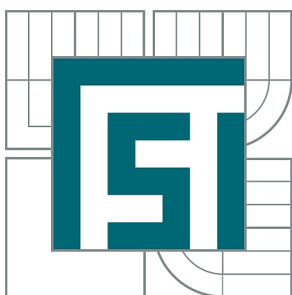




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A  
ROBOTIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND  
ROBOTICS

# **NÁVRH KAMEROVÉHO SYSTÉMU PRO DETEKCI POLOHY KAROSERIE AUTOMOBILU**

DESIGN OF A VISION SYSTEM FOR LOCALIZATION OF A CAR BODY

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. JAN HVÍŽĎALA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. ALEŠ POCHYLÝ**

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Jan Hvizďala

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Návrh kamerového systému pro detekci polohy karoserie automobilu**

v anglickém jazyce:

### **Design of a vision system for localization of a car body**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je navrhnout snímací systém pro detekci polohy karoserie automobilu. Úvodní část práce je zaměřena na analýzu vhodných kamerových systémů a porovnání jejich vlastností. Dalším cílem je navrhnout obecnou koncepci snímacího systému včetně stanovení vhodných typů objektivů a osvětlení.

V praktické části práce je cílem navrhnout vhodnou metodiku pro kalibraci kamerového systému a nakonec student navrhne vlastní algoritmus pro detekci polohy karoserie.

Cíle diplomové práce:

1. Analýza dostupných kamerových systémů vhodných pro danou problematiku.
2. Návrh koncepce kamerového systému pro detekci polohy karoserie.
3. Návrh vhodné kalibrace systému.
4. Návrh algoritmu pro detekci polohy karoserie.

Seznam odborné literatury:

[1] Wöhler, Ch. 3D Computer Vision: Efficient Methods and Applications. Springer, 2009. 385 s. ISBN 978-3-642-01731-5

[2] Szeliski, R. Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, 2011. 812 s. ISBN 978-1-84882-934-3

[3] L. Sciavicco, B. Siciliano: Robotics Modelling, Planning and Control. Springer London, 2008

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Pochylý

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 28.11.2013

L.S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty



## Abstrakt

Tato práce se zabývá vytvořením vhodného systému pro měření a výpočet polohy karoserie v prostoru. V práci je popsán výběr vhodného softwaru a hardwaru a tvorba výpočtového algoritmu, pro kalibraci a výpočet polohy jednotlivých karoserií. Pro úspěšné vypracování bylo nutné sestavit simulační 3D model, na kterém byl celý algoritmus testován a následně aplikován na tmelících linkách.

## Abstract

This work is dealing with creation of suitable system for positioning of car body in the 3D space. In this work is described process of choosing of suitable software and hardware and creation process of mathematical algorithm for calibration and positioning of each car body. For successful completing was necessary to design simulation 3D model, on which were all algorithms tested and then applied on sealing lines.

## Klíčová slova

výpočet polohy, kamerové systémy, tvorba algoritmu

## Keywords

computation of the position, camera systems, creation of the algorithm





## DIPLOMOVÁ PRÁCE

### Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce Ing. Aleši Pochylému za vedení, odborné konzultace a cenné rady.



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně na základě svých vědomostí, rad a pokynů vedoucího diplomové práce, poskytnutých materiálů a odborných konzultací.

V Pardubicích, dne 26.5.2014

.....

Jan Hvíždala



### Bibliografická citace

HVÍŽĎALA, J. Návrh kamerového systému pro detekci polohy karoserie automobilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Pochylý.



## Contents

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Definování kamerového systému</b>	<b>8</b>
2.1	Kamera a její vlastnosti . . . . .	8
2.1.1	Kamera . . . . .	8
2.1.2	Zpracování obrazu . . . . .	8
2.1.3	Kamerový čip . . . . .	10
2.1.4	Kamerové rozhraní . . . . .	13
2.2	Optika a geometrie obrazu . . . . .	14
2.2.1	Geometrie Obrazu . . . . .	15
2.2.2	Zkreslení obrazu . . . . .	18
2.2.3	Objektiv . . . . .	19
2.3	Osvětlení . . . . .	20
2.3.1	Barevné spektrum . . . . .	21
2.3.2	Zdroje světla . . . . .	21
2.3.3	Okolní světlo . . . . .	22
2.3.4	Technika osvětlení . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Návrh koncepce kamerového systému pro detekci polohy karoserie</b>	<b>25</b>
3.1	Popis systému . . . . .	25
3.1.1	Požadavky zákazníka na systém . . . . .	25
3.1.2	Koncepce systému . . . . .	25
3.2	Hardware . . . . .	27
3.2.1	Kamerový systém . . . . .	27
3.2.2	Světlo . . . . .	36
3.3	Software . . . . .	36
3.3.1	Embedded kamerový systém . . . . .	37
3.3.2	Koncepce kalibrace a nastavení systému . . . . .	37
3.3.3	Koncepce výpočtu . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Vstupní hodnoty</b>	<b>41</b>
4.1	Statické vstupní hodnoty . . . . .	41
4.2	Proměnné vstupní hodnoty . . . . .	42
4.3	Získávání vstupních hodnot . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Návrh vhodné kalibrace systému</b>	<b>44</b>
5.1	Kalibrace systému . . . . .	44
5.1.1	Výpočet měřítek a transformačních matic pro jednotlivé kamery . . . . .	44
5.1.2	Kalibrace natočení kamery . . . . .	46
5.2	Korekce při posunutí kamery . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Návrh algoritmu pro detekci polohy karoserie</b>	<b>47</b>
6.1	Výpočet referenční karoserie . . . . .	47
6.1.1	Výpočet přímek pro jednotlivé kamery . . . . .	47
6.1.2	Výpočet polohy bodů karoserie . . . . .	48

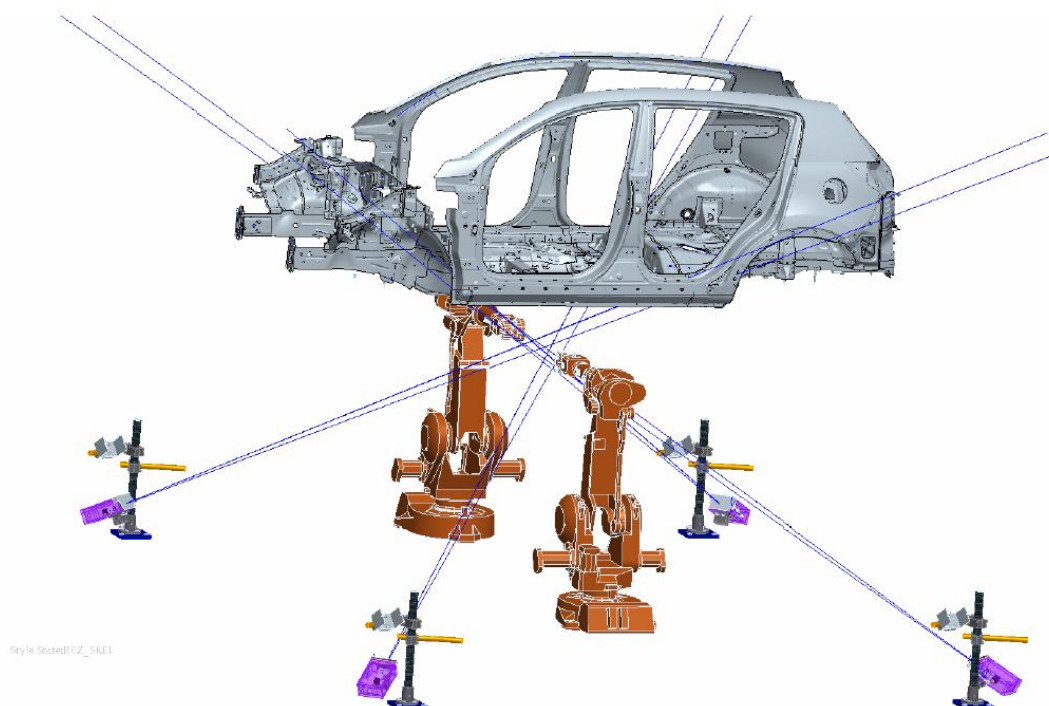
**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

6.1.3	Nalezení správného řešení pomocí metody sečen . . . . .	53
6.1.4	Výpočet souřadného systému karoserie . . . . .	54
6.2	Výpočet polohy měřené karoserie . . . . .	55
<b>7</b>	<b>Chování algoritmu</b>	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>61</b>



## 1 Úvod

Cílem této práce je vytvořit vhodný návrh kamerového systému pro detekci polohy karoserie automobilu. Tato karoserie je umístěna na dopravníku a je nutné vypočítat její přesnou polohu, z důvodů následovného tmelení pomocí 6ti osých angulárních robotů. Koncept systému je zobrazen na obrázku 1 (jedná se pouze o přibližné zobrazení celého systému).



Obrázek 1: Zobrazení celého systému

Z kamerového systému lze získat informace o poloze karoserie, po aplikaci vhodného matematického algoritmu. Algoritmus tedy převádí 2D souřadnice z kamery na 3D polohu karoserie automobilu, toto by nebylo možné pomocí jedné kamery, proto jsou v systému kamery 4. Tento počet kamer vychází částečně ze zadání zákazníka a částečně z vlastností systému. Převedením těchto 2D souřadnic do 3D lze definovat přesnou polohu měřené karoserie a tyto informace využívají roboti pro nanesení tmelu na požadované místa.

V následujících bodech je zpracován celý koncept systému, včetně výběru hardwaru a softwaru a uveden postup tvorby vhodného algoritmu pro výpočet kalibrace a samotné polohy karoserie automobilu.

Na začátku této práce je nejprve rozebrán obecný popis kamerových systému, které jsou vhodné pro tento systém. Na základě znalostí o kamerových systémech je zvolen vhodný hardware. V prostřední pasáži je rozebrána koncepce celého výpočtového algoritmu včetně návrhu vhodné kalibrace. V závěrečných částí této práce je návrh samotného algoritmu pro výpočtovou část a část kalibrace.



## 2 Definování kamerového systému

Definování kamerového systému a jeho částí je základním prvkem jeho plné funkčnosti. Každý parametr má vliv na celý systém a tudíž je důležité znát jeho podstatu a vliv na kvalitu. Hlavními prvky kamerových systémů jsou kamera, optika a osvětlení.

### 2.1 Kamera a její vlastnosti

Kamera má několik důležitých částí, které je nutné definovat: typ kamerového čipu a jeho vlastnosti, kamerové rozhraní a výpočetní část kamerového systému.

#### 2.1.1 Kamera

Kamera je zařízení, které slouží jako nástroj pro zachycení aktuální scény do uložitelné datové podoby. Kamera snímá jednotlivé světelné paprsky jako 2dimenzionální matici světelné energie. Toto světlo je zachyceno na kamerový čip (digitální kamera) nebo na film (analogová kamera). Analogová kamera neměla v průmyslu velké využití a to z důvodu nedostatečné možnosti zpracování obrazu a jeho úpravy. Zachycení světelných paprsků umožňuje světlo citlivý senzor. Tento senzor je rozdělen na jednotlivé části zvané pixely, které zachycují světelnou energii a přetvářejí ji na energii elektrickou. Množství světla, které je přivedeno na kamerový čip, upravuje mechanická nebo elektronická závěrka. Tato energie je potom vzorkována v určité časové periodě a připravena na výstup. Podle rozhraní kamery jsou informace o průběhu světla na čipu digitalizována (digitální výstup) nebo jsou snímána v průběhu času a na výstupu jsou data analogová. Výstupní informace z kamery jsou poté zpracovány do uživatelsky definované podoby. Zpracování dat může probíhat přímo v kameře (smart kamera) nebo v externím počítači, či kontrolní jednotce. [1]

**Požadavky** na kamery použitelné ve strojovém vidění:

- Vyměnitelné objektivy - standardizované připojení objektivu
- Robustní konstrukce s množstvím upevňovacích prvků
- Normované konektory
- Externí synchronizace - spoušť
- Dostatečně rychlé pro vysokorychlostní aplikace
- Stabilní výstup

#### 2.1.2 Zpracování obrazu

Ve strojovém vidění je zpracování obrazu velmi důležité z důvodů různorodých požadavků na výstupní hodnoty z kamerového systému. Samotné zpracování obrazu může probíhat přímo v kameře (smart camera), v připojeném počítači (PC based camera system) nebo v kamerovém kontroléru (Embedded system). Každý ze systému má své uplatnění v praxi a je velmi důležité zvolit vhodný výpočetní hardware pro danou aplikaci. Pro zpracování obrazu je nutné zajistit i správný software, kompatibilní s hardwarem. Téměř každý výrobce těchto systémů má i vlastní univerzální software (zajištěna kompatibilita), který umožní



základní zpracování obrazu. Další možností je využít software třetích stran, který je specializován na úpravu obrazových dat jako je např.: National Instrument, Matlab, Image Tool, Halcon, Sherlock, Matrox nebo některý z open source programů jako je OpenCV. Volba softwaru tedy záleží na konkrétní aplikaci a požadavcích na výstup. Problém u těchto univerzálních softwarů je, že není známa přesná struktura jednotlivých algoritmů a tudíž algoritmus funguje jako "černá skříňka". Pro velkou část aplikací toto není limitující problém a univerzální software může ušetřit hodně času a peněz. V některých případech nelze využít univerzální balíčky a je zapotřebí definovat algoritmy od základů. K naprogramování software pro zpracování obrazových dat lze použít např. LabView, nebo některý z open source softwarů. Tyto softwary mají některé základní manipulace s obrazovými daty předprogramované a zbytek algoritmů lze naprogramovat přímo. Výstupem ze zpracování obrazu mohou být rozměry objektu, plocha objektu, souřadnice těžiště, atd. [1]

**PC Based** systémy jsou určeny pro složitější aplikace, kde je nutná větší výpočetní kapacita pro dosažení rychlé analýzy obrazu. Tento systém využívá některý z komunikačních protokolů pro přenos dat z kamery do PC.

Výhody:

- PC based systém má uživatelsky známé prostředí (např. Windows, Linux)
- Rychlý výpočetní hardware
- Možnost naprogramovat vlastní výpočetní software

Nevýhody:

- Použití průmyslového PC
  - Drahé
  - Využití jen části výkonu hardwaru (software není optimalizován pro daný hardware)

**Chytrá kamera** (smart kamera) je kamera, která má vlastní procesor a zpracování dat je realizováno přímo uvnitř kamery.

Výhody:

- Zařízení vše v jednom (může obsahovat i osvětlení)
- Pro jednodušší aplikace - levné
- Robustní konstrukce - určena do průmyslu (prachu vzdorné, vodotěsné, radiálně odolné modely, apod.)
- Možnost řídit napřímo jednotlivé aktuátory
- Jednoduché grafické programování - není potřeba znát žádný programovací jazyk

Nevýhody:

- Vlastní software kamery - nemusí umět požadované algoritmy
- Pomalejší procesor než v PC Based systémech





- Těžko použitelné ve více komplexních aplikacích
- Nutnost nastavení přes externí počítač
- Malá datová paměť

**Embedded** kamerový systém je velice podobný PC-based, ale univerzální počítač je nahrazen jednoúčelovým kontrolérem. Tento kontrolér je optimalizován přímo pro zpracování obrazu a díky tomu lze využít jeho maximální výkon. Datový přenos mezi kamerou a kontrolérem je zaručen díky komunikačnímu protokolu, který je definován výrobcem pro daný systém. Kontrolér je většinou dodáván od stejného výrobce jako kamery - zaručení kompatibility hardwaru a softwaru. Kontroléry bývají s obrazovkou nebo touchpanelem pro přímé programování, nebo mají pouze video výstup pro připojení externího monitoru. [2]

Výhody:

- Hardware a software je optimalizovaný - rychlost
- Často levnější než univerzální PC
- Konektivita přímo s několika kamerami pro simultánní inspekci
- Konstrukce bez pohyblivých částí (bez větráku, SSD disky) - spolehlivost

### 2.1.3 Kamerový čip

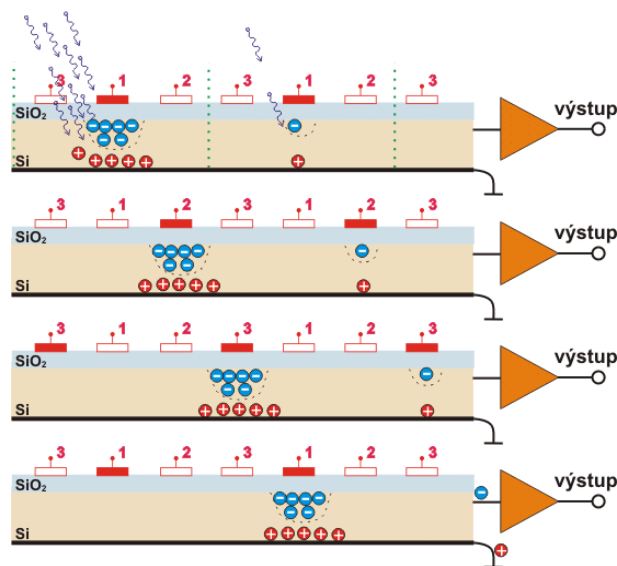
Jak již bylo zmíněno, kamerový čip slouží pro zachycení světelné energie a přeměnu na energii elektrickou. Základní princip čipu je v zachycení letících fotonů (světelné záření) ve světlocitlivých prvcích zvaných pixely. Ty jsou vystaveny fotonovému záření po dobu otevření závěrky (doba expozice). Během expozice, se v pixelu hromadí množství elektronů, které vytváří na čipu náboj. Tento náboj je poté převeden na napětí, které je zesíleno. V případě digitální kamery je informace zdigitalizována a hodnota je připravena na výstupu. Samotná fáze přeměny energie je postavena na principu foto-efektu. Při nárazu fotonu do atomu, předává foton energii a tímto může převést elektron do excitovaného stavu a tím se podílí na elektrické vodivosti.

**Pixel** se skládá z fotocitlivé části, části pro ukládání elektrického náboje a u některých typů čipu i signálové elektroniky. Z tohoto důvodu není fotocitlivá část čipu na celé jeho ploše, ale pouze na části. Poměr fotocitlivé plochy a plochy snímače je znám jako faktor pokrytí (fill factor). Čím větší poměr, tím je čip více citlivý a je potřeba méně světla (menší čas) na zachycení stejného množství energie. Velikosti jednotlivých čipů jsou standardizovány výrobcem a jsou to např: 2/3", 1/1,8", 1/2", 1/3", 1/4", 1/5", 1/6" atd.. Přesné mechanické rozměry aktivní plochy jsou definovány výrobcem a mohou se měnit v řádu procent. Podle velikosti čipu se volí vhodný objektiv. Výběr objektivů je popsán v kapitole 2.1.4. Množství samotných pixelů na čipu se mění podle výrobce a konkrétním čipu. Například čipy v kamerách od firmy OMRON se vyrábí v těchto variantách: 0,3MPx - 1/3" (640 x 480px), 2MPx - 1/1,8" (1200 x 1600px) a 5MPx - 2/3" (2448 x 2044px). Ve strojovém vidění není striktně definovaný žádný video standard, proto se počty pixelů mění podle výrobce. [3]



**Základní typy** kamerových čipů jsou CCD (charged-coupled device, zařízení s vázanými náboji) a CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor, doplňující se k oxid-polovodič).

- CCD princip je uveden na obrázku 2. V horní části obrázku jsou zobrazeny elektrody 1, 2 a 3. Na elektrodu 1 je přivedeno kladné napětí a zároveň je čip vystaven světlu. Na principu fotoefektu se dopadajícím světlem excitují elektrony, které jsou přitahovány k anodám. Jednotlivé pixely jsou prezentovány zelenými čarami v horním obrázku. V horní části obrázku 2 je vidět více elektronů u levého pixelu (více dopadajících fotonů) než u pixelu vpravo. Po skončení expozice se tyto elektrony čtou po řádcích, díky tomu je možné mít signálovou elektroniku pouze u jednotlivých řádků. Čtení se provádí přiváděním trojfázového hodinového signálu (změna signálu elektrody 1 na 2, 2 na 3 a 3 na 1 - 2 až 4 řádek).



Obrázek 2: CCD-princip vázání nábojů [4]

- CMOS čip je konstrukčně stejný jako počítačové procesory. Toto je velká výhoda CMOS čipu, protože technologie výroby je z důvodů velké kapacity výroby levnější. Oproti čipu CCD jsou signálové obvody pro každý pixel umístěny zvlášť. Díky tomu je možné načíst data velmi rychle (v jeden okamžik), tímto dochází k časové úspoře i úspoře elektrické energie. Nevýhoda tohoto čipu je v množství elektronických obvodů, které zabírají velkou část plochy čipu a tedy zmenšují světlocitlivou plochu - nízký fill factor. To je z velké části kompenzováno použitím optických čoček umístěných nad jednotlivými pixely a světlo je zaostřeno pouze na světlocitlivou část. [5]

**Kamerový čip** snímá tedy jen množství dopadajícího světla, proto v základním provedení je schopen čip snímat pouze černobílý obraz (světlo - bílá barva, tma - černá barva). Pro zavedení barevných informací o obrazu se využívá barevných filtrů, které k pixelu/subpixelu propustí jen definovanou vlnovou délku světla. Těto

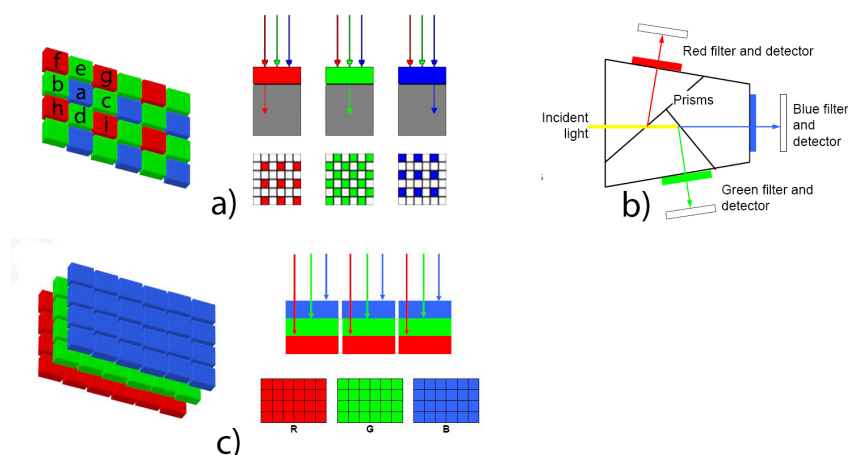


funkce lze dosáhnout vícero způsoby. Například pomocí Bayerova filtru, který bývá používán u levnějších barevných čipů. Jeho princip je zobrazen na obrázku 3 a). Jedná se o “barevné pixely” - nad každým pixelem je umístěn barevný filtr, který propustí jen požadované světlo. Nejčastější provedení funguje s takzvaným RGB (red, green, blue) systémem. Výsledný obraz se poté vypočítává skládáním jednotlivých okolních pixelů na výslednou barevnou matici. Hlavním nedostatkem této metody je, že výsledný obraz není kompletní, kvůli skládání barevného obrazu (skutečné rozlišení výsledného obrazu je o něco menší než aktivní počet pixelů). Další nevýhoda je rozmazání hran, které dochází při skládání výsledného obrazu. Z výše zmíněných důvodů se tento typ čipu ve strojovém vidění téměř nevyužívá. Na obrázku 3 a) je vysvětlena metoda dopočítávání barevné hodnoty pixelu. Modrý pixel označen “a” je dopočítán pomocí matice okolních bodů. Následující rovnice vyjadřují matematický zápis výpočtu. [1]

$$R = \frac{(f + g + h + i)}{4} \quad (1)$$

$$G = \frac{(b + c + d + e)}{4} \quad (2)$$

$$B = a \quad (3)$$



Obrázek 3: Typy barevných čipů

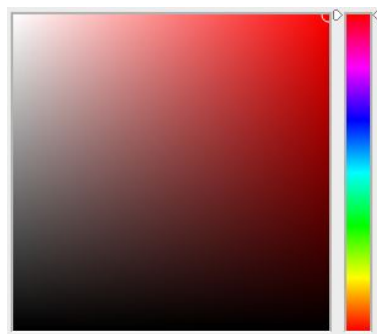
**Další metody** pro snímání barevného obrazu jsou například:

- 3CCD kde je světelný paprsek rozdělen pomocí optického krystalu na 3 identické obrazy a poté je obraz filtrován a zachycen 3mi nezávislými fotodiodami viz obrázek 3 b).



