




Státní doktorská zkouška

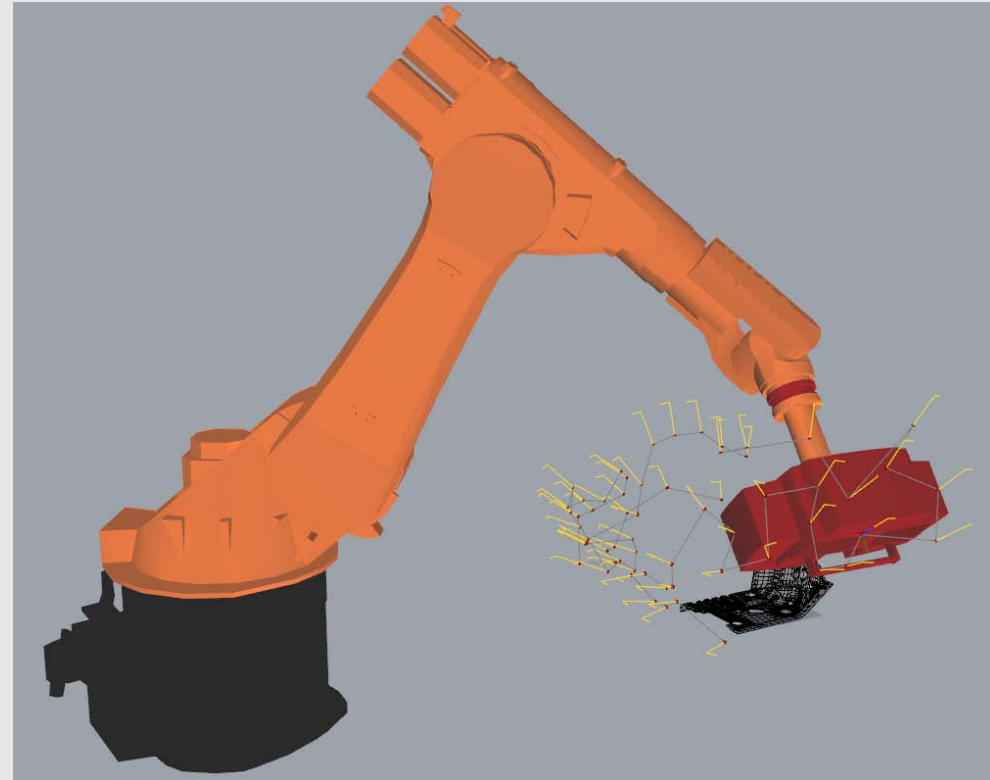
Ing. Tomáš Koutecký

 Institute of Machine  
and Industrial Design

Ústav konstruování – Odbor metodiky konstruování  
Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně

Prezentace - Státní doktorská zkouška  
22. října 2014, FSI VUT v Brně, Česká republika

- **Úvod**
- **Motivace**
- **Současný stav poznání**
- **Kritické zhodnocení**
- **Řešení dizertační práce**
- **Výsledky výzkumu a vývoje**



## Téma dizertační práce:

Automatizace 3D optického měření pomocí fotogrammetrie

**Školitel:** doc. Ing. Jan Brandejs, CSc.

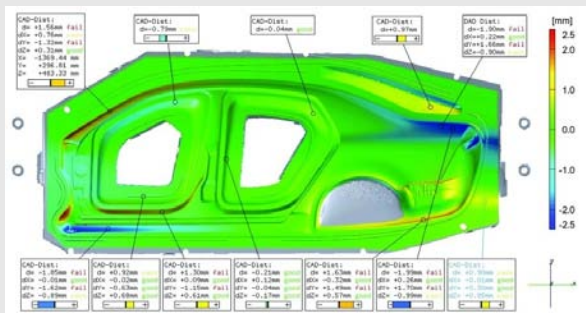
**Školitel specialista:** doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.



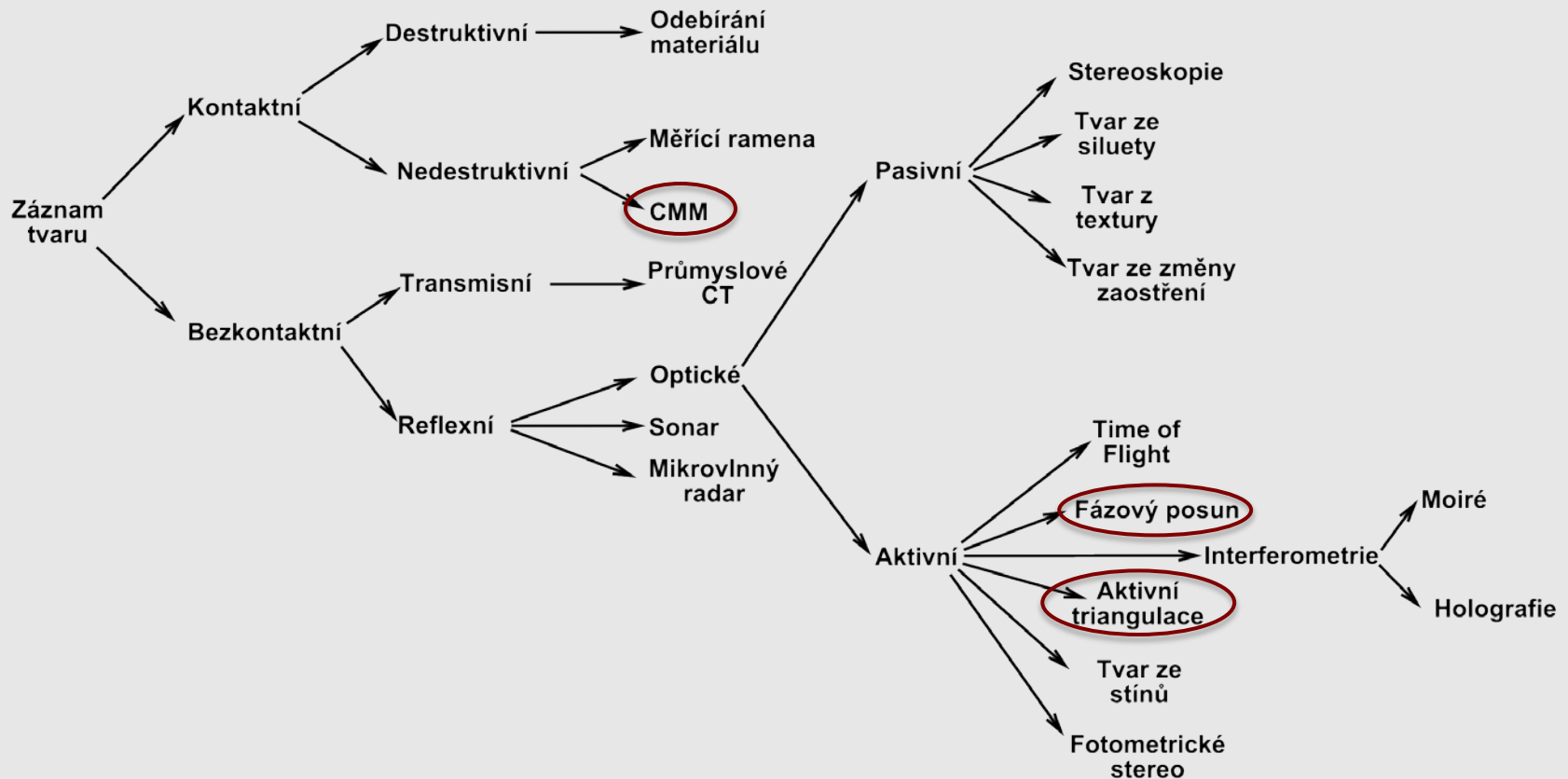
[www.gom.com](http://www.gom.com)

