

Zařízení pro měření tvaru a rozměru výkovek

Jakub Hurník, Ing.

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

Školitel specialista: Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
Fakulta strojního inženýrství
VUT v Brně

Brno, datum



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

OBSAH

- Vymezení řešené problematiky
- Shrnutí současného stavu poznání a analýza poznatků z rešerše
- Vymezení cíle
- Materiál a metody
- Vědecké otázky a pracovní hypotézy
- Současný stav řešení



Výkovek

VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

- Měření těžkých výkovků (volné kování) v procesu výroby

SOUČASNÝ STAV

- Produkce v Číně 13 mil. tun ročně
- Kontaktní měřidla, odhad operátora
- Přídavky na obrábění - i přes 20 % materiálu - nepřesné
- LaCam Forge
 - Laserový skener, přesnost 5 mm, doba měření 15 s

MOTIVACE

- Zpětná vazba operátorovi - korekce tvaru
- Úspora materiálu, ekologie, bezpečnost
- Integrovaný systém - „Industry 4.0“

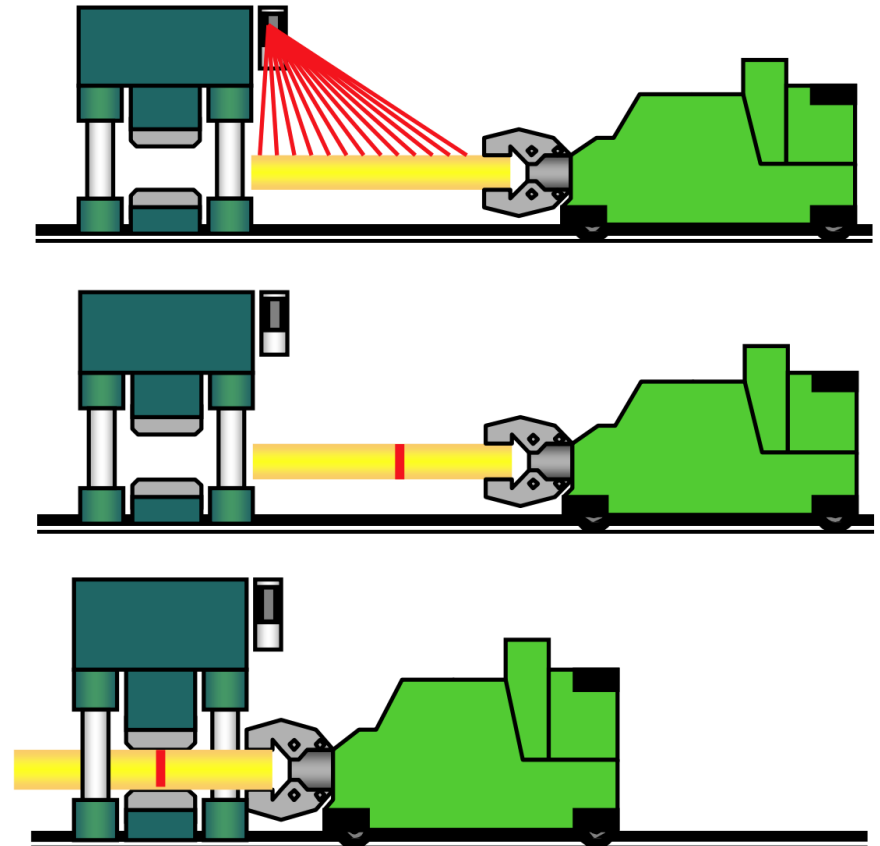
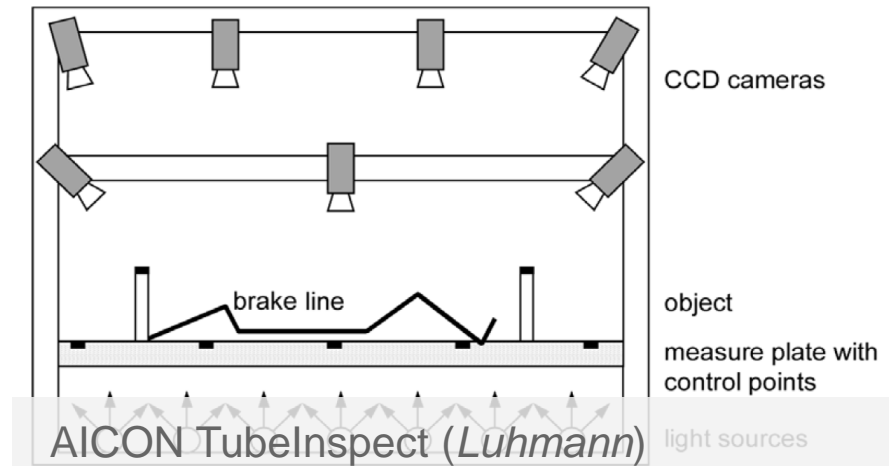


Schéma využití měřicího systému (MiNTEQ)

VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

ŘEŠENÁ PROBLEMATIKA

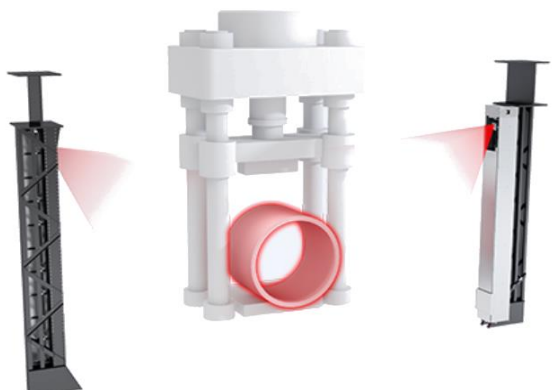
- Rozšiřování možností aplikace optického měření
- Zvýšení TRL („Technology Readiness Level“)
- Spolupráce se ŽDAS
 - Specifikace reálných podmínek a požadavků
 - 800 - 1250 °C, délka 4 m (až okolo 10 m)
 - Přímost osy ± 1 mm/1 m
 - Průměr do $\pm 1,5$ mm
 - Délka do ± 25 mm



SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ - přístupy

▪ Laserové skenování

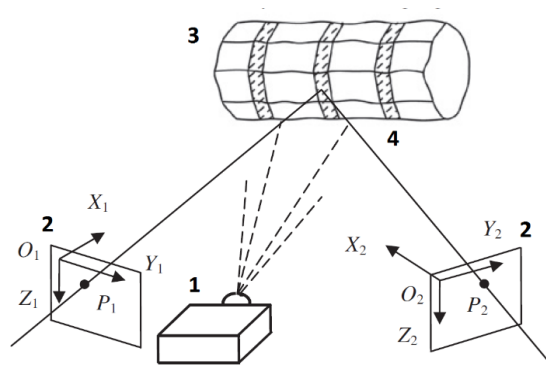
- Specifické podmínky nemají vliv
- Komerční systémy



3D Portal (MERMEC Group)

▪ Aktivní fotogrammetrie

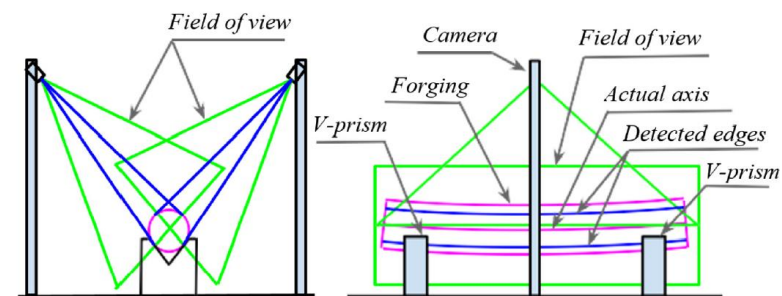
- Liniové skenery, aktivní stereovize
- Silný zdroj světla, SNR



Aktivní stereovize (Liu)

▪ Pasivní fotogrammetrie

- **Siluety**, stereovize
- Rychlé, bez omezení měř. objemu



Měření siluet (Zatočilová)

SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ – problémy opt. systémů

2012

Hu, C., a kol. 2012

- Flexibilní kalibrace kamer pomocí prostorové resekce



2014

Garrido-Jurado, S., a kol. 2014

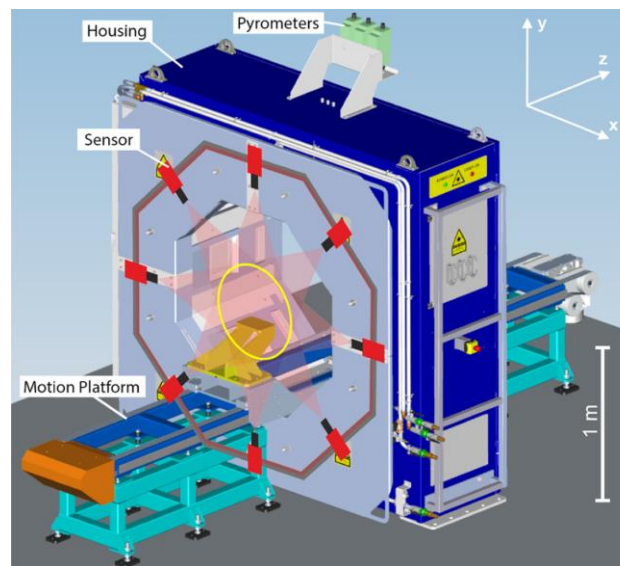
- Rozpoznání kal. značek s korekcí chyb



2015

Ghiotti, A, a kol. 2015

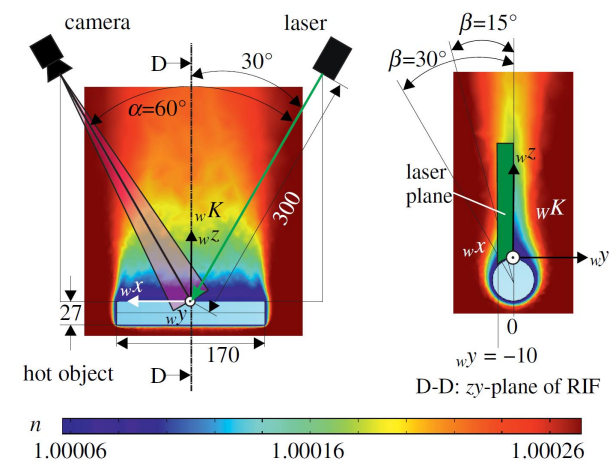
- Studium problematiky měření horkých těles liniovými skenery



2018

Beermann, R., a kol. 2018

- Studium vlivu horké atmosféry na přesnost měření



SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ – siluety

2006

Dworkin, S. B., a kol. 2006

- Prahování za použití NIR filtru



2009

Hu, C. H., a kol. 2009

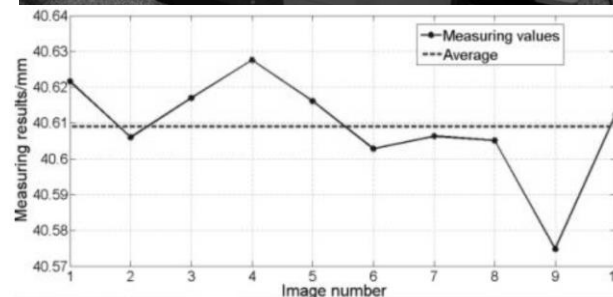
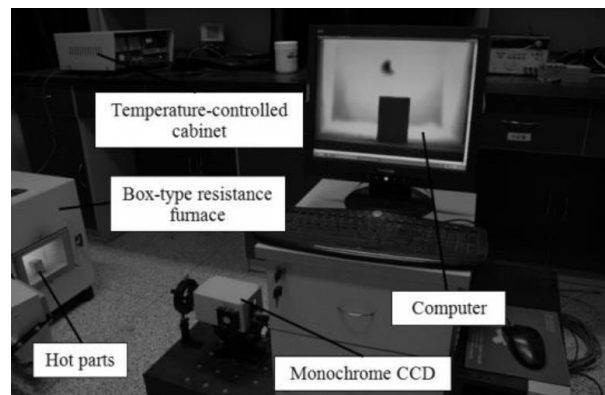
- Hranový operátor, validace hran



2015

Bi, C., a kol. 2015

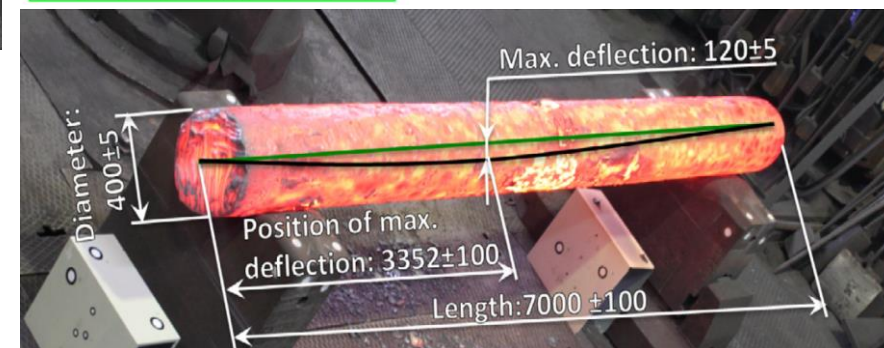
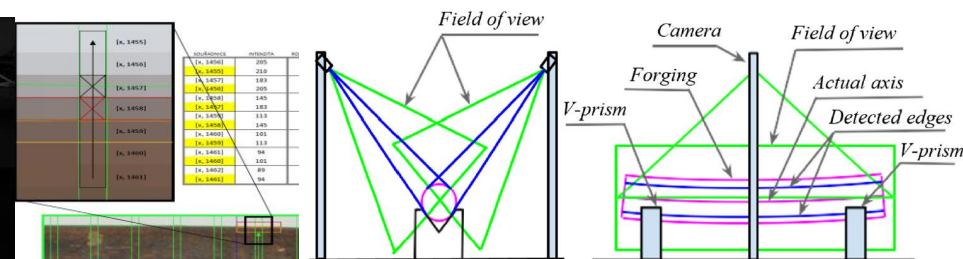
- 2D měření do 0,5 mm, hranový operátor



