnější orientace (external orientation) – označení parametrů kamery
DLT		Přímá lineární transformace (Direct Linear Transformation)
VDI		technické normy vytvořené asociací německých inženýrů (The Association of German Engineers)
DSLR		digitální zrcadlový fotoaparát (digital single lens reflex)
Mean		průměr
AD		statistický test Anderson-Darling (podle SW Minitab)
SSE		součet čtverců residuí (podle SW Minitab)
MSE		střední kvadratická odchylka (podle SW Minitab)
R-Sq		míra úspěšnosti (podle SW Minitab)
S		směrodatná odchylka (podle SW Minitab)
P		pravděpodobnost (podle SW Minitab)

## SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>Obr. 1-1</b>	Konfigurace fotogrammetrického systému se dvěma kamerami.....	14
<b>Obr. 2-1</b>	Vztah mezi dosahovanou přesností měření a velikostí měřeného objektu u různých bezdotykových měřicích metod [2] .....	16
<b>Obr. 2-2</b>	Rozdělení bezkontaktních optických metod měření dle vyhodnocované vlnové délky [2].....	17
<b>Obr. 2-3</b>	Bezkontaktní metody měření tvaru objektů založené na obrazových snímačích, podle [3].....	18
<b>Obr. 2-4</b>	Aktivní triangulace [4].....	18
<b>Obr. 2-5</b>	Dosahované rozlišení a pracovní vzdálenost hlavních metod vyhodnocování třetího rozměru [6].....	19
<b>Obr. 2-6</b>	Historický vývoj fotogrammetrie [2].....	20
<b>Obr. 2-7</b>	Proces on-line a off-line fotogrammetrického měření v průmyslu [9].....	21
<b>Obr. 2-8</b>	Fotogrammetrické měření systémem PRO-SPOT [12] a fotogrammetrický systém určený k měření deformací od firmy GOM [13]..	22
<b>Obr. 2-9</b>	Příklad nekódovaných fotogrammetrických značek [13].....	23
<b>Obr. 2-10</b>	Schéma navrženého TOF systému a 3D model části povrchu válcového výkovku [21].....	25
<b>Obr. 2-11</b>	Zobrazení výsledku měření vakuové lahve v laboratorních podmínkách [21].....	25
<b>Obr. 2-12</b>	Proces optimalizace tvaru výkovku pomocí laserového systému LaCam od firmy Ferrotron [14]. .....	26
<b>Obr. 2-13</b>	Protokol z měření pomocí systému LaCam [14].....	27
<b>Obr. 2-14</b>	Výstupní data získaná měřením žhavého výkovku laserovým systémem TopScan, který nabízí firma Tecnogamma [15].....	27
<b>Obr. 2-15</b>	Výsledky měření pomocí systému od firmy IMEGO, Mefos a SINTEF[16].....	28
<b>Obr. 2-16</b>	Prvky optického systému s xenonovým světlem [17].....	28
<b>Obr. 2-17</b>	Princip spektrálně-selektivní metody[17].....	29
<b>Obr. 2-18</b>	Výsledek extrakce bodů na povrchu výkovku [17].....	39
<b>Obr. 2-19</b>	Schéma optického stereo systému s xenonovou lampou a jeho reálná podoba [18].....	30
<b>Obr. 2-20</b>	Modifikovaný Gausův model aplikovaný na světelné pruhy promítané na žhavý výkovek[18].....	30
<b>Obr. 2-21</b>	Aplikace první derivace na obraz výkovku [18].....	30
<b>Obr. 2-22</b>	Hraniční body detekované na ocelové desce [18].....	31

<b>Obr. 2-23</b>	Monochromatický snímek žhavého výkovku při použití IR filtru [20].....	31
<b>Obr. 2-24</b>	Výsledné prahování snímků, vlevo monochromatický bez IR filtru, vpravo s IR filtrem [20].....	32
<b>Obr. 2-25</b>	Detekce hran na snímcích žhavého výkovku – různé fáze zpracování obrazu [21].....	32
<b>Obr. 2-26</b>	Detekce hran na snímcích žhavého výkovku [21].....	33
<b>Obr. 2-27</b>	Princip fotogrammetrického měření [2].....	33
<b>Obr. 2-28</b>	Princip dírkové komory.....	34
<b>Obr. 2-29</b>	Souřadný systém snímku a souřadný systém kamery [31].....	35
<b>Obr. 2-30</b>	Světový souřadný systém a referenční souřadný systém.....	35
<b>Obr. 2-31</b>	Vnitřní orientace kamery [32].....	36
<b>Obr. 2-32</b>	Funkce odpovídající radiálnímu zkreslení ve snímku.....	37
<b>Obr. 2-33</b>	Vnější orientace kamery [35].....	38
<b>Obr. 2-34</b>	Orientace snímků pomocí algoritmu „Bundle adjustment“ [39].....	40
<b>Obr. 2-35</b>	Metody vnější orientace pro stereo snímky [35].....	43
<b>Obr. 2-36</b>	Kalibrace nelineárních parametrů kamery pomocí olovnicové metody [54].....	44
<b>Obr. 2-37</b>	Kalibrace pomocí kalibračního pole [54].....	45
<b>Obr. 5-1</b>	Hlavní kroky v procesu fotogrammetrického měření.....	50
<b>Obr. 5-2</b>	Průmět válce do obrazové roviny.....	51
<b>Obr. 5-3</b>	Konfigurace fotogrammetrického systému se dvěma kamerami....	52
<b>Obr. 5-4</b>	Konfigurace fotogrammetrického systému se čtyřmi kamerami....	52
<b>Obr. 5-5</b>	Průmyslová monochromatická kamera AM-1600 GE a průmyslová monochromatická kamera Pike (Allied Vision Technology).....	53
<b>Obr. 5-6</b>	Uvažované přístupy k řešení korekce zkreslení ve snímcích.....	55
<b>Obr. 5-7</b>	Model zkreslení vytvořený na základě série měří pro použité DSLR.....	57
<b>Obr. 5-8</b>	Schéma algoritmu iniciální detekce.....	63
<b>Obr. 5-9</b>	Výsledek algoritmu iniciální detekce na zahřátém výkovku.....	64
<b>Obr. 5-10</b>	Schéma první fáze hlavní detekce – hledání hranových bodů pro délce výkovku.....	65