## Inspekce

- Ověření specifikací (rozměry a geometrie)
- **Modelová situace:** Měření plechových dílů karoserie automobilu
- **Vyžadováno:** Rychlost měření  
Přesnost  
Informace o kompletním tvaru dílu



## Metody získání dat



Bellocchio, F.; et al. *3D Surface Reconstruction: Multi-Scale Hierarchical Approaches*. (2013)

## Metody inspekce

*Tradiční metody*



*Současné metody*

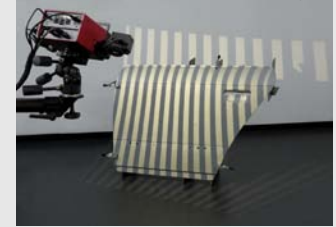
CMM



Laserové skenery

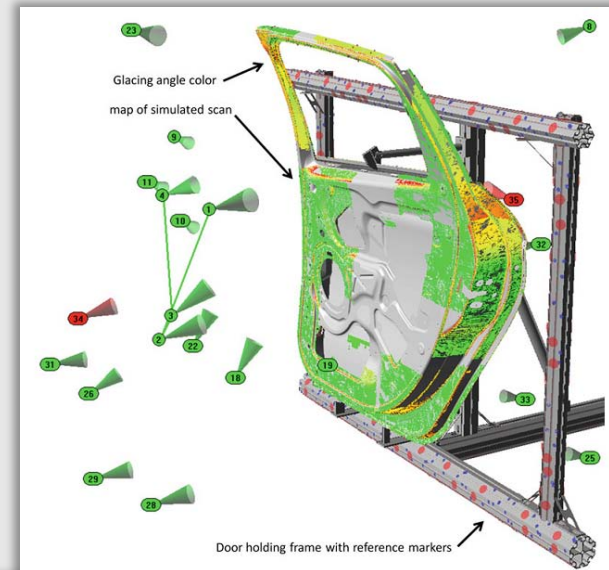


Proužková projekce

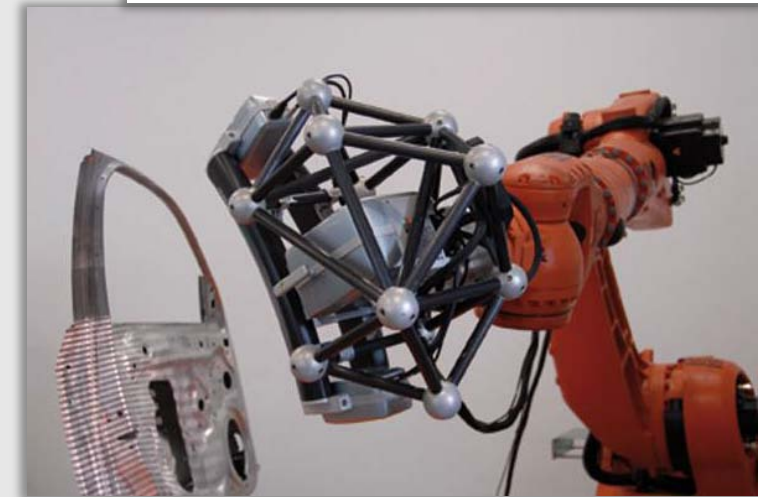


- Fáze inspekce – **příprava měření, získání dat, registrace dat, kontrola rozměrů**
- **Automatizace v přípravě měření** – generování pozic na základě CAD dat

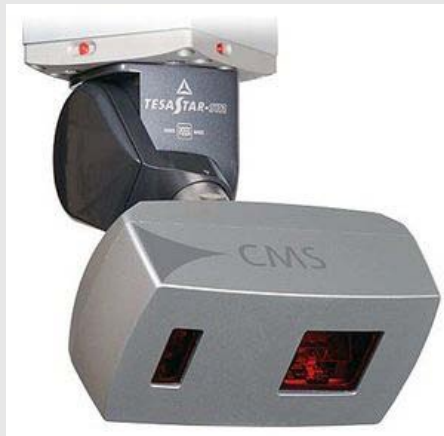
- Měření pomocí **CMM** je **pomalé**, výsledkem je jen velmi **málo naměřených bodů**
- Vyrůstající zavádění **optických systémů** do průmyslových aplikací
- **Časová úspora** díky **automatizaci**



- Manuální pozicování ❌
- Poloautomatické pozicování
- Automatické pozicování ✅



- Automatizace v inspekci pomocí **CMM**, **laserových skenerů** a **skenerů s proužkovou projekcí**
- **Redukce vlivu odlesků** při skenování
- Využití **osvětlovacích modelů** pro simulaci skenování



[www.directindustry.com](http://www.directindustry.com)