- Foveon X3 - tento čip funguje na principu rozdílných vlnových délek, které jsou schopny projít jen do určité hloubky fotodiody. Každou vrstvu lze poté číst separátně a tudíž je výsledkem reálný obraz (obrázek 3c)).

**RGB systém** umožňuje zapsat všechny běžné barvy (obrázek 4) pomocí červené, zelené a modré. Pomocí 8bitového zápisu (256 odstínů pro každou barvu) je možné zapsat  $256^3=16777216$  barev. Bílá barva je definována jako  $R=256, G=256, B=256$  a černá  $R=0, G=0, B=0$ . Z předchozích informací plyne, že pro zaznamenání barevného obrazu je zapotřebí  $3 \times 8\text{bitů} = 24\text{ bitů/pixel}$  což je oproti černobílému (8bitů) 3x více. Z tohoto důvodu musí být kladeny větší nároky u barevných čipů na datové toky, ukládání obrazu a hlavně na zpracování 3x více dat při zpracování obrazu. Toto je velká nevýhoda barevných čipů a proto se využívají jen v případech, kde je nutné zaznamenávat barvu pro pozdější vyhodnocení obrazu. Ve velké části případů se používají pouze černobílé čipy.



Obrázek 4: RGB barevná paleta

#### 2.1.4 Kamerové rozhraní

Kamerové rozhraní popisuje elektronickou a optickou kompatibilitu zvolené kamery a dalších prvků kamerového nebo okolního systému.

**Objektiv** se ke kameře připojuje pomocí standardizovaného upevnění, které je předdefinováno výrobcem. Ve strojovém vidění se standartě využívá C-mount nebo CS-mount u menších inspekci je možné využít i S-mount. Ve speciálních případech jsou na trhu i upevnění typu F-mount (Nikon), K-mount (Pentax), EF mount (Canon) a mnohé další - tyto typy se používají hlavně ve spotřební kamerové technice. Kamerové upevnění definuje mechanické spojení kamery a objektivu a vzdálenost objektivu od čipu. U C a CS-mount se jedná se o závit "1-32 UN 2A" - závit průměr 1" s 32 závity na 1" stoupání. Vzdálenost příruby od čipu je pro CS-mount 12,5mm a pro C-mount je vzdálenost 17,52mm. C-mount objektivy jsou kompatibilní i s kamerou s CS-mount, za použití distančního kroužku o výšce 5mm. CS-mount objektivy nejsou kompatibilní s C-mount závitem na kameře. [6]

**Elektrické rozhraní** kamer má dvě podoby: digitální a analogové. Analogové rozhraní se využívalo u starších systémů, kde nebylo zapotřebí vysokého rozlišení a snímková



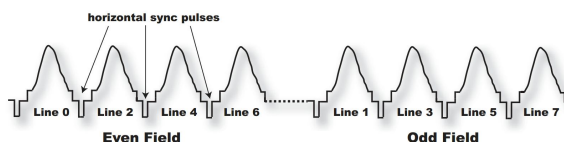
frekvence menší než 25-30FPS. U moderních kamerových systémů se u většiny případů používá digitální rozhraní, pokud nejsou definovány speciální požadavky na systém. [7]

**Digitální rozhraní** kamery pro strojové vidění je v posledních letech nejrozšířenější z důvodů nezávislosti rozlišení a snímkovací frekvence na video formátu nebo na video standardech. Digitální video je digitální signál, který je přenášen datovým tokem z kamery do dalších zařízení. Tok je definován 1 nebo 2 různými napětími, odpovídající binárním hodnotám 0 a 1. Digitální přenos dat má minimální míru obrazového šumu, což je velká výhoda oproti analogovému. Digitální data jsou posílána většinou pixel po pixelu po sériových nebo paralelních linkách. Nejčastěji používané rozhraní je ve strojovém vidění USB, Ethernet nebo CameraLink<sup>TM</sup>. Základní údaje těchto rozhraní jsou uvedeny v tabulce 1

	USB 2.0	USB 3.0	CameraLink <sup>TM</sup>	Gigabit Ethernet
Max datová propustnost (MB/sec)	~ 40	~ 400-600	250/680 základní/plný	120
Max délka kabelu(m)	5	3-5	10-15	100

Tabulka 1: Kamerové rozhraní (délky kabelů se dají rozšířit externím zařízením)

**Analogové rozhraní** kamery může být použito s CCD čipy, z důvodu jednoduššího prokládání snímků (čtení obrazových informací po řádcích). Analogové informace video obrazu jsou rozdělena na dvě matice: sudé a liché řádky obrazových dat ze snímáče. Důvod rozložení obrazu na dvě části je z důvodu nedostatečné kapacity analogového rozhraní. Prokládání obrazu se provádí odesláním lichých a sudých řádků střídavě po sobě, přičemž přijaté řádky se přepisují až po přijetí nových informací. Analogový signál obrazu je zobrazen na obrázku 5. Evropský standard pro analogový video formát se nazývá CCIR (Comité Consultatif International des Radiocommunications). Tento standard definuje přesné vlastnosti signálu. CCIR standard má 625 řádků se stránkovací frekvencí 25 snímků za sekundu (tj. 50 zobrazení prokládaných snímků), poměr stran je 4:3 a napěťová špička signálu je 1V.



Obrázek 5: Analogový datový tok [7]

## 2.2 Optika a geometrie obrazu

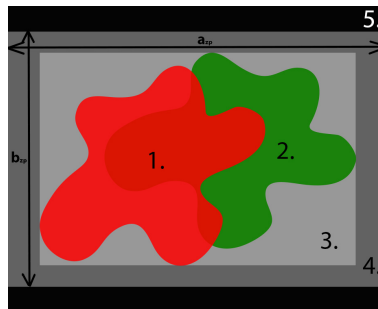
Objektiv je v kamerovém systému velmi důležitým komponentem, který slouží k přenesení obrazu (světelného záření) na kamerový čip. Špatně zvolený typ objektivu může mít za následek zhoršené přenesení obrazu a tím ovlivnit výstup z kamerového systému.



Pro definování správného objektivu je zapotřebí znát parametry jako: zorné pole, pracovní vzdálenost (minimální i maximální), hloubka ostrosti, minimální rozlišovací prvek objektu. [8]

### 2.2.1 Geometrie Obrazu

**Zorné pole** je část prostoru, která je přenesena objektivem na kamerový čip. Pro definování zorného pole je potřeba znát velikost objektu, který musí kamera “vidět” a jeho možné posunutí a natočení. Na obrázku 6 je uveden příklad definice zorného pole: 1. původní objekt, 2. maximální vychýlení objektu, 3. plocha kde se může objekt vyskytovat, 4. okraje (tolerance), 5. vyplnění prostoru do poměru stran čipu. Tyto rozměry zorného pole jsou minimální rozměry, které musí objektiv přenést do kamery.



Obrázek 6: Zorné pole

**Pracovní vzdálenost** je vzdálenost mezi čipem a objektem a je definována většinou okrajovými podmínkami objektivu (minimální zaostřovací vzdálenost) a pracovního prostoru (maximální vzdálenost pro montáž kamery). Mezi těmito limity musí být kamera namontována.

**Ohnisková vzdálenost** definoval C. F. Gauss jako: “*Ohnisková vzdálenost předmětového (obrazového) prostoru je podíl lineární velikosti obrazu (předmětu) v ohniskové rovině k zdánlivé velikosti předmětu (obrazu) nekonečně vzdáleného.*” [9] Pro nejjednodušší interpretaci je zaveden model dírkové komory (pinhole model) na obrázku 7 - zjednodušený model kamery. Po průchodu světelného paprsku ohniskem se obraz překlopí a promítne na kamerový čip. Rovnice platné pro model dírkové komory:

$$\frac{f}{z} = \frac{r'}{r} \quad (4)$$

$$\frac{x'}{x} = \frac{y'}{y} = \frac{r'}{r} \quad (5)$$



$$x' = \frac{f}{z} \cdot x \quad (6)$$

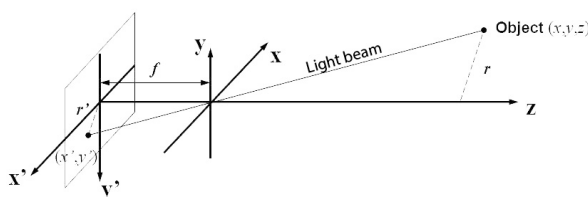
$$y' = \frac{f}{z} y \quad (7)$$

Pro výpočet ohniskové vzdálenosti  $z$  z předchozích rovnic, je zapotřebí nahradit objektivové souřadnice a souřadnice promítnutého objektu, souřadnicemi zorného pole a rozměry čipu.

$$f_1 = \frac{z_{pv}}{a_{zp}} \cdot a_s \quad (8)$$

$$f_2 = \frac{z_{pv}}{b_{zp}} \cdot b_s \quad (9)$$

Výsledné ohniskové vzdálenosti  $f_1$  a  $f_2$  závisí na rozměrech požadovaného zorného pole  $a_{zp}$  a  $b_{zp}$  (obrázek 6). Požadovaná ohnisková vzdálenost se volí nižší z dvojice  $f_1$  a  $f_2$ . Další krok je zvolení nejbližší nižší ohniskové vzdálenosti u objektivu vybraného výrobce. Standardně jsou k dispozici objektivy s ohniskovou vzdáleností: 2, 4, 6, 8, 12, 16, 25, 50, 100 mm. Uvedená hodnota je spočtena pro konkrétní velikost čipu, v praxi se však často setkáváme s objektivy určenými pro větší čip a jeho ohnisková vzdálenost se musí přepočítat pro konkrétní velikost čipu. [8]



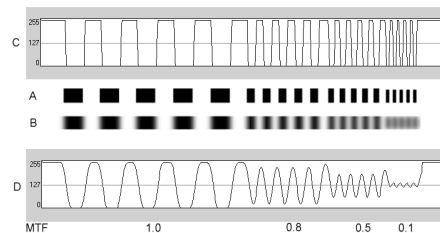
Obrázek 7: Dírková komora [8]

**Hloubka ostrosti** je vzdálenost mezi nejbližším a nejvzdálenějším bodem objektu, který se jeví lidskému oku jako zaostřený. Malá hloubka ostrosti znamená, že je zaostřena pouze nepatrná vzdálenost na objektu, naopak velká hloubka ostrosti znamená zaostření téměř celého objektu. Hloubku ostrosti je nutné v každé aplikaci nastavit na optimální požadovanou hodnotu, nastavení se provádí změnou clonového čísla (clona). Čím větší clonové číslo, tím je zaostřena větší část objektu, ale proniká méně světla a je zapotřebí delší čas expozice pro zachycení stejného obrazu při nižším clonovém čísle.



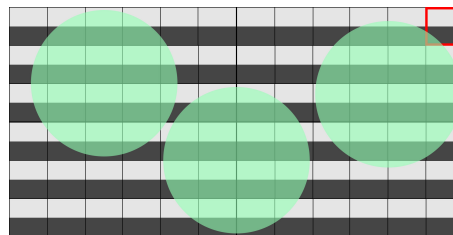
**Rozlišovací schopnost objektivu** je schopnost “vidět” malé details, které se jeví jako ostré. Tato charakteristika objektivu je popsána funkcí MTF (Modulation transfer function - modulační přenosová funkce), která měří kontrast přenesený z objektu do obrazu. Na obrázku 8 je zobrazen popis objektivu pomocí MTF. Řádek “A” je originální obraz, řádek “B” je obraz přenesený na čip. Řádek “C” a “D” ukazují histogram vzorků. Definice MTF vychází z maximální a minimální intenzity světla přenesené na čip. Pro definování této charakteristiky je nutné využít normalizovanou tabulku vzorků a funkci měřit za definovaných podmínek.

$$MTF = \frac{(\text{maximální intenzita} - \text{minimální intenzita})}{(\text{maximální intenzita} + \text{minimální intenzita})} \quad (10)$$



Obrázek 8: Rozlišení objektivu [10]

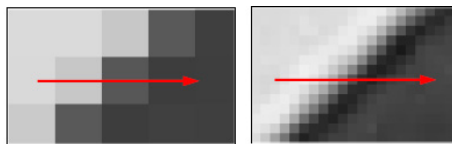
**Skutečné rozlišení** je termín popisující rozměr plochy objektu, který je zobrazen na 1 pixelu (obrázek 9).



Obrázek 9: Skutečné rozlišení

- Pro přesné měření je dolní limit skutečného rozlišení alespoň 2x požadovaná přesnost měření. Toto pravidlo definuje Shannonův / Nyquistův teorém, který popisuje rekonstrukci signálu. Rekonstrukce signálu je možná tehdy, je-li vzorkovací frekvence alespoň dvojnásobek největší harmonické složky signálu. [11] Tento teorém je aplikovaný na rekonstrukci signálu, ale lze jej použít i při rekonstrukci obrazu - nelze určit průběh obrazu mezi jednotlivými pixely. Na obrázku 9 je znázorněna matice pixelů, kde 1 pixel je znázorněn červeným rámečkem, světlá část pixelu je světlo citlivá část pixelu. Zelený měřený objekt má průměr 4-5px (záleží na umístění), tedy přesnost měření je  $4px \pm 1px$  nebo  $5px \pm 1px$ , tj. přesnost je minimálně 2x skutečné rozlišení. V praxi se přesnost měření pohybuje jako 5 násobek skutečného rozlišení, z důvodů kvality objektivů a nepřesné detekci hran.





Obrázek 10: Porovnání skutečného rozlišení [8]

### 2.2.2 Zkreslení obrazu

Dalším důležitým faktorem kvalitního systému je schopnost částečně nebo úplně eliminovat obrazové vady, které v daném systému mohou vznikat. Často vznikající chyby jsou například: geometrické vady, spektrální vady.

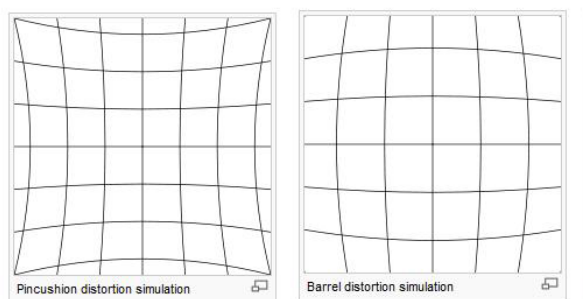
#### Geometrické vady

- Radiální zkreslení obrazu vzniká rozdílnými úhly přicházejícího světla a tím různého ohybu světla v čočkách objektivu. Světlo při přechodu mezi materiály mění svůj úhel podle Snellova zákona zapsaného v následujících rovnicích. Nejčastější typ zkreslení je soudkovité a poduškovité. (obrázek 11). Tato obrazová se vyskytuje ve větší míře u zoom objektivů.

$$n_i \cdot \sin(\theta_i) \cdot k_i = n_t \cdot \sin(\theta_t) \cdot k_t \quad (11)$$

$$k_i = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_i} \quad (12)$$

$$k_t = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_t} \quad (13)$$

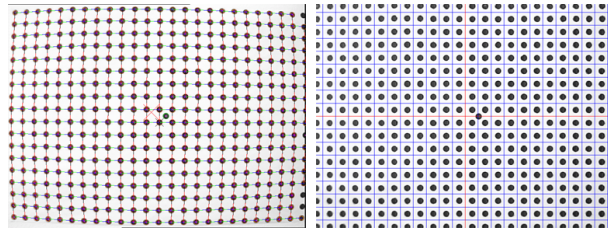


Obrázek 11: Radiální zkreslení a) poduškovité, b) soudkovité [12]

- Korekce pomocí obrazové kalibrace - předem definovaná matice bodů, u které jsou známy parametry rozměr bodů a jejich rozteč, je sejmuta kamerou. Informace o kalibrační desce jsou vloženy do kalibračního softwaru a poté je



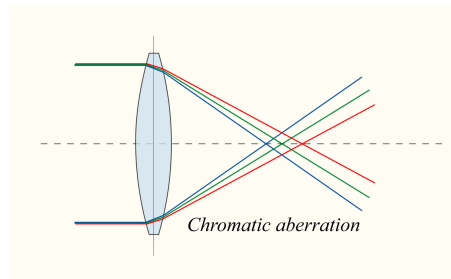
vypočten kalibrační soubor kamery. Kalibrační software bývá dodáván s řídicím softwarem kamery, jako součást vnitřního softwaru smart-kamer nebo součástí řídicích kontrolérů. Kamera poté, při každé inspekci, přepočítává pozice pixelů na základě kalibračního souboru a výstup z kamery je už korigován nebo se kalibrační korekce dělá separátně v kalibračním softwaru třetích stran.



Obrázek 12: Geometrická kalibrace obrazu [8]

### Spektrální vady

- Chromatická aberace vzniká lomem světla v čočkách objektivu. Snellův zákon závisí i na vlnové délce světla a každé jeho spektrum se tedy láme pod jiným úhlem (obrázek 13). Tato vada se jeví na obrázku vytvářením “barevné duhy” na kontrastních hranách objektu.



Obrázek 13: Chromatická aberace [10]

- Chromatická aberace se dá odstranit správnou kombinací čoček, nazývaných achromatická soustava. Další metody spočívají v aplikaci materiálů jako fluorid vápenatý, který má malý světelný rozptyl, nebo použitím difrakčních elementů, které mají opačné světelné vlastnosti než čočka a světlo ohýbají zpět.

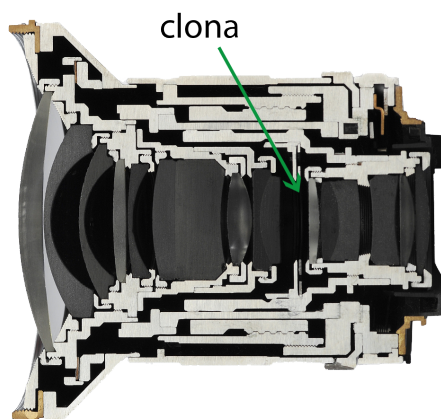
### 2.2.3 Objektiv

Objektiv je optická část kamerového systému, která usměrňuje světelné paprsky na kamerový čip. V praxi se vyskytuje více druhů objektivů a to: s nastavitelnou ohniskovou vzdáleností (zoom objektivy) nebo s pevnou ohniskovou vzdáleností (pevné objektivy).

**Objektiv** se skládá z čoček, ostřicího kroužku, clony a upevňovací části. Systém různě tvarovaných čoček slouží k usměrnění světelných paprsků na kamerový čip a definuje ohniskovou vzdálenost objektivu a jeho minimální zaostřovací vzdálenost.



Ostření je nastavováno ostřícím kroužkem, který mění polohu čoček v objektivu. Ostření může být automatické, pomocí servopohonu a vyhodnocovacího softwaru, nebo mechanické (operátor). Clona je stínící mechanismus objektivu, který definuje množství a úhel světla, které vstupuje do objektivu. Většina objektivů má clonu proměnnou a tedy ji lze přizpůsobit požadavkům systému. Clona má vliv i na hloubku ostrosti (vysvětleno v kapitole 2.2.1). Upevnění objektivu je vysvětleno v kapitole 2.1.4. Při volbě objektivu je nutné zachovat kompatibilitu kamerového čipu a objektivu. Objektiv musí být schopný pokrýt obrazem velikost čipu,



Obrázek 14: Řez objektivem [14]

- Zoom objektiv má výhodu možnosti změny zorného pole, pomocí proměnné změny ohniskové vzdálenosti. Ke změně dochází při přestavení optických členů objektivu, přestavení může dojít mechanicky nebo elektronicky. Tuto vlastnost objektivu lze využít při použití univerzálních inspekci (inspekce malého a velkého objektu). Problémem je, že tyto objektivy jsou konstrukčně velice složité a jejich optické vlastnosti jsou porovnatelně horší než u objektivů s pevným ohniskem. Mechanická změna optických členů má za následek i změnu geometrie obrazu a je nutné udělat kalibraci vždy po změně ohniskové vzdálenosti. Z těchto důvodů nejsou tyto objektivy ve strojovém vidění časté.
- Pevné objektivy jsou kvůli lepším optickým vlastnostem nejčastěji používané. Nastavení zorného pole je tedy stálých rozměrů a je závislé na vzdálenosti objektivu od objektu.

## 2.3 Osvětlení

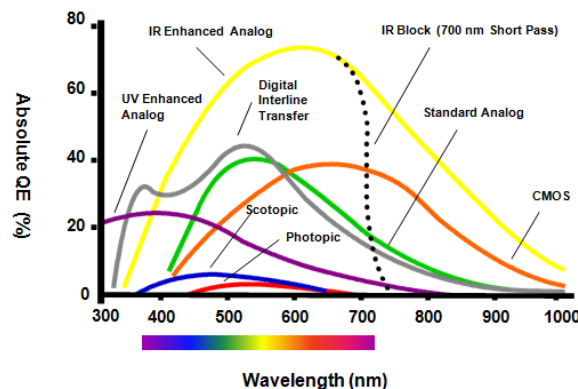
Je dobře známo, že kvalita osvětlení má rozhodující vliv na tvorbu robustního a časově stabilního kamerového systému. Jakákoliv změna osvětlení může dramaticky ovlivnit scénu a tudíž výstup ze systému může být ovlivněn také. Pro správné osvětlení je nutno zvolit parametry jako typ světla, techniku, filtrování podle charakteristiky kamerového snímače



Obrázek 15: příklady osvětlení [15]

### 2.3.1 Barevné spektrum

Důležitým faktorem světla jsou jejich spektrální vlastnosti (frekvence světla/intenzita). Pro maximální využití výkonu je zapotřebí vhodně spárovat spektrum s kamerovým čipem, protože každý čip má rozdílnou citlivost na jiné světlo. Na obrázku 16 jsou vidět průběhy citlivostí v závislosti na světelném spektru. Viditelné světlo se pohybuje v rozmezí 380 až 750 nm, UV světlo má hodnoty 380nm a méně a IR má hodnoty 750nm a více.



