



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

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

ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ TVARU A ROZMĚRU VÝKOVKŮ

JAKUB HURNÍK, Ing.

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2020



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

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

ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ TVARU A ROZMĚRU VÝKOVKŮ

DEVICE FOR MEASUREMENT OF SHAPE AND DIMENSIONS OF
FORGINGS

Ing. Jakub Hurník

Autor práce
Author

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

Vedoucí práce
Supervisor

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2020

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	6
2.1	Blízká fotogrammetrie	6
2.2	Měření výkovků	8
2.3	Vymezení předběžného cíle disertační práce	10
3	SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	12
3.1	Aspekty optického měření těžkých výkovků	12
3.1.1	Vliv tepelného ovlivnění atmosféry	12
3.1.2	Kalibrace kamer s velkým zorným polem	15
3.1.3	Řešení kódovaných kalibračních značek	16
3.2	Měření výkovků pomocí aktivních optických systémů	20
3.2.1	Laserové skenery	20
3.2.2	Aktivní stereovize	22
3.2.3	Liniové skenery	27
3.3	Pasivní optické metody a měření výkovků	30
3.3.1	Pasivní stereovize	30
3.3.2	Snímání siluet	37
4	ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ	48
4.1	Shrnutí a zhodnocení vlastností metod měření výkovků	48
4.1.1	Laserové skenery	48
4.1.2	Aktivní fotogrammetrie	49
4.1.3	Pasivní fotogrammetrie	50
4.2	Oblasti chybějícího poznání	51
4.3	Shrnutí stěžejních poznatků z rešerše	55
5	VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ	57
5.1	Cíl práce	57
5.2	Vědecké otázky a hypotézy	59
5.3	Návrh způsobu řešení	61

5.3.1	Sběr dat	62
5.3.2	Kalibrace kamer	64
5.3.3	Analýza obrazu	65
5.4	Plán publikací	66
6	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	69
6.1	Materiál a metody	69
6.1.1	Průmyslový partner, požadavky na měřicí systém	69
6.1.2	Snímací aparatura	69
6.1.3	Metoda kalibrace kamer	71
6.1.4	Metoda detekce hran a rekonstrukce geometrie výkovku	72
6.2	Dosažené výsledky a vyvozené závěry	73
6.2.1	Kódované kalibrační značky	73
6.2.2	Kalibrace kamer a vliv tepelně ovlivněné atmosféry	74
6.2.3	Detekce hran a rekonstrukce objektu	76
7	ZÁVĚR	78
8	LITERATURA	79
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	85
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	86
11	SEZNAM TABULEK	90
	PŘÍLOHA	91

1 ÚVOD

Těžké výkovky vyráběné volným kovááním jsou výchozími polotovary, které slouží k výrobě hřídel pro lodní, petrochemický a energetický průmysl. Rozměry takových výrobků mohou dosahovat i více než 20 metrů na délku nebo 6 metrů v průměru, kovací teploty se pohybují v rozmezí 850–1250 °C. Proces výroby sestává z více kovacích fází a konečné fáze, během níž je korigována přímota osy polotovaru. Během procesu výroby vnikají odchylky od ideálního tvaru výkovku, které je potřeba měřit, za účelem poskytnutí zpětné vazby operátorovi kovacího lisu o délce, průměru ale i zmíněné přímoti osy výkovků.

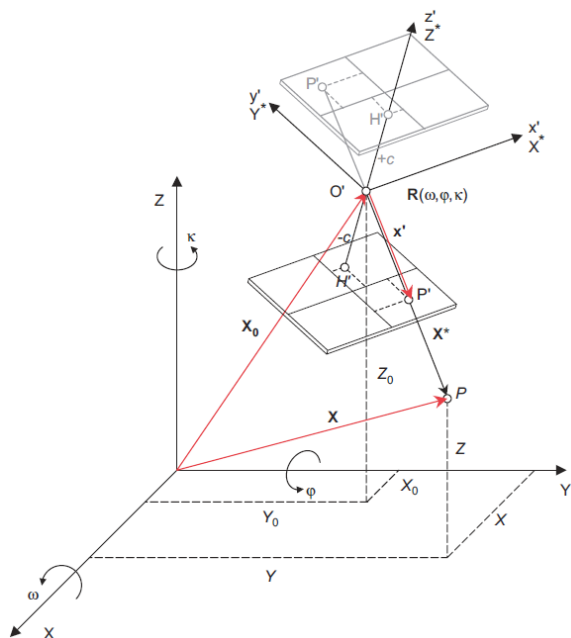
Přestože se jedná o velice nákladnou produkci, stále se běžně používají kontaktní měřidla (posuvná měřidla, kalibry, pravítka), jejichž přesnost je omezená a jsou poskytnuta pouze částečná data o geometrii polotovaru. Přímota osy nelze pomocí kontaktních měřidel určit vůbec – je korigována pouze na základě odhadu operátorů. Dosahovaná rozměrová přesnost polotvarů koreluje s množstvím přídavků na obrábění, které např. dle platné normy „ČSN 42 9011“ tvoří až přes 20 % celkového množství materiálu polotovaru.

Pomocí bezkontaktního (optického) měřicího systému, schopného měřit geometrii výkovku, by mohla být operátorovi dodána potřebná zpětná vazba. Mohlo by být dosaženo vyšší rozměrové přesnosti polotvarů a bylo by možné omezit přídavky na obrábění. Tím by bylo dosaženo úspory materiálu, tepelné energie a také zjednodušení obrábění kovaných polotvarů – vše vede k efektivnější, ekologičtější a levnější výrobě. V budoucnu by se pak v rámci trendu „industry 4.0“ mohl přesný, rychlý a spolehlivý měřicí systém, specializovaný pro tento účel, stát součástí integrovaného celku pro automatické kováání polotvarů.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

2.1 Blízká fotogrammetrie

Blízká fotogrammetrie zahrnuje metody interpretace a měření obrazu za účelem studia tvaru a polohy objektu z jeho fotografií. Výsledkem fotogrammetrického měření objektu je obvykle jeho rekonstrukce v digitální formě (množina bodů v souřadném systému). Aby byla možná rekonstrukce a měření trojrozměrného objektu ze série dvourozměrných fotografií, je třeba popsat proces vznikání každé fotografie z hlediska geometrie drah paprsků světla odrážejících se od objektu a dopadajících na fotografický čip nebo fotografický film. Při tomto popisu se využívá nejčastěji principu modifikované centrální projekce, kde:



obr. 2-1 Geometrický model kamery [1].

- Osa z' je totožná s optickou osou kamery, vzdálenost c je ohnisková vzdálenost.
- $H'[x'_0, y'_0]$ je fyzický střed snímku (bod, kde optická osa protne rovinu snímku).
- O' , nebo také $X_0[X_0, Y_0, Z_0]$ je střed promítání.
- Bod $P[X, Y, Z]$ respektive bod $P'[x', y']$ je bod objektu, respektive bod obrazu, na který je bod P promítnut.
- Rotace ω, φ, κ jsou po řadě rotace okolo os X, Y, Z .

Na základě tohoto modelu lze formulovat tzv. základní rovnice fotogrammetrie [1]:

$$\begin{aligned}
x' - x'_0 - \Delta x' &= -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\
y' - y'_0 - \Delta y' &= -c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}
\end{aligned}
\tag{2.1}$$

Kde $r_{11} \dots r_{33}$ jsou členy matice rotace vytvořené z úhlů ω, φ, κ . Modifikace modelu centrální projekce spočívá v zavedení vlivu zkreslení $\Delta x', \Delta y'$, které vzniká v důsledku nedokonalostí konstrukce soustavy kamery a objektivu. Tyto proměnné zahrnují různé modely, obvykle radiálního zkreslení, v případě přesnějších optických systémů pak i tangenciálního a afinního zkreslení.

Při provádění digitální rekonstrukce objektu je třeba znát parametry tohoto modelu. Proces získávání těchto údajů se nazývá kalibrace kamery (proces lze chápat i jako určení parametrů transformace z prostorových souřadnic do souřadného systému kamery). Kalibraci kamer lze provádět např. pomocí snímání přesného planárního kalibračního pole s pravidelným vzorem [2, 3], přesných kalibračních objektů [4] nebo trojrozměrného kalibračního pole tvořeného kalibračními značkami se známou polohou [5]. Speciálním případem jsou pak metody založené na samokalibraci, které nepotřebují přesnou kalibrační scénu a využívají korespondencí mezi jednotlivými snímky. Řešení těchto rovnic vždy vede na optimalizační problém.

Jak data, na základě nichž je kamera kalibrována (objekty ve snímku o známé geometrii nebo poloze), tak informace o měřených objektech jsou získány ze snímků pomocí metod měření a interpretace obrazu, které pracují převážně s hranami v obraze, a to často se sub-pixelovou přesností. Na základě těchto dat a zmíněné matematické transformace ze světového souřadného systému do souřadného systému čipu kamery je poté možné provést rekonstrukci objektu (princip triangulace).

Blízká fotogrammetrie a její principy se uplatňují v mnoha oborech – ve stavebnictví a architektuře, v inženýrství a průmyslu, v kriminalistice, medicíně, nebo přírodních vědách. V průmyslu má fotogrammetrie široké využití – používá se k inspekci strojních součástí, kontrole ustavení dílů sestav, kalibraci robotů, reverznímu inženýrství strojních součástí nebo designových modelů [6]. Vzhledem k rozvoji výpočetní techniky a digitální fotografie nalézají zmíněné principy stále širší uplatnění v aplikacích, kde to dříve nebylo možné. Tímto směrem je orientována velká část současného výzkumu v této oblasti.

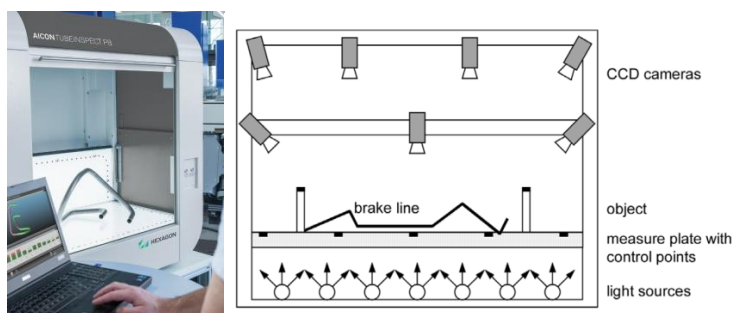
S tímto trendem pokračuje i rozvoj metod počítačového vidění, kde dochází k velkému rozvoji aplikací a metod např. umělé inteligence [7, 8]. Díky těmto metodám mohou počítače pochopit a interpretovat obraz i z komplexních scén reálného světa a to při zachování velmi krátkých výpočetních časů.

2.2 Měření výkovků

Během volného kování těžkých výkovků vzniká potřeba měřit jejich odchylky od ideálního tvaru. V současné době se pro tento účel stále používají primitivní kontaktní metody měření nebo odhad operátora [9, 10]. Ve spolupráci s průmyslovým partnerem byly formulovány základní požadavky na vlastnosti měřicího systému, aby ho bylo možné využít v praxi. Průmyslovým partnerem v tomto případě byl ŽĐAS a.s. – společnost se věnuje jak výrobě těžkých výkovků, tak prodeji integrovaných kovacíh linek.

- Až 4 m dlouhé výkovky rotačně symetrického tvaru (možnost budoucího využití principu měřicího systému na výkovky až na 12 m dlouhé)
- Měření přímo v blízkosti lisu, kde je polotovar držen manipulátorem
- Minimální přesnost polohování manipulátoru ± 5 mm a $\pm 0,5^\circ$
- Povrchová teplota výkovku během měření 800 – 1250 °C
- Požadované výstupy měření a požadovaná přesnost:
 - Délka – chyba do 50 mm
 - Průměr – chyba do 3 mm
 - Geometrie osy výkovku – maximální chyba ± 1 mm/1 m délky výkovku

Za standardních podmínek by tedy šlo o komplexní měření tvaru delšího objektu s rotačně symetrickým průměrem. Pro takové účely existuje na trhu řada kontaktních (souřadnicové měřicí přístroje) i bezkontaktních měřicích systémů, od aktivních 3D skenerů po pasivní - např. AICON TubeInspect, který je přímo specializován pro kontrolu tvaru takových objektů (komplexní ohýbané trubky). Tento přístroj funguje na principu snímání siluet na bílém podsvíceném pozadí více kalibrovanými kamerami (až 16, **obr. 2-2**) [1].

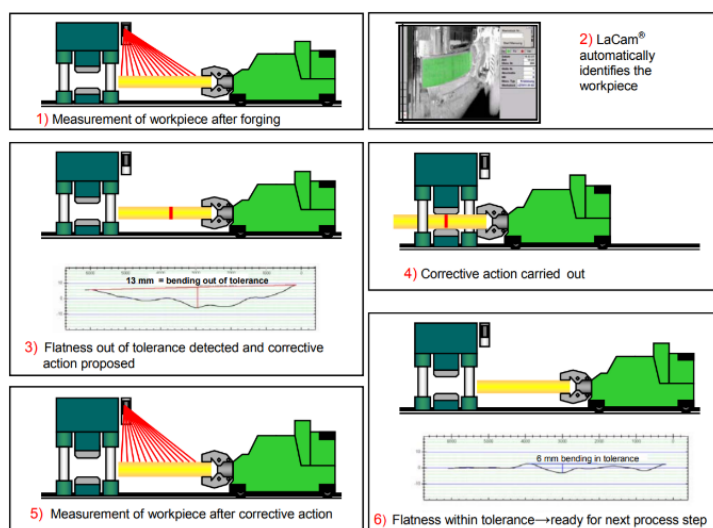


obr. 2-2 Vlevo – přístroj AICON TubeInspect [11], vpravo – schéma funkce tohoto přístroje – CCD kamery snímají ohýbaný objekt proti podsvícené podložce s kontrolními body pro kalibraci kamer [1].

Implementace těchto měřicích systémů pro účely měření výkovků nicméně není možná. Žhavý výkovek během měření vyzařuje viditelné světlo, na povrchu výkovku se vyskytují kontrastní okraje, velikost polotovarů je příliš velká vzhledem k měřicím objemům dostupných přístrojů, do prostředí kování nelze dokonce ani standardní měřicí přístroje umístit kvůli vysokým teplotám a prachu, stejně jako je nemožné využít kontrastního

pozadí. Měření je navíc negativně ovlivňováno horkou atmosférou s rozdílným indexem lomu obklopující výkovek [12].

Na světě existuje pouze několik komerčních měřicích systémů pro měření geometrie výkovků. Příkladem může být LaCam Forge. Tento systém může sloužit například ke korekci přímosti osy výkovku přímo v procesu výroby (obr. 2-3) a využívá laserovou skenovací jednotku, která pracuje na principu měření času letu rozmítaného světelného paprsku (skenování probíhá po jednotlivých bodech). LaCam Forge dokáže měřit délku, šířku a výšku všech polotovarů a průměr, přímost osy a souosost částí rotačně symetrických kovaných polotovarů o délce až 28 m [13]. Každý sken laserovým skenerem trvá maximálně 15 s. Pro kompletní měření geometrie je třeba provést více skenů výkovku z různých úhlů (1 – 4), aby byl zachycen celý povrch. Celková doba skenování a vyhodnocení se pohybuje okolo 2-3 minut. Směrodatná odchylka měření přímosti osy a souososti je 5 mm (1σ), směrodatná odchylka měření délky, průměru nebo výšky polotovarů je více než 10 mm.



obr. 2-3 Schéma použití systému LaCam® Forge od společnosti Ferrotron – krok 1) znázorňuje snímání výkovku, krok 2) automatickou identifikaci výkovku, krok 3) vyhodnocení dat z měření (přímost jeho osy), krok 4) vyrovnání výchyvky osy tříbodovým lisem [14].

Během procesu skenování nutné zamezit jakémukoli pohybu výkovku. Laserový skener, schopný měřit v dostatečném měřicím objemu s dostatečnou přesností je navíc velmi drahý. Zmíněné nevýhody motivují výzkum v této oblasti, za účelem umožnění aplikace měřicích systémů založených na digitálních kamerách a metodách blízké fotogrammetrie. Tyto systémy mají potenciál nabídnout vyšší rychlost měření a nižší cenu komponent při zachování dalších vlastností systému, případně dokonce zlepšení přesnosti.

Většina výzkumných prací se zaměřuje na vývoj metod měření, které jsou založeny na principu aktivní blízké fotogrammetrie (liniové skenery např. [15–17], aktivní stereovize např. [18–24]). Tyto přístupy lze charakterizovat jako úpravu standardního řešení měřicího systému za účelem dosažení invariance ke specifickým podmínkám této aplikace. Nevýhodou tohoto přístupu je nutný silný zdroj světla. Tento zdroj může být drahý nebo

může mít negativní vliv na bezpečnost v pracovním prostoru a síla zdroje také limituje měřicí objem.

Zmíněné nevýhody překonává koncept měřicího systému, který je založen na pasivní fotogrammetrii. V tomto případě je naopak systém adaptován na využití světla, které vyzařuje přímo výkovek. Metoda měření výkovku pomocí stereopáru kamer, na základě snímání jeho siluet, prokázala velký potenciál v rychlosti měření, dostatečné přesnosti a nízké ceně komponent [25–27]. Nevýhodou je obtížné zpracování obrazu (v důsledku přítomnosti kontrastních okují). Důsledkem je pouze dostatečná přesnost nebo opakovatelnost měření a problematická spolehlivost systému. Systém navíc pracoval s běžnými digitálními zrcadlovými fotoaparáty a používal pouze základní metody kalibrace kamer, zpracování obrazu nebo rekonstrukce objektu. Vlastnosti takového měřicího systému byly navíc verifikovány pouze v laboratorních podmínkách při měření jednoduchých malých válcových polotovarů a využití kontrastního pozadí.

K metodám pasivní fotogrammetrie patří i pasivní stereovize, která využívá stereopár kamer a přirozenou texturu na povrchu zkoumaného objektu (např. [28]). Z literatury vyplývá, že tato metoda byla pro měření výkovků prozatím využita pouze s využitím osvitů a spektrálně-selektivní metody, která měla za účel odfiltrovat světlo, které vyzařuje samotný výkovek [29, 30].

2.3 Vymezení předběžného cíle disertační práce

Výzkum, kterým se zabývá tato práce, je orientován na rozšíření aplikace metod fotogrammetrie do nové oblasti, a to na měření výkovků vzniklých volným kovááním, v procesu výroby. Nároky na vlastnosti měřicího systému byly formulovány ve spolupráci s průmyslovým partnerem, který má zkušenosti jak s výrobou a obráběním kovaných polotovarů, tak výrobou a dodáváním samotných kovacíh linek. Jedná se tedy o skutečně relevantní potřeby a podmínky napříč tímto průmyslovým odvětvím. Pro zmíněnou aplikaci dokonce existuje komerční měřicí systém, který ale disponuje mnoha nevýhodami, jako je dlouhá doba samotného skenování, nemožnost přesného měření některých geometrických charakteristik a vysoká cena komponent systému.

Z přehledu metod vyplývá řada výhod pasivní fotogrammetrie, zejména přístupu měření na základě siluet objektu (podobně jako např. AICON TubeInspect). Je nicméně zřejmé, že vzhledem k rušivým vlivům prostředí, bude tyto metody obtížnější aplikovat, ve srovnání s laserovými skenery nebo metodami aktivní fotogrammetrie. Na základě dostupných publikací nicméně není jasné, jestli bude vůbec možné splnit požadavky průmyslového prostředí. Zatím žádný pasivní systém nebyl reálně ověřen v průmyslových podmínkách, kde má na vlastnosti systému vliv řada fenoménů ovlivňujících přesnost i spolehlivost.

Předběžným cílem disertační práce je tedy objasnit, zda je možné dosáhnout požadovaných vlastností měření výkovků pomocí metod pasivní fotogrammetrie nebo robustních metod počítačového vidění, případně prozkoumat možnosti měření dalších geometrických charakteristik polotovarů. Práce se tedy bude zabývat problematikou, jak známé metody aplikovat na tuto specifickou úlohu, interpretací a řešením vlivu jednotlivých fenoménů a hlavně odpovědí na otázku, zda je možné dosáhnout požadovaných vlastností systému, případně dosažené vlastnosti porovnat s jinými metodami měření, například laserovým skenerem.

3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Aspekty optického měření těžkých výkuvků

3.1.1 Vliv tepelného ovlivnění atmosféry

[31] P. E. Ciddor, “Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared,” *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 9, pp. 1566–1573, 1996.

Autor [31] ve studii poukazuje na limity přesnosti geodetického měření, vznikající v důsledku zanedbání proměnlivého indexu lomu atmosféry. Tento index je proměnný a závisí na aktuálních atmosférických podmínkách. Ve studii je předpokládáno, že index lomu atmosféry závisí na aktuální teplotě, tlaku, vlhkosti a obsahu oxidu uhličitého.

Výsledky

Autor verifikoval platnost odvozené rovnice porovnáním svých výsledků s experimentálně naměřenými daty v reálných atmosférických podmínkách. Výsledky vykazovaly velmi dobrou shodu (řádově 10^{-8}) při široké škále atmosférických podmínek (teplota $-40 - +100$ °C, tlak 80 – 120 kPa, vlhkost 0 – 100 %, platné pro vlnové délky 300 – 1690 nm).

Závěr

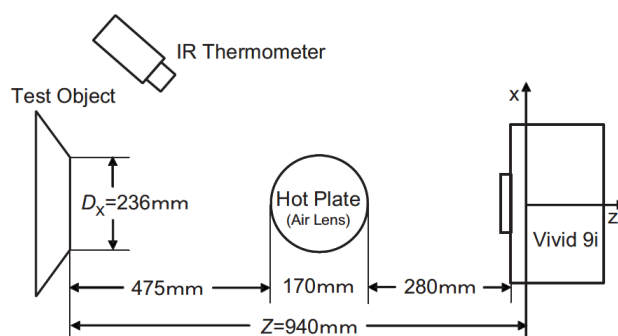
Autor poukazuje na obtížnost měření zejména průměrné teploty a tlaku, na nichž index lomu závisí výrazněji – přesnost tohoto měření se tedy stává praktickým limitem přesnosti odvozených rovnic.

[32] M. Yamauchi, “Errors in optical shape measurement caused by a high-temperature atmosphere,” *Opt. Eng.*, vol. 48, no. 9, p. 4, 2009.

Proudy horkého vzduchu v chladnější atmosféře mohou působit jako čočky a zakřivovat světelné paprsky. Autor studie zkoumal vliv tohoto jevu na přesnost měření optického měřicího systému [32]. Zároveň byl vytvořen analytický model, který predikuje chyby měření způsobené tímto jevem. Autor předpokládal sférickou čočku, jejíž ohnisko c lze vypočítat dle následujícího vztahu:

$$c = \frac{rn_1n_0}{2(n_1 - n_0)(2n_1 - n_0)} \quad (3.1)$$

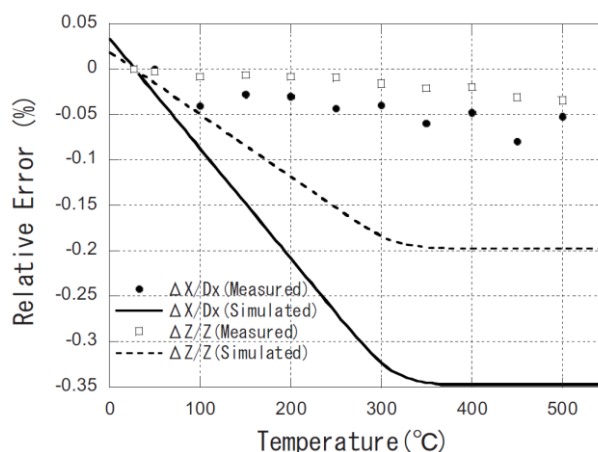
Kde n_1 respektive n_0 je index lomu vzduchu tvořícího cylindrickou čočku, respektive okolí a r je poloměr cylindrické čočky. Výsledky experimentů byly s tímto modelem porovnány. Pro praktické ověření tohoto modelu byla vytvořena experimentální aparatura, viz obr. 3-1.



obr. 3-1 Zleva: měřený objekt, IR teploměr pro kontrolu teploty vyhřívané plotny, vyhřívaná plotna, nad kterou se formuje vzdušná cylindrická čočka, laserový dálkoměr Vivid 9i (Konica-Minolta) s nejistotou měření 0,1 mm [32].

Výsledky

Měření bylo prováděno v rozsahu teplot vyhřívané plotny 27-550 °C v intervalech po 50 °C. Při každé teplotě bylo realizováno 10 měření. obr. 3-2 porovnává teoretickou predikci příčného zvětšení i přiblížení měřeného objektu (maximální predikované relativní příčné zvětšení je 0,35 %, přiblížení 0,2 %) a skutečně změřenou odchylku od referenčního rozměru (maximální skutečně naměřené relativní příčné zvětšení je 0,08 %, přiblížení 0,04 %).



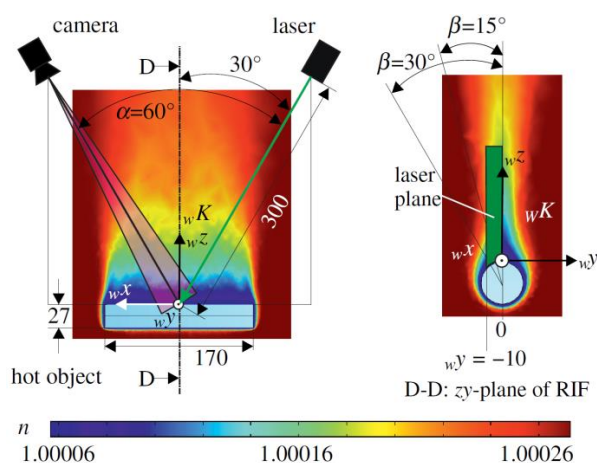
obr. 3-2 Výsledky měření chyby vzniklé v důsledku optických deformací prostředí – plné tečky – naměřené relativní příčné zvětšení, prázdné čtverce – relativní naměřené přiblížení, čárkovaná čára – predikované relativní přiblížení, kontinuální čára – predikované příčné zvětšení; na svislé ose je zaznamenána relativní chyba, na vodorovné teplota vyhřívané plotny [32].

Závěr

Teoretický model optických deformací rozměrů se výrazně odlišoval od skutečně naměřených hodnot. Jako možné vysvětlení bylo prezentováno, že vzduch tvořící cylindrickou čočku měl menší teplotu než vyhřívaná platforma. Autor doporučuje používat analytický model pro odhad maximálních chyb vzniklých tímto jevem v praxi.

-
- [12] R. Beermann, L. Quentin, G. Stein, E. Reithmeier, and M. Kästner, “Full simulation model for laser triangulation measurement in an inhomogeneous refractive index field,” *Opt. Eng.*, vol. 57, no. 11, p. 1, 2018.
-

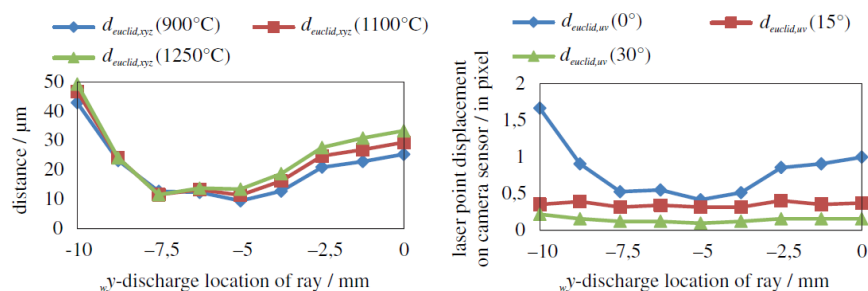
Autoři [12] se zabývali simulací nepřesnosti měření horkého objektu liniovým skenerem (zelený laser, 532 nm), které vzniká v důsledku nehomogenní (horké) atmosféry okolo objektu. Simulace byla zaměřena na měření výkovků o malých rozměrech a teplotě 900 – 1250 ° C z různých pozic (schéma virtuální aparatury, scény a poloh, ze kterých je objekt měřen, lze vidět na obr. 3-3). Simulace probíhala v prostředí COMSOL a zahrnovala jak model horké atmosféry okolo výkovku, tak model sledování paprsků (ray tracing) v nehomogenním prostředí. Výstupem simulace horké atmosféry bylo zejména rozložení hustoty vzduchu (turbulentní proudění nebylo uvažováno). Na základě simulované hustoty atmosféry a extrapolované Ciddorovy rovnice [31] (předpoklad pro extrapolaci - index lomu vakua = 1, byl předpokládán dominantní vliv hustoty atmosféry oproti vlivu vlhkosti nebo obsahu CO₂) byl vytvořen model prostředí pro sledování paprsků. Sledována byla vzniklá chyba měření v důsledku ovlivnění měření horkou atmosférou (rozdíl měření v homogenní a heterogenní atmosféře).



obr. 3-3 Schéma měřicí aparatury (kamera a laser), úhly β vyjadřují jednotlivé polohy měřicí aparatury vůči objektu, ve kterých byla provedena simulace (celkem 3 – 0 °, 15 ° a 30 °), legenda (n – lokální index lomu atmosféry) [12].

Výsledky

Výsledky simulace pro různé teploty výkovku a pozice měřicí aparatury jsou zachyceny na obr. 3-4. Autoři poukazují na protichůdný efekt ovlivnění měření horkou atmosférou při ovlivnění trasy světelného paprsku mezi laserem a výkovkem a kamerou a výkovkem.



obr. 3-4 Výsledky simulace chyby měření (rozdíl mezi bodem měřeným bez a s nehomogenním indexem lomu prostředí) podél osy w_y (viz obr. 3-3) – vlevo průběh chyby v souřadném systému, který je spojen s objektem, pro různé teploty výkovku, vpravo průběh chyby, sledovaný na senzoru kamery v pixelech (koreluje s chybou měřenou v prostoru), pro různé pozice β (opět viz obr. 3-3) [12].

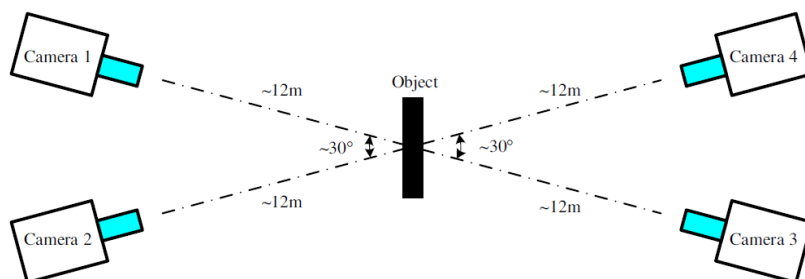
Závěr

Simulace předpokládá chybu triangulace až 50 μm , což je vzhledem k dosahovaným přesnostem měřicích systémů nezanedbatelné. Pro různé teploty výkovků od 900 do 1250 °C byly zaznamenány podobné výsledky (obr. 3-4). Signifikantně nižší ovlivnění měření horkou atmosférou bylo zaznamenáno při měření ze strany (obr. 3-3 $\beta = 30^\circ$). Autoři navrhují vyhnout se měření výkovků skrz horkou atmosféru, formující se nad ním. Vzhledem k zanedbání turbulentního proudění a předpokládané dynamice atmosféry autoři doporučují provádět sekvenci měření a tu průměrovat.