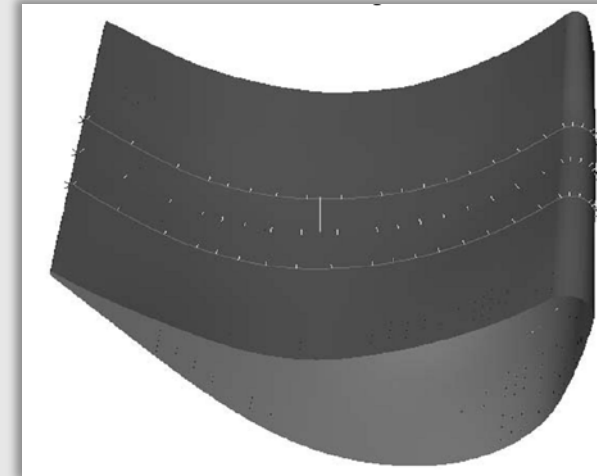


<http://www.alibaba.com>



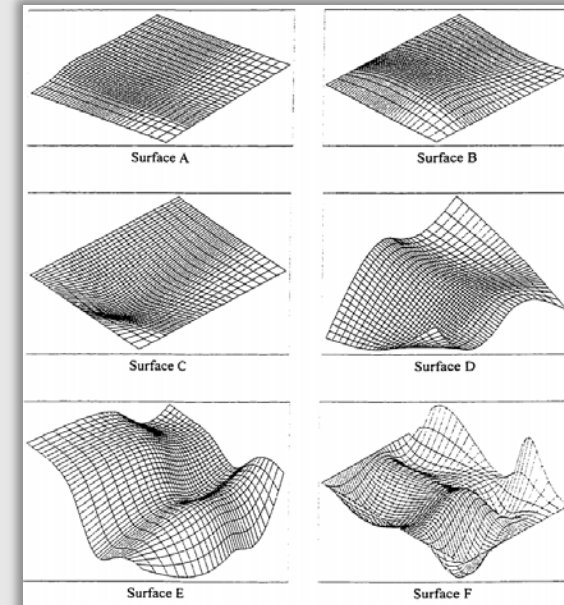
## AINSWORTH, I., et al. 1999, 2000

- Registrace souřadného systému CAD a CMM dat
- Vzorkování povrchu – získání bodů měření
- Vzorkování – Rovnoměrné, Založené na křivosti, Minimální hustota, Založené na parametrizaci
- **Závěry:** Přesnější popis volných povrchů při inspekci



## ELKOTT, D. F., et al. 2002

- Vzorkování povrchu pro získání měřicích bodů
- 4 vzorkovací algoritmy + genetický algoritmus
- Ekvi-parametrický, Velikost oblasti, Změna křivosti, Hybridní
- Nejlepší výsledky – genetický algoritmus; nevýhodou je dlouhý výpočetní čas
- **Závěry:** Robustní řešení pro měření volných povrchů pomocí CMM

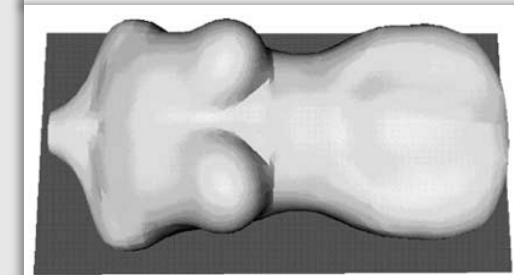
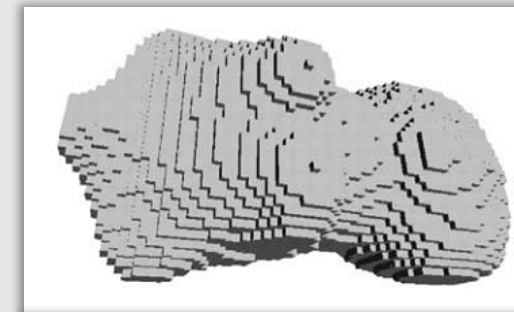
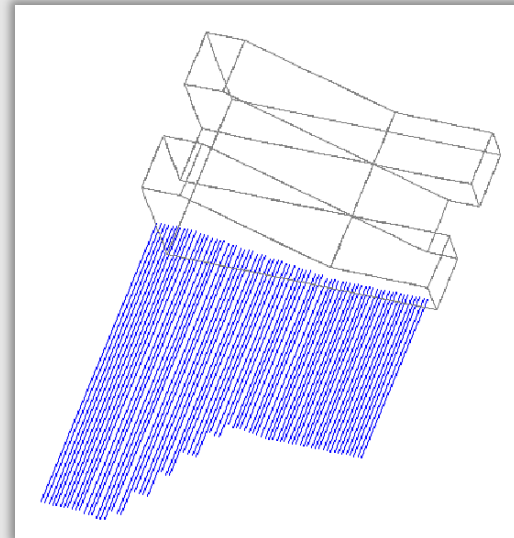


## PRIETO, F., et al. 1999, 2000, 2002

- Ideální pozice laserového skeneru (na základě CAD dat)
- Nejlepší výsledky pro: 170 do 240 mm vzdálenost
  - 35 to 35 ° úhel ( $\alpha$ )
  - 15 to 35 ° úhel ( $\beta$ )
- Kontrola kolizí (voxelový model)
- **Závěry:** Optimální pozicování zvyšuje přesnost měření

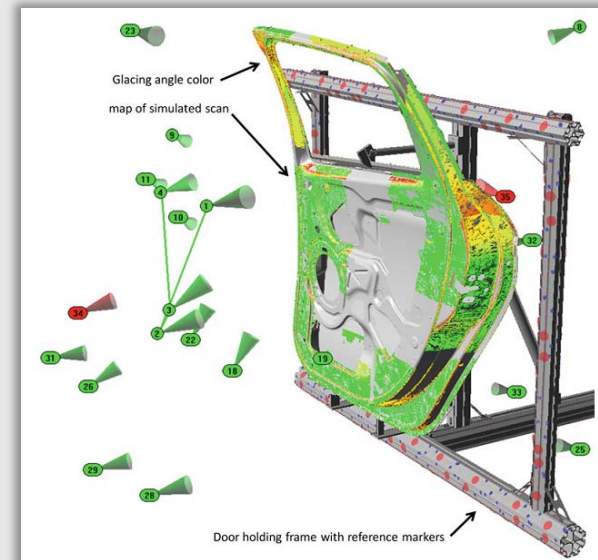
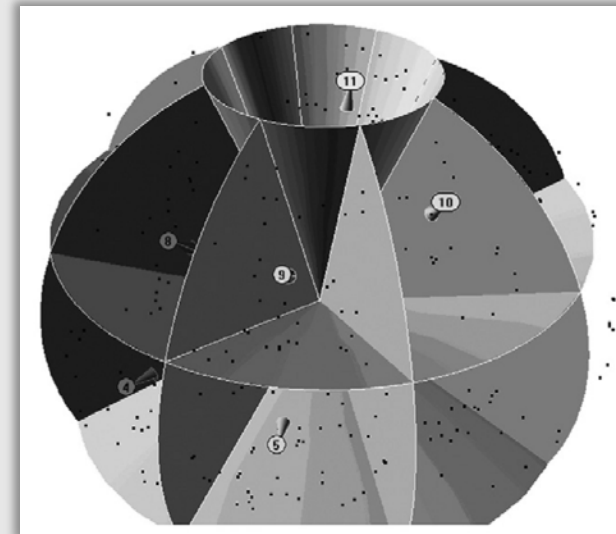
## MARTINS, F. A. R., et al. 2006

