




Státní doktorská zkouška

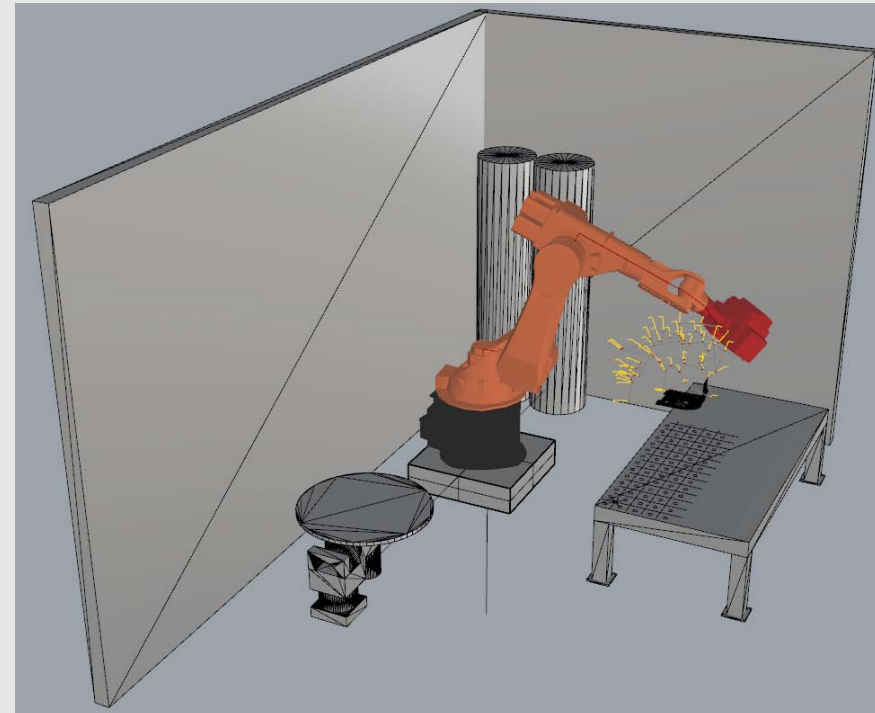
Ing. Tomáš Koutecký

 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
- Závěr



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

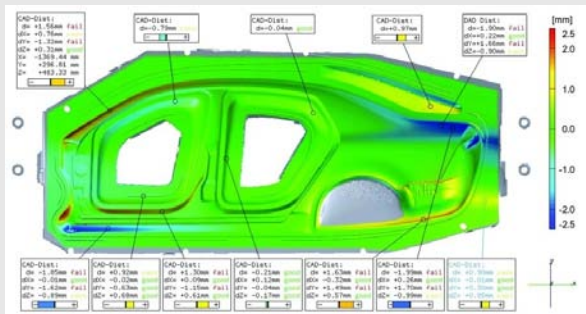
Inspekce

- Ověření specifikací (rozměry a geometrie)
- **Modelová situace:** Měření plechových dílů karoserie automobilu
- **Cíl inspekce:** Informace o kompletním tvaru dílu

Rychlé měření

Automatické porovnání dat

Zkrácení přípravy měření



Metody inspekce

Tradiční metody

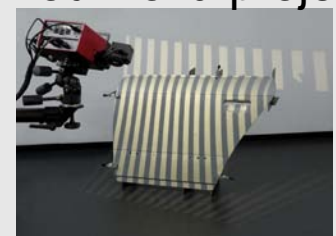
Současné metody

Dotykové sondy

CMM

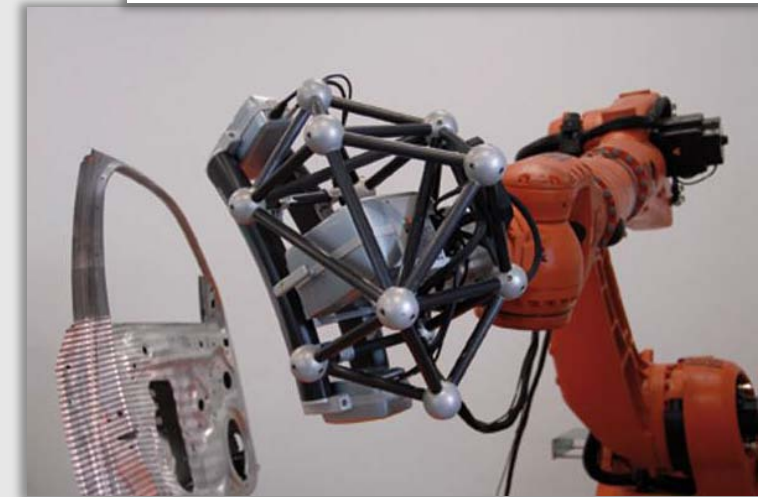
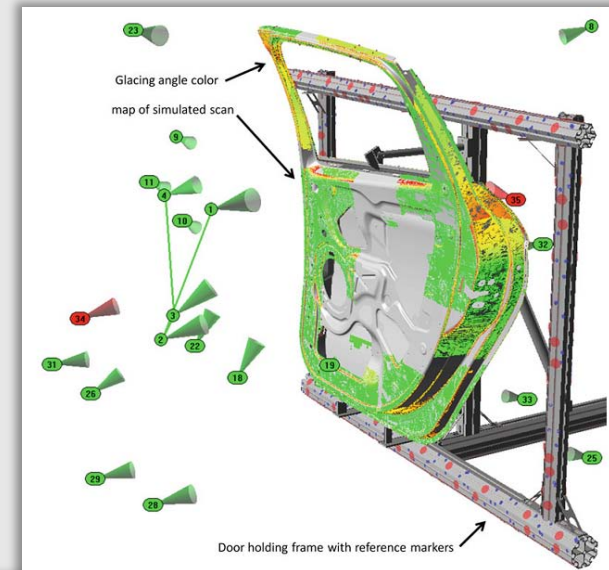
Laserové skenery

