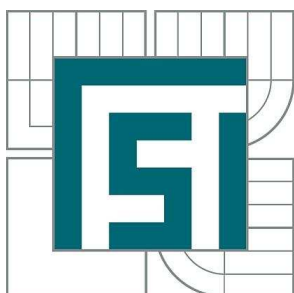


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

AUTOMATIZACE FOTOGRAMMETRICKÉHO MĚŘENÍ SYSTÉMEM TRITOP

AUTOMATION OF OPTICAL MEASURING VIA TRITOP OPTICAL COORDINATE SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TOMÁŠ KOUTECKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. ALEŠ VOLEK

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tomáš Kouček

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Automatizace fotogrammetrického měření systémem TRITOP

v anglickém jazyce:

Automation of optical measuring via TRITOP optical coordinate system

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je řešení automatizace fotogrammetrického měření a vyhodnocení systémem TRITOP užitím robota a programovacího jazyka Python, která by sloužila k urychlení pracovního postupu a jeho opakovatelnosti.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulace řešeného problému a jeho analýza
4. Vymezení cílů práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Analýza a interpretace získaných údajů
7. Závěr

Forma diplomové práce: průvodní zpráva

Typ práce: analytická

Účel práce: pro potřeby průmyslu

Seznam odborné literatury:

Wilfried Linder, Digital Photogrammetry: A Practical Course. 220 pages, Springer, 3rd ed. edition (May 11, 2009). ISBN-10: 3540927247.

Thomas Luhmann. Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications. 214 pages, Springer, 2nd edition (March 8, 2006). ISBN-10: 3540291520.

Mark Lutz, David Ascher. Naučte se Python. 360 stran. ISBN: 80-247-0367-X

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Volek

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 23.11.2009

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je automatizace fotogrammetrického měřicího systému TRITOP. Rešeršní část práce obsahuje rozdělení digitalizačních metod a jejich popis. Dále popisuje funkci fotogrammetrického systému TRITOP. Vlastní práce se zabývá metodikou automatizace procesu měření systémem TRITOP a vyhodnocení tohoto měření. Řešení je následně ověřeno na vybraném příkladu z praxe.

Klíčová slova

Fotogrammetrické měření, TRITOP, automatizace, digitalizace.

ABSTRACT

The goal of this diploma thesis is to automate photogrammetric measuring system TRITOP. In the literature retrieval part there is a review of digitizing methods and its description. Further it contains a description of the photogrammetric system TRITOP role. The practical part of the thesis deals with methodology of the TRITOP measurement and evaluation process automation. Automation is then verified on a practical example.

Keywords

Photogrammetry measurement, TRITOP, automation, digitization.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUTECKÝ, T. *Automatizace fotogrammetrického měření systémem TRITOP*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Volek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně za použití literárních zdrojů a pramenů uvedených v seznamu použité literatury a připomínek vedoucího mé práce Ing. Aleše Volka a garanta Ing. Davida Palouška, Ph.D.

V Brně dne.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě chci především poděkovat vedoucímu své diplomové práce, Ing. Aleši Volkovi za cenné rady a poskytnuté materiály. Dále chci poděkovat svému garantovi, Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za rady a připomínky k práci. Také bych rád poděkoval panu Ing. Miloslavu Drápelovi za poskytnuté možnosti a zázemí ve firmě MCAE Systems s.r.o. Na závěr bych chtěl poděkovat svým rodičům a své rodině za podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

OBSAH	11
ÚVOD	12
1 PŘEHLED SOUČASNÝCH TECHNICKÝCH POZNATKŮ	13
1.1 Systémy pro digitalizaci 3D geometrie	13
1.1.1 Způsoby rozdělení digitalizačních metod	13
1.1.2 Aktivní metody digitalizace	15
1.1.3 Pasivní metody	16
1.2 Využití skenovacích a měřících systémů ve strojírenství	19
1.3 Princip fotogrammetrie [13]	20
1.3.1 Fotografie	21
1.3.2 Metrologie	22
1.4 Optický měřící systém TRITOP	25
1.4.1 Popis systému	25
1.4.2 Proces měření	25
1.5 Možnosti automatizace	27
1.5.1 Python	27
1.5.2 Automatizace systémů firmy GOM	28
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA	30
3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	31
4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ	32
5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ	34
5.1 Konstrukční a přípravná část	34
5.1.1 Měřící soustava	34
5.1.2 Měřený objekt	36
5.1.3 Konstrukce přichycení fotoaparátu k hlavě robota	37
5.1.4 Konstrukce systému odměřovacích laserů	40
5.1.5 Napájení komponent fotoaparátu a laserů	41
5.1.6 Způsob uchycení kabelů	45
5.1.7 Komunikace řídicího počítače s fotoaparátem a robotem	47
5.2 Softwarová část	52
5.2.1 Softwarové řešení komunikace fotoaparátu s řídicím počítačem	52
5.2.2 Softwarové řešení komunikace robota s řídicím počítačem	53
5.2.3 Postup při automatizovaném měření	54
5.2.4 Metodika postupu pro softwarové řešení	58
5.2.5 Volba metodiky ustavení souřadného systému	58
5.3 Analýza výsledků	60
5.3.1 Ověření funkčnosti řešení na sérii měření	60
5.3.2 Statistické ověření opakovatelnosti systému	60
6 ZÁVĚR	63
6.1 Rozbor získaných výsledků a splnění cílů	63
6.2 Možnost další návaznosti na diplomovou práci	63
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	64
8 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	68
9 SEZNAM OBRÁZKŮ	69
10 SEZNAM TABULEK	71
11 SEZNAM PŘÍLOH	72

