

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE (CMM) S OPTICKÝM SNÍMACÍM SYSTÉMEM A OPTICKÉ CMM

**COORDINATE MEASURING MACHINES WITH OPTICAL READER SYSTÉM AND OPTICAL
CMM**

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VÍTĚZSLAV PALÁSEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ PERNIKÁŘ, CSc.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá souřadnicovými měřícími stoji (CMM) s optickým snímacím systémem a optickými CMM. V souladu se zadáním na základě přehledu známých bezkontaktních systémů, je cílem této práce vytvořit metodiku objektivního hodnocení hlavních charakteristik s poskytnutím uceleného přehled těchto systémů. V první části je uveden přehled optických principů pro optické snímače na CMM a optické CMM. Je zde popsán princip bezkontaktního získání prostorové digitální podoby měřeného objektu pomocí laserového a optického zařízení. Ve druhé části je uveden stručný přehled výrobců těchto bezkontaktních systémů a jejich komponent, které slouží nejen pro souřadnicové měření. Tento přehled je rozdělen na optické snímače, které se nasadí na rameno CMM nebo na mobilní měřící rameno a na optické CMM, které lokalizují polohu měřící/skenovací sondy v prostoru opticky anebo snímají měřený objekt z určité vzdálenosti – fotogrammetricky. U každého výrobce je uvedena stručná charakteristika nabízených systémů a tabulka s technickými parametry. Třetí a čtvrtá část pojednává o návrhu metodiky pro objektivní výběr vhodného typu snímače, případně optického CMM z hlediska charakteristiky jakosti snímacího systému ve vazbě na úlohu měření. A na základě této metodiky je uveden výběr vhodného představitele stacionárního měřícího stroje s kontaktním a bezkontaktním způsobem snímání a jejich srovnání.

Klíčová slova

Souřadnicový měřící stroj, skenování, snímací systémy, mobilní měřící systémy, přesnost měření, nejistota měření.

ABSTRACT

This graduation work is about co-ordinal measuring machines (CMM) with optical reader system and optical CMM. In accordance with submission and in terms of survival well known contactless systems the direction is to make methodology objective classification of rating with granting summary of these systems. The first part contains optical principles for visual scanner in CMM and optical CMM. Ist is described there principle of contactless obtaining steric digital version of measured object with using laser and optical facilities. The second part contains brief makes survey of these contactless systems and their component which are used for co-ordinal measuring. The survey is devided into optical readers, which are put on CMM brake or on mobile measuring brake and on optical CMM, which localize position measuring/sensing head in the space or they read measured object from specific distance – fotogrammetric. Characteristic of offered systems and chart with technical data are mentioned with each maker. The third and fourth part is about submission methodology for objective choice suitable sort of reader, optical CMM in target of characteristic reader system quality. And from this methodology is given the choice of suitable exponent stationary measuring machine with contact and contactless way of reading and their comparison.

Key words

Co-ordinal measuring machine, scanning, fading systems, mobile measuring systems, accuracy of measuring, incertitude of measuring.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PALÁSEK, V. *Souřadnicové měřicí stroje (CMM) s optickým snímacím systémem a optické CMM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 59 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Souřadnicové měřicí stroje (CMM) s optickým snímacím systémem a optické CMM** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 29. 5. 2009

.....
Vítězslav Palásek

Poděkování

Děkuji tímto **doc. Ing. Jiřímu Pernikáři** za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat **Ing. Luboši Zachovalovi** za odborné vedení a poskytnutí cenných informací.

OBSAH

Abstrakt.....	2
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod.....	7
1 Přehled optických principů pro optické snímače CMM a optické CMM.....	11
1.1 Laserové 3D skenery.....	11
1.1.1 Laserové hlavy.....	11
1.1.2 Laser tracker.....	12
1.1.3 Ruční laserový skener.....	13
1.2 Optické 3D skenery.....	13
1.2.1 Pruhová projekce.....	13
1.2.2 Fotogrammetrie.....	14
1.3 Zpracování výsledků měření.....	15
2 Inventarizace současné nabídky optických snímačů a optických CMM.....	17
2.1 Optické snímače pro CMM (rozdělení podle výrobců).....	17
2.1.1 Faro.....	17
2.1.2 Metris.....	18
2.1.4 Kreon.....	21
2.1.5 Datapixel.....	23
2.1.6 Perceptron.....	24
2.1.7 Romer.....	25
2.1.8 Carl Zeiss.....	26
2.2 Optické CMM.....	28
2.2.1 Mobilní měřicí systémy, které lokalizují polohu měřicí nebo skenovací sondy v prostoru pomocí laserové technologie.....	28
2.2.2 Mobilní měřicí systémy, které snímají měřený objekt s využitím sledovacího zařízení nebo fotogrammetricky.....	37
3 Výběr optimálních představitelů mechanických a optických snímačů a jejich srovnání.....	48
4 návrh metodiky pro objektivní výběr vhodného typu snímače, případně optického CMM.....	51
Závěr.....	55
Seznam použitých zdrojů.....	56
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	60

ÚVOD

Zajištění kvality průmyslové produkce je prvořadé pro dosažení její konkurence - schopnosti. V některých strojírenských oborech, jako jsou výroba automobilů, výroba letadel, výroba strojů a jejich součástí a podobně, je přesnost výroby rozhodujícím faktorem pro dosažení její kvality. Nedílnou součástí systémů zajišťování kvality průmyslové produkce je v uvedených oborech (a nejen v nich) využití souřadnicové měřicí techniky - souřadnicových měřicích strojů (dále jen "CMM" - coordinate measuring machine).

Rozvoj tohoto oboru přináší stále nové poznatky a na jejich základě stále nové prvky, které se v praxi uplatňují. S vývojem optiky se na CMM stále více nasazují optické snímací systémy, případně se vyvíjejí specifická zařízení, která pracují na principu optické lokalizace snímací sondy v prostoru. Na světě existuje asi desítky výrobců těchto systémů a jejich komponent, které slouží pro souřadnicové měření. Nasazení optiky v oblasti CMM tam, kde je to vhodné, přináší mj. výrazné zvýšení produktivity práce CMM. Protože se jedná o zařízení s poměrně vysokou pořizovací cenou, je jejich produktivita práce jedním z klíčových faktorů pro jejich rentabilitu.

V souladu se zadáním se tato práce pokouší podat přehled systémů, které se na současném trhu nabízejí. Jsou v ní obsaženy všechny systémy, známé autorovi v době zpracování diplomové práce.

Pro vymezení pojmů uvedených v této práci je potřebné uvést několik definic:

Souřadnicový měřicí stroj je měřicí systém pro pohyb snímacího systému a schopností určovat prostorové souřadnice na povrchu měřené součásti³.

Snímací systém je systém, sestávající ze snímací hlavy, a jsou-li použity, z prodloužení snímací hlavy, systému výměny snímací hlavy, snímacího doteku, systému výměny snímacího doteku a prodloužení snímacího doteku³.

Dotykový snímací systém je snímací systém vyžadující ke své funkci hmotný dotyk s měřeným povrchem³.

Bezdotykový snímací systém je snímací systém nevyžadující ke své funkci hmotný dotyk s měřeným povrchem³.

Optický snímací systém je bezdotykový systém vytvářející korigovaný bod měření snímáním pomocí optického snímacího systému³.

Skenování je zvláštní způsob snímání k získávání postupně bodů měření pro charakterizování čar na kontrolovaném povrchu³.

CMM lze rozdělit z hlediska způsobu jejich konstrukce, na pevně umístěné na jednom místě použití (výložníkové CMM s pevným stolem (a), CMM s pohyblivým portálem a mostové CMM (b), CMM s portálem ve tvaru L (c), CMM s pevným portálem (d), výložníkové CMM s pohyblivým stolem (e), stojanové CMM (f) a CMM s pohyblivým sloupem a pohyblivým vodorovným ramenem (g)). Pro potřeby této práce je budeme nazývat stacionární, a na CMM mobilní (šestiosé nebo sedmiosé měřicí rameno (j), laser tracker (k) a další, například roboty (l))^{3,4}.

Vedle konstrukčního hlediska, jak je uvedeno výše, se CMM dají rozdělit podle způsobu určení souřadnic. CMM výše uvedené (a) až (j) používají lineární (inkrementální) způsob měření délky, nebo rotační snímače polohy. CMM (k) až (l) využívají k určení souřadnic optický princip a proto pro potřeby této práce je budeme nazývat *optické CMM*^{3,4}.

Stacionární CMM



Obr. 1 CMM s pohyblivým portálem⁸



Obr. 2 CMM s pohyblivým sloupem⁸



Obr. 3 CMM mostové⁸

Snímací systém



Obr. 4 Dotykový snímací systém⁸



Mobilní CMMObr. 5 Měřicí ramena⁸**Optické CMM**Obr. 6 Laser tracker⁸Obr. 7 Bezdotykový snímací systém⁷

Všechny měřicí systémy, ať dotykové či bezdotykové, vyžadují software. Na jeho úrovni, nebo jinak řečeno schopnostech, jsou závislé možnosti zpracování naměřených dat, a především dat naměřených optickými systémy. Složitost algoritmů, které ze sejmutých bodů (nebo mraků bodů) vytvářejí plochy a geometrické elementy, a ty pak srovnávají s výkresovými daty, je nebývalá. Je zcela poplatná jak matematickému aparátu, využitelnému v praktickém měření v reálném čase, tak výkonnosti počítačů, které výpočty provádí. Právě rychlý rozvoj výpočetní techniky, včetně její miniaturizace, umožňuje masové nasazení těchto výkonných systémů v praxi.

Mimo předmět této práce se ponechává také oblast reverse engineeringu,

byť většina dále uvedených zařízení se vedle oblasti měření využívá hojně i pro tuto oblast. Reverse engineering - znamená konstrukci daného objektu z nasnímaných dat. Elektronický výkres objektu tedy vzniká podle fyzicky existujícího modelu. Typický příklad uplatnění je oblast designu automobilů. Pomíjí se rovněž měření dvojrozměrné, a pomíjí se také počítačová tomografie, která se rovněž v oblasti měření začíná uplatňovat.

1 PŘEHLED OPTICKÝCH PRINCIPŮ PRO OPTICKÉ SNÍMAČE CMM A OPTICKÉ CMM

Optické snímače pro souřadnicové měřicí stroje (CMM) a optické CMM jsou zařízení, založená na bezkontaktním způsobu snímání, „3D digitalizaci“. Tyto bezkontaktní systémy měření se nazývají skenery či digitizéry. Pomocí optiky a snímače s vázanými náboji CCD (Charge-Coupled Device) se provede 2D měření rozměrů objektu. Pro měření třetí souřadnice a získání tak digitální 3D podoby reálného objektu se využívá metody triangulace a interference světla. Tyto metody využívají kombinace několika CCD kamer, laserového zařízení a dalších pomocných zařízení, která lze rozdělit do dvou skupin^{5,9,10}:

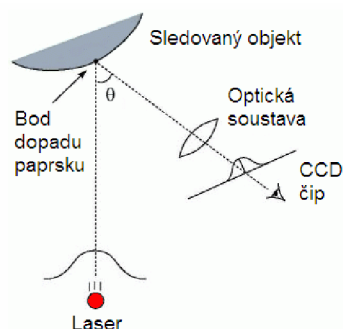
- pro získání 3D tvaru se otáčí skenovaným předmětem a ten je nasvícen laserovým světlem a snímán CCD kamerou³,
- předmětem se nehýbe a otáčí se zařízení, popřípadě se přemísťuje na další stanovisko⁵.

1.1 Laserové 3D skenery

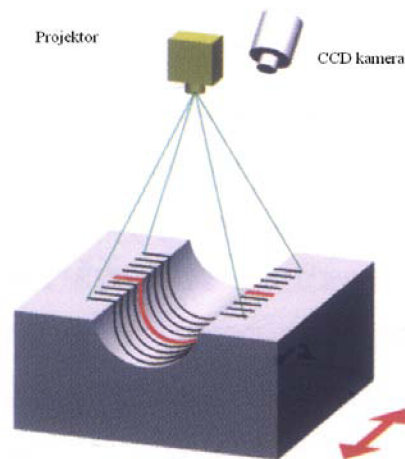
Toto zařízení se rozděluje na laserové skenovací hlavy a stroje sloupového typu (laser tracker). Laserové hlavy se mechanicky upínají na mobilní měřicí rameno nebo na pinolu souřadnicového měřicího stroje. Laserový tracker spojuje mobilní výhody s velkým rozsahem měření, kde měřicí/skenovací hlavice není spojena s konstrukcí stroje¹⁵.

1.1.1 Laserové hlavy

Tyto skenery pracují na triangulačním principu. Na jedné straně základny je umístěno laserové zařízení, které pomocí pohyblivého zrcátka (např. rotujícího polygonového zrcátka), vytváří na snímaném objektu světelný bod, pruh nebo strukturovaný světelný svazek zachytí celý objekt. Prostřednictvím CCD kamery na druhé straně základny se světelný vzor zaznamenává a vytváří se pravidelná síť rastrových bodů. CCD kamera spolu s laserovým zařízením a světelným vzorem na snímaném objektu vytváří tzv. triangulační trojúhelník. Vzdálenost mezi CCD kamerou a světelným vzorem na objektu se nazývá triangulační báze. Pomocí úhlu svíraného mezi triangulační bází a dopadajícím laserovým paprskem, se dopočítá třetí potřebná souřadnice měřeného objektu^{5,9,10}.