Proužková projekce



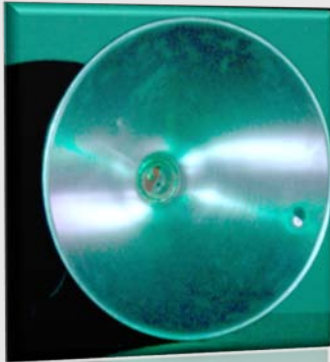
- Fáze inspekce – **příprava měření, získání dat, registrace dat, kontrola rozměrů**
- **Automatizace v přípravě měření** – generování pozic na základě CAD dat

- Vyrůstající zavádění **optických systémů** do průmyslových aplikací
- **Časová úspora díky automatizaci**
 - Manuální pozicování ❌
 - Poloautomatické pozicování
 - **Automatické pozicování** ✅
- **Problematické skenování lesklých dílů**



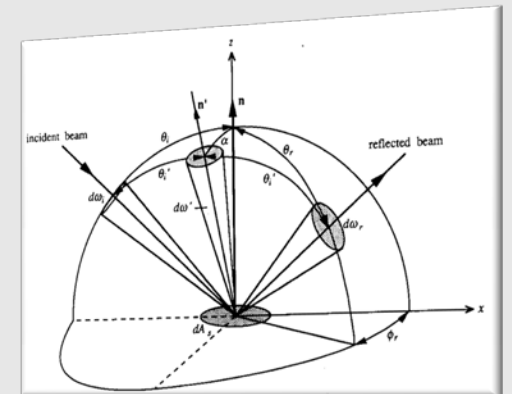
www.breuckmann.com

Automatizace v inspekci pomocí **laserových skenerů**
a **skenerů s proužkovou projekcí**



Redukce vlivu odlesků při skenování

Využití **osvětlovacích modelů** pro simulaci skenování

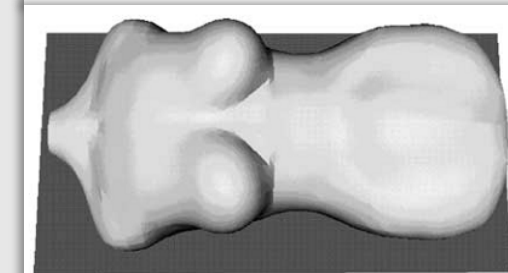
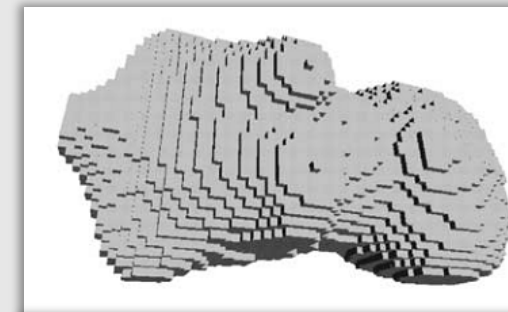
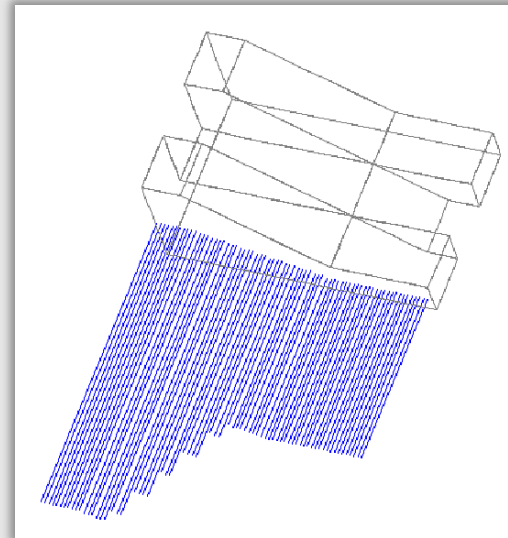


PRIETO, F., et al. 1999, 2000, 2002

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

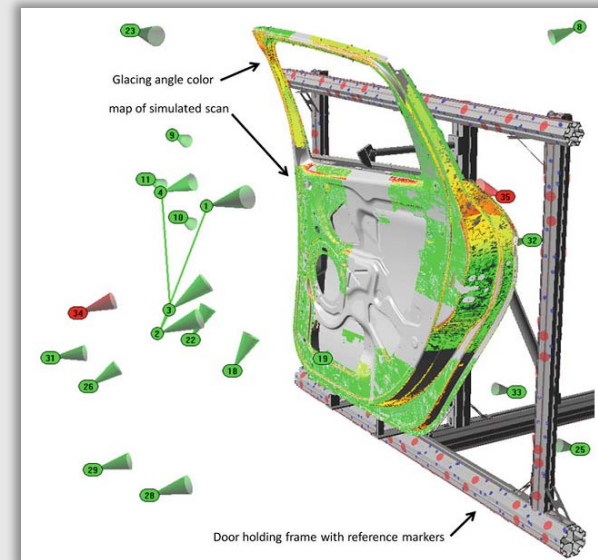
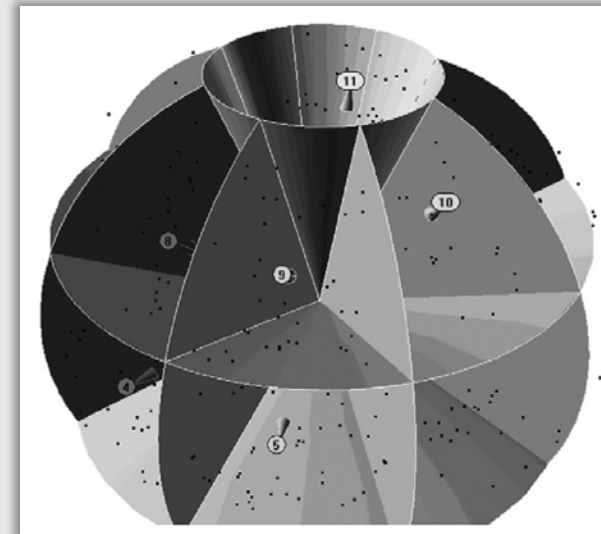
MARTINS, F. A. R., et al. 2006