ÚVOD

Hlavními znaky procesu vývoje nového výrobku jsou především zkracování celkové doby potřebné pro vývoj výrobku a zpřesňování ve všech fázích vývoje, především v konečné, výrobní fázi. K tomuto postupu přispěl především nástup výpočetní techniky a zvyšování jejího výkonu. Současně také vývoj potřebného software, který pokrývá velkou část životního cyklu výrobku, od jeho návrhu až po výrobu i servis. Role reverzního inženýrství a digitalizace je ve vývoji výrobku čím dál výraznější. Tyto metody pomáhají optimalizovat vlastnosti produktu ještě předtím, než je uveden do hromadné výroby, čímž se dále snižují výsledné náklady na vývoj. Reverzní inženýrství a digitalizace jsou tedy spíše než nadstandardem nezbytnou nutností. Otázkou tedy není zda, ale jakým efektivním způsobem tyto metody využívat. Na trhu existují desítky firem využívající široké spektrum digitalizačních metod. Metody se liší především v principu své funkce a konkrétními aplikacemi, ke kterým se využívají. V této práci budou uvedeny základní principy, na kterých je většina digitalizačních metod vystavěna a budou uvedeny výhody a nevýhody těchto metod. Výrazným zvýšením rychlosti a produktivity u digitalizačních metod je bezesporu jejich automatizace. Praktická část této práce bude věnovaná možnostem automatizace a jejímu reálnému využití u vybrané aplikace. K této aplikaci bude využito 3D optického měřicího systému TRITOP německé firmy GOM.

1 PŘEHLED SOUČASNÝCH TECHNICKÝCH POZNATKŮ

1

1.1 Systémy pro digitalizaci 3D geometrie

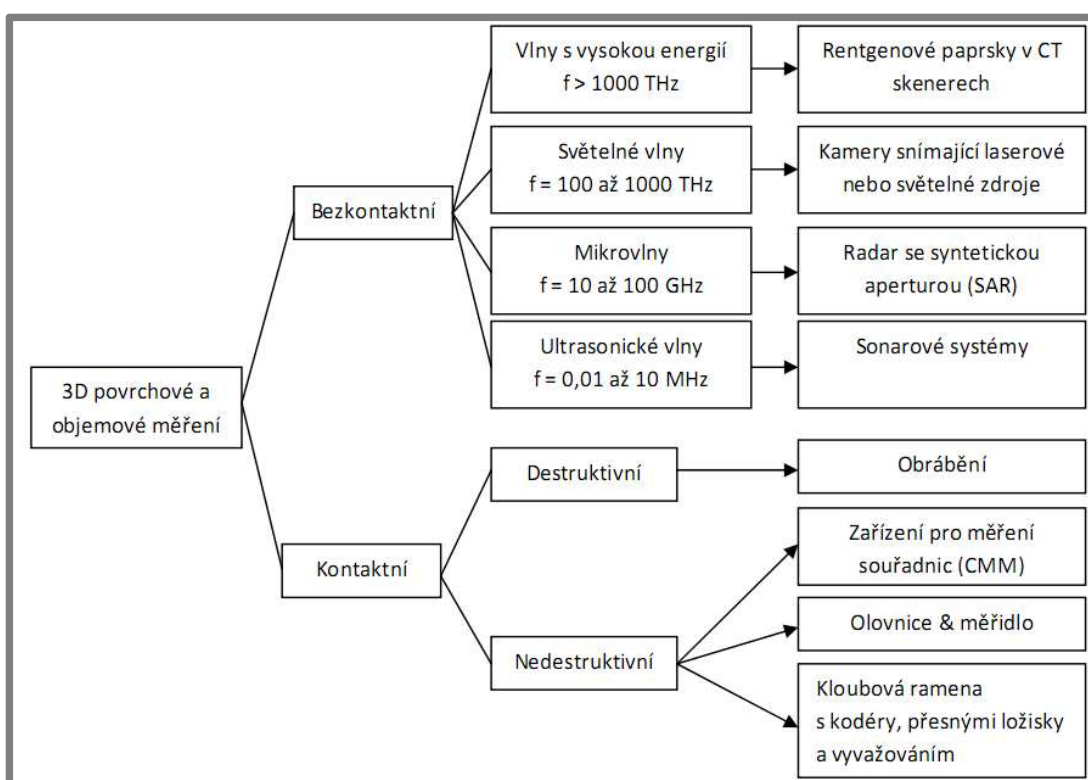
1.1

Systémů, které se používají pro digitalizaci, 3D skenování a obecně získání informací o rozměrech a tvaru objektů, existuje celá řada. Pracují na různých principech a lze je nalézt v mnoha vědeckých i průmyslových odvětvích. Jsou jimi například lékařství, strojírenství, architektura nebo zábavní průmysl. Následující text bude zaměřen na použití těchto systémů především v oblasti strojírenství.

1.1.1 Způsoby rozdělení digitalizačních metod

1.1.1

Způsobů, jak rozdělit metody a techniky 3D objemového a povrchového měření, je velmi mnoho. Jedním ze způsobů může být dělení, jak je uvádí [2] na Obr. 1-1:

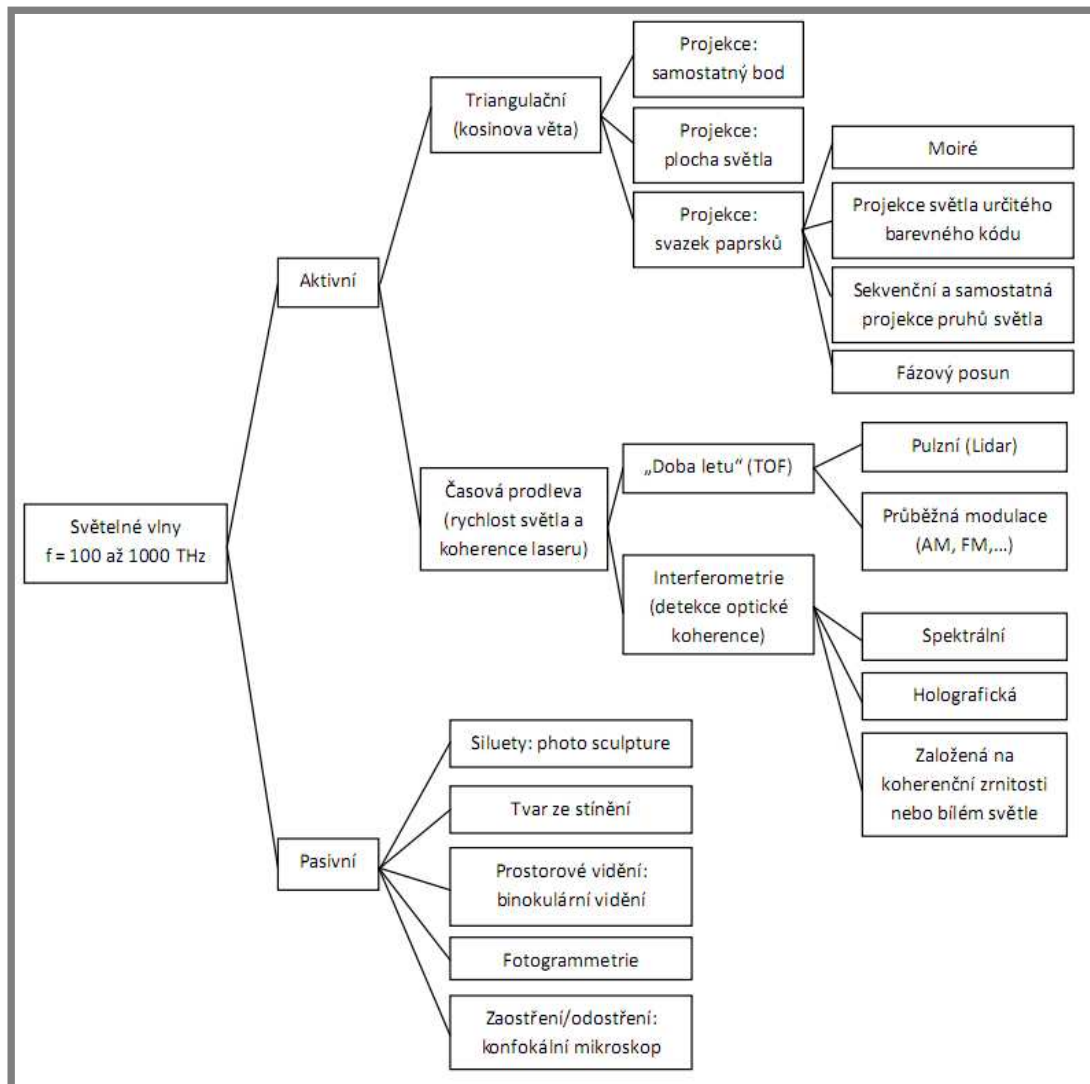


Obr. 1-1 Rozdělení 3D povrchového a objemového měření [2]

Bezkontaktní – při měření nedochází k přímému kontaktu mezi měřícím zařízením a měřeným objektem. Obecně je možné říct, že jsou tyto metody rychlejší a produktivnější než metody kontaktní.

Kontaktní – měření je založeno na kontaktu části měřícího zařízení s měřeným objektem. Nevýhodou oproti bezkontaktním metodám může být neschopnost měřit některé složité objekty a také fakt, že při měření může dojít vlivem kontaktu k poškození povrchu. Některé kontaktní metody jsou na tom přímo založeny (např. obrábění).

Obr. 1-2 ukazuje další rozdělení bezkontaktních měřících metod, konkrétně metod využívajících světla a principů s ním spojených.



Obr. 1-2 Rozdělení 3D měření pomocí světelných vln [2]

Spektrum principů, na kterých jsou jednotlivé systémy založeny, je velmi široké, a proto budou dále zmíněny základy pouze některých z metod využívajících světelných vln.

Pro posouzení vhodnosti těchto měřících systému mohou být dle [1] použita zde uvedená kritéria:

1. Cena
2. Materiál měřeného objektu
3. Velikost měřeného objektu
4. Přenosnost měřícího zařízení
5. Přesnost systému
6. Získání informací o textuře (potřebné jen v některých případech)
7. Produktivita metody
8. Požadavky na kvalifikaci obsluhy
9. Shoda získaných dat se standardy

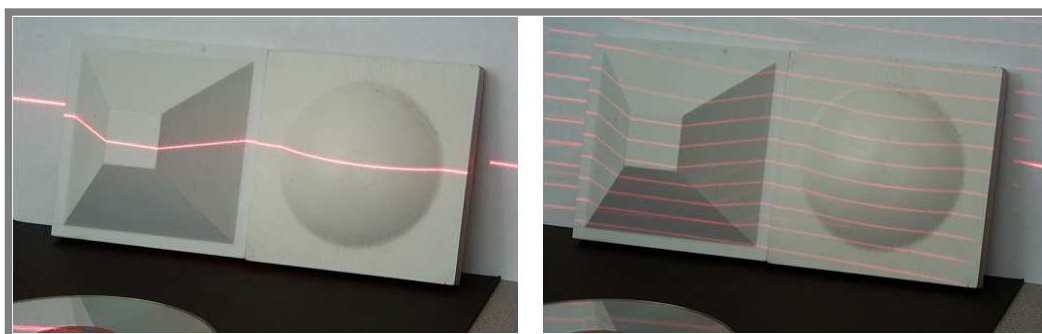
1.1.2 Aktivní metody digitalizace

Laserové 3D skenování

Laserové skenování je založeno na principu triangulace. Systém obsahuje zdroj laserového světla a optický detektor. Laser vysílá světlo v podobě čáry nebo složitějšího vzoru (viz Obr. 1-3) a optický detektor, kterým je nejčastěji digitální kamera, snímá deformovaný vzor na skenovaném objektu. Ze známých parametrů (vzdálenost zdroje a detektoru, vzdálenost od objektu) je pomocí triangulace vypočítána přesná geometrie tělesa.

Výhody: Velká přesnost měřené geometrie, skenování i velkých těles.

Nevýhody: Menší produktivita oproti jiným metodám, problémy při skenování lesklých nebo průhledných povrchů.



