



# Automatické generování pozic optického skeneru pro digitalizaci plechových dílů.

**Tomáš Koutecký**

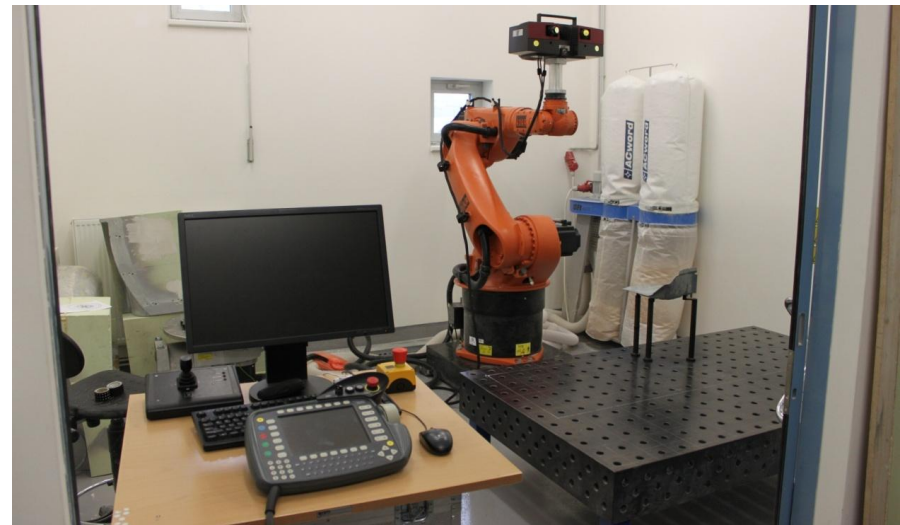


Institute of Machine  
and Industrial Design

**Prezentace k obhajobě doktorské dizertační práce  
29. 6. 2015**

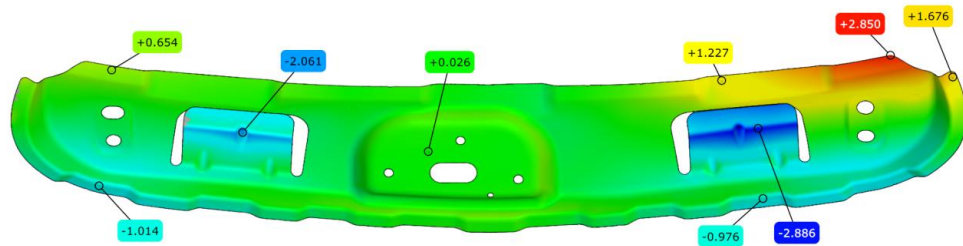
**Ústav konstruování – Odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií**  
Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně

- Úvod
- Shrnutí současného stavu poznání
- Motivace a cíl práce
- Materiál a metody
- Výsledky
- Diskuze a závěr



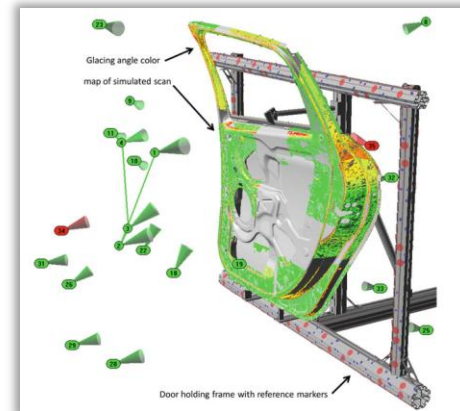
## Úvod do problematiky

- 3D skenery – digitalizace a inspekce
- Laserové skenery a skenery s proužkovou projekcí
- Sériová výroba v automobilním průmyslu
- Velké série → předmět automatizace
- Automatické generování pozic skeneru
- Odlesky u plechových dílů



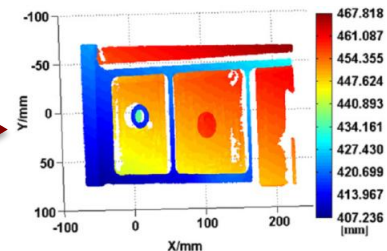
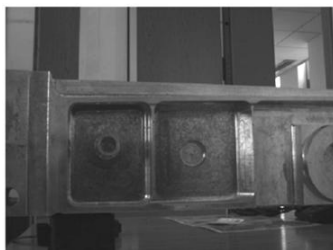
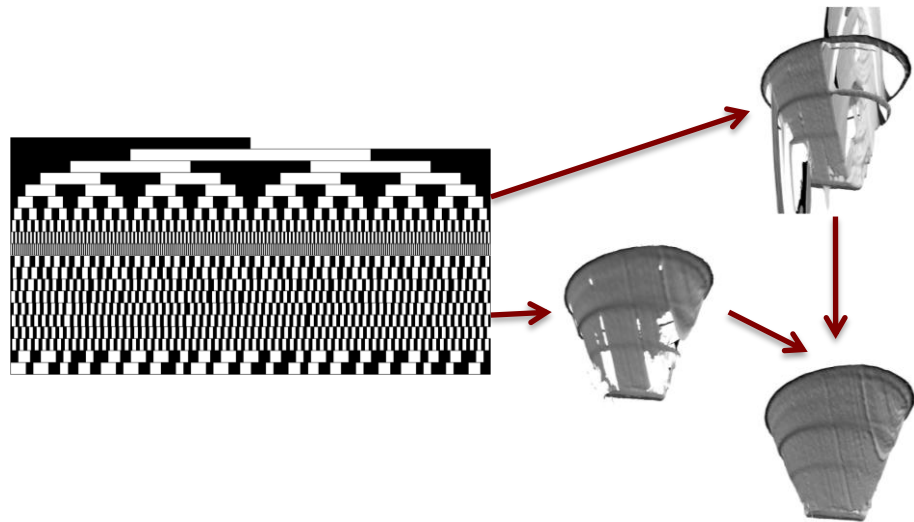
## Automatizace skenování pomocí skenerů s proužkovou projekcí

- GERMANI et al. 2009, 2010, 2012
  - Systém pro určení pozic skenování s 6 DOF robotem
  - Problematika odlesků uvedena, ale neřešena
  - Časové úspory 25 – 45 %
- SHENG et al. 2000, 2002, 2003, 2006, 2007
  - Systém pro generování pozic skenování
  - Stíny a odlesky řešeny zpětnovazebným členem



## Redukce vlivu odlesků při skenování

- GUPTA Mohit et al. 2011
  - Redukce odlesků pomocí změny promítaného vzoru
- JIANG Hongzhi et al. 2012
  - Redukce odlesků pomocí snímků s vysokým dynamickým rozsahem