3.1.2 Kalibrace kamer s velkým zorným polem

[33] H. Hu, J. Liang, Z. Xiao, Z. Tang, A. Asundi, and Y. Wang, “A four-camera videogrammetric system for 3-D motion measurement of deformable object,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 50, no. 5, pp. 800–811, 2012.

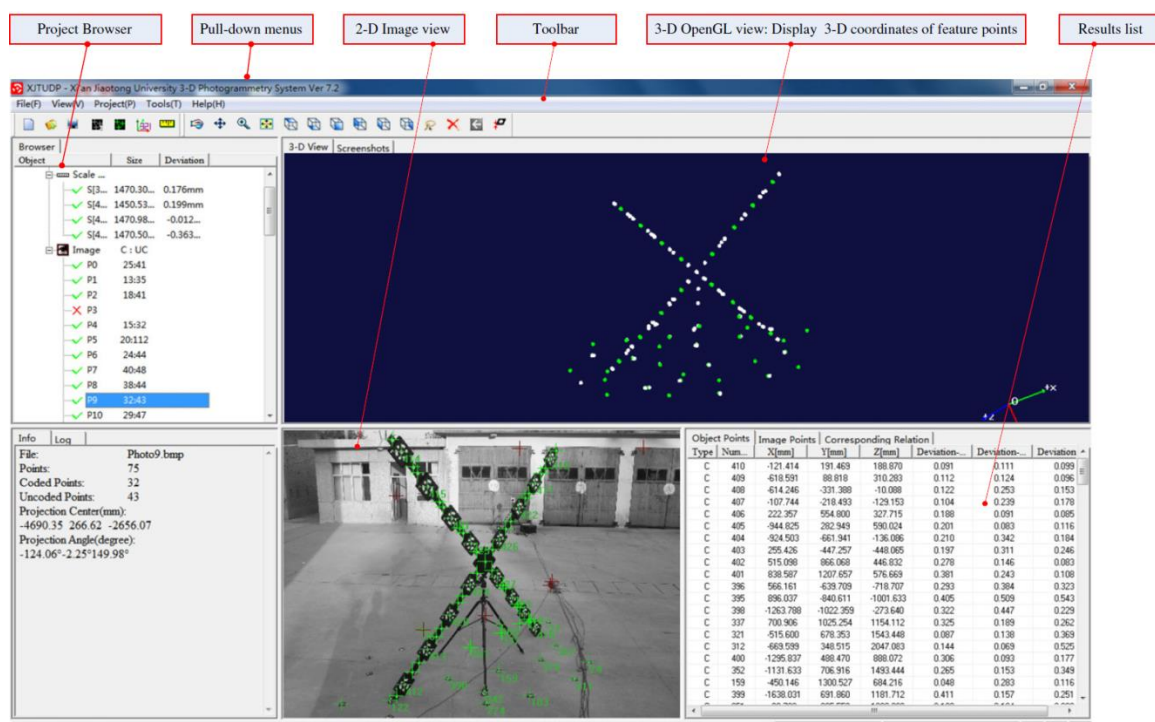
Autoři [33] se zabývali možnostmi přesné kalibrace videogrammetrického systému pro snímání pohybu deformovatelných objektů. Systém pracoval se 4 vysokorychlostními kamerami s rozlišením 1024×1024 px a velikostí pixelu 20×20 μm , jejichž orientace je patrná z obr. 3-5. Rozměr snímané oblasti byl přibližně 5×5 m.



obr. 3-5 Uspořádání kamer videogrammetrického systému [33].

Autoři pro kalibraci kamer tohoto systému využili metodu prostorové resekce. Byl využit model kamery vycházející z rov. 2.1, bylo uvažováno radiální (3 koeficienty), tangenciální

i afinní zkreslení. Kalibrace proběhla na základě několika snímků kalibračního objektu. Kalibračním objektem byl ocelový kříž osazený kruhovými kódovanými kalibračními značkami se známými souřadnicemi v prostoru. Přesné souřadnice kalibračních značek v prostoru byly změřeny fotogrammetrickým systémem XJTUDP (obr. 3-6).



obr. 3-6 Pracovní plocha měřicího fotogrammetrického systému XJTUDP, na obrázcích lze vidět kalibrační objekt [33].

Výsledky

Kamery byly kalibrovány s chybou reprojekce do 0,05 px. Ověření přesnosti kalibrace proběhlo pomocí triangulace bodů na certifikované měřítkové tyči, jejichž vzdálenost byla přesně známa. Měřicí systém dosahoval v měřicí ploše 5×5 m chyby měření 0,24 mm.

Závěr

Prostorová resekce, využívající pole kódovaných kalibračních značek, jejichž poloha v prostoru je změřena fotogrammetrickým systémem, je pro kalibraci systémů s velkým zorným polem vhodná. Dosahovaná přesnost kalibrace kamer je vzhledem k velikosti scény velmi vysoká.

3.1.3 Řešení kódovaných kalibračních značek

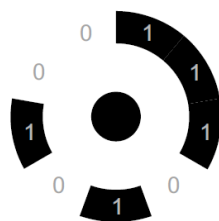
[4] A. V. K. Forbes and N. Bodika, "An inexpensive, automatic and accurate camera calibration method," in *Thirteenth Annual Symposium of the Pattern Recognition Association of South Africa*, vol. 1, pp. 1–6.

[34] Z. LI, "Research on Decoding Method of Coded Targets in Close-range

Photogrammetry,” *J. Comput. Inf. Syst.*, vol. 6, no. 8, pp. 2699–2705, 2010.

- [35] R. Xia *et al.*, “A Robust Recognition Algorithm for Encoded Targets in Close-range Photogrammetry,” *J. Inf. Sci. Eng.*, vol. 28, pp. 407–418, 2012.
- [36] C. Guo, X. Cheng, H. Cui, N. Dai, and J. Weng, “A New Technique of Recognition for Coded Targets in Optical 3D-Measurement,” in *Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications III*, 2014.
- [37] W. M. Li, G. Liu, L. C. Zhu, X. F. Li, Y. H. Zhang, and S. Y. Shan, “Efficient detection and recognition algorithm of reference points in photogrammetry,” in *Conference on Optics, Photonics and Digital Technologies for Imaging Applications IV*, 2016, vol. 9896.
-

Autoři [4, 34–37] vyvíjejí metodu detekce, rozpoznání a výpočtu souřadnic středů kruhových kódovaných kalibračních značek v obraze pro přesné fotogrammetrické měření. Pro tento účel se jedná o nejběžnější design, kvůli své jednoduchosti a přesnosti určení středu. Geometrie kalibračních značek (zachycená na obr. 3-7) i metody jejich detekce a rozpoznání jsou u všech autorů podobné. Autoři využívali 9-16bit značky. Obraz byl nejdříve zpracován prahováním nebo hranovým operátorem (např. [38]). Následně byly segmentovány elipsy (středů kal. značek) na základě zadaných kritérií (velikost, kontrast apod.). Kód značky je na základě znalosti geometrie značky naskenován a je rozdělen na jednotlivé bitové segmenty. Na základě jasů v jednotlivých segmentech je určen bitový kód značky – je aplikováno prahování (Otsuho metoda nebo je jako práh použit průměr průměrné hodnoty černých částí značky a průměrné hodnoty bílých částí značky). Alternativně je bitový kód určen z údajů o bitových přechodech, které se v obraze chovají jako výrazné gradienty. Kód je cyklický (není jasné, kde je počátek; např. cyklický kód 1100 má 4 rozdílné formy – 1100, 0110, 0011, 1001). Výsledný kód značky je určen na základě převodu jednotlivých rotací kódu z binární soustavy do desítkové – nejnižší hodnota kódu v desítkové soustavě je poté přiřazena značce jako identifikační číslo. Není implementována žádná metoda korekce chyb. Závěrečným krokem je přesný výpočet souřadnic středů kalibračních značek pomocí např. metody těžiště. Výstupem z celé operace jsou souřadnice středů kalibračních značek a identifikační číslo značky.



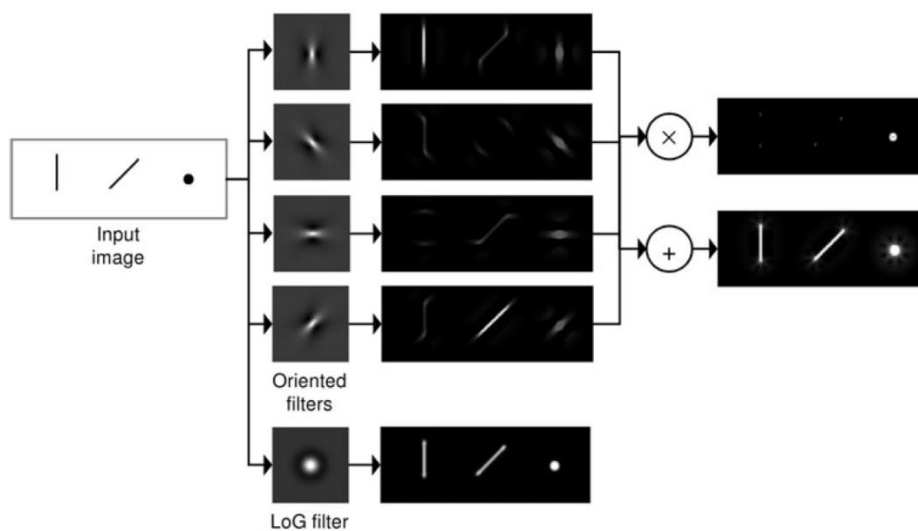
obr. 3-7 Kruhová kódovaná kalibrační značka – ve středu – kontrastní kruh pro segmentaci a lokalizaci značky; prstenec – unikátní kód značky [4].

Výsledky, závěr

Popsaná metoda byla na základě testů detekce a rozpoznání značek v běžných podmínkách hodnocena jako rychlá a spolehlivá.

[39] R. Dosił, X. M. Pardo, X. R. Fdez-Vidal, A. García-Díaz, and V. Leborán, “A new radial symmetry measure applied to photogrammetry,” *Pattern Anal. Appl.*, vol. 16, no. 4, pp. 637–646, 2013.

V článku [39] je prezentována alternativní metoda detekce i rozpoznání kruhových kódovaných kalibračních značek. Detekce středů kalibračních značek probíhala ve frekvenční doméně pomocí několika různě orientovaných Gaborových filtrů. Kruhové a přibližně kruhové objekty by na různě orientované Gaborovy filtry měly vykazovat podobnou nenulovou odezvu, zatímco jiné objekty nikoli. Vynásobením výsledků různě orientovaných filtrů dojde k potlačení nekruhových objektů (obr. 3-8). Obraz byl různě škálován, aby byly zachyceny různě velké kruhové objekty (potenciální středy kalibračních značek).



obr. 3-8 Odezva různě orientovaných Gaborových filtrů a „Laplacian of Gaussian“ filtru na vstupní obrázek; součet a násobek výsledných obrazů [39].

Kód značek byl získán stejnými metodami, jako byly popsány výše – naskenováním celého prstence, který obsahuje kód, a jeho úpravou prahováním a převodem na binární kód. Všechny rotace tohoto cyklického kódu byly porovnány s knihovnou kódů kalibračních značek. Jestliže dojde k přesné shodě, je značka identifikována. Posledním krokem je validace – skutečný naskenovaný prahovaný kód je porovnán se syntetickou podobou tohoto kódu. Na základě korelace mezi těmito obrazy je rozhodnuto, zda se skutečně jedná o kalibrační značku, či nikoli.

Výsledky, závěr

Popsaná metoda byla testována a na různých datasetech dosahovala srovnatelných nebo lepších výsledků než systém kalibračních značek, který používá software AICON.

[40] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas, and M. J. Marin-Jimenez, “Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers

under occlusion,” *Pattern Recognit.*, vol. 47, no. 6, pp. 2280–2292, 2014.

- [41] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas, and R. Medina-Carnicer, “Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming,” *Pattern Recognit.*, vol. 51, pp. 481–491, 2016.
- [42] V. Mondéjar-Guerra, S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, M. Marín-Jiménez, and R. Medina-Carnicer, “Robust identification of fiducial markers in challenging conditions,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 93, pp. 336–345, 2018.
- [43] F. Romero-Ramirez, R. Muñoz-Salinas, and R. Medina-Carnicer, “Speeded up detection of squared fiducial markers,” *Image Vis. Comput.*, vol. 76, pp. 38–47, 2018.
-

Autoři [40] se zabývali vytvořením knihovny čtvercových kódovaných kalibračních značek (obr. 3-9) pro účely kalibrace kamer např. v oblasti rozšířené reality nebo navádění robotů a robustní metody jejich lokalizace a rozpoznání v obraze. Tento design kalibračních značek se používá pro tyto účely, protože 1 dostatečně velká kalibrační značka kóduje celkem 4 body v prostoru zároveň (rohy značky) a spolehlivé kalibrace je tak dosaženo i pokud je v obraze méně značek. Systém je založen na generátoru knihoven kódů kalibračních značek s maximální rotačně-invariantní Hammingovou vzdáleností mezi kódy – je vygenerováno pouze tolik kódů, kolik daná aplikace potřebuje a tím je dosažena vysoká Hammingova vzdálenost mezi nimi. Zároveň je maximalizován počet přechodů bitů, aby nedocházelo k záměnám kalibračních značek s náhodnými objekty v prostředí.



obr. 3-9 Kódované kalibrační značky ArUco (5, 6, a 8 bitů) [40].

Skenování kódu v obraze probíhá pomocí odstranění zkraslení a aplikací Otsuho prahovací metody. Kód značky je vyčten z binárních hodnot v jednotlivých regionech. Algoritmus pro rozpoznávání těchto značek funguje na principu hledání kódu značky v použité knihovně kalibračních značek, která se rozpoznávané značce nejvíce podobá – má od rozpoznávané značky minimální rotačně-invariantní Hammingovou vzdálenost. Takto je využita vysoká Hammingova vzdálenost značek ve vygenerované knihovně kalibračních značek a je dosaženo korekce chyb. Korekce chyb je možná až do $(\tau-1)/2$ chyb, kde τ je minimální rotačně-invariantní Hammingova vzdálenost mezi kódy kalibračních značek v používané knihovně.

Další vylepšení tohoto systému kalibračních značek zahrnovalo implementaci optimalizační metody pro výběr knihoven kalibračních značek s optimální vzdáleností mezi jednotlivými značkami [41]. Dále byl vytvořen i alternativní algoritmus pro robustní rozpoznání kalibračních značek, založený na neuronových sítích [42]. Pro tyto účely byly využity knihovna 50×6 bitových značek, vytvořená popsáním generátorem knihoven. Trénování neuronových sítí probíhalo na velkém syntetickém datasetu (celkem 12500

syntetických obrázků kalibračních značek, zahrnujících různou míru negativních světelných, geometrických i obrazových jevů, 210 000 obrázků pro negativní třídu). Poslední alternativní algoritmus zahrnoval zrychlení rozpoznávání těchto značek, aby bylo možné tento systém využít pro aplikace probíhající v reálném čase, vyžadující vysokou rychlost kalibrace [43].

Výsledky, závěr

Navržený systém čtvercových kódovaných kalibračních značek a jeho postupná vylepšení nebo alternativy byly implementovány v rámci knihovny ArUco pro C++. Autoři tento systém porovnali s existujícími systémy využívající podobnou geometrii značek – ARTag a ARToolKitPlus. Bylo prokázáno, že značky ArUco dosahují nejvyšší Hammingovy vzdálenosti mezi kódy a umožňují tím nejlepší korekci chyb a tím největší robustnost identifikace značek. Ve srovnání s ostatními porovnávanými systémy také metoda rozpoznávání nejlépe odolává Gaussovu šumu.

Optimalizací Hammingovy vzdálenosti v rámci knihoven kalibračních značek bylo dosaženo jejího nevýrazného navýšení, za cenu vysokého výpočetního času, v řádu dní. Autoři proto navrhují využívat pouze suboptimální řešení, které se od optimálního příliš neliší a je dosaženo výrazně kratších výpočetních časů.

Využitím neuronových sítí bylo dosaženo výrazného zlepšení robustnosti rozeznávání značek oproti předchozím řešením. To bylo nicméně vykoupeno dlouhým trénováním těchto sítí na velkém datasetu, které je nutné podstoupit při každé změně velikosti knihovny.

3.2 Měření výkovek pomocí aktivních optických systémů

3.2.1 Laserové skenery

Následující články se zabývají různými formami měření výkovek pomocí laserových skenerů nebo dálkoměrů, které fungují na principu měření času letu světelného paprsku (TOF).

[44] Z. S. Tian, F. Gao, Z. L. Jin, and X. C. Zhao, “Dimension measurement of hot large forgings with a novel time-of-flight system,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 44, no. 1–2, pp. 125–132, 2009.

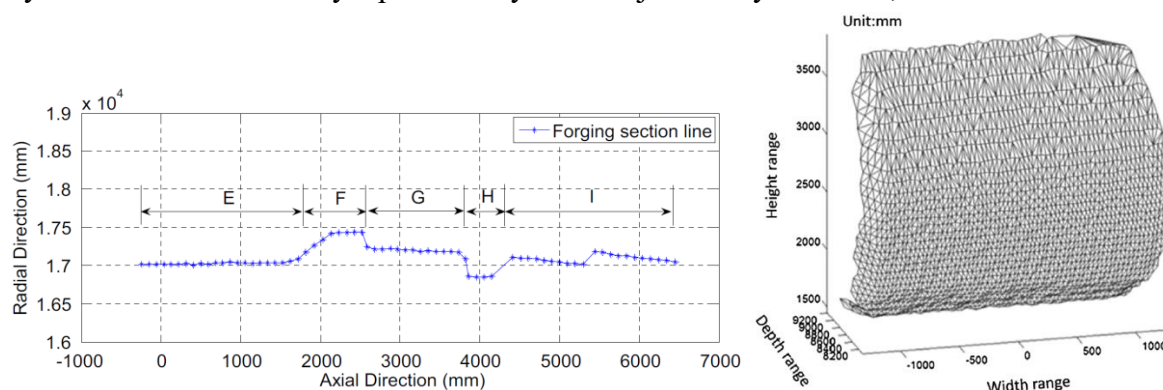
[45] Z. C. Du, Z. Y. Wu, and J. G. Yang, “3D measuring and segmentation method for hot heavy forging,” *Measurement*, vol. 85, pp. 43–53, 2016.

Autoři [44, 45] se ve studiích zabývali otázkou, zda lze využít laserový skener (princip měření vzdálenosti na základě času letu světelného paprsku) pro kontrolu rozměrové

přesnosti horkých výkovků o uvažovaných rozměrech až 20 m na délku a 6 m v průměru. Oba autoři měřili primárně délku a průměr výkovků. Du [45] použil liniový laserový skener LMS100 2D (SICK), který byl natáčen servomotorem. Tian [44] použil nespécifikovaný bodový laserový skener, který byl natáčen okolo 2 os servomotory (oba skenery fungují na principu rozmítaného laserového paprsku). Skenery použité oběma autory pracují v infračerveném spektru. Autoři zároveň navrhuji software pro zpracování výsledků měření (segmentace a určení základních rozměrů výkovku).

Výsledky

Autoři provedli test přesnosti laserového skenování pouze v laboratoři na studeném objektu o rozměrech ve stovkách mm, kde měřicí systém dosahoval chyby měření v případě obou autorů pod 2 %. Měřena byla délka a průměr objektu. Měřicí systém byl testován i v průmyslových podmínkách na horkých výkovcích (1000 °C) o délce až 7000 mm (Tian) a 3000 mm (Du). Výsledná přesnost systému v těchto podmínkách ale nebyla určena, kvůli absenci referenčních rozměrů. Měření výkovku trvalo pouze několik sekund (Tian) a až 15 s v případě autora Du. Výsledkem měření autora Du je celá geometrie výkovku, ze které jsou získávány požadované průměry a délky, zatímco Tian formuluje výsledek ve formátu délky a průměrů výkovku v jednotlivých řezech, viz obr. 3-10.



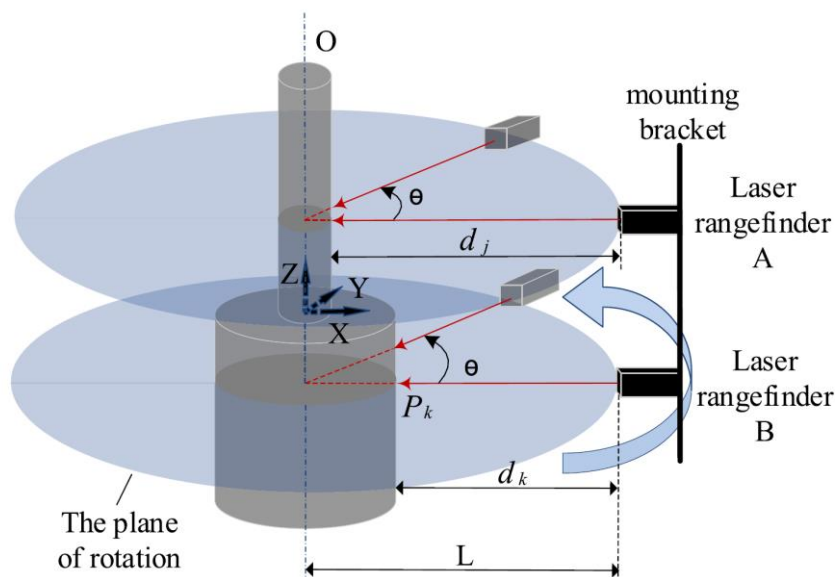
obr. 3-10 Vlevo – výsledek měření, které provedl Tian [44], vpravo – výsledek měření, které provedl Du [45].

Závěr

Průmyslové prostředí nebo vysoká teplota výkovku nemají na výsledek měření laserovým skenerem evidentní vliv – výsledky lze formulovat a lze podle nich poskytnout zpětnou vazbu operátorovi při kovací operaci. Vliv horké atmosféry okolo objektu na výsledek nebyl zkoumán, přesnost systému byla testována pouze v laboratorním prostředí, kde dosahovala přibližně 2 %.

[46] Y. Zhang *et al.*, “A concentricity measurement method for large forgings based on laser ranging principle,” *Measurement*, vol. 147, p. 106838, 2019.

Autoři [46] se zabývali měřením souososti částí těžkého válcového výkovku s různými průměry, nebo souososti válcového výkovku a válcového nástroje na vytváření děr do tohoto polotovaru, přímo v procesu výroby. Pro měření byly použity 2 laserové dálkoměry Hireed Hi50 (princip TOF, rozlišení 1 mm), v konfiguraci dle **obr. 3-11**. V článku je popsána metoda získání, zpracování a analýzy dat, za účelem určení souososti válcových částí.



obr. 3-11 Měření souososti válcových částí výkovku s různými poloměry; měření je provedeno 2 laserovými dálkoměry („A“ a „B“), které se v rámci měření otáčejí přibližně okolo osy výkovku v naznačených rovinách [46].

Výsledky závěr

Navržená metoda byla testována v případě měření souososti válcového výkovku a nástroje pro vytváření děr do něj. Průměr výkovku byl 900 mm, průměr nástroje pak 200 mm. Teplota výkovku nebyla uvedena. Výkovek byl umístěn na přesné polohovatelné platformě, díky níž bylo možné přesně nastavit hodnotu souososti, která vystupovala jako referenční hodnota. Výsledná nepřesnost měření se pohybovala do 0,5 mm, což bylo vyhodnoceno jako dostatečné. Autoři se v publikaci nezabývali žádnými negativními jevy, které by vznikaly v důsledku měření horkého polotovaru, pouze upozorňovali na nekvalitní povrch výkovku, který způsoboval vyšší fluktuace měření.

3.2.2 Aktivní stereovize

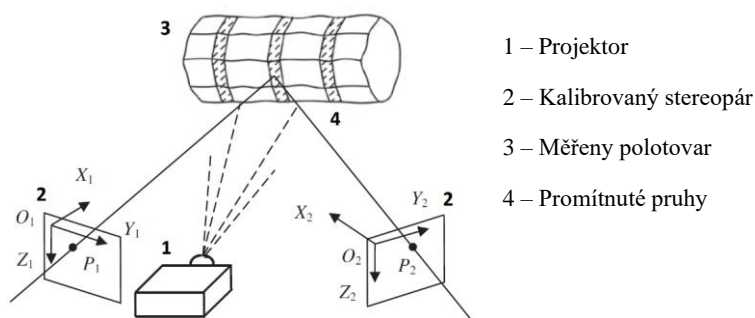
[18] W. Liu, X. H. Jia, Z. Y. Jia, S. J. Liu, B. G. Wang, and J. A. Du, “Fast dimensional measurement method and experiment of the forgings under high temperature,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 2, pp. 237–244, 2011.

[19] W. Liu *et al.*, “An improved online dimensional measurement method of large hot

cylindrical forging,” *Measurement*, vol. 45, no. 8, pp. 2041–2051, 2012.

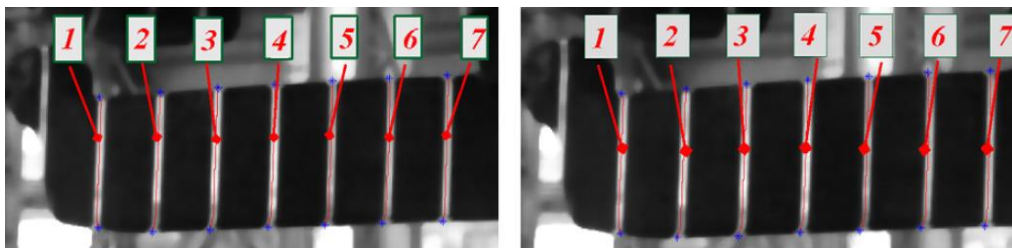
- [20] Z. Y. Jia *et al.*, “A field measurement method for large objects based on a multi-view stereo vision system,” *Sensors and Actuators a-Physical*, vol. 234, pp. 120–132, 2015.
- [21] Z. Y. Jia *et al.*, “A spectrum selection method based on SNR for the machine vision measurement of large hot forgings,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 126, no. 24, pp. 5527–5533, 2015.
- [22] Y. Liu *et al.*, “An improved image acquisition method for measuring hot forgings using machine vision,” *Sensors and Actuators a-Physical*, vol. 238, pp. 369–378, 2016.
- [23] J. H. Yang *et al.*, “Improved calibration method of binocular vision measurement system for large hot forging,” in *Proceedings 2016 Ieee 25th International Symposium on Industrial Electronics*, 2016, pp. 918–922.
- [24] J. Yang, W. Liu, R. Zhang, Z. Jia, F. Wang, and S. Li, “A method for measuring the thermal geometric parameters of large hot rectangular forgings based on projection feature lines,” *Mach. Vis. Appl.*, vol. 29, no. 3, pp. 467–476, 2018.

Autoři využívají stereopár kalibrovaných kamer (REDLAKE ES4020, rozlišení 2048×2048) osazený filtry typu horní propust (BD 440SP, 440 nm) a nekalibrovaný DLP projektor (3M, PD80X, 5000 lm) [18, 19, 21, 24], který byl později nahrazen několika nekalibrovanými modrými liniovými lasery (450-BL, Changchun Laser Optoelectronic Technology Company, výkon neuveden, v tomto případě byl také vyměněny filtry za úzkopásmové BP450-40 TFI, střed pásma 450 nm) [22]. Pro kalibraci stereopáru kamer byla využita Zhangova metoda [3], využívající rovinné šachovnicové pole. Pomocí projektoru nebo laserů je na povrch výkovku promítnut vzor, který je poté triangulován pomocí stereopáru kamer. Autoři se omezili na měření průměru válcových výkovků nebo šířek a délek testovacích těles.



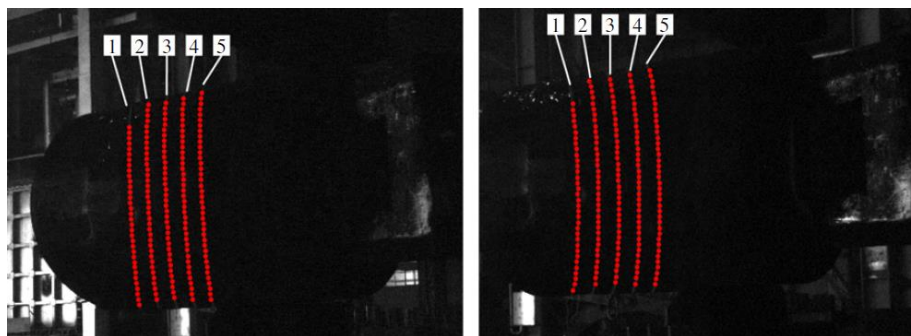
obr. 3-12 Systém stereovize s promítáním strukturovaného světla projektorem [19].

Chronologicky první článek kolektivu [18] pojednává pouze o triangulování projektorem osvícených bodů na siluete měřeného tělesa (2D měření, na povrch výkovku byly promítnuty svislé nebo vodorovné pruhy) – je navržena metoda nalezení středu tenkých paprsků promítnutých projektorem na povrch výkovku nebo testovacího tělesa - ve snímku je určena se subpixelovou přesností na základě modifikovaného Gaussovského modelu rozložení intenzity světla v příčném řezu promítnutým paprskem (díky záření výkovku je standardní Gaussovský profil intenzity paprsku deformován). Středů paprsků jsou sledovány až k siluete výkovku, na níž dojde ke skokové změně intenzity laserového světla. Tyto body jsou poté triangulovány.



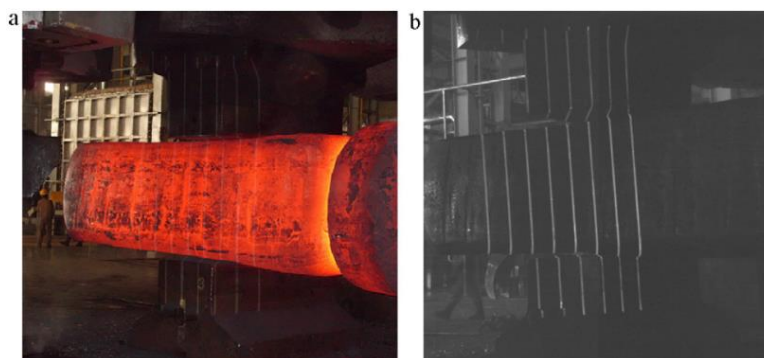
obr. 3-13 Triangulované body na středech pruhů promítaných projektorem na hranici tělesa (modře) [18].

Druhý článek kolektivu [19] se zabývá rozšířením a vylepšením této metody za účelem získání 3D dat. Na výkovek byly promítnuty svislé a vodorovné pruhy. Pro určení středů tenkých pruhů z projektoru ve snímku se subpixelovou přesností použili autoři metodu založenou na Weibullově rozložení pravděpodobnosti, které je možné pro danou situaci lépe modifikovat. Po nalezení promítnutých pruhů jsou tyto pruhy identifikovány a jejich průsečíky triangulovány.



obr. 3-14 Jednotlivé triangulované body na pružích promítaných projektorem (červeně) [19].