<b>Obr. 5-11</b>	Schéma druhé fáze hlavní detekce – zpřesnění polohy nalezených hranových bodů.....	66
<b>Obr. 5-12</b>	Finální zobrazení výsledků hlavní detekce.....	67
<b>Obr. 5-13</b>	Zobrazení výsledku 1. (modré hrany) a 2. (bílé hrany) fáze hlavní detekce včetně výchozího bodu pro kontrolu návaznosti.....	67
<b>Obr. 5-14</b>	Schéma detekce hran na eliptických koncích výkovku.....	68
<b>Obr. 5-15</b>	Souřadný systém snímku.....	70
<b>Obr. 5-16</b>	Odvození polohy ideální osy výkovku pomocí válce se stejným průměrem $r$ na základě známé geometrie v-bloků.....	71
<b>Obr. 5-17</b>	Schéma znázorňující polohu ideálního válce a skutečného výkovku, vůči světovému souřadnému systému.....	72
<b>Obr. 5-18</b>	Horní pohled na řez výkovkem a válcem.....	73
<b>Obr. 5-19</b>	Pohled na hrany výkovku vynesené do světového souřadného systému v rovině XZ.....	75
<b>Obr. 5-20</b>	Pohled na hrany výkovku vynesené do světového souřadného systému v rovině XY.....	75
<b>Obr. 5-21</b>	Rekonstruovaný tvar výkovku z ISO pohledu.....	75
<b>Obr. 5-22</b>	Boční pohled na kružnice proložené detekovanými body v rovině XZ – kružnice mají normály rovnoběžné s osu $x$ .....	76
<b>Obr. 5-23</b>	Boční pohled na kružnice proložené detekovanými body v rovině XZ – kružnice mají normály natočené podle osy výkovku.....	76
<b>Obr. 5-24</b>	Vzdálenost osy výkovku od ideální osy, která vznikne spojením koncových kružnic.....	77
<b>Obr. 5-25</b>	Směr natočení průhybu a velikost průhybu osy výkovku.....	77
<b>Obr. 5-26</b>	Hodnocení tvaru osy z hlediska tolerance přímosti, polohy maximálního průhybu a jeho velikosti.....	77
<b>Obr. 5-27</b>	Schéma navrženého aplikačního softwaru.....	78
<b>Obr. 5-28</b>	Uživatelské rozhraní pro kalibraci kamer.....	79
<b>Obr. 5-29</b>	Zobrazení výsledku kalibrace v 3D grafu.....	80
<b>Obr. 5-30</b>	Uživatelské rozhraní pro nastavení parametrů detekce hran.....	81
<b>Obr. 5-31</b>	Zobrazení výsledků detekce v tabulce.....	82
<b>Obr. 5-32</b>	Uživatelské rozhraní pro měření.....	82
<b>Obr. 5-33</b>	Možnosti vykreslování výsledků v uživatelském rozhraní pro měření.....	83
<b>Obr. 5-34</b>	Textové pole zobrazující informace o rozměrech výkovku a maximálních hodnotách na ose a tabulka s výsledky o každém analyzovaném řezu.....	83
<b>Obr. 5-35</b>	Dvě realizované verze laboratorního stendu.....	84

<b>Obr. 5-36</b>	Stend pro měření výkovků s vysokou teplotou.....	85
<b>Obr. 5-37</b>	Ohřev vzorků v indukční peci na 1200 °C.....	86
<b>Obr. 5-38</b>	Výsledek měření referenčních bodů na stendu pro měření vzorků s pokojovou teplotou.....	89
<b>Obr. 5-39</b>	Výsledek měření referenčních bodů na stendu pro měření vzorků s vysokou teplotou.....	89
<b>Obr. 5-40</b>	Přesnost měření tvaru válcové tyče pomocí optického 3D skeneru Atos III Triple Scan.....	90
<b>Obr. 5-41</b>	Rekonstrukce tvaru osy testovaného vzorku v softwaru Tebis.....	91
<b>Obr. 5-42</b>	Čelní pohled na měřenou tyč a její osu v softwaru Atos Professional.....	92
<b>Obr. 6-1</b>	Krabicový graf znázorňující charakteristiku polohy a variability naměřených dat maximálního průhybu u jednotlivých vzorků.....	95
<b>Obr. 6-2</b>	Krabicové grafy měření maximálního průhybu tyče s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření pomocí systému Atos.....	95
<b>Obr. 6-3</b>	Krabicový graf zobrazující charakteristiky výsledků měření polohy max. průhybu vzorků.....	96
<b>Obr. 6-4</b>	Krabicové grafy měření maximálního průhybu tyče s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření.....	96
<b>Obr. 6-5</b>	Krabicový graf zobrazující charakteristiky výsledků měření průměru vzorků.....	97
<b>Obr. 6-6</b>	Krabicové grafy měření maximálního průhybu tyče s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření.....	97
<b>Obr. 6-7</b>	Krabicový graf zobrazující charakteristiky výsledků měření délky vzorků.....	98
<b>Obr. 6-8</b>	Krabicové grafy měření délky tyče s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření.....	98
<b>Obr. 6-9</b>	Výsledky testů normality u čtyř analyzovaných parametrů.....	99
<b>Obr. 6-10</b>	Graf regresní analýzy zobrazující závislost výsledků měření průhybu na jeho skutečné velikosti.....	102
<b>Obr. 6-11</b>	Krabicové grafy měření maximálního průhybu tyče s eliminací faktoru polohy a zobrazenou hodnotou referenčního měření.....	103
<b>Obr. 6-12</b>	Krabicové grafy zobrazující charakteristiky výsledků měření velikosti max. průhybu vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.....	104
<b>Obr. 6-13</b>	Krabicové grafy měření maximálního průhybu vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C s eliminací faktoru polohy a zobrazenou referenční hodnotou.....	104

<b>Obr. 6-14</b>	Krabicové grafy zobrazující charakteristiky výsledků měření polohy max. průhybu vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C .....	105
<b>Obr. 6-15</b>	Krabicové grafy měření maximálního průhybu vzorku při teplotě 1000 až 1200 °C s eliminací faktoru polohy a zobrazenou referenční hodnotou.....	105
<b>Obr. 6-16</b>	Krabicový graf zobrazující charakteristiky výsledků měření průměru vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C .....	106
<b>Obr. 6-17</b>	Krabicové grafy měření maximálního průhybu vzorku při teplotě 1000 až 1200 °C s eliminací faktoru polohy a zobrazenou referenční hodnotou .....	106
<b>Obr. 6-18</b>	Krabicový graf zobrazující charakteristiky výsledků měření délky vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C .....	107
<b>Obr. 6-19</b>	Krabicové grafy měření délky vzorku při teplotě 1000 až 1200 °C s eliminací faktoru polohy a zobrazenou referenční hodnotou .....	107