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



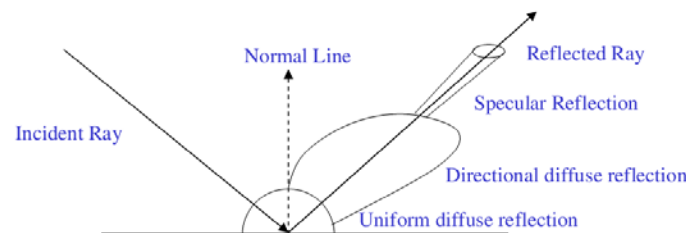
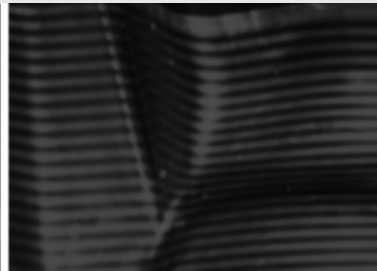
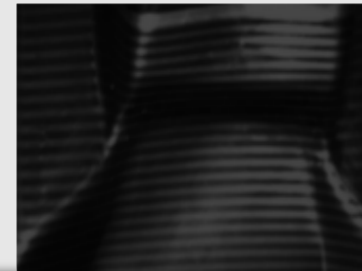
GERMANI, M., et al. 2009, 2010, 2012

- Komplettní inspekční systém s 6 DOF robotem
- Výpočet pozic měření z CAD dat
- Metody povrchových normál a map viditelnosti
- Strategie návrhu pozic: GD&T, Ostříhy a hrany, Velké plošné díly, Komplettní tvar dílu, Poloha konkrétních bodů
- Problematika odlesků uvedena, ale neřešena
- Časové úspory 25 – 45 %
- **Závěry:** Presentované strategie a metody vhodné pro vlastní řešení



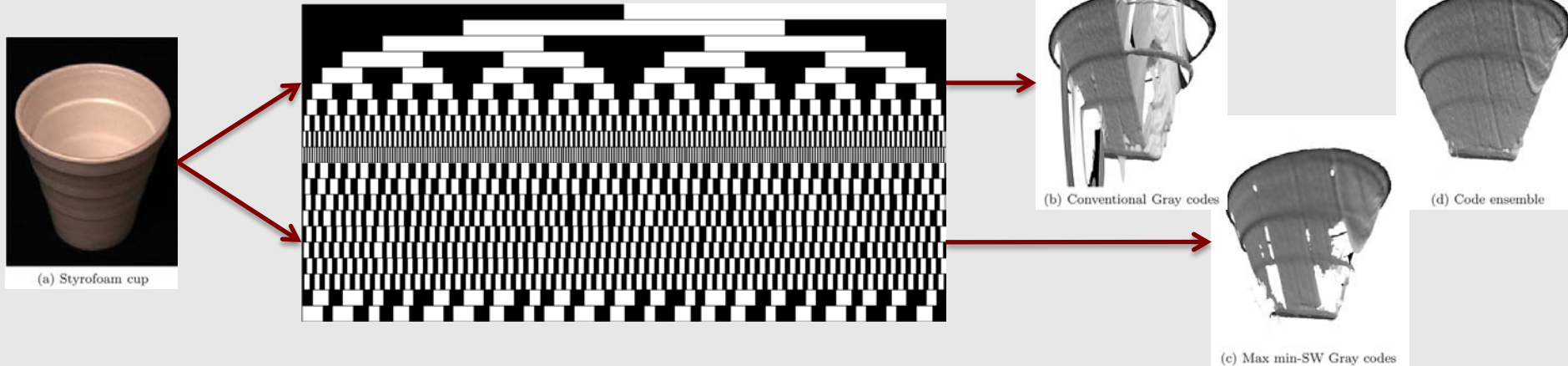
SHENG, W., et al. 2000, 2002, 2003, 2006, 2007

- Kompletní inspekční systém založený na CAD datech
- 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