- Manuální měření s chabými pozicemi → nižší přesnost
  - Voxelový model – sada pohledů & dráha skeneru
- Závěry:** Voxelový model vs. NURBS plochy v ostatních publikacích



## GERMANI, M., et al. 2009, 2010, 2012

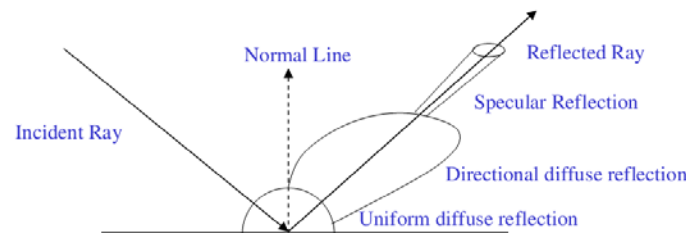
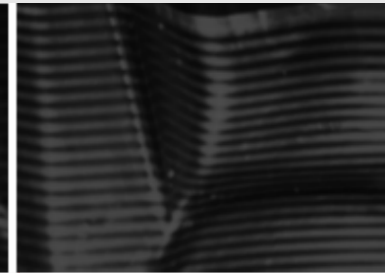
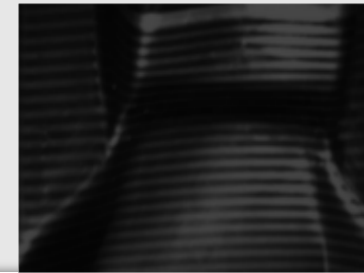
- Komplettní inspekční systém s 6 DOF robotem
- Výpočet pozic měření z CAD dat (dveře - 32 pozic)
- Metody povrchových normál a map viditelnosti
- Strategie návrhu pozic: GD&T, Ostříhy a hrany, Velké plošné díly, Komplettní tvar dílu, Poloha konkrétních bodů
- Registrace dat: metoda RPM nebo ICP
- Časové úspory 25 – 45 %
- **Závěry:** Metodika procesu hledání pozic, prezentované strategie a metody vhodné pro vlastní řešení



# Přehled literatury – Skenery se strukturovaným světlem

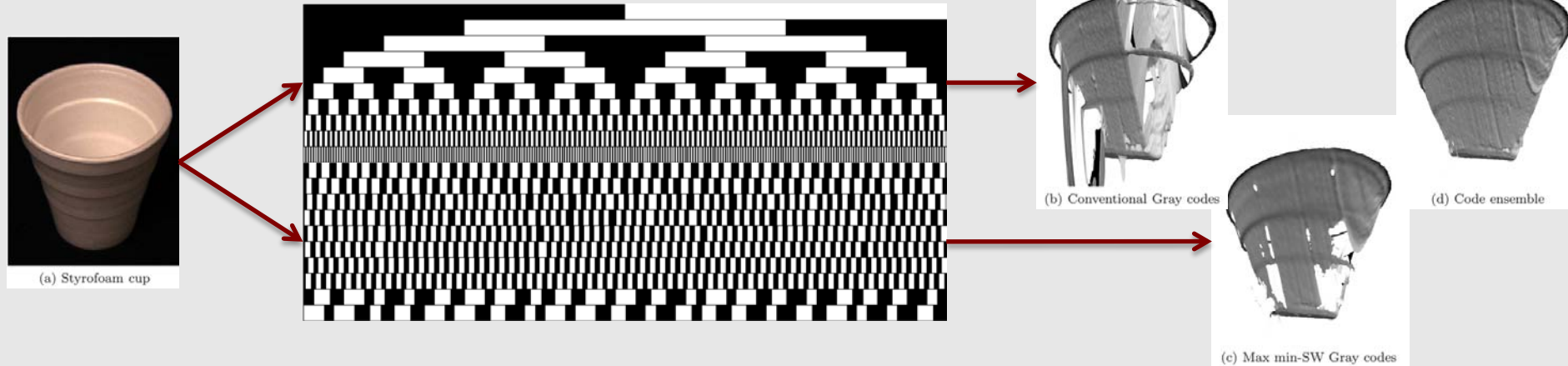
SHENG, W., et al. 2000, 2002, 2003, 2006, 2007

- Kompletní inspekční systém založený na CAD datech
- Obsahuje zpětnovazebný vstup
- Doplnění skenovacích pozic na základě kvality získaných dat
- Řeší problematiku stínů a odlesků
- **Závěry:** Systém řeší problematiku odlesků, avšak až na základě naskenovaných dat



## GUPTA Mohit et al. 2011

- Redukce odlesků pomocí změny promítaného vzoru



## JIANG Hongzhi et al. 2012

- Redukce odlesků pomocí snímků s vysokým dynamickým rozsahem





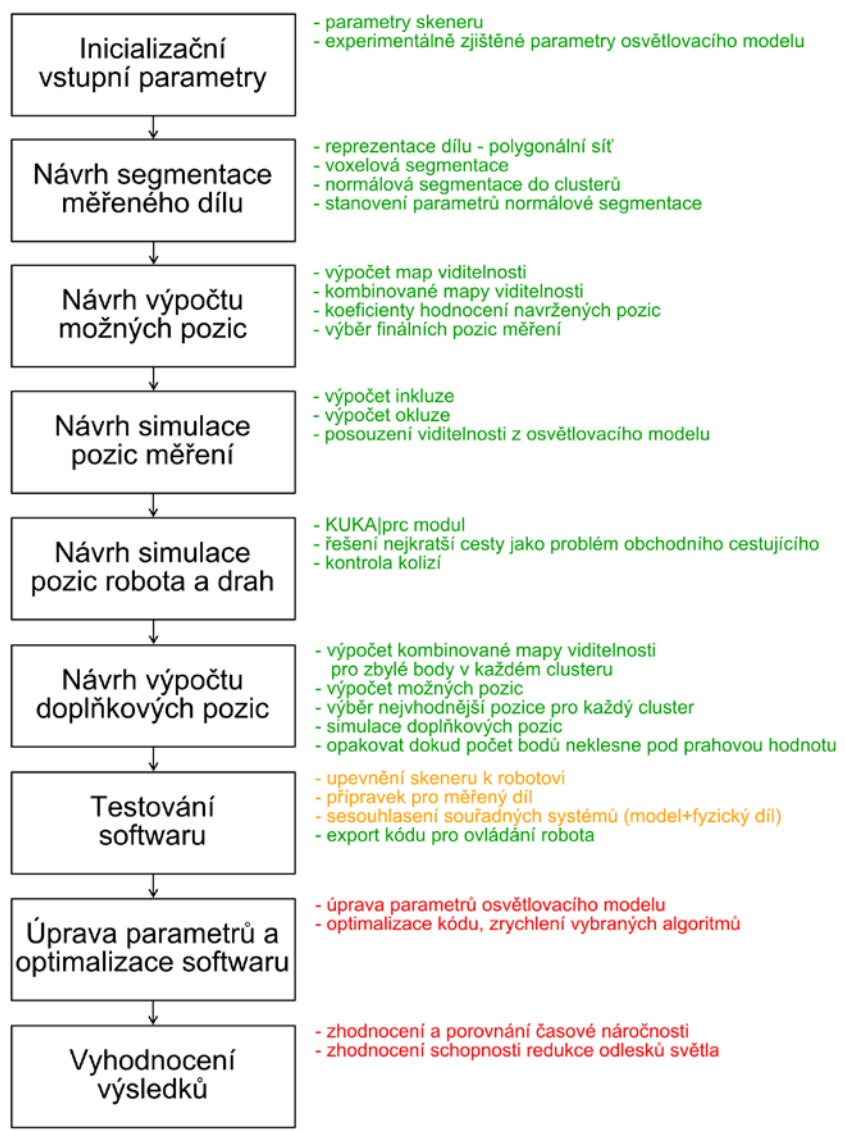
## Kritické zhodnocení získaných poznatků