## Motivace

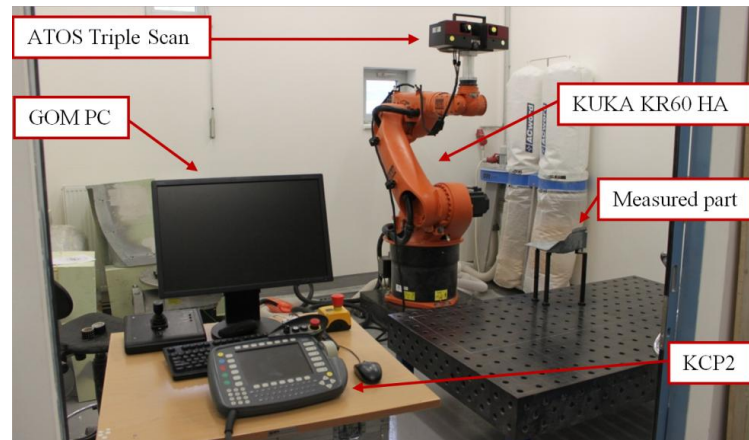
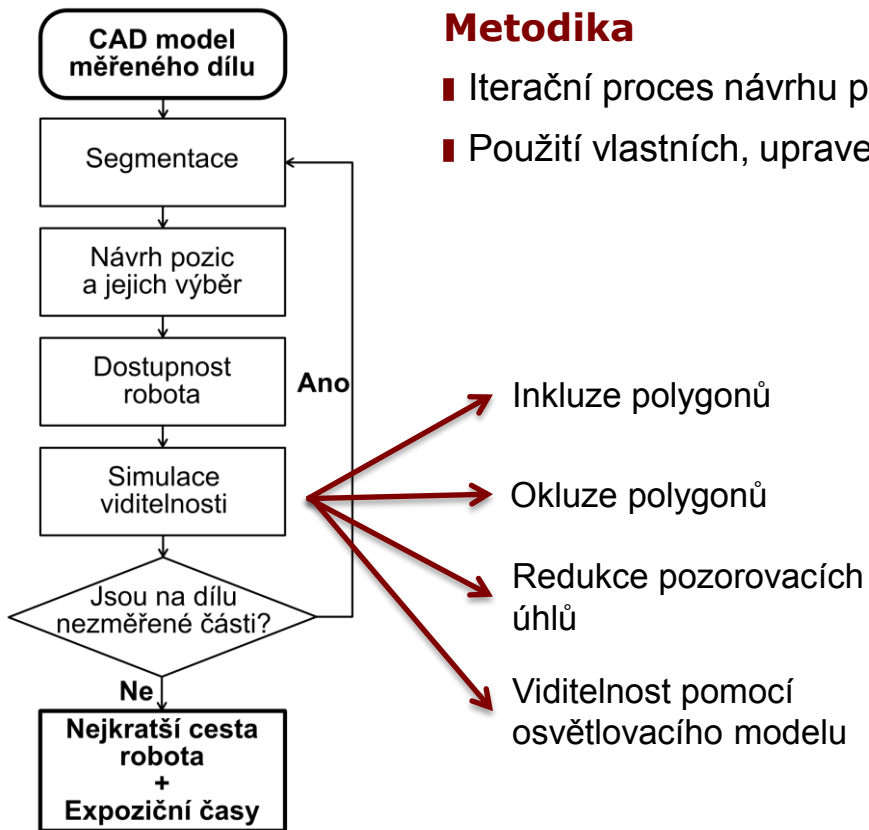
- Neexistuje systém automatické přípravy pozic, který by:
  - Využíval dvoukamerový 3D skener
  - Implementoval osvětlovací model
  - Prováděl simulaci navržených pozic
- U předchozích systémů se nevyskytuje porovnání simulovaných a naměřených dat

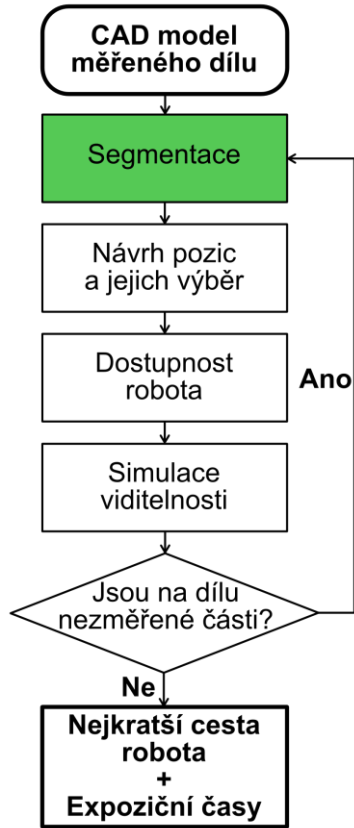
## Cíl práce

- Cílem práce je návrh a ověření metodiky automatizace procesu 3D digitalizace plechových dílů ve fázi generování měřicích pozic skeneru s využitím průmyslového robota.
  - Generování pozic na základě CAD modelu
  - Softwarové řešení včetně implementace osvětlovacího modelu
  - Experimentální ověření metodiky

## Metodika

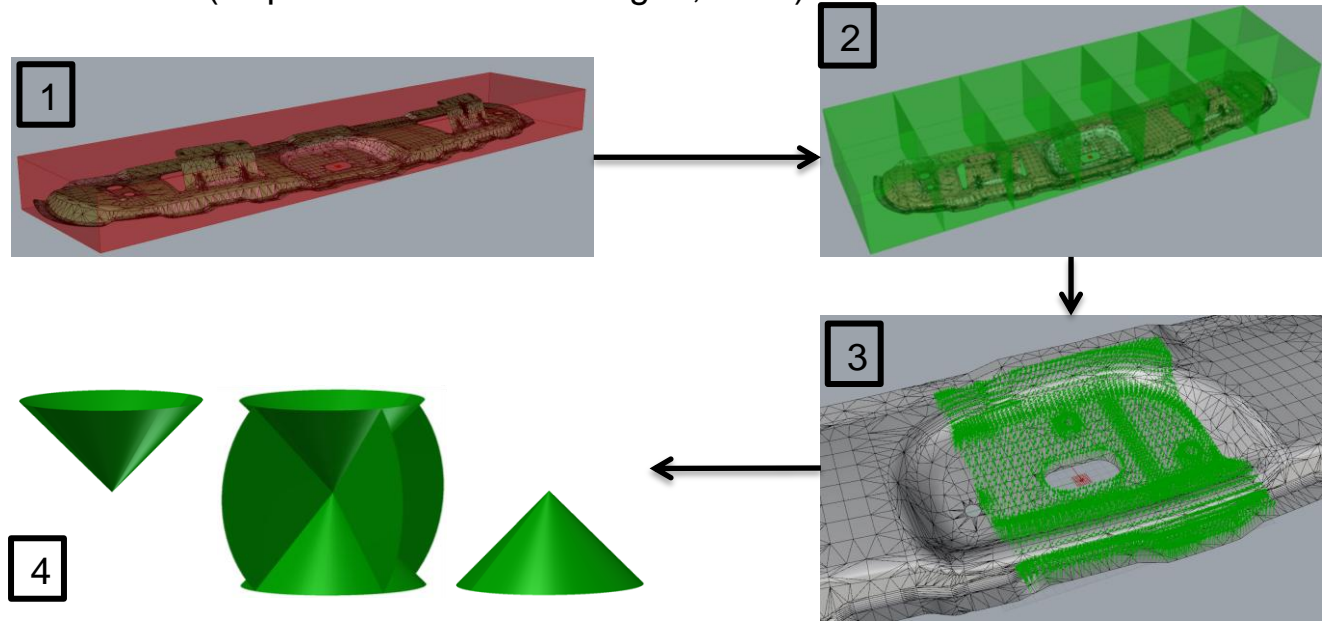
- Iterační proces návrhu pozic
- Použití vlastních, upravených nebo převzatých metod