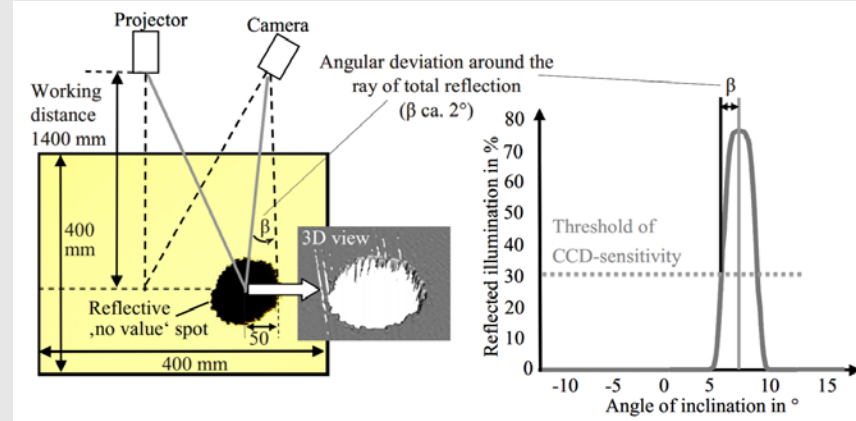
JIANG Hongzhi et al. 2012

- Redukce odlesků pomocí snímků s vysokým dynamickým rozsahem



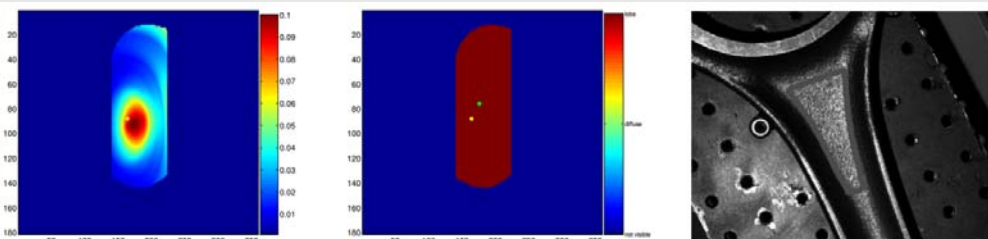
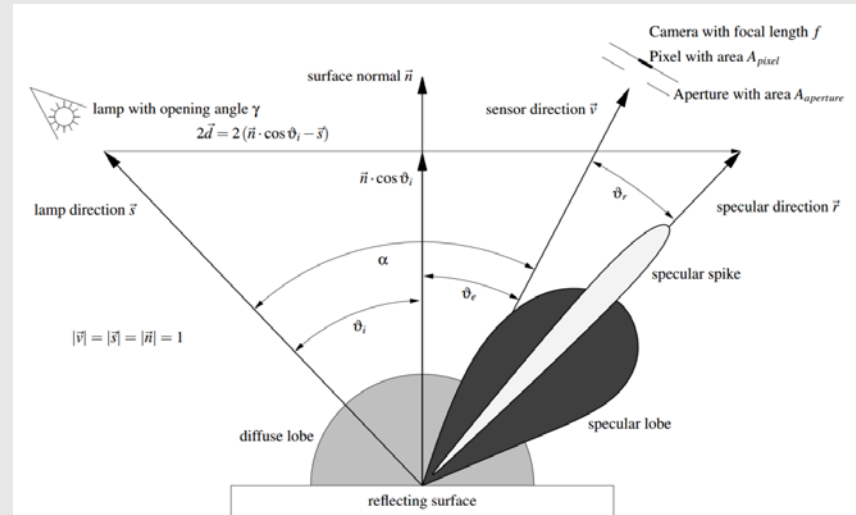
WECKENMANN, A. et al. 2008

- Asistenční optimalizační nástroj pro korekci pozic skenování
- Matematicko-fyzikální model určující nejistotu měření jednotlivých bodů
- Cook-Torrancův osvětlovací model



ELLENRIEDER, M. M. et al. 2005

- Nayarův osvětlovací model
- Kombinace s mapami viditelnosti
- Stanovení parametrů kamery a osvětlení z osvětlovacího modelu

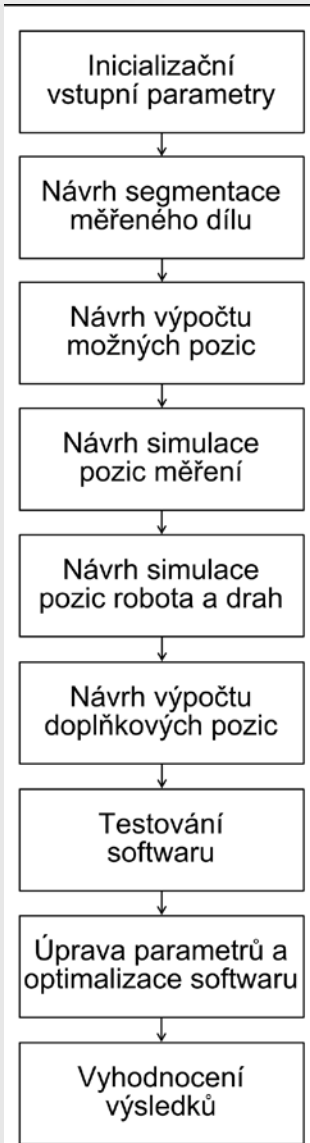


Kritické zhodnocení získaných poznatků

- Automatické **hledání pozic** měření s optickými skenery
- **Kompletní systémy** pro návrh pozic měření na základě CAD dat
- **Odlesky se neřeší** nebo se řeší **zpětně** na základě výsledků měření
- Řešení odlesků **změnou promítaného vzoru** nebo **HDR snímky**
- **Osvětlovací modely** jsou využívány v **asistenčním inspekčním systému** nebo pro **jiný druh inspekce** než je proužková projekce

- Neexistuje **kompletní inspekční systém**, zaměřený na skenování **plechových dílů** pomocí **dvoukamerového skeneru s proužkovou projekcí**, který by využíval **pokročilý osvětlovací model**