Obr. 1-3 Příklad laserového skenování [2]

Triangulační světelný skener

Na objekt je promítán určitý předem přesně definovaný vzor (nejčastěji projektorem) a je sledována deformace tohoto vzoru na skenovaném objektu (viz Obr. 1-4). Vzorem mohou být černé a bílé pruhy (stejně šířky nebo šířky dané určitým binárním kódem), pruhy různých barev nebo složitější tvary jako křivky, kruhy nebo čtverce. Metoda je opět založena na triangulaci.

Výhody: Velká přesnost a produktivita, většinou jednoduché pro použití, mobilní.

Nevýhody: Problémy při skenování lesklých a průhledných povrchů.



Obr. 1-4 Příklad skenování triangulačním světelným skenerem [2]

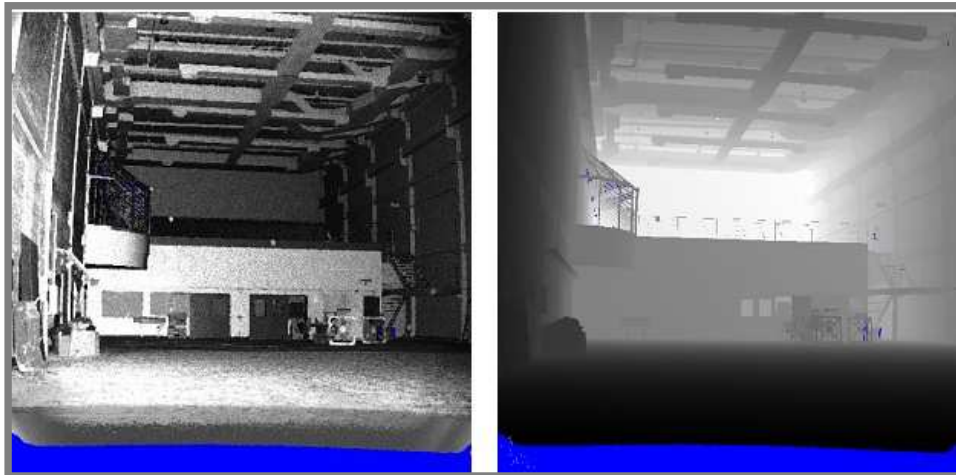
Skener typu Time-of-flight (TOF)

Stejně jako prvně zmíněný skener i tento využívá laser, není však založen na principu triangulace, ale na době letu laserového paprsku. Z přesně známé rychlosti světla v daném prostředí (pro vakuum je to přesně $v = 299\,792\,458$ m/s), známé době letu paprsku a díky rovnici [2]:

$$z = v \frac{\tau}{2}$$

se snadno určí vzdálenost mezi zdrojem a objektem. Pro přesnost 1 mm při měření je však třeba schopnost rozlišitelnosti měřicího zařízení 3,33 pikosekundy.

V praxi se používají buď skenery vysílající jednotlivé krátké pulzy a měřící jen určité body na objektu nebo skenery s výkonným laserem, který osvětlí celou scénu a odražený signál je snímán plošným senzorem. Ten převede signály na mapu časových zpoždění, která může být následně převedena na 3D mapu. Příklad je na Obr. 1-5.



Obr. 1-5 Příklad skenování skenerem typu Time-of-flight [2]

1.1.3 Pasivní metody

Tvar ze siluety

Metoda, která má již poměrně dlouhou historii. Pracuje na principu pořízení několika snímků objektu z různých pozorovacích úhlů a z tvarů siluet (obrysů) se skládá výsledná prostorová geometrie skenovaného objektu (viz Obr. 1-6). V poslední době se využívají dodatečné informace o textuře povrchu skenovaného objektu pro zpřesnění výsledků.

Výhody: Metoda může být snadno automatizována, nízká cena, snadná obsluha a přenosnost

Nevýhody: Střední až nižší přesnost měřené geometrie.



Obr. 1-6 Příklad skenování s využitím siluety [1]

Tvar získaný ze stereo snímků

Metoda simuluje vnímání prostoru lidským zrakem. Ze dvou snímků stejné scény (objektu) s mírně odlišnými pozorovacími úhly a z částí objektu, které se vyskytují na obou snímcích, se určí prostorová geometrie objektu nebo jeho částí. Výsledkem této metody je hloubková mapa znázorňující vzdálenost každého rozpoznávaného bodu od snímacího senzoru.

Výhody: Možnost automatizace, schopnost zachycení geometrie i textury, nízká cena a mobilita.

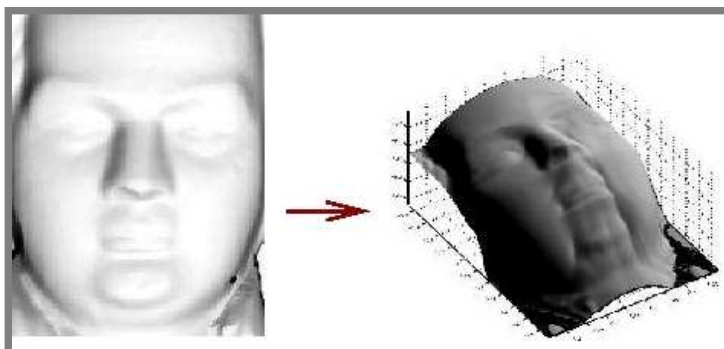
Nevýhody: Nízké rozlišení.

Tvar získaný ze stínů

Metoda využívající principu, kterým lidský zrak odhaduje hloubku při určitém zastínění. Principem je pořízení několika snímků ze stejného pozorovacího místa při různých polohách světelného zdroje. To způsobí jiné podmínky stínů na objektu a na základě příslušných algoritmů se určí geometrie povrchu tělesa. Příklad použití je na Obr. 1-7.

Výhody: Levná a jednoduchá metoda.

Nevýhody: Nízká přesnost.