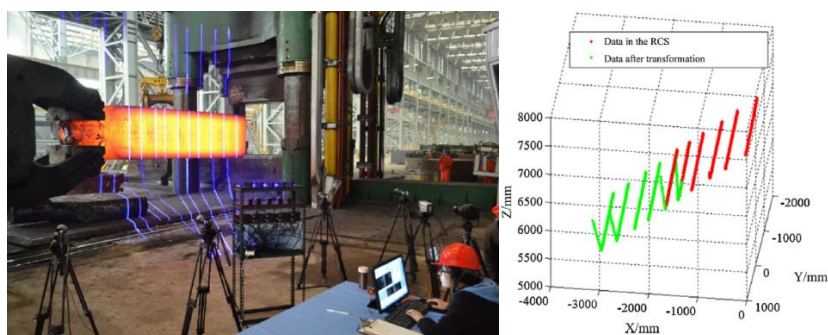
Další článek autorů [21] pojednává o spektrálně selektivním modelu použitým v předešlých člancích těchto autorů – účelem je predikovat odstup signál – šum. V práci je porovnána intenzita světla promítaného projektorem (signál) a intenzita světla emitovaného výkovkem (šum, teplota povrchu výkovku se pohybovala v rozmezí 1150-1200 ° C). Teoretický model odstup signál – šum korespondoval s naměřenými hodnotami během experimentů a byl dle autorů dostatečný pro provedení měření (v nejhorším případě byl signál 2,5× silnější než šum). Nebyl nicméně uvažován žádný další zdroj světla v prostoru, ve kterém měření probíhá, kromě výkovku a projektoru.



obr. 3-15 a) běžný snímek, b) použití spektrálně-selektivní metody [18].

V článku [22] autoři nahradili DLP projektor 5 modrými výkonnými liniovými lasery (výkon bylo možné regulovat). Byla experimentálně stanovena použitelná hranice odstupu signál – šum (signál by měl být minimálně $10\times$ silnější než šum) a pro ni a pro rozdílné teploty výkovků v rozmezí $1050-1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ byly vypočítány minimální použitelné výkony laserů, které byly následně použity při experimentech. Vzdálenost laseru od výkovku byla v tomto případě 2 m, rozměry uvažovaných výkovků se pohybovaly okolo 100 mm. Nutný výkon laseru byl např. při teplotě výkovku $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ stanoven na 1004 mW. Triangulovány byly v tomto případě opět body na hranách výkovku a středech promítaných paprsků jako ve [18].

Článek [20] pojednává o využití dvou stereopárů se zorným polem dohromady $8,6\times 5\text{ m}$ pro měření šířky nebo průměru výkovků. Zorná pole stereopárů se překrývala v 25 % plochy. Vzdálenost měřicí aparatury od měřeného objektu byla přibližně 7 m. Pro osvětlení výkovků bylo také použito pole výkonných laserů – každý laser měl výkon 200 mW. Byly použity celkem 4 11Mpx průmyslové kamery. Článek [23] pak pojednává o přesné metodě kalibrace navržené pro tento systém. Tato metoda využívá kvůli odstranění numerické závislosti parametrů kamery 2 kroků – kalibrace fyzického středu snímku a ohniskové vzdálenosti je provedena v laboratoři a využívá projektivní laserové pole a přesný manipulátor. Kalibrace vnějších parametrů kamery a zkreslení objektivů je pak provedena na místě instalace systému pomocí šachovnicového pole.



obr. 3-16 Vlevo – měřicí aparatura využívající výkonné laserové pole, vpravo – výsledek 3D rekonstrukce povrchu výkovku s využitím 2 stereopárů a laserového pole [20].

Chronologicky poslední článek [24] se vrací opět k využití DLP projektoru a stereopáru kamer. Je opět využita metoda binokulárního vidění v kombinaci s využitím promítání vzoru projektorem. Je využita spektrálně-selektivní metoda a její model rozebírání v článku [21]. Je zde popsána metoda subpixelové detekce promítaných pruhů na povrch výkovku na principu prokládání profilu intenzit jednotlivých pruhů Gaussovskou křivkou. Další informace, o způsobu kalibrace, nebyly poskytnuty.

Výsledky

Experimenty byly provedeny v laboratorních i průmyslových podmínkách, test přesnosti byl vždy realizován jen v podmínkách laboratorních, v případě koncepcí využívající DLP projektor na studených tělesech o známých rozměrech. Při testování přesnosti systému v průmyslových podmínkách vždy chyběly referenční rozměry. Chyba měření všech navržených variant využívající DLP projektor byla pod 1 %, dosahovala až 0,5 % (rozměry testovaných součástí se pohybovaly v rozmezí 100-600 mm; v případě [18, 24] byly měřeny rozměry desky, v případě [19] byly měřeny průměry válce).

Výrazně lepších výsledků bylo dosaženo při použití výkonného laserového pole místo pruhů promítaných projektorem. Chyba měření koncepce prezentované v [22] byla nižší než 0,3 % - tyto experimenty byly provedeny v laboratorních podmínkách na kvádrových tělesech o rozměrech okolo 100 mm a teplotě až 1250 °C. Přesnost koncepce využívající 4 kamery (2 stereopáry) a laserové pole [20] ověřena nebyla, přestože byl systém testován v průmyslových podmínkách při měření výkovku s šířkou 1,3 m. Byla ověřena pouze přesnost kalibrace tohoto systému [23], jejíž průměrná relativní chyba dosahovala 0,052 % - přesnost této metody v tomto případě překonávala přesnost běžně využívané Zhangovy metody.

Závěr

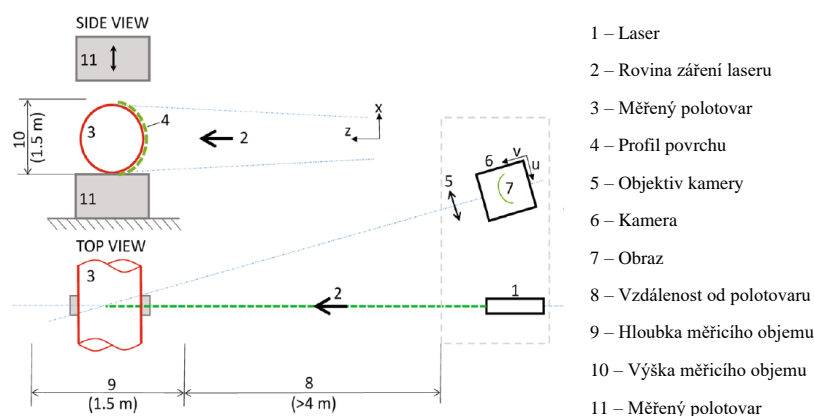
V publikacích byla demonstrována možnost využití aktivní stereovize při měření výkovků. Zaznamenaná chyba byla ve všech případech nižší než 1 %, v průběhu vývoje chyba postupně klesla až na 0,5 % (v laboratorních podmínkách na studeném tělese), což bylo považováno za uspokojivé. Čas měření a vyhodnocení nebyl explicitně uveden. Následně byl zkoumán vliv síly světelného zdroje, respektive odstupu signál-šum. Vliv tohoto faktoru byl pro přesnost a spolehlivost aktivních měřicích systémů kritický – laboratorní experimenty prokázaly násobně vyšší přesnost konceptu využívající výkonné liniové lasery oproti konceptu využívající DLP projektor. V případě testování konceptu využívajícího laserové pole měl navíc měřený objekt teplotu až 1250 °C oproti předchozím případům, kdy byl měřený objekt chladný. Dalším kritickým faktorem zde byla metoda kalibrace kamer, která je v případě velkého měřicího objemu obtížná. Autorům se podařilo dosáhnout průměrné relativní chyby kalibrace 0,052 %.

3.2.3 Liniové skenery

- [15] Y. C. Zhang, J. X. Han, X. B. Fu, and F. L. Zhang, "Measurement and control technology of the size for large hot forgings," *Measurement*, vol. 49, pp. 52–59, 2014.
- [16] D. Bračun, G. Skulj, and M. Kadis, "Spectral selective and difference imaging laser triangulation measurement system for on line measurement of large hot workpieces in precision open die forging," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 90, pp. 917–926, 2017.

Autoři [15, 16] se zabývali možnostmi využití liniového skeneru při měření horkých výkovků. Navržená koncepce využívá výkonného zeleného liniového laseru a kamery se zeleným filtrem (spektrálně-selektivní metoda). Kamera i laser jsou kalibrovány. Soustava kamery a laseru je umístěna na lineárním vedení s možností odečítat aktuální polohu – viz obr. 3-17. Zhang et al. [15] použili laser MGL-III s výkonem 311 mW, kameru MV-VE078SM/SC s rozlišením 1024×768 px) a lineární systém s chybou pozicování do 40 μm. Další detaily nebyly uvedeny. Aparatura, kterou použili Bračun et al. [16] byla schopna měřit maximální délku objektu 1,4 m a maximální průměr 0,5 m; vzdálenost aparatury od měřeného objektu byla 4,2 m. Aparatura využívala 530 nm laser s neuvedeným výkonem a CCD kameru s rozlišením 1290×960 px, osazenou objektivem s ohniskovou vzdáleností 35 mm). Úhel mezi optickou osou kamery a rovinou laseru byl v obou případech 30 °. Bračun využil ke kalibraci referenční 3D objekt, který byl pozicován CNC manipulátorem s přesností 10 μm. Zhang použil ke kalibraci rovinné šachovnicové pole. Bračun využíval ke zvýšení kontrastu laserových pruhů diferenciální snímkování – rychle za sebou byly pořízeny 2 fotografie, jedna s laserovým paprskem a druhá bez něj – takto bylo efektivně potlačeno pozadí.

Výsledkem každé dílčí operace skenování těmito liniovými skenery je množina bodů, reprezentující povrch výkovku v rovině laserového paprsku. Skenování je provedeno v mnoha řezech a výsledky jsou poté sesazeny do společného souřadného systému podle údajů o poloze soustavy kamery a laseru. Autoři se omezili na měření průměru výkovků v jednotlivých rovinách skenování (body v každém řezu byly proloženy kružnicí).



obr. 3-17 Konfigurace systému využívající principu liniového skeneru [16].

Výsledky

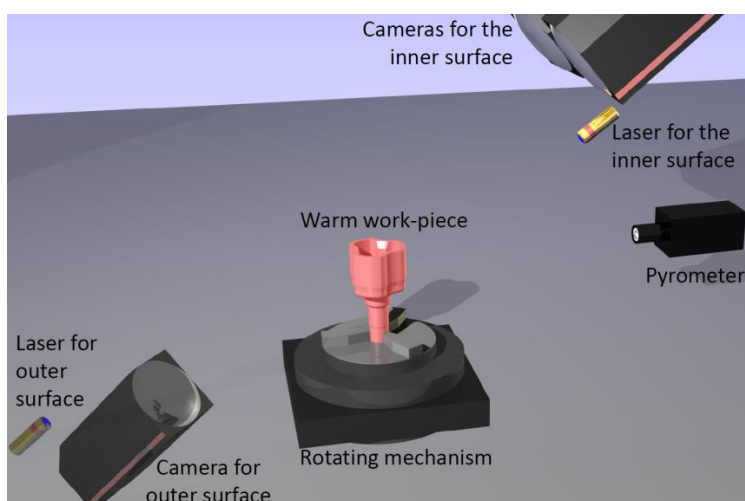
Oba autoři testovali navržené systémy v laboratorních i průmyslových podmínkách. Největší rozměry měřených výkovků byly v případě Zhanga 800 mm, v případě Bračuna 440 mm, povrchová teplota se pohybovala okolo 1000 °C. Jako referenční rozměr byl v obou případech použit rozměr určený kontaktními měřidly (které nicméně vykazovaly vysokou nejistotu měření). Oba zmiňované systémy vykazovaly chybu nebo nejistotu měření méně než 0,5 %.

Závěr

Výsledná chyba měření byla vyhodnocena jako akceptovatelná a nejistota měření byla nižší než u používaných kontaktních měřidel. Měřicí systémy založené na liniovém skeneru byly tedy vyhodnoceny jako vhodné pro měření průměru výkovků. Rychlost měření a vyhodnocení nebyla uvedena.

[17] D. Mejia-Parra *et al.*, “In-line dimensional inspection of warm-die forged revolution workpieces using 3D mesh reconstruction,” *Appl. Sci.*, vol. 9, pp. 1–21, 2019.

Autoři [17] se zabývali návrhem specializované měřicí stanice, integrované ve výrobní lince malých kovaných polotovárů s komplexními tvary a vysokou teplotou (okolo 600 °C). Tento přístroj funguje na principu dvou liniových skenerů, dle **obr. 3-18**. Je využita spektrálně-selektivní metoda – jsou použity modré liniové lasery (20 mW, 450 nm) a 3 využití kamery jsou osazeny modrým pásmovým filtrem (450 nm ± 25 nm). Konkrétnější detaily o měřicí aparatuře nejsou uvedeny. Kalibrace je provedena pomocí přesného rotačně symetrického objektu, kalibrace dosahovala přesnosti 0,01 mm.



obr. 3-18 Konfigurace měřicí stanice – vlevo dole liniový skener pro vnější povrch s 1 kamerou a liniovým laserem, vpravo liniový skener s 2 kamerami a 1 liniovým laserem pro vnitřní povrch, obrobek je umístěn na rotačním stole, teplota obrobku je snímána pyrometrem [17].

Výsledky, závěr

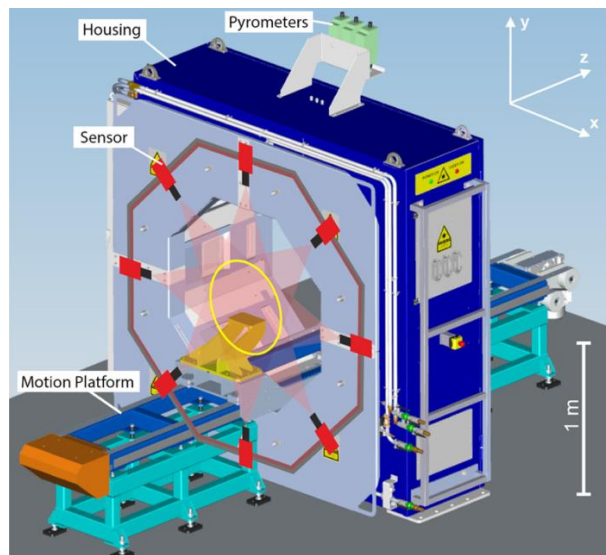
Objekty o největším rozměru přibližně 162 mm byly měřeny s přesností 0,1 mm. Referenční geometrie byla získána 3D skenem polotovaru za studena. Měření polotovaru za vyšších teplot nevykazovalo vyšší chybu – byl zaveden předpoklad, že termální dilatace nemají na přesnost významný vliv a tedy je není třeba kompenzovat. Vlivem možných rušivých efektů v důsledku měření horkého tělesa na přesnost měření se autoři nezabývají.

Tato stanice je schopná měřit objekty i o teplotě nad 600 ° C a je schopna vyhodnotit geometrii objektu do 1 minuty. Stanice nahradí současnou metodu měření za pomoci souřadnicového měřicího přístroje, která je pomalá (měření trvá přibližně 20 minut) a funguje pouze na studené objekty.

[47] A. Ghiotti, A. Schöch, A. Salvadori, S. Carmignato, and E. Savio, “Enhancing the accuracy of high-speed laser triangulation measurement of freeform parts at elevated temperature,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 64, no. 1, pp. 499–502, 2015.

Autoři [47] se zabývali řešením skenovacího zařízení pro povrch menších výkovek komplexních tvarů, implementovatelného do výrobní linky. Výkovky mohou mít teplotu až 1200 ° C a délku nebo průměr až 800 mm. Měření trvá méně než 10 s. K měření bylo použito celkem 8 liniových skenerů Zumbach Electronic s hloubkovým rozlišením 0,03 mm. Byla použita spektrálně selektivní metoda (kamera byla opatřena pásmovým filtrem). Maximální nepřesnost délkového měření systému, vzhledem k reálným potřebám průmyslové aplikace, byla stanovena na 0,2 mm.

Systematická chyba měření v důsledku tepelné roztažnosti celé soustavy v teplotně nestabilním prostředí (změna kalibrovaných vzdáleností senzorů) byla odhadována na 0,5 mm. Proto byl celý rám, včetně zmíněných skenerů, vybaven aktivním vodním chlazením a bylo tak dosaženo teplotní stálosti v rozmezí ± 1 ° C. Předpokládaná chyba v důsledku tohoto jevu poté klesne na 50 μm maximálně. Předpokládaná chyba přesnosti samotných skenerů v důsledku teplotní roztažnosti (předpokládané výkyvy teplot ± 5 ° C) byla stanovena na maximálně 10 μm . Dále byla pomocí zjednodušeného modelu odhadnuta chyba v důsledku rozdílného indexu lomu horké atmosféry okolo výkovek (atmosféra o teplotě 100 ° C), která měla maximálně činit 30 μm . Žádný ze zmíněných jevů nebyl dále softwarově kompenzován.



obr. 3-19 Měřicí zařízení – pohyblivá platforma měřený vzorek posunuje přes portál s 8 statickými liniovými skenery, sestava je opatřena krytováním a obsahuje i pyrometry pro měření teploty výkovků [47].

Výsledky

Ověření přesnosti délkového měření bylo provedeno na řadě těles s přesnými známými rozměry a nízkým koeficientem roztažnosti, za přítomnosti výkovku o teplotě 300 – 800 °C v prostoru měření. Nejistota měření byla vyhodnocena pod 9 μm. Požadovaná maximální chyba měření 0,2 mm byla tedy výrazně větší než výsledná nejistota.

3.3 Pasivní optické metody a měření výkovků

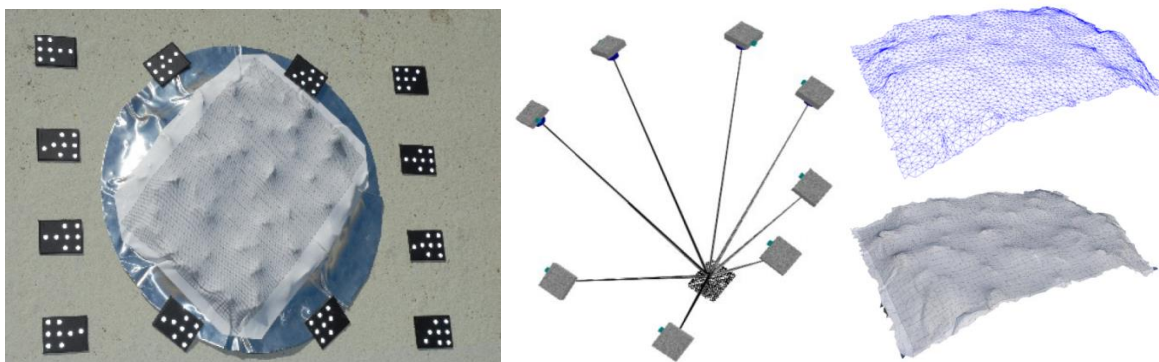
3.3.1 Pasivní stereovize

[48] C. S. Fraser, I. Jazayeri, and S. Cronk, “A Feature-based Matching Strategy for Automated 3D Model Reconstruction in Multi-image Close-range Photogrammetry,” in *ASPRS 2010 Annual Conference*, 2010.

Autoři [48] se zabývali možnostmi aplikace pasivní vícenímkové měřicí metody, založené na triangulaci významných bodů na povrchu tělesa, pro měření deformací hliníkového plechu s pravidelnou strukturou na povrchu. Metoda spočívala ve zpracování obrazu Wallisovým filtrem (pro zvýšení kontrastu povrchových textur), následně byl použit detektor významných bodů FAST a tyto body byly triangulovány pomocí blokového vyrovnávání paprskových svazků. Daný triangulovaný bod musel být viditelný minimálně na 4 snímcích. Pro zvýšení spolehlivosti této metody byly pro registraci jednotlivých snímků využity kódované kalibrační značky.

Výsledky

V rámci experimentu byl použit hliníkový plech o průměru 0,8 m s povrchovou strukturou (obr. 3-20 vlevo). Pro měření bylo použito celkem 8 snímků (obr. 3-20 vpravo). Přesnost triangulovaných bodů byla odhadnuta na základě mimoběžnosti paprsků během aplikace blokového vyrovnávání paprskových svazků. Výsledná přesnost a spolehlivost se lišila na základě nastavení funkce triangulace (bylo bráno v úvahu jen určité procento triangulovaných bodů s nejnižší chybou triangulace). Výsledná přesnost triangulovaných bodů je zachycena v tab. 3-1, výsledná rekonstrukce povrchu na obr. 3-20 vpravo.



obr. 3-20 Vlevo – měřená scéna, uprostřed – pozice kamery relativně vůči měřenému objektu během měření, vpravo - výsledná 3D rekonstrukce povrchu snímaného dílu [48].

tab. 3-1 Přesnost a spolehlivost rekonstrukce souřadnic triangulovaných bodů [48].

Parametr kvality	RMS chyba triangulace	RMS chyba triangulace	Relativní přesnost	Výsledných bodů	Chybných bodů
90	0,43	0,051	1:16 000	3826	177
95 %	0,39 px	0,048 mm	1:17 000	2278	6
99 %	0,30 px	0,038 mm	1:21 000	248	0

Závěr

Metodu triangulace významných bodů lze použít pro přesnou inspekci strojních dílů, s texturovaným povrchem. Navržená metoda dosahovala relativní přesnosti až 1:21 000, což odpovídá chybě 0,038 mm na délce 800 mm.

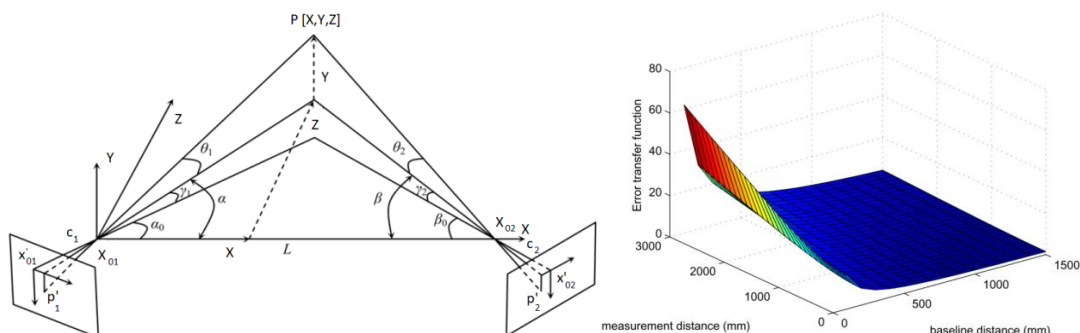
[49] G. Xu, X. Li, J. Su, H. Pan, and G. Tian, “Precision evaluation of three-dimensional feature points measurement binocular vision,” *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 15, no. 1, pp. 30–37, 2011.

Autoři [49] se zabýval vlivem polohy kamer na přesnost pasivní stereovize. Na základě jednoduchého geometrického modelu stereopáru (obr. 3-21) byl formulován předpoklad trendu vývoje chyby měření. Pro výpočet souřadnic daného bodu P v prostoru lze odvodit následující vztah (neznámé jsou patrné z obr. 3-21):

$$P[X; Y; Z] = \left[\frac{L \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}; \frac{L \sin \beta \tan \theta_1}{\sin(\alpha + \beta)}; \frac{L \sin \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right] \quad (3.2)$$

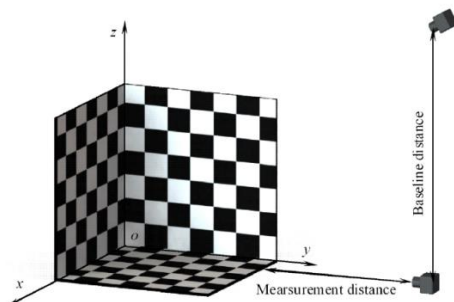
odkud byla odvozena funkce míry závislosti chyby výsledných souřadnic na délce základny $\psi(L)$ (za předpokladu rovnosti úhlů α a β):

$$\psi(L) = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial L}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial L}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial L}\right)^2} = \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta) \cos \theta_1} \xrightarrow{\alpha=\beta} \frac{\sqrt{L^2 + 4Y^2 + 4Z^2}}{2L} \quad (3.3)$$



obr. 3-21 Vlevo geometrický model stereopáru, vpravo vykreslení míry závislosti chyby výsledných souřadnic na délce základny stereopáru (na svislé ose velikost míry závislosti chyby na délce stereopáru, na vodorovných osách je vzdálenost měřeného objektu a délka základny stereopáru) [49].

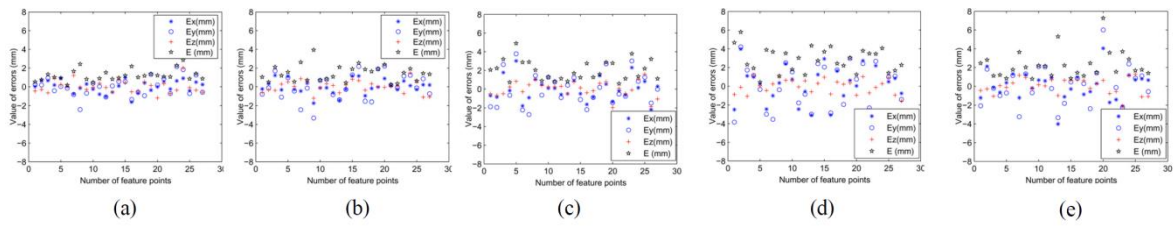
Pro experimentální ověření trendu chyby byly použity průmyslové kamery s rozlišením 3 Mpx a velikostí pixelu 3,2 μm ; ohnisková vzdálenost objektivu byla 8 mm. Kalibrace byla provedena metodou přímé lineární transformace (nelineární zkreslení objektivu bylo zanedbáno), kalibrační pole dosahovalo relativní přesnosti 0,83 %. Toto kalibrační pole (znázorněné na obr. 3-22) bylo zároveň použito jako referenční objekt.



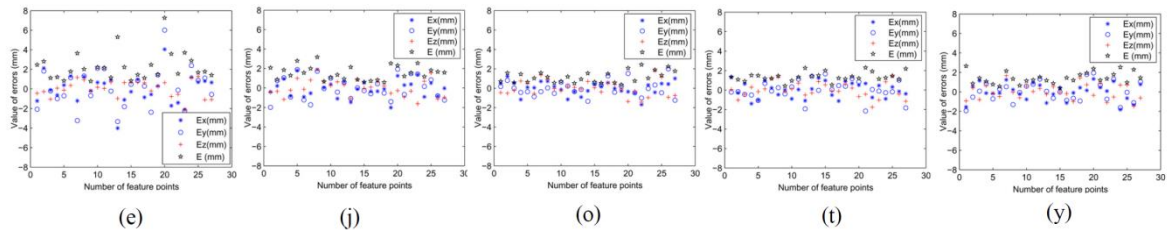
obr. 3-22 Schéma experimentu – vyznačena je vzdálenost od objektu a délka základny stereopáru [49].

Výsledky

V publikaci je provedena série měření objektu ze vzdáleností 1000-3000 mm, délka základny stereopáru se pohybovala v rozmezí 600-1400 mm.



obr. 3-23 Chyby měření stereopárem o základně 600 mm v závislosti na vzdálenosti měřeného objektu: (a) 1000mm; (b) 1500 mm; (c) 2000 mm; (d) 2500 mm; (e) 3000 mm.



obr. 3-24 Chyby měření stereopárem ze vzdálenosti 3000 mm v závislosti na délce základny: (e) 600 mm; (j) 800 mm; (o) 1000 mm; (t) 1200 mm; (y) 1400 mm [49].

Závěr

Experimenty potvrdily předpokládaný trend vývoje chyby měření. Při konstantní délce základny stereopáru 600 mm a zvyšování vzdálenosti měřeného objektu od 1000 do 3000 mm se chyba měření zvětšovala konkrétně od ± 2 do ± 6 mm. Byl potvrzen i trend snižování chyby měření ze vzdálenosti 3000 mm při zvětšování délky základny od 600 do 1400 mm, konkrétně od ± 6 do ± 2 mm. Při tomto experimentu docházelo k výraznému klesání chyby měření až do délky základny 1000 mm, další zvětšování základny nemělo významný efekt.

-
- [50] A. Gil, O. M. Mozos, M. Ballesta, and O. Reinoso, “A comparative evaluation of interest point detectors and local descriptors for visual SLAM,” *Mach. Vis. Appl.*, vol. 21, no. 6, pp. 905–920, 2010.
- [51] A. Dosovitskiy, P. Fischer, J. T. Springenberg, M. Riedmiller, and T. Brox, “Discriminative Unsupervised Feature Learning with Exemplar Convolutional Neural Networks,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 38, no. 9, pp. 1734–1747, 2016.
- [52] K. M. Yi, E. Trulls, V. Lepetit, and P. Fua, “LIFT: Learned Invariant Feature Transform,” *Comput. Vis. - Eccv 2016, Pt Vi*, vol. 9910, pp. 467–483, 2016.
- [53] P. Di Febbo, C. Dal Mutto, K. Tieu, S. Mattocchia, and Ieee, “KCNN: Extremely-Efficient Hardware Keypoint Detection with a Compact Convolutional Neural Network,” in *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 795–803.
-

Gil et al. [50] provedli komparativní studii spolehlivosti algoritmů pro hledání významných bodů i jejich deskriptorů na fotografiích objektů pořízených z různých úhlů, vzdáleností a za různých světelných podmínek. Srovnáno bylo mnoho nejpoužívanějších metod, jako je např. Harrisův operátor, Harrisův-Laplaceův operátor, SUSAN operátor, SIFT operátor, SURF operátor, MSER operátor a Kadirův operátor. Z deskriptorů byly

testovány SIFT, GLOH, SURF, deskripce pomocí Zenrikových momentů, orientační histogramy a popis pomocí celé lokální 10×10 šedotónové okolí.

Dosovitskyi et al. [51] a Yi et al. [52] se zabývali možnostmi aplikace neuronových sítí na proces detekce a deskripce významných bodů, které mají spolehlivostí překonávat konvenční metody. Dosovitskyi se zabýval vytvořením neuronové sítě pouze pro deskripci významných bodů. Pro extrakci významných oblastí z obrazu byla využita metoda MSER. Yi navrhl neuronovou síť pro detekci i deskripci významných bodů. Autoři provedli srovnání navržených metod s konvenčními metodami.

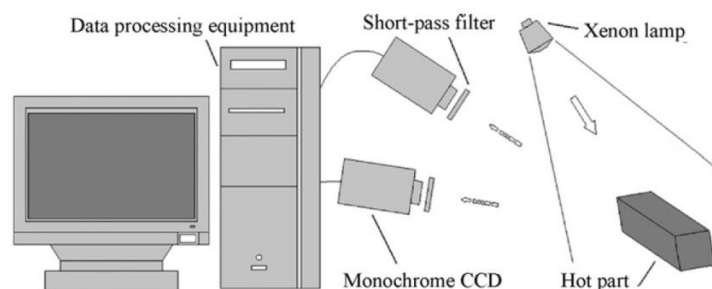
Di Febbo et al. [53] se zabývali vývojem neuronové sítě, aproximující konvenční metody detekce významných bodů, za účelem zrychlení procesu detekce významných bodů v důsledku lepší optimalizace výpočtu.