- **Hlavní cíl práce:** Software pro automatické generování pozic 3D optického skenování pro měření plechových dílů, u nichž je skenování problematické v důsledku odlesků světla.
- **Sekundární cíl:** Experimentální ověření pomocí robota KUKA KR60HA a 3D skeneru ATOS Triple Scan
- **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:

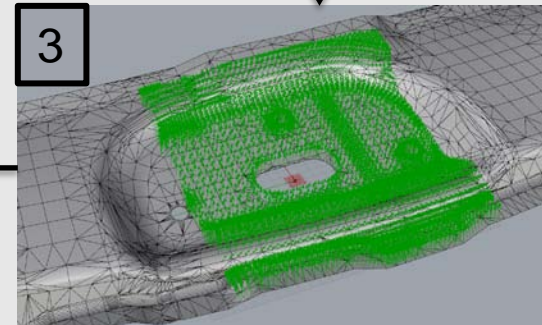
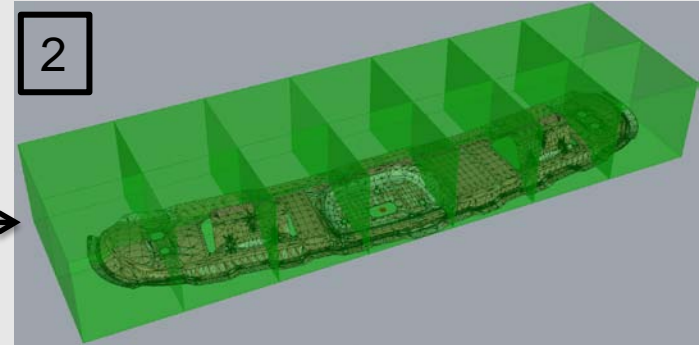
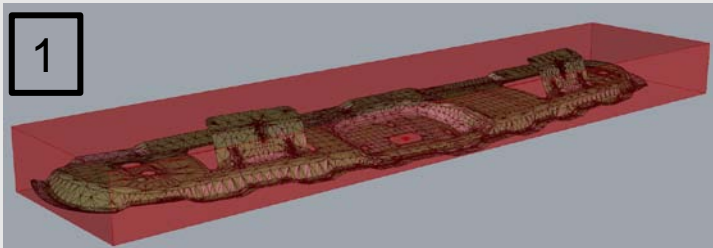
- Software pro automatické generování pozic skenování
- Posouzení počtu a kvality pozic
- Vliv parametrů výpočtu
- Posouzení osvětlovacího modelu

■ Výstupy softwaru:

- Kód pro řízení robota
- Expoziční časy pro skenování

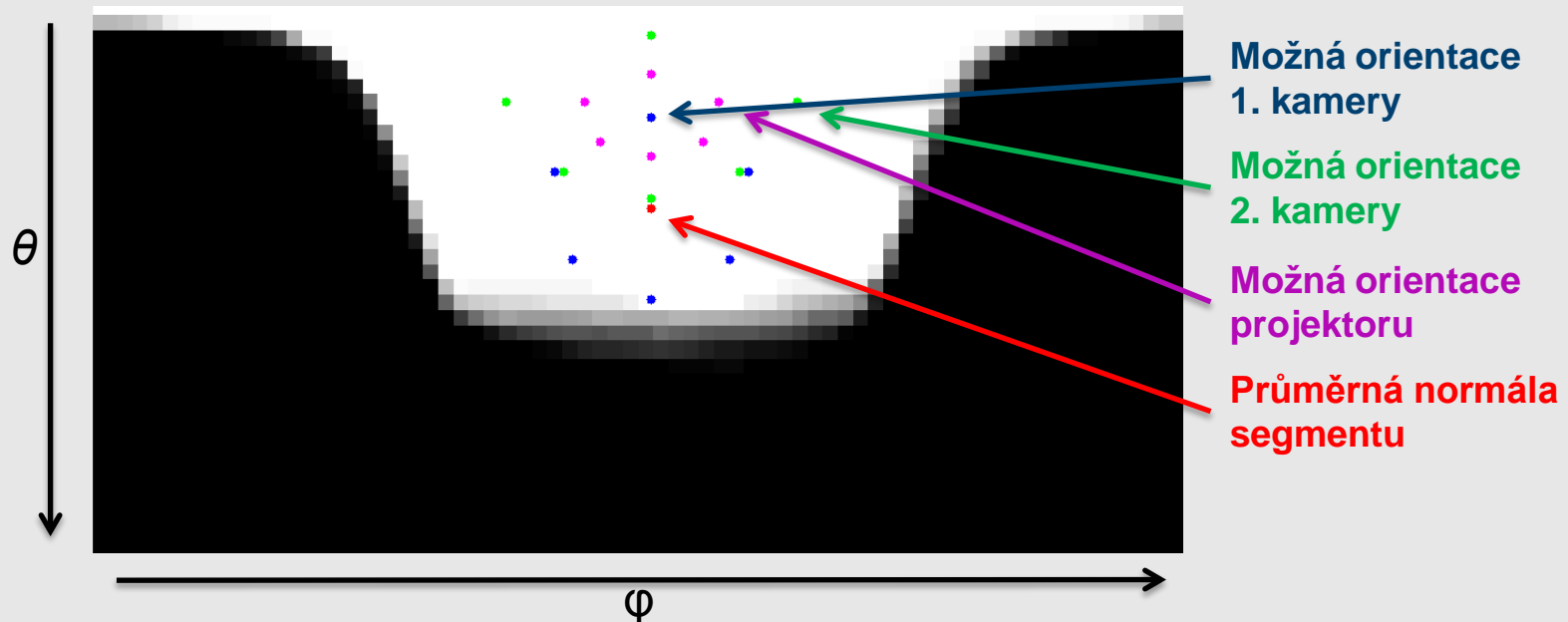
■ Segmentace dílu – dle měřicího objemu a normál polygonů