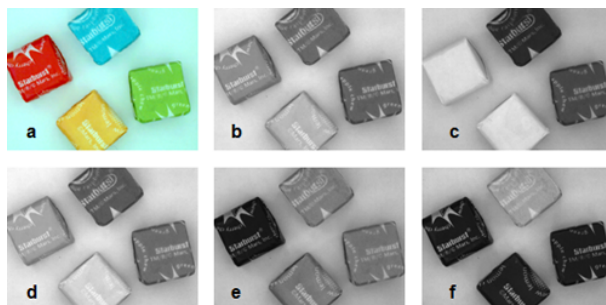
Obrázek 16: Citlivost čipu na rozdílné světelné vlnové délky [13]

Důležitá je také interakce světla s objektem. Ze zákonů fyziky se světlo po dopadu na objekt rozdělí. 1. část světla se odrazí, 2. část světla vyvolá v materiálu emisi, 3. část materiál absorbuje a 4. část může materiálem projít. Interakce závisí na vlnové délce světla, směr světla, barvě povrchu snímaného objektu a jeho fyzikálních vlastnostech, včetně tvaru. Tyto faktory definují chování světla - množství a směr odraženého/emitovaného světla, Na obrázku 17 je ukázána interakce barevných ploch s barevným světlem. Nejčastěji používaná kombinace ve strojovém vidění je kombinace černobílého senzoru a červeného světla - CCD a CMOS jsou nejvíce citlivé na červené světlo. [16]

### 2.3.2 Zdroje světla

Obecně používané typy světla používané v strojovém vidění jsou:

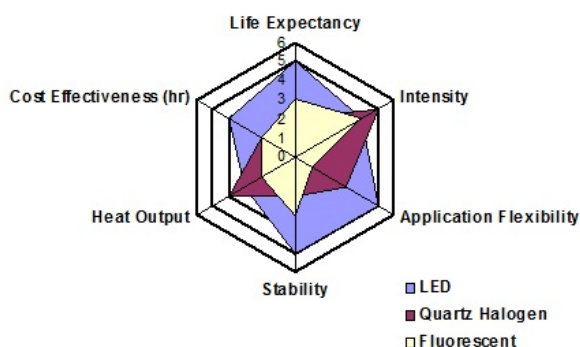
- Fluorescenční zářivka



Obrázek 17: Použití barevných filtrů: a) barevný-CCD čip, b) bílé světlo, c) červené světlo, d) červené + zelené světlo, e) zelené světlo, f) modré světlo (obrázky b-e mají B&W čip) [13]

- Halogenová lampa
- LED dioda
- Halogenidová výbojka
- Xenonová výbojka
- Sodíkové výbojky

Mezi nejrozšířenější osvětlení pro menší aplikace patří fluorescentní, halogenové a LED světla. Pro větší scény, kde je potřeba více světla, se používají halogenidové, xenonové a sodíkové výbojky. Na obrázku 18 jsou vidět vlastnosti jednotlivých typů světla pro menší scény. Téměř největší plochu zabírají světla LED, která patří k nejrozšířenějším u běžných inspekci. [16]



Obrázek 18: Porovnání světelných zdrojů [16]

### 2.3.3 Okolní světlo

Okolní světlo je jedním z nepříznivých faktorů ovlivňující scénu. Většina okolních zdrojů světla může narušit scénu nestabilitou osvětlení (venkovní světlo), multispektrálním světlem, nechtěné stíny atd. Aktivní nebo pasivní metody pro odstranění nepříznivých vlivů jsou:



- Stroboskopický efekt - aktivní
  - jedná se o silný výboj světla v krátkém čase, které je více intenzivní než světlo v okolí - přesvícení
  - synchronizace s kamerou
- Oddělení prostoru od okolního světla - pasivní metoda
  - velice efektivní metoda, kde je okolní světlo úplně odstíněno
  - nejčastěji se umísťuje inspekce do neprůhledného boxu (black box)
- Použití barevných filtrů (Obrázek 17) - pasivní metoda
  - pomocí filtrů lze změnit spektrální vlastnosti světla - využití stabilního okolního osvětlení
  - použití pro zvýraznění nebo potlačení některých barev (interakce s povrchem objektu) [16]

#### 2.3.4 Technika osvětlení

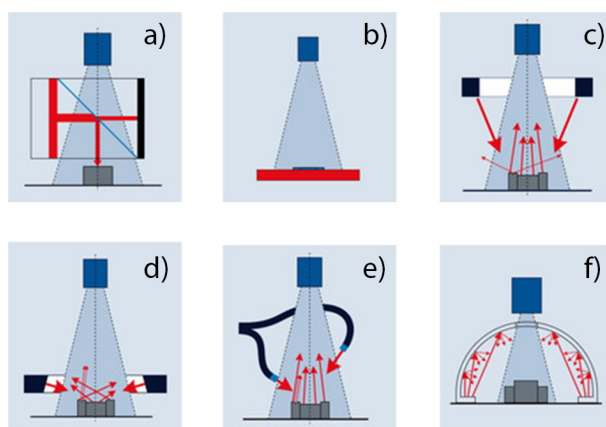
Každý kamerový systém vyžaduje individuální přístup k osvětlení. Zvolením správného typu osvětlení lze eliminovat velkou část problematických charakteristik obrazu, jako je například odlesk, "měkké" hrany, stíny, malý kontrast apod.

Na obrázku 19 jsou znázorněny některé časté příklady osvětlení. [17]

- Koaxiální osvětlení
  - světlo prochází skrz 50% propustné zrcadlo a je odraženo ve směru pohledu kamery - paprsky jsou rovnoběžné s osou kamery
  - vhodné pro ploché objekty, vysoce reflexivní, kosmetické inspekce apod.
- Zadní osvětlení (backlight)
  - světlo je umístěno pod zkoumaným objektem a směřuje směrem do kamery - světlo projde pouze dírami nebo polopropustným materiálem, zbytek objektu je tmavý
  - použití při zkoumání obrysů objektu
- Kruhové osvětlení
  - zdroj světla je po celém obvodu kamery, paprsky jsou téměř rovnoběžné s kamerou a svítí ve směru objektu
  - použití pro zkoumání nerovností povrchu (změna odrazu světla)
- Osvětlení s temným zorným polem (darkfield)



- zdroj světla je po celém obvodu kamery, ale směr je více jak  $45^\circ$  odkloněn od osy kamery - tímto je zabráněno přímému odrazu světla do kamery
- vhodné zejména pro inspekce povrchu, prasklin, škrábanců apod. - i nepatrná hrana odráží světlo do kamery a jeví se jako světlé místo
- Směrové osvětlení (spot light)
  - světlo je přímo namířeno na zkoumanou část pod určeným úhlem - možno zvýraznit zkoumané místo stíny
  - vhodné na inspekci otvorů, hran, přítomnosti prvků apod. prvků
- Difuzní osvětlení
  - světlo je rozptýleno kolem objektu
  - využívá se při zkoumání povrchu jako jsou textury, různé sklony nebo obecnou topografií prvku



Obrázek 19: Typy osvětlení: a) koaxiální osvětlení, b) zadní osvětlení, c) kruhové osvětlení, d) Osvětlení s temným zorným polem, e) směrové osvětlení, f) difuzní osvětlení [17]



### 3 Návrh koncepce kamerového systému pro detekci polohy karoserie

#### 3.1 Popis systému

Cílem této práce je vytvořit kamerový systém pro výpočet polohy karoserie v prostoru. Tato informace je poté využívána roboty při tmelení karoserie, kde robot nanáší tmel podle posunutých souřadnic trajektorie přímo na požadované místa.

Karoserie je umístěna na dopravníku, který je horizontální. Nepřesnost tohoto dopravníku společně s umístěním karoserie je definována zákazníkem a nabývá maximálně  $\pm 30\text{mm}$  pro každý bod karoserie. Tato odchylka je pro tmelení karoserie příliš velká a je zapotřebí korigovat polohu jednotlivých karoserií. Naším cílem je tedy vytvořit tento systém, který je schopný definovat přesnou polohu aktuální karoserie. Karoserie jdou v náhodném pořadí, který je definován vnitřním systémem firmy a proto je nutná možnost měřit různé karoserie bez nutnosti jakékoliv úpravy systému.

##### 3.1.1 Požadavky zákazníka na systém

Vytvořit systém který bude:

- flexibilní a bezúdržbový
- možnost měřit více druhů karoserií bez nutnosti jakéhokoli zásahu obsluhy (3 karoserie: A, B, C)
- jednoduchá správa systému při změně karoserií (nové modelové řady, nebo úprava stávajících)
- velikost chyby systému menší než 3mm (šířka tmelu pokrývá tuto chybu)

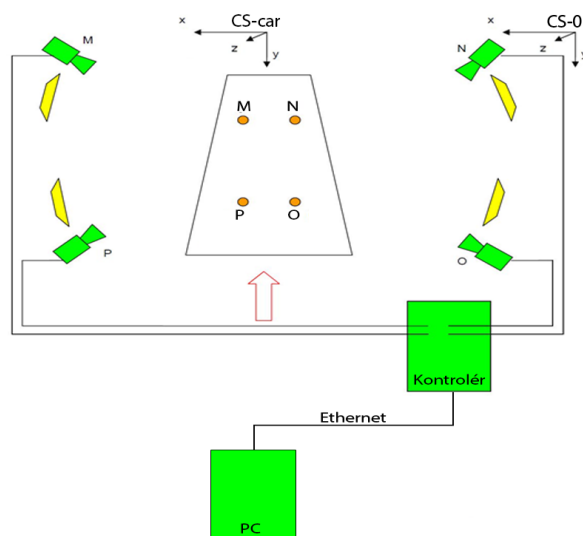
##### 3.1.2 Koncepce systému

Systém se skládá z kamerové a výpočetní části. Kamerová část systému slouží k obrazovému zaměření karoserie, kde výstupem z tohoto systému jsou souřadnice jednotlivých zaměřovacích bodů na kamerovém snímači. Tyto data se poté zpracovávají ve výpočetní části, kde jsou vypočteny hodnoty polohy karoserie a předány na výstupu robotům.

Koncepce tohoto systému vychází z hardwarového uspořádání, které je částečně definováno zákazníkem. Výpočet musí běžet na již stávajícím PC se systémem Windows, které slouží pro manuální ovládání linky. Komunikace mezi PC a kamerovým systémem bude probíhat přes Ethernet. Kamerový systém musí být od firmy OMRON, z důvodů již zaškolené obsluhy.

**Pro** definici polohy objektu v 3D prostoru je důležité znát tento prostor. Toho se dosáhne mechanickým nebo optickým zmapováním (rozměry a polohy hardwarových částí). Základním orientačním prvkem tohoto systému je nulový souřadný systém CS0. Tento souřadný systém je mechanicky definován, aby bylo možné k němu zaměřit veškeré hardwarové prvky systému.





Obrázek 20: Koncepte systému

Samotnou polohu objektu je nutno definovat 3 body v prostoru nebo transformační maticí souřadného systému objektu vůči některému referenčnímu souřadnému systému. V našem případě se jedná o 3 body karoserie, kde každý z nich je snímán separátní kamerou. Tyto body jsou vztaženy k souřadnému systému karoserie, který definuje výslednou polohu dané karoserie, vůči referenčnímu souřadnému systému. Její poloha není vztažena k systému CS0, ale k referenční karoserii z praktických důvodů:

- menší vzdálenost od bodu rotace a translace (práce s menšími čísly) - zákazník definoval maximální možný posun mezi souřadnými systémy jednotlivých karoserií a ten se pohybuje v hodnotách menších než  $\pm 30mm$ .
- jednodušší synchronizaci kamerového systému a robotů (nulové posunutí trajektorií na referenční karoserii)

Pro zpřesnění a zkvalitnění systému je přidána 4. kamera a měřeny jsou 4 body MNOP. Tento krok přinese výhody:

- lepší přesnost systému
  - možnost vypočítat 4 částečně nezávislé souřadné systémy (MNO, NOP, OPM, PMN), výsledkem posunutí karoserie je jejich průměrná hodnota
- robustní systém
  - pokud kamera nezměří požadovaný bod, výpočet proběhne i za pomoci 3 kamer
  - možnost lepší zpětné kontroly systému
  - při rozbité nebo posunuté kameře je systém stále stabilní
  - možnost vypočítat polohu i lehce deformované karoserie

Výstupem z tohoto systému tedy bude transformační matice mezi referenční karoserií a karoserií měřenou. Zákazníkem definovaný výstup je ve formátu:



- 4 kvaterniony - popisují rotaci nového souřadného systému vůči referenčnímu
- 3 translace souřadného systému

Výsledné hodnoty slouží k transformaci trajektorií robotů.

## 3.2 Hardware

### 3.2.1 Kameraný systém

Pro tento systém se nejvíce hodí Embedded kamerový systém, z důvodů:

- Složitější inspekce
- Jednoduššímu propojení více kamer
- Vysoké rychlosti zpracování obrazu.

Požadavkem zákazníka je použití kamer OMRON. Firma OMRON disponuje nyní na trhu kamerovými systémy FH, FZ5 a FZ4. FH kamerové systémy jsou určeny pro vysokorychlostní inspekce a inspekce, kde velice záleží na času cyklu (řádově v jednotkách až desítkách milisekund), v tomto případě se nejedná o vysokorychlostní aplikaci. FZ5 a FZ4 jsou univerzální kamerové systémy, které zaručují přesné a rychlé zpracování obrazu a proto jsou vhodné pro tento systém. Pro naši aplikaci se nejlépe hodí systém FZ5, protože se jedná o novou lepší generaci FZ4. FZ5 obsahuje rychlejší procesory a novou generaci objektového hledání tvaru na obrazu (výrobce udává až 9x rychlejší než u předchozí verze). Tento algoritmus vyhledávání lze využít v našem systému.

Dalším aspektem pro volbu kamery je nutnost zapotřebí rozlišovat barvy, v našem případě se nejedná o barevnou inspekci, ale o vyhledávání objektů v obraze. Z tohoto důvodu bude použita kamera černobílá, výhody jsou uvedeny v kapitole 2.1.3.

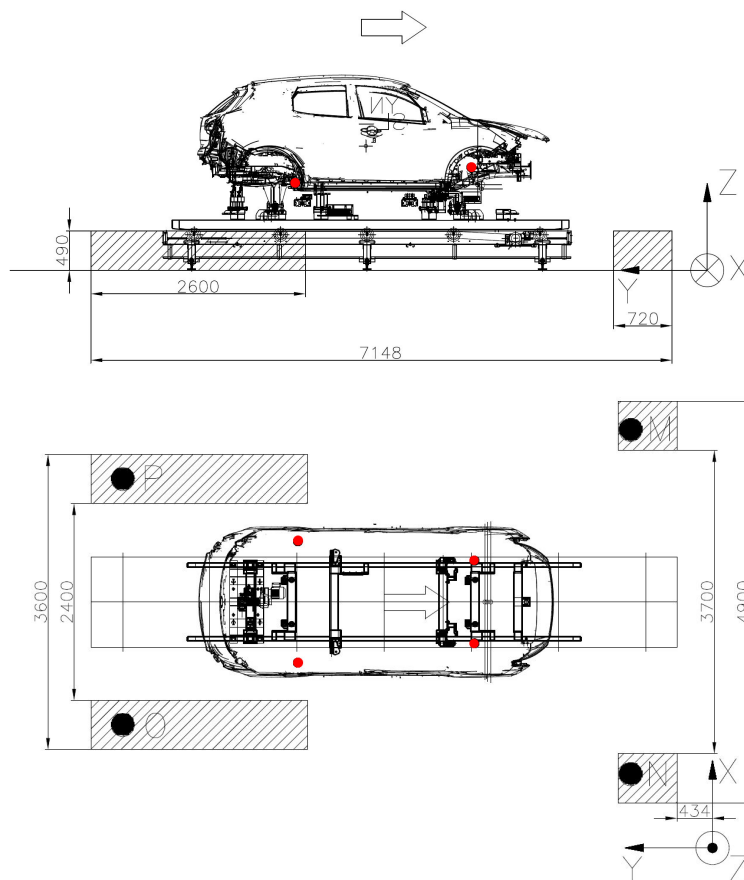
**Kamery**, vhodné pro tento systém, jsou zobrazeny na obrázku 21. Jedná se o standardní průmyslové kamery s vyměnitelnými objektivy. První uvedená kamera je kamera vysokorychlostní. Tato kamera není vhodná pro naši inspekci z důvodu vyšší ceny za vysokorychlostního čip, který není zapotřebí pro tento systém. Další dvě uvedené kamery jsou určeny pro inspekce, kde je zapotřebí menších zástavbových rozměrů kamery. Kvůli speciální konstrukci roste cena a proto se tyto kamery používají jen ve specifických případech. Optimální kamery pro náš systém jsou poslední tři zobrazené kamery. Volbu množství potřebných pixelů na čipu, lze odhadnout výpočtem a vztahy uvedenými v kapitole 2.2.1. Vstupní hodnoty do tohoto výpočtu jsou velikost lokalizovaného objektu a rozlišení kamerového čipu. Tyto hodnoty je nutné definovat a vypočítat. [3]

Z 3D modelu karoserie je nejprve potřeba definovat otvory nebo jiné prvky na karoserii, které je možné jednoduše nalézt v kamerovém systému. Tento prvek se musí nalézat na všech typech karoserií v blízkém okolí, aby bylo možné tento prvek lokalizovat v kameře, při zachování stejné pozice a nastavení kamery. Pro nalezení správného regionu na karoserii je nutné nejprve stanovit přibližnou polohu kamer v systému, aby z dané pozice kamery byla vidět konkrétní oblast možného výskytu

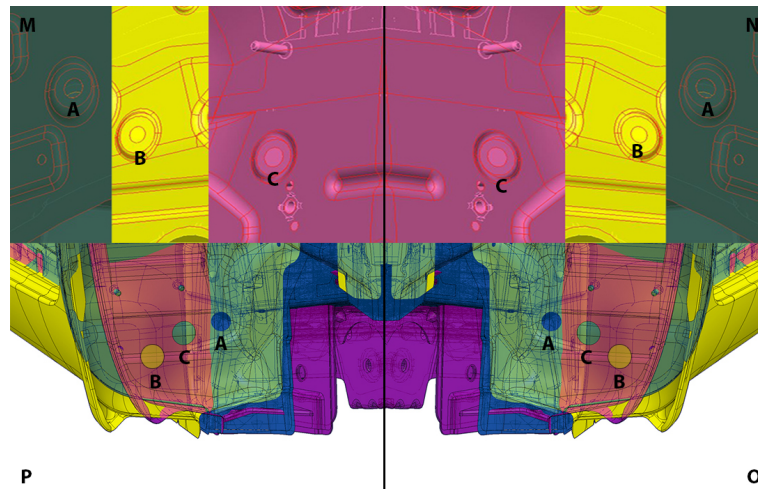


Item	Descriptions	Color / Monochrome	Image read time	Model
	5 million pixels (When connecting FZ5-6□ or FZ5-L35□, up to two cameras can be connected.)	Color	62.5 ms	FZ-SC5M2
		Monochrome		FZ-S5M2
	2 million pixels	Color	33.3 ms	FZ-SC2M
		Monochrome		FZ-S2M
	300,000 pixels	Color	12.5 ms	FZ-SC
		Monochrome		FZ-S
	300,000 pixels	Color	4.9 ms	FZ-SHC
		Monochrome		FZ-SH
	300,000-pixel flat type	Color	12.5 ms	FZ-SFC
		Monochrome		FZ-SF
	300,000-pixel pen type	Color	12.5 ms	FZ-SPC
		Monochrome		FZ-SP

Obrázek 21: Kamery určené pro systém FZ5 [3]



Obrázek 22: Půdorys a bokorys tmelící linky pro umístění kamer



Obrázek 23: Jednotlivé díry na všech karoseriích

prvku. Povolená pozice kamer vychází z konstrukčního uspořádání dopravníku, pojezdů robotů a ostatních prvků tmelící linky. Na obrázku 22 jsou šrafy zobrazené možné pozice jednotlivých kamer.

Po předdefinování pozice kamer, je možné určit oblast, která bude v zorném poli kamer. Tato oblast je znázorněna na obrázku 22 pomocí červených kruhů. V každé oblasti se nacházejí prvky, konkrétně díry, které budou lokalizovány na snímcích z kamer. Konkrétní referenční díry jsou zobrazeny na obrázku 23.

Přední díry mají průměr 12mm (karoserie A, B) a 10mm (karoserie C), zadní díry mají průměr 25mm (karoserie A, C) a 20mm (karoserie B). Díry se nacházejí v plechu o tloušťce 0,8 mm. Tloušťka stěny plechu může ovlivňovat výpočet a proto je nutné ji lokalizovat na obrázku. Z tohoto důvodu je nejmenší požadovaná rozlišovací schopnost kamerového systému 0,8 mm.