**SEZNAM TABULEK**

<b>Tab. 2-1</b>	Porovnání výsledků měření délky a průměru vakuové lahve v laboratorních podmínkách se skutečnými hodnotami [21].....	25
<b>Tab. 2-2</b>	Vztah mezi počtem neznámých, počtem pozorovaných bodů a celkovým počtem rovnic funkčního modelu, podle [42].....	43
<b>Tab. 5-1</b>	Profesionální měřičská kamera Kodak KAI-16000 a digitální SLR.....	53
<b>Tab. 5-2</b>	Teoretický odhad chyby měření průhybu způsobené aproximací měřítka pro různé vstupní hodnoty.....	54
<b>Tab. 5-3</b>	Rozlišitelnost měření s kamerami Kodak Kai-16000 v závislosti na počtu paralelních kamer a použitém objektivu při měření zorného pole o délce 21 m.....	54
<b>Tab. 5-4</b>	Typické nastavení parametrů při měření vzorků s normální i vysokou teplotou pomocí navržené metodiky.....	88
<b>Tab. 5-5</b>	Rozměry a tvar výkovku změřené pomocí 3D skeneru Atos III Triple Scan.....	92
<b>Tab. 6-1</b>	Vypočtené hodnoty rozměrů vzorků při teplotě cca 1150 °C.....	93
<b>Tab. 6-2</b>	Výsledky měření maximálního průhybu sedmi různých vzorků v nezahřátém stavu.....	95
<b>Tab. 6-3</b>	Výsledky měření polohy maximálního průhybu sedmi různých vzorků v nezahřátém stavu.....	96
<b>Tab. 6-4</b>	Výsledky měření průměru sedmi různých vzorků v nezahřátém stavu.....	97
<b>Tab. 6-5</b>	Výsledky měření délky sedmi různých vzorků v nezahřátém stavu.....	98
<b>Tab. 6-6</b>	Výsledky testu normality metodou Anderson-Darling.....	99
<b>Tab. 6-7</b>	Výsledky Wilcoxonova testu souboru dat čtyř analyzovaných parametrů.....	100
<b>Tab. 6-8</b>	Výsledky korelační analýzy metodou Spearman.....	102
<b>Tab. 6-9</b>	Výsledky regresní analýzy sinové funkce pomocí Gauss-Newtonovy metody.....	102
<b>Tab. 6-10</b>	Výsledky měření maximálního průhybu tří různých vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.....	104
<b>Tab. 6-11</b>	Výsledky měření polohy maximálního průhybu tří různých vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.....	105
<b>Tab. 6-12</b>	Výsledky měření průměru tří různých vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.....	106
<b>Tab. 6-13</b>	Výsledky měření délky tří různých vzorků při teplotě 1000 až 1200 °C.....	107



## PUBLIKACE AUTORA

### Publikace k problematice disertační práce:

1. ZATOČILOVÁ, A.; POLIŠČUK, R.; PALOUŠEK, D.; BRANDEJS, J. Photogrammetry based system for the measurement of cylindrical forgings axis straightness. In *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII. Proceedings of SPIE*. Munich, Germany: Proc. SPIE, 2013. s. 87881L- 1 (88781L-10 s.) ISBN: 9780819496041. ISSN: 0277- 786X.)
2. ZATOČILOVÁ, A.; POLIŠČUK, R.; PALOUŠEK, D.; BRANDEJS, J. An approach to the shape deviation measurement of cylindrical forgings. In *53rd International Conference of Mechine Desing Departments*. 1. Brno University of Technology, Antonínská 548/1, Brno 601 90, Czech Republic: Brno University of Technology, 2012. s. 331-338. ISBN: 978-80-214-4533- 8.

### Další publikace z oblasti reverzního inženýrství a metrologie:

3. ZIKMUND, T.; BRADA, M.; ZATOČILOVÁ, A.; PETRILAK, M.; KAISER, J. Kontrola rozměrů redukce objektivu a kamery pomocí rentgenové počítačové tomografie. *Jemná mechanika a optika*, 2014, roč. 59, č. 6- 7, s. 186-189. ISSN: 0447- 6441.
4. ZATOČILOVÁ, A.; KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D.; BRANDEJS, J. Experimental verification of deformation behavior of towing hitch by optical measurement method. In *Book of Proceedings of 54th International Conference of Machine Design Departments*. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. s. 365-374. ISBN: 978-80-7372-986- 8.
5. KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D.; KOUTECKÝ, T.; ZATOČILOVÁ, A.; JANDA, M. 3D Digitalization Of The Human Body For Use In Orthotics And Prosthetics. *An international Journal of Science, Engineering and Technology, World Academy of Science Engineering and Technology*, 2012, roč. 2012, č. 72, s. 1000-1005. ISSN: 2010- 376X.
6. ZATOČILOVÁ, A.; PALOUŠEK, D.; BRANDEJS, J. Využití 3D optických technologií měření a reverzního inženýrství při výrobě formy pro ultra lehké letadlo. In *Sborník referátů. 52. konference kateder, částí a mechanismů strojů s mezinárodní účastí*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2011. s. 306-311. ISBN: 978-80-248-2450- 5.

### Produkty:

1. ZATOČILOVÁ, A.: FOTO-FORG; *Laboratorní stanice pro měření tvarových odchylek výkovků pomocí fotogrammetrie a analýzy obrazu*. Místnost A4/503; ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/ 2, 616 69 BRNO, Česká Republika.
2. KOUTECKÝ, T.; ZATOČILOVÁ, A.; PALOUŠEK, D.: 3DOS-UK- 1; *3D optický skener*. Laboratoř č. A4/503, ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/ 2, 616 69 BRNO, Česká Republika.

**SEZNAM PŘÍLOH**

Výsledky měření sedmi vzorků v nezahřátém stavu.....	P1
Výsledky měření sedmi vzorků v zahřátém stavu.....	P2
Návrh algoritmu pro automatické určení koeficientu korekce radiálního zkreslení pomocí inverzního modelu.....	P3
Algoritmus vstupní detekce (Detection_init_1).....	P4
Algoritmus hlavní detkce – 1., 2. a 3. fáze (Detection_Main1).....	P6
Algoritmus detekce na eliptických koncích (Detection_Main_2).....	P11

## VÝSLEDKY MĚŘENÍ SEDMI VZORKŮ V ZAHŘÁTÉM STAVU

A - délka tyče, B - průměr tyče tyče, C – vzdálenost maximálního průhybu od konce tyče, D – průhyb tyče, E – úhel natočení maximálního průhybu tyče.