- Problematika automatického **hledání pozic** měření pro optické skenery je **intenzivně řešena** (Prieto, F., Martins, F. A. R.)
- Existují již **kompletní inspekční systémy** řešící automatizaci na základě CAD dat (Germani, et al., Shi Q. et al.)
- V kompletních inspekčních systémech se **odlesky řeší zpětně** na základě výsledků měření (Shi Q. et al.)
- **Problematika odlesků** je řešena pomocí **změny promítaného vzoru** nebo snímků s **vysokým dynamickým rozsahem** (Gupta, et al., Jiang et al.)
- **Osvětlovací modely** jsou využívány v **asistenčním inspekčním systému** nebo pro **jiný druh inspekce** než je proužková projekce (Ellenrieder et al., Weckenmann et al.)

- **Problémová situace:** Automatické měření lesklých plechových dílů, kde díl není možné opatřit zmatňujícím práškem
- **Cíl práce:** Navrhnout a vytvořit software pro automatické generování pozic 3D optického skenování pro měření plechových dílů, u nichž je skenování problematické v důsledku nežádoucích odlesků světla.

### ■ Návrh nového názvu tématu dizertační práce

Automatické generování pozic optického skeneru pro digitalizaci plechových dílů.



## ■ Hlavní přínos práce:

■ Zrychlení návrhu pozic ve srovnání s ručním a poloautomatickým přístupem

## ■ Kroky k dosažení cíle:

■ Navrhnout software pro automatické generování kódu pro řízení robota a expozičních časů skeneru

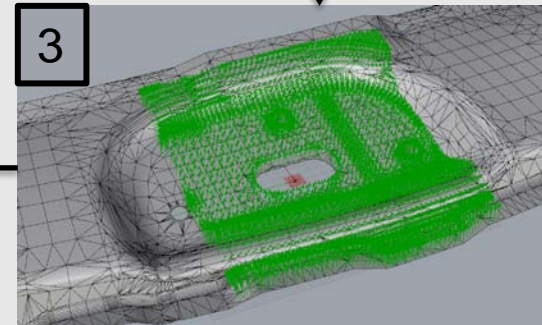
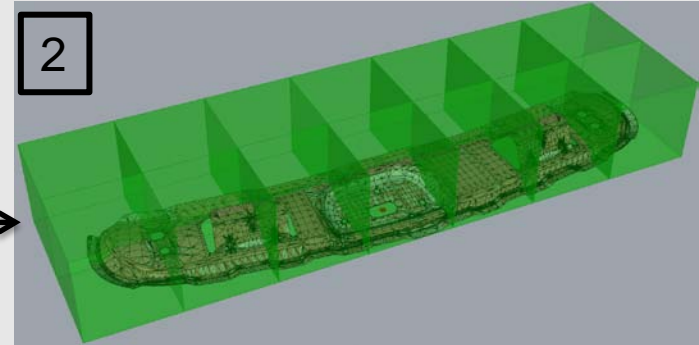
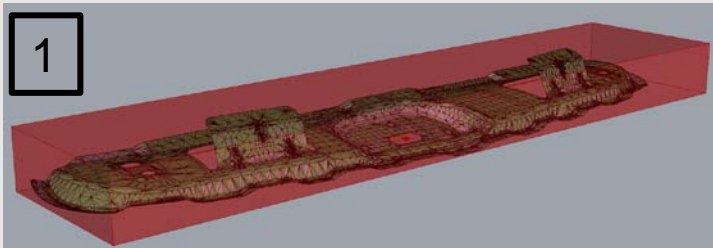
■ Posoudit počet a kvalitu pozic skenování získaných navrženým softwarem ve srovnání s ručním skenováním

■ Posoudit vlivu parametrů vstupujících do výpočtu (hustota polygonální sítě, koeficienty hodnocení kvality pozic)