Polohy jednotlivých děr lze vidět v tabulce 2. Tyto souřadnice jsou vzdálenosti od souřadných systémů jednotlivých karoserií. Pro určení potřebného zorného pole je zapotřebí transformovat tyto souřadnice do souřadného systému kamery. Toho lze docílit vynásobením bodů transformační maticí. Pro výpočet transformační matice je nutné znát přibližnou polohu kamery (předběžné umístění kamer pro výpočet, skutečné umístění se může trochu lišit) a střed zorného pole, který lze vypočítat jako průměrnou hodnotu souřadnic krajních děr na snímku. Tím je myšleno, že střed obrazu by měl být uprostřed mezi krajními dírami různých karoserií v horizontální tak i ve vertikální ose. Na obrázku 23 je vidět umístění děr jednotlivých karoserií a z něho vyplývá, které díry jsou limitující pro zorné pole:

- kamera M: karoserie A a karoserie C
- kamera N: karoserie A a karoserie C
- kamera O: karoserie A a karoserie B
- kamera P: karoserie A a karoserie B



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Karoserie A

souřadnice	$M_A$	$N_A$	$O_A$	$P_A$
X	506	-506	-699,8	700,2
Y	0	0	2180,3	2180,2
Z	220	220	35	35

Karoserie B

souřadnice	$M_B$	$N_B$	$O_B$	$P_B$
X	499,5	-501,4	-781,0	780,8
Y	54	45	2140,1	2141,6
Z	235	237	57	57

Karoserie C

souřadnice	$M_C$	$N_C$	$O_C$	$P_C$
X	502	-502	-748,9	748,9
Y	10	10	2189,1	2189,1
Z	210	210	32	32

Tabulka 2: Souřadnice jednotlivých děr v souřadném systému CS-car karoserie A, B, C [mm]

souřadnice	$CS_{car-A}$	$CS_{car-B}$	$CS_{car-C}$
X	3000	3000	3000
Y	2900	2904	2948
Z	1050,5	1001,5	1050,5

Tabulka 3: Souřadné systémy jednotlivých karoserií v souřadném systému CS0 [mm]

Příklad výpočtu středu zorného pole pro kameru M:

$$\begin{aligned}\bar{X}_M &= \frac{(X_{M-A} + X_{car-A}) + (X_{M-C} + X_{car-C})}{2} = \frac{(506 + 3000) + (502 + 3000)}{2} = \\ &= 3504mm\end{aligned}\quad (14)$$

$$\begin{aligned}\bar{Y}_M &= \frac{(Y_{M-A} + Y_{car-A}) + (Y_{M-C} + Y_{car-C})}{2} = \frac{(0 + 2900) + (10 + 2948)}{2} = \\ &= 2929\end{aligned}\quad (15)$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_M &= \frac{(Z_{M-A} + Z_{car-A}) + (Z_{M-C} + Z_{car-C})}{2} = \frac{(220 + 1050,5) + (210 + 1050,5)}{2} = \\ &= 1265,5mm\end{aligned}\quad (16)$$

Přibližné pozice kamer MNOP v souřadném systému CS0

Pro vytvoření matice je nutné znát jednotkové vektory os souřadného systému, který se snažíme přepočítat ve výsledném souřadném systému CS0. V našem případě se jedná o vektory os kamerového čipu, kde definujeme souřadný systém kamery. Osa Z je kolmá

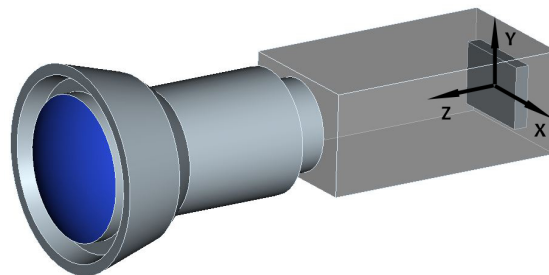


souřadnice	$S_{\{ZP-M\}}$	$S_{\{ZP-N\}}$	$S_{\{ZP-O\}}$	$S_{\{ZP-P\}}$
X	3504	2496	2259,6	3740,5
Y	2929	2929	5062,2	5060,9
Z	1265,5	1265,5	1072	1072

Tabulka 4: Souřadnice středů zorných polí v souřadném systému CS0 [mm]

souřadnice	$K_M$	$K_N$	$K_O$	$K_P$
X	5100	900	1500	4500
Y	1000	1000	7200	7200
Z	400	400	450	450

Tabulka 5: Souřadnice kamer v souřadném systému CS0 [mm]



Obrázek 24: Souřadný systém kamery



na kamerový senzor a směřuje od kamery do středu zorného pole. Osa X je vodorovná osa čipu a osa Y je kolmá na rovinu XZ. Jednotkové vektory tohoto systému v souřadném systému CS<sub>0</sub>, tvoří řádky transformační matice mezi těmito systémy.

Výpočet transformační matice **T** pro kameru M:

$$\begin{aligned}\vec{z}_M &= S_{ZP-M} - K_M = (3504 - 5100; 2929 - 1000; 1265,5 - 400) = \\ &= (-1596; 1929; 865,5)\end{aligned}\quad (17)$$

$$\hat{z}_M = \frac{\vec{z}_M}{|\vec{z}_M|} = \frac{(-1596; 1929; 865,5)}{\sqrt{(-1596)^2 + 1929^2 + 865,5^2}} = (-0,6025; 0,7282; 0,3267)\quad (18)$$

$$\overrightarrow{CS0_z} = (0, 0, 1)\quad (19)$$

$$\vec{x}_M = \overrightarrow{CS0_z} \times \vec{z}_M = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & 1 \\ -0,6025 & 0,7282 & 0,3267 \end{vmatrix} = (-0,7282; -0,6025; 0)\quad (20)$$

$$\hat{x}_M = \frac{\vec{x}_M}{|\vec{x}_M|} = \frac{(-0,7282; -0,6025; 0)}{\sqrt{(-0,7282)^2 + (-0,6025)^2 + 0^2}} = (-0,7705; -0,6375; 0)\quad (21)$$

$$\vec{y}_M = \vec{z}_M \times \vec{x}_M = \begin{vmatrix} i & j & k \\ -0,6025 & 0,7282 & 0,3267 \\ -0,7705 & -0,6375 & 0 \end{vmatrix} = (0,2082; -0,2517; 0,9451)\quad (22)$$

$$\mathbf{T}_M = \begin{vmatrix} xx & xy & xz \\ yz & yy & yz \\ zx & zy & zz \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -0,7705 & -0,6375 & 0 \\ 0,2082 & -0,2517 & 0,9451 \\ -0,6025 & 0,7282 & 0,3267 \end{vmatrix}\quad (23)$$

Samotná transformace bodů je pouze vynásobením transformační matice s vektorem mezi souřadnicemi jednotlivých krajních děr a středem zorného pole.

Výpočet souřadnic děr v souřadném systému kamery M:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{v_{M-A}} &= (X_{M-A} + X_{car-A}) - S_{ZP-M} = \\ &= ((506 + 3000) - 3504; (0 + 2900) - 2929; (220 + 1050,5) - 1265,5) = (2; -29; 5)\end{aligned}\quad (24)$$

$$\begin{aligned}\overrightarrow{v_{M-C}} &= (X_{M-C} + X_{car-C}) - S_{ZP-M} = \\ &= ((502 + 3000) - 3504; (10 + 2948) - 2929; (210 + 1050,5) - 1265,5) = (-2; 29; -5)\end{aligned}\quad (25)$$



$$\begin{aligned}\overrightarrow{v_{M-A}} &= \mathbf{T}_M \times \overrightarrow{v_{M-A}} = \begin{vmatrix} -0,7705 & -0,6375 & 0 \\ 0,2082 & -0,2517 & 0,9451 \\ -0,6025 & 0,7282 & 0,3267 \end{vmatrix} \times (2; -29; 5) = \\ &= (16,95; 12,44; -20,69) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned}\overrightarrow{v_{M-C}} &= \mathbf{T}_M \times \overrightarrow{v_{M-C}} = \begin{vmatrix} -0,7705 & -0,6375 & 0 \\ 0,2082 & -0,2517 & 0,9451 \\ -0,6025 & 0,7282 & 0,3267 \end{vmatrix} \times (-2; 29; -5) = \\ &= (-16,95; -12,44; 20,69) \end{aligned} \quad (27)$$

Tyto výsledné hodnoty jsou promítnuté referenční díry do roviny kamerového čipu v jeho souřadném systému. Jelikož se jedná o čip 2D, zanedbáme souřadnici Z, která je na čip kolmá. Tímto dostaneme krajní body zorného pole M:  $M1 = (16,9457; 12,4424)$   $M2 = (-16,9457; -12,4424)$ . Horizontální a vertikální délka minimálního zorného pole je tedy:

$$ZP_{MX} = |M1_x| + |M2_x| = |16,9457| + |-16,9457| = 33,9mm \quad (28)$$

$$ZP_{MY} = |M1_y| + |M2_y| = |12,4424| + |-12,4424| = 24,9mm \quad (29)$$

Tyto rozměry zorného pole je potřeba rozšířit o maximální možné posunutí karoserie, které je definováno zákazníkem jako  $\pm 30mm$ . Zorné pole je potom:

$$ZP'_{MX} = ZP_{MX} + 100 = 33,9 + 60 = 93,9mm \quad (30)$$

$$ZP'_{MY} = ZP_{MY} + 100 = 24,9 + 60 = 84,9mm \quad (31)$$

Návrh zorného pole musí být proveden pro všechny kamery. Avšak lze definovat symetrii mezi kamerami M, N (přední) a kamerami O, P (zadní), kde odchylky bodů jsou téměř zanedbatelné pro výpočet zorného pole. Proto stačí návrh vypočítat pro jednu přední a jednu zadní kameru.

**Návrh** zorného pole pro kameru O vyplývá z výpočtu zorného pole pro kameru M:

$$\vec{z}_O = (759,6; -2137,8; 622)$$

$$z_O = (0,3229; -0,9088; 0,2644)$$

$$\overrightarrow{CSO_z} = (0,0,1)$$





Kamera	Pixely	Rozlišení	Horizontální poměr pixel/mm	Vertikální poměr pixel/mm
FZ-S	0,3 Mpix	640x480	Přední: 6.8; Zadní: 4.3	Přední: 5.7 Zadní: 5.5
FZ-S2M	2 Mpix	1600x1200	Přední: 17; Zadní: 10.8	Přední: 14.1 Zadní: 13.8
FZ-S5M2	5 Mpix	2448x2044	Přední: 26.1; Zadní: 16.4	Přední: 24.1 Zadní: 23.5

Tabulka 6: Rozlišení kamer

$$\vec{x}_O = (0, 9088; 0, 3229; 0)$$

$$\vec{x}_O = (0, 9423; 0, 3349; 0)$$

$$\vec{y}_O = (-0, 0854; 0, 2403; 0, 9301)$$

$$\mathbf{T}_O = \begin{vmatrix} 0, 9423 & 0, 3349 & 0 \\ -0, 0854 & 0, 2403 & 0, 9301 \\ 0, 3329 & -0, 9088 & 0, 2644 \end{vmatrix}$$

$$\vec{v}_{O-A} = (40, 6; 18, 1; 13, 5)$$

$$\vec{v}_{O-B} = (-40, 6; -18, 1; -13, 5)$$

$$\vec{v}_{O-A'} = (44, 32; 13, 44; 0, 64)$$

$$\vec{v}_{O-B'} = (-44, 32; -13, 44; -0, 64)$$

Horizontální a vertikální délka minimálního zorného pole je tedy:

$$ZP_{OX} = 88, 6mm$$

$$ZP_{OY} = 26, 9mm$$

Rozšířené zorné pole je:

$$ZP'_{OX} = 148, 6mm$$

$$ZP'_{OY} = 86, 9mm$$

Rozlišení snímače se poté volí na základě přepočtu aktivních pixelů na milimetry. Výsledné hodnoty jednotlivých kamer jsou v tabulce 6. V kapitole 2.2.1 je definováno, že skutečné rozlišení se v praxi pohybuje 5 a více. Minimální rozlišovací schopnost kamerového systému je 0,8 mm. Z tabulky 6 je tedy možné vybrat kameru **FZ-S2M**.



**Volba kontroléru** je limitována množstvím kamer, které jsou potřeba pro danou inspekci. V tomto případě se jedná o připojení 4 kamer. Těmto parametrům vyhovuje pouze kontrolér s dotykovým panelem nebo s výstupem pro externí monitor. Jak již bylo zmíněno, výpočet bude probíhat na PC, kde je připojen externí monitor, který lze využít zároveň pro nastavení kamerového systému. Nastavení systému je zapotřebí jen při jeho instalaci a proto při běžné výrobě není nutné zobrazovat obrazy z inspekce. Z těchto důvodů se pro tento systém zvolil kontrolér **FZ5-L350-10**.

**Volba objektivu** je popsána v kapitole 2.2.1, pro správnou volbu objektivu je zapotřebí znát hodnoty:

- pracovní vzdálenost
- velikost zorného pole
- rozměry kamerového čipu

Pracovní vzdálenost závisí na konstrukčních možnostech tohoto systému. Jak je zobrazeno na obrázku 22, kamery se musí nacházet ve šrafovaných plochách M, N, O a P. Volba konkrétních souřadnic kamer je v tabulce 5. Pracovní vzdálenost pro přední kamery je dána velikostí vektoru  $\vec{z}_M$ , pro zadní kamery je dána velikostí vektoru  $\vec{z}_O$ .

$$|\vec{z}_M| = \sqrt{z_{Mx}^2 + z_{My}^2 + z_{Mz}^2} = \sqrt{(-1596)^2 + 1929^2 + 865,5^2} = 2649,0mm \quad (32)$$

$$|\vec{z}_O| = \sqrt{z_{Ox}^2 + z_{Oy}^2 + z_{Oz}^2} = \sqrt{759,6^2 + (-2137)^2 + 622^2} = 2351,7mm \quad (33)$$

Velikost obrazového snímače kamery FZ-S2M je definována výrobcem:  $7,1 \times 5,4$  mm. Dosazením do rovnic v kapitole 2.2.1 - ohnisková vzdálenost, lze vypočítat minimální ohniskovou vzdálenost.

Přední kamery:

$$f_{M1} = \frac{z_{pv}}{a_{zp}} a_s = \frac{2649}{93,9} \cdot 7,1 = 200,3mm$$

$$f_{M2} = \frac{z_{pv}}{b_{zp}} b_s = \frac{2649}{84,9} \cdot 5,4 = 168,5mm$$

Zadní kamery:

$$f_{O1} = \frac{z_{pv}}{a_{zp}} a_s = \frac{2351,7}{148,6} \cdot 7,1 = 112,4mm$$

$$f_{O2} = \frac{z_{pv}}{b_{zp}} b_s = \frac{2351,7}{86,9} \cdot 5,4 = 146,1mm$$

Na obrázku 25 jsou vypsány všechny objektivy vhodné pro kameru FZ-S2M. Z předchozích rovnic jsou limitující menší ohniskové vzdálenosti, které jsou zvýrazněné. Z tohoto lze vyvodit, že vhodný objektiv pro přední i zadní kamery je objektiv **3Z4S-LE SV10028H** s ohniskovou vzdáleností 100mm, u kterého výrobce zaručuje nízké zkreslení. Tento objektiv má nejbližší zaostřovací vzdálenost 2m, která splňuje naši podmínku o pracovní vzdálenosti.

C-mount Lens for 2/3-inch image sensor (Recommend: FZ-S□2M/FZ-S□5M2)  
(3Z4S-LE SV-7525H and 3Z4S-LE SV-10028H can also be used for FH-S□02 and FH-S□04)

Model	3Z4S-LE SV-0614H	3Z4S-LE SV-0814H	3Z4S-LE SV-1214H	3Z4S-LE SV-1614H	3Z4S-LE SV-2514H	3Z4S-LE SV-3514H	3Z4S-LE SV-5014H	3Z4S-LE SV-7525H	3Z4S-LE SV-10028H
Appearance/ Dimensions (mm)									
Focal length	6 mm	8 mm	12 mm	16 mm	25 mm	35 mm	50 mm	75 mm	100 mm
Brightness	F1.4	F1.4	F1.4	F1.4	F1.4	F1.4	F1.4	F2.5	F2.8
Filter size	M40.5 P0.5	M35.5 P0.5	M27.0 P0.5	M27.0 P0.5	M27.0 P0.5	M35.5 P0.5	M40.5 P0.5	M34.0 P0.5	M37.5 P0.5
Maximum sensor size	2/3 inch	2/3 inch	2/3 inch	2/3 inch	2/3 inch	2/3 inch	2/3 inch	1 inch	1 inch
Mount	C mount								

Obrázek 25: Dostupné objektivy pro kameru FZ-S2M [3]

U předních kamer, je ohnisková vzdálenost výrazně vyšší než je ohnisková vzdálenost objektivu, toto lze kompenzovat posunutím kamery nebo mezikroužky, které umožňují prodloužit ohniskovou vzdálenost. Možné posunutí kamery blíže k referenčním díram je minimální z důvodu konstrukčních omezení linky. Proto lze kompenzovat požadovanou ohniskovou vzdálenost, zavedením mezikroužku do systému kamera - objektiv. Firma OMRON nabízí kroužky v sadě 40 mm, 20 mm, 10 mm, 5 mm, 2.0 mm, 1.0 mm a 0.5 mm. Kroužky je vzájemně možno kombinovat, problémem je snížení tuhosti spoje mezi kamerou a objektivem, proto se doporučuje použití maximálního počtu 2 kroužků. Pro mezikroužky delší než 30mm je doporučené zesílení konstrukce držáku kamery, pro maximální odstranění vibrací.

U zadní kamery (O) je minimální ohnisková vzdálenost je větší pouze o 12%. Tento rozdíl lze brát jako rezervu posunutí karoserie a nemusí se kompenzovat.

### 3.2.2 Světlo

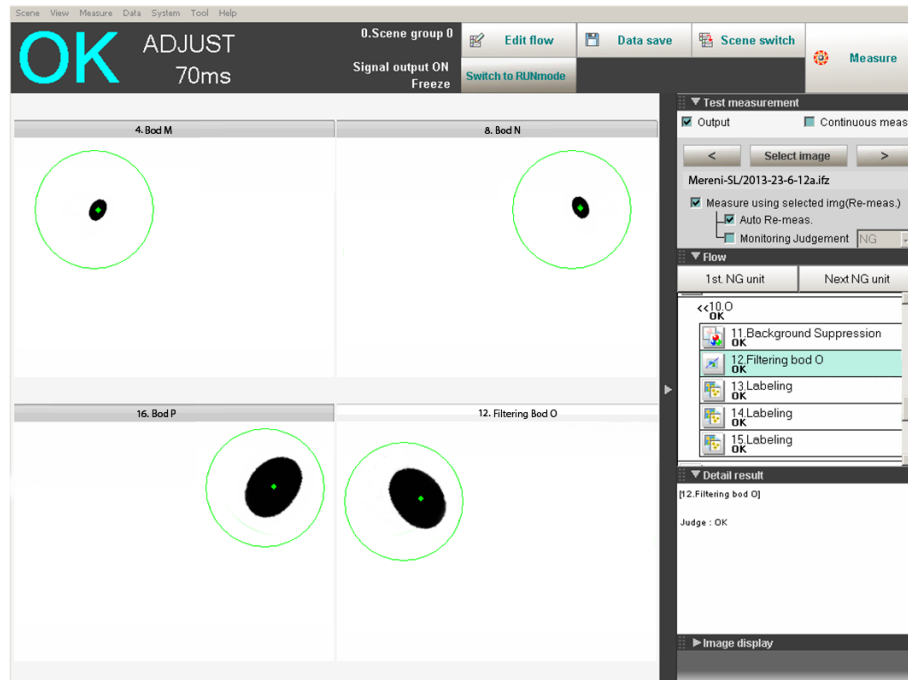
Pro tento systém byla použity průmyslová světla od firmy LVS s označením LV-RBOX-H9. Parametry těchto světel jsou:

- Napájecí napětí: 12V
- Maximální výkon 5W - usměrněn optickou čočkou
- Binární řízení s možným nastavením výkonu
- LED dioda - bílé světlo

Držák světla je vychýlen od osy kamery, z důvodů osvětlení pouze plochy s referenční dírou a neosvětlení samotného prostoru díry. Díky tomuto posunutí, lze vytvořit velký světelný kontrast mezi dírou a jejím okolím.

### 3.3 Software

Softwarové osazení tohoto systému je definováno zákazníkem a skládá z Embedded kamerového systému OMRON (software je součástí kontroléru) a samostatného softwaru pro výpočet polohy karoserie. Komunikace mezi těmito systémy je docílena pomocí Ethernetu.



Obrázek 26: Měření bodů v kamerovém kontroléru

### 3.3.1 Embedded kamerový systém

K nastavení inspekcí bylo dosaženo pomocí vestavěného softwaru OMRON za pomoci vestavěných algoritmů. Tato práce se zabývá vytvořením vhodného výpočetního algoritmu a proto nastavení samotných inspekcí není účelem této práce. Nastavení kamerového systému tedy není součástí této práce. Vizualizaci měření jednotlivých děr v kontroléru lze vidět na obrázku 26.

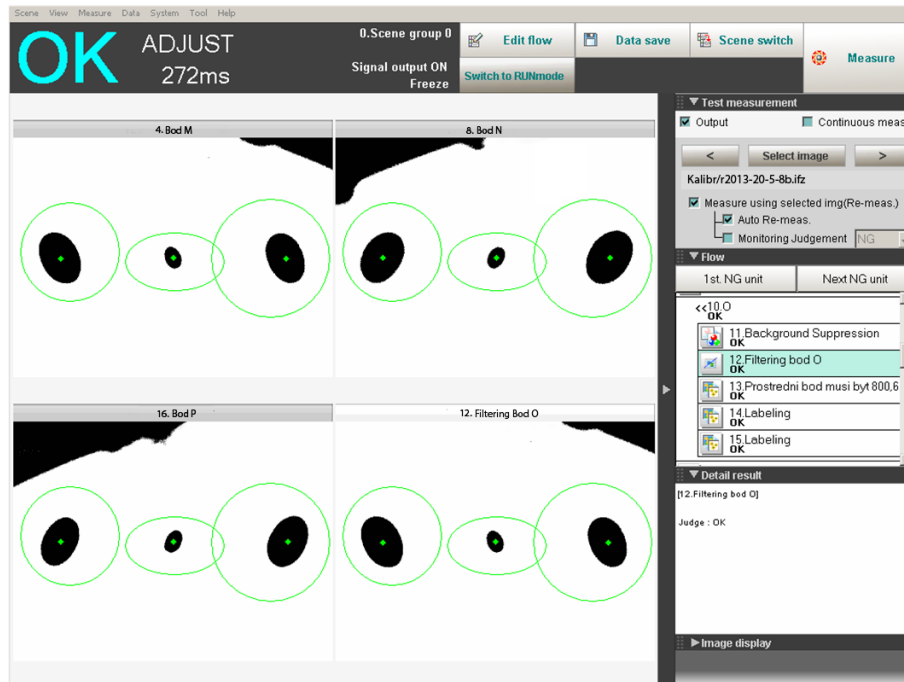
### 3.3.2 Koncepce kalibrace a nastavení systému

Kalibrace systému slouží k vytvoření konfiguračních dat, které popisují systém a korekci výpočetových dat. Kalibraci zkruslení objektivu v tomto případě není potřeba provádět, protože výrobce kamery a objektivu zaručuje vysoce kvalitní objektiv s malým zkruslením.

Vytvoření konfiguračních dat systému se provádí při instalaci systému a při přidávání nové karoserie do výroby, kalibrace systému se provádí při instalaci systému a poté při posunutí kamer (např. nechtěné posunutí kamery operátorem).