- Vytvoření obálkového 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 polygony každého segmentu
- Stanoví viditelnost středů polygonů ze všech směrů
- Vypočítána po 5° 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: $Cf_{seg_or} = \sqrt{\theta_{or} \cdot \varphi_{or}}$

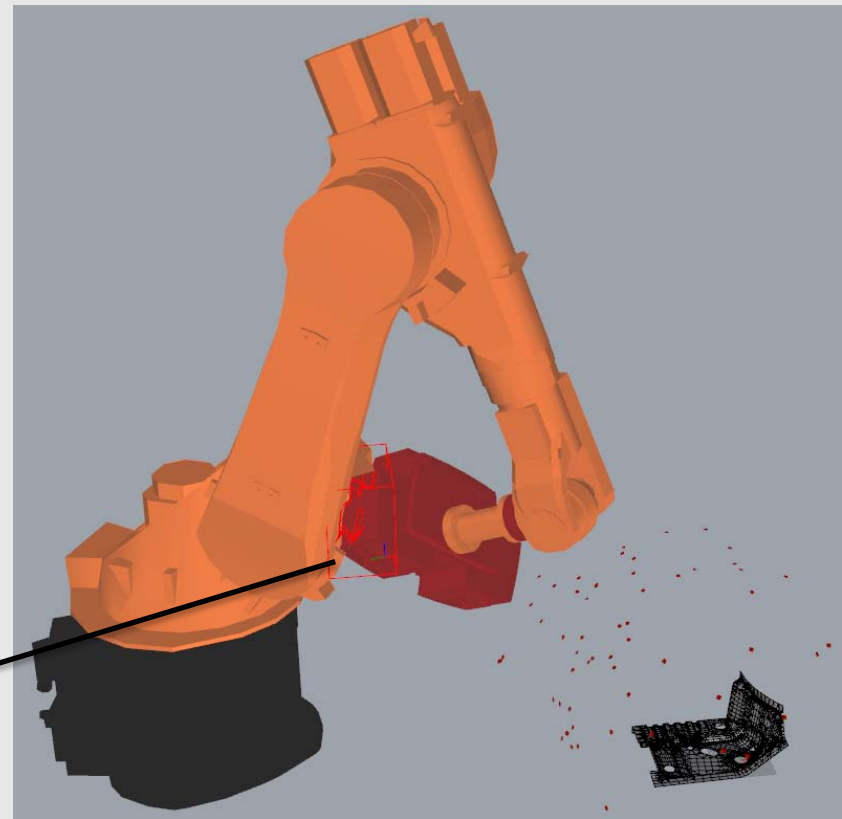
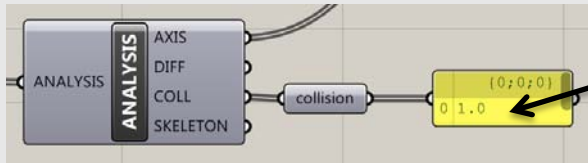
■ Orientace druhé kamery: $C_{2cam} = \left| \left(\frac{|\sigma - \beta_n|}{(\beta_n + 2\alpha)} \right) - 1 \right|$

■ 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



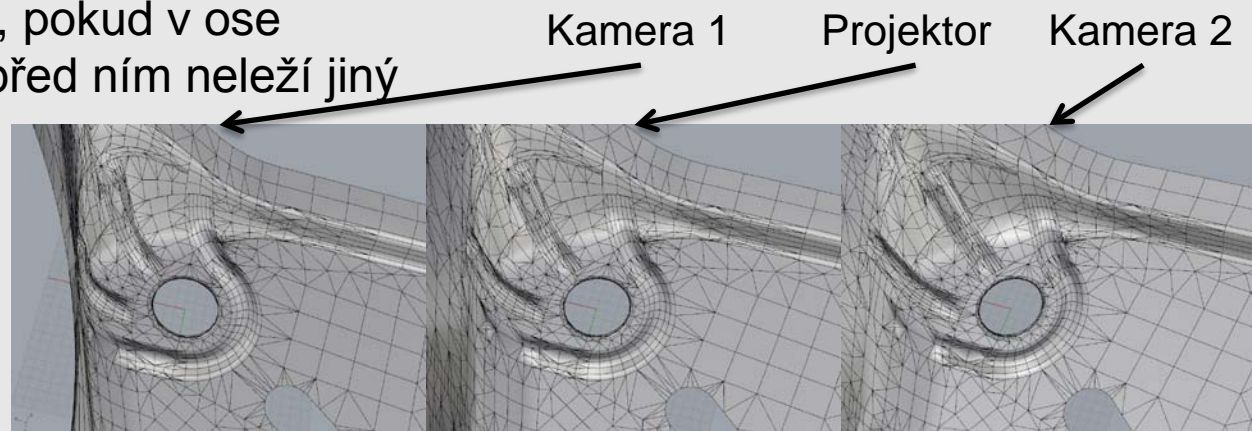
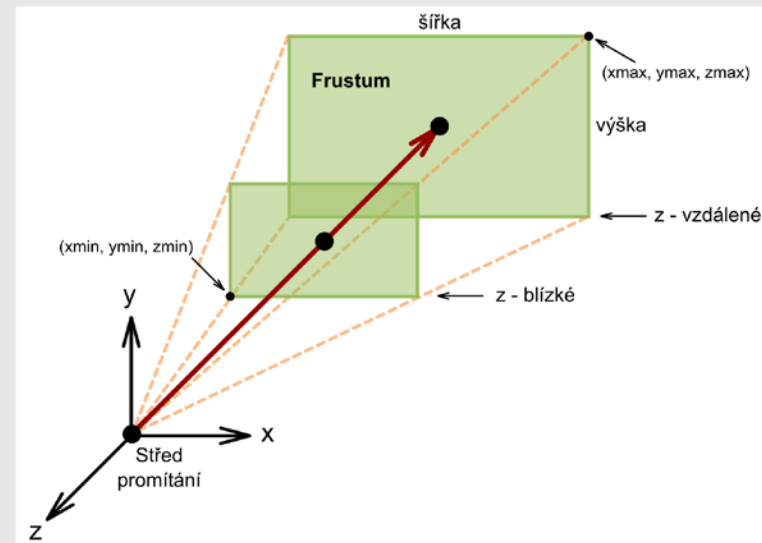
■ Simulace pozic – inkluze a okluze