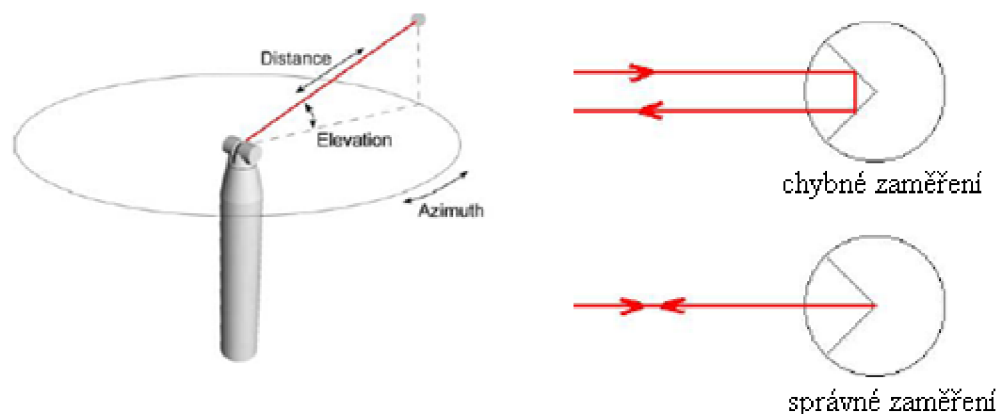


Obr. 1.1 Triangulační princip¹⁰

Obr. 1.2 Linie laserového paprsku⁶

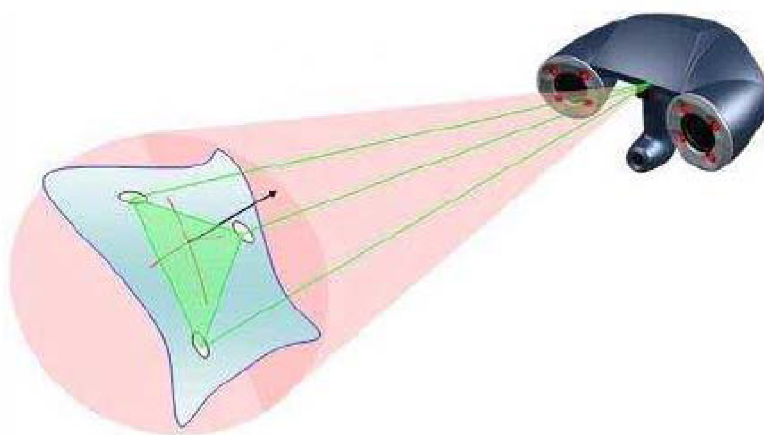
1.1.2 Laser tracker

Laser tracker patří k mobilním měřicím systémům, které sledují polohu odrazového systému z určité vzdálenosti. K měření snímaného objektu využívá laserového měřiče vzdálenosti TOF (Time of Flight), dvou přesných úhlových senzorů polohy (enkodéry) a softwaru pro výpočet, ukládání a zobrazení polohy odrazového systému (reflektoru). Laserový paprsek vycházející z vysílače ovládá podle pohybu reflektoru dva servomotory, které natáčí laserovou hlavu. Sledovaný odraz laserových pulzů na reflektoru je aktualizován 1000 krát za sekundu, což zajišťuje přesnost a opakovatelnost. Reflektor je veden ručně nebo strojně na objekty připravené k měření. Z počátku se změří body na povrchu, přímky, oblouky, kružnice pro funkci zavedení souřadného systému. Úhlové senzory zaznamenají azimut a výškový úhel reflektoru. To je dostačující pro přesné nalezení středu reflektoru. Narazí-li paprsek mimo střed reflektoru, dopadne taky mimo střed senzoru citlivosti PSD (Position Sensing Detector) a systém zahlásí chybu signálu. Při měření vzdálenosti laserovým interferometrem se rozdělí paprsek do dvou svazků. Jeden svazek se vrací zpět do interferometru a druhý dopadá na elektrický obvod, kde se počítá vzdálenost reflektoru od trackeru na základě cyklické změny vlnové délky^{11,12}.

Obr. 1.3 Schéma určení pozice reflektoru laser trackerem¹¹

1.1.3 Ruční laserový skener

Ruční laserový skener (HandyScan 3D) je založen na principu triangulace. Pro zjištění pozice ručního skeneru vzhledem ke snímanému předmětu se používají náhodně rozmístěné reflexní značky, které mohou být umístěny na podložce, nebo přímo na snímaném tělese. Pokud obě kamery současně vidí minimálně 3 reflexní značky, je systém schopen automaticky určit polohu snímaného tělesa. Pro vzájemný pohyb tělesa i skeneru je nutné vidět 4 reflexní značky. Pomocí automatického polohování, může skener snímat vnější i vnitřní části. Skener snímá z povrchu tělesa nepravidelnou síť, vytvořenou z referenčních značek a laserový kříž pro získání informace o ploše. Z nasnímaných dat se vytváří polygonová síť, která je dána třemi vrcholy trojúhelníka a směrem normály¹³.



Obr. 1.4 Automatické polohování¹⁴

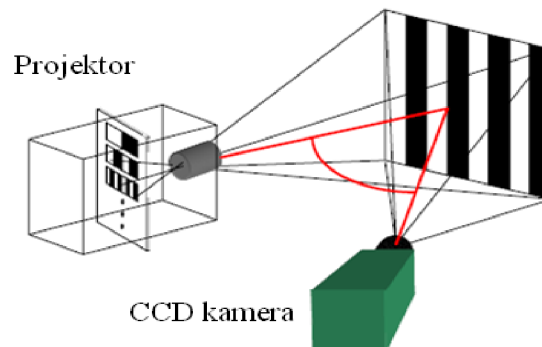
1.2 Optické 3D skenery

Tyto systémy snímají skenovaný předmět z několika úhlů pomocí optického zařízení. Tímto zařízením může být pruhový projektor nebo digitální fotoaparát. Pruhový projektor na snímaný objekt promítá proužky světla a pomocí digitálních kamer je zaznamenává. Digitálním fotoaparátem je snímaný předmět snímán z určité vzdálenosti a pomocí metody triangulace je dvourozměrný obraz převeden do prostorové podoby⁹.

1.2.1 Pruhová projekce

Optické 3D skenery snímají skenovaný objekt z několika úhlů pomocí optického zařízení. Pro snadnější vytváření modelu se na snímaný objekt umísťují pomocné značky, pomocí kterých systém vypočte pozici měřících kamer a přesněji sestaví 3D model. Je také vhodné vytvořit co nejvíce kontrastní pozadí se snímaným objektem, aby nenastal problém s odlišením objektu od prostředí. Je-li povrch příliš lesklý nebo tmavý je nutné ho vhodně nasvítit. U průhledných objektů se využívá křídových sprejů. Na povrch objektu jsou pruhovým projektorem promítány proužky světla, tzv. metoda Fringe light projection. Prostřednictvím jedné nebo dvou vzájemně posunutých digitálních kamer se objekt snímá. Získají se tak obrazy z různých úhlů a dalším digitálním zpracováním se s danou přesností vypočte poloha každého obrazového bodu. Pomocí úhlu, který svírají sdružené paprsky (tzv. úhlová paralaxa) se vypočítá

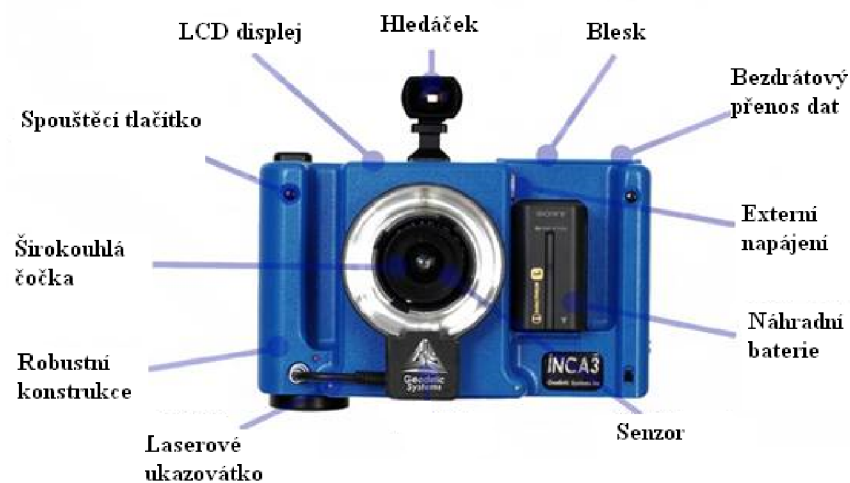
třetí souřadnice bodu. Aby bylo dosaženo většího rozlišení s jednoznačným přiřazením bodů k jejich prostorovým souřadnicím, promítají se na povrch postupně různé vzory^{9,16,10,7}.



Obr. 1.5 Princip promítání pruhů¹⁷

1.2.2 Fotogrammetrie

Základem fotogrammetrie je zachycení povrchu objektu z různých směrů vždy jedním obrazovým senzorem. Tímto senzorem je ve většině případů myšlen speciální digitální fotoaparát, který je nezbytný pro uskutečnění fotogrammetrického měření. Výhodou je snímání zahřátých či ochlazených předmětů v teplotním rozsahu -40 až $+180^{\circ}\text{C}$, aniž by došlo ke zkreslení měřených rozměrů. Před začátkem snímání se na měřený objekt umístí libovolný počet pomocných značek. Jejich počet je závislý na tvarové složitosti snímaného objektu. Vedle snímaného objektu se umísťuje kalibrační tyč, tak aby byla zachycena společně se snímaným objektem. Počet snímků je libovolný, ale nejméně však takový, aby každá pomocná značka byla zachycena minimálně na třech snímcích z různých úhlů pohledu. Podle triangulačního principu a vztahů mezi úhly se vypočítají prostorové souřadnice zjištěného geometrického prvku. Nasnímaná data se ukládají do paměťové karty nebo se přenáší pomocí bezdrátového spojení přímo do počítače. Pomocí speciálního programu se vyhodnocují prostorové souřadnice bodů a prostřednictvím kalibrační tyče se jim přiřazují odpovídající rozměrové hodnoty^{9,16,7}.



Obr. 1.6 Fotogrammetrický fotoaparát¹⁸

1.3 Zpracování výsledků měření

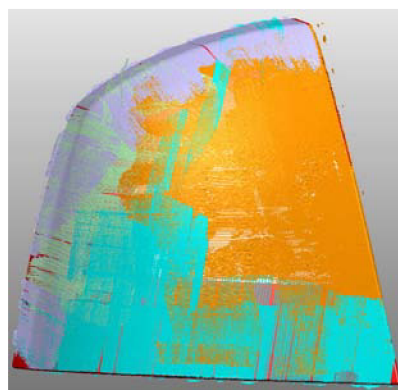
Výstupem z 3D skeneru jsou data popisující povrch skenovaného objektu tzv. mrak bodů (cloud of point). Zpracování těchto dat se dá sestavit do následujících kroků:

- nasnímání prostorových souřadnic - mrak bodů, import bodů,
- úprava nasnímaných dat - filtrování chybných dotyků pro optimalizace polygonální sítě,
- převedení dat do plošného nebo objemového modelu, konstrukce ploch a geometrických elementů,
- srovnání skutečných a nominálních dat,
- výstup výsledků měření.

Souřadnicový měřicí systém skeneru je obecně orientován, proto je nutné provést transformaci bodů do požadovaného souřadnicového systému¹⁵. Pro lepší orientaci je bod zobrazován nejen polohou, ale také barvou, která vyjadřuje intenzitu přijatého signálu při měření délek. Barevně jsou taky rozlišeny různé druhy materiálů, úpravy a geometrické konfigurace - obr. 1.8.



Obr. 1.7 Nominální data⁸



Obr. 1.8 Naskenovaná data⁸

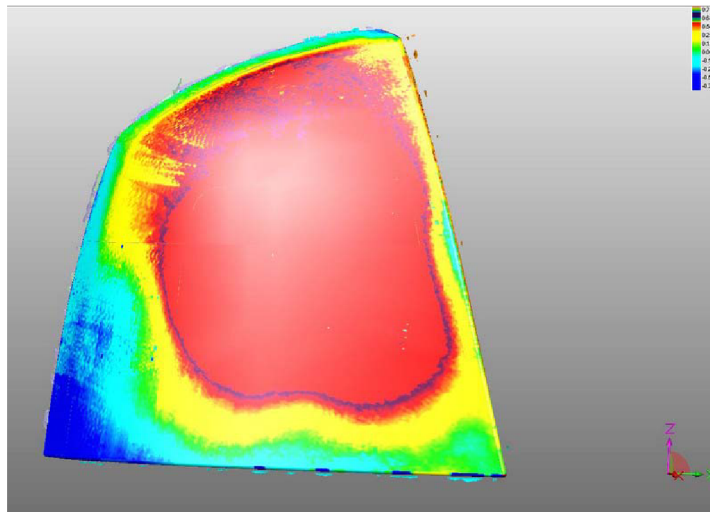
Jednotlivé body nebo snímky pořízené různými druhy skenerů či digitizérů jsou softwarově spojeny do tzv. polygonální sítě. Dalším zpracováním se vzniklá polygonální síť převede do plošného modelu. Vytvořená polygonální síť se proloží geometrickými entitami, tj. křivkami a plochami. Na tyto křivky se v místech, v nichž se mění tvar, zhotoví další kolmé křivky tak, aby se co nejlépe vystihla skutečná geometrie⁷. Z takto upravených geometrických entit vzniká digitální model, se kterým si uživatel může podle komfortu softwaru, vytvořit vlastní obsah výstupního protokolu.

Obecně platí, že každý výrobce optického snímacího zařízení užívá vlastní software k řízení snímání i ke zpracování dat. Některý dokáže nasnímaná data porovnat i s daty nominálními. Výrobce univerzálního měřicího softwaru, který nevyrábí žádné konkrétní snímací zařízení, poskytuje rozhraní pro snímací zařízení všech výrobců (nebo všech významných výrobců). Komfortní měřicí software tedy dokáže snímaná data zpracovat tak, že vlastní snímač (například

skener) nepotřebuje jiné programové vybavení, a je řízen přímo tímto měřicím software.

Výsledkem srovnání naměřených a jmenovitých dat je výsledek měření. Jeho podoba může být, opět podle komfortu měřicího software, různá. Standardně je to číselná podoba, kde jednotlivé naměřené (nebo vypočtené) hodnoty jsou uvedeny v tabulce, spolu se srovnáním, zda výsledek je nebo není v toleranci. Včetně například barevného označení výsledků – zelené v toleranci, červené mimo toleranci.

Komfortní a přehledná podoba výsledků je forma grafická. Pokud jsou jmenovitá data k dispozici ve formě elektronické (CAD), je v protokolu měření možno umístit obrázek měřeného objektu s využitím barevného označení v toleranci/mimo toleranci, s různou sytostí barvy vyznačující velikosti odchylky (colormapping) – obr. 1.9. Tento způsob vyjádření výsledků je označován termínem „colormapping“, který dále budeme používat.



Obr. 1.9 Colormapping⁸

Komfortní měřicí software umožňuje vytvořit vlastní strukturu (obsah) protokolu měření, aby vyhovoval uživateli co nejlépe. Samozřejmostí je kombinace číselné a grafické formy, s doplněním poznámek uživatele, atd. Možnosti jsou poplatné úrovni výpočetní techniky a softwaru obecně a tedy jsou značné.

2 INVENTARIZACE SOUČASNÉ NABÍDKY OPTICKÝCH SNÍMAČŮ A OPTICKÝCH CMM

Tato kapitola poskytuje stručný přehled výrobků firem, zabývajících se výrobou systémů na získávání dat pro potřeby měření a jejím nasazením nejen v metrologické praxi. Z uživatelského hlediska je významná ekonomická dostupnost. Výběr měřicího systému je vždy kompromisem mezi kvalitou systému – přesností měření, a pořizovacími a provozními náklady.