Konfigurační data popisují hardwarové umístění systémových komponent a jsou důležitá pro vytvoření matematického prostorového modelu systému. Tyto data jsou:

- Poloha kamer
- Poloha referenčních bodů
- Poloha kalibračních bodů
- Vzájemná poloha a orientace referenčních děr na karoserii



Obrázek 27: Kalibrace v kamerovém kontroléru

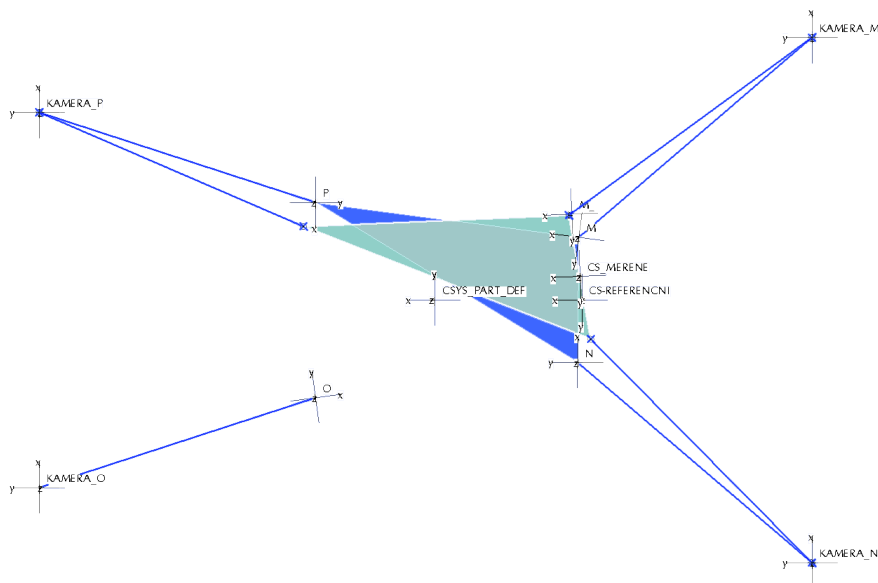
**Referenční body** jsou 4 a jsou umístěny na protější stěně tmelící linky ve směru pohledu kamer. Optimální umístění těchto bodů je přímo ve středu obrazu kamery, toho však nelze lehce dosáhnout z důvodu velkých vzdáleností (4-6m) a těžké miniaturní korekce směru kamer. Proto se tento bod umísťuje až po nastavení kamer do požadovaného zorného pole. Tento bod je černá kulatá samolepka, která je nalepena na kalibračních deskách. Hodnota souřadnic v obraze by měla být 800px; 600px, avšak malý rozptyl lze korigovat při výpočtu. Referenční body jsou popsány souřadnicemi v systému CS0.

Tyto referenční body zároveň slouží ke kalibraci posunutí kamer. Tento jev může nastat pouze při údržbě systému, protože v automatickém režimu je linka plně automatizována a vstup operátorů linky ke kamerám není umožněn.

**Kalibrační body** slouží ke kalibraci natočení kamery vůči její ose Z a pro definování měřítka mezi pixely a skutečnou vzdáleností. Pro každou kameru jsou 2 kalibrační body a jsou umístěny na kalibrační desce. Tyto body se nachází na krajních hranách zorného pole, z důvodu velké vzdálenosti mezi nimi a tím přesnějším výpočtu kalibrace. Kalibrační body jsou popsány vektory mezi referenčním bodem dané kamery a jednotlivými kalibračními body.

Kalibrace je prováděna za nepřítomnosti karoserie na lince, aby bylo možné kamerami sejmout referenční a kalibrační body (při měření karoserie, se body nacházejí schovány za karoserií).

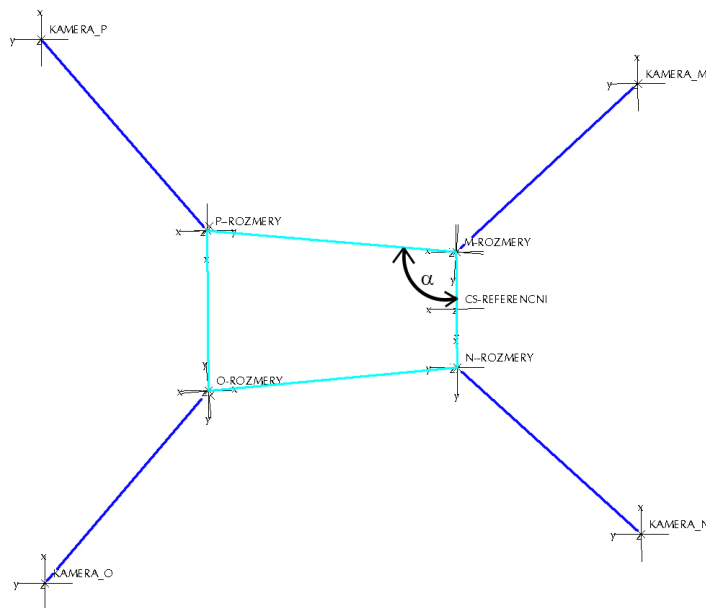
Jednotlivé body zobrazené v kontroléru kamerového systému lze vidět na obrázku 27.



Obrázek 28: Koncepce výpočtu

### 3.3.3 Koncepce výpočtu

V kapitole 3.1.2 je přiblížena koncepce výpočtu. Systém vychází z definování 3 bodů karoserie, které popisují 3D prostor a přesné umístění karoserie. Základem tohoto výpočtu je snímek karoserie a v něm umístěny referenční díry karoserie. Tento snímek definuje přímku, na které leží konkrétní bod karoserie. Přímka je definována středem díry a středem kamerového snímače. Na této přímce se tedy nachází konkrétní bod karoserie. Definováním 3 těchto přímek lze pomocí numerických metod nalézt jednoznačné řešení polohy 3 bodů vůči sobě, na základě známých vzájemných rozměrů. Z těchto 3 bodů lze vypočítat souřadný systém měřené karoserie a jeho transformaci v prostoru vůči souřadnému systému karoserie referenční. Koncepci výpočtu lze znázornit pomocí obrázku 3.3.3. Poloha referenční karoserie je vypočtena stejným způsobem jako karoserie měřená a její poloha souřadného systému je pouze uložena jako poloha nulová v souřadném systému CS0. Přidáním 4. kamery lze provést výpočet 4x a výsledná poloha měřené karoserie je průměrná hodnota z vypočtených transformačních matic. Výstupem z tohoto výpočtu je rotace a posunutí měřené karoserie od karoserie referenční, která je známá pro roboty.



Obrázek 29: Optimální poloha kamer

Optimální polohu kamer v systému lze určit na základě znalosti chování systému a jeho vlastností. Optimální pozice kamery je taková, kde směřnice jejího pohledu pólí úhel, mezi snímaným bodem a jeho sousedními body a měla by ležet v rovině bodů M, N, O a P. Toto vychází z konceptu modelu a obrázku 32, kde optimální umístění kamer lze zvolit tak aby měla směřnice přímky co největší průnik s obalovými plochami jednotlivých koulí, tj. pólí úhel  $\alpha$  (obrázek 3.3.3). Vzdálenost kamery nemá vliv na výpočet a proto se volí na základě požadovaného zorného pole a ohniskové vzdálenosti použitého objektivu (kapitola 3.2.1). Na obrázku 3.3.3 jsou ukázány optimální polohy kamer, kde zvláště je kamera M, u které směřnice kamery pólí úhel  $\alpha$ .

Synchronizace mezi referenční karoserií a roboty probíhá pomocí 3D skenování. Skenování je provedeno 3D laserovou skenovací jednotkou. Z výstupních hodnot lze definovat jeden souřadný systém, který je společný pro roboty a karoserie a tím zanést korekce do výpočtu trajektorií robotů. Tento krok však není součástí této práce a nebude rozebírán v dalších částí této práce.



## 4 Vstupní hodnoty

Do tohoto algoritmu vstupuje velké množství proměnných, které popisují matematický model. Některé hodnoty pouze popisují konstrukční uspořádání hardwarových prvků, tyto hodnoty definují strukturu prostorového matematického modelu a jsou pro všechny výpočty statické, proto je možné je načíst z konfiguračních souborů. Další vstupní hodnoty jsou proměnné a mění se pro každý výpočet. Tyto hodnoty jsou výstupy z kamerového systému.

### 4.1 Statické vstupní hodnoty

Tyto hodnoty definují polohu hardwarových prvků:

- Kamery - 4x
  - poloha středu kamerového snímače  $(X,Y,Z)$  v souřadném systému  $CS_0$
  - celkem 12 hodnot
- Referenční body - 4x
  - poloha středu referenčního bodu  $(X,Y,Z)$  v souřadném systému  $CS_0$
  - celkem 12 hodnot
- Kalibrační body - 8x
  - 2D vektor od středu referenčního bodu do středu kalibračního bodu v souřadném systému  $CS_0$
  - celkem 16 hodnot

Další hodnoty, jsou definovány na základě první kalibrace. Vstupní hodnoty z kalibrace jsou:

- Korekce orientace kamery
  - oprava umístění referenčních bodů ve středu obrazu
  - 2D vektor umístění referenčních bodů od středu obrazu [px]
  - slouží zároveň pro kontrolu posunutí kamer
  - pro každou kameru vektor  $(X,Y)$
  - celkem 8 hodnot
- Korekce natočení kamer okolo osy Z
  - matematická oprava montáže kamery - kamera musí být umístěna horizontálně (osa X kamerového snímače (obrázek 24) v rovině XY souřadného systému  $CS_0$ )
  - pro každou kameru transformační matice  $3 \times 3$





– celkem 36 hodnot

- Měřítko

- přepočítání pixelů na reálné jednotky pro každou kameru [mm]
- celkem 4 hodnoty

Další vstupní hodnoty jsou vztaženy ke každému typu karoserie. Patří mezi ně:

- Přibližná poloha referenční karoserie

- souřadnice referenčních děr v souřadném systému CS0
- každá karoserie má 4 referenční díry
- celkem 16 hodnot

- Transformační matice referenčních děr

- každá referenční díra karoserie má vlastní souřadný systém
- transformace mezi referenční dírou a souřadným systémem karoserie
- celkem 36 hodnot

## 4.2 Proměnné vstupní hodnoty

Tyto hodnoty se mění pro každý výpočet karoserie a jsou to výstupy z kamerového systému. Jedná se o souřadnice referenčních bodů, kalibračních bodů nebo referenčních děr na snímku. Do každé části algoritmu vstupují jiné hodnoty.

Do kalibrace vstupují souřadnice referenčních a kalibračních bodů. Jedná se o souřadnice středů bodů na snímku (X,Y) [px]. Na každém snímku jsou 3 body, celkem tedy do kalibrace vstupuje tedy 24 hodnot.

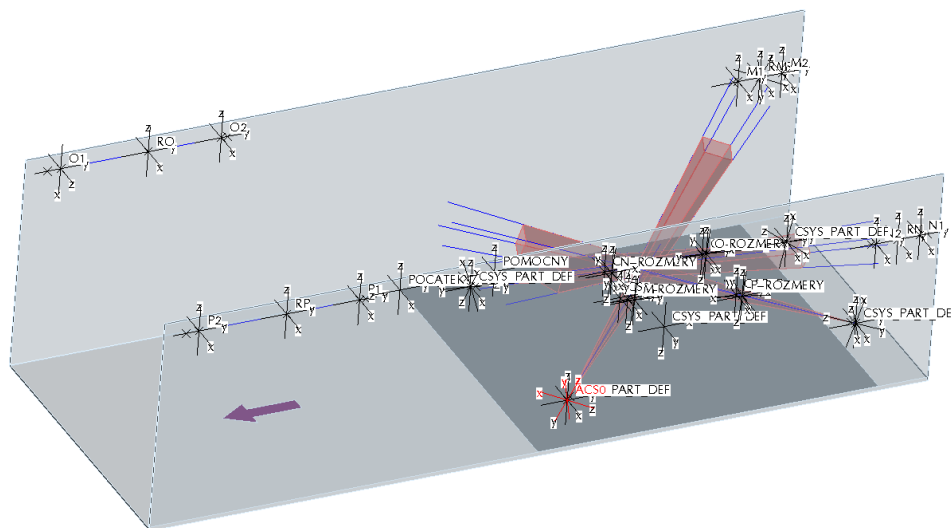
Do samotné části výpočtu vstupují pouze souřadnice středů referenčních děr na snímku (X,Y) [px]. Celkem tedy 8 hodnot.

## 4.3 Získávání vstupních hodnot

Nejrychlejší a nej přesnější metoda pro mapování 3D prostoru je 3D laserové skenování. Pomocí 3D skenovací hlavy je možné zmapovat všechny souřadnice hardwarových komponent vůči jakémukoliv souřadnému systému. Měření probíhá většinou z jednoho místa, ke kterému jsou vztaženy souřadnice a poté transformována do požadovaného souřadného systému, v našem případě CS0. Všechny komponenty by tedy měli být vidět z jednoho místa.

Metoda měření spočívá pouze v přiložení měřicí kuličky k danému prvku a měřicí laserový systém zaznamená její polohu. Pro definování polohy součásti ve 3D je zapotřebí znát minimálně 3 body. Proto každá součást je vyrobena tak, aby bylo možné přiložit měřicí kuličku k součásti na více místech. Úprava dílů probíhala vyrobáním otvorů o průměru 10mm v místech součásti, kde probíhalo měření. Založením kuličky o větším průměru do díry je poté možné přesně určit její polohu vůči součásti.

Pro zjednodušení simulace matematického modelu pracujeme s ideálními hodnotami, které vychází ze simulačního 3D modelu (obrázek 30):



Obrázek 30: Simulační 3D model

souřadnice	$K_M$	$K_N$	$K_O$	$K_P$
X	5100	900	1500	4500
Y	1000	1000	7200	7200
Z	400	400	450	450

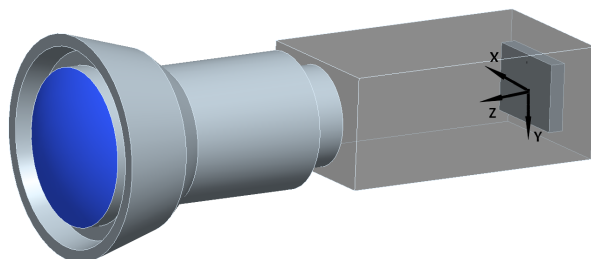
Tabulka 7: Souřadnice kamer v souřadném systému CS0 [mm]

Souřadnice	$R_M$	$R_N$	$R_O$	$R_P$
X	0	6000	6000	0
Y	7164,1	7164,1	-5464.69	-5474.06
Z	3165,7	3165,7	4134.83	4135.32

Tabulka 8: Souřadnice referenčních bodů v souřadném systému CS0 [mm]

souřadnice	$K_{M_1}$	$K_{M_2}$	$K_{N_1}$	$K_{N_2}$	$K_{O_1}$	$K_{O_2}$	$K_{P_1}$	$K_{P_2}$
X	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	-450	450	450	-450	1500	-1800	-1800	1500

Tabulka 9: Souřadnice kamer v souřadném systému CS0 [mm]



Obrázek 31: Souřadný systém kamerového senzoru

## 5 Návrh vhodné kalibrace systému

Kalibrace systému se provádí z důvodů korekce špatné montáže a možného posunutí kamery.

### 5.1 Kalibrace systému

Jak již bylo zmíněno v konceptu kalibrace v kapitole 3.3.2, tato kalibrace se provádí pouze při instalaci systému a skládá se z:

- Výpočet měřítka
- Kalibrace natočení kamery
- Kalibrace orientace kamery

Kalibrace vychází z porovnávání dat z kamer s reálnými kalibračními body, u kterých známe souřadnice v souřadném systému  $CS_0$ .

#### 5.1.1 Výpočet měřítek a transformačních matic pro jednotlivé kamery

Měřítka, které je potřeba pro převod pixelu na milimetry, lze vypočítat pomocí porovnání vzdálenosti mezi body na kamerovém snímáči a body na kalibrační desce. Pro možné porovnání je potřeba transformovat body z kalibrační desky na snímáč.

To je možné provést vynásobením souřadnic kalibračních bodů transformační maticí:

Výstup z kamer pro kalibraci jsou souřadnice bodů  $M_1, M_2, N_1, N_2, O_1, O_2, P_1, P_2$ .

Pro transformaci jednotlivých souřadnic je zapotřebí znát transformační matici pro každou kameru. Tyto transformační matice vycházejí z výpočtu uvedených v kapitole 3.2.1, s rozdílem že osy tohoto souřadného systému mají jiný směr z důvodu nastavení kamerového systému. Výstup kamerového systému má osu X vodorovnou a osu Y svislou (obrázek 31), kde nulové souřadnice jsou umístěny ve středu čipu (nastavení v kamerovém systému).

Příklad pro transformaci kalibračního bodu  $M_1$ :

$$\vec{z}_{SM} = R_M - K_M = (R_{MX} - K_{MX}; R_{MY} - K_{MY}; R_{MZ} - K_{MZ}) \quad (34)$$



$$\begin{aligned} z_{\hat{SM}} &= \frac{\overrightarrow{z_{SM}}}{|z_{SM}|} = \frac{(z_{SMX}; z_{SMY}; z_{SMZ})}{\sqrt{z_{SMX}^2 + z_{SMY}^2 + z_{SMZ}^2}} = \\ &= \left( \frac{z_{SMX}}{\sqrt{z_{SMX}^2 + z_{SMY}^2 + z_{SMZ}^2}}; \frac{z_{SMY}}{\sqrt{z_{SMX}^2 + z_{SMY}^2 + z_{SMZ}^2}}; \frac{z_{SMZ}}{\sqrt{z_{SMX}^2 + z_{SMY}^2 + z_{SMZ}^2}} \right) \end{aligned} \quad (35)$$

$$\overrightarrow{CSO_z} = (0, 0, -1) \quad (36)$$

$$\overrightarrow{x_{SM}} = \overrightarrow{CSO_z} \times z_{\hat{SM}} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & -1 \\ z_{\hat{SMX}} & z_{\hat{SMY}} & z_{\hat{SMZ}} \end{vmatrix} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} x_{\hat{SM}} &= \frac{\overrightarrow{x_{SM}}}{|x_{SM}|} = \frac{(x_{SMX}; x_{SMY}; x_{SMZ})}{\sqrt{x_{SMX}^2 + x_{SMY}^2 + x_{SMZ}^2}} = \\ &= \left( \frac{x_{SMX}}{\sqrt{x_{SMX}^2 + x_{SMY}^2 + x_{SMZ}^2}}; \frac{x_{SMY}}{\sqrt{x_{SMX}^2 + x_{SMY}^2 + x_{SMZ}^2}}; \frac{x_{SMZ}}{\sqrt{x_{SMX}^2 + x_{SMY}^2 + x_{SMZ}^2}} \right) \end{aligned} \quad (38)$$

$$\overrightarrow{y_{SM}} = z_{\hat{SM}} \times x_{\hat{SM}} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ z_{\hat{SMX}} & z_{\hat{SMY}} & z_{\hat{SMZ}} \\ x_{\hat{SMX}} & x_{\hat{SMY}} & x_{\hat{SMZ}} \end{vmatrix} \quad (39)$$

$$\mathbf{T}_{SM} = \begin{vmatrix} x_{\hat{SMX}} & x_{\hat{SMY}} & x_{\hat{SMZ}} \\ y_{\hat{SMX}} & y_{\hat{SMY}} & y_{\hat{SMZ}} \\ z_{\hat{SMX}} & z_{\hat{SMY}} & z_{\hat{SMZ}} \end{vmatrix} \quad (40)$$

Výsledkem jsou tedy body  $M'_1$ ,  $M'_2$  promítnuté do roviny kamerového snímače:

$$M'_1 = \mathbf{T}_{SM} \times KM_1 = \begin{vmatrix} x_{\hat{SMX}} & x_{\hat{SMY}} & x_{\hat{SMZ}} \\ y_{\hat{SMX}} & y_{\hat{SMY}} & y_{\hat{SMZ}} \\ z_{\hat{SMX}} & z_{\hat{SMY}} & z_{\hat{SMZ}} \end{vmatrix} \times (KM_{1X}; KM_{1Y}; KM_{1Z}) \quad (41)$$

$$M'_2 = \mathbf{T}_{SM} \times KM_2 = \begin{vmatrix} x_{\hat{SMX}} & x_{\hat{SMY}} & x_{\hat{SMZ}} \\ y_{\hat{SMX}} & y_{\hat{SMY}} & y_{\hat{SMZ}} \\ z_{\hat{SMX}} & z_{\hat{SMY}} & z_{\hat{SMZ}} \end{vmatrix} \times (KM_{2X}; KM_{2Y}; KM_{2Z}) \quad (42)$$

Souřadnice Z je v tomto případě zbytečná, protože se jedná pouze o souřadnice v rovině. Nyní lze porovnat souřadnice mezi promítnutými body a body změřenými.

$$\overrightarrow{m} = M_1 - M_2 = (M_{1X} - M_{2X}; M_{1Y} - M_{2Y}) \quad (43)$$

$$\overrightarrow{m'} = M'_1 - M'_2 = (M'_{1X} - M'_{2X}; M'_{1Y} - M'_{2Y}) \quad (44)$$

Měřítka je poměr mezi velikostí vektoru změřeného a velikostí vektoru přeneseného:

$$M_{MER} = \frac{\overrightarrow{m}}{\overrightarrow{m'}} = \frac{\sqrt{m_x^2 + m_y^2}}{\sqrt{m_x'^2 + m_y'^2}} \quad (45)$$

Výpočet měřítka je nutné provést pro všechny kamery, jeho hodnoty se při malé nesymetrii mohou lehce lišit.



### 5.1.2 Kalibrace natočení kamery

Tato kalibrace koriguje špatnou montáž kamer. Výpočet je založen na znalosti souřadnic kalibračních bodů, které jsou umístěny na kalibrační desce a porovnání těchto bodů promítnutých do kamerového snímače. Výstupem z této kalibrace je transformační matice, která koriguje výstup z kamer rotací souřadnic okolo osy Z. Obecná rotace kolem osy Z má následující tvar:

$$\mathbf{T}_{\mathbf{KM}} = \begin{vmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (46)$$

Kde úhel  $\theta$  je úhlem natočení mezi vektory, v tomto případě vektory mezi promítnutými a změřenými:

$$\cos \theta = \frac{\vec{m} \cdot \vec{m}'}{|\vec{m}| \cdot |\vec{m}'|} = \frac{m_x \cdot m'_x + m_y \cdot m'_y}{\sqrt{m_x^2 \cdot m_y^2} \cdot \sqrt{m_x'^2 \cdot m_y'^2}} \implies \theta \quad (47)$$

Dosazením konkrétních hodnot do výpočtu lze definovat transformační matice pro kalibraci natočení kamery.

$$\mathbf{T}_{\mathbf{KM}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (48)$$

Z výsledku je patrné, že se jedná pouze o simulaci kalibrace a výsledná transformace je nulová.

## 5.2 Korekce při posunutí kamery

Korekce posunutí kamery je důležitá funkce systému, která umožňuje automatickou korekci orientace kamery. Tuto korekci lze provést jen při malém posunutí kamery. Při velkém posunutí je nutné kameru vyřadit ze systému a vytvořit její zaměření a kalibraci znovu. Při malém posunutí kamery lze zavést korekci pomocí nové souřadnice referenčního bodu v kamerovém snímači. Pokud se kamera pohne, změní se souřadnice referenčního bodu ve snímku. Při změně těchto souřadnic se pouze uloží nová záporná hodnota difference mezi původními a novými souřadnicemi a přepíše se konstanty.



## 6 Návrh algoritmu pro detekci polohy karoserie

### 6.1 Výpočet referenční karoserie

Prvním krokem samotného algoritmu je definování pozice referenční karoserie, která je využívána roboty jako karoserie s nulovými posunutími trajektorií. Proto je nutné synchronizovat tuto karoserii s roboty a uložit její polohu jako referenční.