Vzorek 1	ATOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	699,3	702,9	703,1	703,2	703,2	702,7	702,6	702,7	702,4	702,5	702,7
B	44,5	44,4	44,4	44,4	44,4	44,4	44,3	44,4	44,4	44,4	44,4
C	334	312,4	312,5	302,8	380,9	400,1	361,0	322,0	321,9	302,5	400,1
D	0,3	0,8	0,68	0,74	0,82	0,92	0,97	0,83	0,65	0,66	0,66
E		311,6	298,7	306,6	282,2	290,0	303,7	304,9	308,1	296,4	290,2
Vzorek 2	ATOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	503,4	504	504,4	504,1	502	501,6	501,8	503,8	504,8	504,2	502,7
B	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5	44,6	44,6	44,5	44,5	44,5	44,4
C	331,5	326,0	336,2	332,7	331,5	331,2	331,2	335,8	333,0	332,8	331,9
D	7,8	7,65	8,07	8,01	7,64	7,51	7,2	7,54	7,87	8,02	7,87
E		222,2	280,7	330,7	23,2	90,3	142,7	189,8	249,5	309,6	6,9
Vzorek 3	ATOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	503,4	507	507	505	504	503	502	503	504	507	506
B	49	49,2	49,2	49,2	49,1	49,4	49,4	49,3	49,2	49,1	49,2
C	251,5	253	248	247	247	257	246	247	257	248	258
D	10,2	10,4	9,93	10,6	9,93	9,62	9,47	9,37	10	10,1	10,2
E		272	309	352	30,6	72,1	109	149	194	249	303
Vzorek 4	ATOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	699,9	709	708	706	701	697	698	702	706	709	708
B	44,5	44,4	44,6	44,5	44,6	44,4	44,2	44,4	44,6	44,5	44,6
C	369,5	374	359	368	346	364	359	370	353	374	354
D	11,59	12,3	11,4	11,8	11,3	10,7	10,7	11	11,2	12,1	11,5
E		271	300	334	16,7	68,3	113	169	206	259	305
Vzorek 5	ATOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	698,8	705	709	705	702	706	698	691	709	706	698
B	42	42,1	41,8	41,7	42,4	42,2	41,8	41,8	41,7	42	42,1
C	501,3	509	499	407	514	510	475	487	512	488	479
D	13,42	12,2	13,2	12,4	12,7	11,9	11,4	11,3	13,6	12,1	11,1
E		199	265	339	2,69	207	158	81,1	271	335	51,6
Vzorek 6	ATOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	504,9	501	505	508	508	507	504	503	499	501	504
B	49	49,2	48,9	48,8	49	49,1	48,9	48,8	49,1	49,3	49,1
C	250,9	241	243	254	244	248	247	241	245	246	252
D	18,26	16	17,3	17,4	18,1	16,1	18,1	16,1	17,7	15,9	17,6
E		123	196	247	283	316	358	29,6	81,2	127	178
Vzorek 7	ATOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	699,2	700	691	692	700	711	715	708	698	691	694
B	42	42,1	41,7	42	41,8	42,2	42,3	42,4	41,9	41,7	41,8
C	234,0	250	267	234	272	253	258	299	239	273	245
D	21,08	21	18,2	18,4	18,7	18	21,7	18,4	20	18,2	21
E		1,12	71,8	106	168	206	270	334	9,84	72,5	123

## VÝSLEDKY MĚŘENÍ SEDMI VZORKŮ V NEZAHŘÁTÉM STAVU

A - délka tyče, B - průměr tyče, C – vzdálenost maximálního průhybu od konce tyče,  
D – průhyb tyče, E – úhel natočení maximálního průhybu tyče.

Vzorek 2	ATOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	510	513	508	515	509	507	<del>507</del>	513	510	511	<del>511</del>
B	45	45,3	45,4	45,3	45,2	44,8	<del>44,8</del>	45,3	45,3	45,3	<del>45,3</del>
C	(334)	341	325	330	334	332	<del>332</del>	334	331	336	<del>336</del>
D	(0,3)	8,7	8,5	8,8	7,9	7,5	<del>7,5</del>	8,9	8,5	7,8	<del>7,8</del>
E		178	107	320	40	92	<del>92</del>	149	149	153	<del>153</del>
Vzorek 3	ATOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	511	<del>511</del>	511	515	513	513	<del>513</del>	514	517	517	517
B	49,6	<del>49,6</del>	50,9	50,9	51,1	51,1	<del>51,1</del>	50,6	50,8	50,6	50,4
C	(331,5)	<del>331,5</del>	247	257	251	251	<del>251</del>	257	260	265	252
D	(7,8)	<del>7,8</del>	10,2	9,9	9,7	9,7	<del>9,7</del>	10	10,1	10,5	10,6
E		<del>178</del>	75	195	111	111	<del>111</del>	193	308	265	284
Vzorek 6	ATOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	511	513	<del>513</del>	510	511	511	<del>511</del>	511	516	515	510
B	49,6	51,8	<del>51,8</del>	51,8	51,3	51,3	<del>51,3</del>	50,8	50,5	50,9	51
C	(251,5)	250	<del>250</del>	256	259	259	<del>259</del>	254	246	248	248
D	(10,2)	16,1	<del>16,1</del>	16	15,7	15,7	<del>15,7</del>	16,8	17,6	16,2	16
E		42	<del>42</del>	110	112	112	<del>112</del>	17	12	149	129

## NÁVRH ALGORITMU PRO AUTOMATICKÉ URČENÍ KOEFICIENTU KOREKCE RADIÁLNÍHO ZKRESLENÍ POMOCÍ INVERZNÍHO MODELU

- **Hledání koeficientu na základě kontroly pozice referenčních bodů nalezených ve snímku:**

```
while k>MinStep
```

