

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

## METODY 3D SKENOVÁNÍ OBJEKTŮ

3D SCANNING METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN ČERMÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. TOMÁŠ MARADA, PH.D.

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jan Čermák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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 bakalářské práce:

### **Metody 3D skenování objektů**

v anglickém jazyce:

#### **3D scanning methods**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D optické skenování je v podstatě převedení fyzického objektu do počítačových dat za použití 3D skeneru. V porovnání s dotykovými měřicími systémy optický skener snímá najednou celou plochu. Po nasnímání objektu vytvoří počítačový model a umožní tak jeho následný export do různých datových formátů. Další funkcí optického skenování je porovnání fyzického objektu s teoretickým CAD modelem a vyhodnocení odchylek tvaru a polohy. Cílem této bakalářské práce je vypracování rešerše popisující různé metody skenování 3D objektů.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s metodami 3D skenování.
2. Proveďte popis a porovnání vybraných metod 3D skenování.

Seznam odborné literatury:

[1] [http://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_scanner](http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner)

[2] <http://geo.fsv.cvut.cz/proj/dp/2012/jaroslav-sedina-dp-2012.pdf>

[3] <http://www1.cs.columbia.edu/~allen/PHOTOPAPERS/pipeline.fausto.pdf>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 23.11.2014

L.S.

---

Ing. Jan Roupec, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato práce se v první části zabývá rozdělením 3D skenerů, vysvětluje některé principy jejich fungování. V druhé části jsou podrobněji rozebrány některé metody, konkrétně jsou to 3D skenování za pomoci laserové technologie a 3D skenování využívající strukturované světlo. U obou těchto metod je popsán postup procesu měření a jsou srovnány některé komerčně dostupné skenery. V závěru jsou tyto dvě metody porovnány.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

3D, skenování, laser, strukturované světlo

## **ABSTRACT**

In the first part of this thesis there is a task of taxonomy of the 3D scanners. It explains some principles of the 3D scanners functioning. Then in the second part there are described two particular technologies of the 3D scanning in the more complex way. In the chapters of both of these methods there is described procedure of scanning and compared several commercially available sensors. In the end there is comparison of these two methods.

## **KEYWORDS**

3D, scanning, laser, structured light

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ČERMÁK, J. *Metody 3D skenování objektů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Tomáši Maradovi, Ph.D. za jeho trpělivost během vypracování této práce.

### PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Metody 3D skenování objektů** vypracoval samostatně za použití literárních zdrojů a pramenů uvedených v seznamu použité literatury.

V Brně dne .....

.....

Podpis





**Obsah:**

	<b>Zadání závěrečné práce.....</b>	<b>3</b>
	<b>Abstrakt.....</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>3D SKENERY.....</b>	<b>13</b>
2.1	Rozdělení 3D skenerů.....	13
2.1.1	Kontaktní skenery.....	14
2.1.2	Bezkontaktní skenery.....	16
2.2	Metody Digitalizace.....	18
2.2.1	Měření doby letu světla (Time-of-flight).....	18
2.2.2	Optická interferometrie.....	18
2.2.3	Triangulace.....	18
<b>3</b>	<b>Laserové skenování.....</b>	<b>23</b>
3.1	Laserové skenery využívající dobu letu světla.....	23
3.2	Vliv vlnové délky.....	24
3.3	Postup při měření budov [14].....	24
3.4	Omezení.....	25
3.5	Triangulační skenovací systémy.....	26
<b>4</b>	<b>Strukturované světlo.....</b>	<b>29</b>
4.1	Princip funkce 3D skenování s využitím strukturovaného světla.....	29
4.2	Postup procesu měření 3D skenerem strukturovaného světla [22].....	30
4.3	Kalibrace.....	31
4.4	Přesnost a dosah.....	31
4.5	Navigace.....	32
4.6	Omezení.....	33
4.7	Dělení podle struktury promítaných vzorů.....	34
4.7.1	Temporální kodifikace.....	36
4.7.2	Prostorová kodifikace.....	36
4.7.3	Přímá kodifikace.....	36
4.8	Konkrétní dostupné 3D skenery využívající strukturované světlo.....	37
<b>5</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>39</b>
	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>VYSVĚTLENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>43</b>



## 1 ÚVOD

3D skenování již dávno není novou technologií. Využívání 3D skenování zasahuje do čím dál širšího okruhu odvětví jako např. architektura, archeologie, filmové efekty, počítačové hry, strojírenství, lékařství. Ve spojení s 3D skenerem dávají tyto technologie nečekané možnosti využití jako jsou například různé čelistní, pánevní nebo lebeční náhrady přímo na míru pacienta. Je možné také archivovat ohrožené památky pro budoucí generace, nebo naopak pomocí 3D skenování je možné rekonstruovat různá historická obydlí podle vykopávek. Nedílnou součástí jsou 3D skenery v oblasti geodetického měření, digitalizace budov, kontrole kvality nebo zabezpečovacích systémů. V této práci se budu nejprve zabývat souhrnným rozdělením různých technologií využívaných pro 3D skenování nebo měření. Je mnoho způsobů, jak tyto metody dělit. Například první základní dělení můžeme provést na kontaktní a bezkontaktní, nebo na destruktivní a nedestruktivní. Kontaktní metody mohou být jak destruktivní, tak nedestruktivní. Stejně tak nedestruktivní metody jsou jak kontaktní, tak bezkontaktní. Podle některých zdrojů je možné bezkontaktní reflektivní metody dělit na optické, laserové a ostatní. Laserové metody lze však zařadit do optických metod využívající metodu doby letu světla a triangulace. Výsledkem tohoto byla přehledná taxonomie nepoužívanějších metod. V textu se však poté objevuje i porovnání metod, které se do toho rozdělení nevezly. V další části jsou vysvětleny některé využívané principy. Druhým hlavním úkolem této práce je bližší popis dvou vybraných metod, a to 3D laserového skenování a 3D skenování s využitím strukturovaného světla. Obě tyto metody obsahují například postup měření od kalibrace po výsledný 3D model nebo porovnávám některé dostupné technologie, co se týče přesnosti dosahu nebo ceny. V závěru budou tyto dvě metody navzájem porovnány vzhledem jejich využitelnosti v praxi.

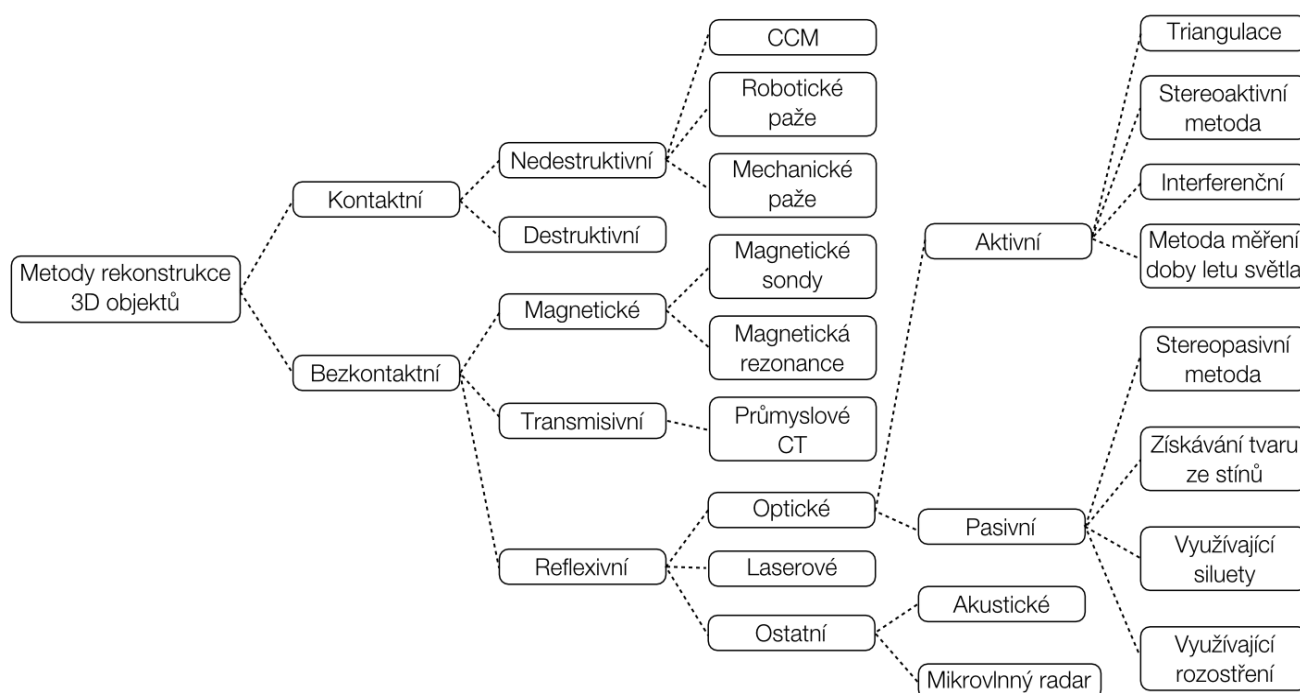


## 2 3D SKENERY

3D skenery jsou zařízení pro zachycení tvarů a textur fyzických objektů a následného převedení do digitální podoby pro další zpracování v počítači. Ve většině případů je princip metody založený na snímání jednotlivých bodů na povrchu objektu a vytvoření velkého počtu těchto bodů tj. mračna bodů. Poté využitím těchto bodů zrekonstruuje (extrapoluje z jednotlivých bodů) prostorový počítačový model použitím vhodné polygonové sítě. K získání těchto bodů se využívá mnoho různých technologií kamery, rentgeny, magnetické mikrotomografie, lasery, dotykové snímače. Od použitých technologií se pak i nazývají jednotlivé metody skenování tzn. například rentgenové, ultrazvukové, laserové, optické nebo mechanické 3D skenery. Nejčastěji se používají nedestruktivních metod, které snímanou součástku nezničí. Každá metoda má ovšem svoje omezení, výhody a nevýhody, včetně celé škály cen. Výstupy tj. 3D počítačové modely mají mnohé využití od filmových efektů a počítačových her přes průmyslový design, ortotiku a protetiku, reverzní inženýrství až po kontrolu kvality nebo dokumentaci kulturních památek. [2, 5]

### 2.1 Rozdělení 3D skenerů

Rozdělení 3D skenerů je možné mnohými způsoby. Vybrané rozdělení bere jako hlavní kritérium dotykové a bezdotykové metody skenování. Nejpoužívanější skenery jsou ve větvi reflexivních. Laserové metody mohou spadat i do metod aktivních optických využívající triangulaci nebo metodu měření doby letu. V taxonomii na Obr.1 jsou laserové metody vyčleněny zvlášť.



Obr. 1 Taxonomie 3D skenerů [3, 4, 20, 29]

## 2.1.1 Kontaktní skenery

### 2.1.1.1 Destruktivní skenery

Toto zařízení má schopnost kromě vnějšího povrchu součásti digitalizovat i vnitřní geometrii. Zaznamenávaný předmět bude však při použití této technologie zničen, od toho i název metody. Stále ještě dnes nalézá využití v oblasti reverzního inženýrství při potřebě digitalizace různých součástí se složitou vnitřní geometrií (první digitalizace vnitřní stavby lidského těla byla prováděna stejným principem), většinou se tak ale děje s kombinací bezkontaktních skenerů. Před samotným procesem digitalizace se skenovaná součást umísťuje na nastavitelný rám, kde je pokrývána speciálním materiálem. Ten poskytuje při zpracování zaznamenávaných snímků vysoký kontrast mezi součástí a výplňovým materiálem. Další fází je vyčerpání vzduchu z prostoru za vzniku vakua. To se provádí proto, aby se tento kontrastní materiál dostal do všech dutin součásti. Tento připravený blok se poté připevní ke frézovacímu stolu uvnitř skenovacího zařízení. Samotné skenování probíhá tehdy, když frézka odfrézovává ultratenké vrstvy materiálu ze součásti za současného skenování optickým skenerem. Každý nový povrch vzniklý odfrézováním předchozí vrstvy je tak předlohou pro jeden snímek. 3D model je poté poskládán z jednotlivých skenů. Tloušťka odfrézované vrstvy například u destruktivního skeneru RE1000 je 0,0127–0,127 mm. Přesnost digitalizace je  $\pm 0,0254$ . Pro vyšší produktivitu měření lze snímat více součástí najednou, které ale musí být ze stejného materiálu. RE1000 používá k odebrání vrstvy materiálu frézku pro přesné obrábění. Lze použít na slitiny hliníku, plasty, měkký kov, litina, mosazi, antikorozi oceli, měď a zinek. Doba snímání závisí na velikosti součásti, nastavení přesnosti a počtu odebíraných vrstev. [1, 5]



Obr. 2 Destruktivní skener RE1000 [7]

### 2.1.1.2 Nedestruktivní skenery

Nedestruktivní kontaktní skenery zahrnují všechny narození od destruktivních metod objekt není při digitalizaci nijak poškozen. Kontaktní 3D skenery zkoumají povrch objektu pomocí fyzického hmotného dotyku. Zatímco objekt zůstává v klidu připevněný k podložce, CMM polohovací rameno, na kterém je upevněna bodová nebo kuličková sonda umožňuje uživateli bodově snímat 3D data z fyzického objektu. Poloha je zaznamenávána CMM ramenovým

enkodérem, což je opto-elektronický přístroj, detekující inkrementální linie na stupnici ke zjištění přesné polohy ramena. Enkodér je také znám jako čtecí hlava. Před samotným skenováním je vhodné pro zvýšení přesnosti digitálního obrazu vyznačit na povrchu skenovaného objektu body, které se musí nasnímat. Množství těchto bodů se odvíjí od složitosti tělesa a námi požadované přesnosti. [5]

**Do této skupiny spadají:**

- souřadnicové měřicí stroje
- skenery na mechanické paži
- skenery na robotické paži

**a) Souřadnicové měřicí stroje (CMM – Coordinate Measuring Machine)**

Souřadnicové měřicí stroje se také dají použít pro digitalizaci, ale především se používají pro měření součástí.