Výsledky, závěr

U porovnávaných metod byla zkoumána míra invariance vůči translaci, rotaci, změně měřítka, změně kontrastu a barev nebo rozmazání snímku. Z konvenčních deskriptorů významných bodů v komparačních studiích dosahovaly nejlepších výsledků SURF a GLOH [50]. Ze zmíněných operátorů byly jako nejlepší vyhodnocovány operátory Harrisův, MSER [50] a KAZE [53]. Dosovitskyi a Yi ukazují, že pomocí neuronových sítí lze v porovnání s konvenčními metodami dosáhnout vyšší spolehlivosti deskripce významných bodů, zejména na datasetech, na kterých jsou sítě trénovány. Di Febbo demonstruje možnost využití neuronových sítí při optimalizaci výpočtů komplikovaných robustních deskriptorů za účelem dosažení řádově nižšího výpočetního času. Autoři provádějící komparační studie nicméně připouštějí, že výkon jednotlivých metod se může výrazně lišit v závislosti na prostředí zachyceném na fotografiích.

[29] Z. Y. Jia, B. G. Wang, W. Liu, and Y. W. Sun, “An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 2, pp. 267–271, 2010.

Autoři [29] zkoumali možnosti aplikace pasivní stereovize při měření horkých výkovků. Byl navržen koncept měřicího systému, pracující se stereopárem kalibrovaných kamer. Autoři navrhují využití spektrálně selektivní metody, aby dosáhli odfiltrování světla, které emituje horký výkovek.

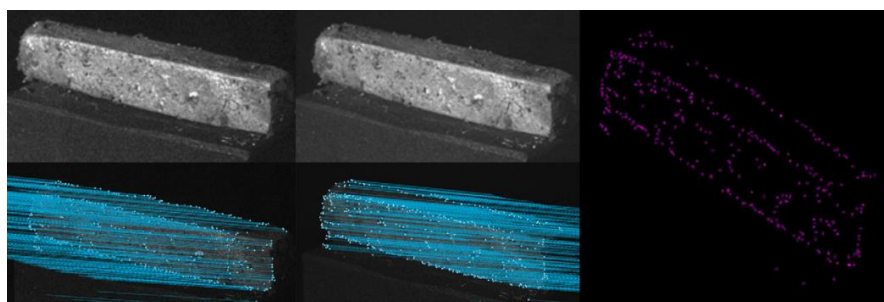


obr. 3-25 Schéma konceptu měřicího systému, zleva: počítač, kamery osazené filtry typu horní propust, xenonová lampa a horký výkovek [29].

Experimentální aparatura se skládala z monochromatických průmyslových kamer osazených filtry, které propouští pouze světlo o vlnových délkách kratších než 450 nm. Aby bylo dosaženo kvalitních fotografií, výkovek je osvětlen 500W xenonovou lampou. Autor pro rekonstrukci geometrie objektu využívá metodu triangulace korespondujících významných bodů. Extrakce významných bodů v obraze byla provedena pomocí Harrisova operátoru, konkrétní metodu deskripce autor nezmiňuje. Není zmíněna ani použitá metoda kalibrace kamer. Přesnost měření není zkoumána.

Výsledky

Měřeným objektem je malý ocelový polotovár o teplotě až 1200 °C, konkrétní rozměry autor neuvádí. Výsledky experimentu lze vidět na obr. 3-26. Bližší detaily o výsledcích, např. počet triangulovaných bodů, nejsou uvedeny.



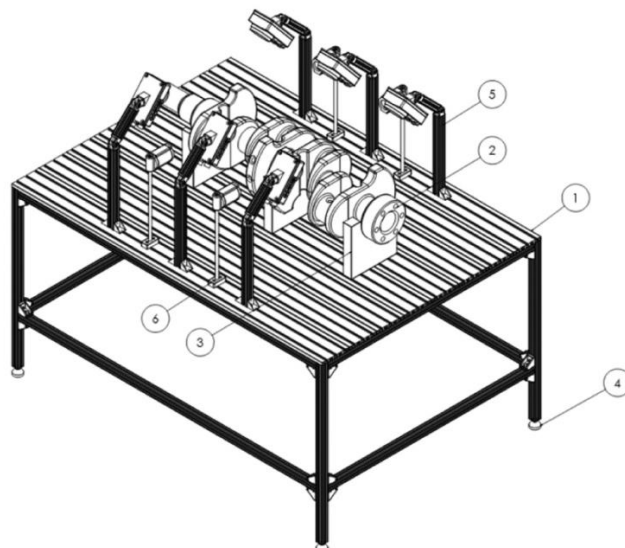
obr. 3-26 Stereovize při měření výkovku – dvojice snímků vlevo nahoře – snímky pořízené experimentální aparaturou za použití spektrálně-selektivní metody, vlevo dole – významné body s vyznačenými korespondencemi mezi snímky, vpravo – 3D rekonstrukce [29].

Závěr

Pomocí spektrálně-selektivní metody a při nasvětlení výkovku xenonovou lampou lze potlačit světlo, které je vyzařováno samotným výkovkem a pořídit tak snímky výkovku, na kterých je vidět kontrastní struktura povrchu. Pomocí metod stereovize lze získat mrak bodů na povrchu snímaného výkovku.

[30] R. Lins, “Mechatronic system for measuring hot-forged automotive parts based on image analysis,” *Trans. Inst. Meas. Control*, vol. 40, no. 13, pp. 3774–3787, 2018.

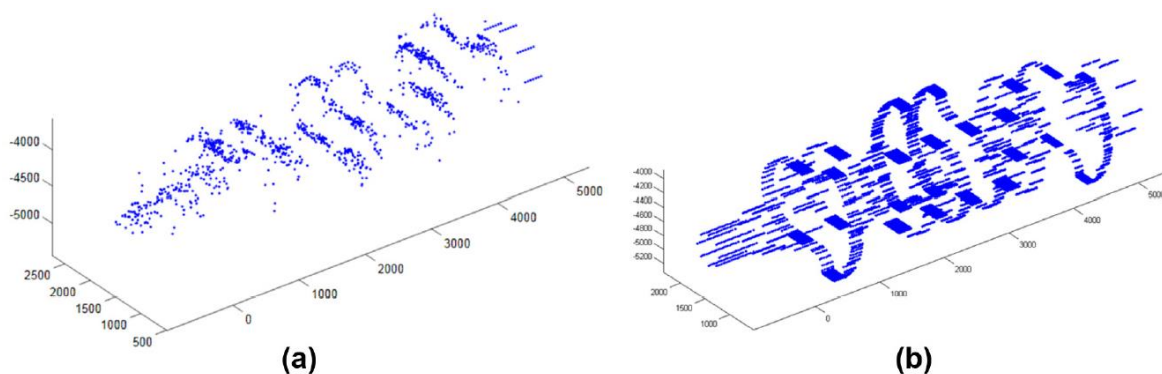
Autoři [30] se zabývali měřením geometrie klikových hřídelí spalovacích motorů za tepla pomocí pasivní stereovize. Bylo použito celkem 6 nspecifikovaných kamer v konfiguraci dle obr. 3-27. Měřený objekt byl osvětlen nspecifikovanými světelnými zdroji. Teplota objektu během měření také nebyla přesně specifikována. Autoři pro extrakci a přiřazování odpovídajících si bodů používali metodu SIFT.



obr. 3-27 Měřicí zařízení pro rozměrovou kontrolu klikové hřídele za zvýšené teploty; 1 – měřicí stůl, 2 – měřený objekt, 3 – držák měřeného objektu (prizmata), 4 – nohy stolu redukující otřesy, 5 – kamery měřicího systému, 6 – osvětlovací systém [30].

Výsledky

V případě měření skutečné klikové hřídele byla zaznamenána relativní nejistota měření $\pm 0,53 \%$, v případě měření modelu klikové hřídele s nanesenou pravidelnou strukturou byla nejistota měření $\pm 0,47 \%$. Rozdíly v hustotě sítě na povrchu lze vidět na Obr. 3-28. Autoři dále zkoumali vliv intenzity osvětlení – zvyšující se intenzita osvětlení vedla ke zvýšení množství a snížení nejistoty rekonstrukce bodů.



Obr. 3-28 Rekonstrukce objektu pomocí pasivní stereovize (mračno bodů) – a) skutečná kliková hřídel, b) texturovaný model klikové hřídele [30].

Závěr

Metoda měření byla vyhodnocena jako dostatečně přesná i rychlá a vyhovující požadavkům reálného průmyslového prostředí jako bezkontaktní náhrada souřadnicových měřicích přístrojů, které jsou schopny pracovat pouze se studeným objektem.

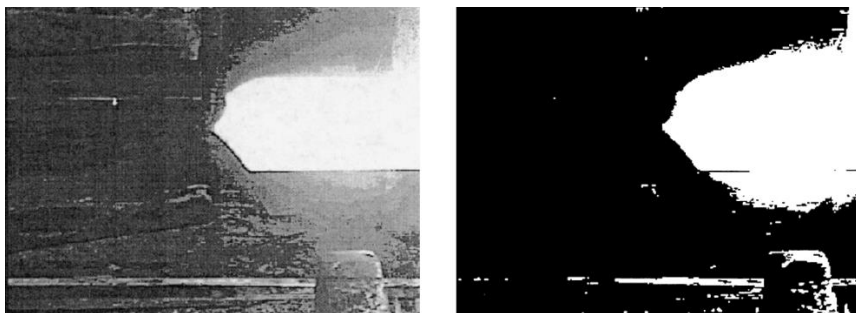
3.3.2 Snímání siluet

[54] S. B. Dworkin and T. J. Nye, "Image processing for machine vision measurement of hot formed parts," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 174, no. 1–3, pp. 1–6, 2006.

Autoři [54] zkoumali možnosti snímání horkých výkovků CCD kamerou v průmyslovém prostředí. Kvalita snímků byla posuzována na základě spolehlivosti segmentace výkovku prahováním.

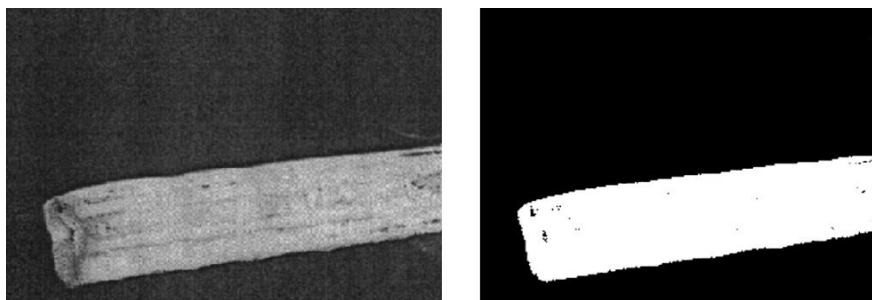
Výsledky

Praktické testy ve viditelném spektru pomocí barevné CCDkamery ukazují problém s nedostatečným odlišením pozadí výkovku v důsledku ozáření pozadí slunečním světlem nebo světelnými zdroji v prostředí.



obr. 3-29 Segmentace výkovku ve viditelném spektru [54].

Autoři navrhují a testují možnost využití monochromatické kamery a barevného NIR-pass filtru (propustnost nad 790 nm). Aplikací tohoto filtru bylo dosaženo efektivního potlačení pozadí.



obr. 3-30 Segmentace výkovku v NIR spektru [54].

Závěr

Pomocí CCD kamery lze získat kvalitní snímky výkovků, z nichž je možné výkovky segmentovat. Je nicméně nutné omezit spektrum vlnových délek, v nichž je výkovek snímán. Horký výkovek vyzařuje světlo v celém spektru, na které je kamera citlivá. Takto široký rozsah ale nemůže být zároveň fokusován objektivem, autoři tedy doporučují využívat barevné filtry. Nejlepších výsledků bylo dosaženo pomocí NIR-pass filtru, který propouští záření výkovku a zároveň velmi dobře potlačuje pozadí.

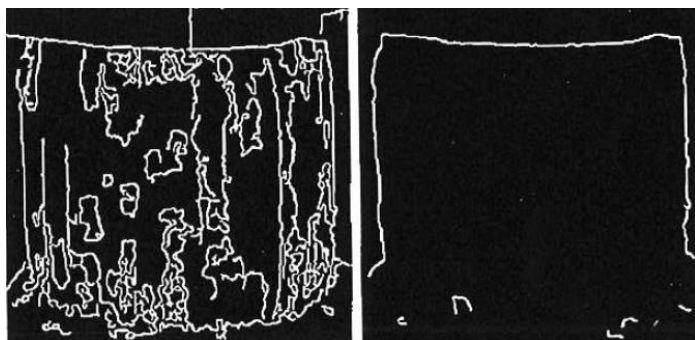
[55] C. H. Hu, B. Liu, and X. X. Song, "A novel edge detection approach used for online dimensional measurement of heavy forging," in *2008 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Applications*, vol. 7160, S. Ye, G. Zhang, and J. Ni, Eds. 2009.

Autoři [55] zkoumají možnosti segmentace siluet horkého pomocí hranového operátoru. Pro tento účel byl v publikaci použit Cannyho hranový operátor [38]. Hranové operátory ale nalézají v obraze falešné hrany, nebo lokálně naopak nedokážou nalézt hledané siluety. To je způsobené kontrastními okujemi na povrchu výkovku nebo nerovnoměrným chladnutím. Autoři tedy navrhnou a verifikují řešení tohoto problému.

Navržená metoda segmentace zahrnovala předzpracování obrazu pomocí ekvalizace histogramu a postprocessing ve formě validace hran, který byl integrován přímo do Cannyho hranového operátoru. Ekvalizace histogramu byla provedena z důvodu dosažení vyššího kontrastu ve snímku a tím spolehlivějšího nalezení hranových bodů. Následoval Cannyho hranový operátor, který byl modifikován výpočtem vah hranových bodů. Hranovým bodům na rozhraní oblastí s různými intenzitami jasu (siluetám) byla přiřazena vysoká váha, zatímco štíhlým hranám nebo hranicím malých oblastí (okuje apod.) byla přiřazena váha nízká. Tato váha byla vypočítána na základě míry potlačení hrany konvolucí s širokým Gaussovským jádrem.

Výsledky

Detaily provedení experimentu, jako je velikost a teplota výkovku nebo vybavení autor neuvádí. Výsledky segmentace horkého výkovku lze vidět na obr. 3-31. Vlevo na obraze získaném Cannyho hranovým operátorem je patrné nalezení velkého množství falešných hran, zatímco siluety v některých místech chybí. Vpravo je patrné odstranění falešných hran a ucelení siluet.



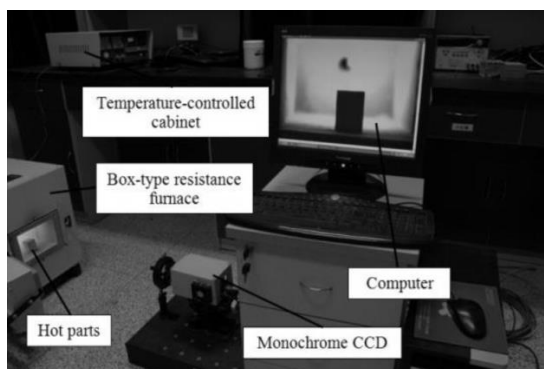
obr. 3-31 Vlevo – obraz výkovku zpracovaný Cannyho hranovým operátorem, vpravo – obraz výkovku zpracovaný navrženou metodou segmentace [55].

Závěr

Autoři demonstrovali možnost spolehlivé segmentace siluet horkého výkovku ze snímku pořízeného digitální kamerou. Pro tuto specifickou aplikaci nelze využít běžné hranové operátory – je třeba využít zpracování obrazu, který zajistí vyšší kontrast a tím vyšší spolehlivost nalezení siluet a zároveň nalezené hrany validovat za účelem odstranění falešně pozitivních hran.

-
- [56] C. Bi, X. H. Qu, Y. Liu, Y. P. Liu, and J. L. Liu, “Dimensional Measurement of Small Hot Pieces Based on a Monochrome CCD,” in *2014 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Apisat2014*, vol. 99, H. Haiyan, Ed. 2015, pp. 1158–1163.
-

Autoři [56] zkoumali možnosti dvojrozměrného měření základních rozměrů malých výkovků na principu snímání jejich siluet. Byl navržen koncept monokulárního měřicího systému, využívající kalibrovanou monochromatickou průmyslovou kameru (1/2“ velikost čipu, objektiv s ohniskem 35 mm). Kamera byla osazena IR-cut filtrem, aby nedocházelo k rozostření snímků vlivem radiace, kterou emituje výkovek. Interní parametry kamery byly kalibrovány pomocí Zhangovy metody [3]. Délky byly určovány komparací s referenčním rozměrem. Detekce hran byla založena na Sobelově hranovém operátoru.

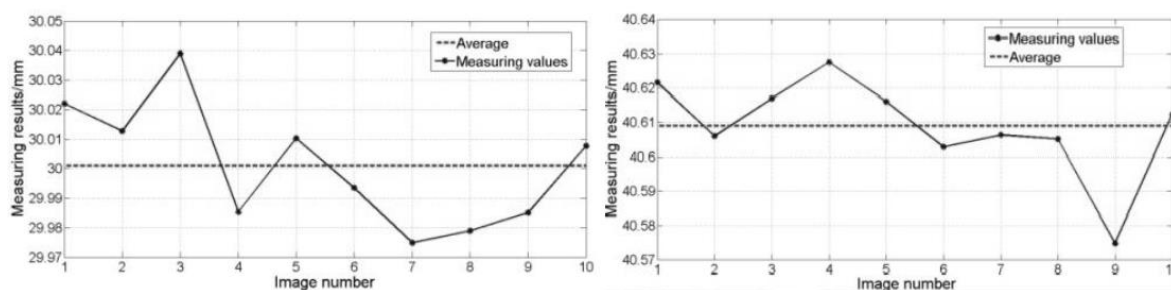


obr. 3-32 Schéma zkušební aparatury, zobrazující měřený horký objekt před v odporové peci, monochromatickou CCD kameru a počítač [56].

Výsledky

Kalibrace proběhla na základě snímání 3 referenčních vzorků tvaru krychle s přesnými rozměry 10, 30 a 50 mm. Na základě snímání hran a porovnání jejich vzdáleností s referenčním rozměrem byla vypočítána konstanta pro přepočítání mezi pixely a milimetry – pixelová rozlišitelnost byla přibližně 0,12 mm na px. Kalibrace byla ověřena snímáním jiných referenčních vzorků s rozměry 9, 20, 40 a 60 mm. Absolutní chyba měření se zde pohybovala do 0,3 mm (relativně k měřeným rozměrům cca 0,5 %), zatímco směrodatná odchylka opakovatelnosti tohoto měření byla ve všech případech nižší než 0,0034 mm.

Experimentální měření probíhalo na ocelovém kvádru o teplotě 1000 °C, jehož rozměry byly 39,710 a 29,173 mm. Skutečně naměřené rozměry lze vidět na obr. 3-33. Po korekci ovlivnění naměřených rozměrů teplotní roztažností byly tedy skutečně naměřené rozměry 39,375 mm (rozdíl o 0,335 mm oproti referenčnímu rozměru) a 29,476 (rozdíl o 0,303 mm oproti referenčnímu rozměru).



obr. 3-33 Měřené rozměry zkušebního tělesa [56].

Závěr

Dosažená chyba měření nižší než 0,5 mm byla vyhodnocena jako vyhovující, základní rozměry výkovků tedy lze touto metodou měřit. Autoři se dále nezabývají příčinou této chyby měření nebo příčinou vyšší směrodatné odchylky v případě měření horkých objektů.

[57] C. Bi, J. G. Fang, D. Li, and X. H. Qu, “Study on application of color filters in vision system of hot forgings,” in *Optical Measurement Technology and Instrumentation*, vol. 10155, S. Han and J. Tan, Eds. 2016.

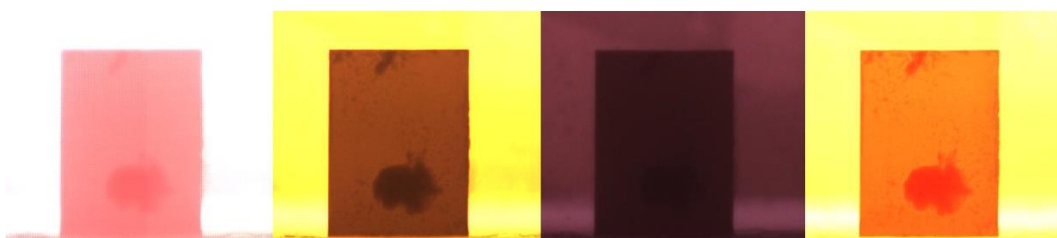
Autoři [57] zkoumali vliv spektrálně-selektivní metody na kontrast fotografií výkovku. Motivací byl vývoj pasivního monokulárního měřicího systému pro měření základních rozměrů výkovků. Měřicí systém využíval barevnou CCD kameru a pro segmentaci siluet výkovku byl využíván Sobelův hranový operátor, pracující s černobílým obrazem. Experimenty byly prováděny v laboratorních podmínkách. Snímaným objektem byl ocelový kvádr o rozměrech 30×30×40 mm. Kontrast byl studován v běžném rozsahu kovací teploty - 800-1200 °C. Pro zahřívání výkovku byla použita odporová pec. Sledovaným indikátorem kvality snímku byl kontrast mezi objektem (ocelovým kvádrem) a pozadím ΔV , definovaný následovně:

$$\Delta V = |V_O - V_B| \quad (3.4)$$

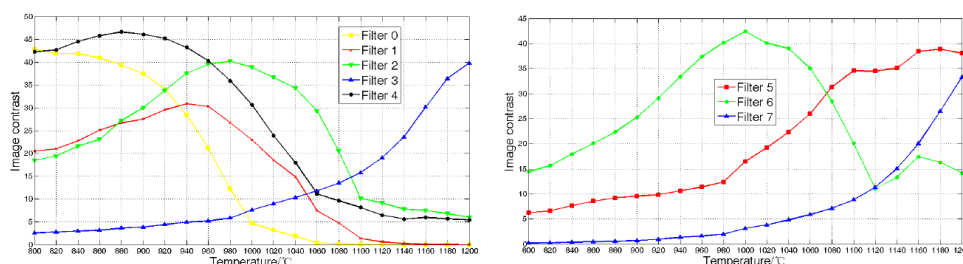
Kde V_O je průměrná hodnota jasu objektu a V_B je průměrná hodnota jasu pozadí. Autoři uvažovali kombinaci 2 metod filtrace – fyzikální (pomocí barevného filtru) a digitální (pomocí úplného potlačování saturovaných barevných spekter při tvorbě černobílého obrazu). V rámci fyzikální filtrace byly testovány 4 barevné filtry nebo jejich kombinace – červený, zelený, modrý a IR-cut.

Výsledky

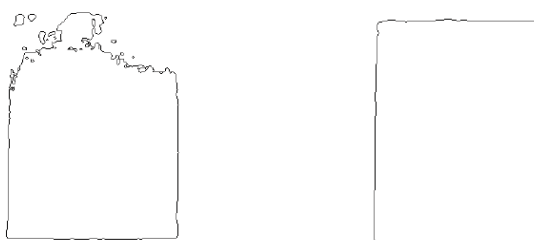
Autoři zveřejnili fotografie, které byly pořízeny s použitím různých barevných filtrů, viz obr. 3-34. Ze série takových fotografií při různých teplotách objektu ve zmíněném rozmezí byly vypočítány křivky kontrastu (obr. 3-35). Dále byla demonstrována odezva Sobelova hranového operátoru na vhodně vybrané spektrum snímání objektu (obr. 3-36).



obr. 3-34 Fotografie při využití (z leva): červeného, zeleného, modrého, a IR cut barevného filtru [57].



obr. 3-35 Kontrast výkovku při použití barevných filtrů (filtr 0 – bez filtru, filtr 1 – červený filtr, filtr 2 – zelený filtr, filtr 3 modrý filtr, filtr 4 – IR-cut filtr, filtr 5 – červený + IR-cut filtr, filtr 6 – zelený + IR-cut filtr, filtr 7 – modrý + IR-cut filtr) [57].



obr. 3-36 Vliv zvýšeného kontrastu v důsledku aplikace spektrálně-selektivní metody na spolehlivost segmentace horkého objektu – vlevo bez využití spektrálně-selektivní metody, vpravo – spektrálně-selektivní metoda byla využita [57].

Závěr

Závěrem experimentu je poznání, že spektrálně selektivní metoda má výrazný vliv na kontrast výkovku a tím i spolehlivost jeho následné segmentace. Vhodný barevný filtr je nutné volit v závislosti na snímané teplotě výkovku. Z vybraných filtrů v uvažovaném rozmezí teplot nelze vybrat jediný optimální filtr. Na základě výsledků kontrastu byly formulovány intervaly teplot a pro ně z daných filtrů nejvhodnější varianty (tab. 3-2).

tab. 3-2 Volba vhodného filtru v závislosti na teplotě výkovku [57].

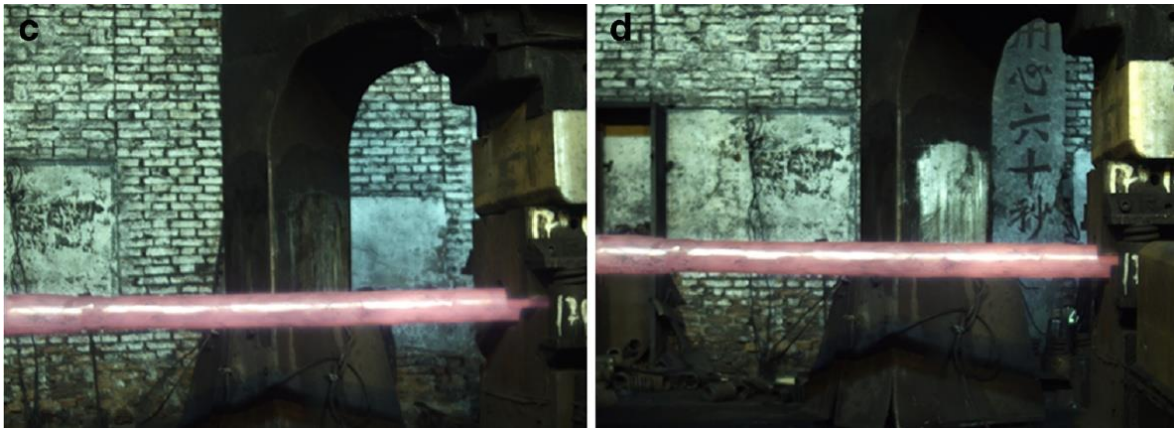
Rozsah teplot	Vhodný filtr
800-960 °C	IR-cut
960-1080 °C	Zelený + IR-cut
1080-1200 °C	Červený + IR-cut

[58] Y. Zhou, Y. Wu, and C. Luo, “A fast dimensional measurement method for large hot forgings based on line reconstruction,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 99, pp. 1713–1724, 2018.

Autoři [58] se ve studii zabývali měřením rozměrů horkých těžkých výkovků na základě jejich siluet. Metoda spočívala v nalezení hran v obraze pomocí Houghovy transformace (pouze rovné hrany) a jejich triangulaci. Tím, že byly v obraze hledány celé rovné hrany a ty byly triangulovány, nikoli pouze jednotlivé body, bylo dosaženo potřebné spolehlivosti. Systém byl kalibrován pomocí Zhangovy metody (za použití šachovnicového pole) [3]. Byly měřeny pouze základní rozměry objektů – v případě laboratorních experimentů s krychlí délka její hrany, v případě testování systému v průmyslových podmínkách na válcovém polotovaru byl měřen jeho průměr.

Výsledky, závěr

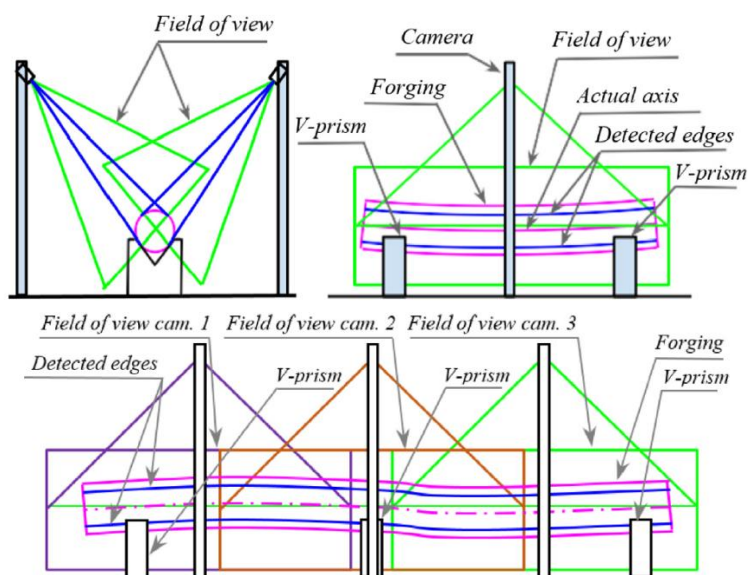
Laboratorní experimenty proběhly pomocí měření zkušebního objektu – krychle o délce hrany 140 mm. Maximální dosažená chyba při tomto experimentu dosahovala 0,62 %. Praktické testy v průmyslovém prostředí byly provedeny na válcovém výkovku o průměru 115 mm (není jasné, jak byl tento rozměr získán, ani jestli byl válcový polotovar dostatečně rovný). Relativní chyba provedeného měření byla v tomto případě 0,79 %, což bylo považováno za dostatečné. Hlubší statistická analýza přesnosti měření nebyla provedena.



obr. 3-37 Fotografie pořízené měřícím systémem během testů v laboratoři [58].

-
- [25] A. Zatocilova, R. Poliscuk, D. Palousek, and J. Brandejs, “Photogrammetry based system for the measurement of cylindrical forgings axis straightness,” in *Conference on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII*, 2013, vol. 8788.
- [59] A. Zatočilová, “Měření a vyhodnocování přímosti osy rotačních výkovků pomocí fotogrammetrie a analýzy obrazu,” *Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně*, 2014.
- [26] A. Zatocilova, D. Palousek, and J. Brandejs, “Development of a photogrammetry system for the measurement of rotationally symmetric forgings,” in *Conference on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX*, 2015, vol. 9525.
- [27] A. Zatocilova, D. Palousek, and J. Brandejs, “Image-based measurement of the dimensions and of the axis straightness of hot forgings,” *Measurement*, vol. 94, pp. 254–264, 2016.
-

Účelem souboru prací [25–27, 59] je objasnit, zda je možné měřit geometrii horkého válcového objektu (výkovku) pomocí pasivní fotogrammetrie na základě snímání jeho siluet. V pracích je postupně takový systém navrhován a prakticky ověřován v laboratorních podmínkách. Měření je průměr, délka a přímota osy válcových výkovků. Systém pracoval s dvěma kalibrovanými kamerami sledující výkovek, ležící v prizmatech. Kamery sledují výkovek z radiálního směru, optické osy jsou kolmé a směřují do středu výkovku (obr. 3-38). Systém byl schopen díky snímání siluet měřit pouze výkovky válcového tvaru (které jsou ale nejčastěji vyráběné). Zároveň byl navržen i koncept systému pracující na navrženém principu, který využívá více než dvě kamery, schopný měřit i výkovky o délce 20 m a průměru 6 m.