2.1 Optické snímače pro CMM (rozdělení podle výrobců)

Jsou snímače, které se upnou na rameno stacionárního měřicího stroje nebo na mobilní měřicí rameno. Kvalita nasnímaného povrchu je dána hustotou bodů, s jakou laserový paprsek pokryl povrch reálného tělesa. Čím vyšší je hustota nasnímaných bodů, o to jsou převážně nepravidelné plochy přesněji zaměřeny. Výstupem ze skeneru je soubor usprádaných dat do polygonové sítě, která definuje velmi přesnou geometrii povrchu tělesa.

1.1.1 Faro

- **Laser Scan V3**

Jedná se o americký kontaktní měřicí i skenovací systém. Uživateli umožňuje sejmout jednotlivé body pevným dotekem nebo naskenovat body laserovou triangulační metodou pro podrobnější vyhodnocení. Ideální řešení pro inspekci a reverzní inženýrství. Hlavní předností je, že zvládá zobrazení tmavých a reflektujících ploch. Je kompatibilní s rameny Faro a lze jej zapojit do měřicího systému se sedmi osami, což umožňuje větší flexibilitu. Hustota snímání 19000 bodů za sekundu není fixní a je automaticky regulována tvarem měřeného komponentu^{19,20}.



Obr. 2.1 Laser Scan V3²⁰

Nejčastější aplikace²⁰:

- Letecká výroba: měření dílů, vyrovnání, nastavování nářadí a forem,
- Automobilová výroba: měření dílů, nastavování nářadí a forem,
- Kovovýroba: inspekce prvních kusů, měření v kusové i sériové výrobě.

Tab. 2.1 Technická specifikace Laser Scan V3²⁰ :

Hmotnost	370 g
Počet bodů v pruhu	640 bodů/ pruh
Počet snímků	30 snímků/ s
Rychlost měření	19200 bodů/ s
Měřicí vzdálenost od povrchu	95 mm
Šířka skenovacího pruhu	34 a 60 mm
Přesnost	± 35 μm
Pracovní teplota	10°C ÷ 40°C
Třída laseru	II

Tab. 2.2 Přesnost měření: (bezkontaktní měření)²⁰

Laser Scan V3	1.2 m	2.4 m	3.0 m	3.6 m
Quantum [mm]	x	± 0,056	± 0,074	± 0,086
Platinum [mm]	± 0,053	± 0,065	± 0,087	± 0,108
Fusion [mm]	x	± 0,086	± 0,124	± 0,159

2.1.2 Metris

Metris původně vyráběl pouze optické skenovací hlavice. Dnes je to velká belgická skupina, čítající řadu výrobců téměř všech typů CMM. Vyvíjí a vyrábí skenery, využívající laserového paprsku k měření objektů. Upínají se jak na pinolu souřadnicového měřicího stroje, tak na měřicí rameno nebo měřicí robot. K typickým představitelům digitálních laserových skenerů upínajících se na souřadnicový měřicí stroj patří skenery řady LC a XC²².

- **Digitální laser skener LC60D/LC50C**

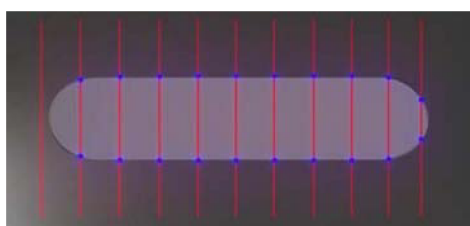
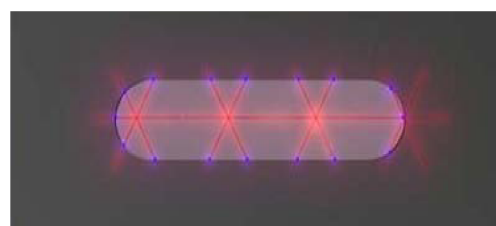
Je určen pro efektivní skenování povrchů s různou barvou nebo vysokou odrazivostí (reflexí). Systém dynamicky přizpůsobuje intenzitu laserového zdroje a pomocí CMOS kamery citlivost. LC60D automaticky zachytí jakékoliv postupné nebo náhlé změny v povrchových vlastnostech. Používá se především pro aplikace, které vyžadují rychlejší produktivitu nebo u skenování reflexních povrchů jako např.: plechové díly, frézované povrchy, plasty, případně některé lakované díly. Pro jednodušší digitalizační úlohy na souřadnicovém měřicím stroji se používá skener LC50C. Je postaven na stejném skenovací technologii jako LC60D. Zaručuje rychlé a úplné pokrytí povrchu a tím i špičkovou produktivitu skenování²².

Obr. 2.2 Laser skener LC60D²²Tab. 2.3 Technická specifikace Laser skener LC60D a LC50C²²:

Model	LC60D	LC50C
Hmotnost	230 g	220 g
Rychlost měření	75000 bodů / s	23000 bodů / s
Měřicí vzdálenost od povrchu	80 mm	80 mm
Rozlišení	60 μm	60 μm
Přesnost	15 μm	20 μm
Zorné pole	60 x 60 mm	50 x 60 mm

- **Křížový skener XC50**

Křížový laserový skener pro rychlé a efektivní skenování otvorů, štěrbin a mezer na souřadnicovém měřicím stroji. Senzor digitalizuje povrch sloučením tří laserových skenerů. Každá kamera má vlastní skener a je mírně natočená oproti ostatním. Skenování probíhá střídavým způsobem po 120°. Celková snímací rychlost je 3 krát 6400 bodů za sekundu²³.

Obr. 2.3 lineární skener²³Obr. 2.4 Křížový skener²³

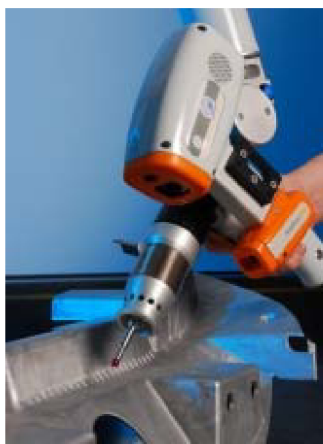
Laserové skenování jedním pruhem, zobrazuje měřené průřezy laserové roviny s objektem v jednom směru. Tímto postupem se zachytí jen informace, zobrazované ve směru laserové roviny. K získání dostatečně digitalizovaného povrchu je zapotřebí více pohledů z různých směrů. Proto skenování křížovým skenerem přináší vyšší rychlost a větší pružnost měření²³.

Obr. 2.5 Křížový skener XC50²³Tab. 2.4 Technická specifikace křížového skeneru XC50 a XC50 – LS²³ :

Model	XC50	XC50 - LS
Hmotnost	510 g	560 g
Rozměry	148 x 86 x 136 mm	145 x 103 x 135 mm
Rychlost měření	3 x 6400 bodů / s	3 x 6400 bodů / s
Měřicí vzdálenost od povrchu	70 mm	195 mm
Šířka zorného pole	3 x 50 mm	3 x 50 mm
Výška zorného pole	3 x 50 mm	3 x 50 mm
Přesnost	15 μ m	20 μ m
Třída laseru	3R	II

- **ModelMaker skener MMD/MMC**

Je digitální laserový skener upnutý na mobilním měřícím ramenu. Ideální řešení pro inspekci a reverzní inženýrství. Je kompatibilní se sedmiosými měřícími rameny Faro, Metris a Cimcore²⁶.

Obr. 2.6 ModelMaker skener MMD²⁶

Tab. 2.5 Technická specifikace ModelMaker skener MMD/MMC²⁶:

Model	MMD 50	MMD 100	MMD 200	MMC 40	MMC 80	MMC 160
Měřicí rozsah	50 mm	100 mm	150 mm	50 mm	100 mm	150 mm
Šířka proužku	50 mm	100 mm	200 mm	40 mm	80 mm	160 mm
Přesnost	16 μm	23 μm	37 μm	24 μm	35 μm	55 μm
Hmotnost	395 g			410 g		
Rychlost snímání	81920 bodů/ s			24000 bodů/ s		
Třída laseru	II					

Výhody a přednosti²⁶:

- Rychlé a přesné skenování,
- Ergonomický, lehký a malý skener,
- Zkontroluje všechny průmyslové materiály,
- Rychlé skenování,
- Teplotní stabilita,
- Manuální výběr délky skenovacího pruhu.

2.1.4 Kreon

Kreon je francouzská firma nabízející řešení pro kontrolu kvality, reverzní inženýrství, povrchové kontroly pro automobilový, letecký a kosmický průmysl. Laserové skenery jsou založeny na principu laserové triangulace, kde vzdálenost k objektu je vypočítána na základě směrového světelného zdroje, laseru a videokamery. Celé portfolio zahrnuje skenery z řady Solano, Aquilon a Zephyr²⁷.

- **Solano**

Laserový scanner Solano představuje základní charakteristiky kontaktního a bezkontaktního 3D měřicího přístroje. Tento laser je určen pro použití v dílnách, reverzním inženýrství a designu, ale také v metrologických laboratořích²⁷.

Obr. 2.7 Laser skener Solano²⁷

• Aquilon

Aquilon je další generace laserového skeneru speciálně navrženého pro aplikace vyžadující vysokou přesnost měření a vysokou hustotu nasnímaných dat. Je určen k inspekci nebo reverznímu inženýrství²⁸.



Obr. 2.8 Laser skener Aquilon²⁸

Tab. 2.6 Technická specifikace laser skeneru Solano a Aquilon^{27,28}:

Model	<u>Solano</u>	<u>Aquilon</u>
Přesnost	50 μm	5 μm
Délka laserového pruhu	100 – 200 mm	50 mm
Rychlost snímání	40 000 bodů/ s	až 1 milion bodů/ s
Měřicí vzdálenost	100 mm	60 mm
Hmotnost	< 400 g	< 400 g
Třída laseru	II	II

• Zephyr

Jsou skenery, které kombinují kontaktní a bezkontaktní měření pro zvýšení přesnosti. Sdružení kontaktní sondy a laserové skenovací technologie umožňuje shromažďovat velké množství údajů, optimalizovat čas měření a produktivitu. Skenery jsou ideální pro použití na CMM a měřicích mobilních ramenech. Kontaktní sonda slouží většinou pro vyrovnávání měřeného objektu²⁹.



Obr. 2.9 Zephyr KZ 23²⁹



Obr. 2.10 Zephyr KZ 100²⁹

Výhody a přednosti^{28,29}:

- Bezproblémová integrace do stávajících systémů,
- Bezkontaktní měření měkkých a křehkých materiálů,

- Univerzální skenovací řešení,
- Vysoká rychlost.

Tab. 2.7 Technická specifikace laserového skeneru Zephyr²⁹:

Model	Zephyr 25 KZ	Zephyr 50 KZ	Zephyr 100 KZ
Hmotnost	360 g	360 g	360 g
Rozměry	150 x 50 x 70 mm	150 x 50 x 70 mm	150 x 50 x 70 mm
Rychlost snímání	30000 bodů/ s	30000 bodů/ s	30000 bodů/ s
Rozlišení	3 μm	5 μm	11 μm
Provozní teplota	-5°C ÷ 50°C	-5°C ÷ 50°C	-5°C ÷ 50°C
Třída laseru	II	II	II

2.1.5 Datapixel

Španělská firma Datapixel nabízí řešení, založené na bezkontaktním měření. OptiScan je vysokorychlostní skenovací senzor, který poskytuje vysokou přesnost a citlivost. Může pracovat s lesklými nebo tmavými povrchy bez nutnosti antireflexního spreje nebo nátěru. Laser, elektronika a optická technologie poskytuje dokonalou synchronizaci s CMM, roboty a mobilními měřicími rameny³⁰.

- **OptiScan H-class/HR**

Senzor s vysokým rozlišením pro velmi přesné snímání. Speciálně konstruovaný pro bezkontaktní měření a kontrolu povrchu na CMM. Vyšší rozlišení zajišťuje lepší přesnost při měření obráběných dílů a přináší vysokou produktivitu měřicího procesu³⁰.

Obr. 2.11 OptiScan H- class³⁰

Tab. 2.8 Technická specifikace laser skeneru³⁰:

OptiScan	H-1040-L	HR-1015-L
Rychlost měření	60000 bodů/ s	60000 bodů/ s
Přesnost	± 10 μm	± 6 μm
Měřicí vzdálenost	100 mm	100 mm
Zorné pole	40 x 40 mm	10 x 15 mm
Třída laseru	II	II

- **OptiScan S/SD**

Poskytuje vysokorychlostní inspekci pro minimalizaci času kontroly. Je určený pro výrobní linky automobilového a leteckého průmyslu³¹.

Obr. 2.12 OptiScan S/SD³¹Tab. 2.9 Technická specifikace laser skeneru³¹:

OptiScan	S/SD-1015-L	R-2080-L
Rychlost měření	60000 bodů/ s	60000 bodů/ s
Přesnost	± 6 μm	± 50 μm
Měřicí vzdálenost	100 mm	200 mm
Zorné pole	10 x 15 mm	60 x 80 mm
Třída laseru	II	II

Výhody a přednosti^{30,31}:

- Bezkontaktní měření měkkých a křehkých materiálů,
- Kompatibilní s Renishaw PH10,
- Porovnání s CAD modelem,
- Použití na CMM a mobilních měřících ramenech.

2.1.6 Perceptron

Perceptron je americká firma vyrábějící skenovací systém, založený na triangulaci laserového paprsku. Systém je složený z lokalizátoru, který vhodně nastaví skener a software. Kromě přenosného systému nabízí rovněž řešení pro automatické souřadnicové měřicí stroje a robotické systémy. Skenováním vytvořený „mrak bodů“, představuje povrch a vlastnosti objektu. Získané body

mohou být použity pro inspekční aplikace, reverzní inženýrství a vizualizaci v automobilovém, leteckém a kosmické průmyslu³².

- **ScanWorks V4i**

Je laserový skener, využívaný jak ve výrobě, tak v laboratořích k měření otvorů, válců, koulí, štěrbin, kolmých ploch atd. Sonda umožňuje kombinovat kontaktní a bezkontaktní snímání. Upíná se na mobilní měřicí rameno, které je součástí systému. Konstrukce ze slitiny hliníku umožňuje nasazení v extrémních podmínkách a zajišťuje ochranu proti poškození a okolnímu vlnění³².