#### 6.1.1 Výpočet přímek pro jednotlivé kamery

Z kapitoly 3.3.3 je patrné, že nejprve je nutné definovat přímky, na kterých leží jednotlivé díry karoserie. Výpočet konkrétní přímky vychází ze 2 bodů, kterými přímka prochází. Jeden bod je střed kamerového snímáče a druhý je promítnutý bod referenční díry karoserie na kalibrační desku. Promítnout tento bod lze pomocí snímku, kde známe souřadnice dané referenční díry. Přepočtení těchto souřadnic [px] na [mm] lze dosáhnout vynásobením změřených souřadnic vypočteným měřítkem z kapitoly 5.1.1. Nechť je příkladem bod M karoserie A, změřený kamerovým systémem:

$$M_{REFX} = M_{MX} \cdot M_{MER} \quad (49)$$

$$M_{REFY} = M_{MY} \cdot M_{MER} \quad (50)$$

Tento bod má souřadnice v rovině (X,Y). Pro možnou transformaci v 3D prostoru je nutné přidat souřadnici  $Z = 0$ .

$$M_{REF} = (M_{REFX}; M_{REFY}; 0) \quad (51)$$

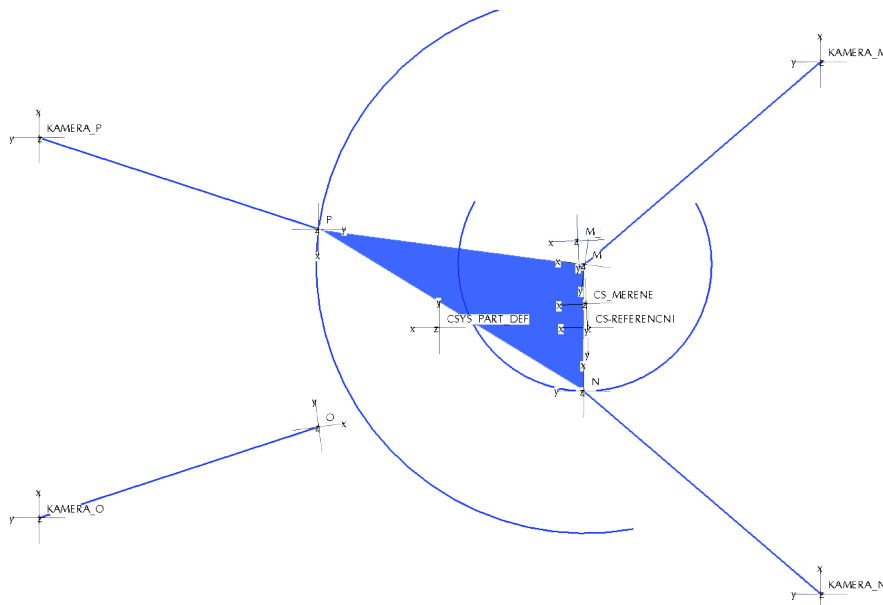
Další krok je zkorigování změřených souřadnic kalibrační maticí pro daný bod.

$$M'_{REF} = \mathbf{T}_{\mathbf{KM}} \times M_{REF} = \begin{vmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times (M_{REFX}; M_{REFY}; 0) \quad (52)$$

Poté stačí transformovat tyto souřadnice bodu z kamerového snímáče na kalibrační desku vynásobením bodu transponovanou transformační maticí mezi souřadným systémem kamerového senzoru a systémem CS0, tyto matice jsou vypočítány v kapitole 5.1.1.

$$M''_{REF} = \mathbf{T}^{\mathbf{T}}_{\mathbf{SM}} \times M'_{REF} = \begin{vmatrix} x\hat{SMX} & y\hat{SMX} & z\hat{SMX} \\ x\hat{SMY} & y\hat{SMY} & z\hat{SMY} \\ x\hat{SMZ} & y\hat{SMZ} & z\hat{SMZ} \end{vmatrix} \times (M'_{REFX}; M'_{REFY}; M'_{REFZ}) \quad (53)$$

Transformované souřadnice  $M''_{REF}$  jsou vztaženy k referenčnímu bodu M, pro výpočet souřadnic od počátku souřadného systému CS0, je zapotřebí připočíst souřadnice referenčního bodu M.



Obrázek 32: Koncepce výpočtu bodů

$$M_R = M''_{REF} + R_M = (M''_{REFX} + R_{MX}; M''_{REFY} + R_{MY}; M''_{REFZ} + R_{MZ}) \quad (54)$$

Přímku, na které leží bod karoserie M, lze zapsat parametricky pomocí následujících rovnic.

$$x_M = K_{MX} + t \cdot (M_{RX} - K_{MX}) \quad (55)$$

$$y_M = K_{MY} + t \cdot (M_{RY} - K_{MY}) \quad (56)$$

$$z_M = K_{MZ} + t \cdot (M_{RZ} - K_{MZ}) \quad (57)$$

Tento výpočet je nutné provést pro všechny kamery.

### 6.1.2 Výpočet polohy bodů karoserie

Pro přesný výpočet polohy karoserie je nutné znát přesné vzdálenosti mezi jednotlivými referenčními dírami karoserie a jejich popis v prostoru vůči souřadnému systému karoserie. Takto popsané body lze poté vložit na jednotlivé přímky a nalézt jednoznačné řešení polohy bodů vůči sobě a tím definovat polohu karoserie. Základem je tedy trojúhelník mezi 3 body karoserie (obrázek 32). Souřadné systémy jednotlivých referenčních děr jsou definovány podle obrázku. Takto popsaný trojúhelník v prostoru má potom jednoznačné řešení a lze definovat jeho polohu souřadným systémem karoserie.

Příklad výpočtu bodu M karoserie A.

Body daného trojúhelníku lze vypočítat jako průsečíky kulové plochy a přímky, kde poloměr kulové plochy je definován jako vzdálenost stěny trojúhelníku. Výpočet vychází



z jedné přímky, na které se definuje bod (M), z kterého jsou vytvořeny dvě kulové plochy o poloměru (MN a MP) a vypočteny dva průsečíky (N, P) s přímkami sousedícími. Porovnává se poté vzdálenost vzniklých průsečíků se vzdáleností 3. stěny trojúhelníku. Numerickými metodami lze nalézt jednoznačné řešení.

První bod (střed koule) zvolíme mimo toleranční pole ( $\pm 30mm$ ) od předpokládaného výskytu karoserie (tabulka 2 a 3). Nejednodušší volba bodu mimo povolený rozsah je posunutí předpokládané souřadnice díry v jedné rovině o 30mm a dopočítání zbylých souřadnic. Protože auto je symetrické okolo osy Y, volíme posunutí v rovině Y o hodnotu  $Y_{korekce}$ .

$$t = \frac{(Y_{M-A} + Y_{car-A} + Y_{korekce}) - K_{MX}}{M_{RX} - K_{MX}} \quad (58)$$

$$X_M = K_{MX} + t \cdot (M_{RX} - K_{MX}) \quad (59)$$

$$Z_M = K_{MZ} + t \cdot (M_{RZ} - K_{MZ}) \quad (60)$$

Obecná rovnice kulové plochy, kde za r je dosazen poloměr  $|MN|$  a  $|MP|$ .

$$(x - X_M)^2 + (y - Y_M)^2 + (z - Z_M)^2 = r^2 \quad (61)$$

$$|MN| = \sqrt{(N_{AX} - M_{AX})^2 + (N_{AY} - M_{AY})^2 + (N_{AZ} - M_{AZ})^2} \quad (62)$$

$$|MP| = \sqrt{(P_{AX} - M_{AX})^2 + (P_{AY} - M_{AY})^2 + (P_{AZ} - M_{AZ})^2} \quad (63)$$

Za hodnoty x, y a z jsou dosazeny parametrické rovnice přímka procházející bodem N a bodem P. -

$$\begin{aligned} & (K_{NX} + e \cdot (N_{RX} - K_{NX}) - X_M)^2 + (K_{NY} + e \cdot (N_{RY} - K_{NY}) - Y_M)^2 + \\ & + (K_{NZ} + e \cdot (N_{RZ} - K_{NZ}) - Z_M)^2 = |MN|^2 \end{aligned} \quad (64)$$

$$G_N = ((N_{RX} - K_{NX})^2 + (N_{RY} - K_{NY})^2 + (N_{RZ} - K_{NZ})^2) \quad (65)$$

$$\begin{aligned} H_N = & 2 \cdot (N_{RX} - K_{NX}) \cdot (K_{NX} - X_M) + 2 \cdot (N_{RY} - K_{NY}) \cdot (K_{NY} - Y_M) + \\ & + 2 \cdot (N_{RZ} - K_{NZ}) \cdot (K_{NZ} - Z_M) \end{aligned} \quad (66)$$

$$I_N = (K_{NX} - X_M)^2 + (K_{NY} - Y_M)^2 + (K_{NZ} - Z_M)^2 - |MN|^2 \quad (67)$$





$$e^2 \cdot G_N + e \cdot H_N + I_N = 0 \quad (68)$$

$$e_{1,2} = \frac{-H_N \pm \sqrt{H_N^2 - 4 \cdot G_N \cdot I_N}}{2 \cdot G_N} \quad (69)$$

$$(K_{PX} + f \cdot (P_{RX} - K_{PX}) - X_M)^2 + (K_{PY} + f \cdot (P_{RY} - K_{PY}) - Y_M)^2 + (K_{PZ} + f \cdot (P_{RZ} - K_{PZ}) - Z_M)^2 = |MP|^2 \quad (70)$$

$$G_P = ((P_{RX} - K_{PX})^2 + (P_{RY} - K_{PY})^2 + (P_{RZ} - K_{PZ})^2) \quad (71)$$

$$H_P = 2 \cdot (P_{RX} - K_{PX}) \cdot (K_{PX} - X_M) + 2 \cdot (P_{RY} - K_{PY}) \cdot (K_{PY} - Y_M) + 2 \cdot (P_{RZ} - K_{PZ}) \cdot (K_{PZ} - Z_M) \quad (72)$$

$$I_P = (K_{PX} - X_M)^2 + (K_{PY} - Y_M)^2 + (K_{PZ} - Z_M)^2 - |MP|^2 \quad (73)$$

$$f^2 \cdot G_P + f \cdot H_P + I_P = 0 \quad (74)$$

$$f_{1,2} = \frac{-H_P \pm \sqrt{H_P^2 - 4 \cdot G_P \cdot I_P}}{2 \cdot G_P}$$

Vyjádřením parametrů  $e$  a  $f$  z kvadratických rovnic dostaneme parametry průsečíky dané kružnice a přímky. Souřadnice průsečíků lze vypočítat dosazením parametrů  $e$  a  $f$  do parametrické rovnice přímky procházející bodem N a P.

$$N_{PRUS-1-X} = e_1 \cdot (N_{RX} - K_{NX}) + K_{NX} \quad (75)$$

$$N_{PRUS-1-Y} = e_1 \cdot (N_{RY} - K_{NY}) + K_{NY} \quad (76)$$

$$N_{PRUS-1-Z} = e_1 \cdot (N_{RZ} - K_{NZ}) + K_{NZ} \quad (77)$$

$$N_{PRUS-2-X} = e_2 \cdot (N_{RX} - K_{NX}) + K_{NX} \quad (78)$$

$$N_{PRUS-2-Y} = e_2 \cdot (N_{RY} - K_{NY}) + K_{NY} \quad (79)$$



$$N_{PRUS-2-Z} = e_2 \cdot (N_{RZ} - K_{NZ}) + K_{NZ} \quad (80)$$

$$P_{PRUS-1-X} = f_1 \cdot (P_{RX} - K_{PX}) + K_{PX} \quad (81)$$

$$P_{PRUS-1-Y} = f_1 \cdot (P_{RY} - K_{PY}) + K_{PY} \quad (82)$$

$$P_{PRUS-1-Z} = f_1 \cdot (P_{RZ} - K_{PZ}) + K_{PZ} \quad (83)$$

$$P_{PRUS-2-X} = f_2 \cdot (P_{RX} - K_{PX}) + K_{PX} \quad (84)$$

$$P_{PRUS-2-Y} = f_2 \cdot (P_{RY} - K_{PY}) + K_{PY} \quad (85)$$

$$P_{PRUS-2-Z} = f_2 \cdot (P_{RZ} - K_{PZ}) + K_{PZ} \quad (86)$$

Na každou přímkou vycházejí 2 průsečíky, kde hledaný průsečík z dvojice průsečíků je vždy ten, který má menší absolutní odchylku od konkrétního bodu předpokládané polohy karoserie.

$$|N_{PRUS-1} - (N_A + CS_{car-A})| > |N_{PRUS-2} - (N_A + CS_{car-A})| \Rightarrow N_{PRUS-2} \quad (87)$$

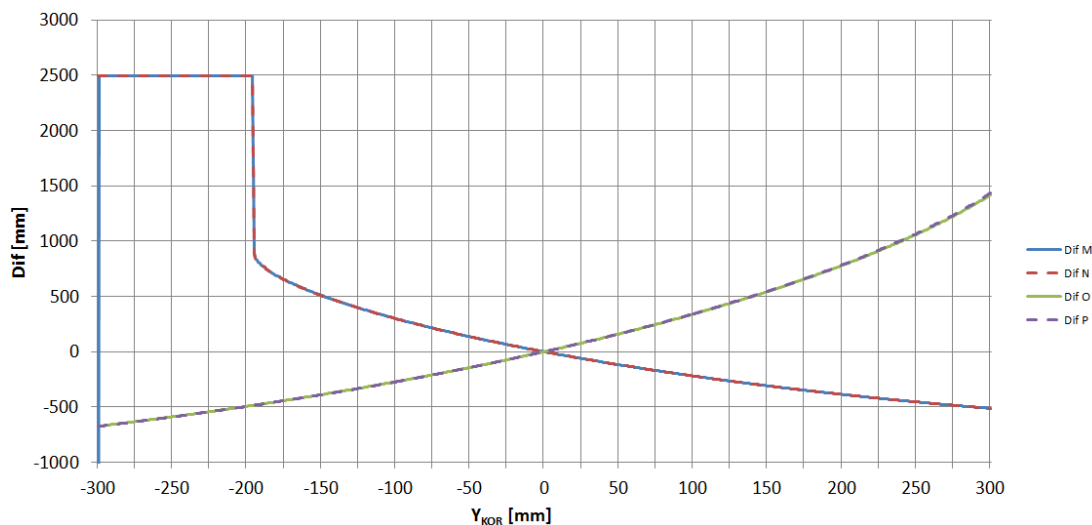
$$|N_{PRUS-1} - (N_A + CS_{car-A})| < |N_{PRUS-2} - (N_A + CS_{car-A})| \Rightarrow N_{PRUS-1} \quad (88)$$

$$|P_{PRUS-1} - (P_A + CS_{car-A})| > |P_{PRUS-2} - (P_A + CS_{car-A})| \Rightarrow P_{PRUS-2} \quad (89)$$

$$|P_{PRUS-1} - (P_A + CS_{car-A})| < |P_{PRUS-2} - (P_A + CS_{car-A})| \Rightarrow P_{PRUS-1} \quad (90)$$

Definujme, že správný průsečík je např.  $N_{PRUS-2}$  a  $P_{PRUS-2}$ . Potom hledaná vzdálenost mezi těmito body je

$$|NP'| = \sqrt{(P_{PRUS-2} - N_{PRUS-2})^2 + (P_{PRUS-2} - N_{PRUS-2})^2 + (P_{PRUS-2} - N_{PRUS-2})^2} \quad (91)$$


 Obrázek 33: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  v závislosti na hodnotě  $Y_{KOR}$ 

Porovnáním s reálnou vzdáleností mezi referenčními body N a P, která vychází z tabulek 2 a 3 lze definovat odchylku. Průběh této odchylky je potom znázorněn v obrázku 33. Vstupními hodnotami do tohoto výpočtu jsou optimální pozice kamer a od tohoto se odvíjející hodnoty.

$$|NP| = \sqrt{(P_{AX} - N_{AX})^2 + (P_{AY} - N_{AY})^2 + (P_{AZ} - N_{AZ})^2} \quad (92)$$

$$Dif_M = |NP'| - |NP| \quad (93)$$

Výsledkem jsou tedy souřadnice bodu  $M_{1\Delta}$ , u kterého je  $Dif_M = 0$ . Body  $N_{1\Delta}$  a  $P_{1\Delta}$  slouží pouze pro definování orientace bodu  $M_{1\Delta}$ , která poté definuje polohu souřadného systému karoserie. Orientace souřadného systému je definována osou X směřující vždy k předchozímu bodu, v tomto případě  $P_{1\Delta}$  a osa Y je doplněna do roviny trojúhelníku směřující k následujícímu bodu, v tomto případě  $N_{1\Delta}$ . Takto popsany trojúhelník v prostoru má potom jednoznačné řešení a lze definovat jeho polohu.

$$\vec{m_{X\Delta}} = (P_{1\Delta} - M_{1\Delta}) = (P_{1\Delta X} - M_{1\Delta X}; P_{1\Delta Y} - M_{1\Delta Y}; P_{1\Delta Z} - M_{1\Delta Z}) \quad (94)$$

$$m_{\hat{X}\Delta} = \frac{\vec{m_{X\Delta}}}{|\vec{m_{X\Delta}}|} = \frac{(m_{X\Delta X}; m_{X\Delta Y}; m_{X\Delta Z})}{\sqrt{m_{X\Delta X}^2 + m_{X\Delta Y}^2 + m_{X\Delta Z}^2}} =$$

$$= \left( \frac{m_{X\Delta X}}{\sqrt{m_{X\Delta X}^2 + m_{X\Delta Y}^2 + m_{X\Delta Z}^2}}; \frac{m_{X\Delta Y}}{\sqrt{m_{X\Delta X}^2 + m_{X\Delta Y}^2 + m_{X\Delta Z}^2}}; \frac{m_{X\Delta Z}}{\sqrt{m_{X\Delta X}^2 + m_{X\Delta Y}^2 + m_{X\Delta Z}^2}} \right) \quad (95)$$

$$\vec{m_{N\Delta}} = (N_{1\Delta} - M_{1\Delta}) = (N_{1\Delta X} - M_{1\Delta X}; N_{1\Delta Y} - M_{1\Delta Y}; N_{1\Delta Z} - M_{1\Delta Z}) \quad (96)$$



$$\vec{m}_{Z\Delta} = m_{\hat{X}\Delta} \times \vec{mn}_{\Delta} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ m_{\hat{X}\Delta X} & m_{\hat{X}\Delta Y} & m_{\hat{X}\Delta Z} \\ mn_{\Delta X} & mn_{\Delta Y} & mn_{\Delta Z} \end{vmatrix} \quad (97)$$

$$m_{\hat{Z}\Delta} = \frac{\vec{m}_{Z\Delta}}{|\vec{m}_{Z\Delta}|} = \frac{(m_{Z\Delta X}; m_{Z\Delta Y}; m_{Z\Delta Z})}{\sqrt{m_{Z\Delta X}^2 + m_{Z\Delta Y}^2 + m_{Z\Delta Z}^2}} =$$

$$= \left( \frac{m_{Z\Delta X}}{\sqrt{m_{Z\Delta X}^2 + m_{Z\Delta Y}^2 + m_{Z\Delta Z}^2}}; \frac{m_{Z\Delta Y}}{\sqrt{m_{Z\Delta X}^2 + m_{Z\Delta Y}^2 + m_{Z\Delta Z}^2}}; \frac{m_{Z\Delta Z}}{\sqrt{m_{Z\Delta X}^2 + m_{Z\Delta Y}^2 + m_{Z\Delta Z}^2}} \right) \quad (98)$$

$$\vec{m}_{Y\Delta} = m_{\hat{Z}\Delta} \times m_{\hat{X}\Delta} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ m_{\hat{Z}\Delta X} & m_{\hat{Z}\Delta Y} & m_{\hat{Z}\Delta Z} \\ m_{\hat{X}\Delta X} & m_{\hat{X}\Delta Y} & m_{\hat{X}\Delta Z} \end{vmatrix} \quad (99)$$

$$\mathbf{T}_{M\Delta}^T = \begin{vmatrix} x_{S\hat{M}X} & y_{S\hat{M}X} & z_{S\hat{M}X} & M_{1\Delta X} \\ x_{S\hat{M}Y} & y_{S\hat{M}Y} & z_{S\hat{M}Y} & M_{1\Delta Y} \\ x_{S\hat{M}Z} & y_{S\hat{M}Z} & z_{S\hat{M}Z} & M_{1\Delta Z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (100)$$

### 6.1.3 Nalezení správného řešení pomocí metody sečen

Pro výpočet skutečné polohy bodů  $M_{1\Delta}$ ,  $N_{1\Delta}$  a  $P_{1\Delta}$  je zapotřebí nalézt trojúhelník kde hodnota  $Dif_M = 0$ , toho lze dosáhnout posunutím souřadnice  $Y_{KOR}$  a výpočet opakovat. Z grafu 1 lze vyčíst, že posunutím hodnot  $Y_{KOR}$ , lze nalézt jednoznačné řešení, kde hodnota  $Dif_M = 0$ . V grafu jsou uvedeny hodnoty pro  $Y_{KOR} = \langle -300mm; 300mm \rangle$ . Pro numerické řešení tohoto problému, lze aplikovat metodu půlení intervalů nebo metodu sečen, která urychlí výpočet oproti metodě iterační. Protože známe přibližné chování funkce  $Dif$ , vycházející z grafu 1. Nejeftektivnější výpočetní metoda pro funkci  $Dif(Y_{Kor})$  je metoda sečen, kde hledanou hodnotou je  $Dif(Y_{Kor}) = 0$ . [18]

Na začátku je zapotřebí určit dvě počáteční hodnoty  $Y_{KOR1}$  a  $Y_{KOR2}$ , které by měli být co nejbližší řešení rovnice  $Dif_M(Y_{Kor}) = 0$ . V našem případě bude  $Y_{KOR1}$  rovno limitní hodnotě posunutí karoserie tj. 30mm a  $Y_{KOR2}$  rovno nulové poloze karoserie tj.  $Y_{M-A} + Y_{car-A}$ . Body  $Q_1$  a  $Q_2$  je dána rovnice sečny

$$Q_1 = (Y_{M-A} + Y_{car-A} + 30; Dif_M(Y_{M-A} + Y_{car-A} + 30)) \quad (101)$$

$$Q_2 = (Y_{M-A} + Y_{car-A}; Dif_M(Y_{M-A} + Y_{car-A})) \quad (102)$$

$$y = Q_{2Y} + \frac{Q_{2Y} - Q_{1Y}}{Q_{2X} - Q_{1X}} \cdot (x - Q_{2X}) \quad (103)$$

Průsečík osy X a dané sečny, vznikne dosazením  $y = 0$ .



$$x = Q_{2X} - \frac{Q_{2Y} \cdot (Q_{2X} - Q_{1X})}{Q_{2Y} - Q_{1Y}} \quad (104)$$

Další bod sečny  $Q_3$  je potom

$$Q_3 = (x; Dif_M(x)) \quad (105)$$

Kde každé další  $x$  lze vypočítat.

$$x_{n+1} = Q_{2X_n} - \frac{Q_{2Y_n} \cdot (Q_{2X_n} - Q_{1X_{n-1}})}{Q_{2Y_n} - Q_{1Y_{n-1}}} \quad (106)$$

Tento cyklus se opakuje, dokud není splněna omezující podmínka. V tomto případě je podmínka definující přesnost hodnoty  $Dif_M(x) \leq 0,01mm$ .