■ *Inkluze*

- Použita metoda Clipping coordinates
- Souřadný systém z OpenGL - 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

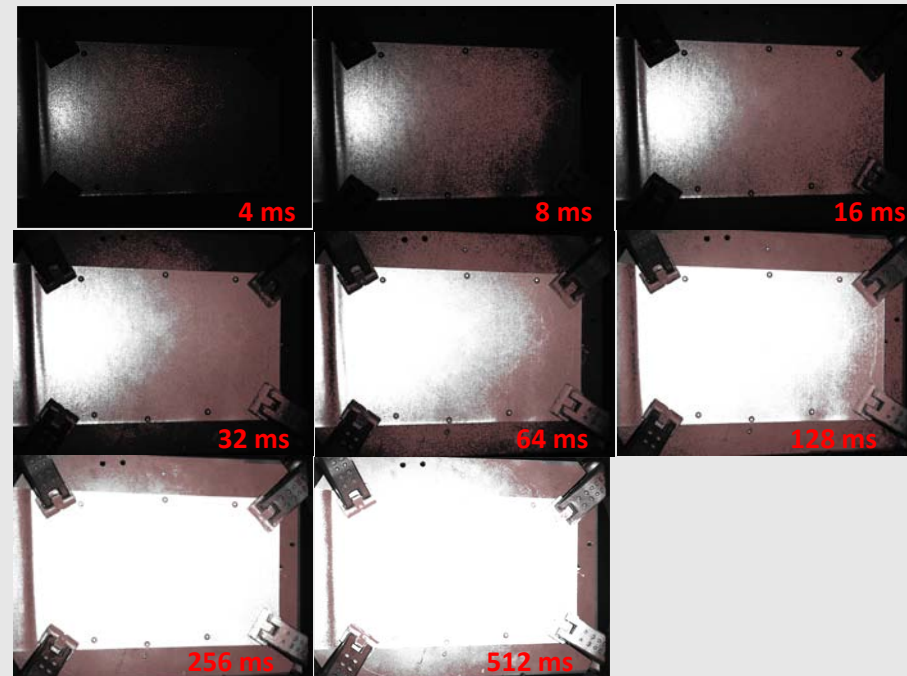
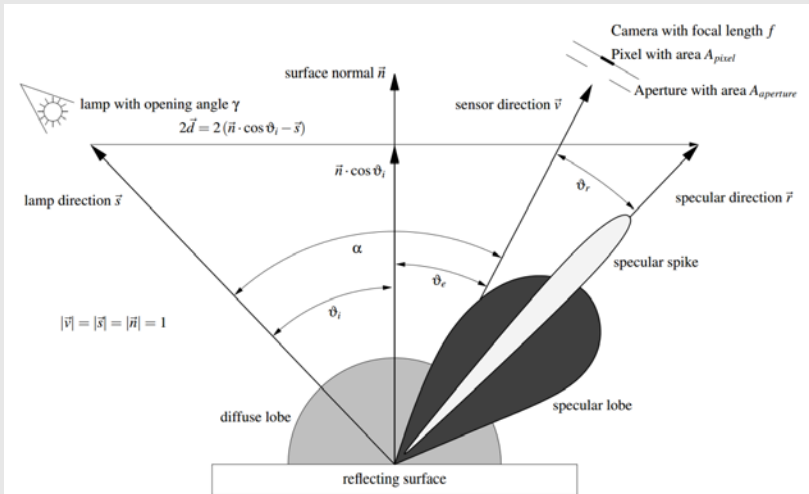