■ Posoudit přesnost použitého osvětlovacího modelu

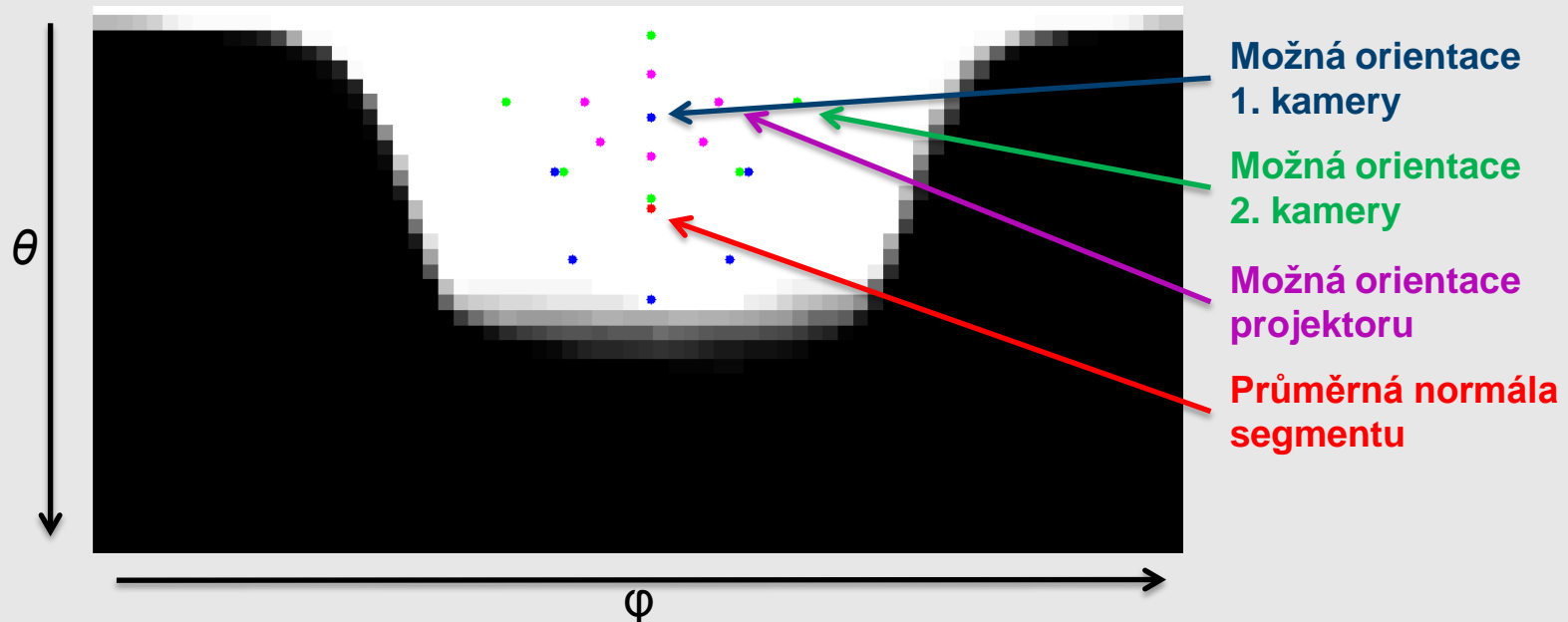
## ■ Segmentace dílu – dle měřicího objemu a normál polygonů

- Vytvoření obálového kvádra tělesa (1)
- Segmentace dle velikosti zorného pole skeneru (2, 3)
- Segmentace dle normál polygonů (4)
- *(obdobný přístup u C. Lartigua)*



## ■ Návrh orientací měření – kombinovaná mapa viditelnosti

- Vypočítána pro všechny body jednotlivých segmentů
- Stanoví viditelnost středů polygonů ze všech směrů
- Vypočítána po  $5^\circ$  pro úhly elevace ( $\theta=0-\pi$ ) a azimutu ( $\varphi=0-2\pi$ )



## ■ Metrika hodnocení navržených orientací

### ■ Hodnocení na základě:

■ Viditelnosti:  $Cf_{vis} = C1_{vis}P_{vis}C2_{vis}$

■ Shodné elevace kamery a projektoru:  $Cf_{\theta} = \left| \left( \frac{|C1_{\theta} - P_{\theta}|}{\alpha} \right) - 1 \right|$

■ Orientace vzhledem k objektu:  $Cf_{obj\_or} = \sqrt{\theta_{or} \cdot \varphi_{or}}$

■ Orientace vzhledem k segmentu:  $Cf_{seg\_or} = \sqrt{\theta_{or} \cdot \varphi_{or}}$

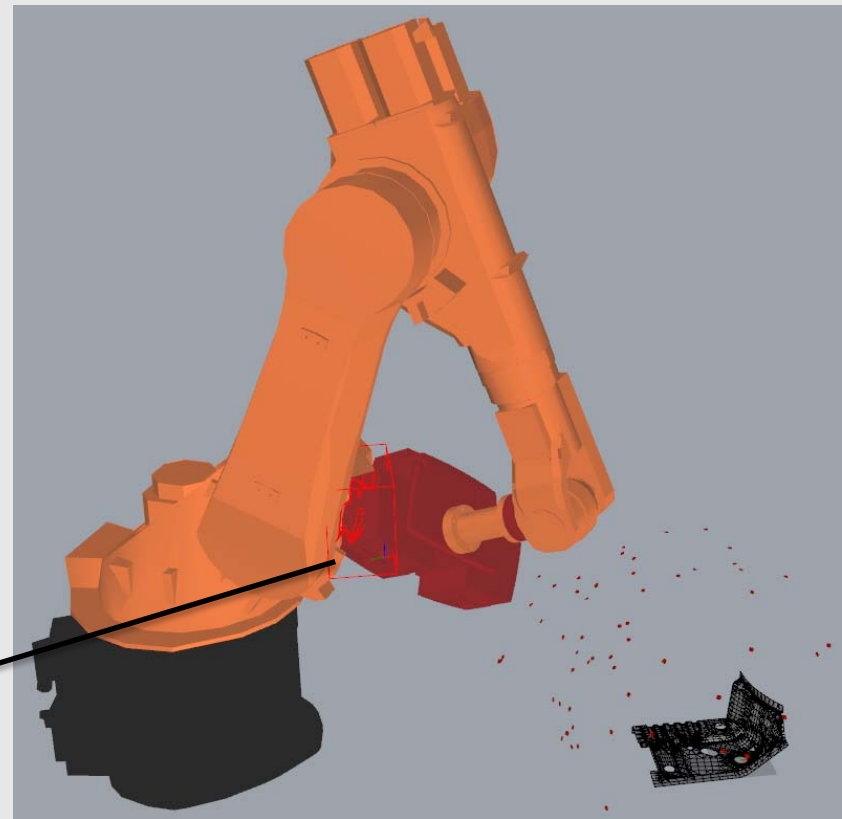
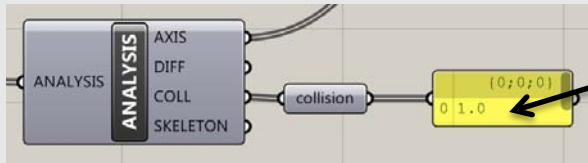
■ Orientace druhé kamery:  $C_{2cam} = \left| \left( \frac{|\sigma - \beta_n|}{(\beta_n + 2\alpha)} \right) - 1 \right|$

■ Výsledný koeficient z předchozích s využitím váhových koeficientů a, b, c, d, e (reálná čísla)

$$Cf_{pos} = a \cdot Cf_{vis} + b \cdot Cf_{\theta} + c \cdot Cf_{obj\_or} + d \cdot Cf_{seg\_or} + e \cdot C_{2cam}$$