- 1) Korekce snímku s koeficientem  $k$ ,  $k+MaxStep$  a  $k+MinStep$
- 2) Hledání středů elips ve snímku s korekcí  $k$ ,  $k+MaxStep$  a  $k+MinStep$
- 3) Výpočet parametrů kamery pomocí bodů nalezených ve snímku s korekcí  $k$ ,  $k+MaxStep$  a  $k+MinStep$
- 4) Zpětný výpočet souřadnic bodů ve snímku na základě parametrů kamery pro  $k$ ,  $k+MaxStep$  a  $k+MinStep$
- 5) Výpočet RMSE ze vzdáleností mezi souřadnicemi původních bodů nalezených ve snímcích  $k$ ,  $k+MaxStep$  a  $k+MinStep$  a zpětně vypočtených.
- 6) Porovnání RMSE a volba nového kroku dle následujícího algoritmu:

```
if RMSE(k) < RMSE(k+MaxStep) and RMSE(k) < RMSE(k+MinStep)
step = step/4
else
if RMSE(k+MaxStep) < RMSE(k) and RMSE(k+MaxStep) < RMSE(k-MinStep)
k= k+MaxStep
else
k= k-MaxStep
end
```

- **Hledání koeficientu na základě kontroly přímosti rovinných hran ve snímku:**

```
while k>MinStep
```

- 1) Korekce snímku s koeficientem  $k$ ,  $k+MaxStep$  a  $k+MinStep$
- 2) Detekce alespoň jedné hrany, která ve skutečnosti představuje přímou linii a proložení detekovaných bodů přímkou, ve všech třech snímcích
- 3) Výpočet RMSE ze vzdálenosti detekovaných bodů a příslušných bodů na přímce, ve všech třech snímcích
- 4) Porovnání RMSE a volba nového kroku dle následujícího algoritmu:

```
if RMSE(k) < RMSE(k+MaxStep) and RMSE(k) < RMSE(k+MinStep)
step = step/4
else
if RMSE(k+MaxStep) < RMSE(k) and RMSE(k+MaxStep) < RMSE(k-MinStep)
k= k+MaxStep
else
k= k-MaxStep
end
```

## ALGORITMUS VSTUPNÍ DETEKCE (DETECTION\_INIT\_1)

Algoritmus slouží k nalezení obrazového bodu, který leží na hraně výkovku v horizontálním směru. Probíhá zvlášť pro pravou a levou stranu výkovku. Následující část kódu popisuje proces hledání hrany na pravé straně.

```
function [lim_L, lim_P, y0_corr]=  
Detection_init_1(Img_A, x0, y0, tresh, med_wide)
```

### Vstupy:

```
Img_A      snímek  
x0         střed snímku v horizontálním směru od levého horního rohu  
y0         střed snímku ve vertikálním směru od levého horního rohu  
tresh     prahová hodnota zvolená uživatelem  
med_wide  šířka mediánového okna
```

### Výstupy:

```
lim_L     vzdálenost levého konce výkovku od středu snímku  
lim_P     vzdálenost pravého konce výkovku od středu snímku  
y0_corr   souřadnice na ose y, na níž byly body nalezeny (obvykle y0)
```

### Příprava vstupů algoritmu:

```
Img_B=rgb2gray(Img_A); převod snímku na šedotónový  
[m,n] = size(Img_B);   uložení počtu pixelů snímku do proměnných
```

### %% DETEKCE PRAVÁ STRANA

```
i=0;  
l=(m-16);  
while and(isempty(lim_P), i<10) % 1*  
    MedArray_begin=[]; MedArray=[]; Nalezeno=false;  
    j=x0;  
    if rem(i,2)==0  
        a=-1;  
    else  
        a=1;  
    end  
    y0_corr=y0+20*i*a; % 2*  
    y0=y0_corr;  
    i=i+1;  
    while and(and((Nalezeno==false), (j<=(n-3))), l<=(m-15)) % 3*  
        rr=1;  
        for k= y0-(med_wide/2):y0+(med_wide/2) % 4*  
            for l= (j-1)-(med_wide/2):(j-1)+(med_wide/2)  
                MedArray_begin(rr)=Img_B(k,l);  
                rr=rr+1;  
            end  
        end  
        begin_hodnota=double(median(MedArray_begin)); % 5*  
        rr=1;  
        for k= y0-(med_wide/2):y0+(med_wide/2) % 6*  
            for l= j-(med_wide/2):j+(med_wide/2)  
                MedArray(rr)=Img_B(k,l);  
                rr=rr+1;  
            end  
        hodnota=double(median(MedArray)); % 7*
```

```
        if abs(hodnota-begin_hodnota)>tresh % 8*
            lim_P=j-1;
            Nalezeno=true;
            i=10;
        end
        j=j+1;
    end
    l=(m-16);
end
```

- 1\* Podmínka pro opakované spuštění cyklu hledání hranového bodu. Cyklus probíhá pokud platí:  
1) bod není nalezen (limP=0)  
2) celý cyklus se zopakoval méně jak 10x (i<10)
- 2\* Podmínka pro nastavení souřadnice y. V prvním cyklu je y=y0. Pokud po dokončení cyklu není limP nalezen, změní se souřadnice y na niž cyklus probíhá. V každém dalším cyklu se k souřadnici y0 přičítají kladné a záporné násobky 20 (souřadnice y=y\_corr)
- 3\* Podmínka pro spuštění cyklu hledání hrany na každé souřadnici j=x, l=y. Cyklus probíhá pokud platí:  
1) hrana není nalezena (Nalezeno==false)  
2) souřadnice y je menší jak počet pixelů ve snímku ve vertikálním směru-3 (j<=(n-3))  
3) souřadnice x je menší jak počet pixelů ve snímku v horizontálním směru-15 (l<=(m-15))
- 4\* l, k - posuvné čtvercové okno o šířce "med\_wide", které ukládá hodnoty intenzity z oblasti do proměnné "MedArray\_begin". Střed okna leží na souřadnici x=j, y=l, přičemž souřadnice y je v rámci jednoho cyklu 4\* stálá (mění se v kroku 2\*), souřadnice x se mění pro každý cyklus 4\* podle podmínky 3\*
- 5\* výpočet mediánu z čtvercové oblasti "MedArray\_begin" a uložení do proměnné "begin\_hodnota".
- 6\* l, k - stejné jako 4\*, pouze čtvercové okno je posunuté v horizontálním směru o jeden obrazový bod. Hodnoty intenzity z oblasti se ukládají do proměnné "MedArray\_begin"
- 7\* výpočet mediánu z čtvercové oblasti "MedArray" a uložení do proměnné "hodnota".
- 8\* podmínka nalezení hranového bodu: pokud rozdíl intenzity v proměnné "hodnota" a "begin\_hodnota" překročí stanovenou prahovou hodnotu "tresh", je hranový bod nalezen ve středu okna "MedArray\_begin" a uložen do proměnné "lim\_P".