Obr. 2.13 ScanWorks V4i³²

Tab. 2.10 Technická specifikace ScanWorks³²:

ScanWorks	V4i	V5
Hmotnost	340 g	438 g
Rozměry	105 x 52 x 90 mm	115 x 100 x 80 mm
Rychlost měření	23040 bodů/ s	458400 bodů/ s
Měřicí vzdálenost	118 mm	100 mm
Délka laser. pruhu	109 mm	110 mm
Šířka laser. pruhu	34 ÷ 75 mm	95 ÷ 140 mm
Přesnost	24 μm	24 μm
Rozlišení	4,5 μm	4,5 μm
Pracovní teplota	10°C ÷ 40°C	10°C ÷ 40°C
Třída laseru	II	II

Výhody a přednosti³²:

- Možnost kontaktního i bezkontaktního snímání,
- Pevná a lehká konstrukce,
- Komplexní systém.

2.1.7 Romer

Je francouzským výrobcem měřících kloubových ramen a optických skenovacích hlavíc určených pro odvětví automobilového, leteckého a lodního průmyslu. Jsou obzvláště vhodné pro inspekci částí, které není prakticky možné přestěhovat do stacionárního CMM³⁴.

- **G-Scan RX**

Je bezkontaktní skenovací sonda určená především pro inspekci a reverzní inženýrství. Instaluje se na šestiosé mobilní měřící rameno stejně rychle, jako při montáži kontaktní sondy³⁴.



Obr. 2.14 G-Scan RX³⁴

Tab. 2.11 Technická specifikace laserového skeneru G – Scan RX³⁴ :

Model	G – Scan RX
Hmotnost	500 g
Rozměry	156 x 72 x 50 mm
Počet bodů v pruhu	640 bodů/ pruh
Počet snímků	30 snímků/ s
Rychlost měření	19200 bodů/ s
Měřicí vzdálenost od povrchu	124 ÷ 222 mm
Délka laserového pruhu	110 mm
Přesnost	± 0.12 mm
Rozlišitelnost	± 0.04 mm
Třída laseru	II

Výhody a přednosti³⁴:

- Mobilní skenovací technologie,
- Pevná a lehká konstrukce,
- Bez nutnosti kalibrace,
- Komplexní systém,
- Bezdrátový přenos dat,
- Integrovaná osa otáčení.

2.1.8 Carl Zeiss

Nabízí optické systémy upínající se na stacionární měřící stroj.

• LineScan

Nástroj pro zachycení celého měřeného povrchu pomocí „mraku bodů“. Krátký čas měření vede ke zvýšení produktivity. Optický skener se uplatňuje především v automobilovém průmyslu při měření karoserii, konstrukci či designu. Výhodou je měření velmi jemných povrchových struktur nebo materiálů citlivých na dotek³⁵.



Obr. 2.15 LineScan³⁵

Tab. 2.12 Technická specifikace LineScan³⁵:

Model	LineScan
Počet bodů v pruhu	1024 bodů/ pruh
Rychlost měření	250000 bodů/ s
Měřicí vzdálenost od povrchu	75 mm
Zorné pole	46 x 55 mm
Pracovní teplota	18°C ÷ 22°C
Teplota uskladnění	-20°C ÷ 70°C
Přesnost	50 μm
Rozlišitelnost	10 μm
Třída laseru	II

Výhody a přednosti³⁵:

- Vysoká rychlost digitalizace,
- Měření měkkých materiálů,
- Možnost měření na CNC stroji.

• EagleEye Navigator

EagleEye je založen na zásadách laserové triangulace. Využívá se především v karosářském odvětví automobilového průmyslu, což je jedno z nejsložitějších oblastí metrologie. Upíná se na robotická nebo horizontální ramena souřadnicového stroje, nasazené ve výrobních linkách pro sériovou kontrolu³⁵.

Výhody a přednosti³⁵:

- Měření hran, přechodů, profilů,

- Měření měkkých materiálů,
- Nasazení při sériové kontrole.



Obr. 2.16 EagleEye Navigator³⁵

Technickou specifikaci systému EagleEye Navigator firma Carl Zeiss pro účely této diplomové práce neposkytla.

2.2 Optické CMM

Do skupiny optických CMM patří mobilní sloupový stroj - laser tracker, který sleduje polohu koncového bodu paprsku na reflektoru, systémy využívají metody promítání pruhů na snímáný objekt a systémy, které pomocí sledovacího zařízení lokalizují měřicí sondu v prostoru nebo snímají měřený objekt z určité vzdálenosti fotogrammetricky. Níže jsou uvedené měřicí systémy těchto výrobců: Faro, Leica – Geosystems, Automated Precision Inc., Metris, Creaform, Steinbichler Optotechnik, Breuckmann, GOM, Konica Minolta, Metronor

2.2.1 Mobilní měřicí systémy, které lokalizují polohu měřicí nebo skenovací sondy v prostoru pomocí laserové technologie

K přenosným měřicím systémům, které sledují polohu měřicí sondy nebo skenovacího přístroje z určité vzdálenosti, patří laser tracker. Princip činnosti tohoto systému spočívá v tom, že laserový paprsek vysílaný z trackeru, sleduje polohu koncového bodu paprsku na odrazovém systému „reflektoru“. Odražený paprsek se vrací zpět do řídicího systému. Tímto způsobem se lokalizuje poloha sondy a softwarovými transformacemi se zaznamenají souřadnice změřeného objektu^{11,12}.

• Faro

Produktová řada americké společnosti Faro zahrnuje systém s kontaktním snímáním, využívající laserovou technologii. Laser tracker umožňuje měřit a kontrolovat především rozměrné součásti a celky přímo v místech jejich instalace nebo tam, kde je to nejúčinnější a nákladově efektivní. Pomocí laserového paprsku neustále sledujícího zrcadlový dotek (reflektor) nebo měřicí rameno, zaznamenává systém polohu bodu v prostoru. Výhodou jsou úhlové

senzory polohy (enkodéry), technologie XtremeADM (Absolute Distance Measurement), která podává zprávu o 3D pozici doteku v reálném čase a dovoluje pokračovat v měření i po přerušení laserového paprsku. Přístroj je zcela utěsněn, má zabudované čidla teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu. Tyto parametry umožňují práci v extrémních podmínkách. Systém je dodáván ve dvou variantách: s technologií XtremeADM nebo s interferometrem pro lepší přesnost a flexibilitu výpočtu vzdálenosti²¹.



XtremeADM

Rychle a přesně zachycuje paprsek

Bezdrátová zaměřovací kamera

Osvětlení pomáhá lokalizovat objekt v dohledu

Samokompenzace

Automatická kompenzace zajišťuje vysokou přesnost

Integrovaná meteorologická stanice

Systém Smart Warm - up

Umožňuje měření v různých podmínkách

Různé možnosti upnutí

Horizontálně, vertikálně „hlavou dolů“ měření ve stísněných podm.

Kulové doteky

Rychle a přesně zachycuje paprsek

Obr. 2.17 Popis laser trackeru faro²¹

Tab. 2.13 Přesnost měření systému laser tracker²¹:

Horizontální měření:			In – line měření:		
Rozsah (m)	XADM (mm)	IFM (mm)	Délka (m)	XADM (mm)	IFM (mm)
2	0,032	0,031	2 – 5	0,011	0,003
5	0,046	0,046	2 – 10	0,013	0,005
10	0,068	0,068	2 – 20	0,017	0,009
20	0,110	0,110	2 – 30	0,021	0,013
30	0,153	0,153	2 – 35	0,023	0,015
35	0,174	0,174	2 – 40	0,027	0,019

Nejčastější aplikace²¹:

- Letecká výroba: inspekce a kontrola, automatizovaná montáž systémů,
- Automobilová výroba: kontrola nastavení náradí, opakované měření reverzní inženýrství,
- Nástrojárny: prototypy forem, nastavení a seřízení náradí.

Tab. 2.14 Specifikace systému laser tracker²¹:

Tracker	Laser Tracker X	Laser Tracker Xi
Hmotnost	20 kg	22 kg
Rozměry	280 x 554 mm	280 x 554 mm
Horizontální rozsah	+/- 270°	+/- 270°
Vertikální rozsah	+75°/-50°	+75°/-50°
Úhlové rozlišení	+/- 2 arcsec	+/- 2 arcsec
Úhlová přesnost	18 μm + 3 μm/m	18 μm + 3 μm/m
Maximální úhlová rychlost	180°/s	180°/s
Měřicí rozsah	0-70 m	0-70 m
XtremeADM		
Snímací frekvence	10000 snímků/s	10000 snímků/s
Rozlišení	0,5 μm	0,5 μm
Přesnost	10 μm + 0,4 μm/m	10 μm + 0,4 μm/m
Třída laseru	I	I
Interferometr		
Max. úhlová rychlost	x	4 m/s
Rozlišení	x	0,158 μm
Přesnost	x	2 μm + 0,4 μm/m
Třída laseru	II	II

- **Leica-geosystems**

Zaměřovací systém od švýcarské firmy Leica-geosystems je mobilní měřicí systém, k přesnému měření velkých i malých dílů, odměrování úhlů horizontálně i vertikálně, pomocí patentovaného interferometru. Kontrolovaný povrch je snímán rychlostí 3000 bodů za sekundu. Polohu bodu v prostoru tento systém zjišťuje třemi typy „trackerů“ v závislosti na obtížnosti a dostupnosti měřených dílů³⁶.

Obr. 2.18 Laser tracker Leica³⁶

Leica Absolute Tracker AT901-B

Je provedení, obsahující pouze reflektor, tzv. zrcátko. Pracovní princip spočívá v tom, že operátor nese v ruce zrcátko, které je sledováno laserovým paprskem vysílaným z trackeru. Přiložením zrcátka v místech sejmutí měřeného bodu, se po stisknutí tlačítka odešlou souřadnice změřeného bodu zpět do řídicího počítače. Systém není kompatibilní s dalším příslušenstvím³⁷.

Leica Absolute Tracker AT901-MR/LR

Je určen pro měření složitějších povrchů. Je kompatibilní s dalšími produkty. T-Probe a T-Scan zvyšují produktivitu měření laser trackerem. Umožňují měření prohloubení a dutiny s velkou přesností. Měření s T-produkty je prostorově nezávislé na směru a orientaci polohy snímacího dotyku. Pomocí bezkontaktního snímače T-scan, změří malé, velké i tvarově složité povrchy dílců o 50% rychleji než běžný snímač. Model vzniká přímo na obrazovce notebooku. Systému se využívá převážně v letectví a těžkém průmyslu k náročným bezdrátovým inspekcím³⁷.

Obr. 2.19 T-Scan³⁷Obr. 2.20 T-Probe³⁷Tab. 2.15 Přesnost měření systému Leica absolute tracker³⁷:

Horizontální měření:			In – line měření:		
Rozsah (m)	ADM (mm)	IFM (mm)	Délka (m)	ADM (mm)	IFM (mm)
2	0,036	0,036	2 - 5	0,014	0,001
5	0,063	0,063	2 - 10	0,014	0,002
10	0,106	0,106	2 - 20	0,014	0,005
20	0,191	0,191	2 - 30	0,014	0,008
30	0,276	0,276	2 - 35	0,014	0,009
35	0,318	0,318	2 - 40	0,014	0,011

Tab. 2.16 Specifikace systému Leica absolute tracker³⁷:

Tracker	AT901-B	AT901-MR/LR
Hmotnost	22 kg	22 kg
Rozměry	620 x 290 x 240 mm	620 x 290 x 240 mm
Horizontální rozsah	± 360°	± 360°
Vertikální rozsah	± 45°	± 45°
Úhlová přesnost	± 15 μm + 6 μm/m	± 15 μm + 6 μm/m
Úhlové rozlišení	+/- 0,14 arc sec	+/- 0,14 arc sec

Měřicí rozsah	160 m	50/160 m
Měřicí rozsah s T-produkty	x	18/30 m
Třída laseru	II	II
ADM - Snímací frekvence	3000 snímků/s	1000 snímků/s
- Rozlišení	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 10 \mu\text{m}$
- Přesnost	$10 \mu\text{m} + 0,4 \mu\text{m/m}$	$10 \mu\text{m} + 0,4 \mu\text{m/m}$
Interferometr - Přesnost	$\pm 0,4 \mu\text{m} + 0,3 \mu\text{m/m}$	$\pm 0,4 \mu\text{m} + 0,3 \mu\text{m/m}$

Nejčastější aplikace³⁷:

- Letecká výroba: inspekce a kontrola, automatizovaná montáž systémů,
- Automobilová výroba: kontrola nastavení náradí, opakované měření, reverzní inženýrství,
- Nástrojárny: prototypy forem, nastavení a seřízení náradí, bezdrátové inspekce.

• Automated Precision Inc

Americká Společnost API je výrobcem laser trackerových systémů Tracker3 a Omnitrac. Laserový interferometr a ADM optika jsou zabudovány přímo do centrálního hřídele. Díky uzavřené konstrukci, umožňuje měření v každém prostředí, v automobilovém průmyslu, letectví, energetice, strojírenství, robotice. Systém má velmi rychlý interferometrický reset nazvaný TurboADM. Omnitrac využívá stejné technologie jak Tracker3, ale bez laserového interferometru. Oba systémy jsou kompatibilní s dalším spektrem nástrojového příslušenství, jako je Intelliprobe senzor. Tento senzor výrazně rozšiřuje rozsah použití aplikací. Je nástrojem pro měření geometrie velkých a složitých součástí nevyžadující lineární pohled paprsku z trackeru³⁸.

Obr. 2.21 Tracker3³⁸Obr. 2.22 Omnitrac³⁹Tab. 2.17 Specifikace systému laser tracker^{38,39}:

Laser Tracker	Tracker3	Omnitrac
Hmotnost	23 kg	23 kg
Rozměry	180 x 190 x 360 mm	180 x 190 x 360 mm
Horizontální rozsah	$\pm 320^\circ$	$\pm 320^\circ$
Vertikální rozsah	$+80^\circ/-60^\circ$	$+80^\circ/-60^\circ$
Úhlové rozlišení	$\pm 0,018 \text{ arcsec}$	$\pm 0,018 \text{ arcsec}$

Úhlová přesnost	25 μm + 5 $\mu\text{m}/\text{m}$	18 μm + 6 $\mu\text{m}/\text{m}$
Maximální úhlová rychlost	120°/s	120°/s
Maximální měřicí rozsah	120 m	120 m
TurboADM		
Snímací frekvence	10000 snímků/s	10000 snímků/s
Rozlišení	0,1 μm	0,1 μm
Přesnost	15 μm + 1,5 $\mu\text{m}/\text{m}$	15 μm + 1,5 $\mu\text{m}/\text{m}$
Třída laseru	I	I
Interferometr		
Max. úhlová rychlost	3 m/s	x
Rozlišení	0,08 μm	x
Přesnost	15 μm + 1,5 $\mu\text{m}/\text{m}$	x
Třída laseru	II	II

Nejčastější aplikace^{38,39}:

- Letecká výroba: bezdrátová inspekce a kontrola, automatizovaná montáž systémů,
- Automobilová výroba: kontrola nastavení nářadí, opakované měření, reverzní inženýrství,
- Strojírenství: svařovna, brusárna, nastavení a seřízení nářadí, kalibrace CMM.