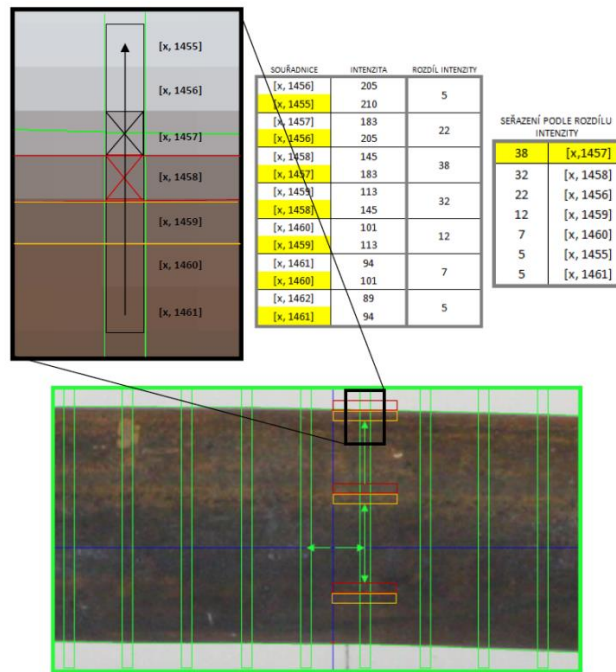


obr. 3-38 Schéma pasivního fotogrammetrického systému [27].

Kamery systému byly kalibrovány pomocí několika kruhových nekódovaných kalibračních značek, rozmístěných ve scéně. Přesná poloha těchto značek v prostoru byla změřena fotogrammetrickým systémem TRITOP. Kalibrační značky byly v obraze nalezeny na základě prahování a výběru eliptických oblastí o zadané velikosti. Středů značek v obraze byly vypočítány metodou těžiště. Vzhledem k absenci kódování značek nebyl proces jejich rozpoznání, respektive asociace souřadnic značek v prostoru a souřadnic jejich obrazu na čipu kamery automatizován a byl tedy proveden uživatelem. Samotná kalibrace využívala metodu přímé lineární transformace. Zkreslení snímku bylo korigováno před vstupem fotografie do samotného výpočtu. Bylo uvažováno pouze radiální zkreslení (1 koeficient) se středem ve středu snímku. Koeficient zkreslení byl odhadnut uživatelem.

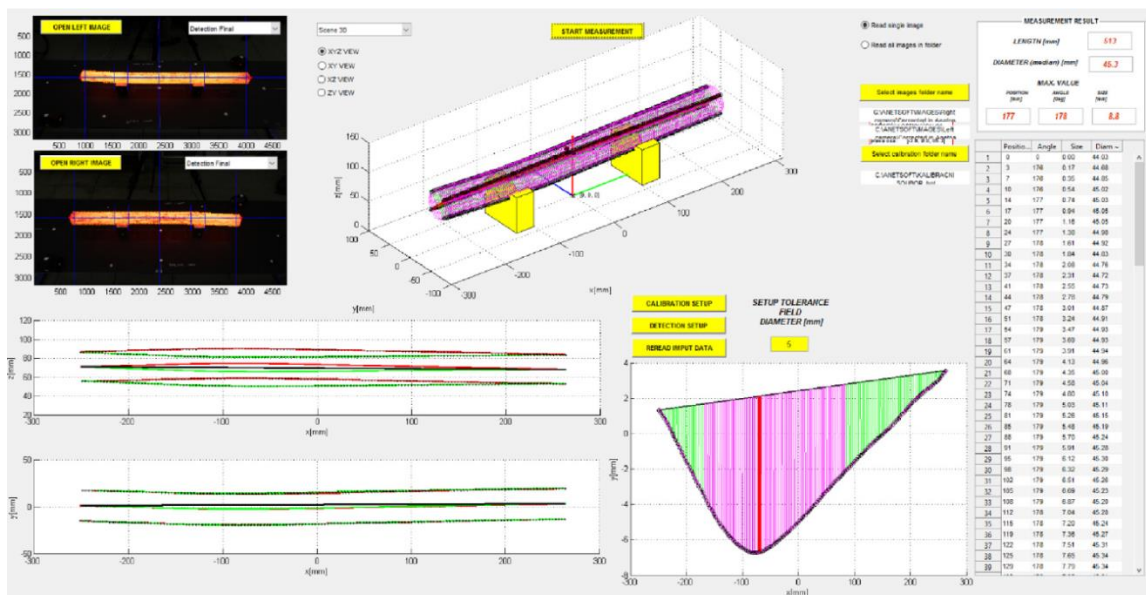
Systém dále využíval metodu detekce hran, která pracovala v několika fázích:

- Nalezení hranových bodů: metoda pracovala se dvěma obdélníkovými okny posunutými o jediný pixel skenujícími obraz ve směru od středu snímku horizontálně nebo vertikálně. Jestliže se mediány oken lišily o prahovou hodnotu nebo více, okolo daného místa byla předpokládána hrana (obr. 3-39).
- Zpřesnění detekce – byl zaveden předpoklad, že hrana se nachází v pixelu, kde je největší první derivace stupně šedi. Tento největší gradient byl hledán v okně o velikosti 1×7 pixelů (obr. 3-39).
- Validace hran – platnost nalezených hranových bodů byla kontrolována na základě návaznosti nalezených hranových bodů.
- Vyhlazení hran – hrany byly vyhlazeny Savitzki-Golay filtrem.



obr. 3-39 Schéma metody nalezení a zpřesnění souřadnic hranových bodů [59].

Geometrie výkovku byla určena ze získaných siluet pomocí prokládání nalezených hran kružnicemi v jednotlivých řezech (viz obr. 3-40). Referenční přímá osa výkovku byla určena na základě známé polohy a geometrie prizmat a průměru výkovku. Na základě vzdálenosti kamery a referenční (přímé) osy byla počítána měřítka jednotlivých řezů (vliv zakřivení výkovku na měřítko byl zanedbán, nicméně byla nastíněna metoda iteračního výpočtu pro odstranění této nepřesnosti). Rekonstrukce osy proběhla proložení siluet (hran) kružnicemi (předpokládanými řezy) – spojnice jejich středů poté určuje osu objektu. Aby byla chyba proložení minimalizována i v případě větších křivostí osy výkovku, byl nastíněn iterační výpočet, kdy byly roviny, ve kterých leží kružnice, natačeny tak, aby jejich normála byla tečná k ose výkovku.



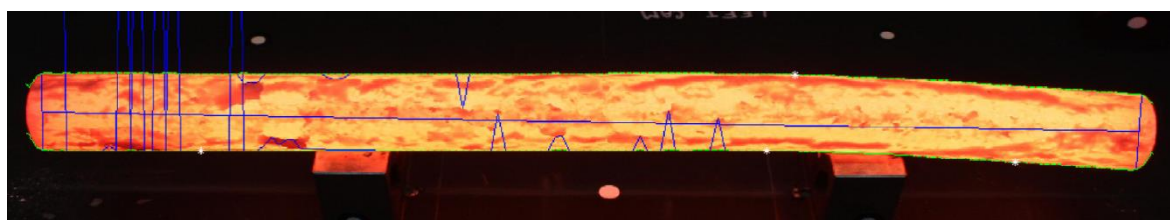
obr. 3-40 Rekonstrukce geometrie výkovku a určení přímosti jeho osy [59].

Testovací aparatura využívala 2 běžné barevné digitální zrcadlové kamery a objektivy s proměnnou ohniskovou vzdáleností. Tyto kamery byly umístěny na stativěch. Výkovek byl vždy vložen do prizmat o známé poloze. Tato prizmata byla připevněna k černé ocelové desce, na které byly umístěny i kalibrační značky. Přesnost měření byla určena pomocí porovnání vypočítané geometrie výkovku s referenčními rozměry. Referenční geometrie výkovku byla získána za studena pomocí metody 3D skenování skenerem ATOS TripleScan (GOM). Byla kompenzována tepelná roztažnost materiálu.

Výsledky

Navržené metody byly testovány v laboratorních podmínkách na ocelových válcových polotovarech s průměrem 50 mm, délkou 500 mm a byly prováděny za studena i za tepla (povrchová teplota byla v tomto případě okolo 1000 °C). Bylo použito celkem 7 vzorků s různou deformací přímosti. Aby mohly být výsledky statisticky vyhodnoceny, každý vzorek byl měřen 10 ×. Chyba kalibrace během experimentů se pohybovala v řádech několika pixelů.

Detekce hran pracovala s pixelovou přesností a byla citlivá na šum a texturu výkovku nebo pozadí. Výsledek detekce lze vidět na obr. 3-41. Falešné hrany byly nicméně odfiltrovány metodou validace hran. Statistické vyhodnocení výsledků lze vidět na obr. 3-42.



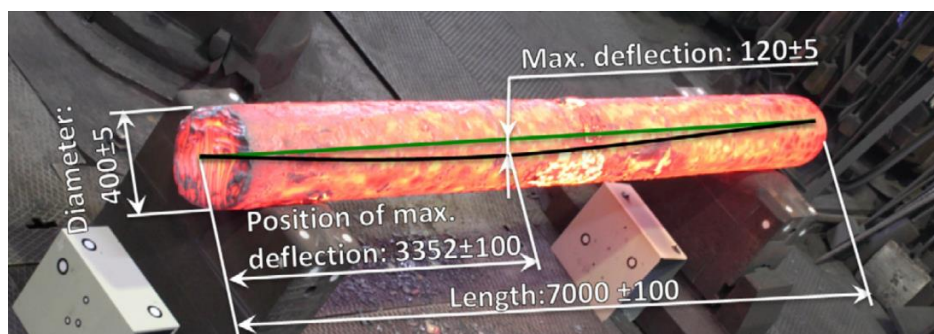
obr. 3-41 Fotografie výkovku s nalezenými hranami – nalezené hrany před validací jsou vyznačeny modře [59].

Sample no.	Max. deflection (unheated)		Dimensions (unheated)		Dimensions (heated)	
	Size [mm]	Position [mm]	Length [mm]	Diameter ~ [mm]	Length [mm]	Diameter ~ [mm]
1	-0.47	-12.00	3.4	0.1	-	-
2*	0.05	0.80	0.5	0.0	-1.5	-0.3
3*	0.21	-3.28	1.0	-0.2	-3.5	-1.3
4	0.21	-8.21	6.2	0.0	-	-
5	1.28	-8.04	6.1	-0.1	-	-
6*	0.66	-5.13	-0.5	0.0	0.0	-1.6
7	2.05	6.56	-0.4	0.0	-	-
	<±2	<±12	<±6.2	<±0.2	<±3.5	Effect of scales?
	Dependent on the shape		<1%	<0.5%	<1%	

obr. 3-42 Průměrná chyba měření vzorků 1-7, zleva: maximální průhyb studených vzorků (velikost, pozice), rozměry studených vzorků (délka, průměr), rozměry zahřátých vzorků (délka, průměr) [27].

Závěr

Měřicí systém dosahoval i přes nepřesnou kalibraci nebo problémy s nalezením siluet a méně přesnou rekonstrukci geometrie (a v důsledku toho přítomnost systematických chyb) uspokojivé přesnosti – chyba měření byla ve všech případech menší než 2 %. Bylo předpokládáno, že bude tato chyba přímo úměrně závislá na měřítku scény a na základě tohoto předpokladu byla formulována prognóza přesnosti systému v reálných průmyslových podmínkách, viz obr. 3-43. Na základě této prognózy byla metoda měření výkovek pomocí snímání jejich siluet vyhodnocena jako vhodná.



obr. 3-43 Prognóza přesnosti pasivního fotogrammetrického systému založeného na snímání siluet [59].

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

Během výroby válcových výkovků je potřeba měřit jejich geometrii. V případě měření těžkých výkovků, vyrobených volným kováním, mohou jejich rozměry být až 20 metrů na délku a 6 metrů v průměru, kovací teploty se pohybují v rozmezí 800-1250 °C [27, 44]. Autoři studií v tomto oboru se zabývají měřením průměru (např. [18]), průměru a délky (např. [44]), přímosti osy (např. [27], existuje i komerční řešení [13]) nebo celkové geometrie výkovků (např. [47]). Výzkum se dělí na aplikaci dvou základních přístupů – aktivní (využívá se externího zdroje světla, je zde snaha dosáhnout invariance vůči záření výkovku) a pasivní (využívá přímo světla, které emituje výkovek).

4.1 Shrnutí a zhodnocení vlastností metod měření výkovků

Na základě níže zmíněných faktů prokázaly metody pasivní fotogrammetrie velký potenciál pro měření výkovků v procesu výroby. Metoda měření tvaru výkovku na základě jeho siluet potenciálně splňuje reálné potřeby průmyslu při stanovené aplikaci a vykazuje mnoho výhod (rychlost měření, absence velmi silného zdroje světla) za cenu složitější aplikovatelnosti těchto principů. Metoda pasivní stereovize sice spíše nespĺňuje požadované charakteristiky, vykazuje ale mnoho výhod, bude tedy také zkoumána.

4.1.1 Laserové skenery

Výkon laserového skeneru v rámci této specifické aplikace zřejmě není významně ovlivněn [44–46]. Měřicí systém je kompaktní a lze ho použít i na velké polotovary nebo polotovary nepravidelných tvarů. Tato metoda je vhodná zejména k měření přímosti osy, souososti jednotlivých částí polotovaru, případně jeho průměru. Např. LaCam Forge zde dosahuje chyby měření 5 mm (1σ), při měření výkovků až do 28 m délky [13]). Při měření délkových charakteristik je chyba vyšší – směrodatná odchylka měření délky nebo výšky polotovarů je více než 10 mm [13]. Autoři publikací na toto téma se zabývají měřením průměru a délky menších polotovarů, kde dosahují výrazně vyšší relativní chyby měření - pod 2 % [44, 45]. Rozdíl lze zřejmě vysvětlit nižší kvalitou využitého laserového skeneru. Čas měření větších polotovarů je v řádu minut (2 – 3 minuty v případě [13]). Během skenování (řádově až desítky sekund [13, 44, 45]) je nutné zamezit jakémukoli pohybu výkovku.

Vzhledem k tomu, že výkon laserových skenerů není nijak výrazně ovlivněn specifikami při měření výkovků, je jednoduché této princip aplikovat. Zřejmě i proto dosáhlo toto

řešení jako jediné průmyslové aplikace. Laserový skener je navíc kompaktní a vzhledem k tomu, že výstupem měření je mračno bodů, tak je tato technologie použitelná i na nepravidelné geometrické tvary. Mohou být měřeny i velmi těžké výkovky délkou až v desítkách metrů. Použitelnost tohoto řešení je ověřená, vzhledem k tomu, že dosáhlo komerčního využití. Je možné měřit všechny charakteristiky výkovků zmíněné ve „Vymezení řešené problematiky“. Nevýhodou tohoto přístupu je omezená přesnost měření délkových charakteristik polotovarů, dlouhá doba skenování, během kterého musí být výkovek nehybný a vysoká cena laserového skeneru.

4.1.2 Aktivní fotogrammetrie

Pomocí aktivní fotogrammetrie je možné měřit výkovky nepravidelných tvarů. Největším problémem těchto konceptů je dosáhnout dostatečného odstupů mezi signálem (promítané světlo) a šumem (světlo emitované výkovkem, světlo z okolí) [21, 22]. Byly navrženy metody (spektrálně-selektivní metoda [21] nebo diferenciální přístup [16]), jak tento odstup zvýšit, přesto je nutný velmi silný zdroj světla (obvykle liniový laser nebo lasery, výkony se pohybovaly v řádech od stovek až po tisíce mW). Byl rozvíjen i koncept používající DLP projektor [18, 19] – autoři nicméně neuvažovali světlo z jakýchkoli dalších světelných zdrojů v kovárně [21].

Výhodou metod aktivní fotogrammetrie je potenciální rychlost měření, díky tomu, že jsou tyto systémy založené na digitálních kamerách. Na druhou stranu, systémy založené na digitálních kamerách je třeba kalibrovat, což může být ve velkém měřicím objemu problematické [23]. Obecným problémem aktivních přístupů je, že výkon světelného zdroje limituje měřicí objem. Tento přístup zřejmě zhoršuje bezpečnost v kovárně, hrozí poškození zraku. V literatuře není uveden žádný případ ověření přesnosti měření výkovku na polotovaru o rozměrech v řádu metrů.

Aktivní stereovize

Přesnost aktivní stereovize byla testována pouze v laboratorních podmínkách, měřen byl ve všech případech pouze průměr nebo šířka objektů. V případě řešení s využitím DLP projektoru byly měřené rozměry 100-600 mm [18, 19, 24]. Chyba měření se postupným vývojem podařila snížit v případě použití DLP projektoru z přibližně 1 % [18] až na 0,5 % [24]. Přesnost byla nicméně verifikována pouze v laboratoři na studeném objektu. V případě využití liniových laserů místo DLP projektoru byla již chyba měření ověřována na malém (okolo 100 mm) horkém objektu (1250 ° C), nicméně opět v laboratorních podmínkách. Potřebný výkon liniového laseru byl v tomto případě stanoven na 1000 mW. Chyba měření se pohybovala pod 0,3 % [22]. Byl vytvořen i koncept využívající pole liniových laserů a dva stereopáry kamer s celkovým zorným polem širokým až 8,6 metru, přesnost tohoto systému ale nebyla verifikována [20].

V případě využití aktivní stereovize je teoreticky možné měřit celou geometrii těžkého výkovku (např. metodou popsanou v [20]) a tím dostat všechny požadované charakteristiky, je nicméně potřeba využít velké množství liniových laserů nebo jiných zdrojů světla o velmi vysokém výkonu.

Liniové skenery

V literatuře byl tento přístup použit na měření polotovarů o velikosti do 800 mm. Pomocí této metody lze měřit i objekty komplikovaných tvarů. Byl měřen průměr [15, 16] s relativní chybou 0,5 % (opakovatelnost měření v průmyslových podmínkách). V tomto případě byl využit jediný laserový skener, který se pohyboval na lineárním vedení po délce výkovku. Pomocí této metody lze měřit i celá geometrie výkovku [17, 47] s velmi vysokou přesností (např. dosažená nejistota měření 9 μm při měřených délkách až 800 mm [47]). V případě měření celé geometrie byla použita stanice obklopující měřený objekt, obsahující více skenovacích jednotek. Výkovek byl v tomto případě posouván nebo rotován pomocí velmi přesného manipulačního zařízení.

V případě využití liniového skeneru je možné přesně měřit zřejmě jen průřez polotovaru, případně celkovou geometrii menších polotovarů při využití soustavy více liniových skenerů a využití velmi přesného manipulátoru, pohybujícím se samotnými skenery nebo s výkovkem. V případě výkovků s velkými rozměry je využití těchto systémů při měření celkové geometrie (např. přímosti osy) zřejmě problematické, vzhledem k obtížné manipulaci s polotovarů. Liniové skenery tedy zřejmě nejsou vhodné pro měření přímosti osy delších polotovarů – přesnost zde zřejmě bude výrazně ovlivněna případnými deformacemi lineárního vedení, po němž se laser s kamerou nebo výkovek pohybují (viz např. platforma použitá v [47]).

4.1.3 Pasivní fotogrammetrie

Výhodou pasivních fotogrammetrických systémů je oproti již zmíněným přístupům teoreticky neomezený měřicí objem, nízká cena komponent, vysoká rychlost a bezpečnost měření (není třeba zdroj světla). Souhrnnou nevýhodou fotogrammetrických přístupů je opět nutnost kalibrovat kamery. Tím, že se přístup obecně spoléhá na světlo, které vyzařuje samotný výkovek, je metoda použitelná pouze na polotovary s vysokou povrchovou teplotou, měření chladných výkovků nicméně není zaměřením této práce.

Snímání siluet

Systémy založené na snímání siluet jsou použitelné na měření pouze pravidelných tvarů. Bylo testováno 2D [60] a 3D měření [25–27, 58, 59]. V případě 2D měření byla měřena výška a šířka měřených vzorků [60] a v případě 3D měření pak pouze jejich průměr [58] nebo jejich délka, průměr a přímost osy výkovku [25–27, 59] (omezení na válcové polotovary). V případě 2D měřicího systému byla jeho přesnost ověřena v laboratorních

podmínkách na kvádrech o teplotě 1000 ° C a rozměrech v desítkách mm. Dosahovaná chyba měření činila přibližně 0,5 mm. Při experimentálním ověření přesnosti systému měřícího průměr [58] byl test proveden přímo v průmyslovém prostředí na dlouhém válcovém výkovku o průměru 115 mm, relativní chyba při experimentu byla 0,8 %. Není nicméně jasné, jak autoři získali referenční rozměr, potenciální odchylky od přímosti osy byly zanedbány (vzhledem k triangulaci přímek) a rovněž byla zanedbána chyba, která plyne z problému, že kamery systému nevidí stejné siluety. Experimentální ověření přesnosti systému měřící průměr, přímost osy i délku polotovaru bylo provedeno pouze v laboratorních podmínkách na polotvarech o délce 500 mm [27]. Chyba měření zde činila až 2 %. Byly nicméně využity pouze základní metody kalibrace kamer nebo zpracování obrazu. Hlavním problémem je zde omezený kontrast objektu na pozadí, nebo kontrastní okraje a s tím souvisí problematická segmentace nebo nalezení hran, tento problém může vyústit v nižší přesnost nebo spolehlivost měření.

Pomocí metody, popsané v [27], založené na snímání siluet, je možné měřit všechny požadované geometrické charakteristiky výkovku. Metoda navíc vykazuje mnoho výše zmíněných výhod, za cenu neuniverzálnosti a obtížnější aplikace. Dosahovaná chyba měření 2 % je pro splnění požadovaných standardů příliš velká. Hypotézou je, že tato chyba byla převážně způsobena využitím pouze jednoduché metody kalibrace kamer nebo základních pixelově přesných metod analýzy obrazu.

Pasivní stereovize

Výstupem měření pomocí této metody je mračno bodů, je tedy možné měřit geometrii i výkovků nepravidelných tvarů. V případech obou nalezených zdrojů autoři osvěcují horký měřený objekt světelným zdrojem a využívají spektrálně-selektivní metodu, aby bylo odstíněno světlo, které emituje samotný výkovek. Měření byly malé polotovary, v obou případech nebyla velikost explicitně uvedena (v případě [30] se jednalo o klikovou hřídel automobilového motoru). Tento přístup byl testován v průmyslových podmínkách, výsledná chyba měření dosahovala přibližně 0,5 % [30] (vzdálenost triangulovaných bodů od referenčního tvaru).

Pomocí zmíněných metod je možné, kvůli využití světelného zdroje, měřit pouze polotovary menších rozměrů. Pomocí tohoto principu je problematické měřit například délkové charakteristiky výkovků.

4.2 Oblasti chybějícího poznání

Sledování, kontrola kvality nebo měření rozměrných horkých výkovků pomocí bezkontaktních měřících systémů je celkově málo probádanou oblastí – touto problematikou se zabývalo pouze několik vědeckých týmů na celém světě.

Komplexní rešerše napříč systémy, které jsou založeny na digitálních kamerách odhalila více fenoménů nebo specifíků, které mají negativní vliv na přesné měření nebo aplikaci známých principů v této aplikaci. Jedním z důležitých specifíků této oblasti je samotná kalibrace kamer. Přesná kalibrace je nicméně ve velkém objemu specifickým úkolem [23, 33]. Průmyslové prostředí klade navíc nároky na robustnost použité metody. Kvalita snímků výkovku může být negativně ovlivněna zářením horkého výkovku na širokém pásmu frekvencí a může vyvolat rozmazání snímku [54] (je třeba využívat pásmové filtry, které mohou mít navíc kladný vliv na kontrast výkovku [57]). Je třeba používat složité metody segmentace a měření hran kvůli kontrastním okrajům a komplexnosti pozadí [27, 55]. Přesnost systému může být také negativně ovlivněna horkou atmosférou, s odlišným indexem lomu, obklopující výkovek [12, 31, 32]. V literatuře chybí studie, jaký je souhrnný dopad těchto fenoménů nebo specifíků na vlastnosti pasivního fotogrammetrického měřicího systému, nebo jak řešit některé partikulární problémy. Nelze tak odpovědět na otázku, zda takový systém může splnit stanovené požadavky průmyslového prostředí.

Kalibrace

Navrhované metody kalibrace kamer systémů pro měření výkovků pracují s velkým 2D kalibračním polem [18, 19, 21, 22], promítaným polem [20, 23] nebo různými manipulátory [16, 23]. Tyto objekty nebo nástroje nejsou praktické pro kalibraci kamer s velkým zorným polem v průmyslovém prostředí a není umožněna kontinuální kalibrace parametrů kamer těchto systémů. Ty se mohou měnit v důsledku teplotní roztažnosti nebo vibrací, to může vést ke zhoršení přesnosti měřicího systému v čase. Tato dekalibrace systému může vnášet do měření zásadní chybu, viz [47]. Pro přesnou kalibraci kamer s velkým zorným polem lze použít např. prostorovou resekci – tato metoda využívá pole kódovaných značek se známou polohou v prostoru (není třeba velký kalibrační objekt blokující měřicí prostor) a dosahuje vysokých přesností [5, 33]. V případě [33] jsou navíc souřadnice kalibračních značek měřeny fotogrammetrickým systémem, což umožní se vyhnout velkým kalibračním objektům a kalibrační pole sestavit přímo na místě. V literatuře nicméně chybí informace o tom, jak tuto metodu aplikovat pro kalibraci kamer systému pro měření výkovků, jaké jsou limity využití této metody a jakých výsledků lze pomocí této metody dosáhnout.

Prostorová resekce využívá ke kalibraci pole kódovaných kalibračních značek se známou polohou. Standardní systémy kruhových kódovaných kalibračních značek, využívané ve fotogrammetrii, nejsou pro aplikaci v prostředí těžkého průmyslu, kde může dojít k poškození nebo znečištění kódu značek, dostatečně robustní – nejsou schopny korekce chyb [4, 34–37, 39]. V literatuře není uvedeno, jak dosáhnout korekce chyb u tohoto designu kalibračních značek a s tím spojené vyšší robustnosti systému značek. Korekci chyb využívají běžné robustní systémy čtvercových kalibračních značek pro aplikace spojené s počítačovým viděním a virtuální realitou, např. ArUco [40]. Systém korekce

chyb u těchto značek zahrnuje generátor knihoven kalibračních značek, který optimalizuje Hammingovu vzdálenost mezi kódy značek v knihovně kódů kalibračních značek. Rozeznání kalibrační značky a korekce chyb funguje na základě přiřazení nejvíce podobného kódu z knihovny značek rozpoznávané kalibrační značce. Implementací podobné korekce chyb v případě kruhového designu kódovaných kalibračních značek by mělo dojít k dosažení vyšší robustnosti, oproti dostupným řešením.

Odstup signál – šum

Metody pasivní fotogrammetrie využívají siluety nebo strukturu na povrchu objektu k jeho rekonstrukci. Aby bylo možné strukturu nebo siluety využít, musí být ve fotografiích dostatečně kontrastní. Pro zvýšení kontrastu siluet vyplývá z literatury [54, 57] vhodnost spektrálně-selektivní metody (využití barevných filtrů). Z literatury zároveň vyplývá závislost vhodného filtru na aktuální teplotě výkovku [57], ale logicky i na pozadí za výkovkem. Přestože je možné předpokládat, že spektrálně-selektivní metoda částečně potlačí komplexní pozadí i kontrastní okraje, bude zřejmě i přesto nutné pro dosažení vysoké spolehlivosti měření aplikovat metodu validace hran, podobně jako např. v [27, 55]. V literatuře chybí analýza možnosti využití kombinace těchto dvou metod a není jasné, jestli bude možné spolehlivě dosáhnout sub-pixelové detekce hran.

V literatuře dále chybí studie výběru vhodného barevného spektra při snímání povrchové struktury výkovku, například za účelem rekonstrukce geometrie výkovku pomocí pasivní stereovize. Potenciální vhodnost barevných filtrů na zvýšení kontrastu struktury na povrchu výkovku vyplývá z publikovaných fotografií pořízených s barevnými filtry [57].

Teplotní jevy v atmosféře okolo výkovku

Ve většině publikací zabývajících se tematikou měření výkovků nebyl zkoumán vliv horké atmosféry okolo výkovku (s rozdílným indexem lomu) na přesnost měřicího systému – není známo, jak moc je tento vliv významný. Problematika, jak tento vliv do jisté míry v dané aplikaci predikovat, je zachycena v publikacích [12, 31, 32]. Danou situaci měření lze dokonce simulovat pomocí metody konečných prvků a trasování světelných paprsků, výsledné ovlivnění činilo až 50 μm při měření polotovaru o průměru 27 mm [12]. Autor simulace nicméně neuvažuje turbulentní proudění vzduchu, ani různé proudy vzduchu, které se v reálném prostředí mohou vyskytnout. Autor simulaci experimentálně nepotvrdil. Jiný autor se pokoušel predikovat chování válcové oblasti horkého vzduchu, který se za ideálních podmínek chová jako cylindrická čočka [32]. Předpokládané chování se nicméně výrazně lišilo od výsledků skutečných experimentů (experimentálně naměřené hodnoty ovlivnění byly nižší než předpokládané). Autoři [47] vyvíjející soustavu velmi přesných liniových skenerů pro skenování geometrie horkých výkovků s měřicím prostorem o průměru 800 mm předpokládali v jejich případě ovlivnění měření horkou atmosférou do 30 μm , které nepředpokládali, že by bylo účelné kompenzovat. Výsledná celková nejistota měření systému činila nakonec pouze 9 μm , řešením tohoto vlivu se tedy už dále nezabývali. Vzhledem k selhávajícím predikcím tohoto vlivu tedy není jasné, jaký bude mít tento fenomén vliv na pasivní fotogrammetrické měření ve velkém měřicím objemu.

Vlastnosti pasivního měřicího systému

Vhodnost rekonstrukce geometrie výkovku na základě snímání jeho siluet ze snímků z pasivního stereopáru byla ověřena pouze v laboratorních podmínkách na malých objektech o délce do 500 mm [27]. Byly nicméně využity pouze základní metody kalibrace kamer nebo zpracování obrazu, které mohou mít za důsledek právě vyšší chybu měření (2 % [27]). Není jasné, jestli bude možné přes kombinaci negativních vlivů dříve jmenovaných fenoménů dosáhnout stanovených průmyslových standardů. V literatuře tedy chybí test vlastností tohoto přístupu v reálných průmyslových podmínkách za použití pokročilejších sub-pixelově přesných metod kalibrace nebo detekce hran výkovků.

Pasivní stereovize

Předpokladem pro realizaci metody pasivní stereovize je viditelná textura na povrchu měřeného objektu zachycená na snímcích. Taková struktura je na fotografiích výkovků ve zdrojích [27, 57] patrná. Aplikace pasivní stereovize na měření horkých výkovků byla testována pouze na malých polotovarech osvětlených externí zdrojem světla, kdy byla použita spektrálně selektivní metoda [29, 30]. Nevýhodou využití externího zdroje světla je zřejmě limitace měřicího objemu. Pomocí pasivní stereovize bylo možné získat mračno bodů reprezentujících povrch výkovku. Zaznamenaná relativní chyba byla v případě publikace [30] přibližně 0,5 %. Obecně je ale možné dosáhnout pomocí tohoto přístupu vysoké přesnosti, využitelné i při inspekci strojních dílů (např. [48]), nebo vysoké

rychlosti, využitelné i při aplikacích, probíhajících v reálném čase [53]. V literatuře chybí studie, kde by bylo měření výkovků na základě pasivní stereovize provedeno bez umělého nasvětlení výkovku (výhoda odstranění limitace omezeného měřicího objemu) a studie, která by se zabývala výběrem vhodných metod pasivní stereovize (výkon různých metod se může na různých úlohách výrazně lišit [50–53]).