2016

Zatočilová, A., a kol. 2016

- 3D měření, validace hran, chyba do 2 %

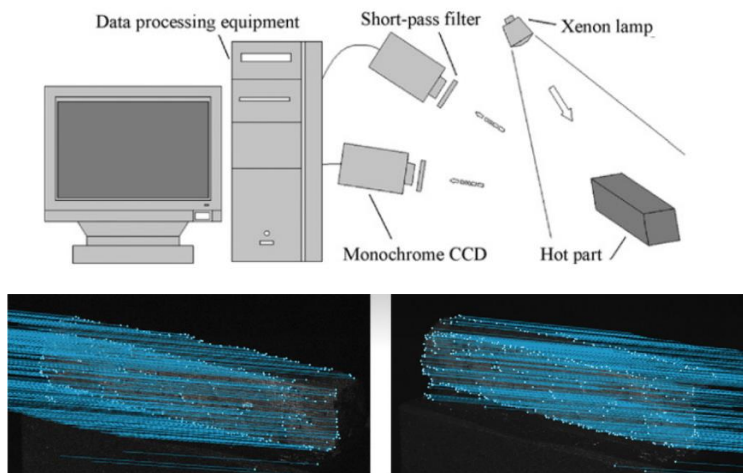


SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ – pasivní stereovize

2010

Jia, Z. Y., a kol. 2010

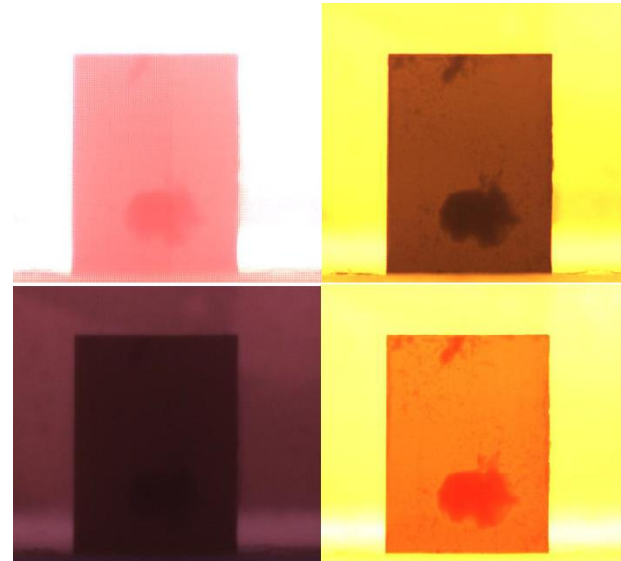
- Osvit, nekalibrované kamery



2016

Bi, C., a kol. 2016

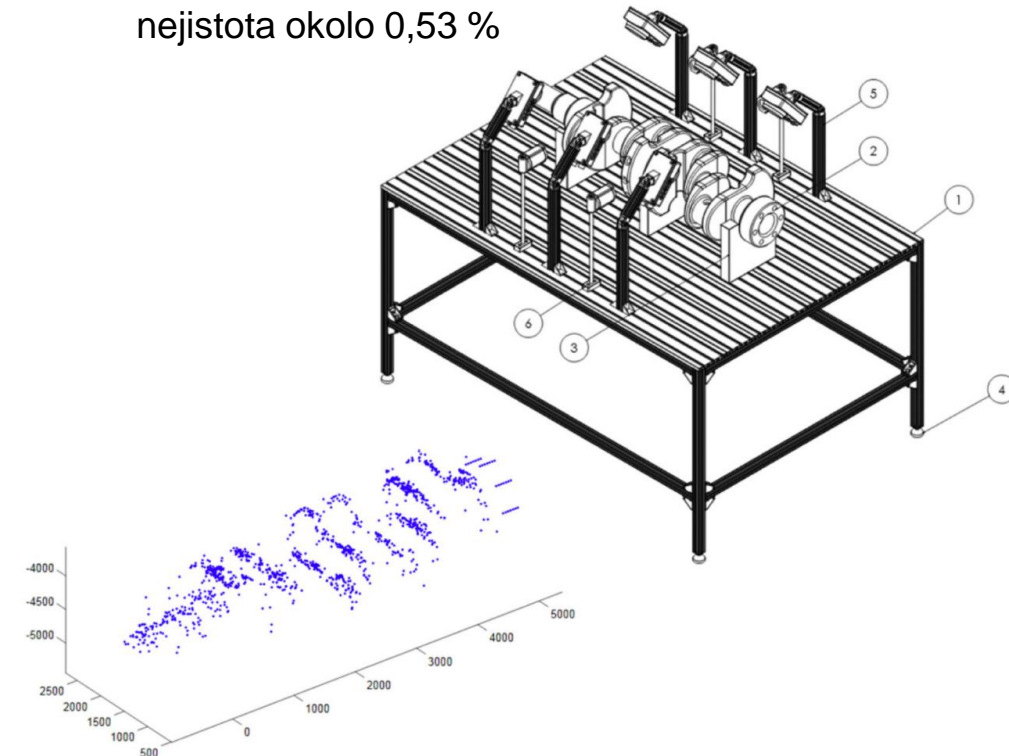
- Studium vlivu barevných filtrů na kontrast siluet



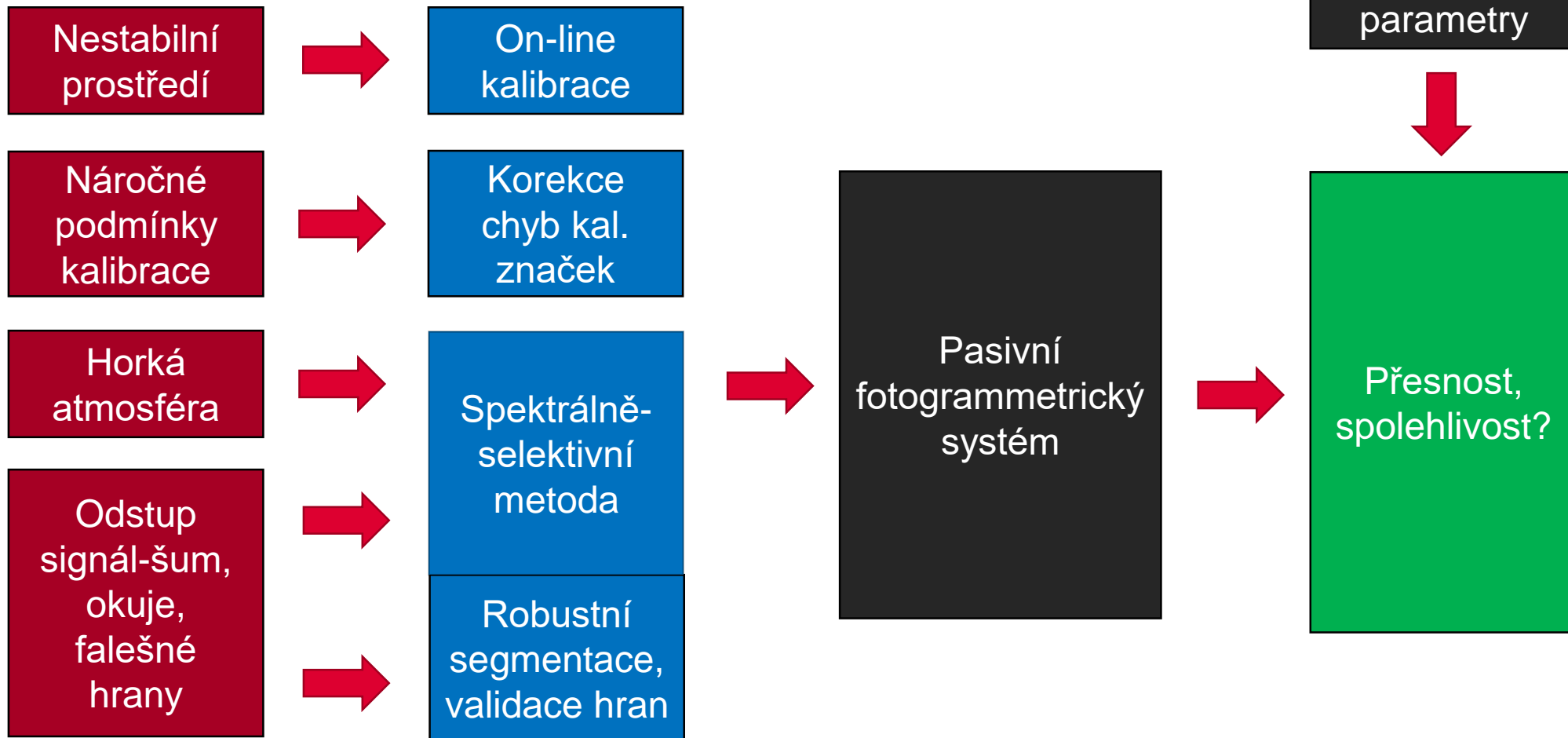
2018

Lins, R., a kol. 2018

- Osvit, kalibrace, nejistota okolo 0,53 %



ANALÝZA REŠERŠE



VYMEZENÍ CÍLE

Hlavní cíl disertační práce

- Cílem práce je objasnit možnosti aplikace principů pasivní fotogrammetrie pro měření geometrie výkovků v procesu výroby.

Přínos disertační práce

- Umožnění vývoje nového měřicího systému



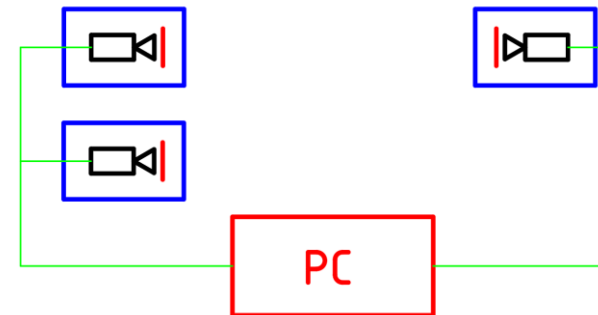
Předkovek

MATERIÁL A METODY - hardware

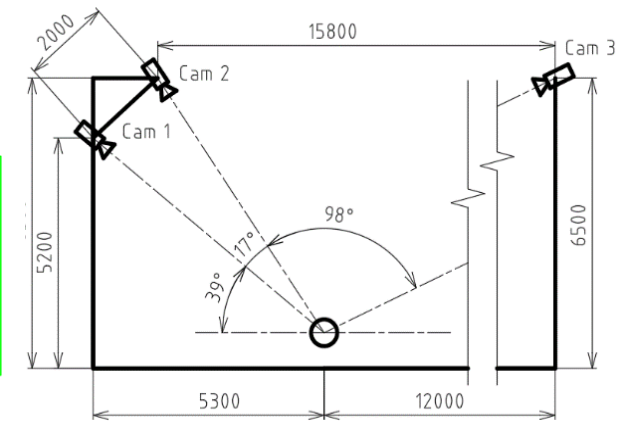
Spektrálně-
selektivní
metoda

Aparatura

- 3 synchronizované kamery, měřicí objem $6 \times 6 \times 2$ m
- 16 MPx monochromatické kamery
- Průmyslové objektivy Zeiss Interlock Compact
- Barevné filtry 630 – 730 nm
- Autonomní kamerové kryty s termoregulací
- Pro porovnání 2 x TOF FARO Focus 3D S 120
- Stereovize - zásobník barevných filtrů > 1 fps
- Stereovize – pozorovací úhel 20°



Aparatura



Rozmístění kamer (Hurník)



