



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

### Kontrola rozměrové přesnosti horkých výkovků pomocí principů pasivní fotogrammetrie

Passive photogrammetric measurement of dimensional accuracy of hot heavy forgings

PhD projekt

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jakub Hurník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

BRNO 2018



---

## **ANOTACE**

Rozměrné, rotačně symetrické výkovky jsou používány jako polotovary pro hřídele v energetickém, lodním a petrochemickém průmyslu. Během výroby vzniká potřeba jejich měření, zejména určení přímosti osy – tu lze korigovat tříbodovým lisem. Podmínky měření jsou velmi specifické - vysoká teplota a velké rozměry polotovarů, prostředí těžké výroby – nelze zde použít běžné optické měřicí systémy. V současné době na světě existuje pouze několik měřících systémů pro zmíněný účel - všechny mají nicméně velké nevýhody v podobě vysoké ceny, nutnosti použití silného zdroje světla, nebo jsou poskytována pouze částečná nebo nepřesná data.

Práce se zabývá aplikací metod pasivní fotogrammetrie pro měření výkovků – systém pracuje s kamerami a využívá světla, které emituje sám horký výkovek. Koncepce překonává zmíněné nevýhody.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Fotogrammetrie, měření, kontrola kvality, výkovky, vysoká teplota

## **SUMMARY**

Heavy, rotationally symmetric forgings are used as semi-finished products (for shafts) in the energy, shipbuilding and petrochemical industry. The measurement needs to be carried out during the manufacturing process, especially the determination of axis straightness, which can be corrected using a three-point press. The conditions of measurement are very specific – high temperature and large dimensions of semifinished products, heavy production environment - conventional optical measuring systems can't be used there. There are only a few measuring systems in the world for this purpose, in addition, they have great disadvantages including high prices, the need of a strong light source, or only partial or inaccurate data are acquired. This work deals with the development of a passive photogrammetric system for the measurement of forgings - the system works with cameras and uses the light emitted by the hot forging itself. The concept overcomes the mentioned drawbacks.

## **KEYWORDS**

Photogrammetry, measurement, quality control, forgings, high temperature

---



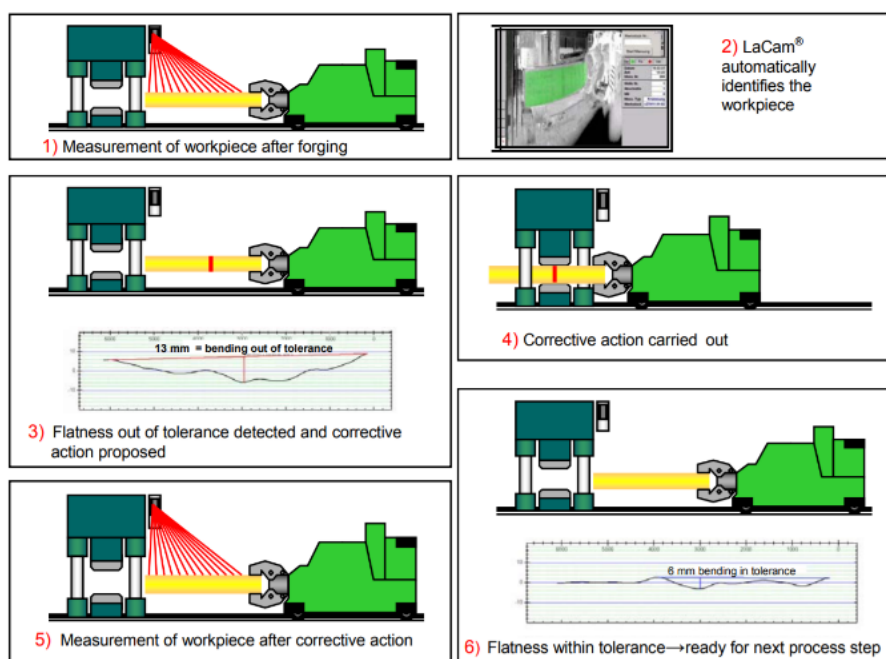
**OBSAH**

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Shrnutí současného stavu poznání</b>	<b>9</b>
2.1	Blízká fotogrammetrie	9
2.1.1	Základní principy fotogrammetrie	9
2.1.2	Zpracování digitálního obrazu	9
2.2	Optické metody a aspekty měření horkých výkovků	12
2.2.1	Laserové skenery	13
2.2.2	Aktivní fotogrammetrie	13
2.2.3	Pasivní fotogrammetrie	16
<b>3</b>	<b>Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků</b>	<b>19</b>
3.1	Shrnutí a zhodnocení řešerše	19
<b>3.2</b>	<b>Oblasti chybějícího poznání a hypotézy</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>Podstata, cíle a přínos disertační práce</b>	<b>21</b>
4.1	Podstata disertační práce	21
4.2	Cíl práce	21
4.3	Přínos práce	21
<b>5</b>	<b>Vědecké otázky a pracovní hypotézy</b>	<b>23</b>
<b>6</b>	<b>Způsob řešení a použité metody</b>	<b>24</b>
6.1	Podmínky a výstup měření	24
6.2	Postup řešení	24
6.3	Experimentální aparatura	24
6.4	Sběr dat	26
6.5	Experimenty a vývoj softwarového řešení	26
6.5.1	Test kalibrace kamer a stabilita parametrů aparatury	27
6.5.2	Metoda segmentace výkovku	27
6.5.3	Měření siluet	27
6.5.4	Korelační metoda	27
6.5.5	Rekonstrukce objektu	27
<b>7</b>	<b>Časový rozvrh a etapy řešení</b>	<b>29</b>
<b>8</b>	<b>Odůvodnění nutnosti a potřebnosti řešení</b>	<b>30</b>
<b>9</b>	<b>Spolupráce s jinými institucemi</b>	<b>31</b>
<b>10</b>	<b>Předpokládané náklady a jejich zdroje</b>	<b>32</b>
<b>11</b>	<b>Předpokládaný výsledek</b>	<b>33</b>
<b>12</b>	<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>34</b>
<b>13</b>	<b>Vědecký životopis</b>	<b>36</b>
<b>14</b>	<b>Seznam obrázků a grafů</b>	<b>38</b>
<b>15</b>	<b>Seznam tabulek</b>	<b>39</b>



## 1 ÚVOD

Výkovky rotačního tvaru jsou výchozími polotovary, které slouží k výrobě komponent (hřídelí) pro lodní, petrochemický a energetický průmysl. Rozměry takových výrobků mohou dosahovat i více než 20 metrů na délku nebo 6 metrů v průměru. Proces výroby sestává z více kovacíh fází a konečné fáze, během níž je korigována přímota osy polotovaru (během všech operací musí mít výkovek kovací teplotu 850 – 1250 ° C). Kontrola kovacího procesu na základě přesného a rychlého měření výkovků, zejména během závěrečné fáze rovnání (Obr. 1), může přinést výrazné úspory materiálu a energie. Toto měření musí probíhat za kovacíh teplot (navíc ve velkém měřicím objemu) – běžné fotogrammetrické systémy zde nemohou být použity. Přestože se jedná o velice nákladnou produkci, běžně se i v dnešní době používají pro měření výkovků kontaktní měřidla (posuvná měřidla, kalibry) [1], jejichž přesnost je omezená<sup>1</sup> a jsou poskytnuta pouze částečná data. Přímota osy nelze pomocí kontaktních měřidel určit vůbec – je korigována pouze na základě odhadu operátora. Dosahovaná rozměrová přesnost polotvarů koreluje s množstvím přídavků na obrábění, který dle platné normy „ČSN 42 9011“ [3] tvoří až přes 20 % celkového množství materiálu výkovku.



Obr. 1 schéma použití systému LaCam® Forge od společnosti Ferrotron – krok 1) znázorňuje snímání výkovku, krok 2) automatickou identifikaci výkovku, krok 3) vyhodnocení dat z měření (přímota jeho osy), krok 4) vyrovnání výchylky osy třibodovým lisem [4]

Pro účely měření rozměrové přesnosti výkovků během procesu výroby bylo vytvořeno pouze několik komerčních systémů na celém světě (všechny tyto systémy jsou založeny na principu laserového skeneru). Zástupcem je např. LaCam Forge od společnosti Mintage [10] - systém používá infračervený laserový skener pro určení

<sup>1</sup> Bračun et al. [2] zmínil nejistotu měření průměru výkovku posuvným měřidlem – 2 mm ( $4\sigma$ ) na 200 mm průměru (1 %). To souvisí s lidskou chybou při měření a s faktem, že měření je pouze dvoubodové (je více ovlivněno hrubostí povrchu). Bračunem navržený optický systém na principu liniového skeneru dosahoval oproti měření posuvným měřidlem nejistoty desetinné - 0,2 mm.

mračna bodů na povrchu výkovku, na základě nichž je určena jeho geometrie. Software systému obsahuje nástroje, které s touto geometrií pracují, za účelem simulace a optimalizace celého procesu kování pro dosažení maximální přesnosti polotovarů (možnou minimalizaci přídavek na obrábění) a rychlosti kovacího procesu (pro snížení počtu ohřevů a úsporu energie). Nevýhodou systému je jeho laserová skenovací jednotka – laserový skener, schopný měřit v dostatečném měřicím objemu, je velice drahý<sup>2</sup> a skenování je pomalé (čas provedení jediného liniového skenu je v případě LaCam Forge 10 sekund [4]).

Zmíněné nevýhody motivují výzkum v této oblasti. Většina výzkumných prací se zaměřuje na vývoj metod měření, které jsou založeny na principu aktivní blízké fotogrammetrie. Nevýhodou tohoto přístupu je nutný extrémně silný zdroj světla (síla zdroje světla také limituje měřicí objem), který může být drahý nebo může mít negativní vliv na bezpečnost v pracovním prostoru. Elegantnějším a levnějším řešením je využití světla, které emituje sám rozžhavený výkovek. Touto problematikou se zabývala zejména Zatočilová a kol. [5], která navrhla, otestovala a demonstrovala potenciál jednoduché metody měření horkých polotovarů na základě snímání siluet měřeného objektu stereopárem kamer (metoda je omezena na rotačně symetrické polotovary a byla testována pouze v laboratorních podmínkách). Koncept má oproti ostatním navrhovaným metodám výhodu v jednoduchosti, rychlosti a nízké ceně komponent, zatímco splňuje požadavky na přesnost.

Práce se zabývá rozšířením současného stavu poznání v této specifické oblasti aplikace počítačového vidění (ve smyslu systematického testování a zhodnocené vlastností metod pasivní fotogrammetrie nebo zpracování obrazu) za účelem zrychlení, zpřesnění a rozšíření aplikace pasivní fotogrammetrie v oblasti měření nebo sledování výkovků. Sekundárním výsledkem práce bude dostupný, prakticky použitelný pasivní fotogrammetrický měřicí systém, který přinese možnost monitorování rozměrové přesnosti kovaného polotovaru v jednotlivých fázích kování. Tato data mohou být dále využita pro optimalizaci kovacího procesu a korekci rozměrové přesnosti výkovků.



Obr. 2 Výkovek [6]

<sup>2</sup> Údaje o ceně systému LaCam Forge nejsou dostupné, nicméně ekvivalentem měřicího komponentu by mohla být např. laserová skenovací jednotka Leica BLK360, jejíž cena se pohybuje okolo 16 000 Euro.

## 2 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Blízká fotogrammetrie

Blízká fotogrammetrie zahrnuje metody interpretace a měření obrazu za účelem studia tvaru a polohy objektu z jeho fotografií [7]. Výsledkem fotogrammetrického měření objektu je obvykle jeho rekonstrukce v digitální formě (množina bodů v souřadném systému) nebo formě grafické. Z hlediska metod zpracování obrazu představuje fotogrammetrie spojení mnoha oborů. Zasahuje do oboru fotografie, grafiky, zpracování obrazu, počítačového vidění nebo počítačově podporovaného projektování (CAD). Principů blízké fotogrammetrie využívají různá zařízení, jako jsou optické sondy, vícebodové souřadnicové měřicí přístroje, 3D skenery (pracující s projektorem nebo linovým laserem), systémy pracující s texturou povrchu, které fungují na principu korelační metody (rekonstrukce významných bodů na povrchu tělesa) a systémy měřící objekt na základě jejich siluet [8]. Zařízení se také dělí na aktivní a pasivní dle toho, zda používají nebo nepoužívají zdroj světla. Blízká fotogrammetrie a její principy mají široké uplatnění – ve stavebnictví a architektuře, v inženýrství a průmyslu, v kriminalistice, medicíně, přírodních vědách nebo počítačovém vidění.