4.3 Shrnutí stěžejních poznatků z rešerše

- Pasivní fotogrammetrie je potenciálně vhodnou metodou pro měření těžkých výkovků, která teoreticky nabízí široké portfolio výhod oproti ostatním metodám. Jedná se o poměrně neprobádanou oblast.
- Hlavními specifiky nebo fenomény, které mají negativní vliv na vlastnosti pasivního fotogrammetrického systému je komplexnost, nestálost a velikost měřicího prostoru, nízký odstup signál-šum (rušivé okraje, širokospektrální záření výkovku nebo komplexní pozadí továrny) a tepelně ovlivněná atmosféra okolo výkovku s odlišným indexem lomu oproti okolní atmosféře.
- Rekonstrukce geometrie výkovku na základě snímání jeho siluet je potenciálně vhodnou metodou pro měření těžkých výkovků. V literatuře je udávána relativní chyba měření pomocí této metody 2 % při testech pouze v laboratorním prostředí. Hypotézou je, že tato chyba byla převážně způsobena využitím pouze jednoduché metody kalibrace kamer nebo základních pixelově přesných metod analýzy obrazu a že by takový systém mohl splnit požadavky průmyslového prostředí, i přes vliv nepříznivě působících fenoménů. Chybí ověření této hypotézy a testy využitelnosti této metody v průmyslových podmínkách.
- Rekonstrukce geometrie výkovku na základě pasivní stereovize byla testována pouze při využití externího osvětlení a spektrálně-selektivní metody. Pomocí pasivní stereovize lze teoreticky získat přesné výsledky měření geometrie. Hypotézou je, že horký výkovek bude možné měřit s dostatečnou přesností (vyhovující průmyslovým požadavkům) bez využití externího osvětlení. Odstranění nutnosti využití osvětlení vede ke zjednodušení systému a mohlo by vést k odstranění limitace omezeného měřicího objemu.
- V případě měření geometrie výkovků v průmyslovém prostředí nelze jednoduše získat referenční rozměry. Jediným alternativním způsobem, jak lze požadované geometrické charakteristiky měřit, je využití laserového skeneru, který má ale omezenou přesnost. Ukazatelem přesnosti systému tedy bude dosažená opakovatelnost měření společně s ověřením přesnosti kalibrace.

- Spektrálně-selektivní metoda může mít výrazný vliv na kontrast siluet nebo struktury na povrchu výkovku. V literatuře nicméně chybí studie využití barevných filtrů při využití pasivní stereovize.
- Horká atmosféra okolo měřeného výkovku může negativně ovlivnit přesnost měření výkovků. V literatuře chybí experimentální ověření míry ovlivnění přesnosti optického měření ve velkém měřicím objemu tímto jevem.
- Potenciálně vhodnou metodou pro kalibraci kamer pasivního měřicího systému pro měření těžkých výkovků je prostorová resekce využívající robustní kalibrační značky.
- Ve fotogrammetrii běžně využívané kruhové kódované kalibrační značky neumožňují korekci chyb a mohly by vykazovat nízkou úspěšnost rozpoznání v komplexních průmyslových podmínkách. Hypotézou je, že bude možné na tento design značek implementovat metodu korekce chyb (inspirace u čtvercového designu značek, používaného v aplikacích počítačového vidění) a dosáhnout tak spolehlivějšího rozpoznávání značek oproti stávajícím metodám.

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

V procesu hutní výroby vzniká potřeba měření odchylek tvaru těžkých kovaných polotovárů od požadované geometrie. Jedná se o měření délky, průměru a přímosti osy výkovků. Z rešerše vyplývá potenciál využití principů pasivní fotogrammetrie pro tento účel. Literatura ale neposkytuje dostatek informací pro přímou implementaci těchto principů, není jasné, jestli bude možné dosáhnout požadovaných vlastností systému. Chybějí informace o vhodných přístupech a metodách, na základě kterých by mohl být vyvinut pasivní fotogrammetrický systém pro tuto aplikaci. **Podstatou práce je objasnit možnosti aplikace principů pasivní fotogrammetrie při měření geometrie výkovků v procesu výroby.** To představuje na základě analýzy, vycházející ze znalostí principů fotogrammetrie, a výsledků systematického testování v průmyslovém prostředí:

- identifikovat kritéria pro výběr vhodných metod,
- navrhnout cílené modifikace dostupných algoritmů,
- diskutovat odezvu metod fotogrammetrie na specifika této aplikace nebo fenomény, ovlivňující vlastnosti měřicího systému,
- vyjádřit limity tohoto přístupu z hlediska přesnosti nebo nutných podmínek měření, porovnat tyto limity se stanovenými potřebami průmyslového prostředí.

Přínosem disertační práce je umožnit vývoj profesionálního měřicího systému pro měření výkovků, založeného na principu pasivní fotogrammetrie. Práce má teoreticko-experimentální charakter.

5.1 Cíl práce

Cílem práce je zhodnocení a diskuze vlastností potenciálně vhodných přístupů a metod pasivní fotogrammetrie při měření výkovků. Primárním cílem je zkoumat možnosti aplikace pasivního fotogrammetrického systému, který je založen na měření siluet výkovku. Tento přístup má potenciál splnit veškeré požadavky, kladené na systém pro tento účel, v průmyslu. Sekundárním cílem je pak zkoumat možnosti aplikace pasivní stereovize, pomocí níž je hypoteticky možné přesně měřit některé partikulární charakteristiky výkovků.

Hodnocení vlastností bude dosaženo jejich systematickým testováním na datech získaných v laboratorních nebo průmyslových podmínkách, zatížených negativními vlivy fenoménů, vyskytujícími se při této aplikaci. Výsledky a problémy, spojené s těmito vlivy, budou diskutovány na základě širších znalostí principů fotogrammetrie. Výsledné vlastnosti prototypu měřicího systému budou porovnány s reálnými potřebami průmyslového prostředí.

Konkrétní prostor pro výzkum zde vychází z identifikovaných mezer v literatuře a je bodově shrnut v dílčích cílech – závěry takových experimentů jsou důležité pro vývoj fotogrammetrického systému pro měření výkovků a prozatím je nikdo nepublikoval:

- Pokusit se aplikovat metodu korekce chyb na rozpoznávání kruhových kódovaných kalibračních značek. Porovnat navržené řešení s dostupnými metodami rozpoznávání těchto značek z hlediska robustnosti.
- Ověřit využitelnost prostorové resekce jako metody kalibrace fotogrammetrického systému pro měření výkovků. Změřit a vyhodnotit vliv tepelně ovlivněné atmosféry okolo horkého výkovku (v rozmezí kováčích teplot, v průmyslových podmínkách) na přesnost měřicího systému.
 - Pozn.: Přesnost kalibrace lze chápat jako jeden z klíčových indikátorů přesnosti celého měřicího systému.
- V průmyslových podmínkách realizovat pasivní fotogrammetrické měření výkovku na základě jeho siluet, diskutovat vlastnosti tohoto přístupu a problémy vznikající při této specifické aplikaci.
- Provést komparaci pasivního fotogrammetrického systému snímajícího siluetu s laserovým skenerem z hlediska přesnosti a další vlastností těchto systémů.
 - Laserové skenování dosáhlo jako jediné komerčního využití v této specifické aplikaci. Výkon laserového skeneru není v této aplikaci nijak významně ovlivněn. Jedná se tedy o srovnání s metodou, využívanou v praxi.
- Pokusit se aplikovat metodu pasivní stereovize bez využití externího zdroje světla. Aplikovat spektrálně-selektivní metodu a vyhodnotit vhodné spektrum pro snímání struktury na povrchu výkovku.
 - Pozn.: Vhodnými metodami snímání lze zřejmě dosáhnout zvýšení kontrastu nebo struktur na povrchu výkovku a tím zvýšit přesnost a spolehlivost metod měření pasivní stereovize.

5.2 Vědecké otázky a hypotézy

Ve spolupráci s průmyslovým partnerem byly stanoveny podmínky měření, velikost, tvar a teplota měřeného tělesa, a dále rozměry nebo geometrické charakteristiky, které je třeba měřit a s jakou přesností.

Kalibrace kamer je nutnou podmínkou pro provedení přesného optického měření.

„Bude ovlivnění kalibrace kamer negativními vlivy průmyslového prostředí akceptovatelné, vzhledem k požadavkům na přesnost a spolehlivost měřicího systému?“

- *Hypotéza: „Jako metodu kalibrace bude možné využít prostorovou resekci. Chyba kalibrace vzroste v závislosti na deformaci optického prostředí horkou atmosférou, bude ale vzhledem ke kladeným požadavkům na přesnost systému akceptovatelná¹.“*
 - *Odůvodnění hypotézy: Pro vysoce přesnou kalibraci kamer s velkým zorným polem lze využít prostorovou resekci [5, 33], souřadnice referenčních značek je v tomto případě možné měřit vysoce přesnými fotogrammetrickými systémy. Dle analytického modelu optických deformací horkou atmosférou budou odchylky měřených délek maximálně v řádu desetin procenta, dle závěrů praktických experimentů v laboratorních podmínkách lze ale očekávat skutečné ovlivnění výrazně nižší [32, 47].*
- *Hypotéza: „Potřeba vysoké robustnosti systému kódovaných kalibračních značek využívaného v průmyslovém prostředí je zjevná. Systém kruhových kódovaných kalibračních značek s implementovanou korekcí chyb bude dosahovat vyšší robustnosti oproti stávajícím metodám jejich rozpoznání.“*
 - *Současná řešení kruhových kódovaných kalibračních značek metody korekce chyb nenabízí [4, 34–37, 39]. Při vytváření systému fotogrammetrických kruhových kódovaných kalibračních značek bude možné pro dosažení vyšší robustnosti využít filozofii využívanou systémem čtvercových kalibračních značek ArUco. Systém využívá optimalizace vzdálenosti mezi kódy kalibračních značek v knihovně, korekce chyb rozpoznání je dosaženo přiřazením nejvíce podobného kódu z knihovny rozpoznávané kalibrační značce. Čtvercové kalibrační značky ArUco mají nejlepší schopnost korekce chyb z běžně využívaných systémů kalibračních značek v oboru počítačového vidění [40]. To souvisí i se schopností dosažení vyšší robustnosti, vzhledem k ostatním běžně využívaným systémům kalibračních značek [40].*

¹ Vysoká přesnost měření je vyžadována zejména při měření tvaru výkovků (přímosti osy), na což tento jev nemá výrazný vliv.

Jedním z potenciálně vhodných přístupů k měření tvaru a rozměrů výkovků je jejich měření na základě siluet.

„Bude možné dosáhnout stanovené přesnosti při měření stanovených geometrických charakteristik metodou měření výkovku na základě jeho siluet?“

- Hypotéza: *„Siluety bude možné v obraze dostatečně spolehlivě segmentovat a přesně měřit, aby byla umožněna 3D rekonstrukce výkovku. Měřené rozměry a tvar výkovku bude s potřebnou (stanovenou) přesností odpovídat skutečné geometrii výkovku.“*
 - Odůvodnění hypotézy: Pomocí měření siluet je nicméně možné jinak dosáhnout velmi přesného měření [1, 11]. Problém nízkého odstupu signál – šum siluet bude možné částečně řešit hardwarově (spektrálně-selektivní metodou [57]) a softwarově (validací hran [27, 55]). Vliv ostatních fenoménů, např. tepelně ovlivněné atmosféry okolo výkovku by neměl být překážkou v dosažení potřebné přesnosti [12, 32, 47]. Tato hypotéza je podpořena i faktem, že naprostá většina autorů se vlivem tohoto fenoménu na přesnost měření nezabývá.

„Jaký bude výsledek porovnání vyvíjené metody měření výkovků, na základě snímání jejich siluet, a komerčně využívané metody měření výkovků, pomocí laserového skenování, z hlediska přesnosti výsledků měření?“

- Hypotéza: *„Přístup měření výkovků na základě jejich siluet bude mít řadu výhod i nevýhod oproti komerčně využívané metodě měření výkovků laserovým skenerem. Celkově by takový systém mohl nabízet vůči laserovému skenování alternativu minimálně v některých aplikacích.“*
 - Odůvodnění hypotézy: Výkon laserového skeneru není nijak výrazně ovlivněn touto specifickou aplikací [13, 44, 45]. Přesnost laserového skeneru nicméně zřejmě nedostačuje k tomu, aby tyto data byla využita jako referenční. Zatímco výsledkem měření pomocí laserového skeneru je mračno bodů, výsledkem měření objektu pomocí navržené metody pasivní fotogrammetrie jsou rekonstruované siluety. Není jasné, jaké přesnosti budou tyto metody dosahovat při vyhodnocování stanovených geometrických charakteristik, nebo dalších pokročilých geometrických charakteristik výkovků (válcovitost, kruhovitost, sousost některých válcových částí apod.).

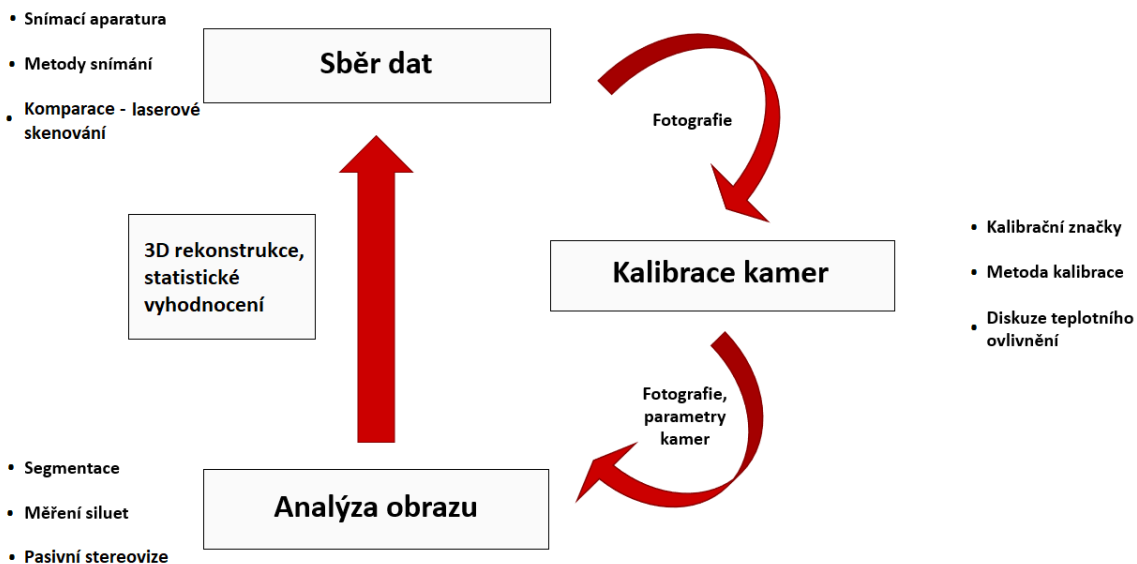
Druhým z potenciálně vhodných přístupů k měření některých geometrických charakteristik výkovků je pasivní stereovize.

„Bude možné dosáhnout dostatečné přesnosti při měření některých stanovených geometrických charakteristik výkovku pomocí pasivní stereovize? Bude možné využít světlo, které vyzářuje horký výkovek?“

- Hypotéza: „*Pomocí existujících metod pasivní stereovize, nebo jejich modifikací, bude možné provést hrubou 3D rekonstrukci povrchu výkovku. Získaný tvar výkovku bude s potřebnou přesností odpovídat skutečnému tvaru výkovku.*“
 - Odůvodnění hypotézy: Pomocí pasivní stereovize lze dosáhnout přesné rekonstrukce povrchu objektu [48]. Pasivní stereovize byla úspěšně testována na výkovku osvětleném xenonovou lampou za použití spektrálně-selektivní metody, metoda stereovize byla schopna najít velké množství odpovídajících si bodů na povrchu výkovku, nicméně zřejmě nepravidelně rozmístěných [29, 30]. Rekonstrukce povrchu byla v tomto případě dostatečně přesná [30] (testováno na malém výkovku).
- Hypotéza: „*Dostatečně přesné a spolehlivé rekonstrukce povrchu výkovku bude možné dosáhnout i bez využití externího osvětlení.*“
 - Odůvodnění hypotézy: Na publikovaných fotografiích výkovků bez externího osvětlení je patrná výrazná struktura [27, 57], jejíž kontrast navíc zřejmě závisí na použitém barevném spektru, ve kterém je snímán [57].

5.3 Návrh způsobu řešení

Spolupráce s průmyslovým partnerem umožní provádění experimentů v reálném průmyslovém prostředí. Práce zahrnuje 3, respektive 4 hlavní oblasti úkolů – sběr dat, řešení kalibrace kamer, řešení analýzy obrazu a řešení 3D rekonstrukce objektu. V rámci každé oblasti je třeba vyřešit podmnožinu inženýrských problémů, které mají vliv na výsledek měření. Zpětné vazby je dosaženo výpočtem indikátorů kvality výsledků jednotlivých metod, kde to lze provést (např. chyba reprojekce u kalibrace kamer), dále pak statistickým vyhodnocením výsledků (opakovatelnost) nebo porovnáním s jinou technologií měření. Pro porovnání budou použity standardní statistické metody. Zpětná vazba bude interpretována a v závislosti na ní a budou upravovány příslušné uzly, aby bylo dosaženo optimálních vlastností měřicího systému (z hlediska požadavků na přesnost, spolehlivost, rychlost a jednoduchost měření). Tento postup povede jak k vývoji fotogrammetrického systému pro měření výkovků, tak ke zodpovězení zmíněných vědeckých otázek. Schéma postupu řešení je graficky shrnuto na obr. 5-1:

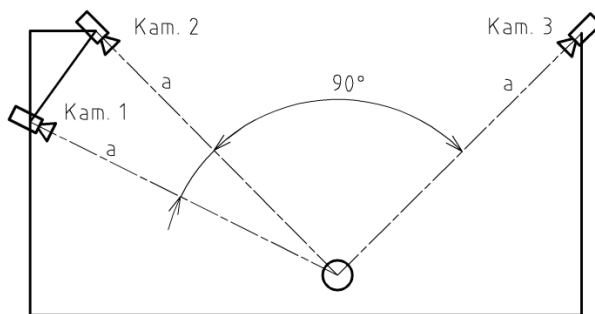


obr. 5-1 Schéma výzkumu a vývoje fotogrammetrického systému pro měření výkovek.

5.3.1 Sběr dat

Měřicí aparatura pro metodu rekonstrukce výkovek na základě jeho siluet.

Snímací aparatura byla navržena na základě požadavku přístupu snímání siluet objektu (optické osy kamer svírají pravý úhel a směřují z radiálního směru do středu výkovek [27], viz Kam. 2 a Kam. 3 na obr. 5-2). Kam. 1 byla přidána navíc, pro kontrolu a zvýšení přesnosti měření a případnému měření dalších geometrických charakteristik, jako je kruhovitost nebo válcovitost.



obr. 5-2 Schéma snímací aparatury.

Budou použity průmyslové kamery se stabilní vnitřní geometrií, aby ji nebylo potřebné kalibrovat při každém snímku. Kamery budou mít vysoké rozlišení kvůli dosažení vysoké přesnosti a kompaktních rozměrů kalibračních značek, jejichž minimální pixelová velikost ve snímku je dána potřebou metody pro výpočet jejich středů („Star ellipse operator [1]). Kamery budou osazeny pásmovými barevnými filtry, které potlačí pozadí a zajistí vyšší kontrast siluet [57]. Vzhledem k teplotnímu zatížení celého prostoru budou kamery vybaveny ochrannými kryty s tepelnou regulací, aby nedocházelo ke změně vnitřních

parametrů kamery v důsledku teplotních dilatací (podobné řešení jako např. [47]). Snímkování kamer bude synchronizováno. Zorné pole kamer bude nadimenzováno tak, aby bylo možné měřit s dostatečnou rezervou výkovky o zadané délce 5 m. Kamery budou kalibrovány v reálném čase, aby se zamezilo možným vlivům dekalibrace kvůli tepelné roztažnosti celého prostředí [47].

V rámci testování vlastností pasivní stereovize bude experimentální aparatura zahrnovat pouze stereopár zmíněných kamer s chladicím systémem a se základnou stereopáru 1 – 3 × menší než je vzdálenost stereopáru od objektu, aby bylo dosaženo co nejvyšší přesnosti [49]. Zorné pole bude řádově menší než v případě předešlého přístupu, aby bylo dosaženo dostatečně detailního snímání části výkovku, např. při měření jeho průměru. Kamery budou opět kalibrovány v reálném čase a snímání bude synchronizováno.

Dále bude ještě realizováno zařízení pro výběr vhodného spektra v rámci řešení možného pozitivního vlivu spektrálně-selektivní metody. Vzhledem k relativně rychlému chladnutí výkovku (což vede na dynamické měnění vzhledu scény) a potřebě vidět scénu v různých spektrech nejlépe zároveň, bude kamera opatřena automatickým zásobníkem pro výměnu barevných filtrů. Toto zařízení bude využito pouze pro 1 kameru. Kamera bude v tomto případě nekalibrovaná a bude od tepelných vlivů pouze odstíněna, aby nedošlo k jejímu poškození, vzhledem k tomu, že v tomto případě nebude docházet k žádnému měření.

Spektrálně-selektivní metoda

V literatuře není uvedeno, jakým způsobem těžké výkovky snímat, aby bylo dosaženo kvalitních snímků s vysokým kontrastem siluet nebo struktur (okují) na jejich povrchu. Ze studie nicméně vyplývá vhodnost spektrálně selektivní metody snímání, chybí ale relevantní vyhodnocení vhodného spektra [54, 57]. Vhodné spektrum pro snímání siluet výkovku (aby bylo dosaženo dostatečného kontrastu) závisí zejména na pozadí za výkovkem, vhodný filtr bude tedy pro tuto aplikaci vyhodnocen experimentálně.

Pro výběr vhodného barevného spektra pro pasivní stereovizi je plánován experiment se snímáním horkého polotovaru v různých spektrech, pomocí revolverového zásobníku barevných filtrů. Bude studován kontrast povrchových struktur a počet nalezených významných bodů na povrchu výkovku v obraze pomocí různých detektorů (různé detektory mohou mít výrazně odlišné výsledky na konkrétní úloze [50]). Výsledkem bude doporučení vhodného spektra pro snímání výkovku o specifikovaném rozmezí teplot.

Referenční rozměry nebo komparace s jinými metodami měření

V rámci sběru dat při aplikaci principu měření výkovku na základě jeho siluet budou kalibrovanými kamerami snímány výkovky různých rozměrů a tvarů reprezentující portfolio v průmyslu vyráběných výkovků. Bude nashromážděn dostatek dat pro statistické vyhodnocení opakovatelnosti měření a spolehlivosti jednotlivých přístupů, metod a

měřicího systému jako celku. Při snímání výkovků budou tyto výkovky zároveň snímány i laserovým skenerem pro následnou komparaci těchto metod.

Při sběru dat pro měření výkovku pomocí pasivní stereovize se předpokládá pouze menší polotovar (rozměry okolo 500 mm). V případě laboratorních testů lze získat referenční rozměry tohoto objektu 3D skenováním za studena a následnou kompenzací tepelné roztažnosti těchto rozměrů.

5.3.2 Kalibrace kamer

Metoda kalibrace kamer

Metody kalibrace kamer systémů pro měření výkovků, prezentované v literatuře, pracují s velkým 2D kalibračním polem [18, 19, 21, 22], promítaným polem [20, 23] nebo různými manipulátory [16, 23]. Tyto objekty nebo nástroje nejsou praktické pro kalibraci kamer s velkým zorným polem v průmyslovém prostředí, zároveň není umožněna kontinuální kalibrace vnějších parametrů kamer, které se mohou měnit např. v důsledku teplotní roztažnosti držáků kamer nebo deformací celého prostředí. Touto dekalibrací může ve výsledku vznikat zásadní chyba [47]. Kvůli zmíněným nevýhodám bylo nutné navrhnout jinou metodu kalibrace, která tyto nevýhody překonává. Na základě rešerše vyplynula vhodnost metody kalibrace kamer založené na prostorové resekci, pracující s kódovanými kalibračními značkami, jejichž poloha v prostoru je měřena komerčním fotogrammetrickým systémem. Pomocí této metody je možné dosáhnout vysoké přesnosti kalibrace, je možné vytvořit téměř libovolně velké kalibrační pole bez potřeby velkých kalibračních objektů a je možné dosáhnout kontinuální kalibrace některých parametrů kamery, které se mohou mezi jednotlivými snímky lišit (např. v důsledku tepelné roztažnosti držáků kamer). Přesnost této metody ve velkém měřicím objemu bude otestována pomocí 3D rekonstrukce souřadnic referenčních bodů ve snímcích se známou polohou.

Kalibrační značky

Během experimentů budou v souladu s požadavky kalibrační metody v měřicím objemu rozmístěny kalibrační značky tak, aby každá kamera snímala určitý počet značek rovnoměrně rozmístěných po snímku. Bude volen malý počet značek s ohledem na minimální potřebný počet pro kalibraci kamer. Přesná poloha značek v prostoru bude známa (změřena dostupným fotogrammetrickým systémem TRITOP). Velikost značek bude dimenzována tak, aby měly na snímcích průměr minimálně 15 px (v souladu s požadavky elipsového operátoru pro výpočet středu elipsy [1]). Vzhledem k náročné aplikaci a potřebě polohu značek měřit fotogrammetrickým systémem TRITOP, bude implementován robustní systém kalibračních značek se stejnou geometrií, jakou používá

tento měřicí systém. Značky musejí být vyrobeny tak, aby byly mechanicky odolné a odolné vůči vysokým teplotám.

Aby bylo možné měřit kruhové kódované kalibrační značky pomocí systému TRITOP a zároveň je použít v náročných průmyslových podmínkách, bylo nutné vyvinout robustní systém kalibračních značek se stejnou geometrií, jako používá systém TRITOP. Publikované metody dekódování kruhových kódovaných kalibračních značek nejsou schopny korekce chyb v důsledku poškození značek fyzicky nebo v obraze a bylo by problematické je využít v náročných průmyslových podmínkách. Bude tedy vytvořen systém kruhových kódovaných kalibračních značek využívající principů generování uživatelem zadaného počtu kódů, které se maximálně odlišují, a jejich rozpoznání na základě rotačně invariantní podobnosti mezi skenovanými kódy značek z obrazu a kódy značek v knihovně. Tento princip je inspirován systémem kalibračních značek ArUco [40].

Teplotní ovlivnění přesnosti měřicího systému

V důsledku horké atmosféry, která obklopuje výkovek může dojít k nepřesnostem optického měření [12, 32, 47]. Tato chyba musí být v případě kontinuální kalibrace kamer patrná z chyby reprojekce kalibrace kamer. Bude proveden experiment, kde bude v průmyslových podmínkách posuzován rozdíl chyby reprojekce před a po umístění výkovku do scény. Vzniklý potenciální nárůst chyby reprojekce bude diskutován s přihlédnutím k požadované přesnosti systému.

5.3.3 Analýza obrazu

Segmentace, měření siluet

Bude experimentováno s různými metodami zpracování obrazu, morfologickými operacemi nebo různými modifikacemi hranového operátoru metod prahování. Bude experimentováno s různými metodami validace hran inspirovanými články zabývající se touto problematikou [27, 55]. Pro detekci hran bude zvažováno využití sub-pixelově přesných metod [1]. Budou brány v úvahu různé variace současných metod počítačového vidění, které jsou založeny na neuronových sítích. Cílem je dosažení spolehlivé segmentace výkovku a nejlépe sub-pixelově přesné spolehlivé metody detekce hran. Na základě znalosti funkce těchto metod budou výsledky experimentu diskutovány a objasněny.

Pasivní stereovize

V literatuře není objasněno, jestli je možné měřit horké výkovky pomocí principů pasivní stereovize s dostatečnou přesností a spolehlivostí, bez využití externího zdroje světla. Bude realizován pokus o rekonstrukci povrchu měřeného polotovaru. Na této úloze bude testováno více dostupných metod pro hledání významných bodů (např. Harrisův operátor,

MSER, apod.), metod pro jejich deskripci (např. SURF, LIFT apod.), nebo metod pracujících na základě korespondence oblastí v obraze. Bude porovnávána hustota rekonstruované sítě, a její spolehlivost nebo přesnost. S přihlédnutím k funkci těchto metod budou výsledky porovnání diskutovány a objasněny. Přesnost bude posuzována vůči referenční geometrii.

Rekonstrukce objektu, vývoj systému pro měření výkovků

V rámci rekonstrukce výkovku na základě siluet se nabízí možnost výkovkem přesně otáčet (výkovek během měření drží manipulátor s přesností polohování $0,5^\circ$), lze experimentovat se skládáním více měření z různých úhlů za účelem dosáhnout vyšší opakovatelnosti měření.

3D rekonstrukce povrchu výkovku při použití pasivní stereovize je přímočará – výsledkem rekonstrukce je mračno bodů. V případě potřeby sesazování více měření je teoreticky možné využít některé z metod registrace mračen bodů.

5.4 Plán publikací

Plánované publikace by měly přinést odpovědi na stanovené vědecké otázky.

Publikace 1 – předpokládané datum odeslání 4/2019

Cíl publikace Návrh a experimentální verifikace metody kalibrace kamer systému pro měření výkovků, diskuze ovlivnění přesnosti kalibrace horkou atmosférou s odlišným indexem lomu okolo výkovku.

Periodikum Proceedings of SPIE (sborník, indexováno ve WoS i SCOPUS)

Impact factor -

Publikace přinese poznatky o vhodné metodě kalibrace kamer pro fotogrammetrický systém pro měření výkovků, míře ovlivnění přesnosti kalibrace horkou atmosférou a diskuzi dalších specifik této aplikace. Metoda bude založena na principu prostorové resekce, jejíž potenciální vhodnost byla nastíněna v rešerši. Metoda bude prakticky verifikována v laboratorních i průmyslových podmínkách.

Publikace 2 – předpokládané datum odeslání 6/2020

Cíl publikace Návrh a experimentální verifikace vlastností robustního systému kruhových kódovaných kalibračních značek s korekcí chyb, používaného ve fotogrammetrii

Periodikum Machine Vision and Applications

Impact factor 1,605 (2019)

Publikace přinese nový robustní systém kódovaných kalibračních značek, který má unikátní schopnost korekce chyb. Korekce chyb bude dosaženo optimalizací Hammingovy vzdálenosti v knihovně kalibračních značek a jejím využitím při rozpoznávání jejich kódu. To bude fungovat na základě porovnání naskenovaného kódu značky v obraze s knihovnou kódů kalibračních značek. Navržený systém bude porovnán z hlediska robustnosti vůči současným publikovaným metodám rozeznávání těchto značek a také vůči komerčnímu řešení (GOM TRITOP).

Publikace 3 – předpokládané datum odeslání 9/2020

Cíl publikace Návrh a experimentální verifikace metody měření výkovek na základě jejich siluet.