Zásobník filtrů



Měření TOF



Fotografie z měřicího systému



Kryt kamery

MATERIÁL A METODY - software

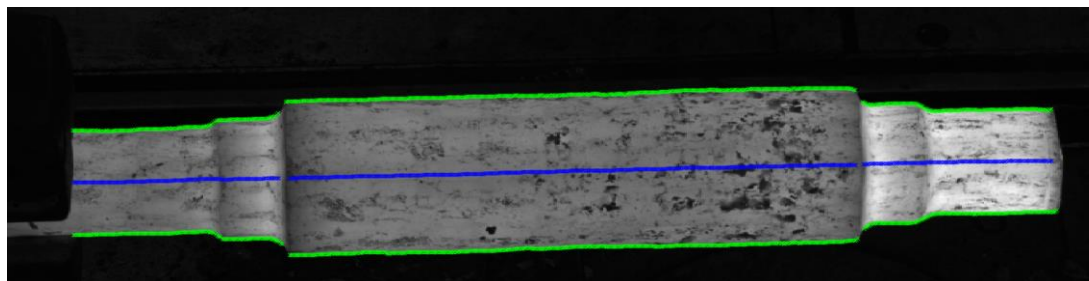
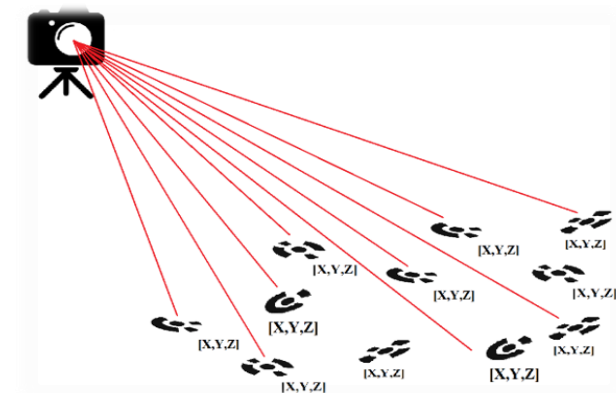
On-line kalibrace

Korekce chyb kal. značek

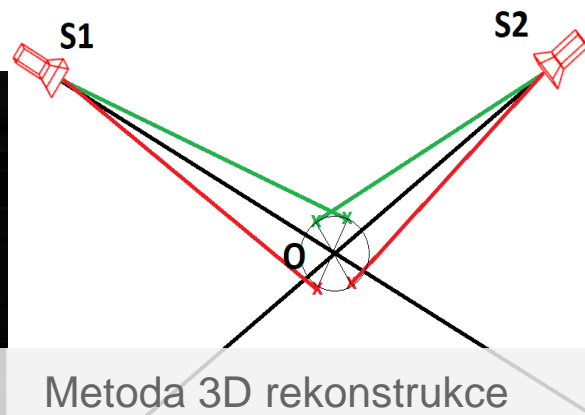
Robustní segmentace validace hran

Softwarové metody

- Dvofázová kalibrace kamer, prostorová resekce
- Kalibrační značky s korekcí chyb
- Segmentace založená na Sobelově metodě a Houghově transformaci
- Sub-pixelová detekce hran
- Validace na základě konektivity
- Vyhlazení dat na základě ratingu kvality hran
- Metoda 3D rekonstrukce s předpokladem kruhového průřezu

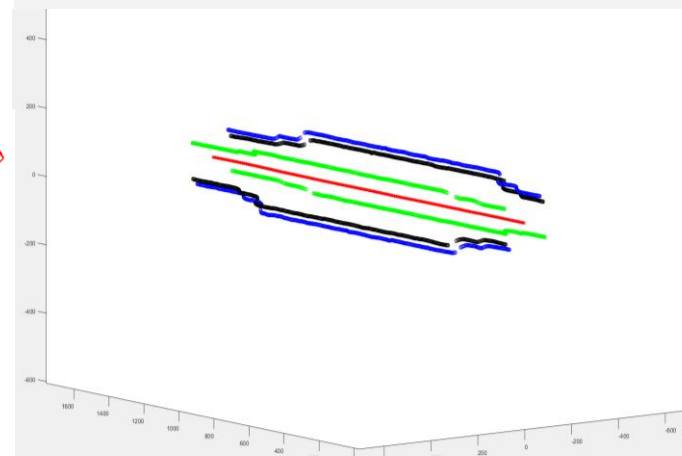


Hrany a osa výkovku



Metoda 3D rekonstrukce

Prostorová resekce



Výsledná geometrie

VĚDECKÉ OTÁZKY, PRACOVNÍ HYPOTÉZY

Pasivní fotogrammetrický systém

➔ **Otázka č. 1:** Bude ovlivnění kalibrace kamer akceptovatelné?

➔ **Hypotéza č. 1:** Korekce chyb pomůže zvýšit robustnost systému kal. značek.

➔ **Otázka č. 2:** Bude možné dosáhnout stanovené přesnosti měření?

➔ **Hypotéza č. 2:** Vliv tepelně ovlivněné atmosféry bude akceptovatelný.

➔ **Otázka č. 3:** Jaké budou výsledky porovnání s laserovým skenováním?

➔ **Hypotéza č. 3:** Měřená geometrie bude s potřebnou přesností odpovídat skutečné geometrii výkovku.

➔ **Otázka č. 4:** Bude možné využít pasivní stereovizi?

➔ **Hypotéza č. 4:** Pasivní fotogrammetrie bude nabízet z hlediska přesnosti alternativu vůči laserovému skenování.

➔ **Hypotéza č. 5:** Získaný tvar bude s potřebnou přesností odpovídat skutečnému tvaru výkovku.

VĚDECKÉ OTÁZKY, PRACOVNÍ HYPOTÉZY

Pasivní fotogrammetrický systém



Otázka č. 1: Bude ovlivnění kalibrace kamer akceptovatelné?



Hypotéza č. 1: Korekce chyb pomůže zvýšit robustnost systému kal. značek.



Hypotéza č. 2: Vliv tepelně ovlivněné atmosféry bude akceptovatelný.

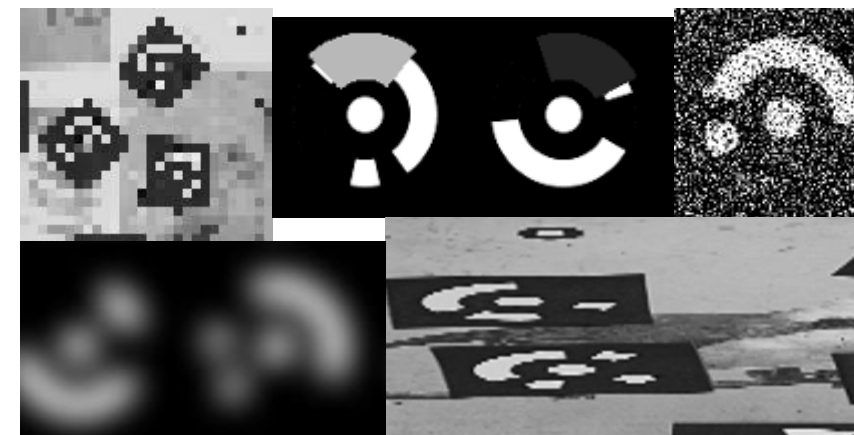
METODA A ODPOVĚĎ NA OTÁZKU č. 1

Metoda validace hypotézy 1

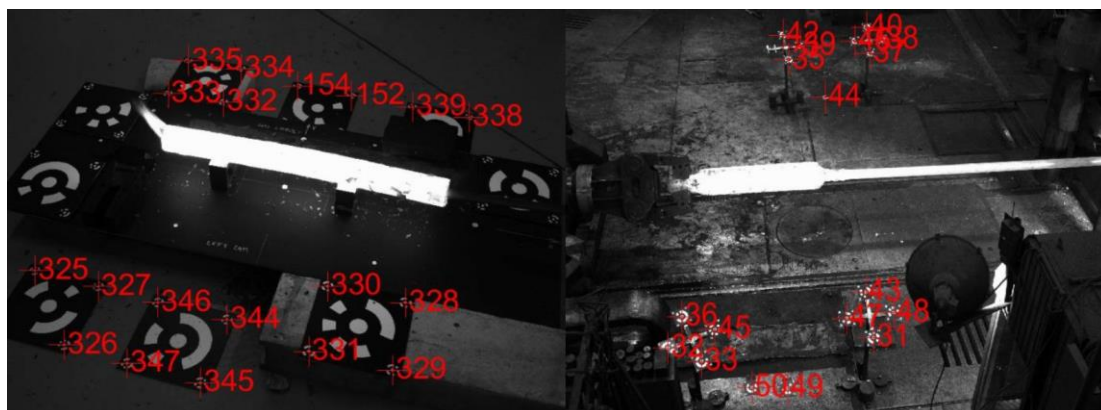
- Odezva systému kal. značek na běžné negativní jevy
- Statistické porovnání robustnosti s přístupy v literatuře, TRITOP a ArUco
- Ukazatele *recall*, *precision*