**b) Skenery s mechanickou paží**

Umožňují vytvářet detailní počítačové modelů jednoduchým mechanickým sledováním tvarových linií na povrchu fyzického objektů. Samotný skenovací proces je snadný, přesný a rychlý. Příkladem je skener MicroScribe, který je ideálním nástrojem pro animátory, designéry, vývojáře video her, architektky nebo kohokoliv, kdo pracuje ve 3D. Je to velmi jednoduché a univerzální 3D digitalizační zařízení. Na pohyblivé členy přístroje MicroScribe se používají optoelektronické senzory, které mají za úkol snímat polohu jednotlivých členů a jsou odolné proti rušení. Většinou je možno vytvářet 3D počítačové modely užitím sejmutých bodů, polygonů a křivek (splines, NURBS) nebo či jiných geometrických útvarů. Tato digitalizovaná data mohou být uložena ve formě známých datových formátů (IGES, DXF aj.). Přesnost se pohybuje mezi 0,1 a 0,4 mm s rozsahem akční koule ramene okolo 1,27–1,67 m. [5]



*Obr. 3 MicroScribe MX [9]*

### c) Skenery s robotickou paží

Narozdíl od skenerů s mechanickou paží je provoz skeneru zautomatizován resp. řízen z dálky. Jeho využití může sloužit například pro kontrolu kvality v provozu, nebo skenování v nebezpečných prostorách. [2]

#### 2.1.2 Bezkontaktní skenery

Bezdotykové (bezkontaktní) snímací systémy, na rozdíl od dotykových, nevyžadují ke své funkci hmotný dotyk s povrchem součásti. Díky jednoduchosti, přesnosti nebo rychlosti skenování jsou v dnešní době nejrozšířenější variantou 3D skenerů na trhu. [29]

**Můžeme je dále dělit na:**

- Magnetické
- Transmisivní
- Reflexivní

#### a) Magnetické skenery

Můžeme je rozdělit na skenery s magnetickou sondou nebo skenery využívající magnetickou rezonanci. Použitím druhého zmíněného typu zařízení můžeme získávat informace o vnitřní geometrii součástí. Jedná se o nedestruktivní skenery pracující na stejném principu jako klasické magnetické rezonance požívané ve zdravotnictví. Zařízení jsou většinou mobilní a používají se např. ke kontrole potrubí, kotlů nebo jiných uzavřených nádob. [5, 29]

#### b) Transmisivní skenery

Zástupcem transmisivních skenerů jsou skenery využívající technologii počítačové tomografie (CT). Stejně jako u skenerů využívajících magnetickou rezonanci je možné tímto typem skeneru získávat údaje o vnitřní stavbě zkoumaného objektu. Pro přenos informace se využívá rentgenové záření. Narozdíl od zdravotnických verzí CT se při tomto použití používá vyšší intenzita záření. Zvláštním zástupcem jsou mikro- a nanotomografy. Tyto zařízení jsou stále poměrně vzácné, to dokazuje i fakt, že se v České republice vyskytuje pouze jeden exemplář (v|tome|x firmy GE Phoenix), a to právě v brněnském CEITEC VUT. [10, 29]

#### c) Reflexivní skenery

Do této kategorie spadají skenery akustické (např. sonar), laserové, ale především optické. Optické skenery jsou nejrozšířenější a nejpoužívanější větev 3D skenerů. Z toho vyplývá i největší množství různých technologických řešení a tím i dalšího dělení. [29]

#### Akustické skenery

3D digitalizace využívající tento způsob získávání informace pracuje na principu bezkontaktního snímání povrchu objektu sondou emitující zvukové vlnění. To může být například ultrazvuk nebo sonar. Jelikož je to jedno z cenově nejnenáročnějších řešení problematiky prostorového snímání povrchů, je využíváno většinou v oblasti kontroly kvality. Skenování probíhá manuální ultrazvukovou sondou ve tvaru pistole, která má kovový hrotem, jenž se přikládá ke snímanému povrchu. Stlačení spouště je vyslán zvukový signál, ten se převede do prostorových souřadnic. Ty je možné uložit do CAD systémů nebo jako datové soubory. Jeho přesnost je relativně malá. Pohybuje se v rozmezí 0,3 až 0,5 mm. [5]

#### Optické skenery

Snímání skenovaného objektu je prováděno z několika úhlů za pomoci optického zařízení. Při změně scény nebo snímacího zařízení se po pořízení snímků ze mnoha různých úhlů



pohledu data zpracovávají za využití pokročilých algoritmů na digitalizovaný model. Většina skenerů poskytuje možnost vytváření počítačových modelů využitím nasnímaných bodů, polygonů, křivek typu spline nebo jiných standardních geometrických entit. Před samotným skenováním se na tělese vyznačují orientační body, které poté slouží pro zarovnávání skenů přes sebe při tvorbě 3D modelu. Tyto orientační body se nazývají referenční body a lepí se přímo na povrch snímaného objektu. Jejich množství může dosahovat počtu i několik tisíc. [5]

### **Pasivní metody**

V rámci geometrického uspořádání měřicího systému této není zahrnutý zdroj osvětlení. Energie je zde jen přijímá, nikoliv žádným způsobem emitována. Základním principem je v tomto případě nasnímání minimálně dvou snímků kamerou. To buď při natočení objektu, nebo změnou polohy snímače. Pro systémy s dynamickým snímáním je upřednostňováno více kamer se známou orientací a samokalibrací. [6, 29]

#### **Mezi pasivní metody patří metody měření tvaru pomocí:**

- Stereovidění
- Analýza pohybu
- Zoomování
- Získávání tvaru ze stínů objektu (stínování)
- Využívání siluet (kontur) objektu
- Změny ohniska
- Textura objektu [29]

### **Aktivní metody**

Narozdíl od pasivních metod je zde emitován určitý druh energie. To může být viditelné světlo nebo jakékoliv elektromagnetické záření. Paprsek tohoto záření je namířený na povrch snímaného tělesa, ten se pak odrazí zpět do snímače. Optické metody mají velmi široké uplatnění v mnoha různých odvětvích, stále více se jich však využívá v různých průmyslových odvětvích. Mezi výhody těchto metod patří zejména rychlost, mobilita a přesnost měření. [6, 29]

#### **U aktivních triangulačních metod se k označení povrchu používá:**

- Světelný paprsek (1D triangulace)
- Světelný pruh (2D triangulace)
- Strukturované světlo (3D triangulace)

Světelný paprsek a světelný pruh mají své využití převážně u laserových skenovacích systémů, které mají výhodu velké pracovní vzdálenosti. Mimo průmyslová odvětví se uplatňují například v architektuře či archeologii. [29]

#### **Patří mezi ně:**

- Triangulace
- Aktivní stereovidění
- Interferenční

- Metoda měření doby letu světla (ToF – time-of-flight)

## 2.2 Metody Digitalizace

Základním problémem, ke kterému při skenování dochází je ztráta důležité informace o jedné souřadnici. To je zpravidla se jedná Z-ová souřadnice. Pro získávání toho třetího rozměru se využívá:

- měření doby letu světla
- optická interferometrie
- triangulace [5]

### 2.2.1 Měření doby letu světla (Time-of-flight)

Z doby letu světelného paprsku od chvíle jeho vyslání, odražení od snímaného povrchu, až po získání informace na snímacím senzoru, můžeme snadno zjistit vzdálenost bodu od počátku souřadného systému, který je většinou umístěný v místě kamery, kterou modelujeme jako takzvaný Pinhole (pouze jako krabička s dírou). Principem je souvislost mezi rychlostí vhodného referenčního signálu s měřeným modulovaným optickým signálem. Ten je možné modulovat pulzně, pseudonáhodně nebo spojitě. Hlavním problémem této metody je dozajista skutečnost, že rychlost světla asi  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  je extrémní, z toho plynou vysoké nároky na přesnost měřicího snímačů a také jisté omezení pro vzdálenost snímání. [5]

### 2.2.2 Optická interferometrie

Princip optické interferometrie spočívá na principu měření doby letu koherentního záření. Vlnění světelného paprsku se dělí na referenční a měřicí. Tyto dvě vlnění spolu interferují. Výsledek zachycuje snímač, což může být kupříkladu fotodioda. Během vlastního měření se používají polarizační dělič a dva odrážače. Touto metodou je možné změřit jen vzájemnou vzdálenost zkoumaných bodů, pokud se však provede kalibrace, je možné i absolutní měření. [5]

### 2.2.3 Triangulace

Nejpoužívanějšími zástupci triangulace jsou v dnešní době laserové a optické techniky.

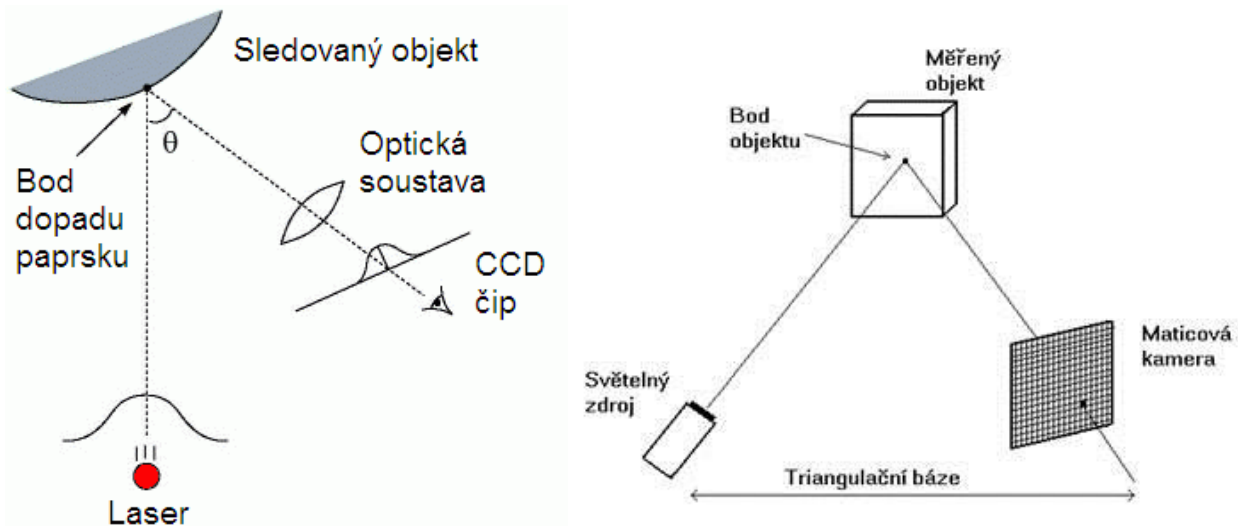
**Tyto metody lze rozdělit do dvou skupin:**

- aktivní triangulace
- pasivní triangulace [5]

#### 2.2.3.1 Aktivní triangulace

Mluvíme-li o aktivní triangulaci, pak je základem jeden aktivní zdroj záření, povrch měřeného objektu a jeden snímač (většinou jdou o CCD čip), tomuto uspořádání se pak říká triangulační trojúhelník – obr. 4. Triangulační bází se nazývá vzdálenost mezi světelným zdrojem a snímačem. Úhel, který svírá triangulační báze a světelný paprsek, se nemění, zatímco úhel svírající bázi a dopadající paprsek na snímač je závislý na místě odrazu paprsku od předmětu. Pomocí těchto získaných informací je poté možné vypočítat Z-ovou souřadnici. V závislosti na druhu použitého zdroje záření (většinou se jedná o LASER) můžeme rozlišovat tři druhy aktivní triangulace. Jedná-li se pouze o jeden paprsek, pak je výsledkem 1D triangulace, jelikož měříme vzdálenost pouze jednoho bodu. Použijeme-li zdroj, který štěrbinou zobrazuje světelný pruh na předmětu, pak mluvíme o 2D triangulaci. Poslední možností je zobrazení

několika rovnoběžných čar nebo strukturované sítě, která pokrývá celý objekt najednou, jedná se tedy o 3D triangulaci. Snímání celého povrchu najednou je při dostatečném výpočetním výkonu velkým urychlením a také do jisté míry zpřesněním, pokud scéna není dokonale statická, proto je 3D triangulace oproti 1D a 2D výhodnější. [5, 6, 29]



Obr. 4 Aktivní triangulace [5,6]