Periodikum Measurement

Impact factor 2,218 (2017)

Publikace objasní limity pasivního fotogrammetrického systému pro měření výkovek, na základě jeho siluet, pomocí metod pasivní fotogrammetrie. Publikace se bude věnovat experimentální verifikaci důležitých vlastností vyvíjeného pasivního fotogrammetrického systému v průmyslových podmínkách. Dalším přínosem je diskuze specifik této aplikace a formulace kritérií pro výběr vhodných metod a opatření, na základě širších znalostí o funkci daných metod a principech fotogrammetrie. Jedná se například o návrhu spektrálně-selektivní metody, metody detekce a validace hran apod. Přesnost systému bude verifikována na základě opakovatelnosti měření a ověření přesnosti kalibrace systému. Dosažené vlastnosti budou porovnány se stanovenými potřebami průmyslového prostředí.

Publikace 4 – předpokládané datum odeslání 3/2021

Cíl publikace Experimentální komparace navržené metody pasivní fotogrammetrie a metody měření na základě laserového skeneru

Periodikum Sensors and Actuators A: Physical

Impact factor 2,739 (2018)

Publikace se bude věnovat experimentální komparaci vlastností metody měření výkovek na základě pasivní fotogrammetrie a snímání siluet a metody měření výkovek pomocí laserového skeneru. Metody budou porovnány v reálných průmyslových podmínkách

z hlediska jejich klíčových vlastností a opakovatelnosti měření, včetně měření pokročilých geometrických charakteristik výkovků. Přínosem publikace bude tedy zhodnocení a porovnání vlastností a limitů obou metod.

Publikace 5 – předpokládané datum odeslání 4/2021

Cíle Návrh a experimentální verifikace vlastností měření výkovků pomocí publikací pasivní stereovize.

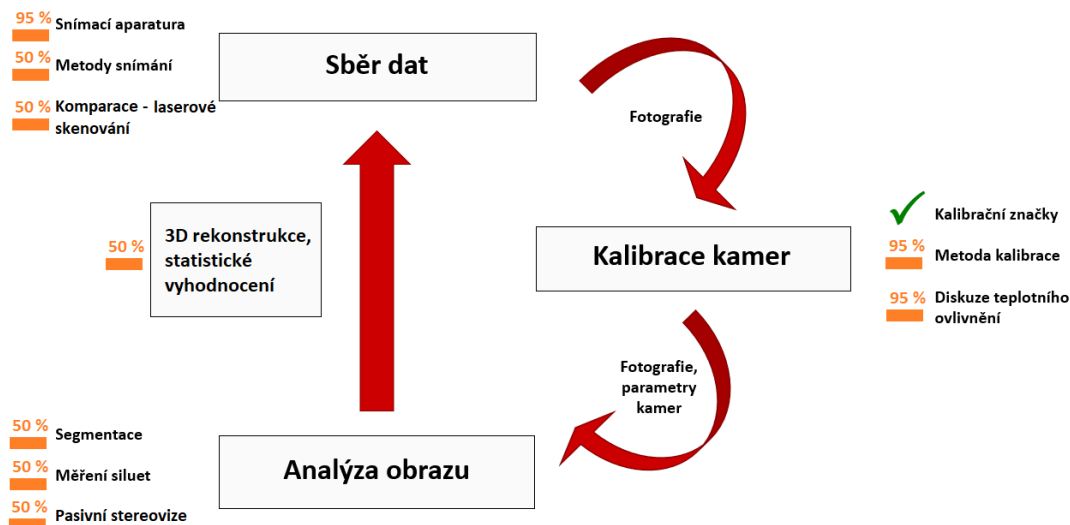
Periodikum Measurement

Impact factor 2,218 (2017)

Přínosem publikace je objasnění limitů pasivní stereovize při měření výkovků. Bude experimentováno s využitím světla, které vyzařuje sám horký výkovek. Tato studie bude zahrnovat výběr vhodného spektra pro optimalizaci kontrastu viditelných povrchových struktur výkovku při různých teplotách výkovku a komparaci několika metod pasivní stereovize. V rámci objasnění vhodného barevného spektra bude provedena termální analýza povrchu výkovku termokamerou a simulace kontrastu povrchových struktur, která bude poté porovnána s výsledky experimentů. Experimenty budou probíhat v laboratorních i průmyslových podmínkách. Bude hodnocena přesnost získaných dat a spolehlivost měření. Vlastnosti metody budou porovnány se stanovenými reálnými potřebami průmyslového prostředí.

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Současný stav řešení práce je shrnut na **obr. 6-1**.



obr. 6-1 Současný stav řešení disertační práce.

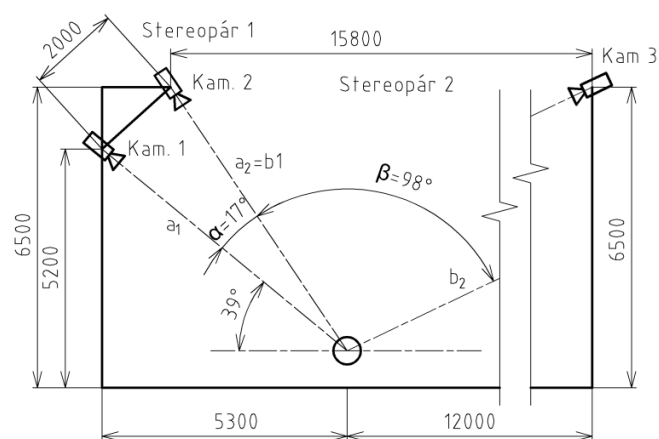
6.1 Materiál a metody

6.1.1 Průmyslový partner, požadavky na měřicí systém

Aby bylo možné řešit toto téma, byla navázána spolupráce s průmyslovým partnerem – ŽĐAS a.s. S průmyslovým partnerem byl na výzkum a vývoj fotogrammetrického systému pro měření výkovek úspěšně podán projekt TAČR Zéta (1/2018-12/2019, výsledkem funkční vzorek) a bude dále podán projekt Trend (1/2020-12/2022, plánovaným výsledkem poloprovoz). ŽĐAS je výrobcem výkovek – experimenty probíhající v průmyslovém prostředí lze realizovat v jejich kovárně. Průmyslový partner v rámci spolupráce poskytuje zázemí k provádění experimentů a zajišťuje drobné konstrukční úkony např. při montáži snímací aparatury do prostředí kovárny. Společnost se také zabývá výrobou a prodejem zařízení pro volné kování – kovací lisů, manipulátorů a integrovaných kovací souborů.

6.1.2 Snímací aparatura

V prostorách kovárny ŽĐAS byla realizována snímací aparatura. Tato aparatura je zachycena na obr. 6-2. Umístění kamer bylo voleno jako kompromis mezi navrženými pozicemi kamer a reálnými možnostmi umístění v kovárně. Malá odchylka úhlu β od navržené hodnoty 90° může vést k nesignifikantnímu a predikovatelnému snížení přesnosti metody měření výkovek.

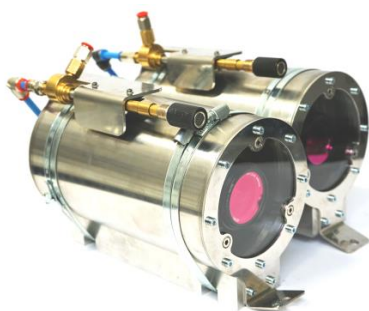


obr. 6-2 Snímací aparatura, skutečné pozice kamer [61].

Aby bylo dosaženo dostatečně kvalitních snímků, vysoké rozlišitelnosti a neměnnosti vnitřních parametrů kamer, jsou voleny monochromatické kamery s vysokým rozlišením a průmyslové objektivy s pevným ohniskem a zámkem zaostření i clony. Rozdílná vzdálenost kamer od výkovku byla kompenzována volbou ohniskové vzdálenosti objektivů. Velikost zorného pole ve vzdálenosti sledovaného objektu je ve všech případech větší než 5 m, aby bylo možné měření všech výkovků až do stanovené délky. Kamery jsou osazeny červeným pásmovým filtrem, který efektivně potlačuje pozadí (vhodnost určena experimentálně). Konkrétní typy a vlastnosti použitého hardwaru nebo aparatury jako celku jsou shrnuty v tab. 6-1. Kamery 1 a 2 jsou umístěny v termoregulovaných krytech (obr. 6-3), aby nedocházelo ke změnám vnitřních parametrů kamer v důsledku tepelných dilatací. Celý vnitřní prostor v krytech kamer je konstantně udržován při teplotě 20 °C pomocí 29 W vírové trubice Vortec 106-2-H. Kamera 3 je chlazená tlakovým vzduchem bez termoregulace, což může vést ke kolísání teploty. V budoucnu bude tento nedostatek napraven. Dalším nedostatkem, který bude napraven, je využití obyčejného borosilikátového skla, které nemá optickou kvalitu, jako krycího skla krytu. Sklo má negativní vliv na přesnost měření.

tab. 6-1 Typ a vlastnosti použitého hardwaru a snímací aparatury jako celku.

	Kamera 1, 2	Kamera 3
Typ kamery	ZWO ASI1600MM	ZWO ASI1600MM Pro
Rozlišení	4656 × 3520 px; 16 Mpx	4656 × 3520 px; 16 Mpx
Typ objektivu	Zeiss Interlock Compact	Zeiss Interlock Compact
Ohnisková vzdálenost	21 mm	35 mm
Filtr	Schneider-Kreuznach 680-100 HT	Schneider-Kreuznach 680-100 HT
Velikost zorného pole	5,8 × 4,4 m	6,7 × 5,1 m
Pixelová rozlišitelnost	1,25 mm	1,44 mm



obr. 6-3 Termoregulované kryty kamer [61].

Pro studium vhodného barevného spektra v rámci výzkumu možností aplikace pasivní stereovize byl vytvořen zásobník revolverových filtrů, jehož kapacita je až 7 filtrů. Zásobník je synchronizován s kamerou, sestava zvládne při kontinuální výměně barevných filtrů více než 1 snímek za sekundu.



obr. 6-4 Zásobník optických filtrů s kamerou ZWO ASI 1600 MM a objektivem Zeiss Interlock Compact [62].

6.1.3 Metoda kalibrace kamer

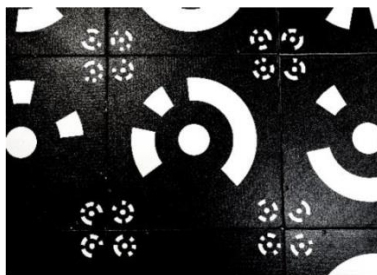
Kalibrace kamer

Navržená metoda kalibrace kamer funguje na principu prostorové resekce. Ke kalibraci je použito pole robustních, kódovaných kalibračních značek, jejichž kódování a metoda rozpoznávání je přizpůsobena této náročné aplikaci. Souřadnice značek v prostoru jsou změřeny profesionálním fotogrammetrickým systémem TRITOP (GOM). Metoda je detailně popsána ve vydané publikaci – v kap. 6.3 „Publikace 2“ [61]. Navržená metoda kalibrace funguje ve dvou hlavních krocích, kdy v prvním jsou řešně vypočítány vnitřní parametry kamery. Tento úkon se provádí pouze jednou před instalací měřicího systému, vzhledem ke stabilní vnitřní geometrii kamer a konstantní teplotě prostředí, ve kterém jsou kamery umístěny. Kalibrace vnějších parametrů kamer může být prováděna z každého snímku. Pro kalibraci stačí pouze několik kalibračních značek se známou polohou umístěných ve scéně. V budoucnu bude testována i varianta metody kalibrace, založená na rovnicích epipolární geometrie, pomocí nichž je možné kamery kalibrovat i bez znalosti souřadnic kalibračních značek v prostoru.

Kódované kalibrační značky

Navržený systém 15-bitových kódovaných kalibračních značek využívá stejnou geometrii, jako kalibrační značky systému TRITOP. Navržený systém nicméně nově zavádí metodu korekce chyb, kterou dostupné systémy nedisponují. Za účelem optimalizace Hamingovy vzdálenosti mezi značkami byl vytvořen generátor knihoven kalibračních značek, který vygeneruje knihovnu pouze o potřebném počtu značek s nejlepšími vlastnostmi. V obraze je značka detekována a její kód je naskenován robustními algoritmy. Naskenovaný kód je převeden na pravděpodobnostní na základě podobnosti s bílými nebo černými částmi středu značky. Toto řešení umožní využít zvýšenou Hammingovu vzdálenost značek v knihovně pro korekci chyb bez nárůstu falešně-pozitivních případů. Pravděpodobnostním kódům je pak přiřazen nejpodobnější kód z knihovny značek, jestliže je tento rozdíl dostatečně malý. Například v případě knihovny 60 15-bitových kalibračních značek je Hammingova vzdálenost 3, je tedy možné dosáhnout korekce chyb v míře až 2 poškozených bitů nebo 1 zaměněného. Systém kalibračních značek dále implementuje více dílčích vylepšení za účelem dosažení vysoké robustnosti. Detailně je metoda popsána v článku „Circular coded target system for industrial applications“, který je momentálně nabídnut k publikování.

Dle vygenerovaných kódů kalibračních značek byla geometrie značek vytvořena v grafickém programu. Aby byly značky dostatečně odolné, byly vytištěny metodou přímého UV tisku na plechové destičky. Velikost značek byla volena s ohledem na pixelovou rozlišitelnost kamer a na požadavky elipsového operátoru, tedy tak, aby jejich středy měly v obraze průměr minimálně 15 px – střed značky má průměr 28 mm, celkově je značka čtverec o hraně 140 mm.



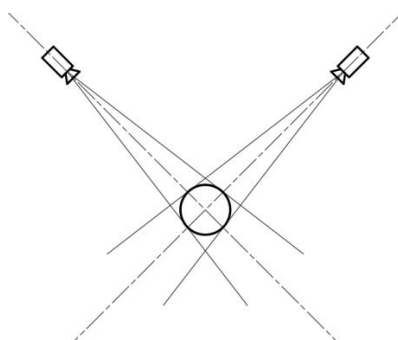
obr. 6-5 Kalibrační značky vytisknuté metodou přímého UV tisku [61].

6.1.4 Metoda detekce hran a rekonstrukce geometrie výkovku

Metoda detekce hran pracuje ve 3 fázích. První fází je předzpracování obrazu pomocí gama korekce za účelem rozjasnění obrazu. Následně je provedena dilatace-eroze za účelem vyhlazení větších objektů – operace má za účel částečně vyhladit kontrastní okraje, které by mohly generovat falešné hrany. Druhou fází je pak adaptivní prahování – takto je získána kontura objektu. Třetí fází je pak validace hran, která prozatím probíhala

manuálně. V budoucnu bude tato metoda významně modifikována za účelem dosažení vyšší spolehlivosti, sub-pixelové přesnosti a automatizace procesu validace hran.

Rekonstrukce objektu z jeho siluet pomocí kalibrovaných kamer proběhne podle schématu na obr. 6-6. Toto schéma, které předpokládá přibližnou kolmost optických os kamer, zahrnuje více zjednodušení, které mají nicméně zanedbatelný vliv – jedná se o předpoklad přibližně kruhového průřezu a velké vzdálenosti kamer od osy výkovku. S těmito předpoklady je jednoduché v jednotlivých 2D řezech vypočítat bod osy výkovku. Tím lze jednoduše vypočítat měřítko a tím jednotlivé měřené průměry.



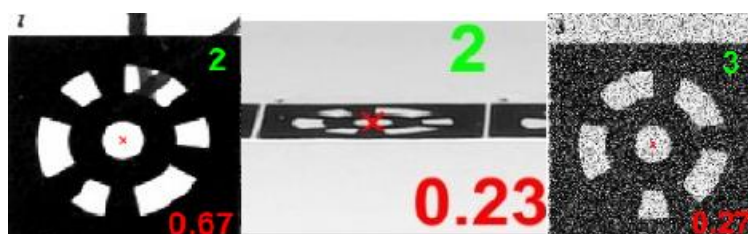
obr. 6-6 Schéma triangulace osy výkovku – určení měřítka.

Návrh metody zpracování obrazu za účelem pasivní stereovize byl prozatím navržen a testován jen v laboratorním prostředí. Byla využita metoda SURF [28].

6.2 Dosažené výsledky a vyvozené závěry

6.2.1 Kódované kalibrační značky

Byly realizovány testy odolnosti této metody vůči poškození kódu kalibrační značky, malému rozlišení kalibrační značky, velkému pozorovacímu úhlu, šumu a rozmazání. Na těchto datasetech systém prokázal velkou odolnost vůči jmenovaným jevům (např. byl schopný detekovat kalibrační značky s průměrem středu 3 px nebo při pozorovacím úhlu až 7 °) a naplnil předpoklady vysoké schopnosti korekce chyb (až 2 poškozené bity) při zachování nízkého poměru falešně-negativních případů. Celkově systém překoval jak komerční řešení (GOM TRITOP), tak metodu publikovanou v [37]. Detaily výsledků jsou popsány v článku „Circular coded target system for industrial applications“, který je momentálně nabídnut k publikování.



obr. 6-7 Příklady výsledků rozpoznávání kalibračních značek za ztížených podmínek; zelené číslo je rozpoznávaný identifikátor kalibrační značky, červeně je značena chyba rozpoznání v bitech.

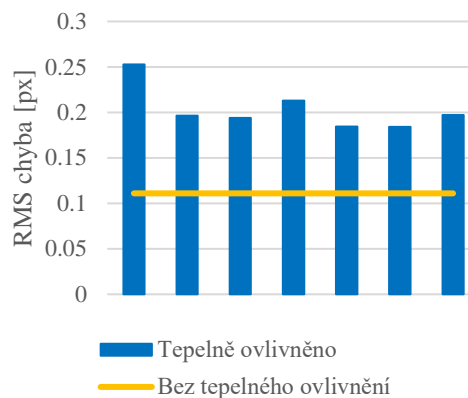
6.2.2 Kalibrace kamer a vliv tepelně ovlivněné atmosféry

Pro kalibraci vnitřních parametrů kamer bylo použito 50 hybridních kalibračních značek a celkem 8 kalibračních snímků tohoto pole. Chyba reprojekce se pohybovala do 0,1 px. Přesnost kalibrace kamer byla testována přímo v kovárně průmyslového partnera. Polohy a orientace kamer byly kalibrovány pouze pomocí 8 kalibračních značek. Pomocí parametrů kamer 1 a 2 byly triangulovány souřadnice kalibračních značek v měřicím prostoru a byla zkoumána jejich odchylka od referenčních souřadnic, změřených fotogrammetrickým systémem TRITOP. Vektory chyb byly rozloženy do směru hloubky a do směru na směr hloubky kolmý. Bylo zjištěno, že příliš krátká základna stereopáru způsobuje nárůst chyby v důsledku nepřesného určení hloubky, výsledky jsou shrnuty v tab. 6-2.

tab. 6-2 Ověření přesnosti kalibrace kamer – chyby rekonstrukce souřadnic kalibračních značek v prostoru - e_{3DRMS} – střední kvadratická chyba rekonstrukce souřadnic značek ve 3D, φ – úhel pozorování kal. značek, e_{max} – maximální chyba souřadnic ve směru kolmém na směr hloubky (dále označována jen jako 2D), e_{RMS} – střední kvadratická chyba souřadnic ve 2D, l_{max} – maximální naměřená délka ve scéně, ξe_{RMS} – relativní střední kvadratická chyba ve 2D [61].

e_{3DRMS}/mm	φ °	e_{max}/mm	e_{RMS}/mm	l_{max}/m	$\xi e_{RMS}/\%$
2,30	10,3-14,4	0,39	0,25	6	0,004

Dále bylo zkoumáno ovlivnění přesnosti kalibrace kamer výkovkem o teplotě přibližně 1000 °C. Byla porovnána chyba reprojekce ze série snímků pořízených před a po umístění výkovku do scény – výsledek je patrný z obr. 6-8. Červeně označené značky na tomto obrázku byly použity ke kalibraci.



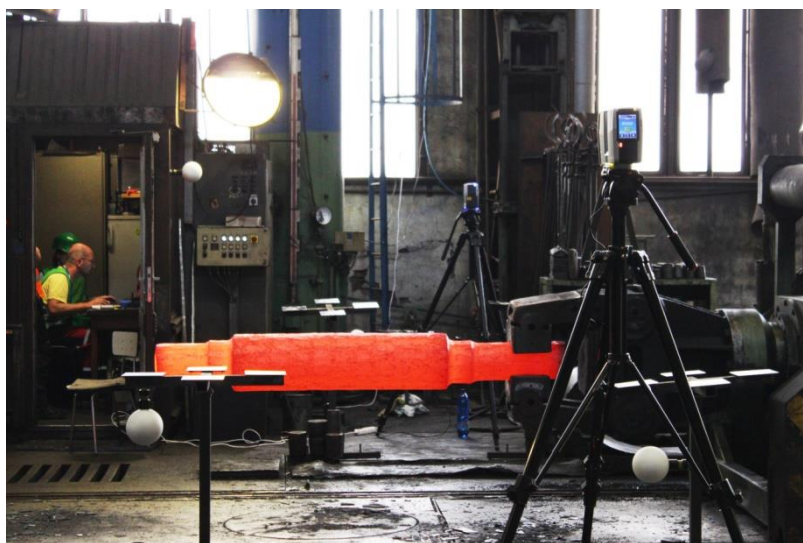
obr. 6-8 Vlevo kalibrační scéna s výkovkem, vpravo vliv tepelně ovlivněné atmosféry na střední kvadratickou chybu kalibrace ve snímcích pořízených krátce po sobě [61].

Metoda kalibrace kamer dle výsledků experimentu prokázala vysokou přesnost, chyba kalibrace byla přibližně 0,25 mm při měřených délkách okolo 6 m – vzhledem k požadované přesnosti měřicího systému je tato chyba řádově menší. Ve srovnání s metodou kalibrace určenou pro stejný účel [23] byla relativní chyba navržené metody kalibrace řádově nižší (0,004 % vs 0,052 %). To lze vysvětlit nevhodnou metodou kalibrace využívající rovinné šachovnicové pole, které nemusí být při velkých velikostech přesné, může se deformovat a nelze jím efektivně pokrýt velký měřicí objem. Dalším zkoumaným jevem bylo ovlivnění přesnosti kalibrace kamer horkou atmosférou okolo výkovku – byl potvrzen výrazný vliv, který zvýšil chybu reprojekce až 2,5× (z 0,11 na 0,25 px). Této chybě se lze nicméně vyhnout provedením kalibrace krátce před tím, než je výkovek umístěn na scénu.

Závěrem těchto experimentů je potvrzení vhodnosti kalibrační metody založené na prostorové resekce pro tuto aplikaci. Tepelné ovlivnění horkou atmosférou okolo výkovku bylo potvrzeno, ale je možné se mu vyhnout tím, že budou kamery kalibrovány krátce před tím, než bude výkovek ve scéně. Vliv teplotního ovlivnění na přesnost samotného měření a jeho korelace s předpokládanou analyticky vypočítanou hodnotou bude dále zkoumán. Závěry byly prezentovány v publikaci „Camera calibration method of optical system for large field measurement of hot forgings in heavy industry” [61] na konferenci SPIE Optical Metrology 2019.

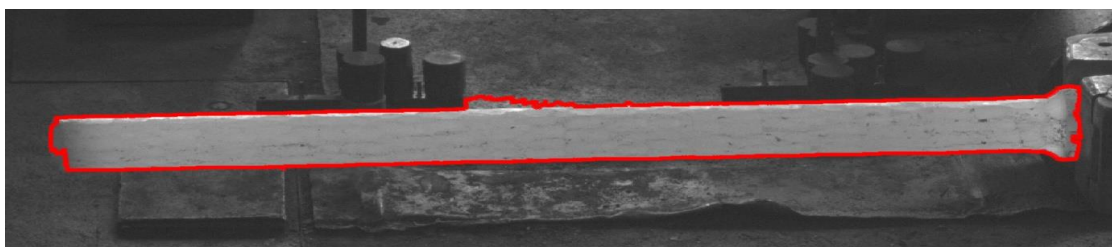
6.2.3 Detekce hran a rekonstrukce objektu

Pomocí popsané metody detekce hran a rekonstrukce objektu byly zpracovány data z experimentu z průmyslového prostředí. Součástí těchto experimentů bylo i měření výkovek laserovými skenery (výkovek byl skenován dvěma skenery FARO Focus 3D S 120 zároveň, z obou stran, dle obr. 6-9). Bohužel, při těchto experimentech ještě nebyla využita spektrálně-selektivní metoda – byly tedy ztíženy podmínky pro detekci hran. Druhým problémem experimentu bylo množství technických problémů při měření výkovek laserovým skenerem – bylo shromážděno pouze omezené množství nepříliš dat, z nichž nebylo možné provést kvalitní statistické vyhodnocení nebo porovnání metod.

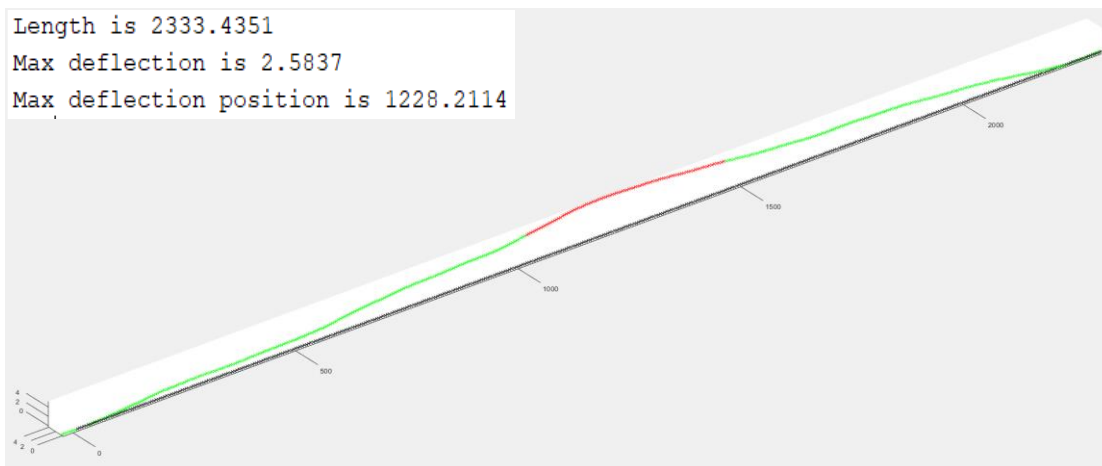


obr. 6-9 Měření výkovek 2 laserovými skenery Faro.

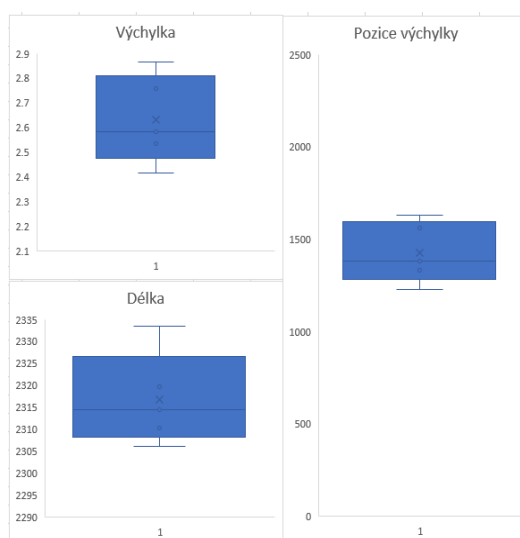
Výsledek navržené metody detekce hran lze vidět na obr. 6-10. Je vidět, že v některých oblastech tato detekce selhává – metoda bude přepracována. Automatická metoda validace hran zatím nebyla navržena, a tak validace probíhala manuálně. Výsledek rekonstrukce lze vidět na obr. 6-11. Daný výkovek byl měřen celkem 5 ×, statistické vyhodnocení naměřené výchylky osy, její pozice délky výkovek lze vidět na obr. 6-12.



obr. 6-10 Výsledek stávající detekce hran na stávajících datech bez validace².



obr. 6-11 Část výsledku – profil osy (červená část je mimo toleranci přímosti, 2 mm), délka výkovku, maximální průhyb osy a pozice maximálního průhybu².



obr. 6-12 Statistické vyhodnocení vybraných geometrických charakteristik z 5 měření, osy jsou v mm².

Dosahovaná přesnost měřicího systému je zřejmě v současné době limitována použitím detekce hran s pixelovou přesností (rozlišitelnost měřicího systému odpovídá přibližně 1,3 mm). Další příčinou chyby opakovatelnosti měření velikosti nebo pozice výchylky je citlivost měření na případné odchylky od kruhovitosti průřezu výkovku. Možnými řešeními jsou aplikace sub-pixelově přesné metody měření siluet nebo využití dat z více měření, kde bude výkovek rozdílně natočen. Přesnost geometrie osy v řádu milimetrů nicméně postačuje reálným potřebám průmyslového prostředí. Měření geometrie výkovku na základě jeho siluet tedy prozatím prokazuje vysoký potenciál pro aplikaci v průmyslu.

Dalším krokem je zde úprava a automatizace metod zpracování obrazu, shromáždění většího množství dat jak z kamerového systému, tak z laserových skenerů, vyhodnocení opakovatelnosti měření u obou přístupů a jejich vzájemné porovnání.

² Tyto obrázky byly použity v závěrečné zprávě projektu TAČR ZÉTA TJ01000268.

7 ZÁVĚR

Tato práce je pojednáním k doktorské disertační práci, jejíž podstatou je rozšíření stavu poznání v oboru pasivní fotogrammetrie, za účelem realizace systému pro monitorování rozměrové přesnosti těžkých výkovků. Pojednání se zabývá návrhem výzkumu v této oblasti.

Práce podává kritický přehled současných metod měření výkovků a vymezuje perspektivní oblast pro výzkum, kterou je aplikace pasivní fotogrammetrie. Jsou shrnuty oblasti chybějícího poznání a na jejich základě jsou formulovány vědecké otázky s hypotézami a konkrétní cíle disertační práce. Vědecké cíle mají charakter realizace, systematického testování a následné evaluace, interpretace a objasnění výkonu potenciálně vhodných přístupů a metod pasivní fotogrammetrie, aplikovaným cílem je pak návrh a implementace měřicího systému. Dále je uveden současný stav řešení disertační práce, který zahrnuje popis použitých metod, dosažených výsledků a seznam dosavadních publikací.

Na základě tohoto návrhu výzkumu bude realizována disertační práce, jejímž přínosem je rozšíření aplikace pasivní fotogrammetrie a vývoj měřicího systému pro měření těžkých výkovků, vyrobených volným kovááním. Pomocí tohoto systému bude možné měřit odchylky od požadovaného tvaru válcových výkovků přímo v procesu výroby a podávat tak zpětnou vazbu operátorovi kovacího lisu. Díky podávání zpětné vazby operátorovi bude možné dosahovat vyšší rozměrové přesnosti výkovků a tím omezit přídavky na obrábění. Důsledkem toho pak bude úspora materiálu, zjednodušení a zkrácení obrábění, snížení energetických nákladů a v návaznosti na to vyšší ekologičnost a zlevnění produkce. V budoucnu v rámci trendu „průmysl 4.0“ by se pak zmíněný měřicí systém mohl stát součástí integrovaného kovacího souboru pro optimalizované automatické kováání.