Odpověď na otázku 1, část 1

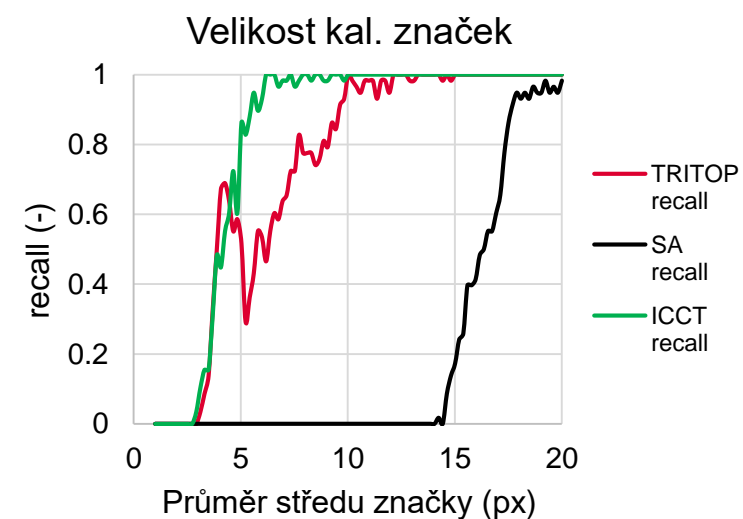
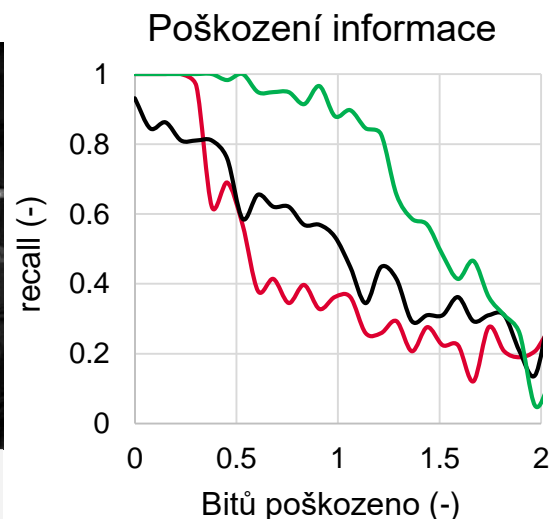
- Např. o 30 % vyšší spolehlivost (poškození kódu), osvědčeno v praxi
- Kalibraci lze provést spolehlivě, korekce chyb pomáhá vyšší spolehlivosti
- Impaktovaný článek v recenzním řízení



Příklady zkoumaných obrazových jevů



Nasazení značek v praxi během experimentů (*Hurník*)



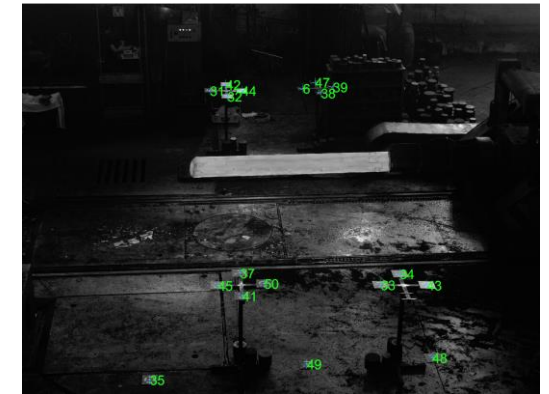
METODA A ODPOVĚĎ NA OTÁZKU č. 1

Metoda validace hypotézy 2

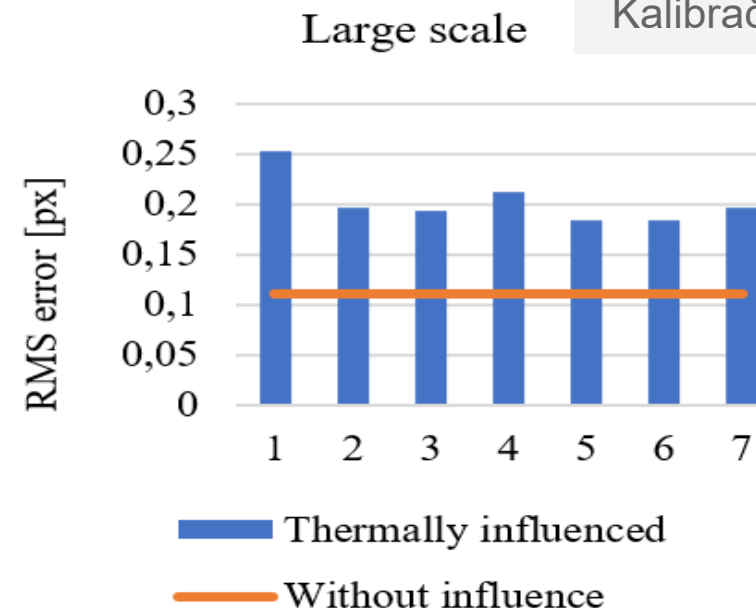
- Vliv horké atmosféry
- Chyba kalibrace před a po vložení výkovku do scény
- Reprojekční chyba ΔRMS

Odpověď na otázku 1, část 2

- Termální ovlivnění - zvýšení chyby reprojekce z 0,1 na 0,25 px po vložení výkovku do scény
- Fyzikální limit přesnosti měřicího systému řádově 0,5 mm
- Konferenční příspěvek ve WoS



Kalibrační scéna



Chyba reprojekce (*Hurník*)

VĚDECKÉ OTÁZKY, PRACOVNÍ HYPOTÉZY

Pasivní fotogrammetrický systém



Otázka č. 1: Bude ovlivnění kalibrace kamer akceptovatelné?



Hypotéza č. 1: Korekce chyb pomůže zvýšit robustnost systému kal. značek.



Hypotéza č. 2: Vliv tepelně ovlivněné atmosféry bude akceptovatelný.



Otázka č. 2: Bude možné dosáhnout stanovené přesnosti měření?



Hypotéza č. 3: Měřená geometrie bude s potřebnou přesností odpovídat skutečné geometrii výkovku.

METODA A ODPOVĚĎ NA OTÁZKU č. 2

Metoda validace hypotézy 3

- Vliv kombinace fenoménů
- Opakované měření v reálných podmínkách
- Sledována opakovatelnost – u_{AL} , u_{ALdef} , u_{AD} , u_{Av} (u_{Avmax})

Odpověď na otázku 2

- Opakovatelnost okolo 1 mm – osa i průměr
- Slibné výsledky, potřeba více testů
- Bude publikováno v impaktovaném časopise