## ■ Simulace pozic – dostupnost robota

- Využit modul KUKA|prc v prostředí Grasshopper
- V případě kolize je buď:
  - Změněna pozice kamery 1 a 2
  - Nebo použita další pozice dle seznamu možných orientací



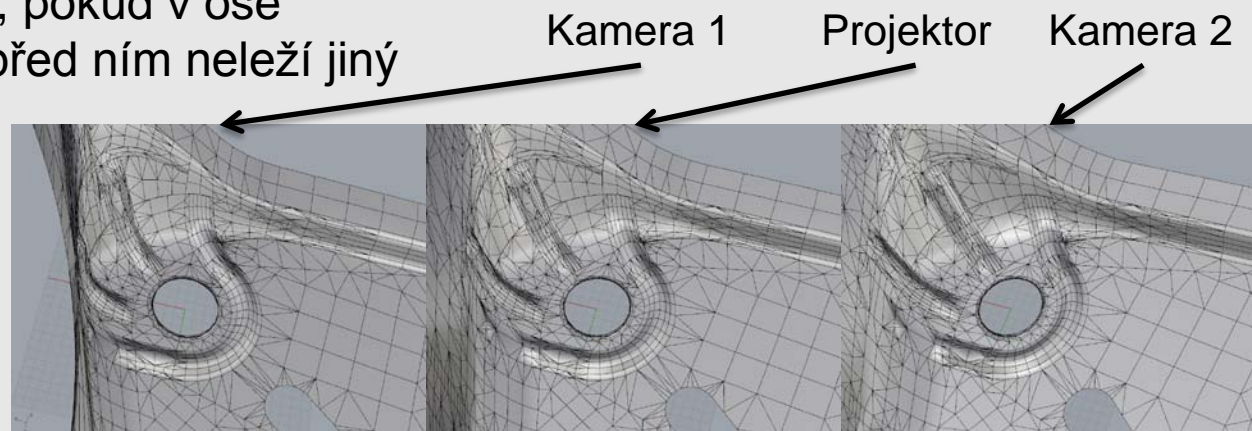
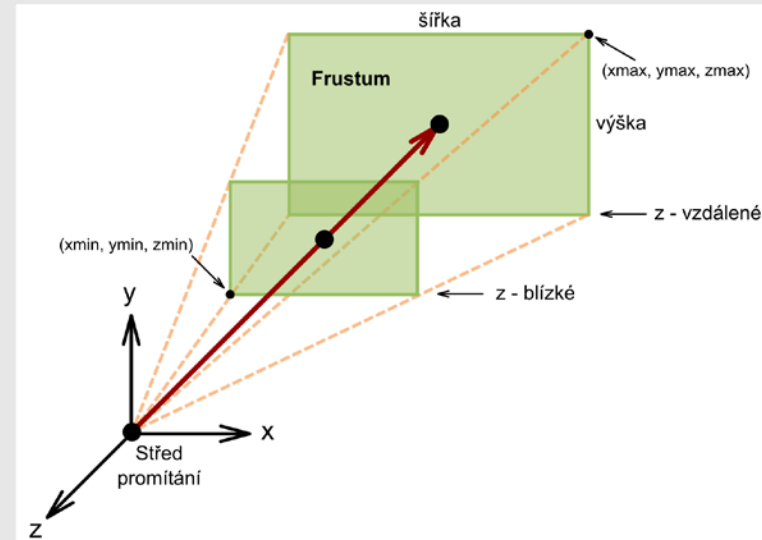
## ■ Simulace pozic – inkluze a okluze

### ■ *Inkluze*

- Použita metoda Clipping coordinates
- Speciální souřadný systém používaný v OpenGL pro stanovení inkluze bodů ve frustu (komolý jehlan)

### ■ *Okluze*

- Použita metoda posílání paprsků skrze polygony objektu
- Polygon je viditelný, pokud v ose kamery/projektoru před ním neleží jiný polygon

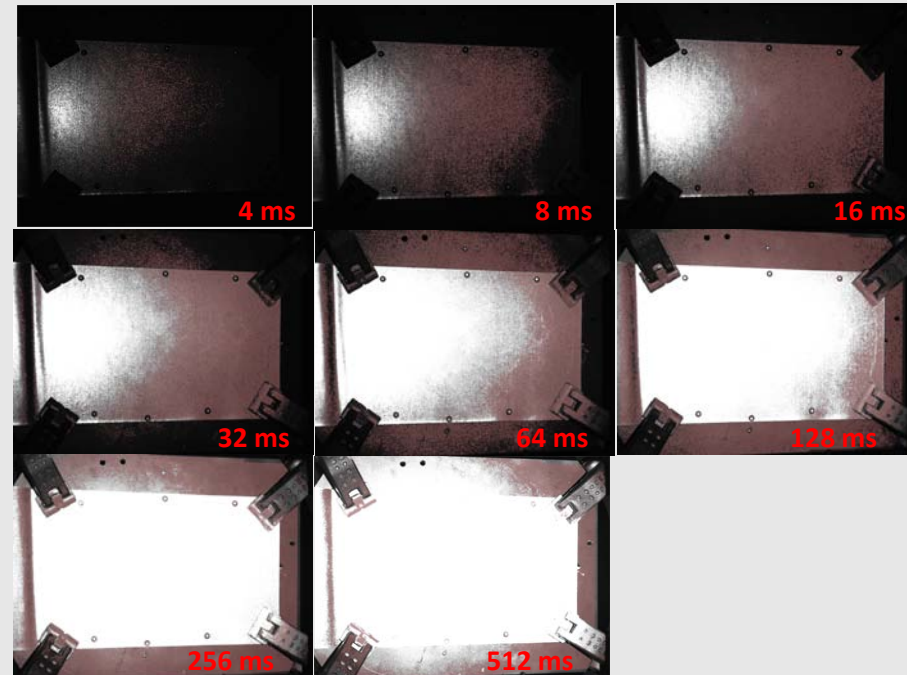
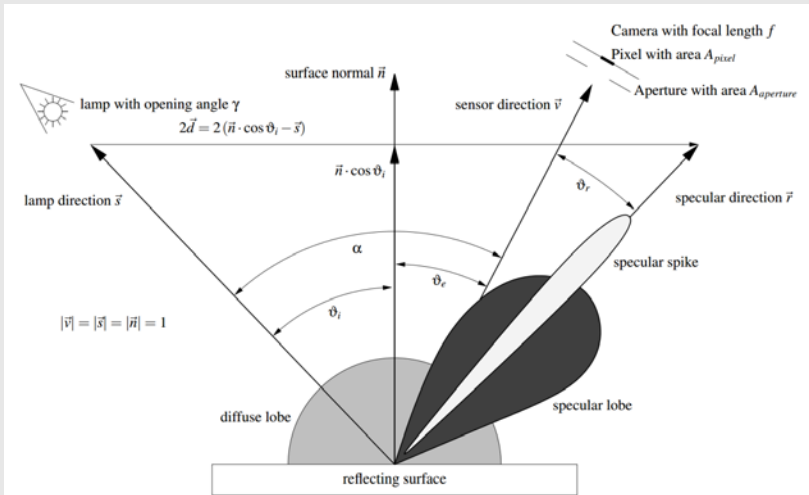