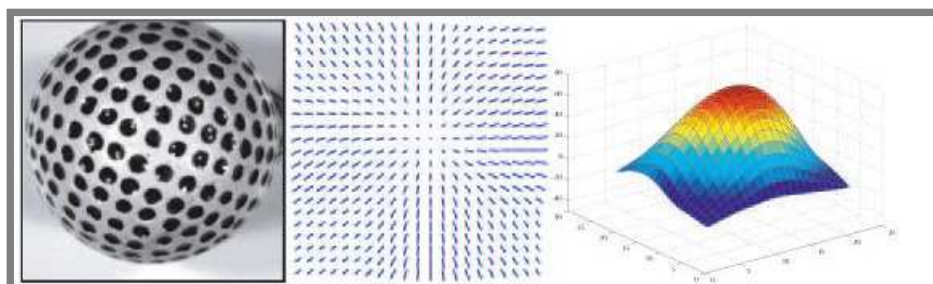
Obr. 1-7 Příklad skenování s využitím stínů [7]

Tvar získaný z textury

Pokud je předem známá textura, která je na měřeném tělese, je možné z ní získat informaci o tvaru tělesa (viz Obr. 1-8). Základní myšlenkou je rozdělení textury na malé strukturované elementy (texely) a nalezení jejich transformace na objektu. Tyto transformace dávají informaci o 3D geometrii povrchu tělesa.

Výhody: Jednoduchá a levná metoda.

Nevýhody: Omezené aplikace (textura), malá přesnost.



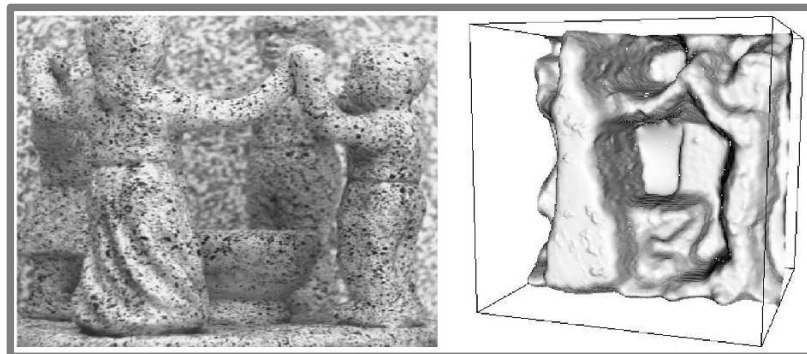
Obr. 1-8 Příklad skenování s využitím textury [8]

Tvar získaný změnou zaostření

Metoda využívající toho, že při zaostření na určitou ohniskovou vzdálenost jsou přesně zaostřeny jen některé části objektu. Při průběžné změně polohy ohniskové roviny budou postupně přesně zaostřeny všechny viditelné části objektu. Ze známých parametrů soustavy a ze série fotografií je možné vytvořit 3D mapu. Největší použití nachází metoda ve spojení s mikroskopy. Příklad použití je na Obr. 1-9.

Výhody: Velmi jednoduchá metoda.

Nevýhody: Omezené rozlišení a přesnost, použití speciálních čoček, poměrně vysoká cena.



Obr. 1-9 Příklad skenování s využitím změny zaostření [9]

Fotogrammetrie

Základním principem je využití dvou a více fotografií (dnes již většinou digitálních) objektu nebo scény, ze kterých jsou na základě principů fotogrammetrie popsaných dále (v kapitole 1.3) získány prostorové souřadnice bodů nebo složitějších prvků.

Výhody: Jednoduchá a poměrně levná metoda.

Nevýhody: Nevhodné pro záznam celého povrchu, spíše samostatných bodů nebo s dalším využitím jiné metody.

Využití Moiré efektu

Tato metoda využívá křížení dvou monochromatických vln. V místě tohoto křížení dochází ke vzniku interferenčního vzorku (tzv. moiré). Matematicky se jedná o základní trigonometrické zákony, tuto skutečnost je možno popsat následující rovnicí:

$$\cos(a) \cos(b) = \frac{1}{2} (\cos(a - b) + \cos(a + b))$$

Po aplikaci filtru s dolní propustí na vytvořenou fotografii zůstane přítomný pouze rozdílový člen z obou vln. Obr. 1-10 ukazuje příklad použití této techniky.



Obr. 1-10 Příklad skenování s využitím Moiré efektu [2]

1.2 Využití skenovacích a měřících systémů ve strojírenství

Jako ve všech ostatních oblastech lidské činnosti dochází i ve strojírenství v průběhu let ke zrychlování procesů vedoucích k výrobě nových výrobků či jejich optimalizaci. Dalším požadavkem je také dosažení co největší produktivity výroby s co nejmenší cenou při dodržení předepsané kvality výrobků.[3] Těchto několik požadavků dalo vzniknout odvětvím, kterými jsou reverzní inženýrství (reverse engineering) a výroba prototypů (rapid prototyping). Právě v těchto (a dalších) odvětvích nacházejí využití skenovací a měřící metody popsané výše. Hlavními oblastmi použití jsou tedy:

Digitalizace – v mnoha případech nejsou pro součást dostupná 3D data a mnohdy ani výkresová dokumentace. V případě, že je nutné součást znovu vyrobit nebo nějakým způsobem upravit (reverzní inženýrství), jsou nejrychlejší cestou k získání takovýchto dat právě skenovací a měřící systémy.