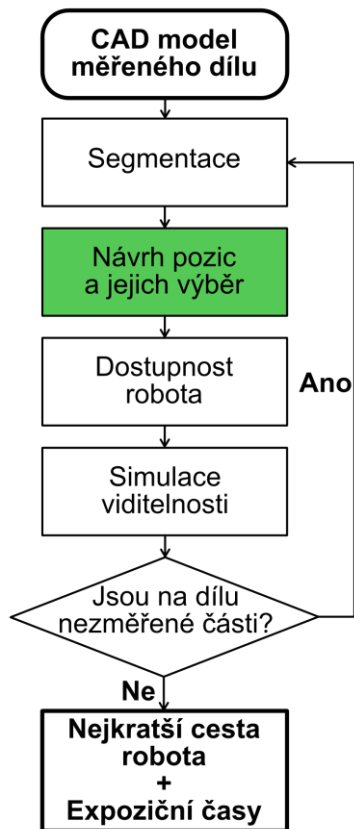




## Segmentace

- Dělení dílu pro generování pozic
- Segmentace dle měřicího objemu a normál polygonů
- **Vlastní** metoda (inspirace v článku – Lartigue, 2013)



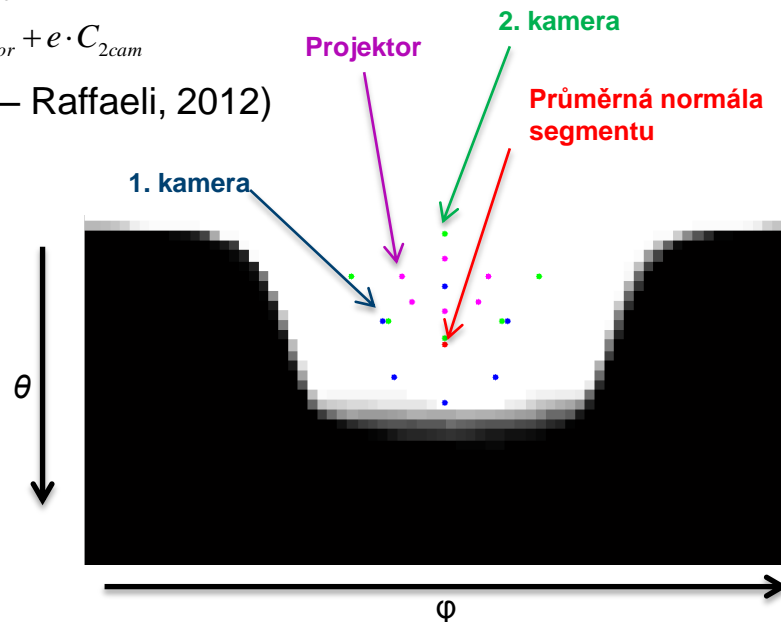


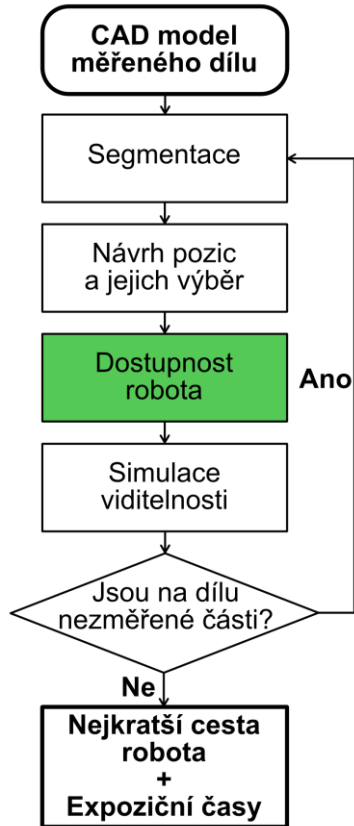
## Návrh a výběr pozic měření

- Metoda map viditelnosti
- Návrh pozic projektoru a 1. a 2. kamery
- Hodnocení pozic dle navržené metriky:

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

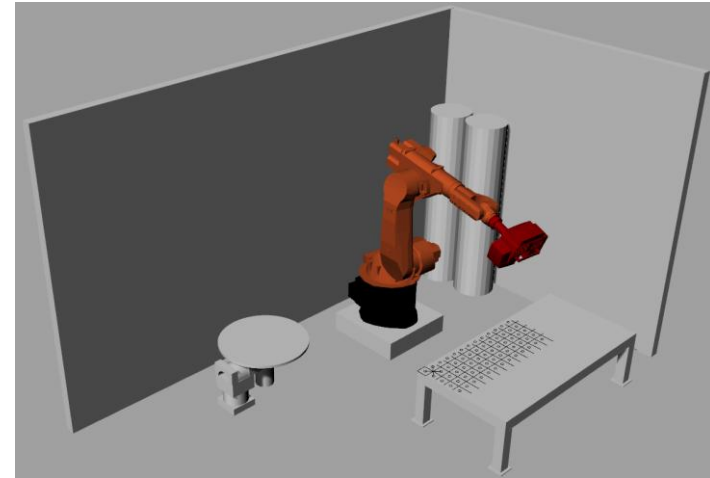
- Upravená metoda (vychází z článku – Raffaelli, 2012)