#### 2.1.1 Základní principy fotogrammetrie

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 (modifikovaná rovnice středového promítání, epipolární geometrie [7]). V obecném případě je třeba znát jak orientaci kamery v prostoru (vnější orientace), tak její vnitřní geometrii (vnitřní parametry – ohnisková vzdálenost, zkreslení objektivu apod.) – proces získávání těchto údajů se nazývá kalibrace kamery (proces lze chápat i jako určení parametrů transformace z prostorových souřadnic do souřadného systému kamery pomocí optimalizačních metod).

Jak data, na základě nichž je kamera kalibrována (objekty ve snímku o známé geometrii nebo poloze), tak informace o měřených objektech jsou získány ze snímku pomocí metod měření a interpretace obrazu, které pracují s hranami, jasnem, případně rozložením barev v obraze. Na základě těchto dat (jestliže je jich dostatek) a matematické transformace ze světového souřadného systému do souřadného systému čipu kamery je poté možné provést rekonstrukci objektu (princip triangulace).

#### 2.1.2 Zpracování digitálního obrazu

Zpracování obrazu pro účely fotogrammetrie obnáší metody segmentace, detekce hran, detekce a měření geometrických primitiv a korespondence obrazů.

- **Segmentace**

K segmentaci obrazu lze použít např. prahování - rozdělení pixelů obrazu do tříd dle hodnoty jejich jasu podle uživatelem stanovené hodnoty prahu (tato hodnota může být určena i automaticky z histogramu, např. v případě Otsuovy metody).

Další metodou segmentace obrazu jsou hranové operátory (slouží k nalezení hran v rámci celého obrazu). Operátory mohou být založené na filtrech využívajících nulté derivace (dilatace eroze) první derivace, (Robertsův, Sobelův nebo Prewittův operátor) nebo druhé derivace a principu „zero crossing“ (Laplacian of Gaussian (LOG) operátor, Cannyho operátor) [7]. Komparační testy operátorů ukazují, že nejlepší

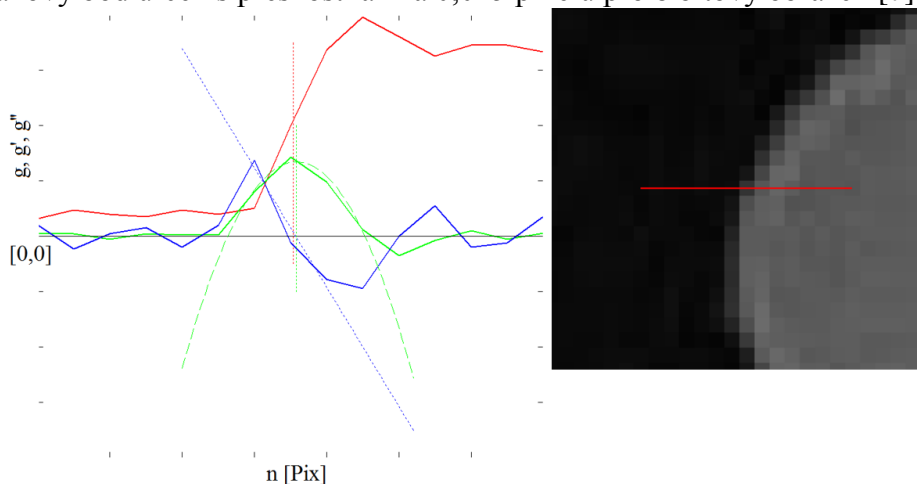
výsledků z hlediska spolehlivosti a odolnosti vůči šumu lze dosáhnout pomocí operátorů založených na druhé derivaci, zvláště Cannyho operátoru [9], [10].



Obr. 3 Výsledek úpravy obrazu Cannyho operátorem – červenou barvou jsou zvýrazněny nalezené hrany [7]

- **Metody měření prvků v obraze**

Hrany objektů na fotografii představují nejdůležitější data obrazu pro měření geometrických elementů. Hrany zachycené na snímku při bližším pohledu tvoří pozvolný přechod mezi plochami s různými hodnotami jasu, pokrývající několik pixelů. Hranového bod lze přesně určit pomocí metod subpixelové hranové interpolace, využívající nultou (metoda zachování momentů), první (metoda korelace) nebo druhou (metoda „zero crossing“) numerickou derivaci (Obr. 4). Teoreticky může být hranový bod určen s přesností až na 0,015 pixelu pro 8 bitový obrázek [7].



Obr. 4 Metody subpixelové detekce hran – červeně – data nulté derivace a metoda zachování momentů, zeleně – první derivace a metoda korelace, modře – druhá derivace a metoda „zero crossing“ [11]

- **Korelační metoda**

Korelační metoda pracuje se dvěma (stereovize) nebo více snímky objektu, které jsou pořízeny z různých úhlů a vzdáleností od objektu. Metoda je využívána pro nalezení a identifikaci bodů nebo oblastí v obraze pro následný výpočet jejich souřadnic v prostoru (např. pro rekonstrukci povrchu) nebo pro sledování objektů v sekvencích obrázků. Využívá se principů triangulace. Algoritmus lze rozdělit do následujících fází: nalezení a přesná lokalizace významných bodů nebo oblastí ve snímcích, unikátní popis každého elementu na základě lokálních informací v obraze a přiřazení elementů z různých snímků se shodným popisem k sobě.

Vzhledem k tomu, že objekt musí být fotografován z různých vzdáleností a úhlů, algoritmus hledání, určování polohy i identifikace významných bodů v obraze by měl být pokud možno invariantní vůči translaci, rotaci, změně měřítka, změně kontrastu a barev nebo rozmazání snímku.

Gil et al. [12] provedl test spolehlivosti algoritmů pro hledání významných bodů i jejich deskriptorů na fotografiích objektů pořízených z různých úhlů, vzdáleností a za různých světelných podmínkách. Výsledek byl určen na základně opakovatelnosti (invariance) vůči zmíněným vlivům. Srovnáno bylo mnoho nejpoužívanějších metod jak je např. Harrisův operátor, Harrisův-Laplaceův operátor, SUSAN (Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus) operátor, SIFT (Scale Invariant Feature Transform) operátor, SURF (Speeded Up Robust Features) operátor, MSER (Maximally Stable Extremal Regions) operátor a Kadirův operátor. Ze zmíněných operátorů byly jako nejlepší vyhodnoceny operátory MSER a Harrisův.

Z deskriptorů byly testovány SIFT, GLOH (Gradient Location-Orientation Histogram), SURF, Zenrikovy momenty, orientační histogramy a lokální  $10 \times 10$  šedotónové okolí. Zde dosahovaly nejlepších výsledků SURF a GLOH.

V současné době nicméně dochází k rozvoji deskriptorů, které jsou založeny na umělých neuronových sítích. Dosovitskyi [13] se zabýval návrhem architektury neuronové sítě pro deskripci významných bodů v rámci korelační metody. Navrhl síť s neurony ve 4 vrstvách a automatickou metodu jejího trénování. Generace tréninkových dat obnášela extrakci významných oblastí z obrázků a jejich náhodné afinní zkreslení, úpravu kontrastu nebo rozmazání – neuronová síť byla natrénována tak, aby různě deformované oblasti byly sítí přiřazeny k sobě. Autor jako detektor významných bodů použil operátor MSER. Natrénovanou síť poté experimentálně ověřil a její výsledky porovnal s konvenčními deskriptory – neuronová síť dosahovala výrazně vyšší spolehlivosti téměř za všech podmínek, nicméně deskripce byla několikanásobně výpočetně náročnější<sup>3</sup>.

Všichni zmínění autoři, provádějící komparace algoritmů pro hledání významných bodů i jejich deskriptorů, nicméně připouštějí, že vhodnost metod se může lišit v závislosti na prostředí zachyceném na fotografiích.



Obr. 5 Vlevo - významné body, uprostřed a vpravo – odpovídající významné body ze dvou různých snímků [14]

Aby mělo měření objektů založené na korelační metodě dostatečnou přesnost, je nutné zvolit správné rozmístění kamer v prostoru, respektive pořídit snímky objektu ze

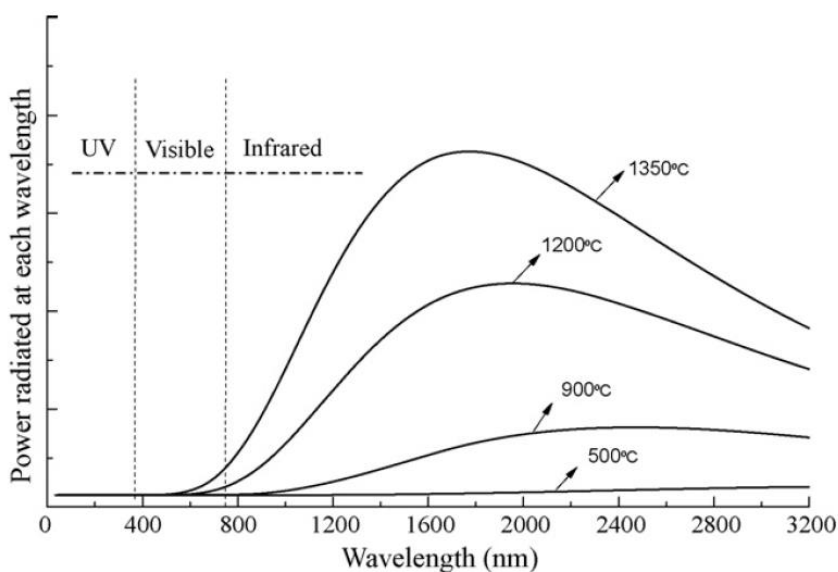
<sup>3</sup> Např. deskripce jednoho prvku trvá metodou SIFT 4.5 ms, deskripce prvku pomocí neuronové sítě 103,9 ms. Při použití hardwarové akcelerace pomocí grafické karty lze tento čas nicméně zkrátit na 1,8 ms [13].

správných poloh. Vlivem polohy kamer na přesnost stereovizního systému se zabýval Xu et al. [15]. Provedl sérii měření objektu ze vzdáleností 1000 – 3000 mm, délka základny stereopáru se pohybovala do 1500 mm. Autor na základě testů doporučuje pro tyto vzdálenosti zvolit základnu stereopáru 1000 mm – její další rozšíření nemá na přesnost systému podstatný vliv.

## 2.2 Optické metody a aspekty měření horkých výkovků

Na světě doposud vzniklo pouze několik návrhů systémů pro měření rotačně symetrických výkovků, tyto systémy jsou v různé fázi vývoje. Komerční aplikace zatím dosáhly pouze systémy založené na principu měření času letu světelného paprsku. Takové systémy jsou ovlivněny negativními vlastnostmi průmyslového prostředí pouze minimálně. Negativní vlastnosti prostředí jsou následující:

- Vibrace a prach – jejich působením může dojít k rozkalibrování nebo v krajním případě zničení měřicího systému.
- Působení horké atmosféry – s teplotou vzduchu se mění jeho index lomu. Proudění horkého vzduchu v chladnější atmosféře mohou působit jako čočky a zakřivovat světelné paprsky. Vlivem tohoto jevu na přesnost optického měřicího systému se zabýval Makoto Yamauchi [16], který vytvořil analytický model pro predikci maximální chyby způsobené tímto jevem. Autor předpokládal válcovou oblast horkého vzduchu, která tvoří čočku – spojku. Dle predikce se může tato chyba pohybovat i v řádech desetin procenta (dle experimentů v laboratorních podmínkách – válcovou oblast tvořila plotýnka o průměru 170 mm zahřátá až na 550 °C - byla tato hodnota nižší). Dále může mít teplota opět negativní vliv na rozkalibrování systému vlivem tepelné roztažnosti materiálu.
- Záření horkého tělesa – spektrální citlivost CCD nebo CMOS čipu se pohybuje v rozmezí vlnových délek 300 – 1100 nm. Silné záření horkého výkovku ve spektru blízkém infračervenému záření (nad 750 nm, viz Obr. 6) může způsobit rozmazání snímku [17]. Pro snímání takových objektů je tedy nutné používat pásmové filtry.