Pokud je bod nalezen, je splněna podmínka "Nalezeno=true" a cyklus 3\* je ukončen na konkrétní souřadnici x, y. Následuje návrat k 1\*, kde cyklus končí při nesplnění podmínky 1). V opačném případě je změněna souřadnice y a celý proces se opakuje.

## ALGORITMUS HALVNÍ DETKCE – 1. AŽ 3. FÁZE (DETECTION\_MAIN1)

Algoritmus slouží k nalezení bodů na podélných hranách výkovku v jednotlivých řezech. Algoritmus je rozdělen do tří fází:

- 1) Nalezení hranových bodů (fáze A)
- 2) Nalezení počátečních bodů pro kontrolu návaznosti (fáze B)
- 3) Oprava chybně nalezených bodů (fáze C)

**function** [top,bott,bott\_sort,top1,bott\_sort1,start\_top,start\_bott]  
=**Detection\_main\_1**(Img\_A,y0,lim\_L,lim\_P,LL,LP,PL,PP,cuts,tresh,med\_wide)

### Vstupy:

Img\_A            snímek  
y0                střed snímku ve vertikálním směru od levého horního rohu  
tresh             prahová hodnota zvolená uživatelem  
med\_wide        šířka mediánového okna  
cuts              vzdálenost řezů v jednotkách pixelů, v nichž budou hledány hranové body  
lim\_L,lim\_P     x-ová souřadnice na levé/pravé straně snímku za níž detekce nebude probíhat

### Výstupy:

top, bott        finální detekované body na horní/spodní hraně  
bott\_sort       finální detekované body na spodní hraně seřazené tak, že jsou vynechány volné řádky v místech v-bloků, kde detekce neprobíhá  
top1             detekované body na horní hraně – pouze fáze 1  
bott\_sort1      detekované body na horní hraně, seřazené tak, že jsou vynechány volné řádky v místech v-bloků, kde detekce neprobíhá – pouze fáze 1  
start\_top       souřadnice počáteční bodu pro opravu návaznosti na horní hraně  
start\_bott      souřadnice tří počátečních bodů pro opravu návaznosti na spodní hraně

### Příprava vstupů algoritmu:

Img\_B=rgb2gray(Img\_A);    převod snímku na šedotónový  
[m,n] = size(Img\_B);      uložení počtu pixelů snímku do proměnných

### Nastavení velikosti parametrů, podle šířky řezů

```
if cuts<=50
    lim=4;ods_tresh=6;
end
if and(cuts<=75,cuts>=50)
    lim=6;ods_tresh=6;
end
if and(cuts<=100,cuts>=75)
    lim=6;ods_tresh=6;
end
```



**%% 1. krok hlavní detekce - HORNÍ HRANA (v textu označení A)**

Algoritmus hledá hrany výkovku zvláště na spodní a horní hraně. Spodní hrana je navíc rozdělena na tři části, jelikož v oblasti v-bloků detekce na spodní hraně neprobíhá.

```

for i=lim_L:cuts:lim_P % 1*
  Nalezeno=false;
  j=y0;
  while and((Nalezeno==false), (j>=3)) % 2*
    rr=1;
    for k= i-(med_wide/2):i+(med_wide/2) % 3*
      MedArray_begin_top(rr)=Img_B(j+1,k);
      MedArray_top(rr)=Img_B(j,k);
      rr=rr+1;
    end
    begin_hodnota_top=double(median(MedArray_begin_top));%4*
    hodnota_top=double(median(MedArray_top));
    if abs(hodnota_top-begin_hodnota_top)>tresh % 5*
      qq=1;
      for ij=j-3:j+3 % 6*
        Hodnota_begin=double(Img_B(ij+1,k));
        Hodnota=double(Img_B(ij,k));
        Residual(qq,1)=abs(hodnota-begin_hodnota);
        Residual(qq,2)=ij;
        qq=qq+1;
      end
      Residual=sortrows(Residual,-1); % 7*
      hranice_top(i-lim_L+1,1)=residual(1,2);
      hranice_top(i-lim_L+1,2)=i-lim_L;
      Nalezeno=true;
    end
    j=j-1;
  end
  hranice_top(i-lim_L+1,3)=i;
end

```

- 1\*** i - cyklus pracuje v horizontálním směru od lim\_L po lim\_P, souřadnice x se mění skokově o vzdálenost rozteče "cuts" (prohledávání snímku pouze ve vertikálních řezech)
- 2\*** Podmínky pro spuštění cyklu detekce na souřadnici x=i, y=j=y0. Cyklus probíhá pokud platí:
  - 1) hrana není nalezena (Nalezeno==false)
  - 2) souřadnice y je menší jak počet pixelů ve snímku ve vertikálním směru-3
- 3\*** k - cyklus pracuje ve dvou posuvných obdélníkových oknech o šířce 1x"med\_wide". Ukládá hodnoty intenzity z těchto sousedních oblastí do proměnné "MedArray\_begin" a "MedArray". Střed prvního okna leží na souřadnici x=i,y=j, střed druhého okna je posunutý ve směru y o jeden obrazový bod.
- 4\*** výpočet mediánu z obdélníkové oblasti "MedArray\_begin" a "MedArray" a jejich uložení do "begin\_hodnota" a "hodnota"
- 5\*** podmínka nalezení hranového bodu: pokud rozdíl intenzity v proměnné "hodnota" a "begin\_hodnota" překročí stanovenou prahovou hodnotu "tresh", je hranový bod nalezen ve středu okna MedArray\_begin.
- 6\*** ij - cyklus kontroluje okolí nalezeného hranového bodu a hledá maximální rozdíl intenzity mezi sousedními pixely ve směru y

(gradient). Pracuje ve statickém okně, které má velikost 1x7 pixelů a jeho střed leží na pozici nalezeného hranového bodu v kroku 6\*. Rozdíly uloží do proměnné "Residual".

- 7\* seřadí hodnoty ve vektoru "Residual" podle velikosti. Souřadnice bodu na prvním místě je označena jako finální poloha hrany. Souřadnice všech nalezených hranových bodů jsou uloženy do proměnné "hranice\_top".