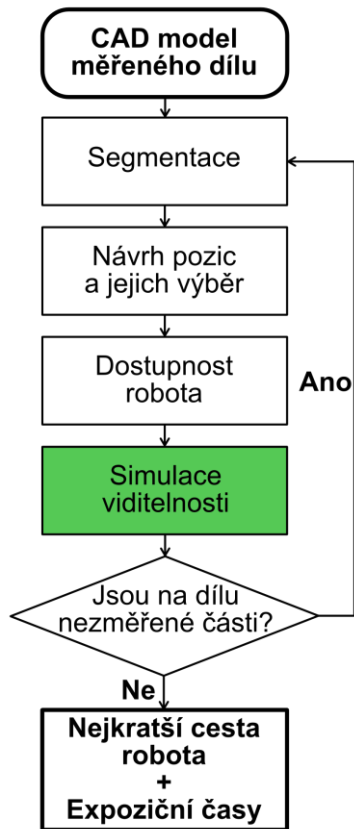




## Dostupnost robota

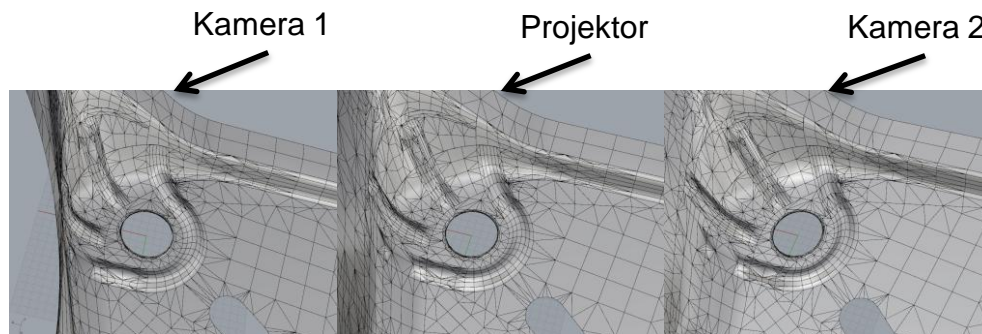
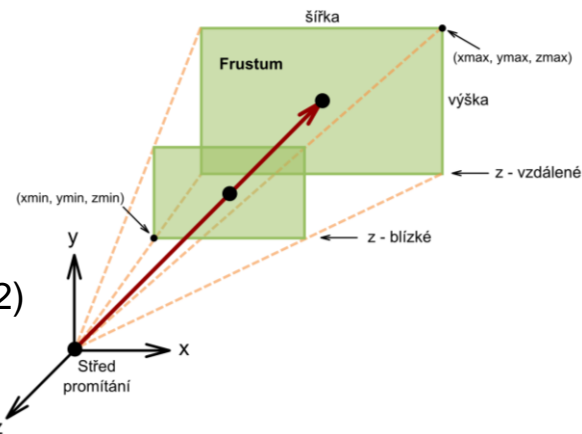
- Kontrola kolizí
- Model místnosti, robota se skenerem, měřeného dílu
- Řešeno pomocí KUKA|prc
- Testování pozic dle nejvyššího koeficientu  $Cf_{pos}$
- **Vlastní** řešení využívající modul KUKA|prc





## Simulace viditelnosti

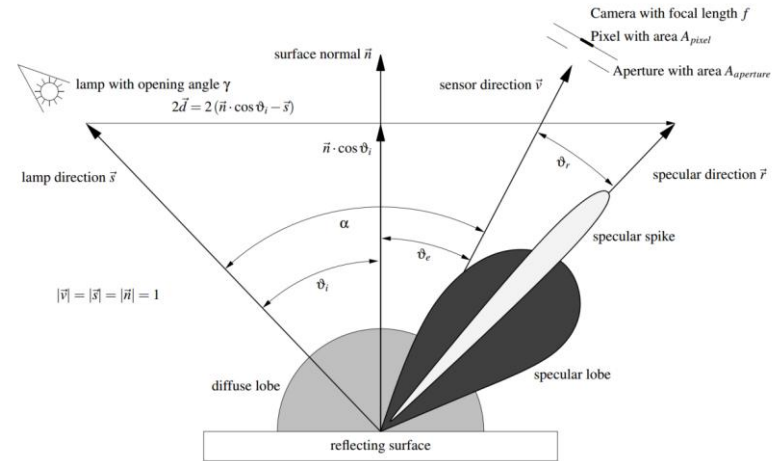
- Kontrola inkluze polygonů ve frustu
- Kontrola okluze/zastínění polygonů
- Omezení pozorovacích úhlů
- Kontrola viditelnosti polygonů pomocí osvětlovacího modelu
- **Převzaté metody** (vychází z článku – Raffaeli, 2012)
  - **Vlastní aplikace osvětlovacího modelu** (použitého v článku – Ellenrieder, 2005)



## Aplikace osvětlovacího modelu

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

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



## Výpočet parametrů osvětlovacího modelu

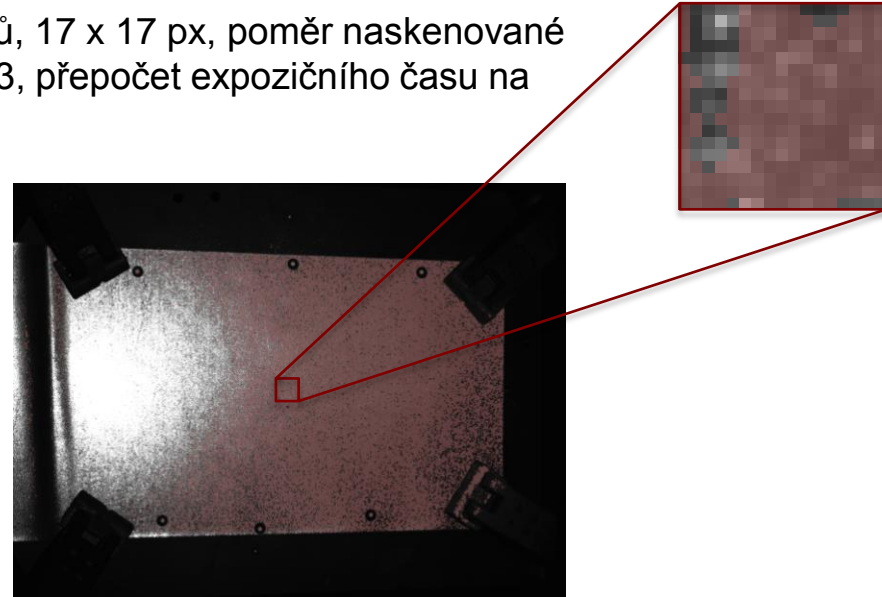
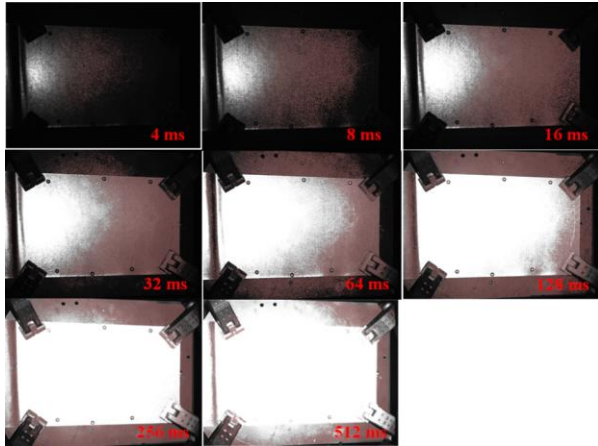
- Pro konkrétní materiál plechových dílů
- Aparatura – ATOS III Triple Scan, MV 170, rotační stůl, vzorek plechu
- Vstupní parametry – vzdálenost  $d_i$ , úhel  $\vartheta_i$  (0 – 80°), expoziční časy (4 – 512 ms), konstanty
- Výstupy –  $K$  (difuzní),  $\sigma_1, m_1$  (lesklý lalok),  $\sigma_2, m_2$  (lesklý hrot)
- Procedura – plné osvětlení pro daný expoziční čas, 17 x 17 px, průměrná hodnota šedi, proložení křivkou *lsqcurvefit* pro jeden expoziční čas a všechny úhly