Reverse engineering (RE) – je definováno jako proces vytvoření matematického modelu z fyzického modelu.[3] Hlavními důvody pro RE mohou být v realu například:

- Již výše zmíněná potřeba výroby kopie součásti, pro kterou nejsou dostupná 3D data ani výkresy
- Potřeba provedení modifikace a analýzy skutečné součásti pro její přepracování a zdokonalení
- Potřeba získání 2D profilů pro výrobu modelu s využitím CAD
- Možnou oblastí použití je také úprava forem pro lití nebo úprava nástrojů pro obrábění (související se změnou, kterou musí výrobek podstoupit)
- Velmi rozvíjející se oblastí je individuální výroba a úprava protéz a implantátů.[4]

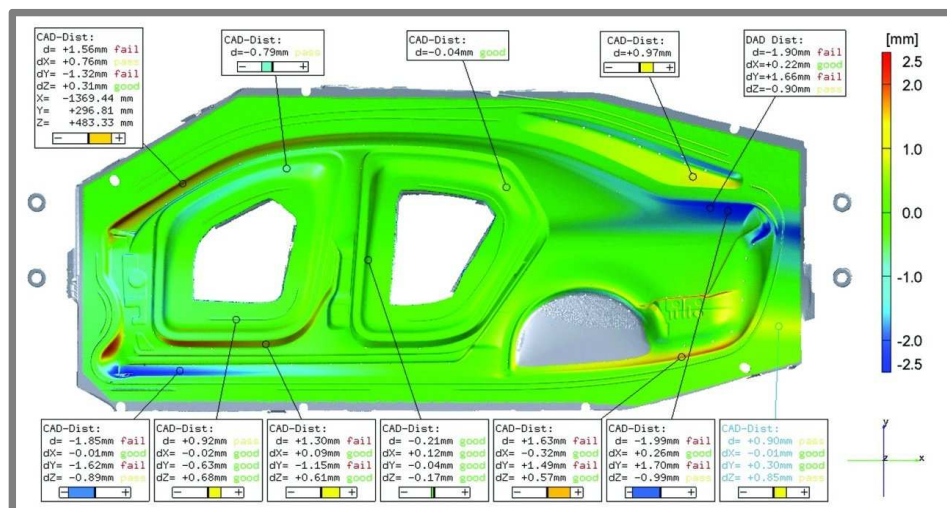
Rapid prototyping (RP) – tato oblast výrazně souvisí s oblastí RE. Příklad použití je na Obr. 1-11. Proces úpravy výrobku do konečné podoby může mít více stupňů a v těchto stupních se často přistupuje k využití technologií výroby prototypů. Hlavními důvody pro jejich využití mohou být:

- *Experimentování a učení se* – výroba prototypu a jeho testování v reálných nebo simulovaných podmínkách
- *Testování a zkoušení* – využití při zkoušení idejí a konceptů vztahujících se k vývoji produktu
- *Komunikace a interakce* – využití pro představení idejí a komunikaci o nich. Skutečný 3D model je mnohem názornější než pouhý počítačový model.
- *Začlenění do sestav* – využití při testování prvků sestav nebo celých podsestav a jejich společné funkčnosti.
- *Plánování a fáze vývoje* – využití při plánování fází vývoje produktu. Prototyp je často koncovým členem každé vývojové fáze.[5]



Obr. 1-11 Rapid prototyping – příklad použití [10]

Inspekce – je dalším důležitým krokem v procesu výroby výsledného výrobku. Na kvalitu a přesnost výrobku je při jeho výrobě kladen stále větší důraz. Důvodem je především celkově se zvyšující přesnost výroby a zároveň nutnost dodržení předepsaných norem. Základním principem inspekce ve strojírenství je porovnání skutečného fyzického výrobku (as-built) s digitálním modelem (as-designed). Srovnáním se odhalí odchylky jako například zkroucení, otupení nástroje nebo jiné výrobní vady.[6] Skenovací a měřicí systémy hrají i v této oblasti významnou roli, když umožňují rychle a kvalitně získat 3D data skutečného výrobku. Příklad využití skenovacích metod v inspekci je na Obr. 1-12.



Obr. 1-12 Inspekce s využitím dat získaných optickým skenováním [17]

1.3 Princip fotogrammetrie [13]

Fotogrammetrie je jednou z optických metod, které se řadí mezi nekontaktní pasivní 3D měřicí metody. Fotogrammetrie funguje na stejném principu jako lidské oči. Ze dvou či více snímků stejného objektu pořízených z různých pozic je možné získat prostorové souřadnice kteréhokoliv bodu vyskytujícího se na všech snímcích. [11]

Fotogrammetrii lze dělit podle mnoha různých kritérií, například je to dle:

- vzdálenosti objektu a pozice fotoaparátu (kamery)
- počtu měřicích snímků
- způsobu pořízení a vyhodnocení
- dostupnosti výsledků měření
- atd. [12]

U všech druhů fotogrammetrie se však uplatňují stejné principy.

Již z názvu fotogrammetrie vyplývají dvě základní oblasti, které fotogrammetrii definují. Zaprvé se jedná o oblast fotografie a principy, které v této oblasti platí. Druhou oblastí je metrologie, která popisuje techniky získání 3D souřadnic z 2D fotografií.[13]

1.3.1 Fotografie

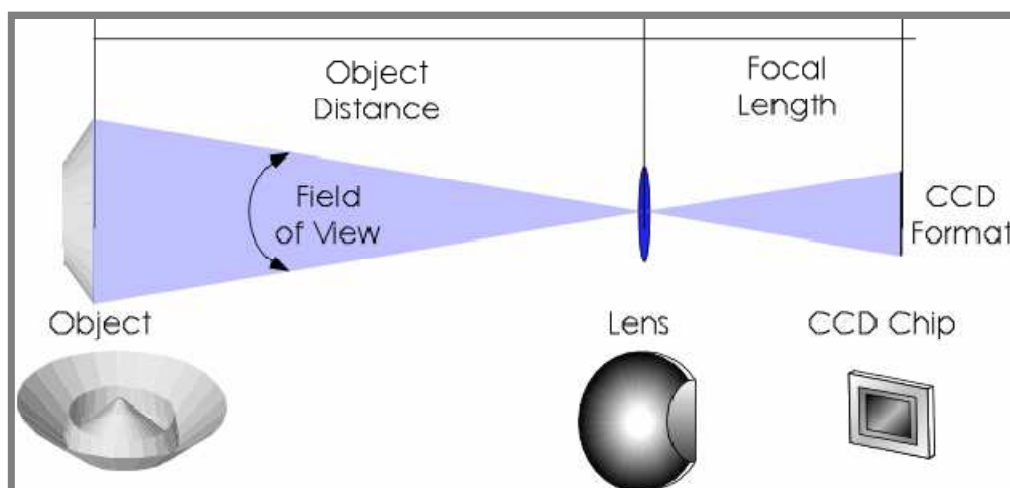
1.3.1

Kvalita pořizované fotografie je velmi důležitá pro přesnost a spolehlivost fotogrammetrických systémů. Kvalitu ovlivňuje více faktorů, třemi nejdůležitějšími jsou: zorné pole, zaostření a expozice.