### 2.2.3.2 Pasivní triangulace

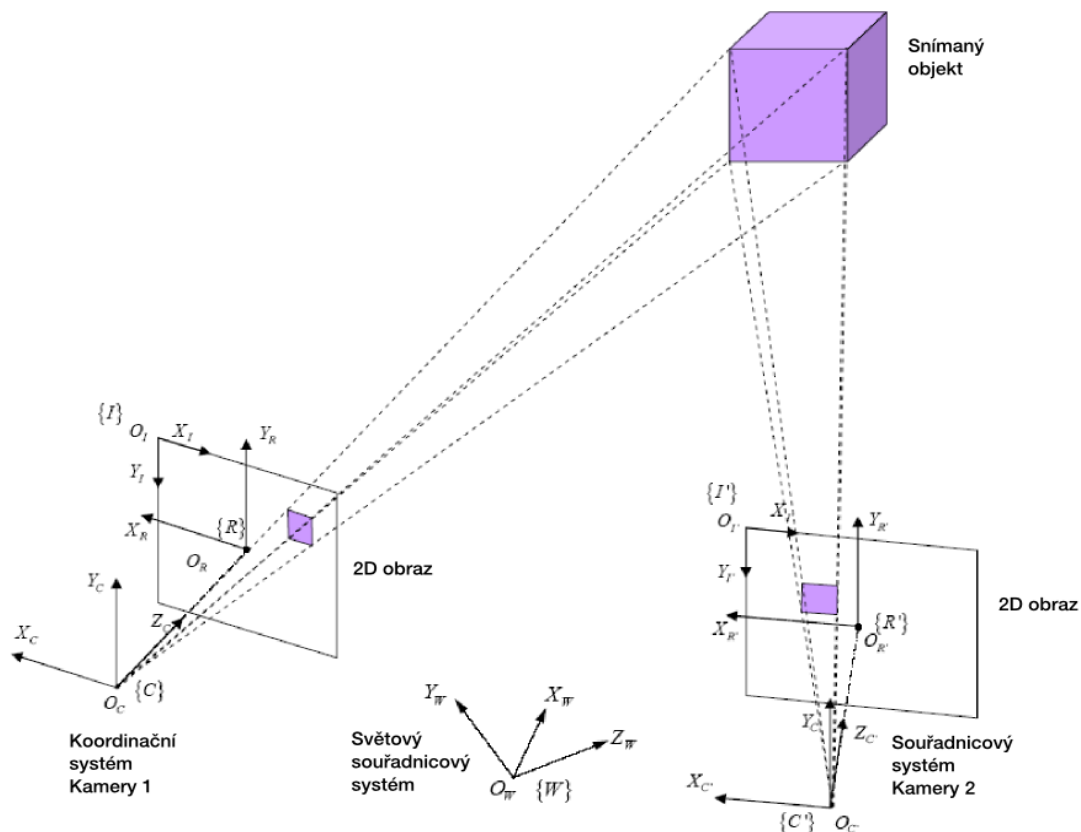
Jelikož pasivní metoda nemá vlastní zdroj záření, neznáme tedy ani přesné geometrické uspořádání mezi zdrojem a snímačem. Většinou se jedná o kombinaci několika snímacích zařízení. Podle toho můžeme rozlišovat tři základní druhy pasivní triangulace. První je pokud použijeme více snímačů se známou vzájemnou orientací, druhá možnost je více kamer se samokalibrací a třetí pouze jedna kamera se samokalibrací, ale se zachycováním v různých polohách. V případě techniky samokalibrace není třeba předem znát polohu kamer/kamery, protože jejich vzájemná pozice je odvozována a určována přímo z naměřených dat. Často se také využívá tzv. kalibrační předmět, jehož všechny rozměry známe a je zároveň skenován společně s daným předmětem. Poté je možné z jednotlivých měření a měřítka referenčního předmětu odvodit velikost a tvar skenovaného objektu.

Největší nevýhodou těchto metod jsou vlivy okolního prostředí, a to zejména osvětlení měřicího místa, které může být nedostatečně nasvícené nebo hůře přeexponované. Pokročilejší přístroje jsou dovybavovány modulátory intenzity paprsku, což umožňuje využití ve větší škále aplikací i za horších podmínek. Tyto přístroje mají však vyšší cenu, která ještě naroste, pokud vybavení obsahuje modulátory intenzity paprsku.

Nejčastější metodou pasivní triangulace je stereovidení. Princip této metody je podobný jako funkce lidského zrakového systému při odhadu vzdálenosti. Používá se však dvojice CCD snímačů namísto očí. Za pomoci těchto dvou snímačů získáváme dva stereoskopické snímky, které představují dva různé perspektivní obrazy. Potom z úhlu snímaného sdruženými paprsky (tj. úhlová paralaxa) získáváme ztracený třetí rozměr, a to vzdálenost povrchu od středu pohledu obou snímačů.

Hlavním problémem stereovize je nekorrespondence některých souhlasných bodů ve snímaných obrazech, které mají nevýraznou texturu nebo hrany. To samozřejmě způsobuje nepřesná měření. Často se tedy využívá stereovize jako doplňující zařízení pro aktivní metody. Stereovize má velké množství využití, zvláště v oblastech pokročilých technologií.

Hlavní výhodou těchto zařízení je oproti konkurenčním metodám cena, to je však na úkor přesnosti a kvality měření. [5, 6, 29]



Obr. 5 Typický stereovizní systém [11]

### 2.2.3.3 Výběr 3D skeneru

Dnes se na trhu objevuje velká škála zařízení schopná nasnímat fyzické objekty do 3D podoby. Při výběru 3D skeneru se lze řídit podle těchto kritérií:

- 1) Za jakým účelem se naskenovaná data získávají (reverzní inženýrství, kontrola, 3D tisk, podklad pro další modelování designu,...)
- 2) Velikost objektu, který bude skenován (každý skener je určen pro určité rozmezí, překročení tohoto rozmezí znamená zmenšení přesnosti)
- 3) Skenování s texturou nebo bez textury (s barvou objektu nebo bez)
- 4) Lokace skenování (na dílně, mimo budovu, laboratoř, extrémní podmínky atd.)
- 5) Doba nutná pro naskenování objektu (např. při skenování člověka je nutností, aby celá postava byla zachycena během co nejkratšího okamžiku kvůli nekontrolovatelným pohybům těla)
- 6) Jakým způsobem budeme data dále zpracovávat (většina CAD systémů neumí pracovat s výstupy ze skenerů jako STL, OBJ, WRL,...)

Poté se nejčastěji vybírají 3D skenery dotykové (CMM), které jsou vhodné pro kontrolu nebo získávání informace o geometrii prvků. Není zachycován celý tvar, ale obsluha pouze proměřuje/ zachycuje určená místa. Bezkontaktní laserové skenery jsou ideální pro komplexní kontrolu s vysokou přesností, jejich využití je možné od nejmenších součástí až po budovy a terény. Optické skenery se poté volí pro jejich rychlé zpracování. [2]

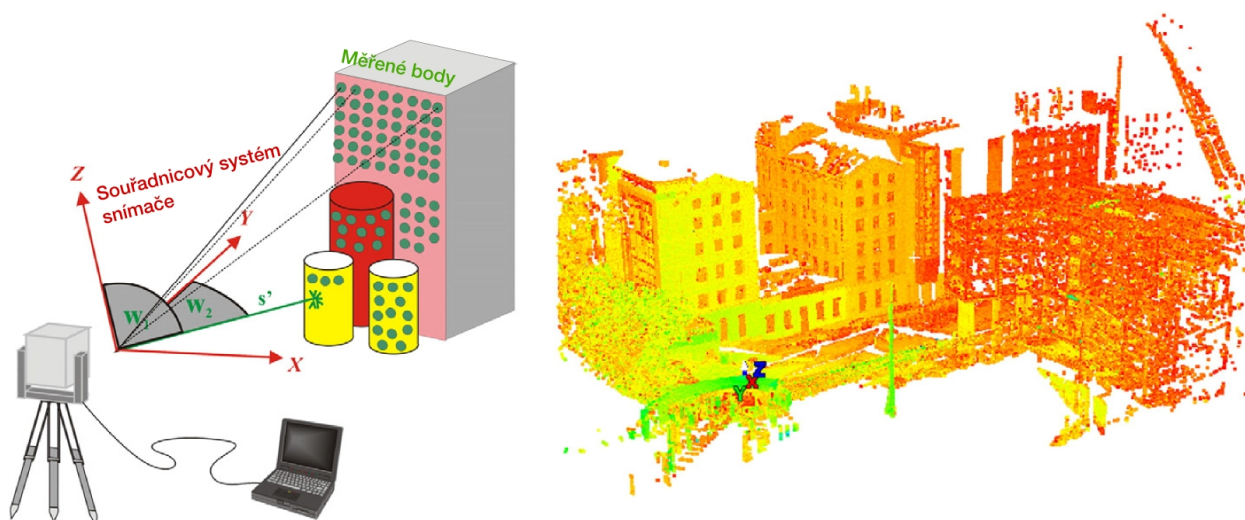
**Tab.1** Porovnání některých metod 3D skenování [17]

Metoda	Velikost objektu měření	Aktivní nebo pasivní	Povrchová nebo objemová		Nejednoznačnost měření
Strukturované světlo	Mikroskopické po velmi velké	A	T	Triangulace	Je možná
Srovnávání geometrických vzorů	Obvykle velké, ale možnost implementování do mikroskopie	P	T	Předloha	Žádná
Optická fázová interferometrie	Malé/mikroskopické	A	T	Rozdíl drah světla	Ano
Mapování čela vlny	Malé až velké povrchy	A n P	T	Rozdíl drah světla	Ne
Stereo snímání	Malé až velké scény	P	T	Nerovnosti/triangulace	Ne
Konfokální snímání	Mikroskopické až velmi malé	A	T		Ne
Moiré technika	Mikroskopické až velmi velké	A	T	Rozdíl drah světla	Ano
LIDAR	Velké	A	T	Rozdíl drah světla	Ano
Doba letu (ToF)	Velké	A	T	Rozdíl drah světla	Ano
Stínování	Typicky velké, ale teoretická možnost malých	A	T	Vlastnosti odrazivosti	Ne
Zaostřování	Typicky velké, ale teoretická možnost malých až mikroskopických	P	T	Kvalita obrazu	Ne
Tomografie	Velké	A	V	Rekonstrukce	Ne
Laminografie	Velké	A	V	Rekonstrukce	Ne
Holografie	Malé až velké	A	T	Rozdíl drah světla	Ne
Konoskopická holografie	Malé až velké	A	T	Rozdíl světelných drah	Ne
Atomární silová mikroskopie	Mikroskopické	A	T	Atomární síly	Ne
Tečková fotografie	Malé až velké	A	T	Změna dráhy světla	Ano
Tečková interferometrie	Malé až velké	A	T	Změna dráhy světla	Ano
Optická koherentní tomografie	Malé	A	V	Podobnost drah světla	Ne



### 3 LASEROVÉ SKENOVÁNÍ

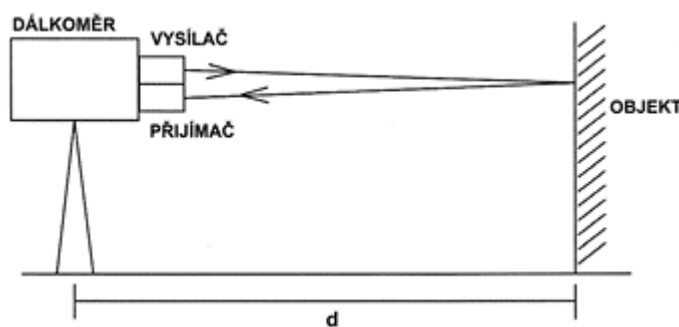
Technologie laserového skenování jsou velice vhodné pro skenování rozlehlých objektů a prostorů, jelikož ostatní metody využívané pro tyto účely jako je totální stanice, měřicí pásma nebo běžné kamery jsou velice časově náročné a nepřesné na to, aby se daly prakticky využít při měření velkých vzdáleností. Laserové skenery měří vzdálenost od snímače po nejbližší povrch s přesností od milimetrů po centimetry s rychlostí od tisíců po stovky tisíc naměřených bodů za sekundu. Jediný záznam může obsahovat několik milionů 3D bodů. Jelikož skenování z jedné polohy nemůže nikdy zaznamenat všechny informace, musí být měření opakováno na několika různých místech. Často se používá fotoaparát nebo digitální kamery k zachycení obrazu daného prostředí, který se může dále spojit s naměřenými daty, aby se zjednodušil proces modelování. [12, 13, 30]



Obr. 6 Schéma měření a výstup z měření [30]

#### 3.1 Laserové skenery využívající dobu letu světla

Princip laserového skeneru využívající ToF technologii je podobný jako například sonar. 3D laserový skener je namířený na skenovaný fyzický objekt a laserový paprsek je směřovaný přes objekt k nejbližší umístěnému snímači. Měřením doby letu laserového paprsku, což je čas dráhy od skeneru k danému objektu a zpět do skeneru. Pozice v trojrozměrném prostoru každého naskenovaného bodu je tedy plně určena. Tímto způsobem skener laserovým paprskem zaznamená celé těleso to se většinou provádí rotujícími částmi skeneru. To je buď rotací celé hlavy skeneru v případě dalšího skenu, nebo rozmítání pomocí rotujících spojených dvou zrcadel, nebo dokonalejšího rotujícího optického odrazného hranolu, obvykle mající tvar pravidelného  $n$ -úhelníku. Kvalita zdigitalizovaného tělesa je dána hustotou, s jakou laserový paprsek pokrývá plochu reálného tělesa. Obvykle bývá součástí zařízení i barevná kamera, která při skenování zaznamenává barevnou informaci. Výsledkem záznamu je *mračno bodů*, které sestává z tisíců bodů v trojrozměrném prostoru a které jsou rozměrově přesnou



geometrickou napodobeninou. Díky kameře i se stejnou texturou. Tyto data jsou pak převedeny do 3D CAD modelu, se kterým se může dále manipulovat v CAD softwarech.