$$G(\vartheta_i) = \underline{K}(\cos \vartheta_i + \underline{\sigma_1(2 \cos \vartheta_e \cos \vartheta_i - \cos \alpha)^{m_1}} + \underline{\sigma_2(2 \cos \vartheta_e \cos \vartheta_i - \cos \alpha)^{m_2}})$$

## Výpočet limitních hodnot šedi

- Určení viditelnosti polygonu
- Výstupy –  $G_{\min}$ ,  $G_{\max}$ ,  $G_{ideal}$
- Procedura – obraz s překryvem naskenovaných pixelů, 17 x 17 px, poměr naskenované plochy, Gaussovo rozložení pro jeden úhel, úroveň 0,3, přepočtení expozičního času na úroveň šedé



## Aplikace osvětlovacího modelu

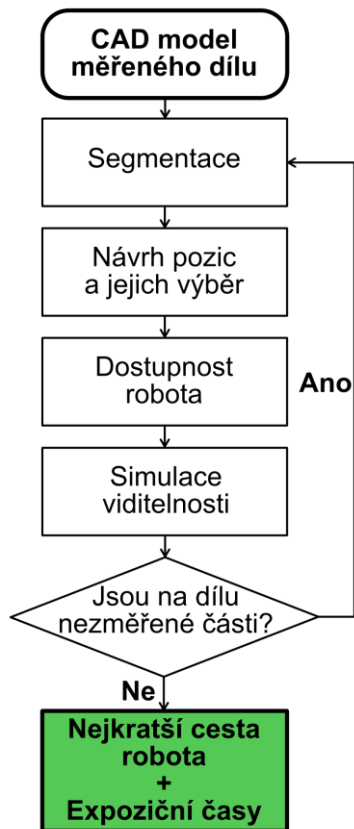
- Expoziční čas pro každý polygon
- Průměrný expoziční čas pro segment
- Hodnota šedi pro všechny polygony z předchozího kroku simulace
- Podmínka viditelnosti
- **Výstupy:** Seznam viditelných polygonů  
Expoziční čas pro danou pozici

$$t_{pol} = \frac{(G_{ideal} d_{pol}^2)}{k_1 (\cos \vartheta_i + \sigma_1 \cos^{m_1} \vartheta_r + \sigma_2 \cos^{m_2} \vartheta_r)}$$

$$t_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{pol_i}$$

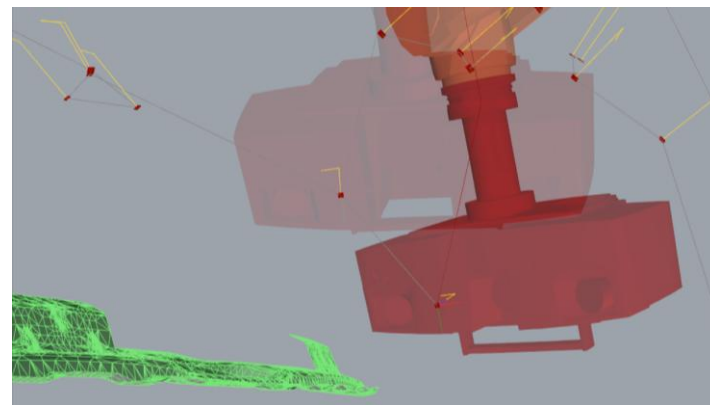
$$G_{pol} = \frac{k_1 t_{avg} (\cos \vartheta_i + \sigma_1 \cos^{m_1} \vartheta_r + \sigma_2 \cos^{m_2} \vartheta_r)}{d_{pol}^2}$$

$$G_{min} < G_{pol} < G_{max}$$



## Nejkratší cesta robota

- Řešeno jako TSP problém
- Využit python modul tsp-solver od Dmitry Shintyakova
- Algoritmus upraven pro zohlednění přetáčení skeneru
- Hodnocení vzdáleností:  $dist = dist_e \cdot angle_z \cdot angle_x$
- **Upravená** metoda řešení TSP (vychází z práce Shintyakova, 2011)

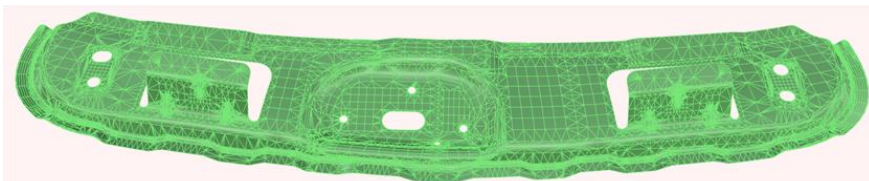


## Plechové díly (Plech1, Plech2)

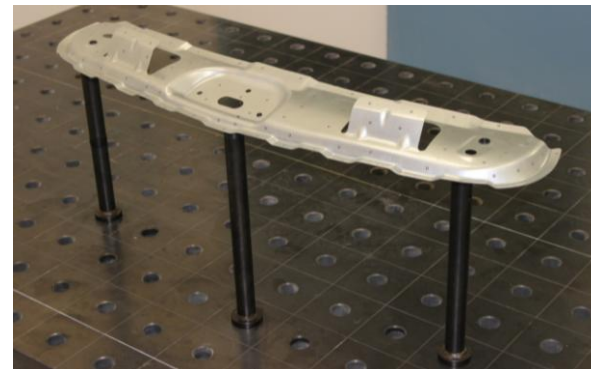
- Průměrná složitost dílů, konvexní i konkávní plochy
- Zohlednění vlivu různých použitých modelů