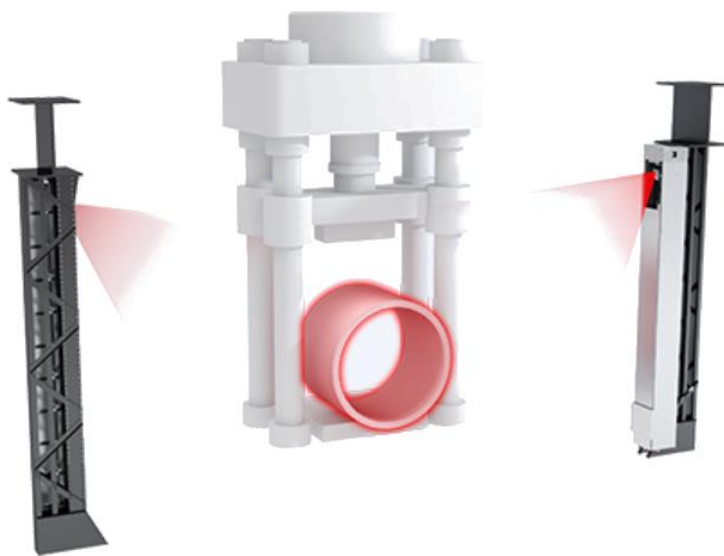
Obr. 6 Záření horkého tělesa – závislost intenzity na vlnové délce [18]

Díky těmto vlastnostem prostředí a také kvůli velkým rozměrům výkovků není možné pro měření výkovků on-line použít konvenční měřicí systémy.

### 2.2.1 Laserové skenery

Testováním použitelnosti laserového skeneru (principu měření času letu světelného paprsku) pro kontrolu rozměrové přesnosti výkovků se zabývali Tian et al. [19] a Du et al. [20]. Oba autoři se omezili pouze na měření délky a průměru výkovků. Du použil liniový laserový skener LMS100 2D německé společnosti SICK, který byl natáčen servomotorem. Tian použil nespecifikovaný bodový laserový skener, který byl natáčen okolo 2 os servomotory. Skenery použité oběma autory pracují v infračerveném spektru. Autoři provedli testy v průmyslovém prostředí na 3 m dlouhém výkovku o povrchové teplotě v rozmezí 1200 - 950 ° C s chybou systému menší než 2 %. Du uvádí čas měření i vyhodnocení přibližně 15 s, Tian čas neuvádí.

Na tomto principu pracují i komerční měřicí systémy pro komplexní monitorování procesu kování, např. LaCam Forge [4]. Systém je schopný vyhodnotit délku, průměr, přímost osy a teplotu výkovku. Čas potřebný na jeden liniový sken se pohybuje do 10 sekund (bližší informace, např. celkový čas potřebný ke skenování výkovku, nejsou dostupné). Software systému obsahuje navíc nástroje pro simulaci a optimalizaci procesu kování, který pracuje s naskenovanou geometrií. Podobný systém, pracující s dvěma laserovými skenery, nabízí společnost MERMEC Group – 3D Portal [20].

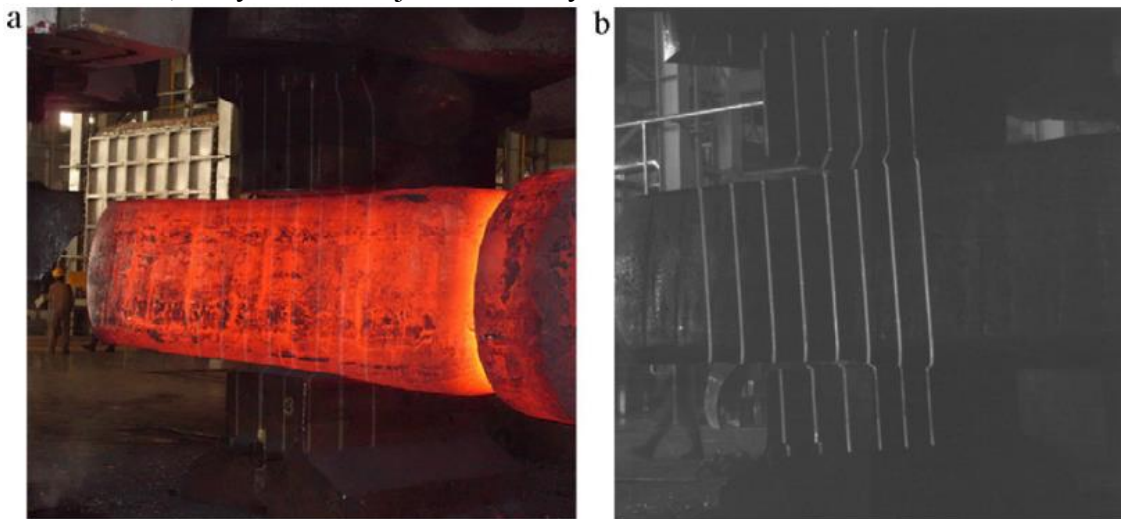


Obr. 7 MERMEC Group – 3D Portal [21]

### 2.2.2 Aktivní fotogrammetrie

Hlavními problémy, které je nutné řešit při vývoji aktivního fotogrammetrického systému pro tuto aplikaci, jsou velké rozměry měřených polotovárů a radiace výkovku, který při vysokých teplotách vyzařuje i viditelné světlo. Tyto podmínky společně s komplexním prostředím těžkého průmyslu a dalšími světelnými zdroji v okolí výrazně zhoršují kontrast mezi promítaným světlem a okolím, což vede k problémům při segmentaci obrazu a vyšší nejistotě měření. Za účelem odfiltrování světla, které vyzařuje sám horký výkovek, používají všichni autoři [2][18][22][23][24][25][26][27] spektrálně-selektivní metodu (používá se fyzikální filtr, který blokuje světlo vyzařované výkovkem a propouští světlo vyzařované systémem – dolní propust nebo pásmový filtr - Obr. 8), Bračun et al. [2] používá navíc diferenciální přístup – pracuje

s dvěma rychle za sebou pořízené fotografie (parametry snímání jsou shodné) s tím, že na jedné je měřený objekt osvětlen zdrojem světla, který využívá systém a na druhé ne. Odečtením těchto obrazů dojde k neutralizaci rušivého záření okolí za cenu zvýšení úrovně šumu, který autor filtruje Gaussovským filtrem.

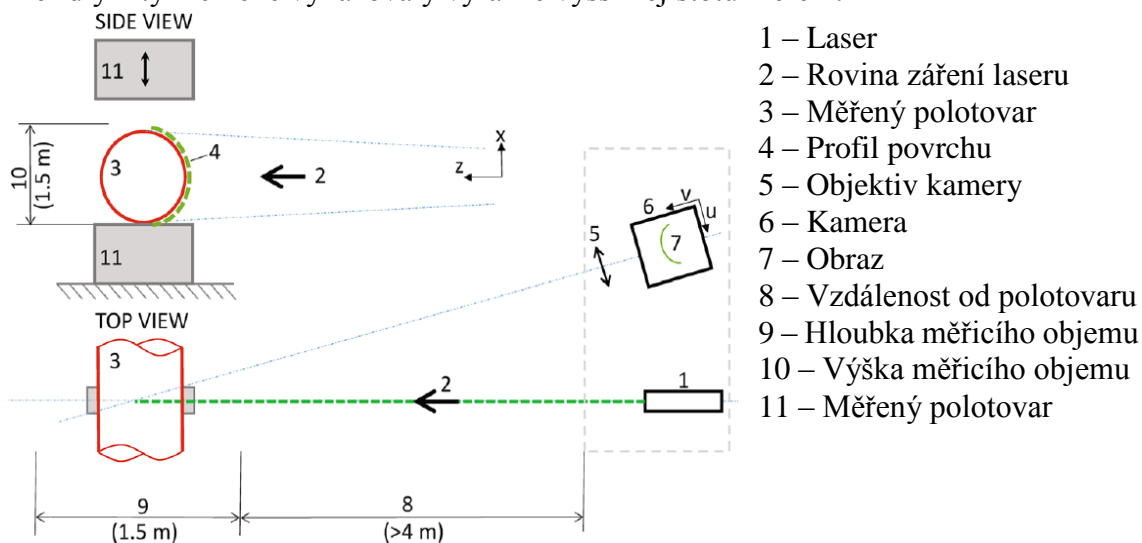


Obr. 8 a) – běžný snímek, b) – použití spektrálně – selektivní metody [24]

Zhang et al. [22] navrhl jednoduchý měřicí systém pro měření délky rotačně symetrických výkovků, pracující s nekalibrovanými komponentami – liniovým zeleným laserem (MGL-III, 400 mW) a luxmetrem (XYI-III). Luxmetr i laser byly umístěny na jednom tělese, které se pohybovalo po lineárním vedení rovnoběžně s osou výkovku. Je aplikována spektrálně selektivní metoda – na čidlo luxmetru je instalován úzkopásmový zelený filtr. Přesná poloha soustavy kamery a laseru na lineárním vedení byla určována pomocí magnetického pásku a enkodéru. Oba konce měřeného polotovaru byly detekovány na základě změny intenzity laserového světla odraženého od povrchu výkovku zpět do luxmetru – pro tuto situaci byl navržen predikční analytický model. Délka výkovku byla stanovena jako rozdíl poloh, ve kterých byly detekovány jeho konce. Chyba měření byla ve všech případech menší než 0,5 % a rychlost měření se pohybovala v řádu sekund (měřený polotovar byl 400 mm dlouhý).

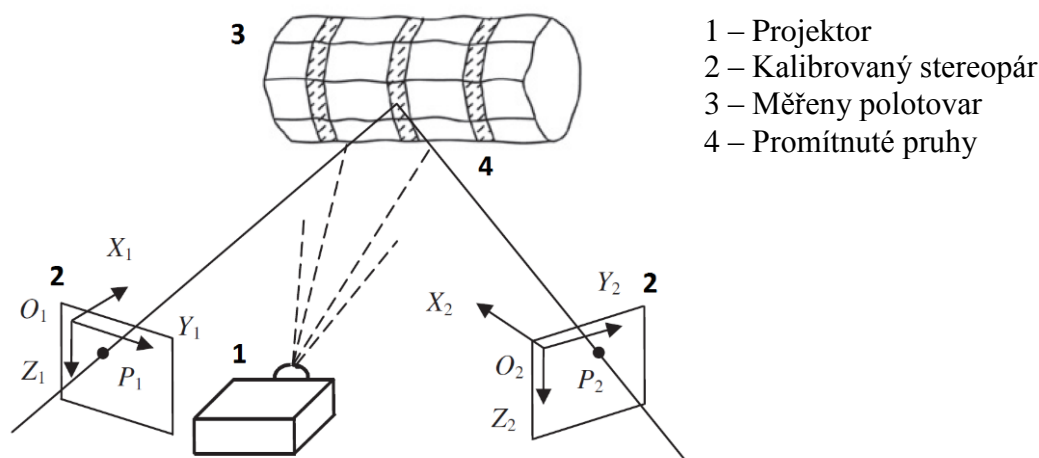
Další rozpracovaná metoda je založena na principu liniového skeneru. Konfigurace systému je podobná jako v případě uvedeném výše – využívá se výkonného zeleného liniového laseru a kamery (namísto luxmetru) se zeleným filtrem, nicméně kamera i laser jsou kalibrovány, soustava je opět umístěna na lineárním vedení s možností odečítat aktuální polohu – viz Obr. 9. Tuto konfiguraci použili Zhang et al. [23] (laser MGL-III, 400 mW, kamera MV-VE078SM/SC, rozlišení  $1024 \times 768$ ) a Bračun et al. [2] (přesný typ laseru a kamery nebyl uveden). Úhel mezi optickou osou kamery a rovinou laseru byl v obou případech  $30^\circ$ . Výsledkem každé dílčí operace skenování tímto liniovým skenerem 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). Oba zmiňované systémy vykazovaly nepřesnost měření méně než 0,5 %, rychlost měření a vyhodnocení nebyla uvedena. Největší rozměry testovaných výkovků byly v případě Zhanga 800 mm, v případě Bračuna 440 mm. Přesnou povrchovou teplotu výkovků autoři neuvádějí.