Zorné pole (zorný úhel)

Zorné pole je funkcí ohniskové vzdálenosti použité čočky a velikosti (formátu) digitálního senzoru. Tato závislost je naznačena na Obr. 1-13.

Čočky se středně rozlehlým zorným úhlem mají tento úhel asi 50°. Čím větší je zorný úhel, tím širší prostor před objektivem je možné zachytit nebo na druhé straně tím menší vzdálenost od objektu je potřeba zachovat. Nutný je však kompromis mezi velikostí prostoru a přesností, s jakou bude daný obraz zachycen [13]. S větším zorným úhlem se totiž projevuje sférická vada, kdy se obraz zakřivuje do tvaru koule. Proto se používají čočky s co největší ohniskovou vzdáleností. [14]



Obr. 1-13 Zorné pole čočky [13]

Zaostření

U pořizovaných snímků je požadována co nejvyšší ostrost, a to v co největším rozsahu vzdáleností. Tuto ostrost udává tzv. *hloubka ostrosti*. Jedná se o složitou funkci závislou na ohniskové vzdálenosti, formátu senzoru, vzdálenosti fotoaparátu od

objektu a clonového čísla. Přibližně je možné hloubku ostrosti vypočítat podle vzorce: [14]

$$\text{Přední hloubka ostrosti [mm]} = \frac{CFa^2}{(f^2 + Cfa)}$$

$$\text{Zadní hloubka ostrosti [mm]} = \frac{CFa^2}{(f^2 - Cfa)}$$

f : ohnisková vzdálenost objektivu [mm]

F : clonové číslo

a : zaostřená vzdálenost [mm]

C : rozptylový kroužek [mm] = povolené rozostření na senzoru

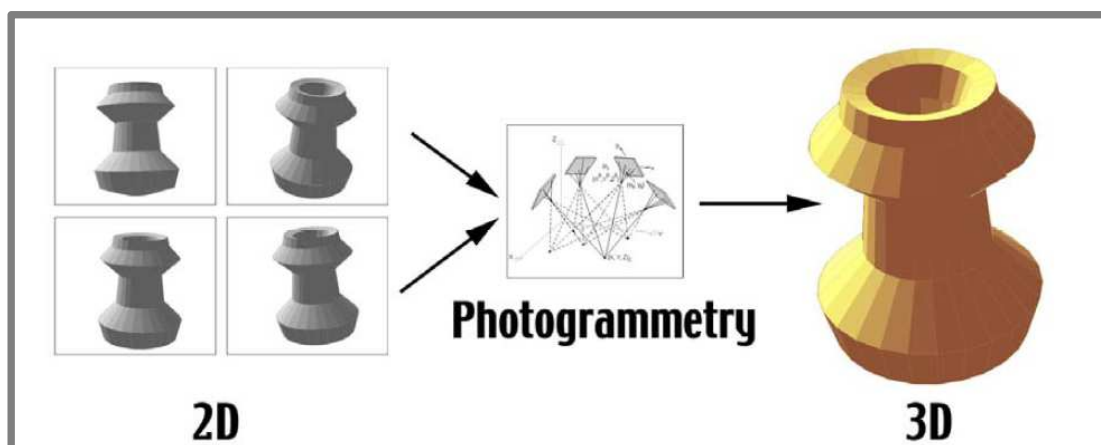
Expozice

Expozice udává osvětlení výsledné fotografie. Protože se při pořizování fotografií ve většině případů používá blesk, je výsledná expozice fotografovaného objektu závislá především na intenzitě blesku. Důležitá je však také clona, expoziční čas a ISO citlivost. Pouze na těchto třech proměnných však závisí expozice pozadí, které je příliš vzdáleno od fotoaparátu, než aby je blesk byl schopen osvětlit. Zvýšení clonového čísla o jednu hodnotu (například z 11 na 16) zvýší hodnotu expozice 2x. Totéž platí u citlivosti (např. ze 100 na 200) a expozičního času (např. snížením z 1/30s na 1/60s). [15]

1.3.2 Metrologie

Fotografie převádí obraz skutečného prostorového světa do 2D podoby. Proto se musí nutně jeden rozměr ztratit. Tímto rozměrem je hloubka. Fotogrammetrií se procesem naznačeným na Obr. 1-14 tento rozměr vrací zpět.

Z oblasti metrologie je třeba se zmínit o třech základních principech a metodách, na kterých je tato oblast fotogrammetrie postavena. Jedná se o princip nazvaný „model kamery“ a metodu svázání projekčního svazku, která zahrnuje principy triangulace a resekce.

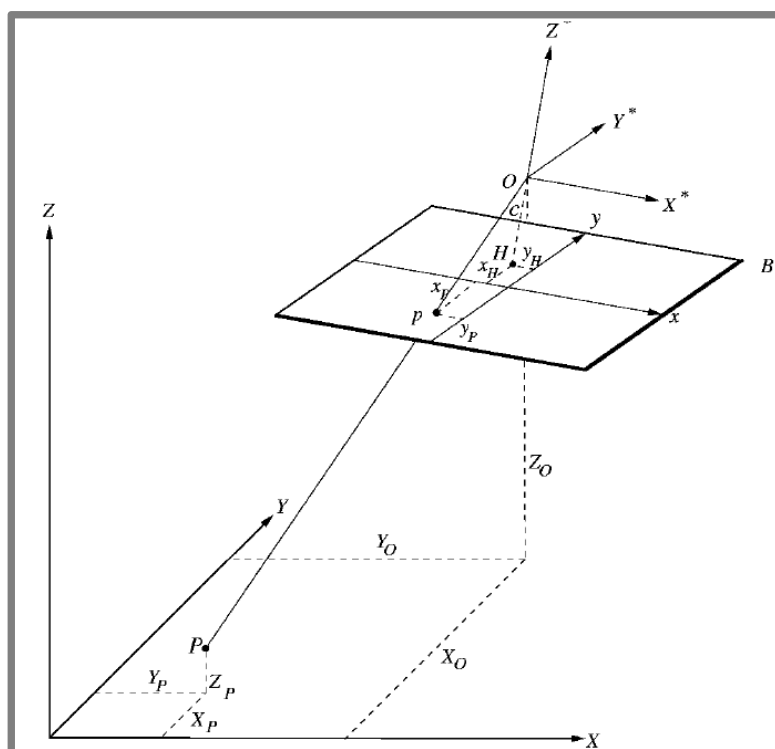


Obr. 1-14 Princip procesu fotogrammetrie [13]