Měřený díl a původ dat	Počet polygonů	Identifikace modelu
<i>Plech1</i>		
CAD model	9477	P1_CAD_10000
CAD model	29910	P1_CAD_30000
Skenovaný díl	10022	P1_SKEN_10000
Skenovaný díl	29884	P1_SKEN_30000
<i>Plech2</i>		
Skenovaný díl	8800	P2_SKEN_10000
Skenovaný díl	29169	P2_SKEN_30000

P1\_CAD\_10000



Plech1

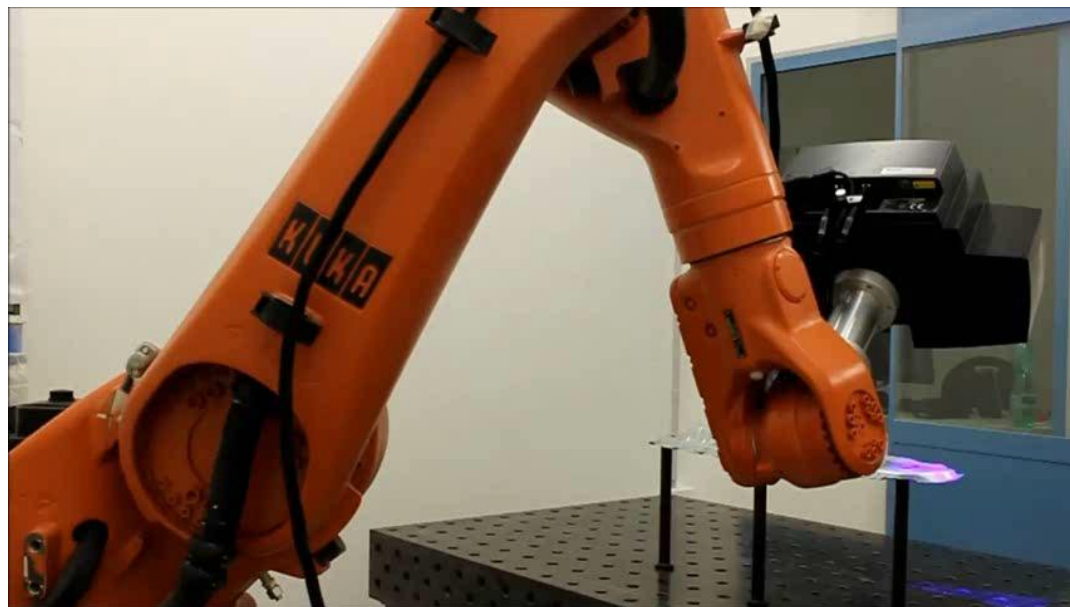


Plech2



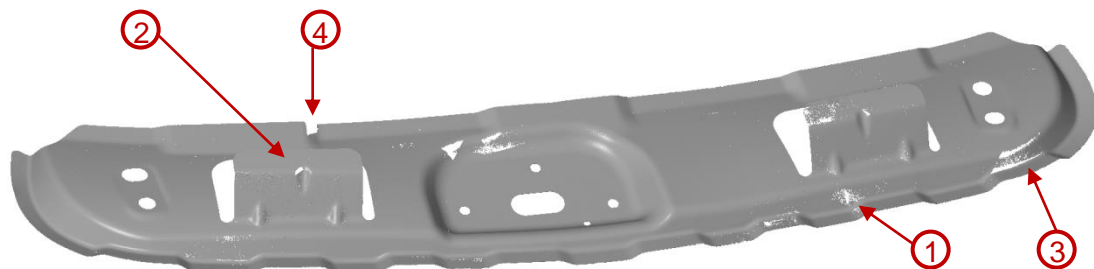
## Testovací měření

- Provedeno pomocí robota KUKA KR 60HA a 3D skeneru ATOS III Triple Scan



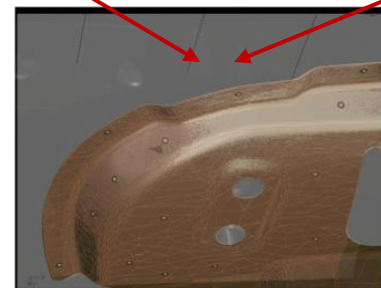
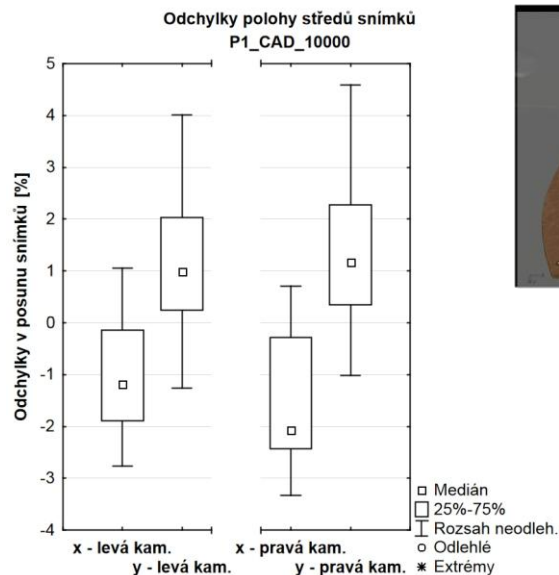
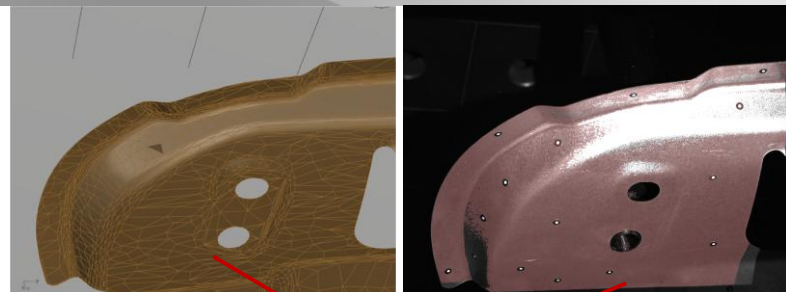
## Ruční a automatizovaná příprava pozic

- Kompletnost naskenovaných dat u automatizované přípravy (nenaskenováno do 1%)
- **Čas přípravy pozic:** ruční 75 min, automatizované 10-35 min
- **Počet pozic:** ruční 30, automatizované 33-40
- **Závěr:** Snížení času přípravy pozic o 50-85%  
Počet pozic nepatrně vyšší, potřeba optimalizace (Set Cover Problem)