• Metris

U Metris je laser radar řešením pro zpracovatelský průmysl, který poskytuje plně automatizované bezkontaktní měření. Podstatou laserového radaru je širokopásmová frekvence modulovaného infračerveného laseru (100GHz modulace), která poskytuje silný a pro obsluhu bezpečný signál. Produktové portfolio je doplněno celou řadou doplňkových software pro řešení kontroly a reverzního inženýrství²⁴.



Obr. 2.23 Laser radar²⁴

Tab. 2.18 Specifikace systému laser radar²⁴:

Rychlost snímání	1000 bodů/s
Měřicí rozsah	1 ÷ 60 m
Horizontální rozsah	360°

Vertikální rozsah	$\pm 45^\circ$
Prostorová přesnost	16 $\mu\text{m}/\text{m}$
	102 $\mu\text{m}/10\text{m}$
	240 $\mu\text{m}/24\text{m}$
Třída laseru	I

Vlastnosti a výhody²⁴:

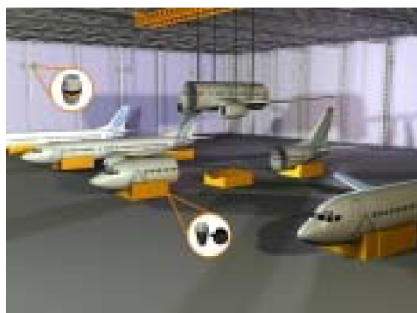
- Vysoká rychlost a přesnost měření,
- Bezkontaktní snímání,
- Rozšíření pohledů pomocí zrcadel,
- Integrace více laserových radarů.

Aplikace²⁴:

- Kontrola výroby a montáže komponent v leteckém průmyslu,
- Kontrola součástí v automobilovém průmyslu,
- Jednotlivé kontroly náradí a montáže.

iGPS

Je vnitřní velkoobjemový sledovací systém, který umožňuje průběžně a automatické měření nebo sledování polohy přípravků, dílů, sestav v několika objektech s velkou přesností. Využívá se u leteckých, automobilových a dalších průmyslových výrobců – obr. 2.24 a obr. 2.25. Rychle a jednoduše se nakonfiguruje podle tvaru a velikosti pracovního prostoru v rozsahu 2 m ÷ 300 m. Multiuživatelské schopnosti umožňují instalaci libovolného počtu iGPS nástrojů a senzorů. Získané hodnoty lze v rámci pracovního prostoru shromažďovat, srovnávat či upozornit na překročení nastavené tolerance a předejít tak následným problémům²⁵.

Obr. 2.24 Letecká montáž²⁵Obr. 2.25 Robotické pracoviště²⁵

Základ iGPS tvoří laserový vysílač – obr. 2.26, vybavený nabíjecími bateriemi nebo napájecím adaptérem. Válcový snímač se zorným polem 360° v horizontální rovině a 120° ve vertikální rovině. Podmínkou je, aby laserový vysílač viděl snímač. Pro měření na těžko dostupných místech a skrytých bodech se používá přenosná sonda – obr. 2.27²⁵.

Obr. 2.26 Laserový vysílač²⁵Obr. 2.27 Přenosná sonda²⁵

Srovnáním iGPS a laserového trackeru zjistíme, že při měření v oblastech 10 x 10 m je přesnější tracker. Jelikož ale ne všechny aplikace umožňují měření v těchto oblastech a s přímou viditelností vysílače a snímače, proto iGPS při měření ve větších oblastech předstihuje přesnost a preciznost laserových trackerů²⁵.

- **Creaform**

Creaform je kanadská společnost, zabývající se ručním 3D skenováním. Nabízí rozsáhlé metrologické a inspekční služby pro usnadnění kontroly kvality procesu. Urychlení procesu skenování, inspekci a reverzního inženýrství přináší Handyscan 3D.

Tyto lasery jsou lehké a ergonomické, nemají žádná omezení orientace a dostupnosti v prostorech, nepotřebuje externí sledovací zařízení, jako přenosné CMM nebo pohyblivá ramena. V porovnání s tradičními laserovými scannery umístujícími se na měřicí ramena nebo CMM, je handyscan 3D konkurenceschopný. Tento 3D laserový skener může být kontrolním nástrojem pro analýzu geometrických rozměrů a tolerancí. Dvukamerový REVscan a třikamerový EXAscan patří k představitelům speciálního ručního 3D laserového skenování. Urychlují a usnadňují bezkontaktní měření objektů všech velikostí, kvalitní inspekci a celkové posouzení shody dílů. HandyPROBE je samostatný skenovací nástroj, který je sledován systémem C-Track - dvukamerovým systémem se speciálním osvětlením, který sleduje skenovací sondu v rámci svého pracovního prostoru^{13,40}.

Handyscan 3D:

Umožňuje vzájemný pohyb tělesa a skeneru během snímání. Na těleso nebo podložku se nalepí orientační značky a pomocí několika CCD kamer se snímá laserový kříž na tělese. Systém automaticky zaznamenává všechny snímky a díky referenčním značkám je možné snímaná data zpřesňovat a upravovat. Okamžité zobrazování nasnímaných dat na počítači urychluje vyhledávání míst, které potřebují detailnější snímání. Výsledky snímání se automaticky přepočítávají a generuje se polygonová síť^{13,40}.

Obr. 2.28 REVscan⁴⁰Obr. 2.29 EXAscan⁴⁰

Tab. 2.19 Technická specifikace handyscan 3D⁴⁰:

Handyscan	REVscan	EXAscan
Hmotnost	0,980 kg	1,25 kg
Rozměry	160 x 260 x 210 mm	172 x 260 x 210 mm
Měřicí rychlost	18000 snímků/s	25000 snímků/s
Rozlišení v ose Z	0,1 mm	0,05 mm
Třída laseru	II	II
Přesnost	až do 50 μm	až do 40 μm
ISO	20 μm + 0,2 L / 1000	20 μm + 0,1 L / 1000
Měřicí vzdálenost	30 cm	30 cm

A**Aplikace⁴⁰:**

- Inspekce - bezkontaktní kontrola objektů všech velikostí, kontrola kvality, posuzování shody 3D modelů oproti originálu,
- Průmysl - automobilový, letecký, reverzní inženýrství.

HandyPROBE:Obr. 2.25 HandyPROBE⁴⁰Tab. 2.19 Technická specifikace HandyPROBE a C-Track⁴⁰:

Model	HandyPROBE	C-Track
Hmotnost	0,447 kg	5,6 kg
Rozměry	204 x 159 x 97 mm	1089 x 174 x 119 mm
Měřicí rychlost	30 bodů/s	
Přesnost	25 μm	
Pracovní objem	7,8 m ³	
Pracovní teplota	15°C ÷ 40 °C	

Vlastnosti a výhody⁴⁰:

- přenosný
- volnost pohybu
- automatické nastavení
- rozšíření rozsahu měření

2.2.2 Mobilní měřicí systémy, které snímají měřený objekt s využitím sledovacího zařízení nebo fotogrammetricky

Sledovací systém měří polohu infračervených diod pomocí CCD kamer. Infračervené diody jsou umístěné na aktivním měřicím zařízení a prostřednictvím úhlu sdružených pohledů z CCD kamer se počítá poloha těchto diod v prostoru. U systémů pracujících na principu fotogrammetrie se na snímáný objekt umístí referenční značky a spolu s přiloženou kalibrační tyčí se z různých pozic objekt nasnímá digitálním fotoaparátem. U metody promítání pruhů je využito obrazové korelace. Na snímáný objekt se promítají různé světelné pruhy, které se pomocí CCD kamer zaznamenávají^{6,11,7}.

- **Steinbichler Optotechnik**

Německá firma Steinbichler Optotechnik je celosvětovým dodavatelem optických skenerů a měřicí techniky. Pro 3D digitalizaci kontrolovaného povrchu nabízí dva systémy⁴¹.

T- Scan 2

Je kompaktní přenosný laserový skener. Obsahuje funkce odstranění vibrací nebo objekt v pohybu. Pohodlný provoz zajišťuje manipulační stativ a mobilní umístění optického sledovacího systému optotrak⁴¹.



Obr. 2.26 Laserový skener T-Scan 2 a Optotrak⁴¹

Tab. 2.20 Technická specifikace T-Scan 2⁴¹:

Hmotnost	1,2 kg
Rozměry senzoru	172 x 138 x 80 mm
Typ laseru	Dioda
Měřicí vzdálenost	83 mm
Třída laseru	II
Rozlišení	1 μ m
Přesnost	\pm 30 μ m
Délka kabelu scanner - PC	9 m

Tab. 2.21 Technická specifikace sledovacího systému⁴¹:

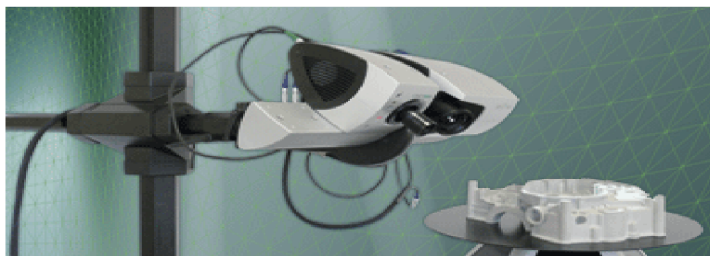
Systém	Optotrak Pro 1000	Optotrak Pro 2000
Hmotnost	19 kg	19 kg
Rozměry [mm]	1126 x 200 x 161	1126 x 200 x 161
Měřicí rozsah	1.5 ÷ 4.5 m	1.5 ÷ 6 m
Přesnost	0.09 + 0.01 mm	0.09 + 0.01 mm

Vlastnosti a výhody⁴¹:

- Rychlý a přesný sběr dat
- Vysoká teplotní stabilita
- Rychlá montáž, snadné dopravení
- Eliminace vibrací

Comet 5

Comet 5 je flexibilní a mobilní systém využívající promítání bílého světla (Light Fringe Projection) a fotogrammetrie. Kombinace jedné kamery a integrované projekční technologie zaručuje vysokou rychlost měření a výbornou kvalitu dat. Vysoká přesnost a spolehlivost hardwaru a softwaru splňuje požadavky na kvalitu ve vývoji a výrobě. Robustní mobilní konstrukce celého systému je velmi stabilní a umožňuje nasazení v širokém rozsahu teplot. Pro instalaci systému jsou k dispozici různé manipulační doplňky - stojan fotoaparátu pro snímáče polohy, flexibilní polohovací ponk, otočný stůl pro automatické polohování objektů⁴².

Obr. 2.27 Comet 5⁴²Tab. 2.22 Technická specifikace systému Comet 5⁴²:

Comet 5	1.4 M	4 M
Rozlišení kamery [bodů]	1360 x 1024	2048 x 2048
Měřicí rozsah [mm³]	65 x 50 x 50 100 x 75 x 60 210 x 160 x 140 480 x 360 x 250 900 x 660 x 500	55 x 55 x 50 80 x 80 x 60 190 x 190 x 140 380 x 380 x 250 760 x 760 x 500
3D bodová vzdálenost v [μm]	40,75,150,350,650	25,40,95,190,380
Umístění senzoru	Stativ, ruční natáčení	Stativ, ruční natáčení
Čas měření v [s] <i>Rychle / kvalitně</i>	2.0 / 3.5	2.5 / 5.0
Nastavení objektu	Otáčení stolu, automaticky	Otáčení stolu, automaticky

Vlastnosti a výhody⁴²:

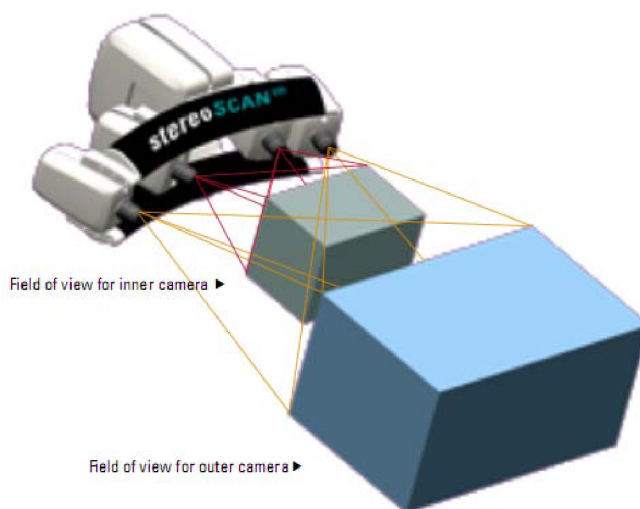
- Rychlé a přesné měření
- Efektivní využití řízení kvality
- Teplotní stabilita
- Mobilita
- Eliminace vibrací

- **Breuckmann**

K dalším výrobcům v oblasti optického měření, digitalizace a kontroly kvality patří německá firma Breuckmann. Pro oblast strojírenství vyvíjí systémy stereoSCAN a Optotyp. Tyto 3D snímače jsou založeny na patentované miniaturní promítací technice (MPT). Tento účinný systém měření a kontroly, je schopen poskytnout vysoké rozlišení a přesnost, rychlé pořízení dat, spolehlivou analýzu dat⁴³.

StereoSCAN

Skládá se z plně integrované kombinace patentované MPT projekční jednotky a 2 digitálních CCD kamer s vysokým rozlišením, které jsou umístěny asymetricky na obou stranách zakřivené lišty projektoru. Asymetrické nastavení digitálních kamer zajišťují triangulační úhly (10°, 20° a 30°). Měřicími rozsahy jsou myšleny pozice kamer, které definují základní délku a přibližnou úhlopříčku obrazu. Tímto způsobem se zaznamenají i oblasti jinak těžko přístupné. Tato konfigurace umožňuje maximální výkon s ohledem na pružnost a přesnost měření. Při skenování lze využít otočného stolu s reflexními značkami, pomocí nichž systém vypočítá natočení stolu a seřadí pořízené snímky⁴³.