Celý předchozí výpočet se musí opakovat pro všechny body karoserie.

#### 6.1.4 Výpočet souřadného systému karoserie

Vynásobením matice  $T_{M\Delta}^T$  a transformační maticí mezi bodem M a souřadným systémem  $CS_{CAR-A}$ , které vychází z 3D modelu, dostaneme reálnou polohu a natočení souřadného systému karoserie vypočítaného z bodu M v souřadném systému CS0. V tomto případě se jedná o matice rotace a translace.

$$\begin{aligned} T_{VYSL-M} &= T_{M\Delta}^T \times T_{CAR-A-M} = \\ &= \begin{vmatrix} x_{\hat{S}MX} & y_{\hat{S}MX} & z_{\hat{S}MX} & M_{1\Delta X} \\ x_{\hat{S}MY} & y_{\hat{S}MY} & z_{\hat{S}MY} & M_{1\Delta Y} \\ x_{\hat{S}MZ} & y_{\hat{S}MZ} & z_{\hat{S}MZ} & M_{1\Delta Z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} r_{XX-A-M} & r_{XY-A-M} & r_{XZ-A-M} & t_{X-A-M} \\ r_{YX-A-M} & r_{YY-A-M} & r_{YZ-A-M} & t_{Y-A-M} \\ r_{ZX-A-M} & r_{ZY-A-M} & r_{ZZ-A-M} & t_{Z-A-M} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (107)$$

Tuto matici je nutné vypočítat pro všechny vypočtené body karoserie. Výsledkem jsou tedy 4 matice, z kterých se vypočítá aritmetický průměr pro každou hodnotu matice.

$$\begin{aligned} T_{VYSL-REF} &= \frac{T_{VYSL-M} + T_{VYSL-N} + T_{VYSL-O} + T_{VYSL-P}}{4} = \\ &= \begin{vmatrix} r_{VYSL-XX} & r_{VYSL-XY} & r_{VYSL-XZ} & t_{VYSL-X} \\ r_{VYSL-YX} & r_{VYSL-YY} & r_{VYSL-YZ} & t_{VYSL-Y} \\ r_{VYSL-ZX} & r_{VYSL-ZY} & r_{VYSL-ZZ} & t_{VYSL-Z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (108)$$

Tato matice slouží jako matice referenční pro nulové posunutí trajektorií robotů, kde poloha souřadného systému je  $(t_{VYSL-REF-X}; t_{VYSL-REF-Y}; t_{VYSL-REF-Z})$  a natočení

souřadného systému je  $\begin{vmatrix} r_{VYSL-REF-XX} & r_{VYSL-REF-XY} & r_{VYSL-REF-XZ} \\ r_{VYSL-REF-YX} & r_{VYSL-REF-YY} & r_{VYSL-REF-YZ} \\ r_{VYSL-REF-ZX} & r_{VYSL-REF-ZY} & r_{VYSL-REF-ZZ} \end{vmatrix}$ . Výsledné hodnoty jsou v vztaženy k počátku souřadného systému CS0.



## 6.2 Výpočet polohy měřené karoserie

Výpočet polohy měřené karoserie vychází ze stejného výpočtu jako je výpočet referenční karoserie (kapitola 6.1). Výstupem tohoto výpočtu je transformace mezi souřadným systémem referenční karoserie a souřadným systémem měřené karoserie. Z tohoto vyplývá, že je nutné provést celý výpočet jako u karoserie referenční a porovnat výsledné matice. Transformační matici mezi těmito systémy lze vypočítat vynásobením matice rotace  $\mathbf{T}_{VYSL-REF}$  a  $\mathbf{T}_{VYSL-MER}$

$$\mathbf{T}_{VYSL} = \mathbf{T}_{VYSL-REF} \times \mathbf{T}_{VYSL-MER} =$$

$$\begin{vmatrix} r_{VYSL-REF-XX} & r_{VYSL-REF-XY} & r_{VYSL-REF-XZ} \\ r_{VYSL-REF-YX} & r_{VYSL-REF-YY} & r_{VYSL-REF-YZ} \\ r_{VYSL-REF-ZX} & r_{VYSL-REF-ZY} & r_{VYSL-REF-ZZ} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} r_{VYSL-MER-XX} & r_{VYSL-MER-XY} & r_{VYSL-MER-XZ} \\ r_{VYSL-MER-YX} & r_{VYSL-MER-YY} & r_{VYSL-MER-YZ} \\ r_{VYSL-MER-ZX} & r_{VYSL-MER-ZY} & r_{VYSL-MER-ZZ} \end{vmatrix} \quad (109)$$

Rozdíl polohy mezi těmito souřadnými systémy lze vypočítat odečtením vzájemné polohy v souřadném systému CS0.

$$t_{VYSL} = t_{VYSL-MER} - t_{VYSL-MER}$$

$$(t_{VYSL-REF-X} - t_{VYSL-MER-X}; t_{VYSL-REF-Y} - t_{VYSL-MER-Y}; t_{VYSL-REF-Z} - t_{VYSL-MER-Z}) \quad (110)$$

Požadavkem zákazníka byl výstup transformace mezi souřadným systémem měřené a referenční karoserie v kvaternionech. Převod transformační matice rotace na kvaterniony je následující. [19]

$$q_1 = \frac{\sqrt{r_{VYSL-XX} + r_{VYSL-YY} + r_{VYSL-ZZ} + 1}}{2} \quad (111)$$

$$q_2 = z_{nam_1} \cdot \frac{\sqrt{r_{VYSL-XX} - r_{VYSL-YY} - r_{VYSL-ZZ} + 1}}{2} \quad (112)$$

$$q_3 = z_{nam_2} \cdot \frac{\sqrt{r_{VYSL-YY} - r_{VYSL-XX} - r_{VYSL-ZZ} + 1}}{2} \quad (113)$$

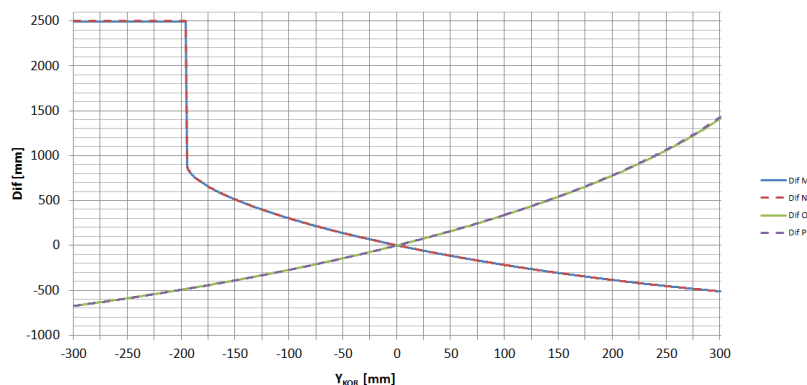
$$q_4 = z_{nam_3} \cdot \frac{\sqrt{r_{VYSL-ZZ} - r_{VYSL-XX} - r_{VYSL-YY} + 1}}{2} \quad (114)$$

Kde  $z_{nam_1}$ ,  $z_{nam_2}$  a  $z_{nam_3}$  je znaménko kvaternionu, záležící na následujících rovnicích.

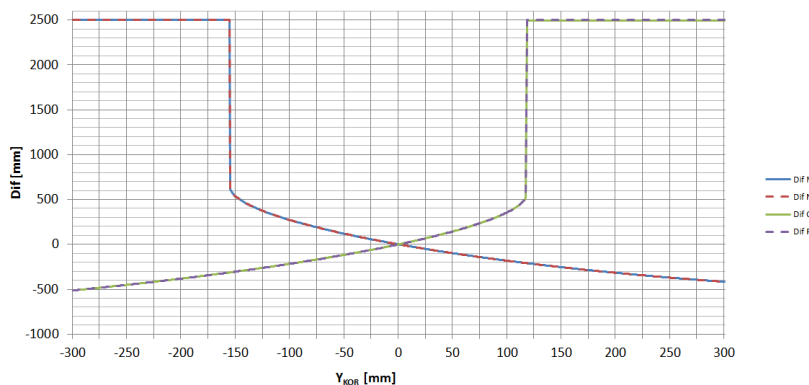
$$z_{nam_1} = -1 \Leftrightarrow (r_{VYSL-ZY} - r_{VYSL-YZ}) < 0 \quad (115)$$

$$z_{nam_2} = -1 \Leftrightarrow (r_{VYSL-XZ} - r_{VYSL-ZX}) < 0 \quad (116)$$

$$z_{nam_3} = -1 \Leftrightarrow (r_{VYSL-YX} - r_{VYSL-XY}) < 0 \quad (117)$$



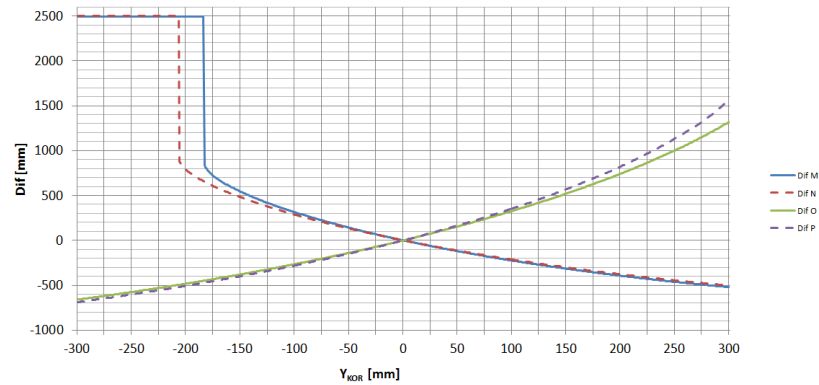
Obrázek 34: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(0, 0, 0)$  - optimální umístění kamer



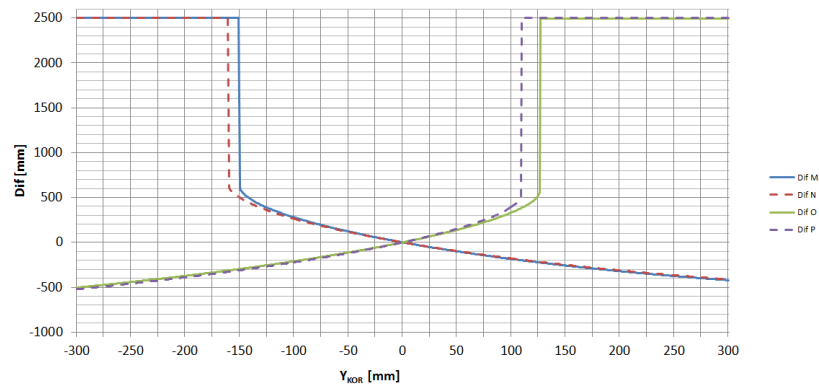
Obrázek 35: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(0, 0, 0)$  - reálné umístění kamer

## 7 Chování algoritmu

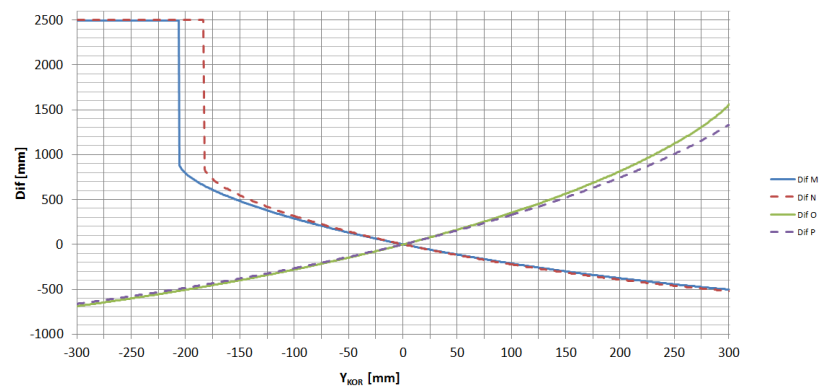
Testováním tohoto algoritmu v simulačním 3D modelu, lze definovat tento systém jako stabilní na základě výsledného chování algoritmu. Simulace probíhala při optimálním umístění kamer (kapitola 3.3.3) a při reálném umístění, které vychází z tabulky 5. Maximální posunutí karoserie je definováno jako  $\pm 30mm$ , avšak pro jistotu funkčnosti algoritmu v tomto rozsahu, jsou pro testování systému zvoleny hodnoty vyšší a to v rozsahu  $\pm 50mm$ . Testovány byly pouze pozice nulové a limitní, tj. v každé ose posunutí o  $\pm 50mm$ . Tato simulace zaručuje, že mezi limitními hodnotami má algoritmus řešení, na základě znalosti průběhů hodnot  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$ . Výsledkem je tedy 7 grafů průběhu hodnot  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro optimální umístění kamer a 7 grafů pro reálné umístění kamer.



Obrázek 36: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(-50, 0, 0)$  - optimální umístění kamer

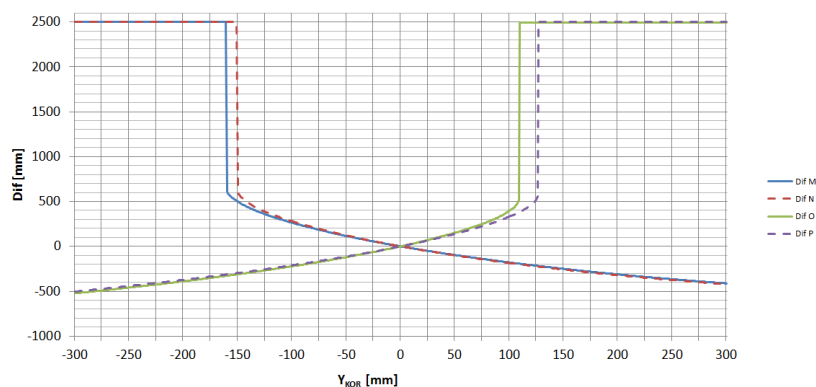


Obrázek 37: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(-50, 0, 0)$  - reálné umístění kamer

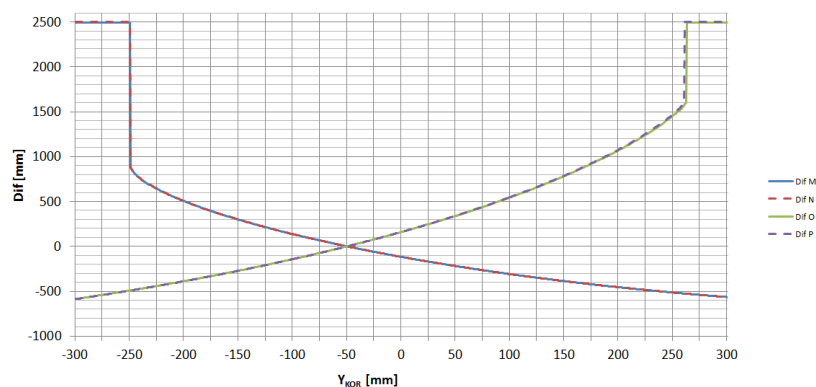


Obrázek 38: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(50, 0, 0)$  - optimální umístění kamer

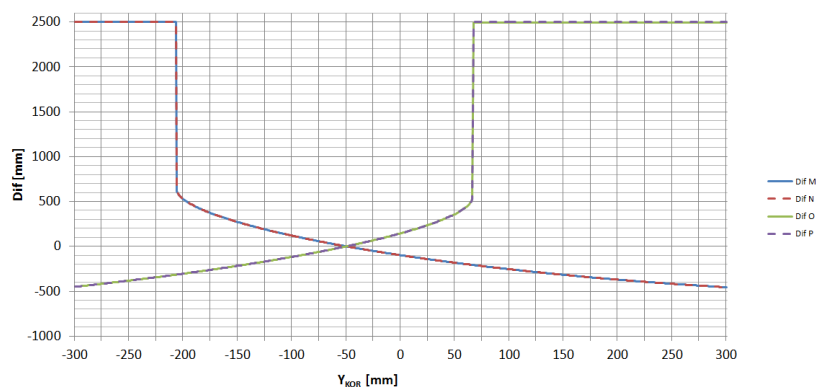




Obrázek 39: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(50, 0, 0)$  - reálné umístění kamer



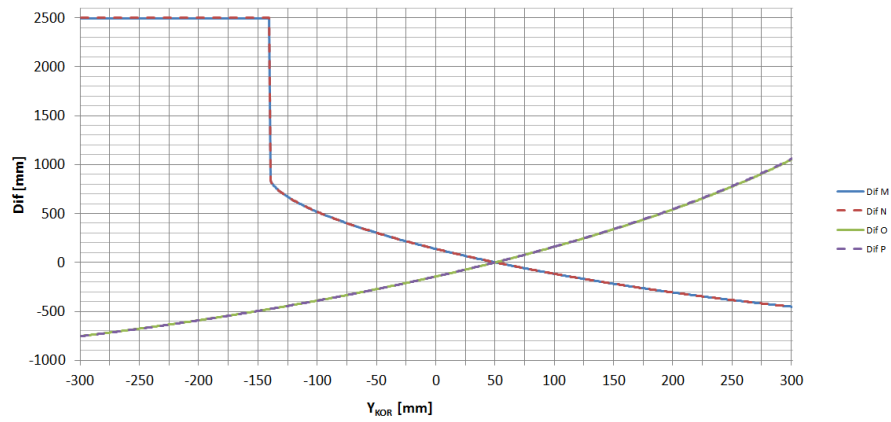
Obrázek 40: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(0, -50, 0)$  - optimální umístění kamer



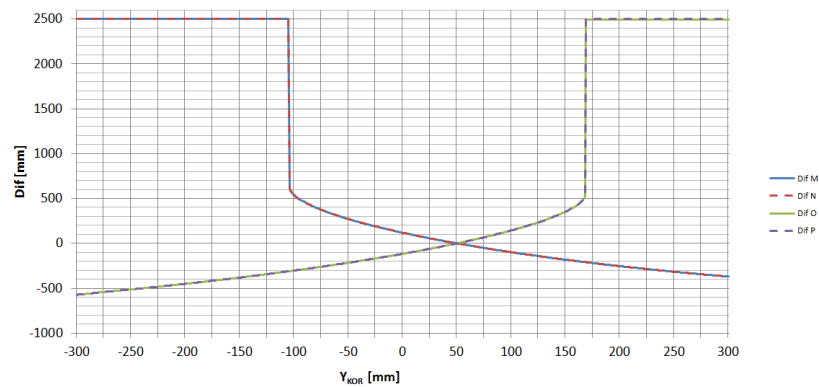
Obrázek 41: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(0, -50, 0)$  - reálné umístění kamer



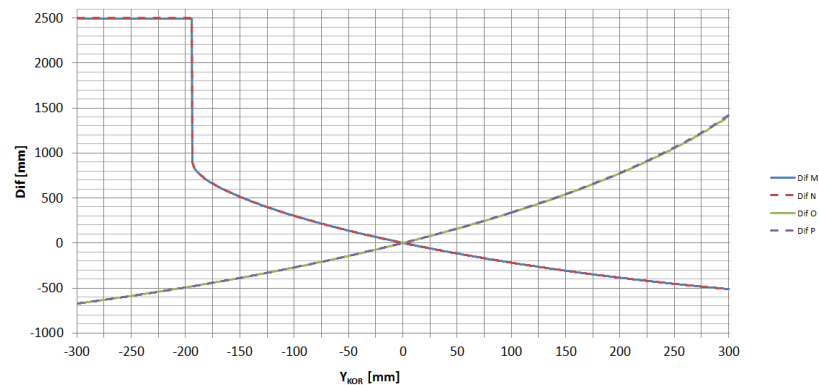
DIPLOMOVÁ PRÁCE



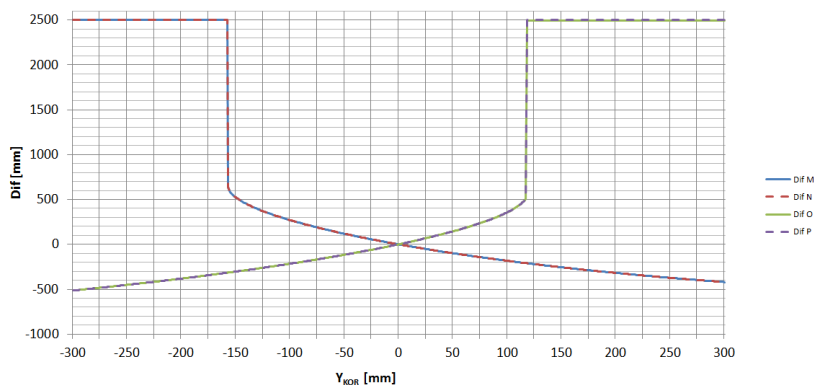
Obrázek 42: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(0, 50, 0)$  - optimální umístění kamer



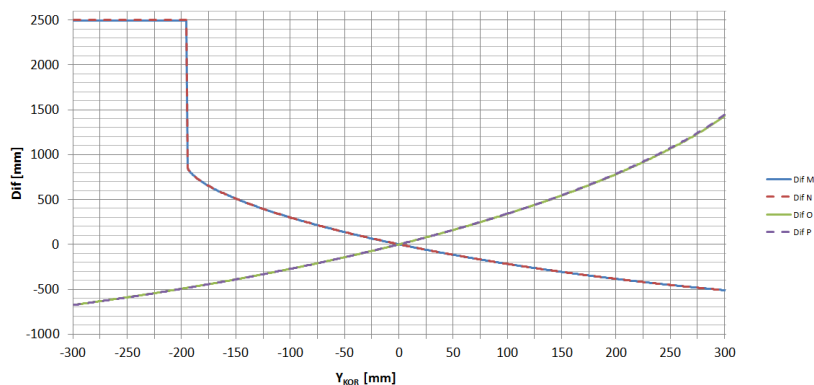
Obrázek 43: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(0, 50, 0)$  - reálné umístění kamer