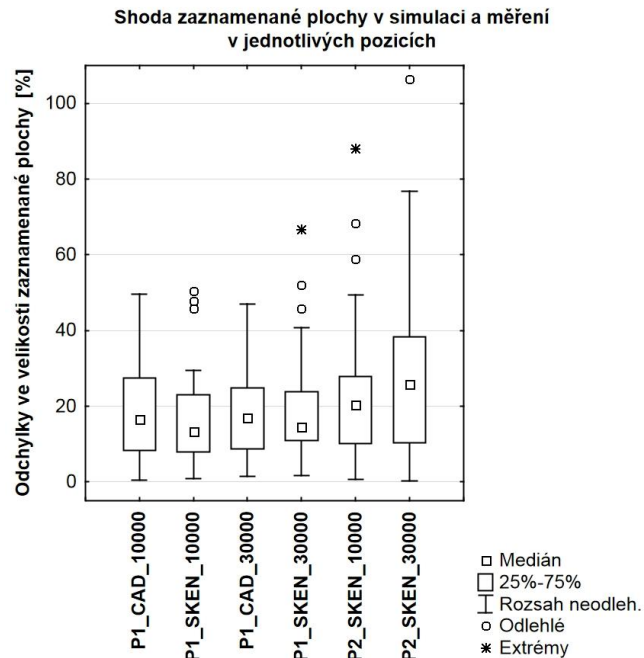
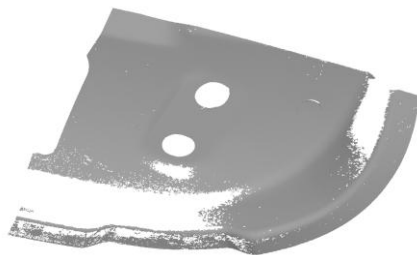
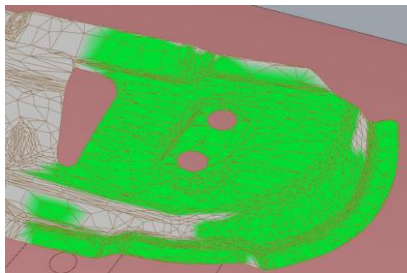
## Shoda snímků

- Ověření shody hardwarové konfigurace s poč. modelem
- Medián odchylek **poloh i velikostí** snímků do 2%
- Předpokládané vlivy:
  - Přesnost ustavení modelu
  - Přesnost parametrů použité optiky
- **Závěr:** Zjištěné odchylky shody snímků nemají zásadní vliv na výslednou přesnost simulace



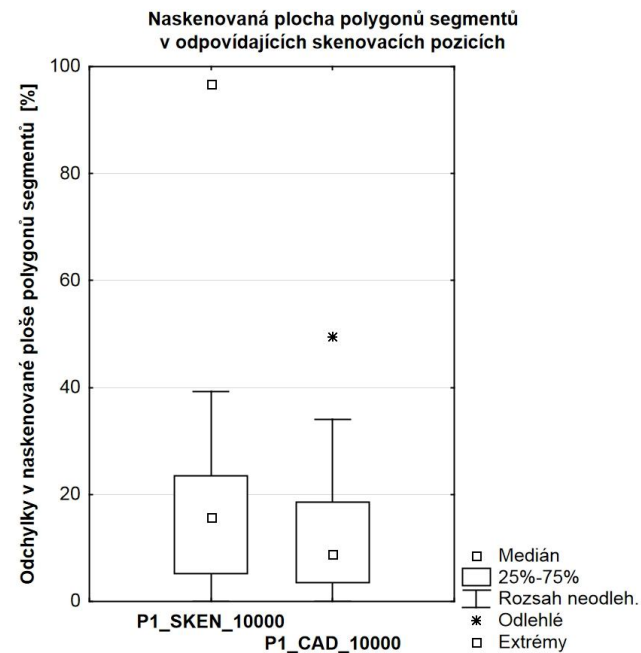
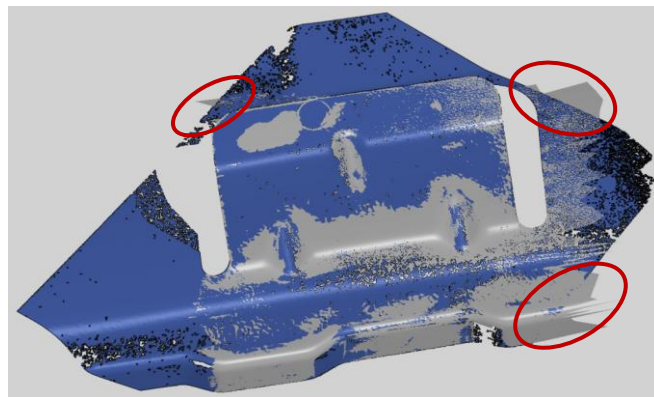
## Shoda naskenované plochy

- Porovnání v jednotlivých záběrech
- Medián odchylek do 17% u dílu Plech1, do 26% u dílu Plech2
- **Závěry:** Model získaný skenováním má kladný efekt na přesnost simulace  
Vliv hustoty použitého modelu na přesnost simulace není pozorovatelný  
Osvětlovací model dobře simuluje přímé odlesky



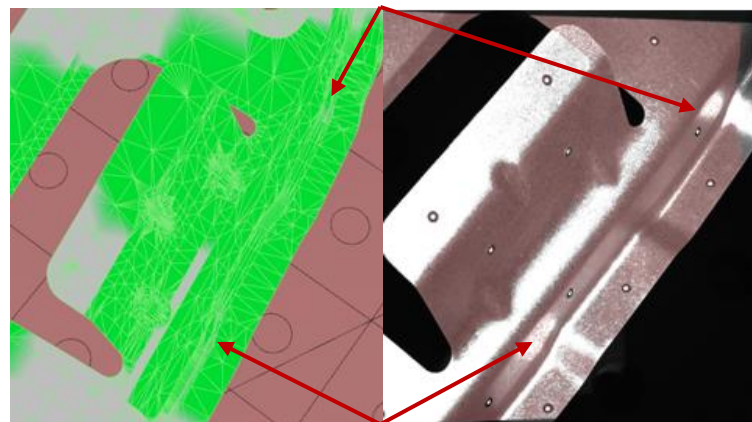
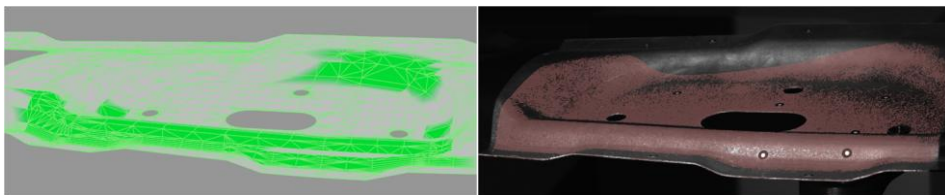
## Posouzení metody segmentace

- Posouzení plochy segmentu naskenované v jednom záběru
- Medián odchylek naskenované plochy: 9 – 16 %
- **Závěry:** Způsobeno vícenásobnými odlesky  
Dále optimalizovat pomocí dělení na menší segmenty