## %% 2. krok hlavní detekce - HORNÍ HRANA (v textu označení B)

Mezi detekovanými body pomocí A se mohou nacházet také chybné body, které se na hraně výkovku nenacházejí. Cílem tohoto algoritmu je zvolit z nalezených hranových bodů ten, který s největší pravděpodobností leží skutečně na hledané hraně. Algoritmus pracuje zvláště na horní a spodní hraně. Celkem jsou nalezeny 4 body - jeden pro horní hranu a tři pro každou z dílčích oblastí spodní hrany. Následující kód představuje proces hledání bodu na horní hraně výkovku.

```
area_top=[];
qq=1;

for i=1:cuts:lim_P-lim_L+1 % 1*
    if abs(hranice_top(i+cuts)-hranice_top(i))>=ods_tresh % 2*
        oblasti(qq,:)=hranice_top(i,:);
        qq=qq+1;
        nalezeno=true;
    end
end
if nalezeno==true; % 3*
    oo=length(oblasti(:,1)); % 4*
    oblasti_new(1,:)=hranice_top(1,:); % 5*
    oblasti_new((2:oo+1),:)=oblasti;
    for i=1:oo % 6*
        vzdalenosti(i+1,1)=oblasti_new(i+1,3)-oblasti_new(i,3);
        vzdalenosti(i,2)=oblasti_new(i,1);
        vzdalenosti(i,3)=oblasti_new(i,2);
        vzdalenosti(i,4)=oblasti_new(i,3);
    end
    vzdalenosti(oo+1,(2:4))=hranice_top(length(hranice_top),:); % 7*
    for i=1:oo+1 % 8*
        if max(vzdalenosti(:,1))==vzdalenosti(i,1);
            area_top(2,:)=vzdalenosti(i,:);
            area_top(1,:)=vzdalenosti(i-1,:);
        end
    end
else % 9*
    area_top(1,(2:4))=hranice_top(1,:);
    area_top(2,(2:4))=hranice_top(lim_P-lim_L+1);
end
pom_top=ceil((area_top(2,3)/cuts-area_top(1,3)/cuts)/2); % 10*
position_top(1,1)=area_top(1,3)+pom_top*cuts;
position_top(1,2)=hranice_top((position_top(1,1)+1),1); % 11*
```

- 1\* i - cyklus pracuje pouze v oblasti, ve které pracoval algoritmus A. Souřadnice x se mění skokově o vzdálenost rozteče "cuts" (prohledávání snímku ve vertikálních řezech)
- 2\* kontrola souřadnic nalezených hranových bodů - pokud rozdíl na y-nové souřadnici mezi body v sousedních řezech překročí

nastavenou hranici "ods\_tresh" uloží každý první hranový bod, který splnil tuto podmínku do proměnné "Oblasti" (tím se rozdělí detekované hranové body na oblasti s přibližně stejnou souřadnicí y)

- 3\* podmínka pro spuštění opravy: pokud byla alespoň jednou splněna podmínka překročení "ods\_tresh" (*nalezeno==true*) pokračuje v 4\* až 9\*, v opačném případě pokračuje krokem 9\*
- 4\* spočítá počet nalezených podoblastí a uloží do oo
- 5\* vytvoří nový vektor "Oblasti\_new" tak, že na první řádek uloží souřadnici prvního hranového bodu, který byl nalezen pomocí **A**, na další řádky uloží data z proměnné "Oblasti".
- 6\* oo - cyklus počítá délku každé podoblasti uložené v matici "Oblasti\_new" a ukládá do prvního sloupce matice "Vzdalenosti" a současně do dalších sloupců zapisuje souřadnice jejich počátku
- 7\* na poslední místo do matice "Vzdalenosti" uloží souřadnice posledního hranového bodu z oblasti, ve které pracoval algoritmus **A**.
- 8\* z dat v matici "Vzdalenosti" vybere oblast, která má největší délku a její souřadnice uloží do vektoru "Area\_top"
- 9\* pokud není ani jednou splněna podmínka v 2\* znamená to, že nejdelší spojitá oblast odpovídá celé oblasti, ve které pracoval algoritmus **A** a do "Area\_top" uloží souřadnice počátku a konce této oblasti.
- 10\* vypočítá x-ovou souřadnici bodu uprostřed nejdelší spojitě oblasti z "Area\_top" (souřadnice se vztahuje k počátku oblasti, ve které pracoval algoritmus **A**)
- 11\* vypočítá x-ovou souřadnici bodu pro kontrolu návaznosti vůči s.s. ve snímku a uloží ji do proměnné "position\_top".

### %% 3. krok hlavní detekce - HORNÍ HRANA - Z LEVA DO PRAVA (v textu označení C)

Oprava návaznosti pracuje postupně vždy od bodu nalezeného pomocí **B** směrem vpravo i vlevo. U horní hrany tedy probíhá 2x, u spodní hrany 6x, neboť je rozdělena na tři samostatné části. Následující kód provádí opravu detekovaných hran na pravé straně horní hrany.

```
for i=position_top(1,1)+1:cuts:lim_P-lim_L+1 % 1*
    if abs(hranice_top(i+cuts)-hranice_top(i))>=ods_tresh % 2*
        qq=1;
        for j=hranice_top(i)-lim:hranice_top(i)+lim % 3*
            rr=1;
            for k= (i+cuts)-(med_wide/2):(i+cuts)+(med_wide/2) % 4*
                MedArray_begin_top(rr)=Img_B(j,lim_L+k);
                MedArray_top(rr)=Img_B(j+1,lim_L+k);
                rr=rr+1;
            end
            begin_hodnota_top=double(median(MedArray_begin_top)); % 5*
            hodnota_top=double(median(MedArray_top));
            residual(qq,1)=abs(hodnota_top-begin_hodnota_top); % 6*
            residual(qq,2)=j;
            qq=qq+1;
        end
        residual=sortrows(residual,-1); % 7*
        hranice_top(i+cuts)=residual(1,2);
        hranice_top(i+cuts,4)=residual(1,2);
    end
end
```

- 1\* i - cyklus pracuje pouze v oblasti, jejímž počátkem je souřadnice x bodu na horní hraně nalezený pomocí algoritmu **B** ("position\_top") a konec oblasti odpovídá souřadnici x posledního bodu na kterém celá detekce probíhala. Souřadnice x se v této oblasti mění skokově o vzdálenost rozteče "cuts" (prohledávání snímku pouze ve vertikálních řezech)
- 2\* podmínka spuštění opravy hranového bodu: pokud rozdíl mezi souřadnicí y dvou po sobě následujících hranových bodů překročí stanovený práh "ods\_tresh"
- 3\*-7\* další kroky odpovídají kroku 3\* až 7\* v **A** s tím rozdílem, že prohledávaná oblast má pevnou délku  $2x_{lim}+1$  a její střed leží ve směru y na pozici předchozího bodu, který prošel kontrolou a je tedy považován za správně detekovaný.