Obr. 2.28 StereoScan - zorné pole⁴³

Tab. 2.23 Technická specifikace stereoScan⁴³:

Senzor	1.4 MPixel	6.6 MPixel
Hmotnost	6 kg	6 kg
Zdroj světla	100 W halogen	100 W halogen
Počet promítaných pruhů	128	128
Čas měření	0,98 s	6 s
Rozlišení kamery	1384 x 1036 pixel	3000 x 2200 pixel

Tab. 2.24 Dosahovaná přesnost systému při různé velikosti měřeného objektu⁴³:

Zorné pole s triangulačním úhlem 30° Rozestup vnitřních kamer 200 mm a pracovní délka 380 mm			
Úhlopříčka obrazu	60 mm	125 mm	250 mm
Rozlišení v osách X, Y	35 μm	75 μm	150 μm
Rozlišení v ose Z	1,5 μm	3 μm	4 μm
Přesnost	$\pm 7 \mu\text{m}$	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 17 \mu\text{m}$

optoTOP-HE

Optický systém TOP-HE se používají pro velmi přesné bezkontaktní snímání. Systém je k dispozici se třemi vyměnitelnými objektivy pro dosažení většího měřicího rozsahu. Konstrukce z uhlíkových vláken zajišťuje optimální mechanickou a tepelnou stabilitu CCD kamery. Patentovaná MPT projekční jednotka umožňuje mimořádně rychlé získávání dat přibližně za jednu sekundu. Kalibrace může být provedena uživatelem během několika minut pro zajištění vysoké míry přesnosti za všech okolností⁴⁴.

Obr. 2. 29 OptoTOP – HE⁴⁴Tab. 2.25 Technická specifikace senzoru OptoTOP – HE⁴⁴:

Senzor	1.4 MPixel	6.6 MPixel
Hmotnost	2 ÷ 3 kg	6 kg
Zdroj světla	100 W halogen	100 W halogen
Počet promítaných pruhů	128	128
Čas měření	0,98 s	6 s
Rozlišení kamery	1384 x 1036 pixel	3000 x 2200 pixel
Měřicí vzdálenost	30 ÷ 1700 mm	30 ÷ 1700 mm

Tab. 2.26 Dosahovaná přesnost systému při různé velikosti měřeného objektu⁴⁴:

Zorné pole s triangulačním úhlem 30°			
Úhlopříčka obrazu	50 mm	200 mm	800 mm
Rozlišení v osách X, Y	30 μm	120 μm	480 μm
Rozlišení v ose Z	1 μm	4 μm	16 μm
Přesnost	$\pm 7 \mu\text{m}$	$\pm 15 \mu\text{m}$	$\pm 60 \mu\text{m}$

Vlastnosti a výhody⁴⁴:

- Snadná a rychlá instalace kamerových modulů,
- Rychlá změna měřené oblasti,
- Mechanická a teplotní stabilita,
- Barevné mapy odchylek od CAD modelu.

• GOM

Německá společnost GOM vyrábí optické měřicí systémy s hlavním zaměřením na aplikace, jako je 3D digitalizace, 3D souřadnicové měření, kontrolu kvality. Systémy využívají triangulace a digitálního image processingu (metoda pro vylepšení kvality záznamu). Mezi flexibilní optické měřicí stroje patří Atos a Tritop⁴⁵.

Atos

Jedná se o optický mobilní bezkontaktní 3D skener vybavený CCD kamerou. Vysoká výkonnost, velké rozlišení a široký záběr měřicí plochy umožňuje přesný a efektivní sběr dat pro kontrolu kvality výroby, reverzní inženýrství, Rapid Prototyping. Uplatnění tedy nalezne v technologiích CAD, CAM nebo FEM. Proces měření je založen na principech optické triangulace a fotogrammetrii. Při skenování se na objekt umísťují pomocné značky, pomocí kterých systém vypočte pozici měřících senzorů^{16,7,45}.

Obr. 2.30 Optický skener Atos⁴⁵Tab. 2.27 Technická specifikace systému Atos⁴⁵:

Model	ATOS I	ATOS III
Rozměry senzoru [mm]	440 x 140 x 200	490 x 300 x 170
Čas měření [s]	0,8	2
Měřicí rozsah [mm²]	125 x 100 - 800 x 1000	150 x 150-2000 x 2000
Rozteč bodů [mm]	0,12 ÷ 1	0,07 ÷ 1

Vlastnosti a výhody⁴⁵:

- Vysoká teplotní stabilita
- Široký záběr měřicí plochy
- Mobilní systém

Tritop

Je přenosný optický měřicí systém, určený k přesnému bezkontaktnímu souřadnicovému měření. Systém se skládá z digitálního fotoaparátu, notebooku, kalibrační tyče a samolepících značek. Systém se automaticky nastavuje a reguluje a je založený na principech fotogrammetrie. Připravený objekt spolu s kalibrační tyčí je snímán digitálním fotoaparátem z různých pozic v prostoru. Na základě digitálních snímků software vypočítá pozice fotoaparátu

při jednotlivých snímcích a 3D souřadnice měřených bodů na objektu. Dále software umožňuje zobrazení přesnosti měření^{9,16,45}.



Obr. 2.31 Systém Tritop⁹

Tab. 2.28 Technická specifikace systému Tritop⁴⁵:

Konfigurace systému	Tritop
Přenos dat	Bezdrátově nebo flash karta
Kalibrace	automaticky
Měřicí rozsah [m ²]	0,1 x 0,1 ÷ 10 x 10
Provozní teplota	- 40°C ÷ 120°C

Vlastnosti a výhody⁴⁵:

- Flexibilita
 - Vysoká teplotní stabilita
 - Lze měřit i měkké materiály
 - Mobilní a jednoduše ovladatelný systém
 - Měření zahřátých/ochlazených objektů
- **Konica Minolta**
- Japonské přístroje Konica Minolta jsou v oblasti 3D měřicí techniky představitelem především bezkontaktní 3D digitizéry řady Vivid⁴⁷.

VI-9i

Využívá metodu triangulace světla. Je vhodný pro ověření správnosti a tvarové inspekci vnějších obráběných dílů, zápustek, litých dílů, lisovaných plastových částí a prototypů. VI-9i vyžaduje pouze 2,5 sekundy k získání přesných 3D dat. Podle velikosti měřeného cíle se používají tři typy výměnných objektivů. Na snímáný objekt je vysílán laserový paprsek a podle odrazu a doby letu se vyhodnotí vzdálenost a poloha objektu od zařízení. Laserový pruh se pohybuje přes celý objekt a je snímán CCD kamerou. Profil digitalizace dat je přesně reprodukován na vestavěném LCD displeji nebo obrazovce počítače^{10,7,47}.

Obr. 2.32 VI-9i⁴⁷**Vlastnosti a výhody⁴⁷:**

- Vysoká rychlost a přesnost měření
- Vyměnitelné objektivy
- Jednoduchý postup kalibrace
- Mobilní systém

Tab. 2.29 Technická specifikace systému VI-9i⁴⁷:

Metoda měření	Triangulace světla
Hmotnost	15 kg
Rozměry	221 x 412 x 282 mm
Provozní teplota	10°C ÷ 40°C
Rozsah scanneru	0,5 ÷ 2,5 m
Výměnné objektivy	Ohnisková vzdálenost 25 mm Ohnisková vzdálenost 14 mm Ohnisková vzdálenost 8mm
Vstupní rozsah (X, Y, Z)	93 x 69 x 26 mm 1495 x 1121 x 1750 mm
Přesnost	± 0,05 mm
Rozlišení v ose X	± 50 μm
Rozlišení v ose Y	± 50 μm
Rozlišení v ose Z	± 8 μm
Velikost textury	480 x 640 bodů

- **Metronor**

Metronor je norská technologická společnost, zabývající se přenosnými souřadnicovými systémy⁴⁸.

- **Solo**

Je kompletní a skutečně přenosný měřicí systém sestávající z jediné CCD kamery, sondáže, stativu a počítačového systému. Zařízení našlo uplatnění v mnoha oblastech. Od montážní linky přes kontrolu a údržbu po prototyping a deformační analýzu⁴⁸.

Obr. 2.33 Systém Solo⁴⁸**Vlastnosti a výhody⁴⁸:**

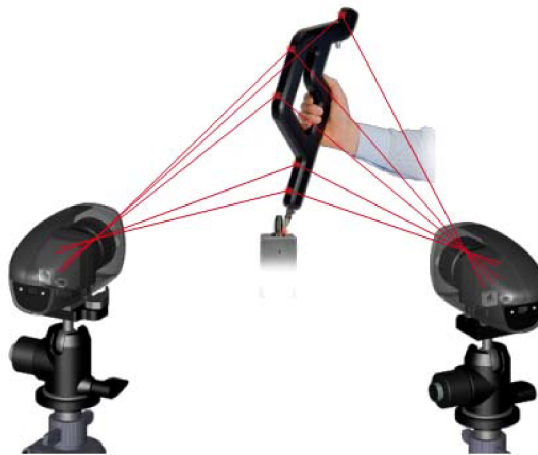
- Rychlé a jednoduché nastavení a použití
- Kompletní systém 24 kg včetně počítače
- Tepelná stabilita
- Měření bez konstrukcí, ramen a drátů
- Odstranění pohyblivých částí
- Lze rozšířit na duo nebo duet
- Přesnost 0,12 mm
- Měřicí rozsah 1,5 x 1,5 x 1,5 mm³

Solo Twin

Je kompletní, přenosný měřicí systém, rozšířený o další CCD kamery. Celkové zorné pole se tímto zdvojnásobilo a rozšířila se oblast využití⁴⁸.

Obr. 2.34 Solo twin⁴⁸

Světelné pero – obr. 2.35 je vyrobeno ze stabilních uhlíkových vláken. Používá se k uchopení sondy. Různě vestavěných světelných zdrojů v peru, využívají kamery pro výpočet polohy sondy v prostoru. Světelná pera rozšiřují měřicí rozsah až na 30 m od kamery⁴⁸.



Obr. 2.35 Světelné pero v systému Duo⁴⁸

Vlastnosti a výhody⁴⁸:

- Rychlé a jednoduché nastavení a použití
- Vysoké přesnost pro velké objekty
- Tepelná stabilita
- Měření bez konstrukcí, ramen a drátů
- Odstranění pohyblivých částí
- Zorné pole 70°
- Vhodný pro úzké a špatně dostupné prostory

• Renishaw

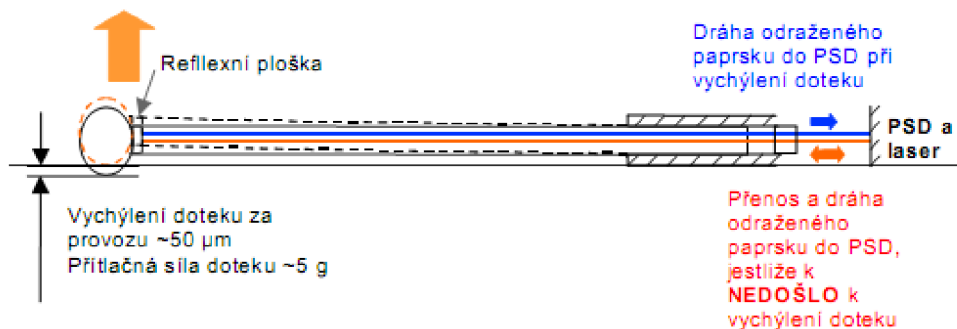
Pro úplnost přehledu, který má tato diplomová práce za cíl, uvádím technicky jedinečný systém, který využívá kontaktního způsobu skenování, využívající uvnitř laserový paprsek.

Britská společnost Renishaw nabízí jedinečnou řadu spínacích dotekových a kontaktních skenovacích měřících systémů pro souřadnicové měřící stroje. Spínací dotekové sondy snímají nespojitě body na povrchu dílce. Kontaktní skenovací systémy měří vychylováním doteku sondy a zaznamenávají velké množství dat z povrchu dílce a tím poskytují, přesnější informace o tvaru a profilu obrobku. Skenovací sondy jsou miniaturní kontaktní měřící stroje s lehkými pasivními mechanismy, které dokážou každou sekundu nasnímat stovky bodů z povrchu a umožní tak, přesné zjištění tvaru, velikosti a polohy⁴⁹.

Pěti-osé skenování:

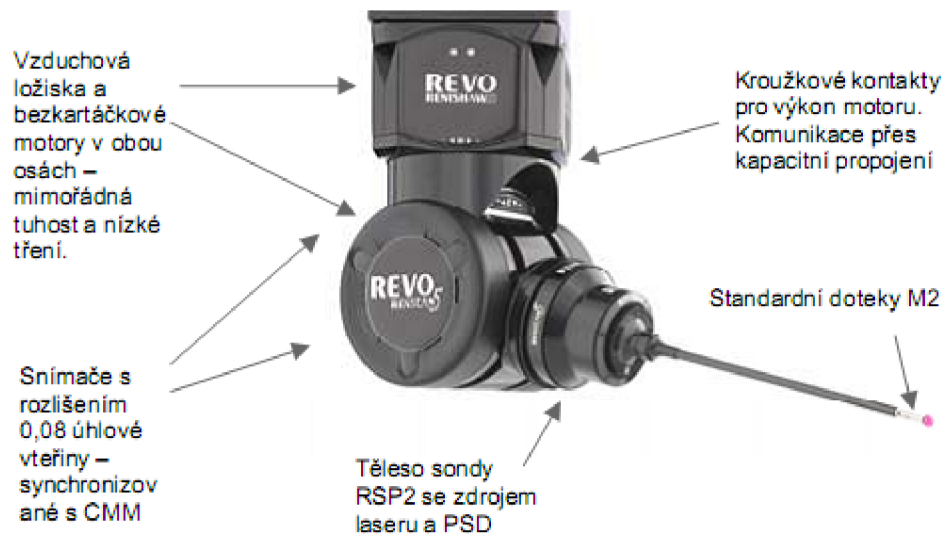
Renscan5 je nová technologie snímacího systému souřadnicových měřících strojů a je k dispozici pouze s řídicím programem. Využívá synchronizovaného pohybu os souřadnicového měřícího stroje a hlavičky. Funguje tak, že dotekový snímač je připevněn k dvuosé servomotorové polohovací hlavičce, která se natáčí všemi směry. Držák doteku je dutý a je vyroben z uhlíkových vláken. Středem držáku je veden laserový paprsek do reflektoru umístěného ihned za špičkou doteku. Odražený paprsek se vrátí do držáku hrotu a pomocí detektoru citlivosti (PSD), umístěném v servomotorové hlavičce se zaostří. Jakmile se špička doteku dostane do styku s povrchem, držák doteku se mírně prohne, což způsobí, že laserový paprsek se na detektoru citlivosti posune. Systém poté nastaví všech 5 os (3 osy stroje a 2 osy otočné hlavičky) k zachování

konstantního vychýlení laserového paprsku maximálně 110 μm na detektoru citlivosti^{49,50}.