Terestrické 3D laserové skenery se stále častěji využívají právě pro skenování budov a přírodních objektů pro jejich vysoký výkon v oblasti získávání dat, vysoké přesnosti a vysokému rozlišení. Ačkoliv se parametry jednotlivých zařízení kus od kus liší, rychlost získávání dat se pohybuje od 1 do 6 kHz, délková přesnost od 5 mm do 25 mm a vzorkovací interval je programovatelný, což má za následek, že laserové technologie získávají výhodu oproti stávajícím mapovacím technikám jako jsou EDM, GPS nebo fotogrammetrie, protože má velké rozlišení bez potřeby odrazového zařízení.

Spojená data mračen bodů jsou natolik dostatečná, aby poskytla optimální reprezentaci jakéhokoliv povrchu bez nutnosti interpolace. [5, 6, 12, 30]

### 3.2 Vliv vlnové délky

Komerčně dostupné zdroje využívají laserové paprsky o různých vlnových délkách (vizte Tabulka.), jsou však preferované takové vlnové délky, které mají nízký výkon a jsou bezpečné pro lidský zrak. Pokud je laser využíván společně s CCD snímačem, pak je doporučená vlnová délka 670 nm, jelikož se ukázalo, že spektrální citlivost CCD snímače dosahuje maximálních hodnot právě při této hodnotě.

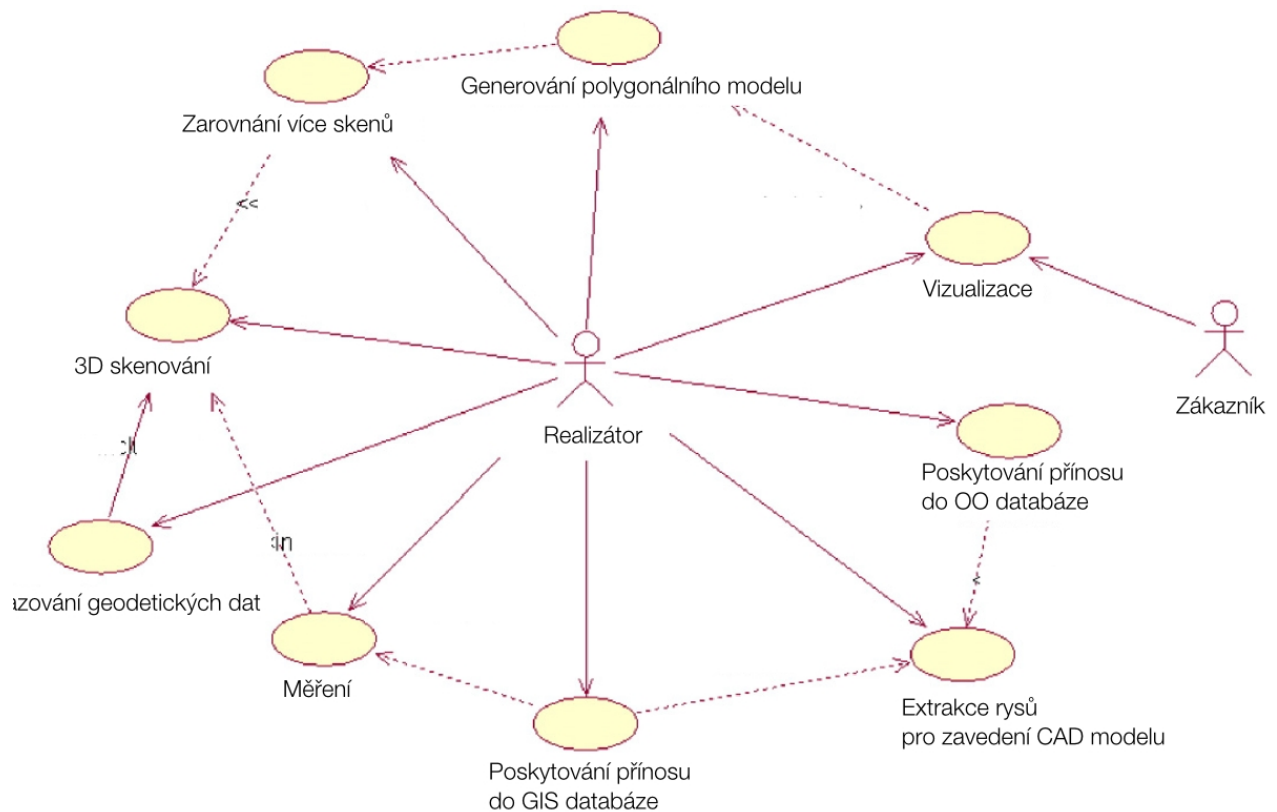
**Tab. 2** Porovnání některých 3D laserových skenerů [13]

Výrobce	3rdTech	Cyra Tech	MetricVision	Optech	Riegl USA
Vlnová délka laseru [nm]	670	532	1550	1540	904
Výkon laseru [mW]	5	1	4	10	1,2–85
Měřitelná délka [m]	0,3–12	1,5–50	0,3–55	1,5–1200	0,3–2500
Přesnost [mm/X m]	10/12	6/50	0,02	6/100	76/2400
Cena	\$45 000	\$125 000	\$360 000	\$150 000	\$35 000–85 000

### 3.3 Postup při měření budov [14]

1. 3D skenování
2. Uspořádání naskenovaných dat z různých pozic
3. Generování polygonové sítě a modelu
4. Spojení s geodetickými daty
5. Získávání dat pro CAD implementaci
6. Vizualizace





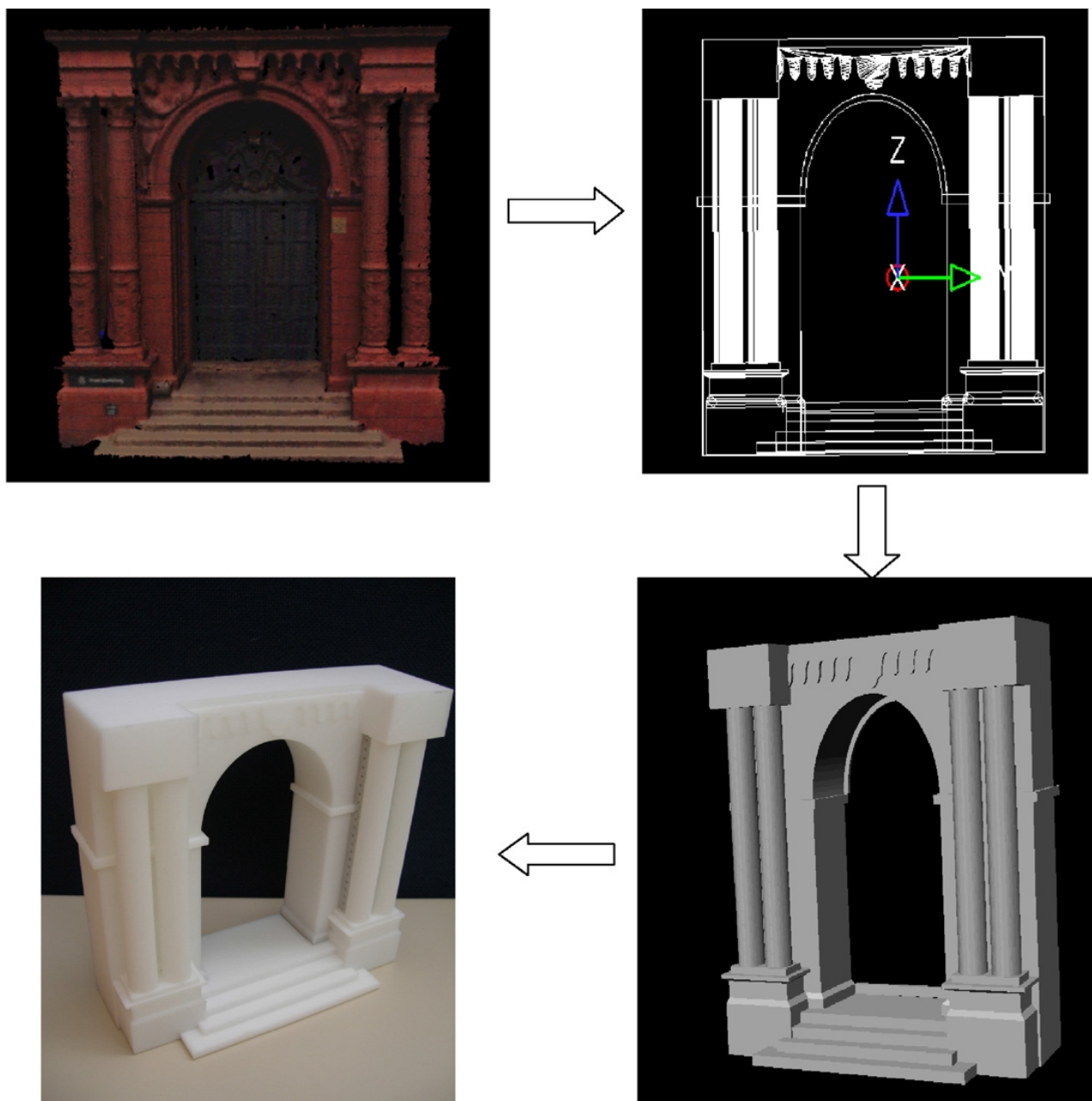
Obr. 7 Algoritmus při skenování velkých objektů [14]

### 3.4 Omezení

Během dalšího zpracování nastává problém se získáváním smysluplných informací z 3D modelu vzniklého z 3D skenování. Protože výsledkem laserového skenování jsou miliony informací o existujícím objektu, které obsahují X, Y, Z souřadnice a informace o barvě RGB pro každý jednotlivý bod v mračnu bodů. To přináší obtíže se získáváním přesné geometrie a zpomaluje vytváření 2D plánů a 3D CAD modelů. Jelikož vytvořená polygonální síť obsahuje velký počet trojúhelníků, je složité vytvořit základní obrysy a linie pro CAD modelování. Je snaha vytvářet automatické algoritmy, které urychlí vytvoření použitelných CAD modelů.

Možným problémem při dalším zpracování jsou u laserových skenerů transparentní povrchy, jako jsou například okna. Určitým řešením tohoto problému je spojení fotografických dat a ruční predefinování v postprodukčním procesu. [14]

Na obrázku lze vidět zjednodušování 3D skenu na použitelný CAD model pro využití v 3D tisku

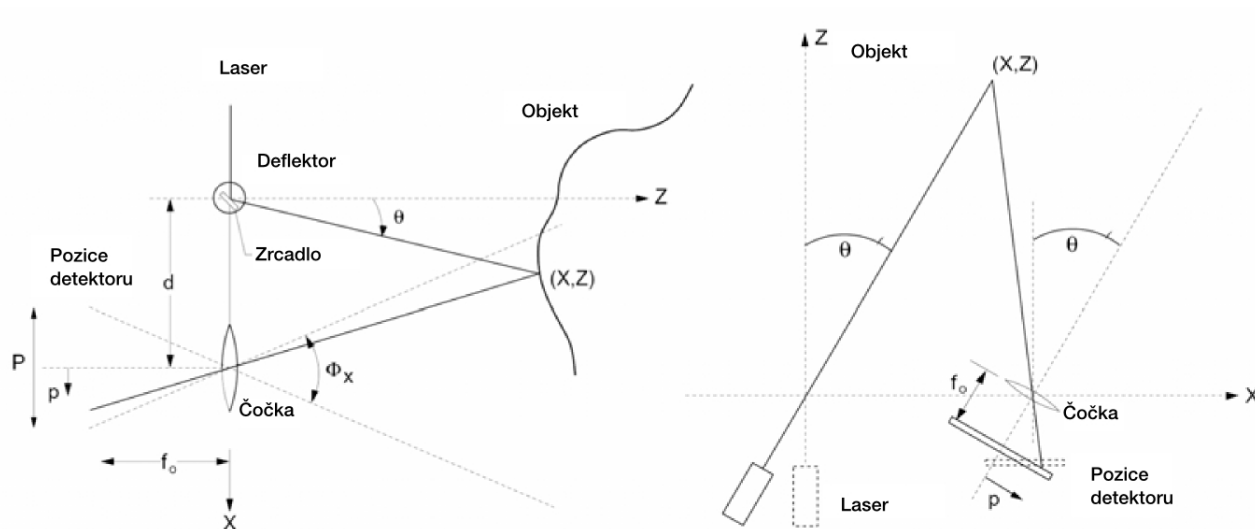


Obr. 8 Od 3D skenu přes 3D model po 3D tisk [14]