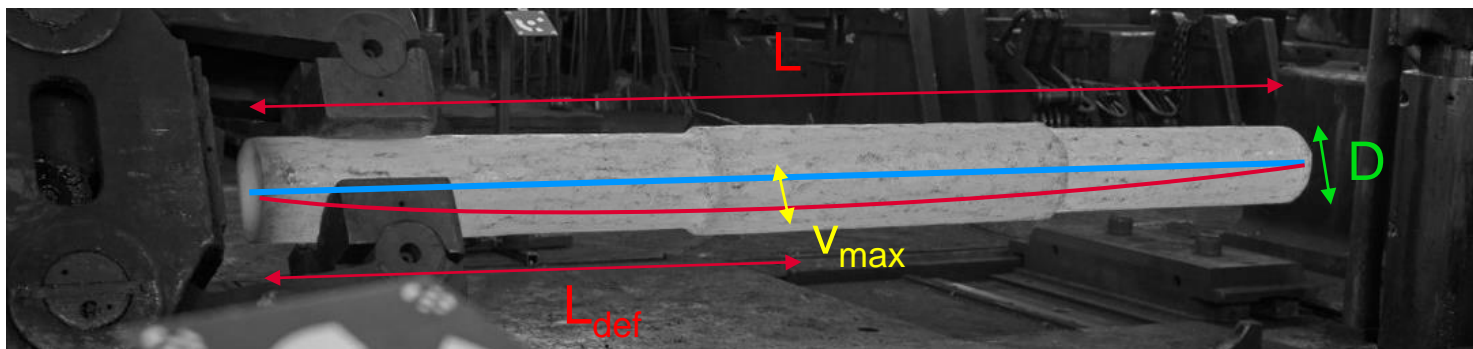
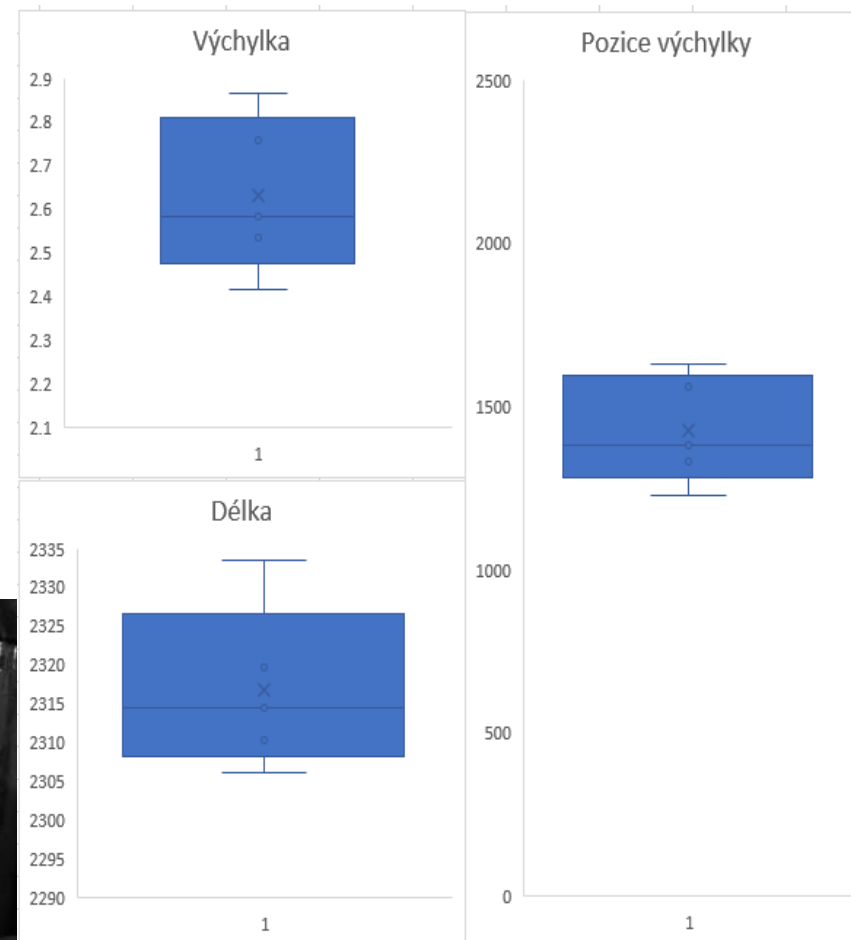


Schéma měřených charakteristik výkovku



Statistické vyhodnocení výsledků

VĚDECKÉ OTÁZKY, PRACOVNÍ HYPOTÉZY

Pasivní fotogrammetrický systém



Otázka č. 1: Bude ovlivnění kalibrace kamer akceptovatelné?



Hypotéza č. 1: Korekce chyb pomůže zvýšit robustnost systému kal. značek.



Otázka č. 2: Bude možné dosáhnout stanovené přesnosti měření?



Hypotéza č. 2: Vliv tepelně ovlivněné atmosféry bude akceptovatelný.



Otázka č. 3: Jaké budou výsledky porovnání s laserovým skenováním?



Hypotéza č. 4: Pasivní fotogrammetrie bude dosahovat srovnatelných nebo lepších výsledků ve srovnání s laserovým skenováním.

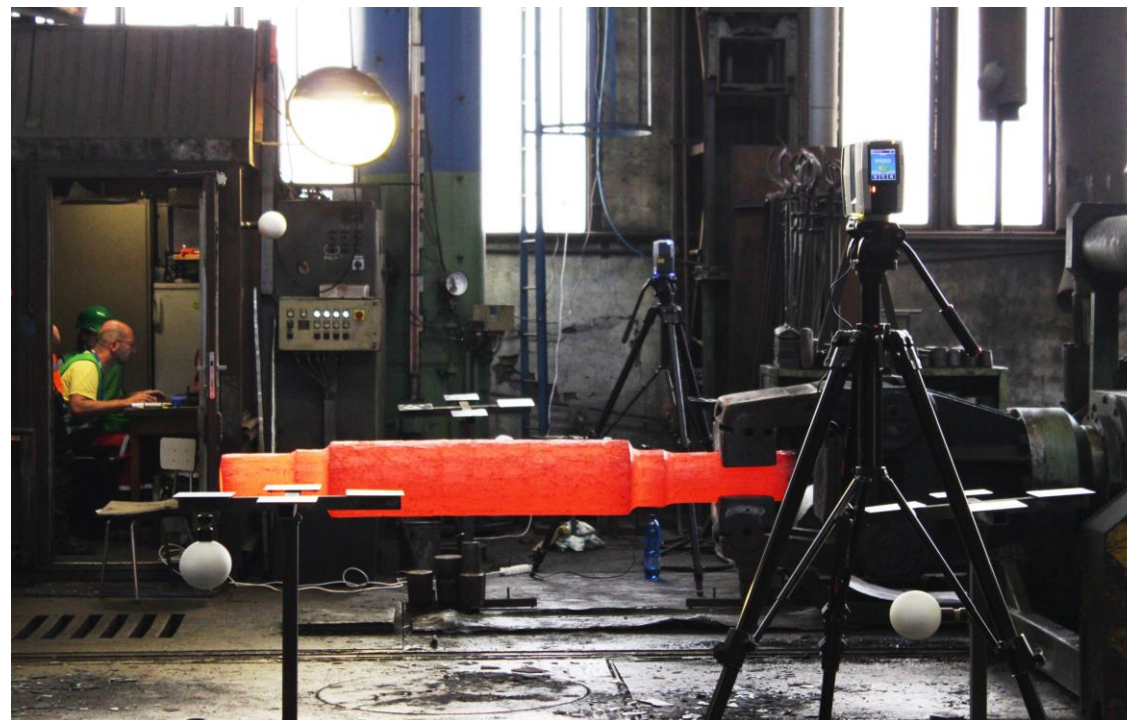
METODA A ODPOVĚĎ NA OTÁZKU č. 3

Metoda validace hypotézy 4

- Statistické porovnání 2 měřících metod
- Opakované simultánní měření v reálných podmínkách
- Sledována opakovatelnost obou metod – u_{AL} , u_{ALdef} , u_{AD} , u_{Av} (u_{Avmax})

Odpověď na otázku 3

- Slibné počáteční výsledky, potřeba více testů
- Opakovatelnost laserového skenování zřejmě horší než v případě pasivní fotogrammetrie
- Bude publikováno v impaktovaném časopise



Měření výkovku pomocí laserových skenerů

VĚDECKÉ OTÁZKY, PRACOVNÍ HYPOTÉZY

Pasivní fotogrammetrický systém



Otázka č. 1: Bude ovlivnění kalibrace kamer akceptovatelné?



Hypotéza č. 1: Korekce chyb pomůže zvýšit robustnost systému kal. značek.



Otázka č. 2: Bude možné dosáhnout stanovené přesnosti měření?



Hypotéza č. 2: Vliv tepelně ovlivněné atmosféry bude akceptovatelný.



Otázka č. 3: Jaké budou výsledky porovnání s laserovým skenováním?



Hypotéza č. 3: Měřená geometrie bude s potřebnou přesností odpovídat skutečné geometrii výkovku.



Otázka č. 4: Bude možné využít pasivní stereovizi?



Hypotéza č. 4: Pasivní fotogrammetrie bude nabízet z hlediska přesnosti alternativu vůči laserovému skenování.



Hypotéza č. 5: Získaný tvar bude s potřebnou přesností odpovídat skutečnému tvaru výkovku.