■ Simulace pozic – osvětlovací model

- 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

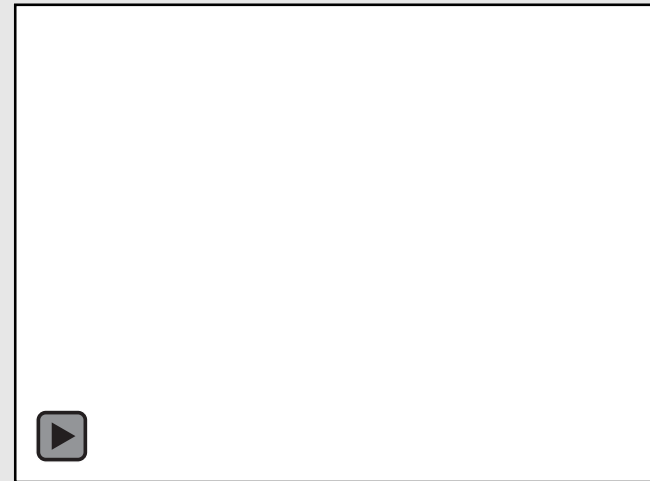
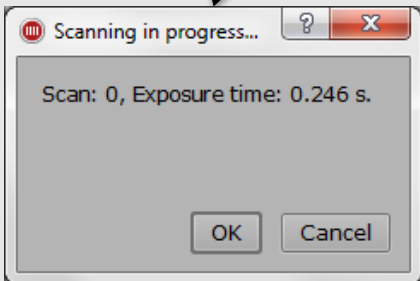
$$G = \frac{c \cdot t}{d_t^2} \cdot \rho (\cos \vartheta_i + \sigma_1 (2 \cos \vartheta_e \cos \vartheta_i - \cos \alpha)^{m_1} + \sigma_2 (2 \cos \vartheta_e \cos \vartheta_i - \cos \alpha)^{m_2})$$

Ellenrieder, M. M., et al.



■ Výpočet nejkratší cesty + export kódu

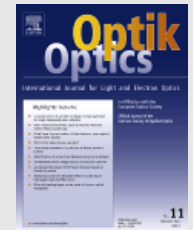
- Výpočet nejkratší cesty řešen jako problém obchodního cestujícího (TSP)
- Využit python modul tsp-solver od Dmitry Shintyakova
- Export expozičních časů + import v ATOSu
- Export kódu pro řízení robota



```
28 PDAT_ACT = {VEL 50,ACC 100,APO_DIST 100}
29 FDAT_ACT = {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'}
```

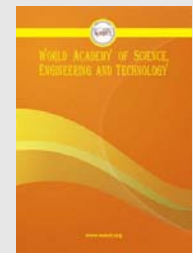
■ Impaktované publikace

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.

- V pojednání k SDZ byla provedena rešerše literatury
 - Přehled inspekčních systémů
 - Redukce vlivu odlesků
 - *Využití osvětlovacích modelů*
- Stanoven cíl práce
- Navržena metodika softwaru
- Software je zpracován
- Experimenty pro osvětlovací model
- Experimentální ověření navrženého řešení



Děkuji za pozornost

T. Koutecký

 Institute of Machine
and Industrial Design

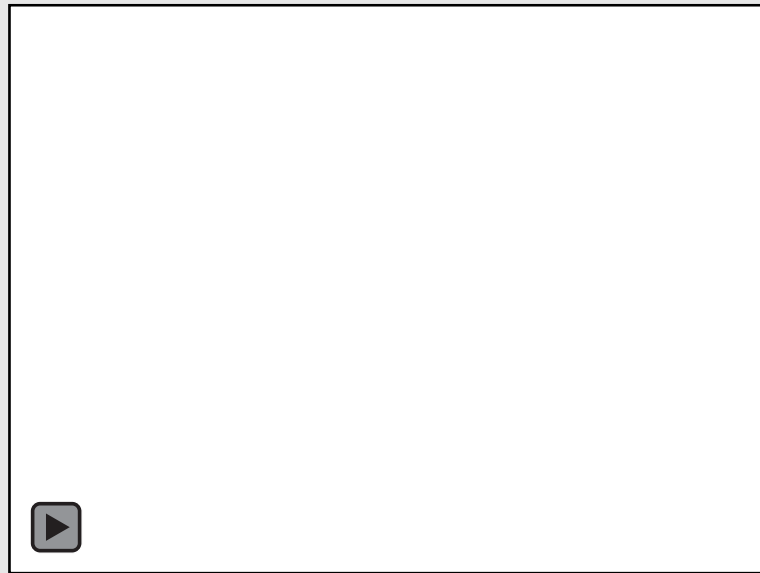
Institute of Machine and Industrial Design
Faculty of Mechanical Engineering
Brno University of Technology

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

1. Současný stav rozpracování softwaru

- Plugin do softwaru Rhinoceros
- Jazyk Python, cca 4 000 řádků kódu
- Rhino .NET knihovny, OpenNURBS, Kuka|PRC

- 1 Výběr adresáře pro export
- 2 Výběr měřeného dílu
- 3 Výpočet pozic skenování
- 4 Výpočet nejkratší cesty robota
- 5 Zobrazení pozic skenování (s robotem a naskenovanými daty)
- 6 Simulace cesty robota a export kódu



2. Bude v algoritmu zohledněna struktura povrchu, která má vliv na vznik odlesků?

- Využití Nayarova osvětlovacího modelu

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

Postup získání parametrů modelu

- Hodnota šedi při různém expozičním čase a úhlu ϑ_i
- Získání parametrů modelu ($\sigma_1, \sigma_2, m_1, m_2, \rho$)
- Odvození limitních hodnot naskenovaných bodů

Úhel ϑ_i Exp. čas	0	6,85	10	20	30	40	50	60	70	80
4	17	247	98	6	2	1	1	1	0	0
8	35	252	179	12	5	3	2	1	1	0
16	70	251	244	24	9	5	4	2	2	1
32	141	250	251	49	19	10	7	5	3	2
64	239	247	249	98	37	21	15	10	7	4
128	248	241	246	193	75	42	29	20	14	7
256	243	230	240	238	151	85	59	40	27	15
512	234	206	227	223	212	168	118	81	55	29