### 3.5 Triangulační skenovací systémy

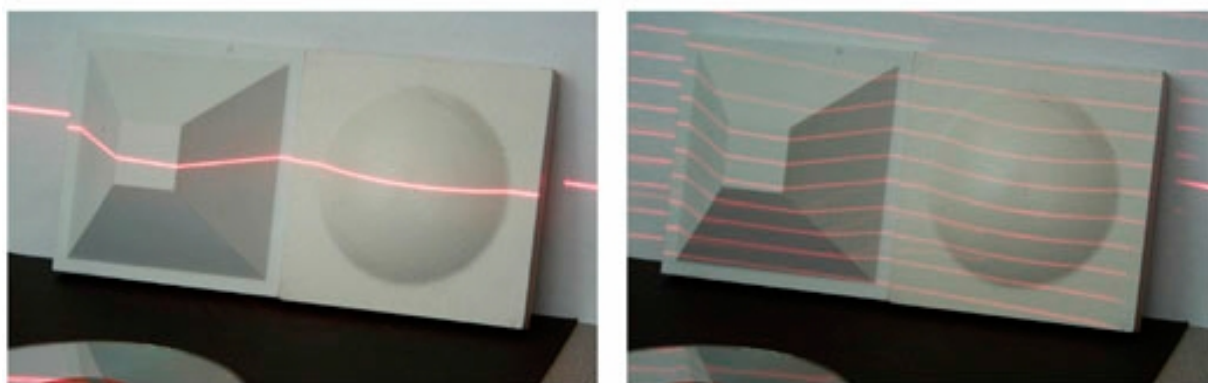
Jsou určeny pro skenování malých předmětů na krátké vzdálenosti s vysokou přesností, uplatnění nalézají ve strojírenských aplikacích a v oblasti archeologie [12]

Většina laserových skenovacích systémů je založena na principu, kde jedna nebo více statických detekčních jednotek snímá promítaný koherentní laserový paprsek odražený od povrchu snímaného objektu. Rozšířením tohoto principu je metoda synchronizovaného skeneru, kde pohyb paprsku i detekčního zařízení je synchronní. [5]



Obr. 9 Schéma triangulačního laserového systému [13]

Promítaný tvar paprsku vycházejícího ze zdroje je buď přímka (promítaná skrz štěrbinu) nebo řada paralelních přímek. Za předpokladu, že je známá vzájemná poloha a orientace jednotlivých optických komponentů (obdržena z předchozí kalibrace senzorů), souřadnice objektu mohou být jednoduše dopočítány pomocí využití triangulace z promítnutého laserového paprsku. [13]



Obr. 10 2D a 3D laserové skenování objektu [13]

Zástupcem laserových skenerů je HandyScan 3D a Vivid 910 od firmy Minolta, na kterých lze popsat konkrétní postup při skenování

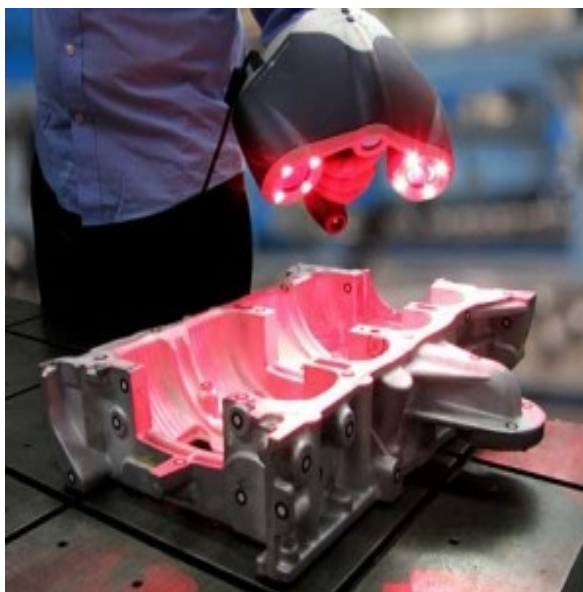
### HandyScan 3D

HandyScan 3D je ruční laserový skener, který pracuje za vzájemného pohybu skeneru a tělesa během snímání. Pomocí pozičních značek na tělese nebo podložce HandyScan 3D identifikuje vzájemnou polohu skeneru a objektu. Použitím dvou kamer snímá laserový kříž na tělese. V reálném čase je na počítači zobrazován obraz snímání, těleso a laserový kříž. Zároveň se automaticky vytváří polygonová síť.

Využitím této technologie snímání a vyhodnocování dat je možné velice snadné naskenovat i tvarově složitější modely. Na základě zvoleného rozlišení se podle všech nasnímaných dat automaticky přepočítává výsledná síť. Data je možné průběžně zpřesňovat a

upravovat, protože všechny snímky jsou systémem zaznamenávány, to znamená, že díky okamžitému zobrazení výsledků se urychluje proces vyhledání míst, která nebyla nasnímána nebo vyžadují detailnější snímání.

Skener HandyScan 3D pracuje na principu triangulace. Reflexní značky je možné umístit na podložku, nebo přímo na snímané těleso. Jestliže obě snímací kamery vidí najednou minimálně tři reflexní značky, může systém automaticky určit polohu snímaného objektu. V případě plynulého pohybu je třeba, aby v záběru byly minimálně 4 reflexní značky. Protože je vzájemná poloha reflexních bodů jedinečná (protože se značky lepí ručně, tudíž nepravidelně) systém tedy může kdykoliv pokračovat a navázat na již nasnímané body. Maximální přesnost je 0,05 mm [5]



Obr. 11 HandyScan 3D [26]

### Vivid 910

Firma Konica Minolta v současné době nabízí několik typů laserových skenerů. Vivid 910 je výhodný pro svou mobilitu, vysokou rychlost a přesnost záznamu. Je možné objekt nasnímat za méně než jednu sekundu (v případě rychlého režimu). Stejně jako vyše zmíněný HandyScan 3D využívá i tento skener ke skenování princip triangulace. Skenovaný objekt je umístěn 0,6 až 1,2 metru od objektivu. Přesnost snímání je v rozmezí  $\pm 0,008$  mm. Výstupním formátem je nejčastěji formát STL a DXF. Hmotnost toho zařízení je 11 kg. [5]



Obr. 12 Minolta Vivid 910 [25]

## 4 STRUKTUROVANÉ SVĚTLO

3D skener strukturovaného světla je zařízení pro měření trojrozměrného tvaru objektu užitím promítaného světelného vzoru a kamerového systému.

V dnešní době je strukturované světlo běžně využíváno pro různé trojrozměrné profilometrické zkoumání povrchů díky jeho nízké ceně a vysoké rychlosti, proto je jedním z nejčastějších způsobů, jak velmi rychle a efektivně zjistit žádané informace o povrchu objektu.

Měřicí čidla na bázi strukturovaného světla (SL – structured light) jsou využívány v mnoha odvětvích, kromě strojírenství a kontroly kvality je to např. k uchování uměleckých děl, v zábavním průmyslu, medicíně nebo zabezpečení. Je to především pro jeho bezkonkurenční rozlišení, bezkontaktní zajištění rekonstrukce celého pole objektů ve vysokém rozlišení a rychlost. K výhodám se dá také jistě zařadit kompaktnost skenerů, jelikož měřicí proces je realizován pouze profilometrickým systémem, který se skládá z jednotky pro zpracování a analýzu (PC), projekční jednotky (zpravidla videoprojektoru) a vizuální jednotky (CCD/CMOS kamera).

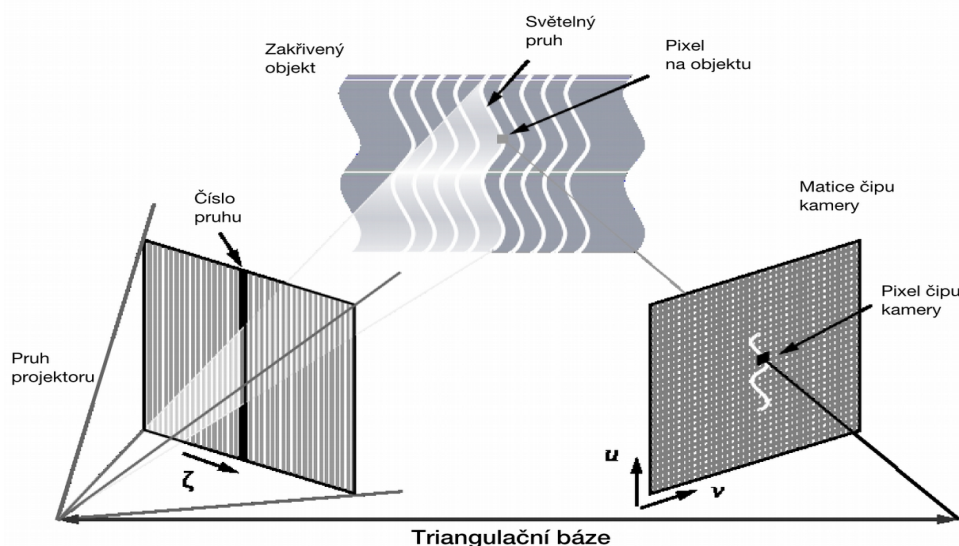
Při zaznamenávání stojícího objektu je nutné, aby tento byl uchycen v přidavných upínacích zařízení z důvodu dostatečného zajištění proti pohybu. Jako upínací zařízení se většinou používají pro tento účel vyrobené rámečky s omezeným rozsahem rozměrů upínacího prostoru, sklíčidla či svěráky.

Využitím zařízení se strukturovaným světlem lze zaznamenat i geometrii pohybujících se těles, to se však děje na úkor snížení kvality digitalizace. Při tomto dynamickém skenování objektů se ukázalo, že základní vzory jsou nedostačující, proto začaly vznikat strukturálně složitější vzory. [13, 29]

### 4.1 Princip funkce 3D skenování s využitím strukturovaného světla

Promítání úzkých pásů světla na trojrozměrně tvarovaný povrch vytváří linie osvětlení, které jsou zkeslené z jiného úhlu než se nachází projektor a mohou být použity pro přesnou geometrickou rekonstrukci tvaru povrchu. Používá se mnoho různých variant strukturovaného světla, ale vodorovné pruhy jsou nejčastější. [18, 29]

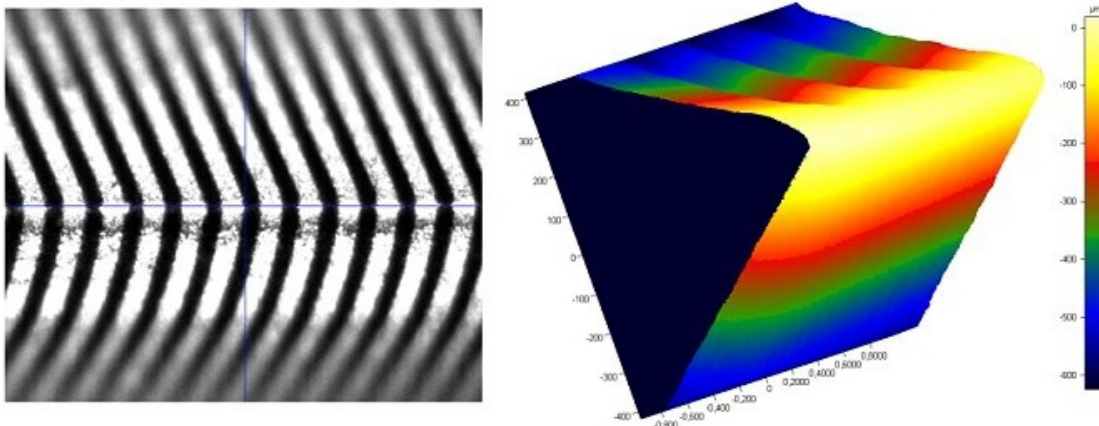
Na obr. 13 je zobrazeno, jak se rovný pruh po dopadnutí na povrch tělesa vlivem deformace zakřivuje.



Obr. 13 Princip triangulace systému se strukturovaným světlem [18]

Modulovaný vzor je porovnán v počítači se vzorem promítaným, tj. porovnávají se odpovídající si pixely projektoru a snímacího zařízení. Výsledkem tohoto porovnání a využitím vhodného algoritmu se vytvoří body orientované v prostoru, tzv. *mračna bodů*. S těmito body lze dále pracovat a vytvořit souvislý povrch. [18, 29]

Na obrázku lze vidět zakřivení promítaného vzoru objektu a následující 3D rekonstrukce.



Obr. 14 Převedení ze zakřivení pruhů strukturovaného světla na 3D model [18]

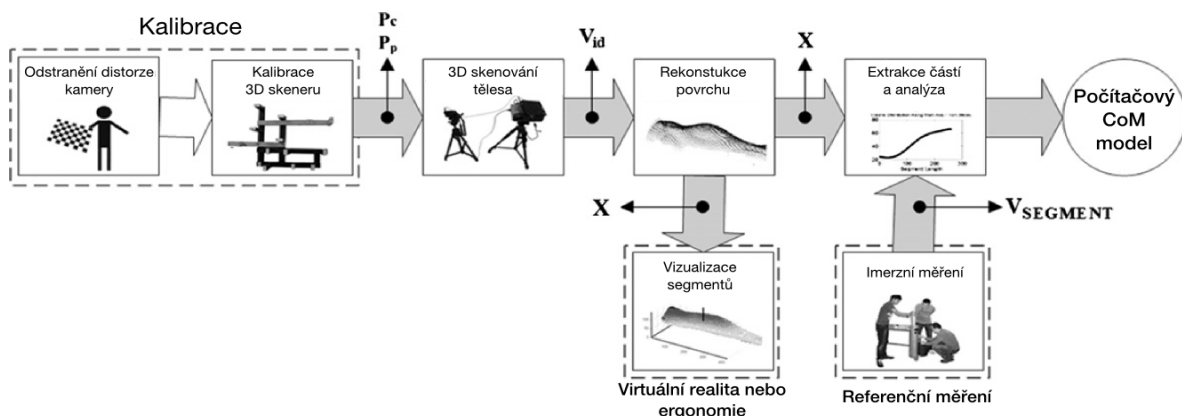
Existující rekonstrukční modely a kalibrační metody na principu strukturovaného světla mohou být rozděleny do analytických nebo empirických metod.