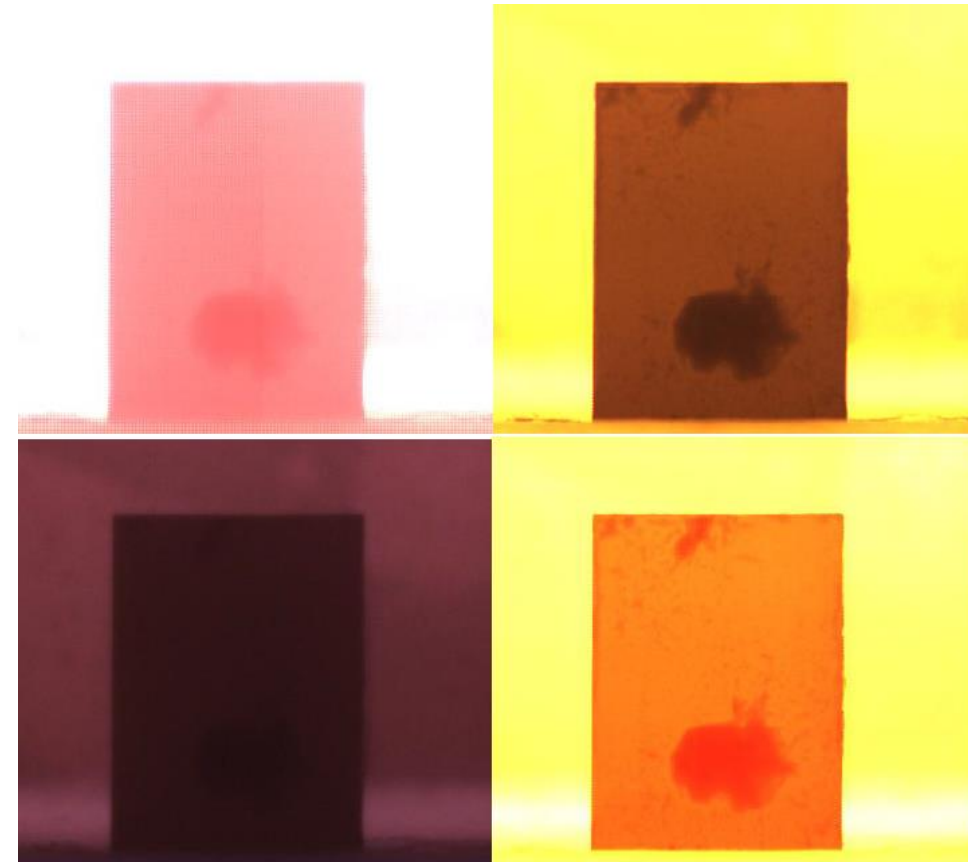
METODA A ODPOVĚĎ NA OTÁZKU č. 4

Metoda validace hypotézy 5

- Vliv kombinace fenoménů, studium vlivu spektrálně selektivní metody
- Opakované měření v laboratorních podmínkách
- Sledována chyba měření – δ_{AD} a další, hustota sítě a spolehlivost triangulace.

Odpověď na otázku 4

- Zatím nezodpovězeno.



Vliv spektrálně-selektivní metody (*B_i*)

ZÁVĚR

Publikace - vydané

- **VO1:** HURNÍK, J, A ZATOČILOVÁ a D PALOUŠEK. Camera calibration method of optical system for large field measurement of hot forgings in heavy industry. In: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI [online]. 2019. Dostupné z: doi:10.1117/12.2527693
- VRÁNA, R., VAVERKA, O., ČERVINEK, O., PANTĚLEJEV, L., HURNÍK, J., KOUTNÝ, D., PALOUŠEK, D. Heat treatment of the SLM processed lattice structure made of AlSi10Mg and its effect on the impact energy absorption. In: Euro PM2019 Proceedings. 2019.

Publikace - plánované

- **VO1:** HURNÍK, J, A ZATOČILOVÁ a D PALOUŠEK. Circular coded target system for industrial applications. In: Machine Vision and Applications (Q2)...
 - 2. kolo recenzního řízení – 100 %
- **VO2:** Measurement of heavy forgings using silhouettes – Measurement (Q1)
 - Vyhodnocování dat – 60 %
- **VO3:** Comparison of passive photogrammetry and laser scanning for measurement of forgings - Advanced Manufacturing Technology (Q1)
 - Vyhodnocování dat – 60 %
- **VO4:** Hot metal workpieces measurement using passive stereovision – Measurement (Q1)
 - Hardware – 15 %

ZÁVĚR

Aplikované výstupy

- Software: Kalibrace kamer pomocí kódovaných značek
- Funkční vzorek 1: Automatický zásobník barevných filtrů
- Funkční vzorek 2: Optický systém pro měření rotačních výkovků za tepla

Participace na projektech

- TAČR TREND, Výzkum a vývoj pokročilé technologie měření tvaru a rozměrů výkovků v rámci procesu automatizovaného kování
- TAČR ZÉTA, Vývoj optického systému pro automatizované měření rotačních výkovků
- MPO OP PIK, Vývoj transtibiální protézy zhotovené 3D tiskem
- 2 × Specifický výzkum: Vývoj procesních parametrů technologie Selective laser melting pro výrobu unikátních kovových dílů, Výzkum mechanických a fyzikálních vlastností strukturovaného materiálu připravovaného pomocí aditivní výroby
- 5 hospodářských smluv (3 × Sunflower-Trimmer, 1 × TopGis, 1 × Alpla)

DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

Jakub Hurník, Ing.

Jakub.Hurnik@vut.cz



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

www.ustavkonstruovani.cz

OTÁZKA OPONENTA č. 2

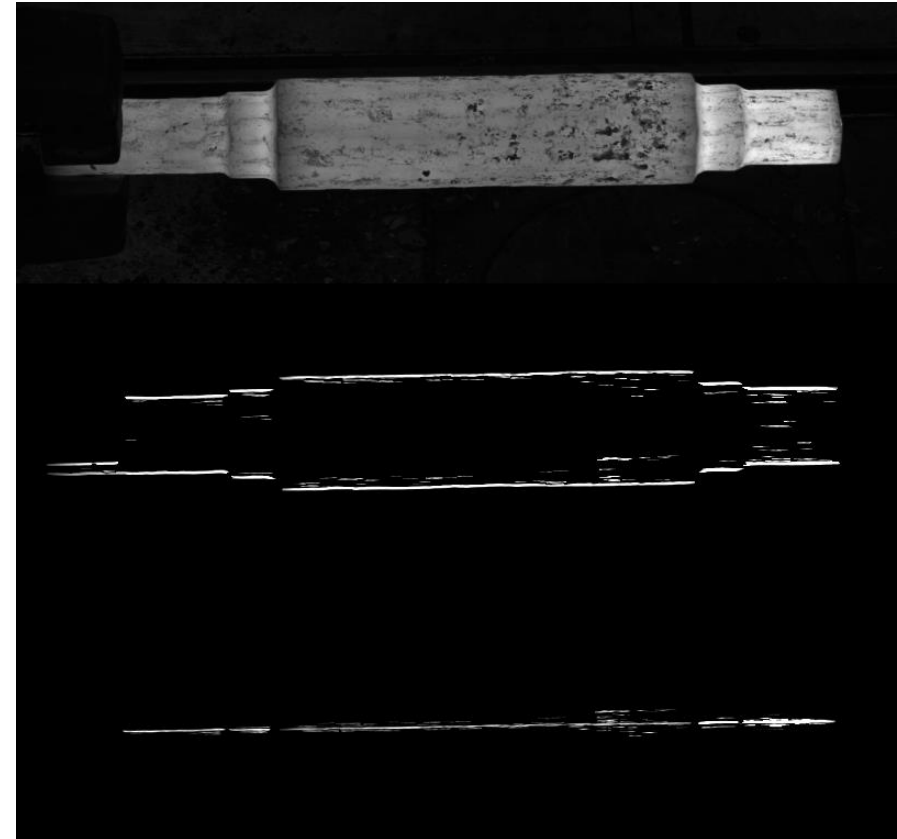
Jakou plánujete použít sub-pixelovou metodu detekce hran?

1. Fáze - segmentace

- Filtr citlivý na horizontální symetrické objekty o dané velikosti
- Sobelův hranový operátor, omezení rozsahu úhlů gradientu
- Dvojitý práh (jako Cannyho operátor)
- Eroze-dilatace pro odstranění osamocených hran
- Podmínka symetrie – osu tvoří minimum síly horní a spodní hrany
- Houghova transformace, nalezení osy

2. Fáze - sub-pixelová detekce hran

- Probíhá v řezech okolo očekávaných hran
- Proložení lokálních maxim parabolou
- Validace hran na základě konektivity
- Vyhlazení na základě ratingu hran (směr a velikost gradientu)