## Omezení osvětlovacího modelu

- Osvětlovací model nemůže dobře simulovat vícenásobné odlesky, které nastávají u konvexních povrchů → řešení pomocí metody posílání paprsku (Ray tracing)
- Nejasné odchylky v zaznamenané ploše mezi simulací a měřením (viz obrázek vlevo) → identifikace vlivů na tyto rozdíly



## Zhodnocení

- Navržená metodika přináší **časovou úsporu** v přípravě pozic měření v hodnotách 50-85%
- **Simulace se s měřením shoduje** s mediánem odchylek do 17%, respektive 26%
- **Naskenování plochy** dílu bylo ve všech případech s odchylkami do 1%
- **Počet vygenerovaných pozic** je o 6,5-33% větší než u ruční přípravy pozic
  
- Byla navržena a otestována metodika automatického generování pozic
- Byly provedeny detailní simulace a jejich porovnání se skutečným měřením – v předchozích pracích chybělo
- V systému pro plánování snímání byl poprvé použit osvětlovací model pro návrh a simulaci pozic

KOUTECKÝ, T.; PALOUŠEK, D.; BRANDEJS, J. **Application of a Reflectance Model to the Sensor Planning System.** *Proc. SPIE 9530, Automated Visual Inspection and Machine Vision*, 953005 (June 22, 2015); doi: 10.1117/12.2184890.

KOUTECKÝ, Tomáš, David PALOUŠEK a Jan BRANDEJS. **Analysis of sheet metal parts behaviour during fringe projection based digitization.** In: 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.

KOUTECKÝ, Tomáš, David PALOUŠEK a Jan BRANDEJS. 2013. **Method of photogrammetric measurement automation using TRITOP system and industrial robot.** *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*. 124(18): 3705-3709. DOI: 10.1016/j.ijleo.2012.11.024. ISSN 00304026. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030402612009199>

PALOUŠEK, David, Milan OMASTA, Daniel KOUTNÝ, Josef BEDNÁŘ, Tomáš KOUTECKÝ a Filip DOKOUPIL. 2015. **Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy.** *Optical Materials*.40: 1-9. DOI: 10.1016/j.optmat.2014.11.020.

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, roč. 2012, č. 72, s. 1000-1005. ISSN: 2010- 376X.

KOUTECKÝ, Tomáš, Jan BRANDEJS a David PALOUŠEK. **Metodika automatizace fotogrammetrického měření systémem TRITOP.** In: 52. konference kateder částí a mechanismů strojů s mezinárodní účastí. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, s. 121-126. ISBN 978-80-248-24.

**SPIE.** OPTICAL METROLOGY

**MMK 2013**  
INTERNATIONAL MASARYK CONFERENCE  
for Ph.D. Students and Young Researchers





**Děkuji za pozornost**

**T. Koutecký**



Institute of Machine  
and Industrial Design

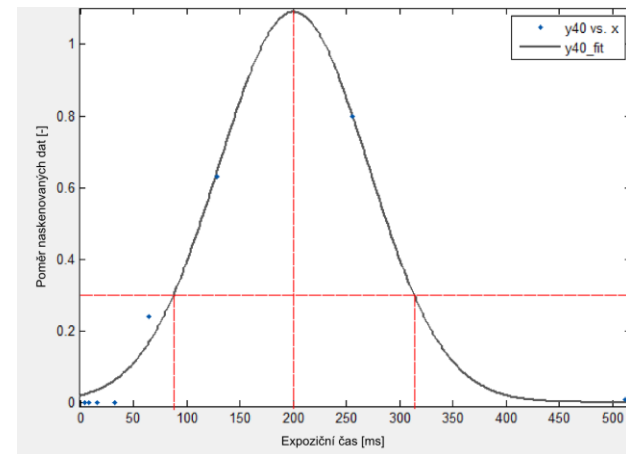
**Ústav konstruování – Odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií**

Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně

## Prof. Druckmüller

1. „Stanovení rozsahu šedé“ + zdůvodnění?

- Použitý 3D skener – uzavřený systém
- Přímá souvislost mezi expozičním časem a naskenováním plochy
- Přesněji – kontrast a korektní dekódování (přesněji SNR, saturace)
- Lineární závislost mezi expozičním časem a hodnotou šedé – v oblasti dostatečného SNR a bez saturace je hodnota šedé dostatečné měřítko
- V budoucnu použití 3D skeneru vlastní konstrukce – přístup k parametrům promítaného vzoru a limitní hodnotě SNR



## Prof. Druckmüller

### 2. Výstupy práce a zhodnocení vlastního přínosu

- Plugin pro software Rhinoceros (využívá dále pluginy Grasshopper, KUKA|prc) implementující navrženou metodiku
  
- **Vlastní** metoda segmentace (inspirace v článku – Lartigue, 2013)
- **Upravená** metoda návrhu a výběru pozic měření (vychází z článku – Raffaelli, 2012)
- **Vlastní** řešení kontroly dostupnosti robota využívající modul KUKA|prc
- **Převzaté** metody simulace viditelnosti (vychází z článku – Raffaelli, 2012)
  - **Vlastní** aplikace osvětlovacího modelu (použitého v článku – Ellenrieder, 2005)
- **Upravená** metoda řešení TSP pro určení nejkratší cesty robota (vychází z práce Shintyakova, 2011)

## Doc. Matula

1. Nebylo by vřhodnřjší orientaci segmentů přizpůsobit normálám v krychlích?

- Segmenty jsou přizpůsobeny – první segment v krychli se počítá **dle průměrné vážené normály**
- Další segmenty jsou také vytvořeny v závislosti na průměrné vážené normále

2. Nejsou zbytečné překryvy způsobeny použitou hladovou strategií?

- Ano
- Optimalizace počtu pozic pomocí řešení Set Cover Problem

## Doc. Morovič

1. Rozved'te možnosti redukce počtu pozic měření?

- Nutné dosažení vyšší shody simulace se skenováním – vyšší počet pozic je nyní výhodou, části, které se v rozporu se simulací naskenovaly, jsou pokryty z jiných pohledů
- Řešení pomocí Set Cover Problem
  - Seznam všech polygonů dílu –  $U = \{1, 2, 3, 4, 5\}$
  - Jednotlivé pohledy –  $S = \{\{1, 2, 3\}, \{2, 4\}, \{3, 4\}, \{4, 5\}\}$
  - Pokrytí všech polygonů –  $\{\{1, 2, 3\}, \{4, 5\}\}$
- Vícekriteriální systém – hodnocení nejen zda se polygon naskenuje, ale v jaké kvalitě a podle toho může mít váhu při optimalizaci