Jako referenční rozměr byl v obou případech použit rozměr určený kontaktními měřidly – ty nicméně vykazovaly výrazně vyšší nejistotu měření.



Obr. 9 Konfigurace systému využívající principu liniového skeneru [2]

Odlíšný princip byl rozvíjen autory Liu, Jia a kolektivem. Autoři (dle Obr. 10) využívají stereopár kalibrovaných kamer (REDLAKE ES4020, rozlišení  $2048 \times 2048$ ) osazené filtry typu dolní propust (BD 440SP, 440 nm) a nekalibrovaný DLP projektor (3M, PD80X, 5000 lm) [24] [25] [26], 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) [27]. Pomocí projektoru nebo laserů je na povrch výkovku rotačně symetrického výkovku promítnut vzor, který je poté triangulován pomocí stereopáru kamer. Autoři se omezili na měření průměru rotačních výkovků nebo siluet testovacích těles. Testy byly provedeny v laboratorních i reálných podmínkách, test přesnosti byl vždy realizován jen v podmínkách laboratorních. Chyba měření všech navržených variant byla pod 1 % (rozměry testovaných součástí se pohybovaly v rozmezí 100 – 200 mm). Čas měření a vyhodnocení nebyl explicitně uveden.



Obr. 10 Systém stereovize s promítáním strukturovaného světla projektorem [25]

Chronologicky první článek kolektivu [24] pojednává pouze o triangulování projektořem osvětlených bodů na siluetě měřeného tělesa (2D měření, na povrch výkovku byly promítnuty svislé nebo vodorovné pruhy) – je navržena metoda nalezení středu tenkých paprsků promítnutých projektořem 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). Středy paprsků jsou sledovány až k siluetě výkovku, na níž dojde ke skokové změně intenzity laserového světla. Tyto body jsou poté triangulovány.

Druhý článek kolektivu [25] 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 projektořem ve snímku se subpixelovou přesností použili autoři metodu založenou na Weibullově rozložení, které je možné pro danou situaci lépe modifikovat. Po nalezení promítnutých pruhů jsou tyto pruhy identifikovány a jejich průřezy triangulovány.

Další článek autorů [26] pojednává o spektrálně selektivním modelu použitým v předešlých článcích těchto autorů – účelem je predikovat odstup signál – šum. V práci je porovnávána intenzita světla promítaného projektořem (signál) a intenzita světla emitovaného výkovkem (šum, teplota povrchu výkovku se pohybovala v rozmezí 1150 – 1200 ° C). Teoretický model odstupu 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 projektořem.

V posledním zmíněném článku [27] autoři nahradili DLP projektořem 5 modrými výkonnými liniovými lasery. Byla experimentálně stanovena použitelná hranice odstupu signál – šum (signál by měl být minimálně 10 × silnější než šum) a pro ni a pro rozdílné teploty výkovků v rozmezí 1050 – 1250 ° C byly vypočítány minimální použitelné výkony laserů, vzdálenost laseru od výkovku byla 2 m, rozměry měřených výkovků se pohybovaly okolo 100 mm - např. při teplotě výkovku 1250 ° C byl potřebný výkon stanoven na 1004 mW. Chyba měření této koncepce byla nižší než 0,3 %.

Jia et al. [18] navrhl systém pracující se stereopárem kalibrovaných kamer a xenonovou lampou osvětlující povrch výkovku. Je použita spektrálně-selektivní metoda k odfiltrování světla, které je emitováno výkovkem (kamery jsou osazeny filtrem, který propouští pouze světlo o vlnových délkách kratších než 450 nm). Autor v článku pouze demonstruje možnost extrakce významných bodů v obraze Harrisovým detektorem a potenciál použití korelační metody (metodu deskripce významných bodů autor nezmiňuje). Rozměry testovaného polotovaru nebo výkon lampy autor také neuvádí.

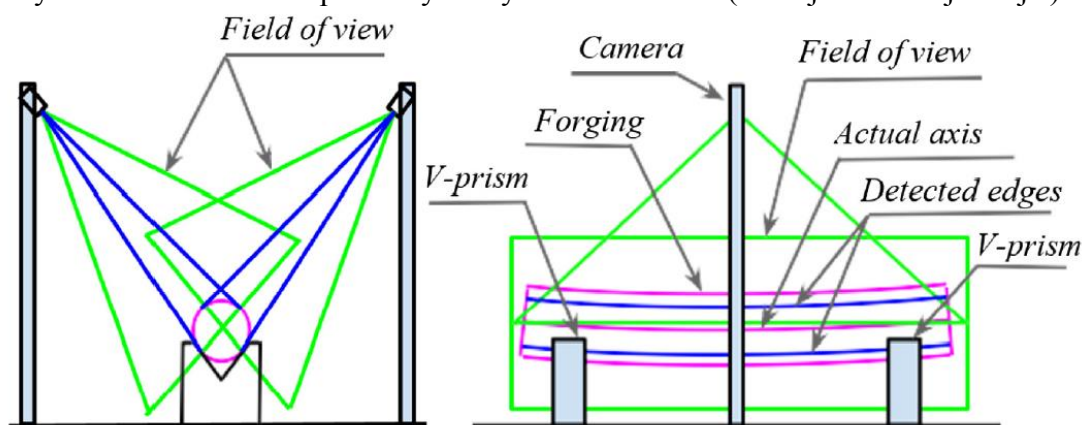
### 2.2.3 Pasivní fotogrammetrie

V současné době byly publikovány pouze práce, které se zabývají měřením rozměrů výkovků založeném pouze na snímání jeho siluet. Náročnost snímání siluet výkovku spočívá v textuře na jeho povrchu, která vzniká v důsledku nerovnoměrného chladnutí a tvorbě okují. Hu et al. [28] navrhl segmentaci výkovku na principu Cannyho hranového operátora. Metoda zahrnovala předzpracování obrazu pomocí ekvalizace

histogramu a postprocessing ve formě validace hran (na základě rozdílu hodnot pixelů interpolovaných Gaussovskými jádry s různými parametry – „Difference of Gaussians“). Přesnost detekce se pohybovala v řádu pixelů a bylo dosaženo spolehlivé detekce a odstranění nežádoucích kontur.

Bi et al. [29] navrhl na principu snímání siluet 2D měřicí systém pro měření rozměrů malých horkých součástí. Systém pracoval s jedinou kalibrovanou kamerou osazenou filtrem, který blokuje infračervené záření. Délky byly určovány komparací s referenčním rozměrem. Detekce hran byla založena na Sobelově hranovém operátoru. Test přesné segmentace siluet, nicméně z obrazu z kamery osazené NIR filtrem, úspěšně provedl Juan et al. [30].

Jediný 3D měřicí systém, založený na principech pasivní fotogrammetrie a zároveň další originální metoda detekce hran výkovku, byly navrženy Anetou Zatočilovou [4]. Prototyp systému využíval 2 kalibrované barevné digitální kamery sledující výkovek z radiálního směru, optické osy jsou kolmé a směřují do středu výkovku (Obr. 11). Systém používal k určení tvaru a rozměrů výkovku pouze jeho siluety (viditelné na Obr. 12). Měřen byl průměr, délka a byla rekonstruována osa výkovku. V článku byl navržen koncept systému pracující na navrženém principu, pracující s více než dvěma kamerami, schopný měřit i výkovky o délce 20 m a průměru 6 m. Systém byl schopen díky snímání siluet měřit pouze výkovky rotačního tvaru (které jsou ale nejčastější).



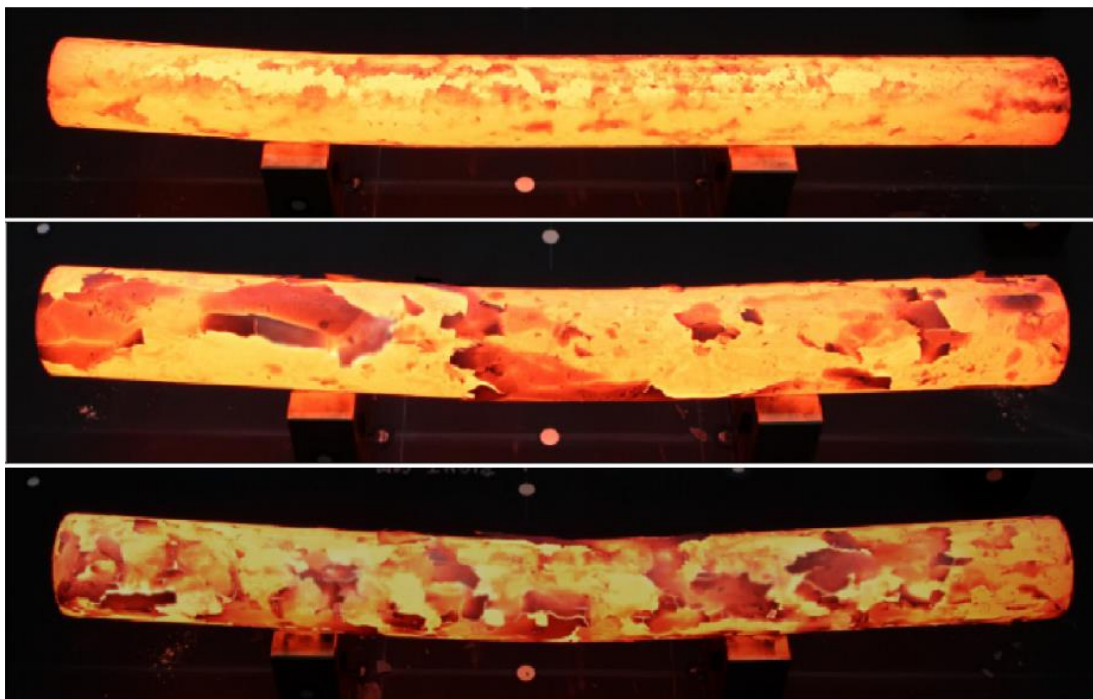
Obr. 11 Schéma pasivního fotogrammetrického systému [5]

Výkovek byl vložen do prizmat a byla vypočítána jeho referenční osa na základě známé polohy a geometrie prizmat a průměru výkovku. Konce výkovku byly nalezeny pomocí níže popsané detekce hran a obraz mezi těmito konci byl nařezán hustou sítí řezů. Na základě vzdálenosti kamery a referenční (přímé) osy byla počítána měřítka jednotlivých řezů (vliv zakřivení výkovku na měřítka byl zanedbán, nicméně byla nastíněna metoda iteračního výpočtu pro odstranění této nepřesnosti).

Systém dále využíval jednoduchou metodu detekce hran, díky čemuž byl schopen pracovat, jen pokud byla silueta výkovku velice kontrastní. Detekce hran pracovala se dvěma okny 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. Ve druhé fázi detekce byly tyto hrany validovány (byly použity širší okna) a poté byla detekce zpřesněna – byl zaveden předpoklad, že hrana se nachází v bodě, kde je největší první derivace stupně šedi. Takto nalezené hrany byly poté vyhlazeny Savitzki-Golay filtrem. Detekce pracovala s pixelovou přesností a byla citlivá na šum a texturu výkovku. Systém také využíval pouze základní metodu kalibrace kamer bez výpočtu zkreslení, které vzniká v důsledku nedokonalostí

geometrie kamery (byla využita přímá lineární transformace rovnic kolinearit). Zkreslení bylo korigováno předem, a to na celém snímku na základě uživatelem odhadnutých parametrů. Chyba kalibrace se pohybovala v řádech pixelů.