U analytické metody je projektor považován za inverzní kameru, souřadnice povrchu může být specifikována pomocí průsečíků vhodných entit. Nezbytná podmínka trojrozměrného měření je znalost vnitřních parametrů optického zařízení a znalost relativní pozice a orientace projektoru a kamery vůči sobě (vnější parametry).

U empirických metod existují referenční plochy, díky kterým získáváme relativní výšku  $h$  je vzhledem k referenčnímu bodu  $\Delta$ :  $h = f(\Delta)$ . Odpovídající rozdíl  $\Delta$  je vzdálenost mezi povrchem skenovaného objektu a referenční plochou pro jeden konkrétní pixel na snímací obrazové ploše kamery. [21]

#### 4.2 Postup procesu měření 3D skenerem strukturovaného světla [22]

1. Kalibrace
2. Skenování 3D
3. Rekonstrukce povrchu
4. Extrahování segmentů a jejich analýza
5. CoM model

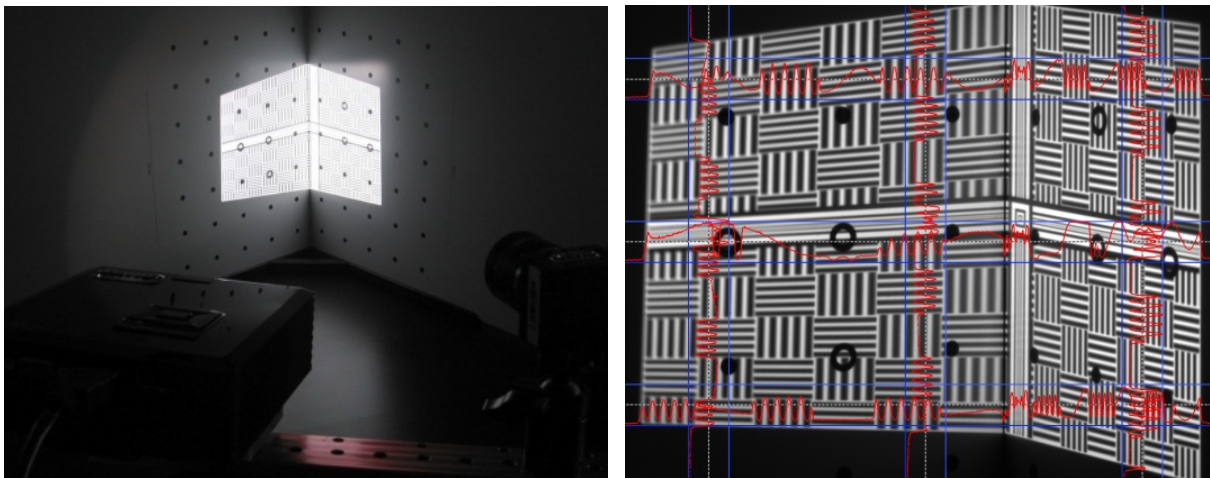


Obr. 15 Algoritmus měření pomocí systému se strukturovaným světlem [22]

### 4.3 Kalibrace

Každá z výše uvedených metod samozřejmě vyžaduje různé způsoby kalibrace systému. Analytická metoda požaduje znalost parametrů obou optických zařízení (vnitřních parametrů) a vzájemnou polohu a natočení vůči sobě (vnější parametry). Zatímco empirická metoda si žádá stanovení parametrů empirického modelu, jehož podmínky nemusí mít žádný fyzikální význam. Odpovídajícím způsobem se pak tyto kalibrace nazývají kalibrace analytické metody a kalibrace empirické metody. Vnitřní parametry kamery je třeba znát bez ohledu na to, jakou metodu kalibrace používáme.

Protože se v dnešní době 3D skenery stávají stále populárnější v nejrůznějších odvětvích, jsou na vývoj kladeny požadavky, aby mohly být flexibilnější než ty, které jsou dostupné v literatuře. To znamená takové, které budou snadněji využitelné v venkovním prostředí, a nejen v laboratořích, a to se zachováním současné kvality a přesnosti. První studie vedly k vývoji kalibračních procedur, které vyžadují osvětlení a získání obrazů pouze ze tří nebo dvou kalibračních referenčních ploch, což vedlo k podstatnému snížení doby nutné pro kalibraci a ke zjednodušení komplexnosti kalibračního terče. Následující pokroky v tomto výzkumu vedly ke stanovení a charakterizaci procedury, ve které tvoří projekční zařízení druhou kameru, tudíž odpadá problém s kalibrací kamery – projekční pár se zkalibruje zároveň jako pár stereoskopických kamer. Tato navrhovaná kalibrační metoda umožňuje stanovení vnějších i vnitřních parametrů kamery a projektoru v jednom kroku. Nyní je snaha o to, aby se pár kamera-projektor skeneru mohl nakalibrovat bez cizí pomoci (tzn. kalibrace bez známého kalibračního terče) [21]



Obr. 16 Kalibrace pomocí kalibračního terče [16]

### 4.4 Přesnost a dosah

Rozlišení závisí především na velikosti promítaného vzoru a jejich optické kvalitě. To je značně limitováno samotnou vlnovou délkou používaného světla (modré světlo je přesnější než bílé). Snížení šířky promítaného světla je také limitováno rozlišením projektoru a snímacího čipu kamery. Různě velké objekty mohou být měřeny pomocí tomu odpovídající velikostí pruhu daného vzoru. Jsou dokumentovány praktické aplikace měření objektů několik metrů velkých. [13]

#### Typická výstupní čísla:

Rovinnost 60 cm širokého povrchu – do 10  $\mu\text{m}$

Tvar spalovací komory motoru – do 2  $\mu\text{m}$  (navýšení)

Tvar objektu 5 cm velkého – asi okolo 1  $\mu\text{m}$

Radius ostří obráběcího nože zhruba 10  $\mu\text{m}$  velkého –  $\pm 0.4 \mu\text{m}$  [18]

**Tab. 3** Srovnání některých komerčních skenerů [13]

Výrobce	Výrobek	Přesnost [mm]	Měřitelný objem	Rychlost
GOM	Atos II	0,005–0,02	35×28×20 mm až 1200×960×960 mm	1 300 000 bodů za 7 s
Breuckmann GmbH	OptoTOP-HE100	0,015	80×60×50 mm	1 300 000 bodů/s
Breuckmann GmbH	OptoTOP-HE600	0,050	480×380×300 mm	1 300 000 bodů/s
Genex	EI 3D Digitizer	0,025-0,25	59×48×32 mm až 250×200×200 mm	442 368 za <1 s
Steinbichler Optotechnik	Comet C50	0,02	45×35 mm	6 666 bodů/s
Steinbichler Optotechnik	Comet C400	0,07	420×340 mm	6666 bodů/s

#### 4.5 Navigace

Protože je možné snímat objekt pouze z jednoho úhlu v danou dobu, je třeba kombinovat více měření z různých úhlů. To může být realizováno pomocí nalepení referenčních značek na objekt a poté po zkombinování skenů z různých úhlů se dané odpovídající si značky překryjí, aby tak vznikl kompletní model. Otáčení může být zautomatizováno pomocí otočného stolu. [18]

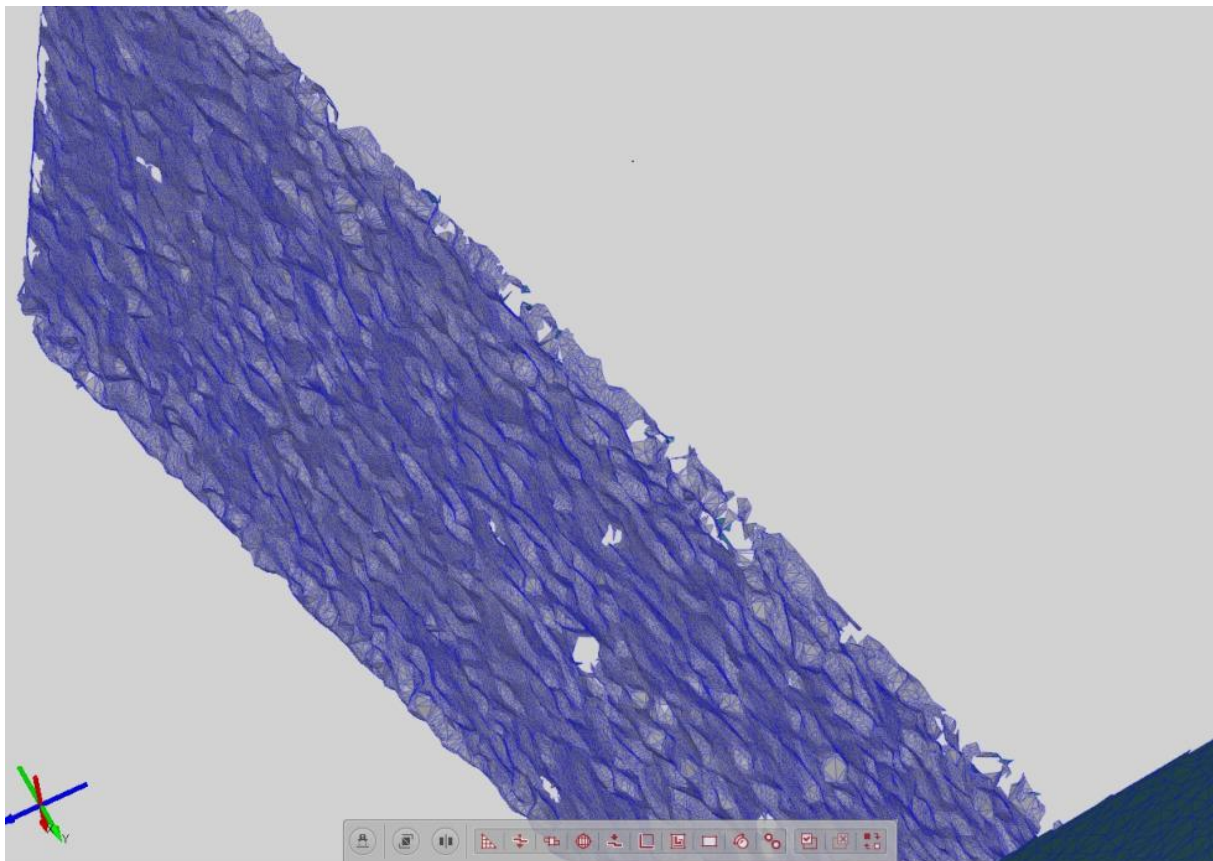


Obr. 17 Navigace 3D skeneru pomocí orientačních značek [18]



#### 4.6 Omezení

Největší nedostatkem použití strukturovaných vzorů jsou chyby měření z důvodu výskytu lesklých a transparentních ploch na povrchu objektů. Paprsky světla emitované projektorem se na těchto površích mohou odrazit pod úhlem nevhodným pro zachycující zařízení nebo dokonce projít skrze povrch. Základní podmínkou této techniky je, aby objekt měl dostatečnou difúzní odrazivost, jinak dochází k výraznému ovlivnění a zkreslení naměřených dat, z toho vyplývá, že pozice naměřených bodů se liší od souřadnic skutečných bodů. Názornou ukázkou je zachycování rozměrů koncové měřky, která je využívána jako etalon pro kontrolu dílenských měřidel. Problém nastává při měření vzdáleností dvou navzájem rovnoběžných rovinných kontrolních ploch. Ty jsou z vysoce kvalitní speciálně legované oceli bez vnitřního pnutí, s vysokou stabilitou a dobrou přilnavostí. Pečlivě tepelně zpracované a ručně lapované s přesností řádově v tisícinách milimetrů. Takto připravený povrch má vysokou reflektanci (odrazivost), tudíž je značně lesklý a jak je vidět na Obr.18 dochází kvůli tomu k výraznému zvrásnění plochy nebo v některých místech dokonce i děrám. Je zde znázorněna polygonální síť, vzniklá proložením trojúhelníků naměřenými body. To se provádí za účelem vytvoření souvislého povrchu. S problémem lesklých povrchů se lze částečně vypořádat nanesením vrstvy matujícího prášku na povrch měřeného objektu, to se provádí většinou sprejem. [19, 29]



Obr. 18 Vady výsledného skenu kvůli lesklému povrchu [29]

#### 4.7 Dělení podle struktury promítaných vzorů

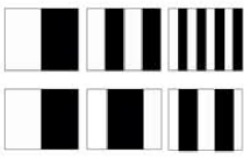
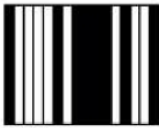

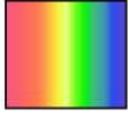
Pro zlepšení přesnosti, rychlosti a kvality měření se vyvíjí stále nové druhy vzorů, které v projekčním zařízení vznikají odlišným způsobem. Zpracování a analýza každého vzoru se od sebe liší. Každý vzor má jisté výhody i nevýhody, proto se žádný nepreferuje, ale vybírá podle okolností. Vzory jsou složeny z jednotlivých skupin pixelů majících odlišná kódová hesla. Kódová hesla jsou mapována v promítaných vzorech na základě úrovně šedé, u jiných vzorů zase barevných nebo geometrických reprezentací. Výhodou většího množství zakódovaných bodů je vyšší přesnost, to ale znamená složitější mapování ve vzorech a tím i vyšší náročnost na výpočetní výkon.