Shora: ořezaný obraz, horizontální hrany, podmínka symetrie

OTÁZKA OPONENTA č. 2

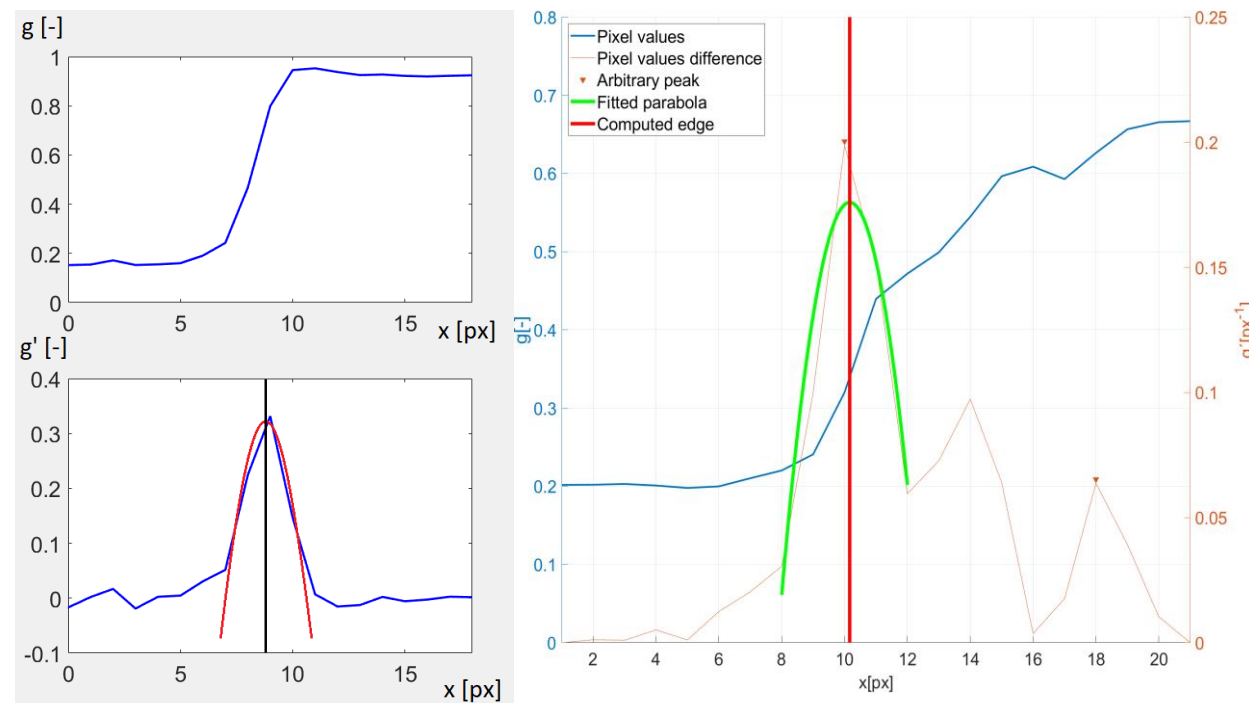
Jakou plánujete použít sub-pixelovou metodu detekce hran?

1. Fáze - segmentace

- Filtr citlivý na horizontální symetrické objekty o dané velikosti
- Sobelův hranový operátor, omezení rozsahu úhlů gradientu
- Dvojitý práh (jako Cannyho operátor)
- Eroze-dilatace pro odstranění osamocených hran
- Podmínka symetrie – osu tvoří minimum síly horní a spodní hrany
- Houghova transformace, nalezení osy

2. Fáze - sub-pixelová detekce hran

- Probíhá v řezech okolo očekávaných hran
- Proložení lokálních maxim parabolou
- Validace hran na základě konektivity
- Vyhlcení na základě ratingu hran (směr a velikost gradientu)



Sub-pixelová metoda detekce hran

OTÁZKA OPONENTA č. 2

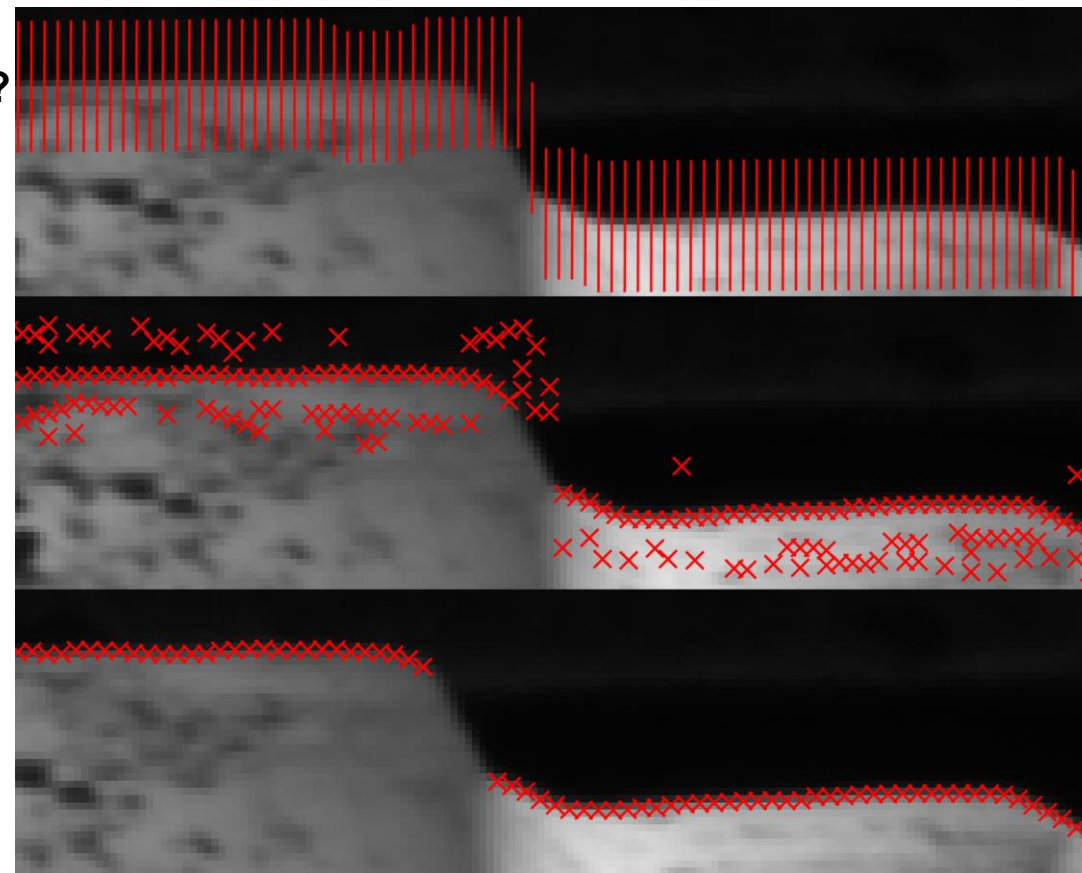
Jakou plánujete použít sub-pixelovou metodu detekce hran?

1. Fáze - segmentace

- Filtr citlivý na horizontální symetrické objekty o dané velikosti
- Sobelův hranový operátor, omezení rozsahu úhlů gradientu
- Dvojitý práh (jako Cannyho operátor)
- Eroze-dilatace pro odstranění osamocených hran
- Podmínka symetrie – osu tvoří minimum síly horní a spodní hrany
- Houghova transformace, nalezení osy

2. Fáze - sub-pixelová detekce hran

- Probíhá v řezech okolo očekávaných hran
- Proložení lokálních maxim parabolou
- Validace hran na základě konektivity
- Vyhlazení na základě ratingu hran (směr a velikost gradientu)



Shora: Řezy okolo očekávané hrany, lokální maxima první derivace, validace na základě konektivity

OTÁZKA OPONENTA č. 1

Zvažoval jste pořízení sekvence obrazů, jejich sloučení v jeden obraz a následné využití slepé dekonvoluce, za účelem zmírnění negativního vlivu horké atmosféry?

Vliv horké atmosféry se neukazuje jako kritický. Využití takové metody by také mohlo být potenciálně problematické.

Využití více snímků

- Nestálé prostředí – potenciálně obtížné sesazení snímků
- Vliv lokálních turbulencí bude potlačen, nikoli vliv „atmosférické čočky“.
- Praktické problémy – přenos snímků apod.

Slepá dekonvoluce

- Nestejné konvoluční jádro napříč snímkem
- Kompenzace rozmazání hran v rámci subpixelové metody detekce

Předmět další práce?



Obraz z měřicího systému

OTÁZKA OPONENTA č. 1

Zvažoval jste pořízení sekvence obrazů, jejich sloučení v jeden obraz a následné využití slepé dekonvoluce, za účelem zmírnění negativního vlivu horké atmosféry?

Vliv horké atmosféry se neukazuje jako kritický. Využití takové metody by také mohlo být potenciálně problematické.

Využití více snímků

- Nestálé prostředí – potenciálně obtížné sesazení snímků
- Vliv lokálních turbulencí bude potlačen, nikoli vliv „atmosférické čočky“.
- Praktické problémy – přenos snímků apod.

Slepá dekonvoluce

- Nestejné konvoluční jádro napříč snímkem
- Kompenzace rozmazání hran v rámci subpixelové metody detekce

Předmět další práce?