## ■ Simulace pozic – osvětlovací model

- Nayarův model  $\longrightarrow$
- Difuzní odraz, lesklý lalok, lesklý hrot
- Experimentální stanovení limitních hodnot šedi (v obrazu) pro naskenování povrchu dílu
- Experimentální stanovení koeficientů difuzního a lesklého odrazu

$$G = \frac{c \cdot t}{d_t^2} \cdot \rho (\cos \vartheta_i + \sigma_1 (2 \cos \vartheta_e \cos \vartheta_i - \cos \alpha)^{m_1} + \sigma_2 (2 \cos \vartheta_e \cos \vartheta_i - \cos \alpha)^{m_2})$$

*Ellenrieder, M. M., et al.*



## ■ Výpočet nejkratší cesty + export kódu

- Výpočet nejkratší cesty řešen jako problém obchodního cestujícího (TSP)
- Využit python modul tsp-solver od Dmitry Shintyakova
- Export expozičních časů

## ■ Export kódu pro řízení robota



```
1 0.246
2 0.256
3 0.190
4 0.122
5 0.139
6 0.100
7 0.153
8 0.258
28 PDATACT = {VEL 50,ACC 100,APO_DIST 100}
29 FDATACT = {TOOL_NO 6,BASE_NO 6,IPO_FRAME #BASE}
30 BAS (#PTP_PARAMS,50)
31 ;ENDFOLD
32 PTP {E6POS: X 168.734, Y 541.407, Z 158.095, A -122.582, B 18.000, C -85.525, E1 0.000, E2 0.0, E3 0.0, E4 0.0, E5 0.0, E6 0.0, S 'B 010'}
33 PTP {E6POS: X 168.734, Y 541.407, Z 158.095, A -122.582, B 18.000, C -85.525, E1 0.000, E2 0.0, E3 0.0, E4 0.0, E5 0.0, E6 0.0, S 'B 010'}
34 PTP {E6POS: X -38.956, Y 535.662, Z 229.422, A -104.622, B 27.000, C -82.972, E1 0.000, E2 0.0, E3 0.0, E4 0.0, E5 0.0, E6 0.0, S 'B 010'}
35 PTP {E6POS: X -110.162, Y 644.299, Z 132.355, A -86.000, B 16.000, C -86.054, E1 0.000, E2 0.0, E3 0.0, E4 0.0, E5 0.0, E6 0.0, S 'B 010'}
36 PTP {E6POS: X -149.637, Y 654.389, Z 26.691, A -78.983, B 2.000, C -89.519, E1 0.000, E2 0.0, E3 0.0, E4 0.0, E5 0.0, E6 0.0, S 'B 010'}
37 PTP {E6POS: X -169.759, Y 663.948, Z 14.378, A -89.000, B 2.000, C -89.519, E1 0.000, E2 0.0, E3 0.0, E4 0.0, E5 0.0, E6 0.0, S 'B 010'}
38 PTP {E6POS: X -145.621, Y 655.101, Z -26.184, A -79.933, B -4.000, C -90.963, E1 0.000, E2 0.0, E3 0.0, E4 0.0, E5 0.0, E6 0.0, S 'B 010'}
39 PTP {E6POS: X -278.075, Y 650.099, Z -3.874, A -76.000, B 0.000, C -90.000, E1 0.000, E2 0.0, E3 0.0, E4 0.0, E5 0.0, E6 0.0, S 'B 010'}
```

## ■ Impaktované publikace

T. Koutecký, et al., **Method of photogrammetric measurement automation using TRITOP system and industrial robot**, *Optik - Int. J. Light Electron Opt.* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.11.024>



## ■ Neimpaktované publikace

Koutný, D.; Paloušek, D.; Koutecký, T.; Zatočilová, A.; Janda, M. **3D Digitalization Of The Human Body For Use In Orthotics And Prosthetics**. An international Journal of Science, Engineering and Technology. World Academy of Science Engineering and Technology. 2012. 2012(72). p. 1000 - 1005. ISSN\~2010-376X.



Koutecký, T.; Brandejs, J.; Paloušek, D.:

**Metodika automatizace fotogrammetrického měření systémem TRITOP**, Sborník referátů, pp.121-126, ISBN 978-80-248-2450-5, (2011), Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, *článek ve sborníku, akce: 52. konference kateder částí a mechanismů strojů s mezinárodní účastí, Ostravice, 06.09.2011-09.09.2011*

Koutecký, T.; Paloušek, D.; Brandejs, J.:

**Analysis of sheet metal parts behaviour during fringe projection based digitization**. Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké konference MMK2013, Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky. Hradec Králové: Magnanimitas, 2013. s. 3499-3508. ISBN: 978-80-87952-00-9.

## ■ Projekty

### ■ Řešitel

- FAVU/FSI-J-13-1905 – Vizualizační jádro pro použití v umělecké tvorbě a strojírenských aplikacích

### ■ Spoluřešitel

- FSI-J-12-1798 – Tvorba strukturované geneze artefaktu metodami optické digitalizace

### ■ Participace na projektech

- OPVK CZ.1.07/2.2.00/28.0278 – Studio digitálního sochařství a nových médií
- NETME Centre – Centrum nových technologií pro strojírenství
- Rozvojový projekt CSM60 – Zavedení a rozvoj integrovaného zkušenostního vyučování v bakalářském studiu strojírenství

## ■ Funkční vzorky

- Adaptér TRITOP – Kuka
- 3D laserový skener
- 3D optický skener

## ■ Průmyslové vzory

- Prostorový skener (č. zápisu – 36158)
- Prostorový skener\* (obličejový)


*\* čeká na přiřazení čísla zápisu*





**Děkuji za pozornost**

**T. Koutecký**

 Institute of Machine  
and Industrial Design

**Institute of Machine and Industrial Design**  
Faculty of Mechanical Engineering  
Brno University of Technology

Prezentace - Státní doktorská zkouška  
22. října 2014, FSI VUT v Brně, Česká republika