Rekonstrukce osy proběhla proložením siluet (hran) kružnicemi (předpokládanými řezy) – spojnice jejich středů poté určuje osu objektu. Aby byla chyba proložení minimalizována i v případě větších křivosti osy výkovku, byl navržen iterační výpočet, kdy byly roviny, ve kterých leží kružnice, natáčeny tak, aby jejich normála byla tečna k ose výkovku.



Obr. 12 Fotografie výkovků [5]

I přes tyto nedokonalosti byl měřicí systém poměrně přesný – chyba měření byla ve všech případech menší než 2 %, jeho rychlost se pohybovala okolo 45 s (test byl realizován na polotovarech o průměru 50 mm a délce 500 mm). Pro tuto aplikaci byla později vytvořena nová, vysoce přesná a rychlá metoda kalibrace kamer, která nicméně nebyla dosud implementována [11]. Kalibrace pracuje s množinou alespoň 10 kódovaných referenčních značek (jejich souřadnice v prostoru jsou známy) rozmístěných v měřicím objemu. Metoda je schopna kalibrovat jak jedinou kameru tak stereopár. Kalibrace počítá s dlouhodobě stabilními parametry zkreslení objektivu (nemí dojit k úpravě zaostření nebo výrazné změně teploty objektivu), všechny ostatní parametry kamer se mohou při pořizování jednotlivých snímků lišit (kalibrace byla vyvinuta pro kamery s nestabilní vnitřní geometrií – amatérské digitální zrcadlovky). Předpokládaným výsledkem implementace metody je podstatné zrychlení a zpřesnění systému.

### 3 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

#### 3.1 Shrnutí a zhodnocení řešerše

Sledování, kontrola kvality nebo měření rozměrných horkých výkovků pomocí bezkontaktních měřicích systémů je celkově málo probádanou oblastí – touto problematikou se zabývalo pouze několik vědeckých týmů na celém světě. Tyto týmy rozvíjely koncepce na různých principech – laserové skenování, aktivní fotogrammetrie nebo pasivní fotogrammetrie.

Komerční aplikace dosáhlo pouze řešení na základě laserového skeneru [4] [21]. Tento princip lze aplikovat velice jednoduše – horká atmosféra, záření výkovku nebo velké rozměry objektu totiž výkon systému nijak výrazně neovlivňují [19] [20]. Měřicí systém je dostatečně přesný, kompaktní a lze ho použít i na velké polotovary nebo polotovary nepravidelných tvarů. Nevýhodou je dlouhý čas skenování (až 10 s na liniový sken) [4].

Aplikace principů fotogrammetrie na tomto poli je složitější – systémy pracují s kamerami, které jsou silně ovlivněny zářením výkovku o vysoké teplotě (je nutné použít pásmový filtr) [17].

Výzkum se zde zaměřuje zejména na aplikaci principů aktivní fotogrammetrie (liniové skenery nebo promítání vzoru na povrch výkovku a jeho následná triangulace kalibrovaným stereopárem). Největším problémem těchto konceptů je dosáhnout dostatečného odstupe mezi signálem (promítané světlo) a šumem (světlo emitované výkovkem, světlo z okolí). Byly navrženy metody (spektrálně-selektivní metoda [26] nebo diferenciální přístup [2]) 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). Tento přístup zhoršuje bezpečnost v kovárně, hrozí poškození zraku. Výkon světelného zdroje také limituje měřicí objem (autoři testovali přesnost měření pouze na objektech o průměru v řádech desítek až stovek mm). Byl rozvíjen i koncept používající bezpečný DLP projektor [24] – autoři nicméně neuvažovali světlo z jakýchkoli zdrojů v kovárně [26]. Přesnost těchto aktivních systémů byla testována pouze v laboratorních podmínkách, měřen byl ve všech případech pouze průměr výkovků, a to s vysokou přesností, chyby měření se pohybovaly v desetinách procenta. Další výhodou aktivních systémů, kromě zmíněné přesnosti je možnost měřit komplexní tvary. Liniové skenery nicméně nemusejí být vhodné pro měření přímosti osy delších polotovarů – přesnost zde zřejmě bude výrazně ovlivněna případnými deformacemi lineárního vedení, po němž se laser s kamerou pohybuje.

Výhodou pasivních fotogrammetrických systémů je oproti již zmíněným přístupům teoreticky neomezený měřicí objem, nízká cena komponent, vysoká rychlost, bezpečnost (měření je bezkontaktní a není třeba silný zdroj světla) a jednouchost měření [5]. Vývoj pasivních fotogrammetrických systémů pro kontrolu kvality horkých výkovků se prozatím soustředil pouze na 2D a 3D měření objektů na základě jejich siluet. Nevýhodou tohoto přístupu je nicméně nemožnost jejich použití na objekty komplexních tvarů. V případě pasivního 3D měření [5] byla měřena délka, průměr a přímota osy výkovku. Testy (které nicméně proběhly pouze v laboratorních podmínkách) prokázaly ve všech případech dostatečnou přesnost a rychlost měření, přestože byly použity pouze základní metody segmentace obrazu a měření prvků v obraze, kalibrace kamer nebo rekonstrukce osy výkovku – tímto přístupem prokázal velký potenciál.

### 3.2 Oblasti chybějícího poznání a hypotézy

V rámci vývoje pasivního fotogrammetrického systému pro měření horkých výkovků chybí předně jakékoli testy kalibrace kamer ve velkém měřicím objemu (kvádr o stranách v řádu jednotek metrů), v němž se nachází objekt o velmi vysoké teplotě. Pro podobnou situaci byl vytvořen analytický model možné chyby, který předpokládá maximální odchylku měřených délek pouze v řádech desetin procenta [16]. Platnost tohoto modelu byla nicméně ověřena pouze v laboratorních podmínkách, v malém prostoru.

Při použití pásmových filtrů lze pořídit kontrastní ostré snímky horkých výkovků [17]. Segmentace výkovků z obrazu na principu prahování i hranových operátorů nebo metoda určení siluet výkovků byla již úspěšně navržena v pracích více autorů [5] [17] [28] [29] [30], byla nicméně vždy testována pouze na polotovarech základních geometrických tvarů. Poloha siluet byla vždy určena pouze s pixelovou přesností. Subpixelově přesná metoda detekce hran prozatím nebyla vyvinuta.

Vzhledem k jasně viditelné struktuře (okuje) na povrchu výkovků na fotografiích pořízených pasivním snímacím systémem např. Zatočilové [5] by mohlo být vhodné použití korelační metody pro rekonstrukci bodů na povrchu objektu. Experiment, který by prokázal nebo vyvrátil, vhodnost tohoto přístupu prozatím nebyl proveden. Proveden byl pouze experiment podobný, s tím, že povrch výkovku byl osvětlen xenonovou lampou a byla použita spektrálně-selektivní metoda – zde byl prokázán potenciál korelační metody, přesnost tohoto měření ale testována nebyla [18].

Dále chybí test přesnosti a spolehlivosti pasivního fotogrammetrického systému v reálných průmyslových podmínkách na velkých válcových polotovarech. Tento typ měřicího systému byl prozatím testován pouze v laboratorních podmínkách na jednoduchých válcových polotovarech, jejichž délka se pohybovala od 400 do 700 mm -chyba měření se zde pohybovala do 2 % [5] při použití pouze základních metod kalibrace kamer, měření siluet nebo rekonstrukce osy objektu. Celkový čas měření i vyhodnocení se pohyboval do 40 s. Dle závěrů těchto testů systém prokázal potenciál.

## 4 PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE

### 4.1 Podstata disertační práce

Podstatou práce je rozšířit současný stav poznání v oblasti fotogrammetrie a tyto poznatky aplikovat – přijít s novým řešením monitorování rozměrové přesnosti horkých výkovků pomocí principů pasivní fotogrammetrie.

### 4.2 Cíl práce

Cílem disertační práce je vývoj pasivního fotogrammetrického systému pro měření tvaru a rozměrů horkých výkovků, který bude splňovat reálné požadavky průmyslového prostředí. Bude měřena délka, průměr a přímota osy výkovku. Hlavním kritériem při návrhu systému je jeho aplikovatelnost v podmínkách těžkého provozu. Sekundárním cílem, který bude dosažen v rámci vývoje systému je zhodnocení vlastností metod pasivní fotogrammetrie a zpracování obrazu při zmíněné specifické aplikaci. Konkrétní prostor pro výzkum je zde bodově shrnut v dílčích cílech – výsledky takových experimentů prozatím nikdo nepublikoval. Hodnocení vlastností metod bude dosaženo jejich systematickým testováním na datech získaných v reálných průmyslových podmínkách.

#### Dílčí cíle:

- Změřit vliv tepelně ovlivněné atmosféry okolo horkého výkovku (v rozmezí kovací teploty) na přesnost kalibrace kamer ve velkém měřicím objemu v průmyslových podmínkách.
- Vyvinout různé přístupy segmentace výkovků (i osazených) a varianty subpixelově přesné metody měření jejich siluet pro pasivní fotogrammetrický systém, otestovat je na datech z reálných průmyslových podmínek a vybrat nejvhodnější<sup>4</sup> řešení.
- Na datech z reálných průmyslových podmínek otestovat různé metody v rámci pasivního korelačního přístupu pro rekonstrukci významných bodů na povrchu polotovaru a posoudit jejich vlastnosti<sup>4</sup>.
- Navrhnout různé kombinace využití dat o siluetách a významných bodech při digitální rekonstrukci objektu a zhodnotit je<sup>4</sup>, realizovat, optimalizovat a v reálných podmínkách otestovat nejvhodnější řešení.

### 4.3 Přínos práce

Optické systémy pro bezkontaktní měření rozměrové přesnosti výkovků přímo v procesu výroby přinášejí možnost přesného, bezpečného a komplexního měření (např. měření přímoty osy při procesu rovnání výkovku). Na základě měření je možné poskytnout zpětnou vazbu operátorovi, díky které lze dosáhnout přesnějších rozměrů polotovaru a tím ušetřit materiál a energii. V budoucnu by pak mohla být data využívána v rámci integrovaného systému pro automatické řízení a optimalizaci procesu kování, což koresponduje se současným trendem „průmysl 4.0“.

Komerční optické systémy pro zmíněnou aplikaci jsou založeny na principu laserového skeneru. Tento princip umožňuje přesné měření výkovků libovolných tvarů. Laserový skener je navíc jednoduše implementovatelný v této specifické

---

<sup>4</sup> Budou hodnoceny vlastnosti jako přesnost, spolehlivost a výpočetní náročnost.

aplikaci – záření horkého polotovaru nebo okuje nemají významný vliv na výkon systému [19], [20]. Měření je ale pomalé (během měření dochází k chladnutí výkovku) a cena komponent systému je vysoká, díky čemuž jsou tyto systémy v těžké výrobě málo rozšířené. Proto se i v dnešní době pro měření výkoků používají kontaktní měřidla [1], která jsou nepřesná [2], a např. přímost osy jimi nelze měřit vůbec.

Implementace principů fotogrammetrie pro účely měření rozměrové přesnosti výkoků je v porovnání s laserovým skenerem složitější – záření výkovku ve spektru blízkém infračervenému způsobuje rozmazání snímků [17], siluety objektů je složité segmentovat a měřit kvůli vyskytujícím se okujím [5], [28] apod. Dále chybí publikace odpovídající na základní otázky kladené při vývoji systému o vhodnosti nebo použitelnosti různých metod fotogrammetrie pro tuto specifickou aplikaci – tyto problémy prozatím překážejí implementaci fotogrammetrie na tomto poli. Disertační práce přinese řešení zmíněných problémů (specifikovaných v dílčích cílech práce) ve smyslu výběru nebo vývoje metod pasivní fotogrammetrie, které budou pro danou aplikaci vhodné. Na základě těchto poznatků bude vytvořen měřicí systém, splňující reálné požadavky průmyslového prostředí, který bude umožňovat rychlejší měření a jehož cena komponent bude výrazně nižší než u stávajících komerčních systémů. Získané informace mohou být také dále použity při vývoji jiných pasivních fotogrammetrických systémů pro účely sledování, měření nebo kontrolu kvality horkých výkoků. Zmíněné výstupy práce by mohly přispět k většímu rozšíření optických měřicích systémů v těžké výrobě.