## ALGORITMUS DETEKCE NA ELIPTICKÝCH KONCÍCH (DETECTION\_MAIN\_2)

Cílem tohoto algoritmu je nalezení přibližné polohy, kde podélná hrana přechází v eliptický konec. Nejdříve je tady nutné najít v této oblasti hranové body. Algoritmus je rozdělen na čtyři části, protože probíhá odděleně na obou stranách výkovku na spodní a horní hraně. Detekce každé ze čtyř částí navazuje na souřadnici krajního hranového bodu nalezeného v hlavní detekci. Oblast hledání hran má ve směru x omezenou délku na 3/4 vzdálenosti od krajního bodu na podélné hraně k bodu detekovanému v iniciální detekci. Na detekované hraně potom hledá místo, kde "rovinná" hrana přechází v elipsu. Hledání přechodu je založeno na kontrole přírůstku gradientu, který při překročení stanovené hranice indikuje místo přechodu.

```
function [hranice_top_P,hranice2_top_P,hranice_bott_P,
hranice2_bott_P,hranice_top_L,hranice2_top_L,hranice_bott_L,hranice2
_bott_L,line_P,line_L,point_P,point_L]=Detection_main_2(Img_A,xyP_to
p,xyP_bott,xyL_top,xyL_bott,lim_L,lim_P,lim_LL,lim_PP,cuts)
```

### Vstupy:

```
Img_A
xyP_top    poslední bod na horní hraně nalezený pomocí Detection_Main_1
xyP_bott   poslední bod na spodní hraně nalezený pomocí Detection_Main_1
xyL_top    první bod na horní hraně nalezený pomocí Detection_Main_1
xyL_bott   první bod na spodní hraně nalezený pomocí Detection_Main_1
lim_L      bod na levém konci výkovku detekovaný v Detection_Init
lim_P      bod na pravém konci výkovku detekovaný v Detection_Init
cuts       vzdálenost řezů v pixelech
```

### Výstupy:

```
hranice_top_P, hranice_top_L, hranice_bott_P, hranice_bott_L
všechny detekované body na straně P/L příslušné hrany top/bott
hranice2_top_P, hranice2_top_L, hranice2_bott_P, hranice2_bott_L
detekované body na straně P/L příslušné hrany top/bott ležící mezi
bodem nalezeným v Detection_Main_1 a bodem zlomu
line_P,line_L
souřadnice koncových bodů úsečky spojující body zlomu na eliptických
koncích na pravé/levé straně výkovku
point_P,point_L
středový bod na úsečkách, které spojují body zlomu na eliptických
koncích na pravé/levé straně výkovku
```

### Příprava vstupů algoritmu:

```
Img_B=rgb2gray(Img_A);           %převod snímku na šedotónový
Shift_P=round((lim_PP-lim_P)); Shift_L=round((lim_L-lim_LL));
%výpočet a zaokrouhlení vzdálenosti, na níž má detekce probíhat na
%pravém/levém konci výkovku
x_top_P=xyP_top(1,1);y_top_P=xyP_top(1,2);x_bott_P=xyP_bott(1,1);
y_bott_P=xyP_bott(1,2);x_top_L=xyL_top(1,1);y_top_L=xyL_top(1,2);
x_bott_L=xyL_bott(1,1);y_bott_L=xyL_bott(1,2);
%Přerozdělení vstupních krajních bodů z Detection_Main_1
%% HORNÍ HRANA-pravá strana
```

```

j=y_top_P;
residual=[];

for i=x_top_P:limL % 1*
    qq=1;
    for ij=j-4:j+4 % 2*
        begin_hodnota=double(Img_B(ij+1,i));
        hodnota=double(Img_B(ij,i));
        residual(qq,1)=abs(hodnota-begin_hodnota);
        residual(qq,2)=ij;
        qq=qq+1;
    end
    residual=sortrows(residual,-1); % 3*
    if and(residual(1,1)==residual(2,1),
        residual(2,1)==residual(3,1)); % 4*
        hranice_top_P(i-x_top_P+1,2)=residual(2,2);
        hranice_top_P(i-x_top_P+1,1)=i+1;
        j=residual(2,2);
    else
        hranice_top_P(i-x_top_P+1,2)=residual(1,2);
        hranice_top_P(i-x_top_P+1,1)=i;
        j=residual(1,2);
    end
end

first=[];
second=[];
third=[];
nalezeno=false;
i=1;
while and(nalezeno==false,i<=length(hranice_top_P)) % 5*
    first=abs(hranice_top_P(i,2)-hranice_top_P(i+7,2)); % 6*
    second=abs(hranice_top_P(i+1,2)-hranice_top_P(i+8,2));
    third=abs(hranice_top_P(i+2,2)-hranice_top_P(i+9,2));
    if and(and(first>=3,second>=3),and(nalezeno==false,third>=3)) % 7*
        if i>=6
            point_top_P(1,:)=hranice_top_P(i-5,:);
            nalezeno=true;
        else
            point_top_P(1,:)=hranice_top_P(i,:);
            nalezeno=true;
        end
    end
    i=i+1;
end

1* i - cyklus pracuje v horizontálním směru od koncového bodu
detekovaného pomocí Detection_Main_1 k bodu detekovanému
pomocí Detection_Init po jednom pixelu
2* ij - cyklus pracuje v posuvném obdélníkovém oknu o šířce 1x9
pixelů jehož střed leží na souřadnici i,j. Ukládá hodnotu
intenzity po sobě následujících pixelů v této oblasti do
proměnné "hodnota" a "begin_hodnota" a do proměnné "residual"
ukládá jejich rozdíl.
3* seřadí hodnoty ve vektoru "residual" podle velikosti
4* pokud mají první tři hodnoty ve vektoru "residual" stejnou
velikost, uloží jako hranový bod do proměnné "hranice_top_P"

```

- souřadnice druhého bodu v pořadí, v opačném případě ukládá vždy první bod.
- 5\* pokračuje v hledání bodu zlomu pouze pokud jsou splněny následující podmínky: *nalezeno==false* - hranový bod ještě není nalezen, *i<=length(hranice\_top\_P)* - x-ová souřadnice nepřekročila stanovenou oblast hledání,
  - 6\* počítá rozdíl v souřadnici y mezi třemi dvojicemi hranových bodů, které jsou vzdálené 7 pixelů
  - 7\* uloží hledaný bod zlomu, pokud platí následující podmínky: Rozdíl v souřadnici y u první, druhé i třetí analyzované dvojice bodů je větší jak 3