Obr. 2.36 Princip měření hlavice REVO⁴⁹

REVO – je první hlavice používající technologii Renscan5. Seřizovací čas vyžaduje jednu kalibrační operaci v trvání 20 minut. Zvládá identické operace, jaké se běžně provádí s konvenčními spínacími dotekovými nebo tříosými skenovacími sondami. Od tříosého skenování se vyznačuje vyšší rychlostí, přesností a tím i úsporou času⁴⁹.



Obr. 2.37 Popis polohovací hlavice Renscan5⁴⁹



Obr. 2.37 Aplikace skenování⁵⁰

Výhody a přednosti⁵⁰:

- Minimalizace pohybu souřadnicového měřicího stroje a vznik dynamických chyb,
- Rychlost měření až 500 mm/s vede k nárůstu výkonnosti,
- Neomezené polohování a pohyb v pěti osách,
- Minimální opotřebení sondy díky mimořádně nízkým skenovacím silám,
- Maximální dosah až 500 mm se zachovanou efektivní účinnou délkou,
- Rychlá kalibrace všech poloh znamená více času pro měření.

3 VÝBĚR OPTIMÁLNÍCH PŘEDSTAVITELŮ MECHANICKÝCH A OPTICKÝCH SNÍMAČŮ A JEJICH SROVNÁNÍ

Základní kritériem pro rozhodování, jaký snímací systém pro daný CMM a danou úlohu měření použít, je dostupnost snímaných bodů a možnost jejich měření dotykovým nebo optickým způsobem.

Rozdíl v dostupnosti měřených bodů lze spatřit mezi bodem plochy, případně otvorem např. v blatníku automobilu na straně jedné a otvorem v bloku motoru s průměrem několik mm a hloubkou v několika desítkách mm na straně druhé. Jeví se jako logické, že bod plochy blatníku nebo geometrický element, v tomto případě otvor v blatníku je snadno dostupný pro optický snímač (skener, fotogrammetrie). Na druhé straně změřit průměr otvoru o průměru např. 4 mm v hloubce 100 mm, k čemuž je zapotřebí sejmut nejmeně 3 body na kružnici, je pomocí skenování nebo fotogrammetrie za současných technických možností s uspokojivou přesností nemožné.

Možnost měření bodů dotykem je omezená nebo vyloučená při měření horkých objektů (odlitky s teplotou ve stovkách stupňů Celsia) nebo při měření objektů z měkkého materiálu, který by se dotykem i s relativně malou silou dotyku deformoval, například výplň sedačky z molitanu. Ne nevýznamnou roli hrají podmínky prostředí, kdy například v prašném prostředí jsou možnosti spolehlivé funkce optiky limitovány.

Výběr optimálních představitelů nelze tedy jednoduše provést. Každý systém je vhodný pro určité měřicí nebo digitalizační postupy a podmínky, v nichž se tyto výkony provádí. Při hodnocení vhodnosti měřicího systému vycházíme z výsledné přesnosti celého systému. Tato přesnost je definována pro určité konstantní podmínky vnějšího prostředí.

K základním parametrům, pomocí kterých lze kvantifikovat měřicí i snímací systém patří¹:

- Přesnost měření - Rozlišitelnost
 - Největší dovolená chyba měřidla
 - Nejistota měření
- Opakovatelnost měření
- Reprodukovatelnost měření

Přesnost měření: je vyjádřena jako těsnost shody mezi výsledkem měření a pravou hodnotou měřené veličiny. Jedná se o kvalitativní pojem, který se nedá přímo kvantifikovat. Je jedním z hodnotících parametrů kvality měřidla a je definován pro určité konstantní podmínky: vnější prostředí (teplota, tlak, vlhkost, atd.) včetně kvalifikace pozorovatele¹. Přesnost měření a měřidla kvantifikujeme pomocí následujících parametrů: rozlišitelnosti, nejistoty měření a největší dovolené chyby.

* Rozlišitelnost: je kvantitativní vyjádření nejmenší možné vzdálenosti, kterou je dané měřidlo schopno rozlišit¹.

- * Největší dovolená chyba měřidla: jedná se o extrémní hodnotu chyby daného měřidla povolenou specifikacemi, normou, garancí výrobce¹.
- * Nejistota měření: charakterizuje rozsah hodnot, v němž leží pravá hodnota měřené veličiny s danou pravděpodobností. Jinak vyjádřeno, je to parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině^{1,2}.

Podle druhu nejistot rozeznáváme standardní nejistotu u ¹:

- typu A (u_A) získanou z opakovaných měření jako směrodatná odchylka
- typu B (u_B) získanou jinými způsoby

Kombinovaná standardní nejistota u_c ¹:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3.1)$$

Parametrem nejistoty měření může být např. směrodatná odchylka (nebo její daný násobek)¹.

Aritmetický průměr¹:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.2)$$

Směrodatná odchylka jednoho měření¹:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (3.3)$$

Směrodatná odchylka z opakovaných měření¹:

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} = u_A \quad (3.4)$$

Podle definice největší dovolené chyby žádný výsledek měření provedený za daných podmínek nesmí mít chybu větší, jak je největší dovolená chyba. To odpovídá 100% pravděpodobnosti na rozdíl od toho je nejistota měření definována pro pravděpodobnost 95% příp. 99%. To znamená, že pro stejné měřidlo je největší dovolená chyba vždy významově menší než nejistota měření².

Většina výrobců souřadnicových měřících strojů a snímacích systémů udává přesnost měření, což pod tímto pojmem může být myšlena největší dovolená chyba měření nebo nejistota měření. Budeme tedy předpokládat, že přesnost měření udávaná výrobcem, je totožná s největší dovolenou chybou a patří před ní znaménko \pm ².

Opakovatelnost: je těsnost shody mezi výsledky po sobě následujících měření s danou pravděpodobností, provedených za stejných podmínek. Do podmínek opakovatelnosti se zahrnuje: tentýž postup měření, tentýž pozorovatel, tentýž měřicí stroj, totéž místo, opakování v průběhu krátké časové periody¹.

Reprodukovatelnost: je těsnost shody mezi výsledky měření téže veličiny provedenými za změněných podmínek měření. Mezi tyto podmínky lze zahrnout: princip měření, metodu měření, pozorovatele, měřicí přístroj, referenční etalon, místo, podmínky, čas¹.

Přesnost měřicího systému je ovlivněna řadou dílčích faktorů, které mají na celkovou přesnost systému podstatný vliv. K primárním a uživatelem neovlivnitelným faktorům patří konstrukce CMM a přesnost snímacího systému.

Prvním faktorem je konstrukce CMM. Za současného stupně poznání, uplatněného při výrobě CMM, jsou za nejpřesnější 3D souřadnicové měřicí stroje, považovány precizní stroje portálové (nebo od ní odvozené) konstrukce, následovány CMM sloupové konstrukce a CMM mobilními (přenosnými). Druhý faktor je přesnost snímacího systému. Na rozdíl od vlastního CMM lze volit kombinaci snímání dotykového a optického na téže CMM, dokonce s možností automatické výměny snímačů (u CNC strojů). U stacionárních CMM lze přesnost zlepšit pomocí programové korekce přesnosti CAA (Computer Aided Accuracy).

Tyto charakteristiky jsou kvantifikovány určitými hodnotami, které lze srovnat s požadavkem – potřebou měření a podle toho provést volbu konkrétního systému. U optických snímacích systémů k výše uvedeným charakteristikám přistupuje ještě počet snímaných bodů v daném časovém intervalu, například za sekundu, případně další charakteristiky. Co je vhodné při posuzování množství snímaných bodů zohlednit je fakt, zda se jedná o reálné body či body aproximované, tedy proložené matematicky mezi body reálně nasímanými.

Přesnost snímacího systému, ať už dotykového nebo optického, musí být stanovená předem. Například pro precizní CMM s přesností měření řádově v několika μm je třeba zvolit vhodný snímač od daného výrobce. Z hlediska čistě pragmatického, vedle co možná nejlepší kvantifikace charakteristik snímacího a měřicího systému, je vhodné zjistit reference na dané zařízení. U referenčního uživatele, co nejobsáhleji zjistit, jak daný snímací a měřicí systém výrobcem či prodejcem deklarované parametry splňuje, a jak je zajištěn servis.

Pokud se volba vlastního CMM ukáže jako špatná, nezbyvá než zvolený CMM anebo snímací systém nahradit přesnějším. Což znamená nové investice, a obvykle ne malé.

4 NÁVRH METODIKY PRO OBJEKTIVNÍ VÝBĚR VHODNÉHO TYPU SNÍMAČE, PŘÍPADNĚ OPTICKÉHO CMM

Metodika objektivního výběru vhodného typu snímače případně optického CMM musí vycházet ze základních charakteristik jakosti těchto systémů.

Tyto charakteristiky je možné rozdělit na 2 skupiny a sice:

- Obecně platné
- Speciální

4.1 Charakteristiky jakosti snímacích systémů:

Charakteristiky obecně platné budou vyhodnocovány pro každý typ snímače a způsob použití.

Charakteristiky speciální budou záviset na požadavcích na měřicí proces vzhledem ke speciálním podmínkám měření a dalších požadavcích.

Obecně platné charakteristiky jakosti snímacích systémů:

Pro objektivní srovnání budou obecně platné charakteristiky jakosti snímacích systémů definovány při referenčních podmínkách měření tj. v podmínkách při kalibraci.

Přesnost systému – je hodnocena pomocí největší dovolené chyby v mikrometrech.

Rozlišitelnost – je charakterizovaná číselnou hodnotou v mikrometrech.

Opakovatelnost – je charakterizovaná číselnou hodnotou, nejčastěji rozpětím (největší hodnota – nejmenší hodnota).

Reprodukovatelnost – charakterizuje jakosti systému, vzhledem k vlivu operátora. Jedná se o rozpětí středních hodnot výsledků měření prováděných různými operátory.

Velikost snímaného pole (šířka) - ukazatel má významný dopad na produktivitu práce systému. Vyšší hodnota je obvykle spojená s menší (horší) přesností. Je charakterizovaná číselnou hodnotou v milimetrech.

Rychlost snímání (skenování) – je charakterizovaná číselnou hodnotou v nasnímaných bodech za sekundu.

Vzdálenost od měřeného objektu – charakterizuje nejmenší a největší rozmezí vzdáleností od měřeného povrchu, přičemž toto rozmezí pásma by mělo být co největší. Tato charakteristika je významná pro ruční měření, například kloubovým ramenem. Je charakterizována číselnou hodnotou v milimetrech.

Hustota snímaných bodů (reálných bodů) - charakterizovaná číselnou hodnotou počtem nasnímaných bodů.

Speciální charakteristiky snímacích systémů:

Speciální charakteristiky vyjadřují jakost systému vzhledem k jeho univerzálnosti případně speciálních požadavků k ceně, dostupnosti atd.

Tyto charakteristiky se nedají kvantifikovat, proto jejich vliv na jakost je hodnocena stupnicí 1 až 5.

1 – nejvyšší jakost

5 – nejnižší jakost

Mobilita systému - významná je hmotnost systému, kterou je nutné přemístit. Subjektivní hodnocení – lze hodnotit ano – ne, lze přiřadit ano hodnotě 1 a ne hodnotě 5.

Potřeba přímé viditelnosti stacionární a mobilní části - charakteristiku lze hodnotit ano – ne, lze přiřadit hodnotě 1 ano a hodnotě 5 ne.

Universálnost – možnost nasadit snímací hlavici na stacionární CMM i na kloubové měřicí rameno - charakteristiku lze hodnotit ano – ne, lze přiřadit ano hodnotě 1 a ne hodnotě 5.

Schopnost sejmout různou kvalitu povrchu (reflexe a pod.) - subjektivní hodnocení, lze hodnotit ano – ne, lze přiřadit ano hodnotě 1 a ne hodnotě 5.

Schopnost pracovat v různých podmínkách prostředí - subjektivní hodnocení, lze hodnotit ano – ne, lze přiřadit ano hodnotě 1 a ne hodnotě 5.

Kvalita, cena a četnost nutného servisu - hodnocení od nejvyšší hodnoty 1 (nejlepší) po nejnižší hodnotu 5 (nejhorší).

Dostupnost náhradních dílů - Subjektivní hodnocení, lze hodnotit dobrá – špatná, lze přiřadit hodnotě 1 dobrá a hodnotě 5 špatná.

Četnost nutné kalibrace - perioda mezi nutnými kalibracemi, které předepisuje výrobce a jejíž délka je uživatelem neovlivnitelná. Kalibrace výrobcem není pravidelně potřebná – přiřazena hodnota 1, nejvyšší četnost kalibrace – přiřazena hodnota 5.

Komplikovanost a dostupnost kalibrace - subjektivní hodnocení údaje uvedeného výrobcem/prodejcem, zohlednění informací referenčních uživatelů. Subjektivní přiřazení hodnoty 1 až 5.

Další charakteristika podle speciálních požadavků – slovní výsledné hodnocení atd.

Pro objektivní výběr vhodného typu snímače případně optického CMM byla navržena přehledná tabulka, která je na obr. 4.1

Uplatnění všech výše uvedených hledisek není jednoduše možné. Je nutno stanovit priority podle charakteru nasazení měřicího systému, a jim přizpůsobit výběr. Optimalizaci lze provést při výběru srovnatelného výrobku. Například skenovací hlavice, která má být nasazena na stacionární CMM, se dá podle uvedeného přehledu vybírat z produktů 4 výrobců. I v tomto případě je třeba stanovit prioritu, kterou v každém případě nemusí být jen nejnižší cena. Mohlo by přicházet v úvahu srovnání cena - výkon, ale i za výkon je třeba dosadit vhodnou charakteristiku. Může jí být přesnost, hustota skenování, vzdálenost od měřeného povrchu či šířka skenovaného pole.

Za významnou charakteristiku lze považovat produktivitu práce systému, která je například poplatná šířce skenovacího pásu nebo velikosti zorného pole. Naopak u určité úlohy může být nejvýznamnější mobilita systému, která může zahrnovat více nebo méně komplikované přemístění. Tomu budou poplatné časové prodlevy mezi jednotlivými měřeními.