**Vzory můžeme podle kodifikace rozdělit do tří základních skupin:**

- temporální kodifikace
- prostorová kodifikace
- přímá kodifikace

Rozdělení těchto kodifikací je znázorněna v tab.4. Dále můžeme vzory dělit například dle periodicity kódovaných hesel, barevné hloubky nebo vhodnosti pro dynamické měření. [29]

Tab.4 Rozdělení vzorů strukturovaného světla [23]

<b>Temporální kódifikace</b>	<b>Binární kódy</b> 	Posdamer et al. Inokuchi et al. Minou et al. Trobina Valkenburg and McIvor Skocaj and Leonardis Rocchini et al.	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	<b>n-ární kódy</b>	Caspi et al. Horn and Kiryati	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
	<b>Šedý kód + fázový posuv</b>	Bergmann Sansoni et al. Wiora Gühring	✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓
	<b>Hybridní metody</b>	Kosuke Sato Hall-Holt and Rusinkiewicz	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
<b>Prostorové kódifikace</b>	<b>Neformální kodifikace</b>	Maruyama and Abe Durdle et al. Ito and Ishii Boyer and Kak Chen et al.	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	<b>De Bruijnovy vzory</b> 	Hügli and Maître Monks et al. Vuylsteke and Oosterlinck Salvi et al. Lavoie et al. Zhang et al.	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	<b>M-pole</b> 	Morita et al. Petriu et al. Kiyasu et al. Spoelder et al. Griffin and Yee Davies and Nixon Morano et al.	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	<b>Úrovně šedé</b>	Carrhill and Hummel Chazan and Kiryati Hung	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓
<b>Přímé kódifikace</b>	<b>Barevné vzory</b> 	Tajima and Iwakawa Smutny and Pajdla Geng Wust and Capson Tatsuo Sato	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	<b>Aplikovatelnost scény</b>	Statický Pohybující	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
<b>Barevná hloubka pixelu</b>	Binární Úrovně šedí Barevné	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	
<b>Strategie kódifikace</b>	Periodické Absolutní	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓	

#### 4.7.1 Temporální kodifikace

Temporální kodifikace přiřazuje posloupnost hodnot každému kódovanému bodu pomocí sekvenční projekce vzorů. To znamená, že promítané vzory se mění v čase, promítané proužky mění svoje parametry podle určité závislosti.

##### Výhody:

- Vysoké rozlišení a přesnost měření řádově v  $\mu\text{m}$ , přesnost určení 3D souřadnic jednotlivých bodů je úměrná přesnosti binarizace a lokalizace pruhů
- Možnost využití při skenování barevných objektů

##### Nevýhody:

- Nelze uplatnit pro pohybující se objekty, základní předpoklad měření je statická scéna. (neplatí pro Hall-Holt a Rusinkiewiczovu modifikaci)
- Pro vyšší přesnost je nutný vyšší počet pruhů, tím i delší sekvenční čas, a tím nárůst doby skenování

#### 4.7.2 Prostorová kodifikace

Narozdíl od temporální kodifikace není prostorová kodifikace závislá na čase, protože měření scény je realizováno jen jedním snímkem. Kodifikace pixelu je vytvářena na základě informací o intenzitě nebo barvě pixelů v jeho blízkém okolí. Velikost této oblasti je přímo úměrná počtu zakódovaných bodů a potom nepřímo úměrná počtu užitých barev. Pokud se v této oblasti objeví nespojitost povrchu objektu nebo stín, nedokáže si s tím metoda poradit, toto místo je pak ve výsledném modelu hluché.

##### Výhody:

- Možnost zaznamenávání pohybujících se objektů
- Do jednoho vzoru lze situovat veškerý kódovací systém

##### Nevýhody:

- Omezené rozlišení (nižší než u temporální kodifikace)
- Obtížnější dekódování u vzorů s větším počtem barev
- Nespojitost povrchu objektů zapříčiňuje chyby v měření

#### 4.7.3 Přímá kodifikace

U přímé kodifikace vzorů je možné použít pouze jednosnímkové skenování. Každý pixel je kodifikován vlastní barvou nebo intenzitou, proto mohou promítané vzory obsahovat široké spektrum barev a intenzit. Zjednodušení identifikace souřadnic je zde prováděno pomocí jednotlivých vlnových délek a různými projekčními úhly.

##### Výhody:

- Menší počet promítaných vzorů
- Vysoké rozlišení

##### Nevýhody:

- Kvůli malé Hammingově vzdálenosti je přijímaný signál více náchylný na šum
- Nutné použití speciálních projektorů a kamer zvyšuje cenu
- Nelze využít při skenování dynamické scény
- Nízká přesnost (řádově v mm) [29]

## 4.8 Konkrétní dostupné 3D skenery využívající strukturované světlo

### ATOS Triple Scan

ATOS (Advanced Topometric Sensor) je mobilní bezdotykový optický 3D skener firmy GOM, který je určený pro nejrůznější aplikace a využívá pro skenování strukturované světlo. To ve výsledku znamená, že výstupní naskenovaná data mají velké rozlišení, vlastní měření je výkonné, to znamená velké množství dat za krátký čas, a díky konstrukci skeneru je možná široké uplatnění v oblasti měřitelných objemů, které jsou v řádech milimetrů až metrů. Jeho využití je možné díky jeho přesnosti při kontrole kvality či ukládání optimalizovaných dat z design aplikací. Systému ATOS se nejvíce užívá v oblastech CAD, CAM a FEM (Finite Element Method), jelikož je v těchto systémech požadováno měření reálných objektů a poté jejich srovnání s teoretickým modelem. Všechny skenovací systémy ATOS se mohou rozšířit o počítačem řízený rotační stůl. Ten je zvláště vhodný, pokud se provádí více opakovaných měření stejných dílů. Dalším rozšířením je i počítačem řízený robot, který se využije v případě plné automatizace měření.

Jsou používány pruhy strukturovaného světla, pomocí kterých dvojice kamer vytváří prostorový model. Objekt se snímá postupně tak, že se nasnímají minimálně tři body z předchozího měření, které slouží ke skládání jednotlivých skenů na sebe. Pro zpřesnění se na součást lepí speciální referenční štítky a na povrch se nanáší matricí prášky. Potom se přesnost měření může pohybovat v rozmezí  $\pm 0,05$  mm. [5, 27]

#### Přednosti systému:

- vysoké rozlišení (až 66 bodů na 1 mm)
- flexibilita (jedním zařízením můžeme měřit objekty v řádech milimetrů až metrů)
- mobilita (je možné snadno převážet)
- jednoduchost ovládání (automatický přepočet transformací)
- možnost měření lesklých nebo průhledných objektů (po zmatnění povrchu pomocí křídových nebo titanových sprejů)
- možnost měření měkkých materiálů

#### Výstupy z digitalizace:

- optimalizovaná polygonální síť (STL)
- mrak bodů
- řezy (body)
- obrysové a kontrastní křivky (body)
- barevná mapy odchylek od CAD modelu (obrázky)
- protokol měření (HTML, Word, PDF)

#### Oblasti využití digitalizovaných dat:

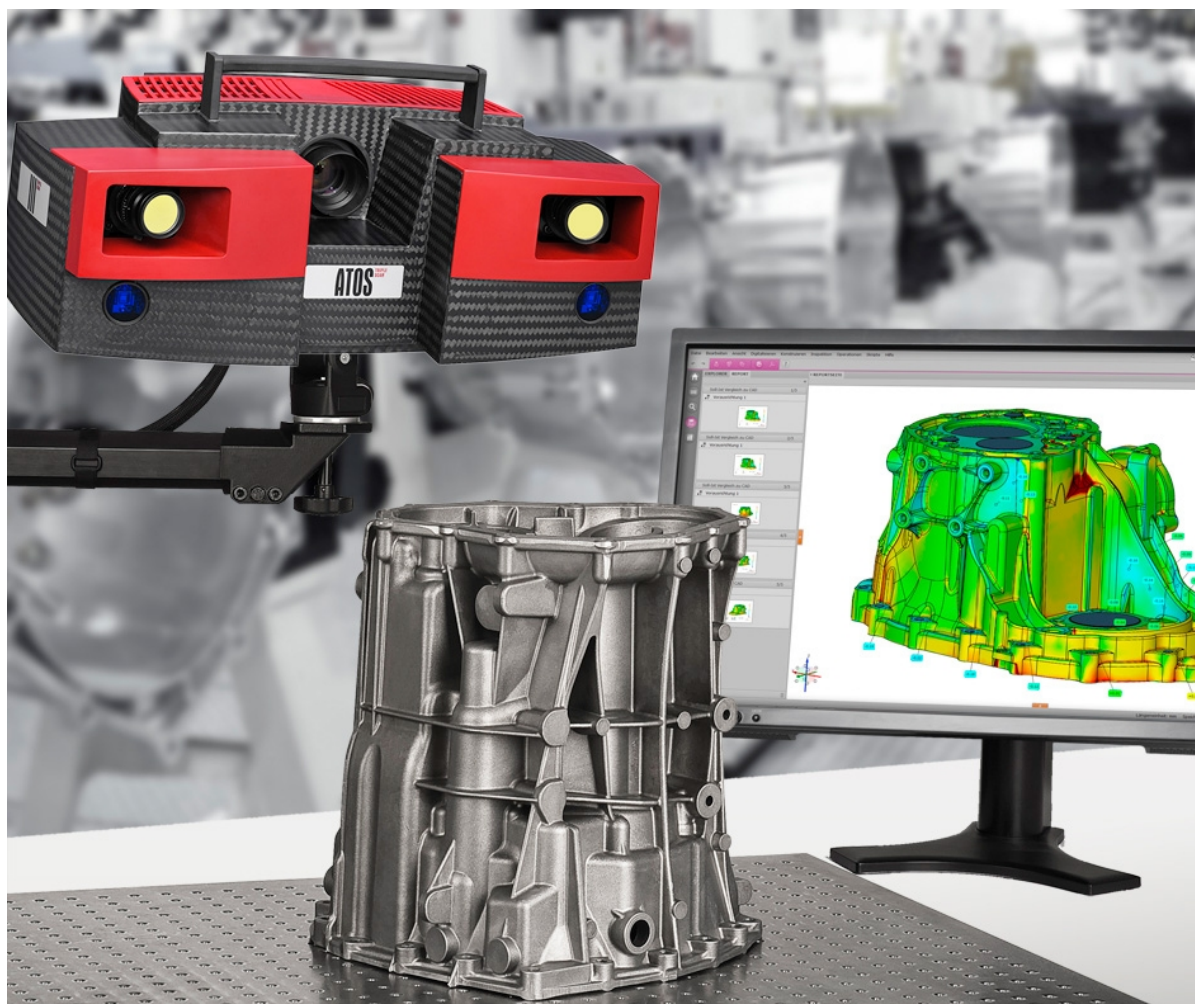
- kontrola kvality
- reverzní inženýrství
- rychlá výroba prototypů
- virtuální realita
- přímé obrábění
- simulace vstřikování plastů
- simulace tažení plechu
- kontrola kolize dílu [5]

### Rozdělení systémů ATOS:

**ATOS II** má narozdíl od systému ATOS I vyšší rozlišení CCD čipů  $2 \times 5.000.000$  bodů, přesnější projekční jednotku, laserové odměřování vzdálenosti skeneru od objektu a robustnější design. Maximální měřitelný objem je  $2000 \times 1600$  mm. ATOS II má široký rozsah využití i v náročných aplikacích.

**ATOS III** je dalším v řadě systémů ATOS s rozlišením CCD čipů  $2 \times 8.000.000$ . Narozdíl od systému ATOS II má kvalitnější optické prvky a výkonnější zdroj světla. Maximální měřitelný objem je  $2000 \times 2000$  mm. Je určen pro nejnáročnější aplikace jako například měření velkých dílů s malými detaily na povrchu.

**ATOS 16M** je nejpokročilejším systémem s rozlišením CCD čipů  $2 \times 16.000.000$  bodů. Maximální měřitelný objem je  $2000 \times 2000$  mm. [5, 27]



Obr. 19 GOM ATOS III [24]

## 5 ZÁVĚR

Tato práce se v první části zabývala utříděním rozdělení používaných technologií 3D skenerů, jejichž počet se v dnešní době pohybuje již v desítkách. 3D skenování se stává čím dál víc rozšířenější i mimo náročnější odvětví nejen rozšiřováním počtu metod, ale zvláště díky levnějším technologiím, tudíž i levnějším 3D skenerům, které pronikají stejně jako 3D tiskárny mezi běžnou populaci. Také kombinace 3D skenerů a 3D tiskárny dává nové perspektivy využití obou těchto zařízení.