## 5 VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

Práce by měla zodpovědět následující otázky:

- Do jaké míry bude přesnost kalibrace ve velkém měřicím objemu ovlivněna horkou atmosférou, která obklopuje výkovek?
  - Hypotéza: Dle Yamauchiho [16] analytického modelu budou odchylky měřených délek způsobené zakřivením světelných paprsků maximálně v řádu desetin procenta. Tento model byl nicméně verifikován pouze v laboratorních podmínkách, teploty atmosféry i velikost tepelně ovlivněného pole byly při experimentu výrazně nižší, než budou při měření horkých rozměrných výkovků v průmyslových podmínkách.
- Jaké metody zpracování obrazu nebo detekce hran jsou nejvhodnější (vykazující maximální spolehlivost nebo subpixelovou přesnost) pro segmentaci výkovku a získání přesných dat o jeho siluetách?
  - Hypotéza: Pomocí kvalitních kamer s pásmovými filtry bude dosaženo dostatečně kvalitních snímků, ze kterých bude možné výkovek segmentovat [17]. Pomocí hranových operátorů nebo metod detekce hranových bodů a jejich modifikací bude možné přesně určit polohu siluety výkovku [5], [28], [29], [30]. Zmíněná hypotéza je podpořena pouze experimenty v laboratorním prostředí na malých objektech základních geometrických tvarů, dosahovaná přesnost byla pouze v řádu pixelů.
- Bude použití korelační metody pro rekonstrukci bodů na povrchu tělesa přínosem pro přesnost a použitelnost pasivního fotogrammetrického systému a které metody budou pro tento účel nejvhodnější?
  - Hypotéza: Na povrchu žhavého výkovku bude viditelná dostatečně kontrastní a tvarově rozmanitá struktura [5].
- Jaká bude dosažitelná přesnost a rychlost měření a jaké budou další vlastnosti pasivního fotogrammetrického systému pro měření horkých výkovků?
  - Hypotéza: Měření výkovku pomocí principů pasivní fotogrammetrie bude dostatečně přesné a rychlé, aby získaná data byla přínosná pro těžkou výrobu [5]. Tato hypotéza je podpořena testy v laboratoři na polotovarech o délce 400 – 700 mm a průměru 50 mm, které byly zahřáty na kovací teploty. Test v reálných průmyslových podmínkách proveden nebyl.

## 6 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ METODY

Postup řešení je volen s ohledem na teoreticko-experimentální charakter práce.

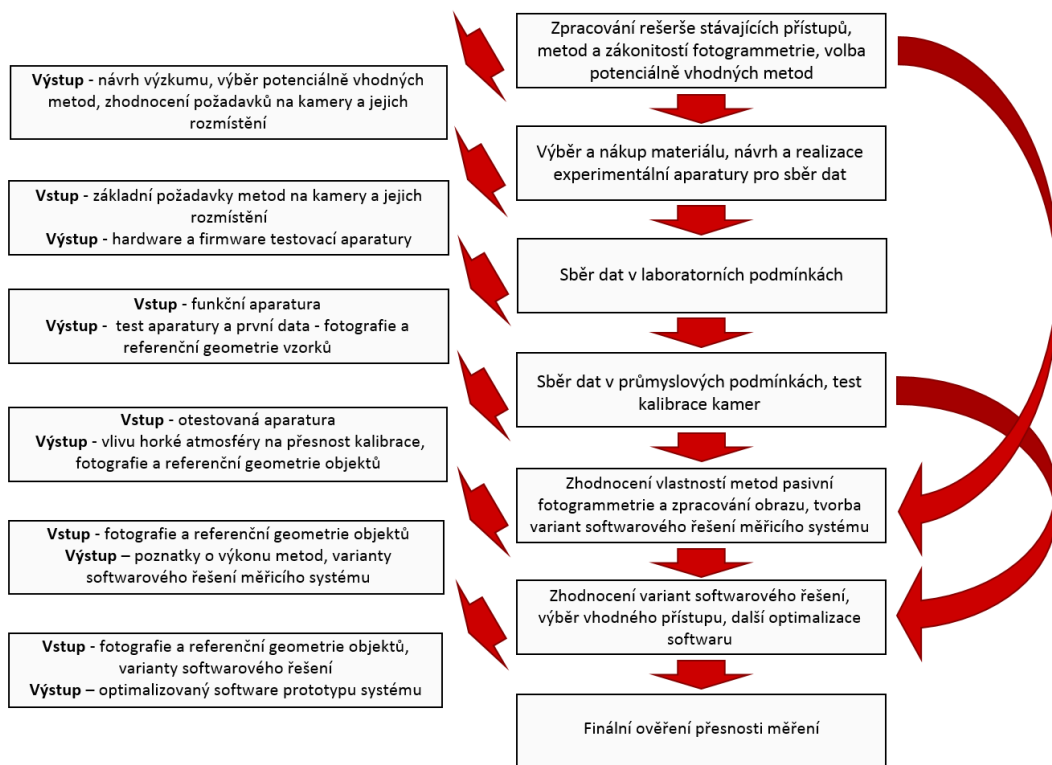
### 6.1 Podmínky a výstup měření

Aby byla zajištěna aplikovatelnost vyvíjeného měřicího systému v průmyslovém prostředí, podmínky a požadované výstupy měření byly formulovány na základě konzultace s průmyslovým partnerem:

- Výsledkem měření bude 3D model osy výkovku vázaný na referenční souřadnice manipulátoru, průměr výkovku a délka výkovku.
- Podmínky měření:
  - Vzdálenost kamer od osy výkovku – 6 – 12 m
  - Povrchová teplota výkovků – až 1250 ° C
  - Maximální délka výkovků – až 6 m
  - Maximální chyba měření -  $\pm 1$  mm/m

### 6.2 Postup řešení

Postup výzkumu je shrnut na Obr. 13:

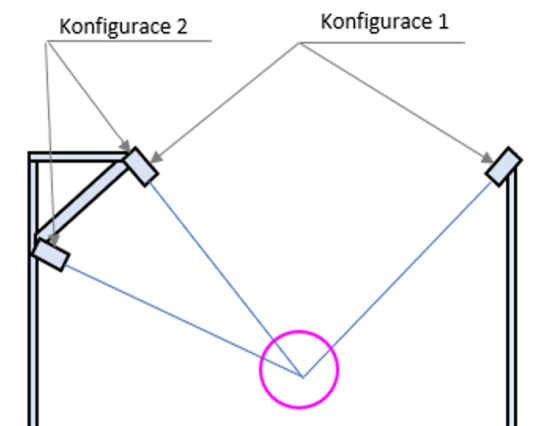


Obr. 13 Postup výzkumu

### 6.3 Experimentální aparatura

Na základě rešerše byly vybrány 2 hlavní přístupy – snímání siluet objektu (optické osy kamer svírají pravý úhel a směřují z radiálního směru do středu výkovku, viz Obr. 14, konfigurace 1) a rekonstrukce bodů na povrchu objektu na základě korelační metody (Obr. 14, konfigurace 2). Druhý zmíněný přístup vyžaduje v ideálním případě (z hlediska přesnosti) vzdálenost kamer stereopáru 1 – 3 × menší než je vzdálenost

stereopáru od objektu. Vzhledem k tomu, že se práce omezuje primárně na rotačně symetrické výkovky, je vhodné zároveň volit vzdálenost kamer co nejnižší, tedy jako třetinu vzdálenosti stereopáru od výkovku z důvodu maximalizace plochy na povrchu rotačního výkovku viditelné oběma kamerami. V tomto případě by nicméně nebylo možné využít plný potenciál měření objektu na základě jeho siluet – byla navržena aparatura, vyhovující oběma přístupům, využívající 3 kamery dle Obr. 14. Umístění kamer musí být co možná nejvíce stabilní, aby nedocházelo k rozkalibrování systému. Kamery budou kvůli tepelnému ovlivnění minimálně 6 m daleko od osy výkovku. Stativy nesmí nijak omezovat provoz kovárny. Konstrukci stativů provádí průmyslový partner projektu.



Obr. 14 Testovací aparatura

Během experimentů bude v souladu s požadavky kalibrační metody v měřicím objemu rozmístěno nejméně 10 kalibračních značek, jejichž přesná poloha 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 kalibrační metody). Značky budou nasprejovány na ocelových výpalcích tepelně odolnou reflexní barvou.

Aby bylo dosaženo dostatečně kvalitních snímků a neměnnosti vnitřních parametrů kamer (ohnisková vzdálenost atd.), jsou voleny kvalitní monochromatické průmyslové kamery s vysokým rozlišením (ZWO ASI1600MM, 16 MPx) a průmyslové objektivy s pevným ohniskem a zámkem zaostření (Zeiss Distagon T). Ohnisková vzdálenost objektivů bude volena tak, aby bylo právě dosaženo požadovaného měřicího objemu. Kamery budou osazeny pásmovým filtrem – budou provedeny experimenty s filtrem propouštějícím pouze záření blízké infračervenému (720 – 1100 nm) i s filtrem propouštějícím pouze viditelné světlo (380 – 750 nm).

Vzhledem k tepelnému zatížení celého prostoru budou kamery vybaveny ochrannými kryty s tepelnou regulací na principu vírové trubice (např. Tecnovideo). Tepelná regulace zajistí stabilitu vnitřních parametrů kamer při změnách teploty. Kryty budou vybaveny filtrem, který filtruje infračervené záření<sup>5</sup>.

Každá kamera bude řízena vlastním minipočítačem Intel Compute Stick. Tyto minipočítače budou bezdrátově komunikovat a posílat snímky do osobního počítače, z něhož bude měření řízeno a bude na něm probíhat vyhodnocování měření.

<sup>5</sup> záření nad 1100 nm – tyto vlnové délky již není schopen čip kamery zachytit, zároveň by mohly způsobovat problémy s tepelnou regulací kamery.

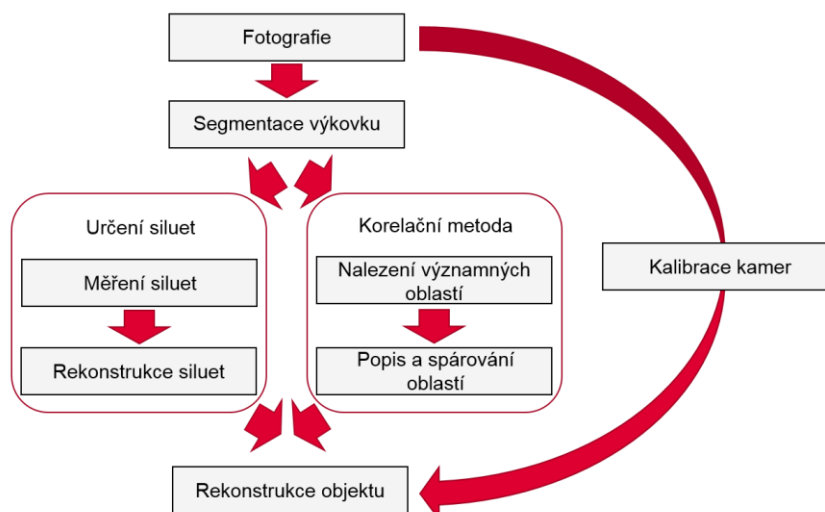
## 6.4 Sběr dat

Sběr dat proběhne nejdříve v laboratorních podmínkách – snímán bude jednoduchý válcový polotovary o průměru 50 mm, délce 500 mm a teplotě okolo 1200 ° C. Referenční rozměry budou určeny nepřímou – není k dispozici dostatečně přesný měřicí systém, kterým lze horký polotovary změřit – geometrie polotovaru bude změřena za studena (velmi přesným optickým 3D skenerem Atos TripleScan 8M), rozměr za tepla bude stanoven na základě uvažování tepelné roztažnosti. Tento experiment slouží zejména pro otestování funkčnosti experimentální aparatury, sekundárním účelem je pak první sběr dat – od tohoto okamžiku bude možné pracovat na vývoji softwaru.