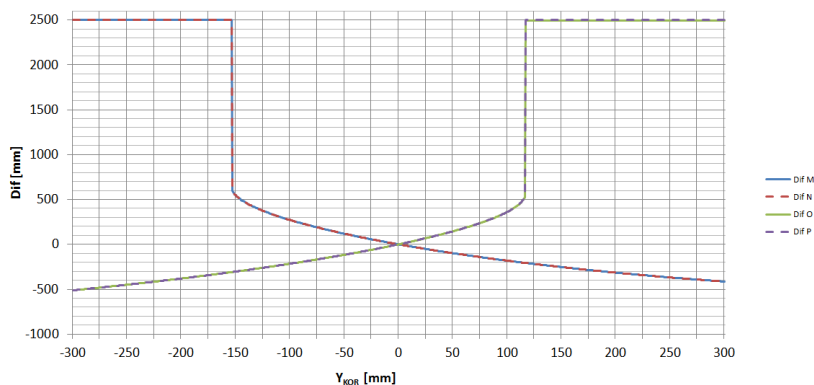
Obrázek 44: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(0, 0, -50)$  - optimální umístění kamer



Obrázek 45: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(0, 0, -50)$  - reálné umístění kamer



Obrázek 46: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(0, 0, 50)$  - optimální umístění kamer



Obrázek 47: Hodnoty  $Dif_M$ ,  $Dif_N$ ,  $Dif_O$  a  $Dif_P$  pro posunutí  $(0, 0, 50)$  - reálné umístění kamer



## 8 Závěr

Předložená práce prezentuje kamerový systém pro výpočet polohy karoserie v prostoru a jeho kalibraci. Tato práce je v souladu se všemi cíly zadání:

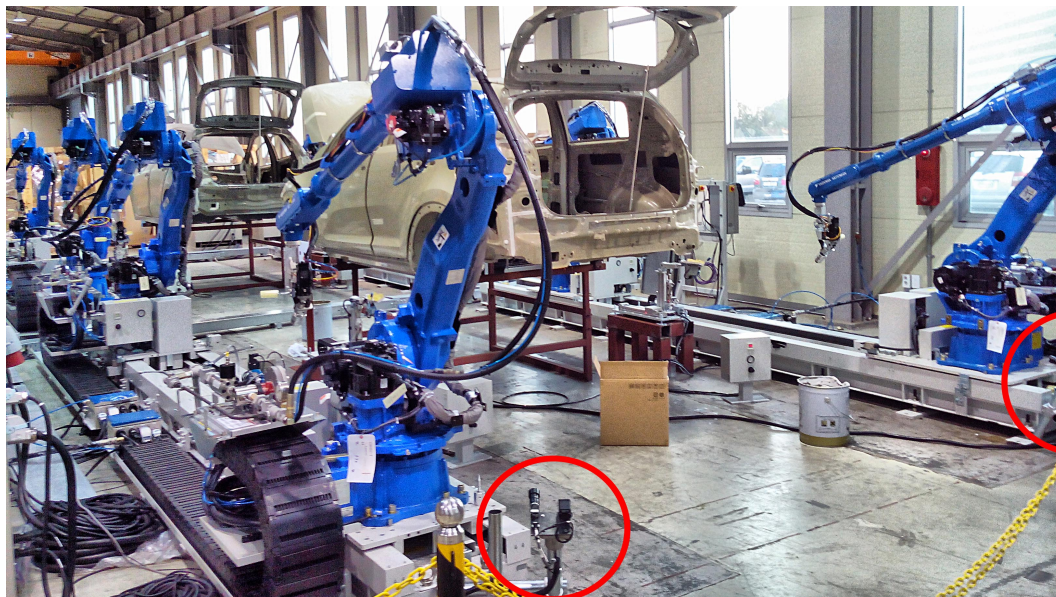
- V kapitole 2 jsou popsány vlastnosti kamerových systémů vhodných pro danou problematiku
- Kapitola 3 popisuje koncepci vhodného výpočtu polohy a kalibraci systému
- Návrh algoritmu kalibrace je popsán v kapitole 5
- V kapitole 6 je popsán vhodný algoritmus pro výpočet polohy karoserie v prostoru

K dosažení práce bylo nutné realizovat následující kroky:

- Vytvoření konceptu kamerového systému z pohledu hardwaru a softwaru
- Výběr vhodného softwaru a hardwaru pro kamerový systém
- Vytvoření simulačního modelu ve 3D pro odzkoušení algoritmu
- Koncepce algoritmu pro kalibraci systému
- Koncepce algoritmu pro samotný výpočet polohy karoserie v prostoru

Z předložené práce vyplývá:

- Výpočtový algoritmus pro kalibraci natočení kamer a pro kalibraci malého posunutí kamer.
- Výpočtový algoritmus pro výpočet polohy referenční karoserie v prostoru.
- Výpočtový algoritmus pro výpočet polohy měřené karoserie v prostoru vůči referenční.
- Z uvedených grafů (kapitola 7) lze vyčíst, že umístění kamer má velký vliv na robustnost výpočtu. Porovnáním mezi grafy reálného a optimálního umístění kamer, lze zjistit chování systému. Při optimálním umístění se rozsah intervalu, kde má algoritmus řešení, zvětšuje, oproti umístění ve skutečných systémech. Vliv mají i rozměry karoserie, konkrétně vzdálenosti měřených děr. Proto je nutné stanovit limitující umístění kamer a co největší vzdálenosti mezi referenčními dírami pro každý systém. Minimální interval kde má algoritmus řešení je potom definován jako maximální možné posunutí karoserie v prostoru, tj. v tomto případě  $\pm 30mm$ .
  - Nechť jsou příkladem obrázky 34 a 35, z nich lze vidět interval kde má výpočet řešení. Pro optimální umístění kamer je interval pro kameru M a N  $\langle -195; 300 \rangle$ , pro kameru O a P není interval omezen v rozsahu  $\langle -300; 300 \rangle$ . Při reálném umístění se interval zmenšuje na hodnoty  $\langle -155; 300 \rangle$  u kamer M a N a  $\langle -300; 117 \rangle$  u kamer O a P.



Obrázek 48: Testovací linka pro kamerový systém

- Z předchozího bodu lze vyčíst, že u kamer O a P, dochází k velkému omezení intervalu. Toto omezení je z důvodu velkého úhlu mezi optimálním a reálným umístění kamer.
- Z obrázku 34 lze vyčíst vliv vzdálenosti referenčních děr na karoserii na algoritmus. U kamer O a P není žádné omezení stability v intervalu  $\langle -300; 300 \rangle$ , na rozdíl od kamer M a N, kde je interval omezen na rozsah  $\langle -195; 300 \rangle$ , kde je vzdálenost mezi referenčními dírami menší.

Na obrázku 48 je zobrazena testovací linka, kde byl kamerový systém odzkoušen na reálném systému. Po různých testech byla přesnost systému určena jako dostačující a systém byl aplikován na 4 linkách v Jižní Korei a na Slovensku.



## Reference

- [1] PRUSI, Timo. TTE-5216 Machine Vision and Optical Measurements: Cameras. 2012.
- [2] Embedded Vision System - National Instruments. [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/207111>
- [3] OMRON, FH / FZ5 Series. [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.ia.omron.com/products/family/3210/specification.html>
- [4] Charge-coupled device. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/CCD>
- [5] Digitál pod lupou: Snímací čip. AZ FOTO. [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: [http://www.azfoto.cz/informace/digital\\_pod\\_lupou/snimaci\\_cip](http://www.azfoto.cz/informace/digital_pod_lupou/snimaci_cip)
- [6] Camera and Lens Compatibility. ATTIVA. [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.attivavision.com/files/lentes-pdf/e4f0c29bea588051a7910e4bf59c0b57.pdf>
- [7] Camera Interface Guide. MSATROX VISION. [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: [http://www.matrox.com/imaging/media/pdf/products/camera\\_guide.pdf](http://www.matrox.com/imaging/media/pdf/products/camera_guide.pdf)
- [8] PRUSI, Timo. TTE-5216 Machine Vision and Optical Measurements: Optics and imaging geometry. 2012.
- [9] Ohnisková vzdálenost. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Ohniskov%C3%A1\\_vzd%C3%A1lenostt](http://cs.wikipedia.org/wiki/Ohniskov%C3%A1_vzd%C3%A1lenostt)
- [10] photo.net [online]. [cit. 20.5.2014]. Dostupný z: [www: http://photo.net/learn/optics/mtf/blur2.gif](http://photo.net/learn/optics/mtf/blur2.gif)
- [11] NATIONAL INSTRUMENTS. Bandwidth, Sample Rate, and Nyquist Theorem [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/2709/en/>
- [12] Distortion\_(optics). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Distortion\\_\(optics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_(optics))
- [13] Micro 4/3rds Photography: Chromatic Aberration and lens correction. In: [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://m43photo.blogspot.cz/2011/02/chromatic-aberration-and-lens.html>
- [14] ZEISS: lens\_cut\_large. In: [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: [http://lenses.zeiss.com/content/dam/Photography/new/images/industrial%20applications/f-mount%20lenses/lens\\_cut\\_large.jpg](http://lenses.zeiss.com/content/dam/Photography/new/images/industrial%20applications/f-mount%20lenses/lens_cut_large.jpg)
- [15] Machine Vision Lighting | H.H. Barnum. In: [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.hhbarnum.com/product/machine-vision-lighting>



- [16] DARYL, Martin. A Practical Guide to Machine Vision Lighting. A Practical Guide to Machine Vision Lighting. 2007, October, s. 18.  
Dostupné z: <http://www.graftek.com/pdf/Marketing/MachineVisionLighting.pdf>
- [17] VOLPI USA: Illumination Techniques. In: [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: [http://www.volpiusa.com/htm/955/en\\_US/Illumination-Techniques.htm](http://www.volpiusa.com/htm/955/en_US/Illumination-Techniques.htm)
- [18] G. Hammerlin, K. H. Hoffmann: Numerical Mathematics, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- [19] ABB: RAPID Instructions, Functions and Data types: 3HAC16581-1, 2009
- [20] Szeliski, R. Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, 2011. 812 s. ISBN 978-1-84882-934-3



## Použité jednotky a veličiny

- $CS_0$ ...nulový souřadný systém
- $CS_{car-A}$ ... souřadný systém karoserie A
- $CS_{car-B}$ ... souřadný systém karoserie B
- $CS_{car-C}$ ... souřadný systém karoserie C
- $CS_M$  ... souřadný systém bodu M
- $\bar{X}_M/\bar{Y}_M/\bar{Z}_M$ ...souřadnice X/Y/Z středu zorného pole kamery M v  $CS_0$  [mm]
- $X_{M-A}/Y_{M-A}/Z_{M-A}$ ...souřadnice X/Y/Z bodu M na karoserii A v  $CS_{car-A}$  [mm]
- $X_{car-A}/Y_{car-A}/Z_{car-A}$ ...souřadnice X/Y/Z systému  $CS_{car-A}$  v  $CS_0$  [mm]
- $X_{car-C}/Y_{car-C}/Z_{car-C}$ ...souřadnice X/Y/Z systému  $CS_{car-C}$  v  $CS_0$  [mm]
- $\vec{x}_M/\vec{y}_M/\vec{z}_M$ ... vektor osy X/Y/Z souřadného systému  $CS_M$  [mm]
- $\hat{x}_M/\hat{y}_M/\hat{z}_M$ ... jednotkový vektor osy X/Y/Z souřadného systému  $CS_M$  [mm]
- $S_{ZP-M}$ ...střed zorného pole bodu M v  $CS_0$  [mm]
- $K_M$ ...souřadnice kamery M v  $CS_0$  [mm]
- $\vec{CS_0}_z$ ...vektor osy Z souřadného systému  $CS_0$  [mm] [mm]
- $T_M$ ...transformační matice pro bod M
- $\vec{v}_{M-A}/\vec{v}_{M-B}/\vec{v}_{M-C}$ ...vektor mezi  $S_{ZP-M}$  a souřadnicemi bodu M karoserie A/B/C v  $CS_0$  [mm]
- $\vec{v}_{M-A}/\vec{v}_{M-B}/\vec{v}_{M-C}$ ...přenesený vektor mezi  $S_{ZP-M}$  a souřadnicemi bodu M karoserie A/B/C v  $CS_0$  [mm]
- $ZP_{MX}/ZP_{MY}$ ...rozměry zorného pole kamery M [mm]
- $\vec{x}_O/\vec{y}_O/\vec{z}_O$ ... vektor osy X/Y/Z souřadného systému  $CS_O$  [mm]
- $\hat{x}_O/\hat{y}_O/\hat{z}_O$ ... jednotkový vektor osy X/Y/Z souřadného systému  $CS_O$  [mm]
- $S_{ZP-O}$ ...střed zorného pole bodu O [mm]
- $K_O$ ...souřadnice kamery O v  $CS_0$  [mm]
- $T_O$ ...transformační matice pro bod O
- $\vec{v}_{O-A}/\vec{v}_{O-B}/\vec{v}_{O-C}$ ...vektor mezi  $S_{ZP-O}$  a souřadnicemi bodu O karoserie A/B/C v  $CS_0$  [mm]





- $\overrightarrow{v'_{O-A}}/\overrightarrow{v'_{O-B}}/\overrightarrow{v'_{O-C}}$ ...přenesený vektor mezi  $S_{ZP-O}$  a souřadnicemi bodu O karoserie A/B/C v  $CS_0$  [mm]
- $ZP_{OX}/ZP_{OY}$ ...rozměry zorného pole kamery O [mm]
- $f_{M1}/f_{M2}$ ...ohnisko pro horizontální/vertikální zorné pole kamery M [mm]
- $f_{O1}/f_{O2}$ ...ohnisko pro horizontální/vertikální zorné pole kamery O [mm]
- $\overrightarrow{x_{SM}}/\overrightarrow{y_{SM}}/\overrightarrow{z_{SM}}$ ... vektor osy X/Y/Z souřadného systému  $CS_{SM}$  [mm]
- $x_{\hat{SM}}/y_{\hat{SM}}/z_{\hat{SM}}$ ... jednotkový vektor osy X/Y/Z souřadného systému  $CS_{SM}$  [mm]
- $R_M$ ...souřadnice referenčního bodu na zdi kamery M v  $CS_0$  [mm]
- $\overrightarrow{CS_0z}$ ...záporný vektor osy Z souřadného systému  $CS_0$  [mm] [mm]
- $T_{SM}$ ...transformační matice pro bod M
- $KM_1/KM_2$ ...kalibrační body M na zdi v  $CS_0$ [mm]
- $KM'_1/KM'_2$ ...kalibrační body promítnuté do kamery M [mm]
- $\overrightarrow{m}/\overrightarrow{m}$ ... vektor mezi bodem  $KM_1$  a  $KM_2/KM'_1$  a  $KM'_2$  [mm]
- $M_{MER}$ ...měřítko kamery M [1]
- $T_{KM}$ ...matice kalibrace
- $\theta$ ...úhel mezi vektorem  $\overrightarrow{m}$  a  $\overrightarrow{m}$  [deg]
- $M_{REFX}/M_{REFY}$ ...souřadnice díry v kameře M přepočítány měřítkem [mm]
- $M_{MX}/M_{MY}$ ...souřadnice díry změřené kamerou [mm]
- $M_{REF}/M'_{REF}/M''_{REF}$ ...reálný/zkalibrovaný/promítnutý vektor díry od středu snímáče kamery M [mm]
- $M_R$ ...vypočtené souřadnice referenčního bod pro kameru M v  $CS_0$  [mm]
- $x_M/y_M/z_M$ ...souřadnice teoretického bodu v parametrickém vyjádření přímky pro bod M [mm]
- $K_{MX}/K_{MY}/K_{MZ}$ ...souřadnice středu snímáče kamery M [mm]
- $t_M/t_N/t_P$ ...parametry přímek M/N/P [1]
- $M_{RX}/M_{RY}/M_{RZ}$ ...souřadnice referenčního bodu pro kameru M v  $CS_0$  [mm]
- $\overrightarrow{MN}/\overrightarrow{MP}/\overrightarrow{NP}$ ...vektory mezi body M a N/M a P/N a P [mm]
- $G_N/G_P$ ...konstanta kvadratické rovnice N/P [mm]
- $H_N/H_P$ ...konstanta kvadratické rovnice N/P [mm]



- $I_N/I_P$ ...konstanta kvadratické rovnice N/P [mm]
- $N_{PRUS-1-X}/N_{PRUS-1-Y}/N_{PRUS-1-Z}$ ...souřadnice X/Y/Z průsečíku 1 na přímce N v  $CS_0$  [mm]
- $N_{PRUS-2-X}/N_{PRUS-2-Y}/N_{PRUS-2-Z}$ ...souřadnice X/Y/Z průsečíku 2 na přímce N v  $CS_0$  [mm]
- $P_{PRUS-1-X}/P_{PRUS-1-Y}/P_{PRUS-1-Z}$ ...souřadnice X/Y/Z průsečíku 1 na přímce P v  $CS_0$  [mm]
- $P_{PRUS-2-X}/P_{PRUS-2-Y}/P_{PRUS-2-Z}$ ...souřadnice X/Y/Z průsečíku 2 na přímce P v  $CS_0$  [mm]
- $Dif_M/Dif_N/Dif_O/Dif_P$ ...rozdíl mezi vypočtenou a reálnou vzdáleností mezi body [mm]
- $\vec{m_{X\Delta}}/\vec{m_{Y\Delta}}/\vec{m_{Z\Delta}}$ ...vektory jednotlivých os X/Y/Z souřadného systému  $CS_M$  [mm]
- $\hat{m_{X\Delta}}/\hat{m_{Y\Delta}}/\hat{m_{Z\Delta}}$ ...jednotkové vektory jednotlivých os X/Y/Z souřadného systému  $CS_M$  [mm]
- $\vec{mn}$ ...vektor mezi body M a N [mm]
- $M_{1\Delta X}/M_{1\Delta Y}/M_{1\Delta Z}$ ...souřadnice X/Y/Z vypočteného bodu M v  $CS_0$  [mm]
- $N_{1\Delta X}/N_{1\Delta Y}/N_{1\Delta Z}$ ...souřadnice X/Y/Z vypočteného bodu N v  $CS_0$  [mm]
- $P_{1\Delta X}/P_{1\Delta Y}/P_{1\Delta Z}$ ...souřadnice X/Y/Z vypočteného bodu P v  $CS_0$  [mm]
- $T_{M\Delta}$ ...matice transformace  $CS_M$  do  $CS_0$
- $Y_{KOR1}/Y_{KOR2}$ ...posunutí souřadnice Y [mm]
- $Q_1/Q_2/Q_3$ ...body sečny [mm]
- $T_{VYSL-M}$ ... výsledná matice transformace referenční karoserie bodu M
- $T_{CAR-A-M}$ ...matice transformace mezi  $CS_{car-A}$  a  $CS_0$
- $T_{VYSL-REF}$ ...výsledná průměrná matice transformace referenční karoserie
- $T_{VYSL-MER}$ ...výsledná průměrná matice transformace měřené karoserie
- $q_1/q_2/q_3/q_4$ ...kvaterniony [1]
- $znam_1/znam_2/znam_3$ ... znaménko kvaternionu [1]



## Seznam obrázků

1	Zobrazení celého systému . . . . .	7
2	CCD-princip vázání nábojů [4] . . . . .	11
3	Typy barevných čipů . . . . .	12
4	RGB barevná paleta . . . . .	13
5	Analogový datový tok [7] . . . . .	14
6	Zorné pole . . . . .	15
7	Dírková komora [8] . . . . .	16
8	Rozlišení objektivu [10] . . . . .	17
9	Skutečné rozlišení . . . . .	17
10	Porovnání skutečného rozlišení [8] . . . . .	18
11	Radiální zkreslení a) poduškovité, b) soudkovité [12] . . . . .	18
12	Geometrická kalibrace obrazu [8] . . . . .	19
13	Chromatická aberace [10] . . . . .	19
14	Řez objektivem [14] . . . . .	20
15	příklady osvětlení [15] . . . . .	21
16	Citlivost čipu na rozdílné světelné vlnové délky [13] . . . . .	21
17	Použití barevných filtrů: a) barevný-CCD čip, b) bílé světlo, c) červené světlo, d) červené + zelené světlo, e) zelené světlo, f) modré světlo (obrázky b-e mají B&W čip) [13] . . . . .	22
18	Porovnání světelných zdrojů [16] . . . . .	22
19	Typy osvětlení: a) koaxiální osvětlení, b) zadní osvětlení, c) kruhové osvětlení, d) Osvětlení s temným zorným polem, e) směrové osvětlení, f) difuzní osvětlení [17] . . . . .	24
20	Koncepce systému . . . . .	26
21	Kamery určené pro systém FZ5 [3] . . . . .	28
22	Púdorys a bokorys tmelící linky pro umístění kamer . . . . .	28
23	Jednotlivé díry na všech karoseriích . . . . .	29
24	Souřadný systém kamery . . . . .	31
25	Dostupné objektivy pro kameru FZ-S2M [3] . . . . .	36
26	Měření bodů v kamerovém kontroléru . . . . .	37
27	Kalibrace v kamerovém kontroléru . . . . .	38
28	Koncepce výpočtu . . . . .	39
29	Optimální poloha kamer . . . . .	40
30	Simulační 3D model . . . . .	43
31	Souřadný systém kamerového senzoru . . . . .	44
32	Koncepce výpočtu bodů . . . . .	48
33	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ v závislosti na hodnotě $Y_{KOR}$ . . . . .	52
34	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (0,0,0) - optimální umístění kamer . . . . .	56
35	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (0,0,0) - reálné umístění kamer . . . . .	56
36	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (-50,0,0) - optimální umístění kamer . . . . .	57
37	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (-50,0,0) - reálné umístění kamer . . . . .	57



38	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (50, 0, 0) - optimální umístění kamer . . . . .	57
39	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (50, 0, 0) - reálné umístění kamer . . . . .	58
40	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (0, -50, 0) - optimální umístění kamer . . . . .	58
41	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (0, -50, 0) - reálné umístění kamer . . . . .	58
42	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (0, 50, 0) - optimální umístění kamer . . . . .	59
43	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (0, 50, 0) - reálné umístění kamer . . . . .	59
44	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (0, 0, -50) - optimální umístění kamer . . . . .	59
45	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (0, 0, -50) - reálné umístění kamer . . . . .	60
46	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (0, 0, 50) - optimální umístění kamer . . . . .	60
47	Hodnoty $Dif_M$ , $Dif_N$ , $Dif_O$ a $Dif_P$ pro posunutí (0, 0, 50) - reálné umístění kamer . . . . .	60
48	Testovací linka pro kamerový systém . . . . .	62



## Seznam tabulek

1	Kamerové rozhraní (délky kabelů se dají rozšířit externím zařízením) . . .	14
2	Souřadnice jednotlivých děr v souřadném systému CS-car karoserie A, B, C [mm] . . . . .	30
3	Souřadné systémy jednotlivých karoserií v souřadném systému CS0 [mm]	30
4	Souřadnice středů zorných polí v souřadném systému CS0 [mm] . . . . .	31
5	Souřadnice kamer v souřadném systému CS0 [mm] . . . . .	31
6	Rozlišení kamer . . . . .	34
7	Souřadnice kamer v souřadném systému CS0 [mm] . . . . .	43
8	Souřadnice referenčních bodů v souřadném systému CS0 [mm] . . . . .	43
9	Souřadnice kamer v souřadném systému CS0 [mm] . . . . .	43