V druhé části jsou popsány vybrané metody 3D skenování, a to konkrétně 3D laserové skenování a 3D skenování s využitím strukturovaného světla. Zástupci obou metod byli porovnání podle určitých parametrů v rámci dané metody. Tyto parametry byl například cena, přesnost, rozlišení nebo dosah. Není korektní porovnávat tyto metody navzájem, ale je jisté, že při výběru konkrétní metody pro využití pro konkrétního skenování budou tyto kritéria hrát jistou roli. Proto je vhodné porovnat ty to metody v oblasti jejich využitelnosti v koncových aplikacích. Pro mnoho různých užití bude přesnost obou metod tak jako tak dostačující, proto se bude uživatel rozhodovat na základě vyspělosti metody, jako je stupeň automatizování, samozřejmě bude hrát roli i cena nebo doba měření, či cena samotného zařízení. Přesnost 3D laserových skenerů se jen lehce liší v závislosti na měřené vzdálenosti, tudíž jejich využití bude vhodné pro měření na větší vzdálenosti, zvláště v prostředí, kde se náhle mění podmínky osvětlení. Skenery se strukturovaným světlem vykazují vysokou přesnost při skenování relativně malých objemů, ale využitím fotogrammetrie, je možné skenovat i velké objekty pomocí pozdějšího skládání jednotlivých skenů. Ale z pohledu koncového uživatele skenování velkých objektů by bylo časově náročné se získaným velkým množstvím dat, ze kterého by dále bylo obtížné tvořit smysluplné počítačové modely. Problém s náročností zpracování vyvstává i u skenování laserem, to však jen ukazuje, jak by bylo náročné zpracovat diametrálně větší množství získaných dat ze sektorového skenování velkých objektů strukturovaného světla. Díky snímanému rozlišení a zvláště díky působení osvětlení okolního prostředí vykazují laserové skenery v oblasti měření velkých objektů lepší výsledky než skenery se strukturovaným světlem. O tom svědčí i značné využití 3D laserových skenerů v oblasti geodetického měření, v případě LIDAR technologie dokonce 3D skenování povrchu země z oběžné dráhy pomocí umělých družic. V oblasti kontroly v reálném čase a bezpečnosti jsou taktéž laserové skenery výhodnější díky jednoduchosti jejich zpracování oproti složitějšímu promítání různých vzorů strukturovaných vzorů, které si žádají delší dobu snímání.





## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Destruktivní 3D skenery* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main07.html>
- [2] *3D skenování* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz>
- [3] 3D Scanning. In: *Digital Geometry Processing* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.hao-li.com/Hao\\_Li/Hao\\_Li\\_-\\_teaching\\_%5BCSCI\\_599\\_Digital\\_Geometry\\_Processing\\_SS\\_2015%5D.html](http://www.hao-li.com/Hao_Li/Hao_Li_-_teaching_%5BCSCI_599_Digital_Geometry_Processing_SS_2015%5D.html)
- [4] Introduction to 3D Scanning. In: *ENGN 2502 3D Photography Lecture 2* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://mesh.brown.edu/3DP-2012/pdfs/3DP-2011-lecture-2.pdf>
- [5] URBÁNEK, Aleš. *KONTROLA SOUČÁSTÍ POMOCÍ METOD REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VUT v Brně Fakulta Strojního Inženýrství.
- [6] ŠNAJDÁREK, Ladislav. *METODY 3D LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ OBROBKU VE VÝROBNÍM PROCESU*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VUT v Brně Fakulta Strojního Inženýrství.
- [7] *Zařízení RE1000*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-28] Dostupné také z: <http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/obr14.jpg>
- [8] *Frézování RE1000*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-28] Dostupné také z: <http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/obr15.jpg>
- [9] ROLAND & MICROSCRIBE. *Charles Schimp* [online]. 2011 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://charlesschimp.blogspot.cz/2011/02/roland-microscribe.html>
- [10] CEITEC VUT Instaluje unikátní mikrotomograf. *JIC.cz* [online]. 2012 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [www.jic.cz/archiv-aktualit/ceitec-vut-instaluje-unikatni-mikrotomograf](http://www.jic.cz/archiv-aktualit/ceitec-vut-instaluje-unikatni-mikrotomograf)
- [11] Stereovision system. *Photobucket.com* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://s780.photobucket.com/user/powerlee918/media/cvchina/cameras.png.html>
- [12] Terestrické 3D skenování. In: ŘÍHA, Jan. *Terestrické 3D skenování* [online]. 2013 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://spszem.cz/storage/files/67/3D-skenovani-2013.pdf>
- [13] JECIĆ, Stjepan a Nenad DRVAR. THE ASSESSMENT OF STRUCTURED LIGHT AND LASER SCANNING METHODS IN 3D SHAPE MEASUREMENTS. *4th International Congress of Croatian Society of Mechanics* [online]. 2003 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <https://bib.irb.hr/datoteka/170686.p126.pdf>
- [14] ARAYICI, Yusuf. An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment. *Automation in Construction* [online]. 2007 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580507000350>
- [15] Calibration and characterization of structured-light 3-D scanners. *Universita Degli Studi di Salerno* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.misure.unisa.it/research/scanners3d>
- [16] DAVID 3.x User Manual Pages. *The DAVID 3D Scanner Wiki* [online]. 2014 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://wiki.david-3d.com/david3\\_user\\_manual/structured\\_light](http://wiki.david-3d.com/david3_user_manual/structured_light)
- [17] WEST, Perry. Nineteen Ways to do 3-Dimensional Imaging. *3D Techniques* [online]. 2013 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://autovis.com/web2/images/stories/resources/3d\\_techniques.pdf](http://autovis.com/web2/images/stories/resources/3d_techniques.pdf)
- [18] SAMADI, Ali. Structured-light 3D scanner. *Structured-light 3D scanner* [online]. 2013 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [https://www.academia.edu/1107159/Structured-light\\_3D\\_scanner\\_-\\_Samadi](https://www.academia.edu/1107159/Structured-light_3D_scanner_-_Samadi)
- [19] Základní informace ke koncovým měrkám. In: *Mitutoyo* [online]. 2014 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.merici-pristroje.cz/files/ckeditor/5b-produkty\\_dle\\_druhu/6-komun%C3%A1ln%C3%AD\\_m%C4%9B%C5%99idla/9-koncove\\_merky/MITUTOYO\\_merky.pdf](http://www.merici-pristroje.cz/files/ckeditor/5b-produkty_dle_druhu/6-komun%C3%A1ln%C3%AD_m%C4%9B%C5%99idla/9-koncove_merky/MITUTOYO_merky.pdf)
- [20] Acquiring 3D shape. In: *3D scanning* [online]. 2010 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://vcg.isti.cnr.it/~ganovell/bertinoro/L2\\_RM\\_creation.pdf](http://vcg.isti.cnr.it/~ganovell/bertinoro/L2_RM_creation.pdf)
- [21] XU, Jing, Jules Douet JIANGUO ZHAO, Libin SONG a Ken CHEN. A simplecalibrationmethodforstructuredlight-based 3D profilemeasurement. *Optics & LaserTechnology*. 2013. DOI: doi:10.1016/j.optlastec.2012.09.035. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399212004641>
- [22] STANČIĆ, Ivo, Josip MUSIC a Vlasta ZANCHI. Improved structured light 3D scanner with application to anthropometric parameter estimation. *Measurement* [online]. 2012 [cit. 2015-05-28]. DOI: doi:10.1016/j.measurement.2012.09.010. Dostupné z:

- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224112003594>
- [23]SALVI, Joaquim, Jordi PAGÉS a Joan BATTLE. Pattern codication strategies in structured light systems. *Pattern Recognition* [online]. 2004, (37) [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.9.5774>
- [24]Sonderschau GOM bild 2 gross. *Franhofer Vision* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.vision.fraunhofer.de/de/files/T923/sonderschau\\_gom\\_bild\\_2\\_gross.jpg](http://www.vision.fraunhofer.de/de/files/T923/sonderschau_gom_bild_2_gross.jpg)
- [25]Konica Minolta Vivid 910. *Hellopro* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.hellopro.fr/images/produit-2/2/7/5/numerisation-par-scanner-laser-3d-konica-minolta-vi910-20572.jpg>
- [26]3D scanner. *Creaform* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [http://www.creaform3d.com/blog/pun5th75ef\\_wp/wp-content/uploads/3d\\_scandfig1-300x252.jpg](http://www.creaform3d.com/blog/pun5th75ef_wp/wp-content/uploads/3d_scandfig1-300x252.jpg)
- [27]*Optical Measuring Techniques: GOM* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.gom.com/>
- [28]3D skenery - skenování reálných objektů do virtuálních modelů [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/3d-skenery/>
- [29]DOKOUPIL, Filip. *STANOVENÍ ODCHYLEK MĚŘENÍ 3D OPTICKÉHO SKENERU*. BRNO, 2013. Bakalářská práce. VUT v Brně Fakulta strojního inženýrství.
- [30]TANG, Pingbo, Daniel HUBER, Burcu AKINCI, Robert LIPMAN a Alan LYTLE. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction* [online]. 2010, **19** [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580510000907>

## 6 VYSVĚTLENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ A ZKRATEK

**3D** – Trojrozměrné

**PŘESNOST** – Přesnost polygonové sítě je měřena odchylkou mezi naměřenými daty a skutečným objektem. Přesnost je daná typem, specifikací a nastavením skeneru. U 3D skenování nezaměřovat s Rozlišením (viz. níže)

**ZAROVNÁNÍ** – U 3D skenování se jedná o umístění jednoho každého skenu do referenčního systému pro vytvoření jednoho celistvého, kompletního modelu. Udáváno také jako registrace.

**CAD** – Computer-Aided Design – vytvořený digitální model pro design, strojírenství a výrobu. Modely jsou tvořeny různými geometrickými tvary jako trojúhelníky, liniemi, válci a plochami. Typickým formátem CAD je .stp a .igs.

**CAE** - Computer-aided engineering – digitální simulace výkonu objektu a sestav. CAE sestává ze simulací typu finite-element analysis (FEA) a computational fluid dynamics (CFD).

**CMM RAMENO** - coordinate measurement machine který používá bodovou, nebo kuličkovou sondu na polohovacím rameni, umožňující uživateli bodově snímat 3D data z fyzického objektu.

**CMM RAMENOVÝ ENKÓDÉR** - opto-elektronický přístroj, detekující inkrementální linie na stupnici ke zjištění přesné polohy ramena. Enkodér je také znám jako čtecí hlava.1

**CNC stroj** – Computer Numerical Control – je počítačem řízený obráběcí stroj který může vytvářet produkt v několika osách pro zvýšení výrobní přesnosti.

**CAI** – Computer-Aided Inspection – počítačová kontrola naskenovaného výrobku s ideálním CAD modelem pro zjištění přesnosti s jakou byl vyroben.

**NURBS** - Non-uniform rational b-spline; matematický model používaný v počítačové grafice a CAD pro vytvoření křivek a ploch. (povrch reprezentovaný čtyřhrannými pláty, řízenými mřížkami)

**OPTICKÝ CMM SKENER** – 3D skener jehož poloha v prostoru je snímána referenční optickou stanicí CMM. Optická stereoskopická CMM kamera snímá aktivní, nebo pasivní značky umístěné na 3D skeneru a dílu a pomocí dynamické reference je umísťuje do souřadného systému.

**FOTOGRAMETRIE** – Metrologický postup pro velmi přesné měření ze stereoskopických snímků.

**MRAČNO BODŮ** – je oblak bodů v 3D prostoru reprezentovaných souřadnicemi X,Y,Z. Většinou se jedná o povrchovou reprezentaci nějakého fyzického objektu. Nejčastějším formátem zápisu pro mračno bodů je .txt, .igs, .ascii.

**REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ** - Proces zjišťování technologických aspektů zařízení, objektu, nebo systému prostřednictvím analýzy jeho struktury, funkčnosti a provozu. Ve 3D skenování proces reverzního-inženýrství zahrnuje sken objektu a následná rekonstrukce jeho tvaru ve specializovaných programech, do podoby 3D modelu.

**ROZLIŠENÍ** – Defínuje velikost detailu zachyceného polygonovou sítí v milimetrech. Je možno ji také přirovnat k rozlišení obrazovky v pixelech. Čím vyšší rozlišení, tím více trojúhelníků je obsaženo v polygonové síti a tím více dat je pro zbudování potřeba nasbírat.

**STL** – StereoLithography – formát zápisu polygonové sítě vycházející ze stereolitografických CAD programů vytvořených firmou 3D Systems Inc. a podporovaných jinými programy. STL je obecně používáno pro rapid prototyping, reverzní inženýrství, stejně jako pro kontrolu kvality jako výstup ze 3D skenování.

**TRIANGULACE** - způsob zjišťování souřadnic a vzdáleností. Provádí se trigonometrickým výpočtem. Sestrojí se pomyslný trojúhelník, jehož jedna strana je strana již známého jiného trojúhelníku s dvěma koncovými referenčními body a třetím bodem je místo, jehož souřadnice se zjišťuje

**POLYGONOVÁ SÍŤ** – výstup ze samo-polohovacích 3D skenerů. Typickými formáty jsou .stl, .obj, sat, a ply.