Sběr dat v průmyslových podmínkách bude obnášet snímání osazených i neosazených válcových polotovary o různé velikosti (až do 6 m) a teplotě po rovnacím procesu. Snímání bude prováděno za standardního provozu kovárny při realizaci komerčních zakázek po několik dní (z hlediska kovárny nebudou třeba žádné náklady spojené s experimentem). Po vychladnutí budou polotovary změřeny zmiňovaným 3D skenerem. V případě potřeby rozšíření např. statistického vzorku pro finální analýzu přesnosti systému lze provést další sběr dat. Tato získaná data budou využita při vývoji softwarového řešení měřicího systému jako primární, díky změření geometrie výkovek hned v počátku mohou data poskytovat rychlou zpětnou vazbu o přesnosti a spolehlivosti metod. Po dokončení experimentů budou kamery ponechány v kovárně. Po uplynutí několika týdnů bude opět provedena kalibrace – bude určena stabilita parametrů kamer a její vliv na přesnost. V rámci obou experimentů bude testován vliv barevných filtrů.

## 6.5 Experimenty a vývoj softwarového řešení

Vyhodnocení použitelnosti metod pasivní fotogrammetrie a zpracování obrazu pro specifickou aplikaci - měření horkých výkovek, i vývoj softwaru měřicího systému bude probíhat v prostředí MATLAB, z důvodu dostupnosti velkého množství knihoven. Zjednodušené blokové schéma softwaru lze vidět na Obr. 15. Vhodnost metod bude hodnocena na základě tří hlavních kritérií – vliv na přesnost, spolehlivost a praktičnost systému. Vedlejším kritériem je pak výpočetní čas. Po vybrání vhodných metod bude software dále optimalizován, bude realizován finální test přesnosti měření a software bude přepsán do vhodného programovacího jazyka (např. C#), který umožní vytvoření aplikace použitelné v komerčním prostředí.



Obr. 15 Schéma procesů zpracování obrazu a rekonstrukce objektu

### 6.5.1 Test kalibrace kamer a stabilita parametrů aparatury

Vhodná metoda kalibrace kamer pro daný systém byla již vyvinuta a je schopna kalibrovat jak jednotlivé kamery, tak stereopár (viz Hurník [10]).

Prvním, nezbytně nutným experimentem je test přesnosti kalibrace kamer testovací aparatury během experimentů – může být do jisté míry negativně ovlivněna tepelným polem výkovku. Přesnost kalibrace bude určena na základě chyby rekalkulace referenčních bodů v prostoru do souřadného systému čipu kamery (na základě toho lze odhadnout chybu měření v prostoru). Jestliže by přesnost kalibrace nevyhovovala, bylo by nutné zvážit úpravu metody kalibrace nebo jiné prostorové uspořádání kalibračních značek.

Dále bude testována stabilita kalibrace kamer. Navržená metoda kalibrace umožňuje kalibrovat téměř všechny parametry kamer z jediného snímku – lze tedy určit, jak se parametry během experimentů mění. Jestliže budou parametry dlouhodobě stabilní, lze se obejít bez procesu kalibrace – došlo by ke zrychlení vyhodnocení snímání a nebyly by třeba kalibrační značky ve scéně.

### 6.5.2 Metoda segmentace výkovku

Metoda segmentace má za účel lokalizovat výkovek v obraze a poskytnout počáteční hodnoty pro následné přesné měření jeho siluet, případně určit oblast pro hledání významných bodů (korelační metoda). Algoritmus musí být použitelný i pro osazené výkovky. Bude experimentováno s aplikací různých modifikací hranového operátoru (např. Canny) nebo metody prahování na snímky pořízené ve viditelném spektru nebo spektru blízkém infračervenému zařízení.

### 6.5.3 Měření siluet

Po lokalizaci lze použít přesnou (subpixelovou) metodu detekce hran (siluet). Detekce může probíhat např. ve vodorovných (siluety konců výkovků) a svislých (jednotlivé průměry) řezech provedených okolo předpokládaných hranových bodů. Vzdálenost řezů bude dostatečně malá, aby bylo využito co možná nejvíce informací z obrazu. Po určení hranových bodů v řezech lze tyto body rozdělit např. dle skokových změn křivosti do skupin, reprezentujících jednotlivé hladké části siluet výkovku (např. u osazeného polotovaru křivky symbolizující siluety jednotlivých průměrů, případně konce výkovků). Jednotlivé skupiny bodů lze poté proložit křivkami různých typů.

### 6.5.4 Korelační metoda

Bude taktéž experimentováno s aplikací korelační metody na snímky pořízené jak ve viditelném spektru, tak ve spektru blízkém infračervenému. Bude realizován pokus o rekonstrukci bodů na povrchu měřeného polotovaru.

Na této úloze bude testováno široké spektrum dostupných algoritmů pro hledání významných bodů (např. Harrisův operátor, MSER apod.) a algoritmů pro jejich deskripci (např. SURF, neuronové sítě). Bude posuzována hustota sítě významných bodů a spolehlivost jejich spárování. Tyto body budou triangulovány a bude posouzena přesnost jejich polohy vůči referenčním datům. Jestliže bude možné tyto body měřit přesně, lze z těchto informací vycházet při rekonstrukci objektu.

### 6.5.5 Rekonstrukce objektu

V rámci rekonstrukce objektu bude testováno více přístupů, lišících se ve využití získaných dat. Geometrie objektu bude určena na základě:

- Pouze jeho siluet
- Pouze údajů získaných na základě korelační metody
- Kombinací obou přístupů
  - Triangulované body poskytnou doplňkovou informaci k získaným siluetám při prokládání dat kružnicemi
  - Korelační metoda bude sloužit pro sledování polohy výkovku pro následné sesazení více měření siluet do společného souřadného systému spojeného s výkovkem

Rekonstrukce osy objektu a určení jeho průměru bude probíhat na základě prokládání dat kružnicemi v pravidelných řezech (viz Zatočilová [5]). Tato metoda bude dále zpřesněna implementací iterační metody pro výpočet modelu osy (při výpočtu měřítka jednotlivých řezů budou brány v úvahu výchyly osy).

Bude určena přesnost měření zmíněných variant, jejich spolehlivost a výpočetní náročnost, bude posouzena jejich použitelnost. Na základě těchto informací bude vybrán a dále optimalizován nejvhodnější přístup (parametry metod budou nastaveny tak, aby došlo ke kompromisu mezi přesností měření a výpočetním časem).

## 7 ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ

Časový plán je přehledně zaznamenán na Obr. 16:

	2017	2018	2019	2020	2021
1	█	█			
2		█	█	█	
3		█			
4		█			
5		█			
6		█			
7		█	█		
8				█	█

Test kalibrace kamer

Validace výsledků měření

- 1 Rešerše a volba vhodných metod
- 2 Projekt Zéta
- 3 Nákup materiálu
- 4 Zprovoznění hardwaru systému
- 5 Test kalibrace v laboratorních podmínkách a sběr dat
- 6 Test kalibrace v průmyslových podmínkách a sběr dat
- 7 Vývoj softwaru systému
- 8 Další optimalizace softwaru a jeho přepis do C#

Obr. 16 Časový plán práce

## 8 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ

Výsledkem práce je zhodnocení a návrh vhodných metod pasivní fotogrammetrie pro monitorování rozměrové přesnosti nebo sledování horkých výkovků a vznikne prototyp prakticky použitelného fotogrammetrického systému pro tento účel. Systémy založené na pasivní fotogrammetrii mohou nabízet přesnější, bezpečnější a rychlejší alternativu k ve dnešní době stále používaným kontaktním měřidlům. V kontrastu s komerčními systémy pro měření výkovků, které jsou založené na principu laserového skeneru, by pasivní systémy mohly nabízet výraznou výhodu v nízké ceně komponent a vysoké rychlosti měření.

Naměřená data mohou být v současné době využívána operátorem při kontrole kvality a při korekci přímosti osy rovnací linkou. Správnou korekcí se zvýší rozměrová přesnost polotovarů a bude možné omezit přídavky na obrábění – bude dosaženo úspory materiálu, tepelné energie a také zjednodušení obrábění kovaných polotovarů. Systém přispěje ke zvýšení efektivity výroby, což se projeví v nižší ceně produkce a vzroste její konkurenceschopnost. Zájem o budoucí uplatnění výsledku práce dokazuje účast průmyslového a současně aplikačního partnera v projektu Zéta. ŽĎAS, a.s. má možnost zavést výsledky projektu ve své kovárně. Dále bude pro společnost přínosem možnost nabízet vyvíjený měřicí systém jako příslušenství pro tvářecí zařízení pro provozování kováren, které jsou součástí jejího portfolia.

V budoucnu by se pasivní fotogrammetrický systém mohl stát součástí integrovaného celku, který by sloužil pro automatické řízení a optimalizaci procesu kování. Vývoj takového celku koresponduje se současným trendem digitalizace (a s ní související automatizace v průmyslu), který je označován jako „Industry 4.0“. Poznatky nabyté při výzkumu mohou také posloužit při budoucím vývoji dalších systémů pro sledování výroby nebo kontrolu kvality horkých součástí a polotovarů.

## 9 SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI

Řešitel disertační práce spolupracuje s následujícími institucemi:

- **ŽĎAS, a.s.** - Člen CEFC, 2250 zaměstnanců, společnost se mj. zabývá výrobou výkovků o váze od 20 do 9 000 kg. Společnost se podílí na formulaci zadání a podmínek měření, drobných konstrukčních řešeních nutných při instalaci kamer (Ing. Tomáš Haman) a poskytuje své prostory pro sběr dat a realizaci testů měřicího systému. ŽĎAS, a.s. má také možnost zavést výsledný systém ve své kovárně. Náklady na tyto testy jsou hrazeny z programu „Zéta“.
- **Ústav matematiky**, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně – řešitel má možnost konzultovat otázky týkající se potenciálně použitelných matematických metod nebo otázky ohledně výběru materiálu s prof. Miloslavem Druckmüllerem (uznávaný vědec a odborník na poli analýzy obrazu) působícím na zmíněném ústavu. Na projektu rovněž spolupracuje studentka doktorského studia Ing. Tereza Konečná, která se bude podílet na implementaci vybraných matematických metod.

## 10 PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY A JEJICH ZDROJE

Na podporu projektu, kterým se zabývá disertační práce, byl schválen program „Zéta“ Technologické agentury České republiky (TJ01000268). Program začal 1.1.2018, doba řešení je 2 roky. Program by měl obsahovat dostatek prostředků na nákup potřebného materiálu, služby, dopravu, mzdy, testování systému v kovárně společnosti ŽĐAS a další.

Plánované náklady VUT na materiál a služby dle programu (Tab. 1, Tab. 2):

Tab. 1 plánované náklady VUT na materiál a služby v roce 2018

Rok 2018	Náklady - 447 000,- Kč	Z toho náklady na duševní vlastnictví - 20 000,- Kč
220 000 Kč - neinvestiční náklady na materiál potřebný ke konstrukci systému (4x průmyslová kamera 40000Kč/ks, 4x objektiv 15000Kč/ks, 4x filtr (UV/IR)+ostatní drobný materiál 20 000Kč). 40 000 Kč - certifikace přípravku na ověřování přesnosti fotogrammetrického systému dle normy VDI 2634 Part 1. 60 000 Kč - náklady na provoz a údržbu využívaných referenčních měřicích systémů ATOSIII Triple Scan a Tritop – testy na vzorcích za studena na VUT Brno. 20 000 Kč - cestovné k průmyslovému partnerovi (Žďas) a ubytování v průběhu testovacích měření Žďar nad Sázavou 47000 Kč - konference SPIE Optical metrology Munich, Německo na níž budou prezentovány výsledky vývoje (2 osoby reg. poplatek senior 16 000 Kč, student 5 200Kč, ubytování 15 000 Kč, cesta 10 000 Kč). 20 000 Kč - náklady na duševní vlastnictví - zpracování patentové řešerše.		