Hodnocení snímacích systémů			
Výrobce, typ	1.		
	2.		
	3.		
Obecně platné charakteristiky	Výrobce, typ		
	1.	2.	3.
Nejistota měření [μm]			
Největší dovolená chyba [μm]			
Opakovatelnost			
Rozlišitelnost			
Rychlost snímání (skenování) [bodů/s]			
Velikost snímaného pole [mm]			
Vzdálenost od měřeného objektu [mm]			
Hustota snímaných bodů [bodů]			
Speciální charakteristiky snímacích systémů			
Mobilita systému			
Viditelnost stacionární a mobilní části			
Univerzálnost			
Kvalita nasnímaného povrchu			
Práce v různých podmínkách prostředí			
Kvalita, cena a četnost nutného servisu			
Dostupnost náhradních dílů			
Četnost kalibrace			
Komplikovanost a dostupnost kalibrace			
Další charakteristika podle speciálních požadavků			
Výsledné hodnocení (průměr)			
Výsledek hodnocení:			
Datum:	Vypracoval:	Podpis:	

Obr. 4.1 Tabulka hodnocení snímacích systémů

Pokud budoucí uživatel nedisponuje potřebnými zkušenostmi nebo znalostmi, je vhodné oslovit vhodnou poradenskou firmu, která optimalizaci výběru může provést.

ZÁVĚR

Pokrok v poznání vědy a techniky přináší nové poznatky do praxe a z tohoto důvodu lze očekávat stále novou nabídku nových a dokonalejších systémů. Kritéria pro jejich srovnání a výběr systémů, uvedená v této práci, budou platná i nadále.

Obecně bude i nadále platit, že nejlevnější zařízení nemusí splňovat všechny charakteristiky pro efektivní využití daného zařízení, a tedy nemusí být optimální pro daný účel. Podle praktických zkušeností uživatelů zjištění referenčních informací bude i nadále hrát významnou roli jako doplňující informace pro rozhodování. Snaha prodejců těchto sofistikovaných zařízení v některých případech znamená pro uživatele nedostatek informací potřebných pro skutečně objektivní posouzení daných vlastností, neboť prodejce zdůrazňuje informace pro jeho účel – prodej – pozitivní, a problémy existující či potenciální zamlčí. Počet výrobců s postupem času a s novými poznatky roste. Některá zařízení jsou však z hlediska využití omezená, především rozsahem měření při zachování přijatelné přesnosti měření.

Prvním rozhodujícím kritériem, od kterého se volba musí vždy odvíjet, je požadovaná přesnost výsledků měření.

Druhé významné kritérium je tvar a povrch měřeného dílu, a to z hlediska dostupnosti měřených bodů pro optický snímací systém, a z hlediska vlastností povrchu pro optické snímání.

Třetím z významných kritérií je rozsah měření. Zřejmě jiný systém bude vhodný pro měření komponent mobilního telefonu a jiný pro měření na smontovaném letadle.

Další kritéria, v této práci uvedená, mají případ od případu větší či menší váhu, nebo vůbec nemusí přicházet v úvahu, a je nutné konkrétní případ nasazení měřicího systému posuzovat individuálně. Jinak vyjádřeno nelze sestavit zcela univerzální tabulku a metodiku, která by poskytla jasné srovnání celé palety systémů, které trh nabízí. Při srovnávání jednotlivých systémů je nutno též důsledně srovnávat stejné parametry těch zařízení, která takové parametry mají definované.

V této práci uvedená nabídka snímacích a měřicích systémů, využívajících optických principů, je poměrně široká a je schopná pokrýt, a v praxi pokrývá, veškeré potřeby měření v širokém počtu oborů. Nové dokonalejší systémy, alespoň v kratším horizontu několika roků, budou přinášet zdokonalení, která budou zvyšovat produktivitu práce systémů. S využitím všech informací, které tato práce poskytuje, by případný uživatel mohl mít volbu systému s optickými principy měření snazší.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ČECH, J., PERNIKÁŘ, J., PODDANÝ, K. *Strojírenská metrologie*. 4. Přepřacované vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005.176s. ISBN 80-214-3070-2
2. PERNIKÁŘ, J., TYKAL, M. *Strojírenská metrologie II*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-2.
3. ČSN 01 0115 *Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii* (opis normy ke studijním účelům)
4. ČSN EN ISO 10360-1 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 1: Slovník*
5. PAVELKA, K., HODAČ, J. *FOTOGrammetrie 3*. 1 vyd. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008. 187 s. ISBN 978-80-01-03978-6
6. NEUMANN, H.J., CHRISTOPH, R. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika*. 4 přepřacované a rozšířené vydání. Uherské Hradiště: L.V. Print, 2008. 108 s.
7. SKOUPÝ, P. *3D optické měřicí a skenovací systémy pro strojírenství*. [CD-ROM], Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 64 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Paloušek.
8. Metrologic Group. *Introduction on Advanced 3D Inspection Software*. [počítačový soubor, CD-ROM], c2007, [cit. 2009-04-23]. 31s.
9. NAVRÁTIL, Robert. *3D skenery* [online]. c2000, [cit. 2009-02-19]. <<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/index.html>>.
10. TIŠNOVSKÝ, P. *Bezkontaktní digitalizace předmětů pomocí 3D scanneru Minolta Vivid VI-700*. [online]. c2002, [cit. 2009-04-22]. <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03013/kap_2.htm>
11. Optical Metrology Centre. *OMC Technical Brief – Laser Tracker* [online]. c2001, [cit. 2009-04-24]. <http://www.optical-metrology-centre.com/Downloads/Tech_Briefs/TechBrief_LaserTracker.pdf>
12. Quality Digest Magazine. *Laser trackers: A New Breed of CMM* [online]. c1998, [cit. 2009-04-24]. <<http://www.qualitydigest.com/feb98/html/lasertrk.html>>
13. Handyscan 3D. *Technické informace* [online]. c2002, [cit. 2009-04-24]. <<http://www.handyscan.cz>>
14. Ustav mechaniky a materiálů. *Tvorba modelu přilby z 3D skenování* [online]. c2000-2008, [cit. 2009-04-24]. <<http://mech.fd.cvut.cz/presentation/other/tvorba-modelu-prilby-z-3d-skenovani>>
15. Smart Technologies. *Popis procesu digitalizace* [online]. c2009, [cit. 2009-04-26]. <<http://www.smart-tech.cz/cz/digitalizace/>>

16. MCAE Systems. *TRITOP Configuration - MCAE Systems* [online]. c2007, [cit.2009-04-11].
<<http://www.mcae.cz/katalog.php?lang=cs&id=167>>.
17. Photogrammetry and Remote Sensing. *Recording and modeling of cultural heritage objects with coded structured light projection systems* [online]. c2006, [cit.2009-04-28].
<http://www.photogrammetry.ethz.ch/general/persons/devrim/2006IT_Akca_etal_Rome06.pdf>
18. Geodetic Systems Inc. *Picture Perfect Measurements* [online]. c2005, [cit.2009-04-30].
<<http://www.geodetic.com/products/products.asp?vstars-s8.htm>>
19. Prima Bilavčík. *Souřadnicové přístroje* [online]. c2002, [cit.2009-02-10].
<<http://www.merici-pristroje.cz/souradnicove.php?txt=030403&lg=CZ&in=1>>
20. Faro. *FARO Laser ScanArm V3* [online]. c2008, [cit.2009-03-01].
<http://www.faro.com/FaroIP/Files/File/Techsheets%20Download/UK_FARO_ScanArmV3_TechSheet.pdf>
21. Faro. *FARO Laser Tracker Xi* [online]. c2008, [cit.2009-02-15].
<http://www.faro.com/FaroIP/Files/File/Techsheets%20Download/UK_LASER_TRACKER_Xi.pdf.PDF>
22. Metris. *Metris LC60D Laser Scanner Revolutionizes Digital Inspection* [online]. c 2008, [cit.2009-03-01].
<http://www.metris.com/products/cmm_scanners/lc60d_digital_scanner/>
23. Metris. *XC50 Cross Scanner* [online]. c2008, [cit.2009-03-01].
<http://www.metris.com/industries/application_case_studies/cmm_scanners/xc50_cross_scanner/>
24. Metris. *Laser Radar – Automated* [online]. c2009, [cit.2009-02-22].
<http://www.metris.com/large_volume_metrology/laser_radar/>
25. Metris. *Large Volume Tracking & Positioning – Large Scale Metrology* [online]. c2009, [cit.2009-04-03].
<http://www.metris.com/large_volume_tracking__positioning/>
26. Metris. *ModelMaker Scanners MMD/MMC* [online]. c2008, [cit.2009-03-01].
< http://www.metris.com/handheld_scanners/modelmaker_d/>
27. Kreon. *Solano - Kreon Technologies* [online]. c2008, [cit.2009-03-05].
<<http://www.kreon3d.com/english/solano/>>
28. Kreon. *Aquilon - Kreon Technologies* [online]. c2008, [cit.2009-03-05].
< <http://www.kreon3d.com/english/aquilon/>>
29. Kreon. *Zephyr KZ 50 - Kreon Technologies* [online]. c2008, [cit.2009-03-05].
< <http://www.kreon3d.com/english/zephyr-kz-50/>>
30. Datapixel. *Non-Contact Optical Sensor & Machine Vision Sensor – OptiScan H-Class/HR* [online]. c2009, [cit.2009-03-05].

- <http://www.datapixel.com/English/components_CMM2.php>
31. Datapixel. *Non-Contact Optical Sensor & Machine Vision Sensor – OptiScan S/SD-Class* [online]. c2009, [cit.2009-03-05].
<http://www.datapixel.com/English/components_Line.php>
 32. Perceptron. *Perceptron ScanWorks Downloads – V4i* [online]. c2009, [cit.2009-03-06].
<<http://www.perceptron.com/downloads.asp>>
 33. Perceptron. *Perceptron ScanWorks Downloads – V5* [online]. c2009, [cit.2009-03-06].
<<http://www.perceptron.com/downloads.asp>>
 34. Romer. *Romer G-Scan RX2* [online]. c2009, [cit.2009-03-14].
<http://romer.eu/romer-g-scan-rx2_647.htm>
 35. Carl Zeiss. *LineScan Optical Sensor* [online]. c2007, [cit.2009-03-24].
<<http://www.zeiss.com/imt>>
 36. Leica – Geosystems. *Laser Tracker systems – Leica Geosystems* [online]. c2009, [cit.2009-02-22].
<http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/lgs_69045.htm>
 37. Leica – Geosystems. *Leica Absolute Tracker – All New Groundbreaking Laser Tracker Systems - Leica Geosystems* [online]. c2009, [cit.2009-02-22].
<http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/lgs_69047.htm>
 38. Automated Precision Inc. *Tracker3 – Laser Tracking Systems* [online]. c2007, [cit.2009-02-16].
<<http://www.apisensor.com/tracker3.html>>
 39. Automated Precision Inc. *API Omnitrac – Laser Tracking Systems* [online]. c2007, [cit.2009-02-16].
<<http://www.apisensor.com/omnitrac.html>>
 40. Creaform. *Handyscan Handheld 3D Scanners* [online]. c2008, [cit.2009-02-25].
<<http://www.creaform3d.com/en/handyscan3d/default.aspx>>
 41. Steinbichler Optotechnik. *Steinbichler Optotechnik - Kompetenz in optischer Mess- und Sensortechnik* [online]. c2007, [cit. 2009-02-19].
<http://www.steinbichler.de/de/main/t-scan_2.htm>
 42. Steinbichler Optotechnik. *Steinbichler Optotechnik - Kompetenz in optischer Mess- und Sensortechnik* [online]. c2007, [cit. 2009-02-19].
<<http://www.steinbichler.de/de/main/comet5.htm>>
 43. Breuckmann. *stereoSCAN 3D- das Messsystem für höchste Ansprüche* [online]. c 2007, [cit. 2009-02-26].
<<http://www.breuckmann.com/index.php?id=stereoscan>>
 44. Breuckmann. *optoTOP-HE-specs.pdf* [online]. c2007, [cit. 2009-02-26].
<<http://www.breuckmann.com/index.php?id=optotop-he>>

45. GOM. *GOM - Measuring Systems - ATOS* [online]. c2007, [cit. 2009-02-21]. <<http://www.gom.com/EN/measuring.systems/atos/system/system.html>>
46. GOM. *GOM - Measuring Systems - TRITOP* [online]. c2007, [cit. 2009-02-21]. <<http://www.gom.com/EN/measuring.systems/tritop/system/system.html>>
47. KONICA MINOLTA. *Introduction - VI-9i non-contact 3D digitizer* [online]. c2009, [cit. 2009-02-21]. <<http://www.konicaminolta.eu/measuring-instruments/products/for-3d-measurement/non-contact-3d-digitizer/vi-9i/introduction.html> >
48. Metronor. *Metronor CMM – Products – Portable CMM* [online]. c2007, [cit. 2009-04-14]. <<http://www.metronorcmm.com/default.asp?menu=3&page=1>>
49. Renishaw. *Renscan5* [online]. c2009, [cit. 2009-04-28]. <<http://www.renishaw.cz/cs/6658.aspx#tocTarget0>>
50. Renishaw. *Welchome to measurement revolution - Renscan5* [online]. c2009, [cit. 2009-04-28]. <<http://www.renscan5.com/en/6057.aspx>>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Anglický význam	Český význam
2D	2-dimensional	Dvourozměrný
3D	3-dimensional	Trojrozměrný
ADM	Absolute Distance Measurement	Absolutní měření vzdálenosti
CAA	Computer Aided Accuracy	Programová korekce přesnosti
CAD	Computer Aided Design	Počítačová podpora konstruování
CAI	Computer Aided Inspection	Počítačová kontrola kvality
CAM	Computer Aided Manufacturing	Počítačem podporovaná výroba
CCD	Charge Coupled Device	Snímač s vázanými náboji
CMM	Coordinate Measuring Machine	Souřadnicový měřicí stroj
CNC	Computer Numeric Control	Počítačem řízený stroj
FEM	Finite Elements Metod	Metoda konečných prvků
GPS	Global Positioning Systém	Systém určování polohy
IFM	Interaction Free Measurement	Přímé měření vzdálenosti
MPE	Maximum Permissible Error	Největší dovolená chyba
MTP	Miniature Projection Technique	Miniaturní promítací technika
PSD	Position Sensor Detectors	Senzor citlivosti
TOF	Time of Flight	Měření času doletu paprsku
u_A	$[\mu\text{m}]$	Standardní nejistota typu A
u_B	$[\mu\text{m}]$	Standardní nejistota typu B
u_C	$[\mu\text{m}]$	Kombinovaná standard. nejistota
n	$[-]$	Počet měření
$s_{\bar{x}}$	$[\mu\text{m}]$	Směrodatná odchylka
\bar{x}	$[-]$	Výběrový průměr
x_i	$[-]$	Jednotlivá měření