8 LITERATURA

- [1] LUHMANN, T., S. ROBSON, S. KYLE a I. HARLEY. *Close Range Photogrammetry*. Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. ISBN 978-184995-057-2.
- [2] TSAI, R. A Versatile Camera Calibration Techniaue for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. 1987, **3**(4), 323–344.
- [3] ZHANG, Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 2000, **22**(11), 1330–1334. ISSN 01628828. Dostupné z: doi:10.1109/34.888718
- [4] FORBES, K., A. VOIGHT a N BODIKA. An Inexpensive, Automatic and Accurate Camera Calibration Method. In: *Thirteenth Annual Symposium of the Pattern Recognition Association of South Africa*. 2002, s. 1–7. ISBN 0799221473.
- [5] SCHNEIDER, D., E. SCHWALBE a H. G. MAAS. Validation of geometric models for fisheye lenses. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 2009, **64**(3), 259–266. ISSN 09242716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2009.01.001
- [6] LUHMANN, Thomas. Close range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 2010, **65**(6), 558–569. ISSN 09242716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.06.003
- [7] BADRINARAYANAN, Vijay, Alex KENDALL a Roberto CIPOLLA. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* [online]. 2017, **39**(12), 2481–2495. Dostupné z: doi:10.1109/TPAMI.2016.2644615
- [8] LIU, Li, Wanli OUYANG, Xiaogang WANG, Paul FIEGUTH, Jie CHEN, Xinwang LIU a Matti PIETIKÄINEN. Deep Learning for Generic Object Detection: A Survey. *International Journal of Computer Vision* [online]. 2020, **128**(2), 261–318. ISSN 15731405. Dostupné z: doi:10.1007/s11263-019-01247-4
- [9] HAWRYLUK, M a J ZIEMBA. Possibilities of application measurement techniques in hot die forging processes. *Measurement* [online]. 2017, **110**, 284–295. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2017.07.003
- [10] HAWRYLUK, Marek, Jacek ZIEMBA a Przemysław SADOWSKI. A Review of Current and New Measurement Techniques Used in Hot Die Forging Processes. *Measurement and Control* [online]. 2017, **50**(3), 74–86. ISSN 00202940. Dostupné z: doi:10.1177/0020294017707161
- [11] HEXAGON. *Tube and Wire Inspection Solutions* [online]. [vid. 2020-07-03]. Dostupné z: <https://www.wire.de/vis-content/event-witu2020.tube/exh-witu2020.2630082/Tube-2020-AICON-3D-Systems-GmbH-Paper-witu2020.2630082-ivDtu4GWRYi3IVXDhjm3Tw.pdf>
- [12] BEERMANN, Rüdiger, Lorenz QUENTIN, Gunnar STEIN, Eduard REITHMEIER a Markus KÄSTNER. Full simulation model for laser triangulation measurement in an inhomogeneous refractive index field. *Optical Engineering* [online]. 2018, **57**(11), 1. ISSN 1560-2303. Dostupné z: doi:10.1117/1.oe.57.11.114107

- [13] FERROTRON a MINTEQ. *LaCam-Forge Brochure* [online]. 2015 [vid. 2020-07-03]. Dostupné z: https://www.mineralstech.com/docs/default-source/refractories-documents/ferrotron/lacam-forge-brochure.pdf?sfvrsn=c58417e1_0
- [14] FERROTRON a MINTEQ. *LaCam-Forge Presentation* [online]. [vid. 2019-06-30]. Dostupné z: https://www.mineralstech.com/docs/default-source/refractories-documents/ferrotron/lacam-forge---presentation.pdf?sfvrsn=6daf9d8b_0
- [15] ZHANG, Y C, J X HAN, X B FU a F L ZHANG. Measurement and control technology of the size for large hot forgings. *Measurement* [online]. 2014, **49**, 52–59. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2013.11.028
- [16] BRACUN, D, G SKULJ a M KADIS. Spectral selective and difference imaging laser triangulation measurement system for on line measurement of large hot workpieces in precision open die forging. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, **90**, 917–926. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-016-9460-0
- [17] MEJIA-PARRA, Daniel, Jairo R. SÁNCHEZ, Oscar RUIZ-SALGUERO, Marcos ALONSO, Alberto IZAGUIRRE, Erik GIL, Jorge PALOMAR a Jorge POSADA. In-line dimensional inspection of warm-die forged revolution workpieces using 3D mesh reconstruction. *Applied Sciences* [online]. 2019, **9**, 1–21. ISSN 20763417. Dostupné z: doi:10.3390/app9061069
- [18] LIU, W, X H JIA, Z Y JIA, S J LIU, B G WANG a J A DU. Fast dimensional measurement method and experiment of the forgings under high temperature. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2011, **211**(2), 237–244. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.09.015
- [19] LIU, W, Z Y JIA, F J WANG, X MA, W Q WANG, X H JIA a D SONG. An improved online dimensional measurement method of large hot cylindrical forging. *Measurement* [online]. 2012, **45**(8), 2041–2051. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2012.05.004
- [20] JIA, Zhenyuan, Lingli WANG, Wei LIU, Jinghao YANG, Yang LIU, Chaonan FAN a Kai ZHAO. A field measurement method for large objects based on a multi-view stereo vision system. *Sensors and Actuators, A: Physical* [online]. 2015, **234**, 120–132. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2015.08.024
- [21] JIA, Z Y, Y LIU, W LIU, C ZHANG, J H YANG, L L WANG a K ZHAO. A spectrum selection method based on SNR for the machine vision measurement of large hot forgings. *Optik* [online]. 2015, **126**(24), 5527–5533. ISSN 0030-4026. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijleo.2015.09.110
- [22] LIU, Y, Z Y JIA, W LIU, L L WANG, C N FAN, P T XU, J H YANG a K ZHAO. An improved image acquisition method for measuring hot forgings using machine vision. *Sensors and Actuators a-Physical* [online]. 2016, **238**, 369–378. ISSN 0924-4247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2015.11.035
- [23] YANG, J H, W LIU, C N FAN, S J LI, F J WANG, Z Y JIA, H Y YAN, X LI a IEEE. Improved calibration method of binocular vision measurement system for large hot forging. In: *Proceedings 2016 Ieee 25th International Symposium on Industrial Electronics* [online]. 2016, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, s. 918–922. ISBN 978-1-5090-0873-5. Dostupné z: %3CGo

- [24] YANG, Jinghao, Wei LIU, Renwei ZHANG, Zhenyuan JIA, Fuji WANG a Shijie LI. A method for measuring the thermal geometric parameters of large hot rectangular forgings based on projection feature lines. *Machine Vision and Applications* [online]. 2018, **29**(3), 467–476. ISSN 14321769. Dostupné z: doi:10.1007/s00138-017-0900-0
- [25] ZATOČILOVÁ, Aneta, Radek POLIŠČUK, David PALOUŠEK a Jan BRANDEJS. Photogrammetry based system for the measurement of cylindrical forgings axis straightness. In: *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII* [online]. 2013. ISBN 9780819496041. Dostupné z: doi:10.1117/12.2020917
- [26] ZATOČILOVÁ, Aneta, David PALOUŠEK a Jan BRANDEJS. Development of a photogrammetry system for the measurement of rotationally symmetric forgings. In: *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX* [online]. 2015, s. 952516. ISBN 9781628416855. Dostupné z: doi:10.1117/12.2184916
- [27] ZATOCILOVA, A, D PALOUSEK a J BRANDEJS. Image-based measurement of the dimensions and of the axis straightness of hot forgings. *Measurement* [online]. 2016, **94**, 254–264. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2016.07.066
- [28] BAY, H, A ESS, T TUYTELAARS a L VAN GOOL. Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding* [online]. 2008, **110**(3), 346–359. Dostupné z: doi:10.1016/j.cviu.2007.09.014
- [29] JIA, Z Y, B G WANG, W LIU a Y W SUN. An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2010, **210**, 267–271. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.09.009
- [30] LINS, RG. Mechatronic system for measuring hot-forged automotive parts based on image analysis. *Transactions of the Institute of Measurement and Control* [online]. 2018, **40**(13), 3774–3787. Dostupné z: doi:10.1177/0142331217731619
- [31] CIDDOR, P. E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared. *Applied Optics*. 1996, **35**(9), 1566–1573.
- [32] YAMAUCHI, M. Errors in optical shape measurement caused by a high-temperature atmosphere. *Optical Engineering* [online]. 2009, **48**(9), 4. ISSN 0091-3286. Dostupné z: doi:10.1117/1.3212674
- [33] HU, H, J LIANG, ZZ XIAO, ZZ TANG, AK ASUNDI a YX WANG. A four-camera videogrammetric system for 3-D motion measurement of deformable object. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2012, **50**(5), 800–811. ISSN 0143-8166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2011.12.011
- [34] LI, Z a M LIU. Research on Decoding Method of Coded Targets in Close-range Photogrammetry. *Journal of Computational Information Systems*. 2010, **6**(8), 2699–2705.
- [35] XIA, RB., JB. ZHAO, WJ. LIU, JH. WU, SP. FU, J. JIANG a JZ LI. A Robust Recognition Algorithm for Encoded Targets in Close-range Photogrammetry. *Journal of Information Science and Engineering* [online]. 2012, **28**, 407–418. Dostupné z: doi:10.1688/JISE.2012.28.2.11

- [36] GUO, C., X. CHENG, H. CUI, N. DAI a J. WENG. A New Technique of Recognition for Coded Targets in Optical 3D-Measurement. In: *Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications III*. 2014.
- [37] LI, W., G. LIU, L. ZHU, X. LI, Y. ZHANG a S. SHAN. Efficient detection and recognition algorithm of reference points in photogrammetry. In: *Optics, Photonics and Digital Technologies for Imaging Applications IV*. 2016.
- [38] CANNY, J. A Computational Approach to Edge-Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 1986, **8**(6), 679–698. ISSN 0162-8828. Dostupné z: doi:10.1109/tpami.1986.4767851
- [39] DOSIL, Raquel, Xosé M. PARDO, Xosé R. FDEZ-VIDAL, Antón GARCÍA-DÍAZ a Víctor LEBORÁN. A new radial symmetry measure applied to photogrammetry. *Pattern Analysis and Applications* [online]. 2013, **16**(4), 637–646. ISSN 14337541. Dostupné z: doi:10.1007/s10044-012-0281-y
- [40] GARRIDO-JURADO, S, RF MUÑOZ-SALINAS, J MADRID-CUEVAS a Marín-Jiménez MJ. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition* [online]. 2014, **47**(6), 2280–2292. ISSN 0031-3203. Dostupné z: doi:10.1016/j.patcog.2014.01.005
- [41] GARRIDO-JURADO, S., R. MUÑOZ-SALINAS, F. J. MADRID-CUEVAS a R. MEDINA-CARNICER. Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming. *Pattern Recognition* [online]. 2016, **51**, 481–491. ISSN 00313203. Dostupné z: doi:10.1016/j.patcog.2015.09.023
- [42] MONDÉJAR-GUERRA, V, S GARRIDO-JURADO, R MUÑOZ-SALINAS, MJ MARÍN-JIMÉNEZ a R MEDINA-CARNICER. Robust identification of fiducial markers in challenging conditions. *Expert Systems With Applications* [online]. 2018, **93**, 336–345. Dostupné z: doi:10.1016/j.eswa.2017.10.032
- [43] ROMERO-RAMIREZ, FJ, R MUÑOZ-SALINAS a R MEDINA-CARNICER. Speeded up detection of squared fiducial markers. *Image and Vision Computing* [online]. 2018, **76**, 38–47. ISSN 0262-8856. Dostupné z: doi:10.1016/j.imavis.2018.05.004
- [44] TIAN, Z S, F GAO, Z L JIN a X C ZHAO. Dimension measurement of hot large forgings with a novel time-of-flight system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2009, **44**(1–2), 125–132. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-008-1807-8
- [45] DU, Z C, Z Y WU a J G YANG. 3D measuring and segmentation method for hot heavy forging. *Measurement* [online]. 2016, **85**, 43–53. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2016.02.004
- [46] ZHANG, Yungang, Yongda WANG, Yunjie LIU, Deping LV, Xianbin FU, Y. ZHANG a Jimeng LI. A concentricity measurement method for large forgings based on laser ranging principle. *Measurement* [online]. 2019, **147**, 106838. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2019.07.066
- [47] GHIOTTI, A., A. SCHÖCH, A. SALVADORI, S. CARMIGNATO a E. SAVIO. Enhancing the accuracy of high-speed laser triangulation measurement of freeform parts at elevated temperature. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2015, **64**(1), 499–502. ISSN 17260604. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2015.04.012

- [48] FRASER, Clive S, Ida JAZAYERI a Simon CRONK. A Feature-based Matching Strategy for Automated 3D Model Reconstruction in Multi-image Close-range Photogrammetry. In: *ASPRS 2010 Annual Conference*. 2010.
- [49] XU, Guan, Xiaotao LI, Jian SU, Hongda PAN a Guangdong TIAN. Precision evaluation of three-dimensional feature points measurement binocular vision. *Journal of the Optical Society of Korea* [online]. 2011, **15**(1), 30–37. ISSN 12264776. Dostupné z: doi:10.3807/JOSK.2011.15.1.030
- [50] GIL, A, O M MOZOS, M BALLESTA a O REINOSO. A comparative evaluation of interest point detectors and local descriptors for visual SLAM. *Machine Vision and Applications* [online]. 2010, **21**(6), 905–920. ISSN 0932-8092. Dostupné z: doi:10.1007/s00138-009-0195-x
- [51] DOSOVITSKIY, A, P FISCHER, J T SPRINGENBERG, M RIEDMILLER a T BROX. Discriminative Unsupervised Feature Learning with Exemplar Convolutional Neural Networks. *Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 2016, **38**(9), 1734–1747. ISSN 0162-8828. Dostupné z: doi:10.1109/tpami.2015.2496141
- [52] YI, KM., E. TRULLS, V. LEPETIT a P. FUA. LIFT: Learned Invariant Feature Transform. In: *ECCV 2016: Computer Vision* [online]. 2016, s. 467–483. ISBN 9783319464749. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-46466-4
- [53] DI FEBBO, Paolo, Carlo DAL MUTTO, Kinh TIEU a Stefano MATTOCCIA. KCNN: Extremely-efficient hardware keypoint detection with a compact convolutional neural network. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops* [online]. 2018, **2018-June**, 795–803. ISSN 21607516. Dostupné z: doi:10.1109/CVPRW.2018.00111
- [54] DWORKIN, S B a T J NYE. Image processing for machine vision measurement of hot formed parts. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2006, **174**(1–3), 1–6. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.10.019
- [55] HU, C H, B LIU a X X SONG. A novel edge detection approach used for online dimensional measurement of heavy forging. In: S YE, G ZHANG a J NI, ed. *2008 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Applications* [online]. 2009. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. ISBN 978-0-8194-7404-9. Dostupné z: doi:10.1117/12.807046
- [56] BI, C, X H QU, Y LIU, Y P LIU a J L LIU. Dimensional Measurement of Small Hot Pieces Based on a Monochrome CCD. In: H HAIYAN, ed. *2014 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Apisat2014* [online]. 2015, Procedia Engineering, s. 1158–1163. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2014.12.698
- [57] BI, Chao, Jianguo FANG, Di LI a Xinghua QU. Study on application of color filters in vision system of hot forgings. *Optical Measurement Technology and Instrumentation* [online]. 2016, **10155**(October 2016), 1015522. ISSN 1996756X. Dostupné z: doi:10.1117/12.2246795
- [58] ZHOU, Yijun, Yongchao WU a Chen LUO. A fast dimensional measurement method for large hot forgings based on line reconstruction. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2018, **99**, 1713–1724. ISSN 14333015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-018-2551-3

- [59] ZATOČILOVÁ, Aneta. *Měření a vyhodnocování přímosti osy rotačních výkovků pomocí fotogrammetrie a analýzy obrazu*. B.m., 2014. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně.
- [60] BI, C, X H QU, Y LIU, Y P LIU a J L LIU. Dimensional Measurement of Small Hot Pieces Based on a Monochrome CCD. In: H HAIYAN, ed. *2014 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Apisat2014* [online]. 2015, s. 1158–1163. Procedia Engineering. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2014.12.698
- [61] 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
- [62] KILIÁN, O. *Vývoj revolverového zásobníku barevných filtrů*. B.m., 2020. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

A_1, A_2, A_3	koeficienty balancovaného radiálního zkreslení
B_1, B_2	koeficienty tangenciálního zkreslení
C_1, C_2	koeficienty afinního zkreslení
c	ohnisková vzdálenost
e_{3DRMS}	střední kvadratická chyba měření ve 3D
e_{max}	maximální chyba měření ve 2D
e_{RMS}	střední kvadratická měření ve 2D
L	délka základny stereopáru
l_{max}	maximální naměřená délka ve scéně
n_1, n_0	indexy lomu materiálu čočky a okolního prostředí
$\mathbf{P}[X, Y, Z]$	vektor souřadnic bodu v globálním s. s.
$\mathbf{P}'[x', y']$	souřadnice obrazu v s. s. kamery zatížené chybou promítání
$\hat{\mathbf{P}}'[\hat{x}', \hat{y}']$	odhad obrazu v s. s. kamery nezatíženého chybou promítání
r	průměr cylindrické čočky
r'	vzdálenost obrazového bodu od středu snímku
r_0	vzdálenost druhého nulového přechodu radiálního zkreslení
$r_{11} \dots r_{33}$	členy matice rotace
V_B	průměrný jas pozadí
V_0	průměrný jas objektu
$\mathbf{X}_0[X_0, Y_0, Z_0]$	střed promítání v globálním s. s.
$\mathbf{x}'_0[x'_0, y'_0]$	souřadnice fyzického středu snímku
α	úhel pozorování objektu stereopárem kamer
ΔV	kontrast mezi objektem a pozadím
$\Delta x', \Delta y'$	vektor zkreslení obrazu v s. s. kamery
ξe_{RMS}	relativní střední kvadratická chyba ve 2D
$\psi(L)$	míry závislosti chyby triangulace na délce základny stereopáru

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 2-1	Geometrický model kamery [1].	6
obr. 2-2	Vlevo – přístroj AICON TubeInspect [11], vpravo – schéma funkce tohoto přístroje – CCD kamery snímají ohýbaný objekt proti podsvícené podložce s kontrolními body pro kalibraci kamer [1].	8
obr. 2-3	Schéma použití systému LaCam® Forge od společnosti Ferrotron – krok 1) znázorňuje snímání výkovku, krok 2) automatickou identifikaci výkovku, krok 3) vyhodnocení dat z měření (přímost jeho osy), krok 4) vyrovnání výchylky osy tříbodovým lisem [14].	9
obr. 3-1	Zleva: měřený objekt, IR teploměr pro kontrolu teploty vyhřívané plotny, vyhřívaná plotna, nad kterou se formuje vzdušná cylindrická čočka, laserový dálkoměr Vivid 9i (Konica-Minolta) s nejistotou měření 0,1 mm [32].	13
obr. 3-2	Výsledky měření chyby vzniklé v důsledku optických deformací prostředí – plné tečky – naměřené relativní příčné zvětšení, prázdné čtverce – relativní naměřené přiblížení, čárkovaná čára – predikované relativní přiblížení, kontinuální čára – predikované příčné zvětšení; na svislé ose je zaznamenána relativní chyba, na vodorovné teplota vyhřívané plotny [32].	13
obr. 3-3	Schéma měřicí aparatury (kamera a laser), úhly β vyjadřují jednotlivé polohy měřicí aparatury vůči objektu, ve kterých byla provedena simulace (celkem 3 – 0 °, 15 ° a 30 °), legenda (n – lokální index lomu atmosféry) [12].	14
obr. 3-4	Výsledky simulace chyby měření (rozdíl mezi bodem měřeným bez a s nehomogenním indexem lomu prostředí) podél osy w_y (viz obr. 3-3) – vlevo průběh chyby v souřadném systému, který je spojen s objektem, pro různé teploty výkovku, vpravo průběh chyby, sledovaný na senzoru kamery v pixelech (koreluje s chybou měřenou v prostoru), pro různé pozice β (opět viz obr. 3-3) [12].	15
obr. 3-5	Uspořádání kamer videogrammetrického systému [33].	15
obr. 3-6	Pracovní plocha měřicího fotogrammetrického systému XJTUDP, na obrázcích lze vidět kalibrační objekt [33].	16
obr. 3-7	Kruhová kódovaná kalibrační značka – ve středu – kontrastní kruh pro segmentaci a lokalizaci značky; prstenec – unikátní kód značky [4].	17
obr. 3-8	Odezva různě orientovaných Gaborových filtrů a „Laplacian of Gaussian“ filtru na vstupní obrázek; součet a násobek výsledných obrazů [39].	18
obr. 3-9	Kódované kalibrační značky ArUco (5, 6, a 8 bitů) [40].	19

obr. 3-10	Vlevo – výsledek měření, které provedl Tian [44], vpravo – výsledek měření, které provedl Du [45].	21
obr. 3-11	Měření sousostí válcových částí výkovku s různými poloměry; měření je provedeno 2 laserovými dálkoměry („A“ a „B“), které se v rámci měření otáčejí přibližně okolo osy výkovku v naznačených rovinách [46].	22
obr. 3-12	System stereovize s promítáním strukturovaného světla projektorem [19].	23
obr. 3-13	Triangulované body na středech pruhů promítaných projektorem na hranici tělesa (modře) [18].	24
obr. 3-14	Jednotlivé triangulované body na pruzích promítaných projektorem (červeně) [19].	24
obr. 3-15	a) běžný snímek, b) použití spektrálně-selektivní metody [18].	25
obr. 3-16	Vlevo – měřicí aparatura využívající výkonné laserové pole, vpravo – výsledek 3D rekonstrukce povrchu výkovku s využitím 2 stereopárů a laserového pole [20].	25
obr. 3-17	Konfigurace systému využívající principu liniového skeneru [16].	27
obr. 3-18	Konfigurace měřicí stanice – vlevo dole liniový skener pro vnější povrch s 1 kamerou a liniovým laserem, vpravo liniový skener s 2 kamerami a 1 liniovým laserem pro vnitřní povrch, obrobek je umístěn na rotačním stole, teplota obrobku je snímána pyrometrem [17].	28
obr. 3-19	Měřicí zařízení – pohyblivá platforma měřený vzorek posunuje přes portál s 8 statickými liniovými skenery, sestava je opatřena krytovaním a obsahuje i pyrometry pro měření teploty výkovků [47].	30
obr. 3-20	Vlevo – měřená scéna, uprostřed – pozice kamery relativně vůči měřenému objektu během měření, vpravo - výsledná 3D rekonstrukce povrchu snímaného dílu [48].	31
obr. 3-21	Vlevo geometrický model stereopáru, vpravo vykreslení míry závislosti chyby výsledných souřadnic na délce základny stereopáru (na svislé ose velikost míry závislosti chyby na délce stereopáru, na vodorovných osách je vzdálenost měřeného objektu a délka základny stereopáru) [49].	32
obr. 3-22	Schéma experimentu – vyznačena je vzdálenost od objektu a délka základny stereopáru [49].	32
obr. 3-23	Chyby měření stereopárem o základně 600 mm v závislosti na vzdálenosti měřeného objektu: (a) 1000mm; (b) 1500 mm; (c) 2000 mm; (d) 2500 mm; (e) 3000 mm.	33

obr. 3-24	Chyby měření stereopárem ze vzdálenosti 3000 mm v závislosti na délce základny: (e) 600 mm; (j) 800 mm; (o) 1000 mm; (t) 1200 mm; (y) 1400 mm [49].	33
obr. 3-25	Schéma konceptu měřicího systému, zleva: počítač, kamery osazené filtry typu horní propust, xenonová lampa a horký výkovek [29].	35
obr. 3-26	Stereovize při měření výkovku – dvojice snímků vlevo nahoře – snímky pořízené experimentální aparaturou za použití spektrálně-selektivní metody, vlevo dole – významné body s vyznačenými korespondencemi mezi snímky, vpravo – 3D rekonstrukce [29].	35
obr. 3-27	Měřicí zařízení pro rozměrovou kontrolu klikové hřídele za zvýšené teploty; 1 – měřicí stůl, 2 - měřený objekt, 3 – držák měřeného objektu (prizmata), 4 – nohy stolu redukující otřesy, 5 – kamery měřicího systému, 6 – osvětlovací systém [30].	36
Obr. 3-28	Rekostrukce objektu pomocí pasivní stereovize (mračno bodů) – a) skutečná kliková hřídel, b) texturovaný model klikové hřídele [30].	36
obr. 3-29	Segmentace výkovku ve viditelném spektru [54].	37
obr. 3-30	Segmentace výkovku v NIR spektru [54].	37
obr. 3-31	Vlevo – obraz výkovku zpracovaný Cannyho hranovým operátorem, vpravo – obraz výkovku zpracovaný navrženou metodou segmentace [55].	39
obr. 3-32	Schéma zkušební aparatury, zobrazující měřený horký objekt před v odporové peci, monochromatickou CCD kameru a počítač [56].	39
obr. 3-33	Měřené rozměry zkušebního tělesa [56].	40
obr. 3-34	Fotografie při využití (zleva): červeného, zeleného, modrého, a IR cut barevného filtru [57].	41
obr. 3-35	Kontrast výkovku při použití barevných filtrů (filtr 0 – bez filtru, filtr 1 – červený filtr, filtr 2 – zelený filtr, filtr 3 modrý filtr, filtr 4 – IR-cut filtr, filtr 5 – červený + IR-cut filtr, filtr 6 – zelený + IR-cut filtr, filtr 7 – modrý + IR-cut filtr) [57].	41
obr. 3-36	Vliv zvýšeného kontrastu v důsledku aplikace spektrálně-selektivní metody na spolehlivost segmentace horkého objektu – vlevo bez využití spektrálně-selektivní metody, vpravo – spektrálně-selektivní metoda byla využita [57].	41
obr. 3-37	Fotografie pořízené měřicím systémem během testů v laboratoři [58].	43
obr. 3-38	Schéma pasivního fotogrammetrického systému [27].	44
obr. 3-39	Schéma metody nalezení a zpřesnění souřadnic hranových bodů [59].	45
obr. 3-40	Rekonstrukce geometrie výkovku a určení přímosti jeho osy [59].	45
obr. 3-41	Fotografie výkovku s nalezenými hranami – nalezené hrany před validací jsou vyznačeny modře [59].	46

obr. 3-42	Průměrná chyba měření vzorků 1-7, zleva: maximální průhyb studených vzorků (velikost, pozice), rozměry studených vzorků (délka, průměr), rozměry zahřátých vzorků (délka, průměr) [27].	46
obr. 3-43	Prognóza přesnosti pasivního fotogrammetrického systému založeného na snímání siluet [59].....	47
obr. 5-1	Schéma výzkumu a vývoje fotogrammetrického systému pro měření výkovků. 62	
obr. 5-2	Schéma snímací aparatury.	62
obr. 6-1	Současný stav řešení disertační práce.	69
obr. 6-2	Snímací aparatura, skutečné pozice kamer [61].	70
obr. 6-3	Termoregulované kryty kamer [61].	71
obr. 6-4	Zásobník optických filtrů s kamerou ZWO ASI 1600 MM a objektivem Zeiss Interlock Compact [62].	71
obr. 6-5	Kalibrační značky vytisknuté metodou přímého UV tisku [61].	72
obr. 6-6	Schéma triangulace osy výkovku – určení měřítka.	73
obr. 6-7	Příklady výsledků rozpoznávání kalibračních značek za ztížených podmínek; zelené číslo je rozpoznáný identifikátor kalibrační značky, červeně je značena chyba rozpoznání v bitech.	74
obr. 6-8	Vlevo kalibrační scéna s výkovkem, vpravo vliv tepelně ovlivněné atmosféry na střední kvadratickou chybu kalibrace ve snímcích pořízených krátce po sobě [61].	75
obr. 6-9	Měření výkovku 2 laserovými skenery Faro.	76
obr. 6-10	Výsledek stávající detekce hran na stávajících datech bez validace ¹	76
obr. 6-11	Část výsledku – profil osy (červená část je mimo toleranci přímosti, 2 mm), délka výkovku, maximální průhyb osy a pozice maximálního průhybu ¹	77
obr. 6-12	Statistické vyhodnocení vybraných geometrických charakteristik z 5 měření, osy jsou v mm.	77

11 SEZNAM TABULEK

tab. 3-1	Přesnost a spolehlivost rekonstrukce souřadnic triangulovaných bodů [48]. ..	31
tab. 3-2	Volba vhodného filtru v závislosti na teplotě výkovku [57].	42
tab. 6-1	Typ a vlastnosti použitého hardwaru a snímací aparatury jako celku.	70
tab. 6-2	Ověření přesnosti kalibrace kamer – chyby rekonstrukce souřadnic kalibračních značek v prostoru - $e3DRMS$ – střední kvadratická chyba rekonstrukce souřadnic značek ve 3D, φ – úhel pozorování kal. značek, e_{max} – maximální chyba souřadnic ve směru kolmém na směr hloubky (dále označována jen jako 2D), $eRMS$ – střední kvadratická chyba souřadnic ve 2D, l_{max} – maximální naměřená délka ve scéně, $\xi eRMS$ – relativní střední kvadratická chyba ve 2D [61].	74

PŘÍLOHA

tab. P-1 Seznam publikací.

Publikace 3 – impaktovaný článek – odeslání 6/2019, souvisí se zaměřením DP

Název manuskriptu	Circular coded target system for industrial applications.
Autoři	Hurník, J., Zatočilová, A., Paloušek, D.
Periodikum	Machine Vision and Applications
Stav	V redakci, prozatím není přijato
Impact factor	1,605 (2019), Q2
Citace	-

Publikace 2 – konferenční příspěvek – odeslání 4/2019, souvisí se zaměřením DP

Název manuskriptu	Camera calibration method of optical system for large field measurement of hot forgings in heavy industry.
Autoři	Hurník, J., Zatočilová, A., Paloušek, D.
Periodikum	Proceedings of SPIE (sborník, indexováno ve WoS i Scopus).
Stav	Publikováno ; https://doi.org/10.1117/12.2527693
Impact factor	-
Citace	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

Publikace 1 – konferenční příspěvek – odeslání 4/2019, nesouvisí se zaměřením DP

Název manuskriptu	Heat treatment of the SLM processed lattice structure made of AlSi10Mg and its effect on the impact energy absorption.
Autoři	Vrána, R., Vaverka, O., Červínek, O., Pantělejev, L., Hurník, J., Koutný, D., Paloušek, D.
Periodikum	Euro PM2019 Proceedings (sborník, indexováno ve Scopus).
Stav	Publikováno
Impact factor	-
Citace	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: <i>Euro PM2019 Proceedings</i> . 2019.

Funkční vzorek 2 – odeslání 7/2020, souvisí se zaměřením DP

Název Revolverový zásobník barevných filtrů

Autoři Hurník, J., Kilián, O.

Funkční vzorek 1 — odeslání 12/2019, souvisí se zaměřením DP

Název Optický systém pro měření rotačních výkovků za tepla

Autoři Zatočilová, A., Hurník, J., Haman, T.

Software 1 – odeslání 4/2019, souvisí se zaměřením DP

Název Kalibrace kamer pomocí kódovaných značek

Autoři Hurník, J., Zatočilová, A.