Tab. 2 plánované náklady VUT na materiál a služby v roce 2019

Rok 2019	Náklady - 137 000,- Kč	Z toho náklady na duševní vlastnictví - 10 000,- Kč
40 000 Kč - neinvestiční náklady na materiál potřebný ke konstrukci systému (elektroinstalace, kovový materiál). 40 000 Kč - cestovné k průmyslovému partnerovi (Žďas), kde budou probíhat jednání a testovací měření + ubytování. 47 000 Kč - konference SPIE Optical metrology Munich, Německo na níž budou prezentovány výsledky vývoje (2 osoby reg. poplatek senior 16 000 Kč, student 5 200Kč, ubytování 15 000 Kč, cesta 10 000 Kč). 10 000 Kč - náklady na duševní vlastnictví - patentový poradce.		

Dále je práce podpořena projektem specifického vysokoškolského výzkumu **FSI-S-17-4144** – „Vývoj procesních parametrů technologie Selective laser melting pro výrobu unikátních kovových dílů“.

Na podporu vývoje dalších dílčích částí softwaru bude zváženo podání projektu juniorského specifického vysokoškolského výzkumu na VUT v Brně.

## 11 PŘEDPOKLÁDANÝ VÝSLEDEK

V rámci plánu práce je předpokládáno, že bude dosaženo následujících výsledků (v souladu s metodikou hodnocení výsledků výzkumu a vývoje):

- $3 \times J_{\text{imp}}$
- $1 \times G_{\text{funk}}$

Vědecké články budou nabídnuty k publikování časopisu „Measurement“ (impakt faktor 2,359, v tomto časopise publikovali autoři zabývající se podobnou tematikou, např. Zatočilová et al. [5] nebo Zhang et al. [22]) nebo „Sensors“ (impakt faktor 2,677).

Funkčním vzorkem bude prototyp fotogrammetrického systému včetně softwaru.

**12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] HAWRYLUK, M. AND J. ZIEMBA Possibilities of application measurement techniques in hot die forging processes. *Measurement*, Nov 2017, 110, 284-295.
- [2] BRACUN, D., 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. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Apr 2017, 90(1-4), 917-926.
- [3] ČSN 42 9011 Výkovky ocelové volné v obvyklém provedení. Podélné. Přídatky na obrábění a mezní úchytky. 1971.
- [4] MITEQ. *LaCamForge* [online]. [cit. 2018-01-20]. <[http://www.mineralstech.com/Documents/Minteq/Ferrotron/Laser%20Profile%20Products%20\(LaCam\)/LaCam-Forge%20brochure.pdf](http://www.mineralstech.com/Documents/Minteq/Ferrotron/Laser%20Profile%20Products%20(LaCam)/LaCam-Forge%20brochure.pdf)>.
- [5] ZATOCILOVA, A., D. PALOUSEK AND J. BRANDEJS Image-based measurement of the dimensions and of the axis straightness of hot forgings. *Measurement*, Dec 2016, 94, 254-264.
- [6] SIMUFACT. *Open Die Forging* [online]. [cit. 2018-01-23]. <<https://www.simufact.com/open-die-forging.html>> (obrázek)
- [7] LUHMANN, T. *Close Range Photogrammetry*. Edition ed. Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. 510 p. ISBN 978-184995-057-2.
- [8] LUHMANN, T. Close range photogrammetry for industrial applications. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Nov 2010, 65(6), 558-569.
- [9] SHRIVAKSHAN AND G.T A Comparison of various Edge Detection Techniques used in Image Processing. *International Journal of Computer Science Issues*, 2012, 5(9), 269-278.
- [10] BHADAURIA AND H.S. Comparison between Various Edge Detection Methods on Satellite Image. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013, 3(6), 324-328.
- [11] HURNÍK, J. Optimalizace kalibrace kamer fotogrammetrického systému navrženého pro měření rotačně symetrických výkovků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.
- [12] GIL, A., O. M. MOZOS, M. BALLESTA AND O. REINOSO A comparative evaluation of interest point detectors and local descriptors for visual SLAM. *Machine Vision and Applications*, Oct 2010, 21(6), 905-920.
- [13] DOSOVITSKIY, A., P. FISCHER, J. T. SPRINGENBERG, M. RIEDMILLER, et al. Discriminative Unsupervised Feature Learning with Exemplar Convolutional Neural Networks. *Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Sep 2016, 38(9), 1734-1747.
- [14] FUHRMANN, S., F. LANGGUTH, N. MOEHRLE, M. WAECHTER, et al. MVE-An image-based reconstruction environment. *Computers & Graphics-Uk*, Dec 2015, 53, 44-53.
- [15] XU, G. A., X. T. LI, J. A. SU, H. D. PAN, et al. Precision Evaluation of Three-dimensional Feature Points Measurement by Binocular Vision. *Journal of the Optical Society of Korea*, Mar 2011, 15(1), 30-37.

- [16] YAMAUCHI, M. Errors in optical shape measurement caused by a high-temperature atmosphere. *Optical Engineering*, Sep 2009, 48(9), 4.
- [17] DWORKIN, S. B. AND T. J. NYE Image processing for machine vision measurement of hot formed parts. *Journal of Materials Processing Technology*, May 2006, 174(1-3), 1-6.
- [18] JIA, Z. Y., B. G. WANG, W. LIU AND Y. W. SUN An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts. *Journal of Materials Processing Technology*, Jan 2010, 210(2), 267-271.
- [19] TIAN, Z. S., F. GAO, Z. L. JIN AND X. C. ZHAO Dimension measurement of hot large forgings with a novel time-of-flight system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Sep 2009, 44(1-2), 125-132.
- [20] DU, Z. C., Z. Y. WU AND J. G. YANG 3D measuring and segmentation method for hot heavy forging. *Measurement*, May 2016, 85, 43-53.
- [21] MERMEC. *3D Portal* [online]. [cit. 2018-01-25]. <<http://www.mermecgroup.com/improve/open-die-forgings/1002/dimensional-measurement.php>>
- [22] ZHANG, Y. C., J. X. HAN, X. B. FU AND F. L. ZHANG Measurement and control technology of the size for large hot forgings. *Measurement*, Mar 2014, 49, 52-59.
- [23] ZHANG, Y. C., C. LUO, X. B. FU AND Y. M. CHEN Automatic measurement method for the size of large forgings based on scattering on rough surface. *Iet Science Measurement & Technology*, Jan 2017, 11(1), 118-124.
- [24] LIU, W., X. H. JIA, Z. Y. JIA, S. J. LIU, et al. Fast dimensional measurement method and experiment of the forgings under high temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, Feb 2011, 211(2), 237-244.
- [25] LIU, W., Z. Y. JIA, F. J. WANG, X. MA, et al. An improved online dimensional measurement method of large hot cylindrical forging. *Measurement*, Oct 2012, 45(8), 2041-2051.
- [26] JIA, Z. Y., Y. LIU, W. LIU, C. ZHANG, et al. A spectrum selection method based on SNR for the machine vision measurement of large hot forgings. *Optik*, 2015, 126(24), 5527-5533.
- [27] LIU, Y., Z. Y. JIA, W. LIU, L. L. WANG, et al. An improved image acquisition method for measuring hot forgings using machine vision. *Sensors and Actuators a-Physical*, Feb 2016, 238, 369-378.
- [28] HU, C. H., B. LIU AND X. X. SONG. A novel edge detection approach used for online dimensional measurement of heavy forging. In S. YE, G. ZHANG AND J. NI eds. *2008 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Applications*. 2009, vol. 7160.
- [29] BI, C., X. H. QU, Y. LIU, Y. P. LIU, et al. Dimensional Measurement of Small Hot Pieces Based on a Monochrome CCD. In H. HAIYAN ed. *2014 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Apisat2014*. 2015, vol. 99, p. 1158-1163.
- [30] JUAN, W., Q. ZURON AND L. JIN. Experimental research on dimensional measurement of hot parts based on CCD - art. no. 68291D. In *Conference on Advanced Materials and Devices for Sensing and Imaging III*. Beijing, PEOPLES R CHINA: Spie-Int Soc Optical Engineering, 2007, vol. 6829, p. D8291-D8291.

## 13 VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS

### Osobní informace

**Jméno, titul:** Jakub Hurník, Ing.

### Odborná kvalifikace a akademická kariéra

- 2012 – 2015** Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, bakalářské studium oboru Základy strojního inženýrství
- 2015** titul Bc. (státní závěrečná zkouška v oboru Základy strojního inženýrství)
- 2015 – 2017** Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, magisterské studium oboru Konstrukční inženýrství
- 2017** titul Ing. (státní závěrečná zkouška v oboru Konstrukční inženýrství)
- 2017 –** Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, doktorské studium oboru Konstrukční a procesní inženýrství, výuka předmětů: 3D optická digitalizace a inspekce strojních dílů, CAD, Konstruování, Konstruování a CAD, Týmový project, Základy konstruování

### Odborná praxe, odborné kurzy a ocenění

- 2017 –** Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, Odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií, vědecký a výzkumný pracovník, částečný úvazek
- 2017** kurz Akademie věd – Základy vědecké práce (5 denní intenzivní kurz)
- 2017** Jihomoravské centrum pro mezinárodní mobilitu – “Brno Ph.D. Talent Finalist” (soutěž o stipendijní podporu disertační práce)

### Výsledky vědecké činnosti

- 2017** HURNÍK, J., ZATOČILOVÁ, A.: Calibsoft ALFA; *Camera calibration using coded targets*. D5/470, NETME CENTRE, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, Technická 2896/2, 616 69 BRNO, Czech Republic. URL: [http://pom.uk.fme.vutbr.cz/pdf\\_projekt.php?id=358](http://pom.uk.fme.vutbr.cz/pdf_projekt.php?id=358). (software)

## Výzkumné projekty

- Projekt:** FSI-S-17-4144  
**Název:** Vývoj procesních parametrů technologie Selective laser melting pro výrobu unikátních kovových dílů  
**Pozice:** Spoluřešitel
- Projekt:** TJ01000268  
**Název:** Vývoj optického systému pro automatizované měření rotačních výkovků  
**Pozice:** Spoluřešitel

**14 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**

Obr. 1 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 [4] .....	7
Obr. 2 Výkovek [6] .....	8
Obr. 3 Výsledek úpravy obrazu Cannyho operátorem – červenou barvou jsou zvýrazněny nalezené hrany [7] .....	10
Obr. 4 Metody subpixelové detekce hran – červeně – data nulté derivace a metoda zachování momentů, zeleně – první derivace a metoda korelace, modře – druhá derivace a metoda „zero crossing“ [11] .....	10
Obr. 5 Vlevo - významné body, uprostřed a vpravo – odpovídající významné body ze dvou různých snímků [14] .....	11
Obr. 6 Záření horkého tělesa – závislost intenzity na vlnové délce [18] .....	12
Obr. 7 MERMEC Group – 3D Portal [21] .....	13
Obr. 8 a) – běžný snímek, b) – použití spektrálně – selektivní metody [24] .....	14
Obr. 9 Konfigurace systému využívající principu liniového skeneru [2] .....	15
Obr. 10 Systém stereovize s promítáním strukturovaného světla projektorem [25] .	15
Obr. 11 Schéma pasivního fotogrammetrického systému [5] .....	17
Obr. 12 Fotografie výkovků [5] .....	18
Obr. 13 Postup výzkumu .....	24
Obr. 14 Testovací aparatura .....	25
Obr. 15 Schéma procesů zpracování obrazu a rekonstrukce objektu .....	26
Obr. 16 Časový plán práce .....	29

## **15 SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 plánované náklady VUT na materiál a služby v roce 2018.....	32
Tab. 2 plánované náklady VUT na materiál a služby v roce 2019.....	32