Matematický model kamery [16]

Kamera je reprezentována matematickým modelem, který umožňuje popsat projekci prostorového objektu do roviny pořizovaného snímku ve fotoaparátu. Tento model je postaven na principu dírkové komory.

Základem modelu je předpoklad, že bod $P (X_P, Y_P, Z_P)$ na objektu, bod $p (x_P, y_P)$ v rovině snímku a střed promítání $O (X_O, Y_O, Z_O)$ leží na jedné přímce. To je znázorněno na Obr. 1-15.



Obr. 1-15 Projekce u matematického modelu kamery [9]

Matematický vztah mezi souřadnicovým systémem objektu a snímku je pak možné zapsat na základě předpokladu kolinearit níže uvedených dvou rovnic.

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \end{bmatrix} = \frac{-c}{Z_P^*} \cdot \begin{bmatrix} X_P^* \\ Y_P^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_P^* \\ Y_P^* \\ Z_P^* \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} X_P - X_O \\ Y_P - Y_O \\ Z_P - Z_O \end{bmatrix}$$

kde:

- B - rovina snímku
- c - ohnisková vzdálenost
- x, y - souřadný systém snímku
- x_H, y_H - souřadnice ohniska v rovině snímku
- x_P, y_P - souřadnice bodu P promítnutého do roviny snímku

X, Y, Z	- souřadný systém objektu
X^*, Y^*, Z^*	- pomocný souřadný systém
X_O, Y_O, Z_O	- souřadnice středu promítání O
X_P, Y_P, Z_P	- souřadnice pozorovaného bodu P
X_P^*, Y_P^*, Z_P^*	- pomocné souřadnice pozorovaného bodu P
dx, dy	- zkreslení čočky
R	- matice rotace

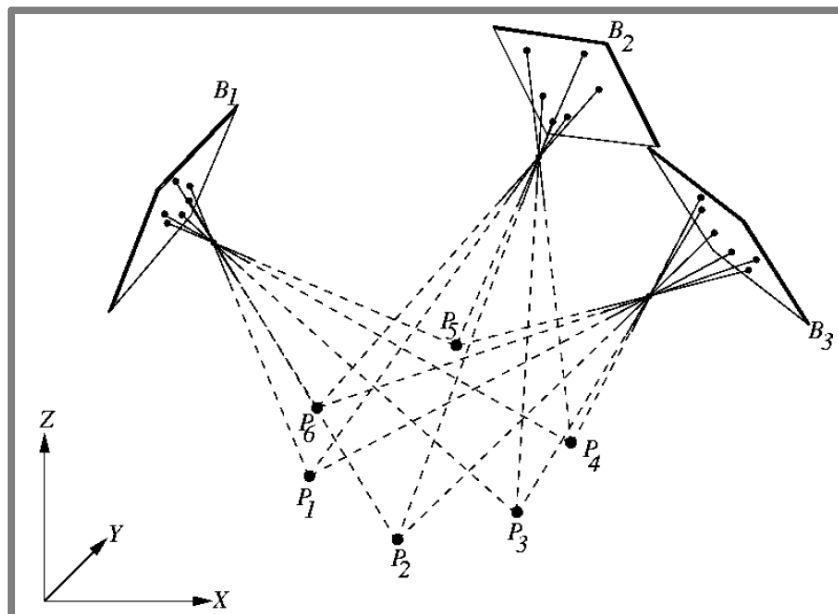
$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Ortogonální rotační matice je použita pro transformaci souřadnic z globálního souřadnicového systému do pomocných souřadnic.

Svázání projekčního svazku

Jedná se o proces, při kterém se ze dvou překrývajících se snímků z různých směrů získají souřadnice bodů na objektu (triangulace) a zároveň polohy kamery (fotoaparátu) při pořizování těchto snímků (resekce).[13] Aby bylo možné vytvořit dostatek rovnic pro výpočet poloh všech bodů, musí se tyto body objevit vždy alespoň na dvou různých snímcích. Ve skutečnosti se pak nejedná o přesný výpočet, ale je snahou pomocí iteračního procesu dosáhnout co nejpřesnějšího výsledku soustav rovnic. [16]

Schéma procesu svázání projekčního svazku je na Obr. 1-16. Jsou zde znázorněny svazky paprsků mezi skutečnými body na objektu a body na výsledných snímcích společně s jejich středy promítání. [16]



Obr. 1-16 Svázání projekčních svazků [16]

1.4 Optický měřicí systém TRITOP

1.4

1.4.1 Popis systému

1.4.1

Systém TRITOP je fotogrammetrickým optickým měřicím systémem německé firmy GOM mbH, která byla založena v roce 1990. Jedná se o jednoduchý přenosný systém, který je určený pro bezkontaktní měření polohy a deformace diskrétních bodů (případně kontrastních čar). Systém je určen především pro měření kontroly kvality, deformační analýzy a digitalizaci [18].

1.4.2 Proces měření

1.4.2

Proces měření se systémem TRITOP je možné rozdělit na čtyři poměrně samostatné kroky [17]:

Označování – příprava objektu zkoumání

Prvním krokem v procesu měření je příprava objektu, který má být měřen. To znamená polepení objektu kontrastními kruhovými značkami, nekódovanými body (markery). Velikost použitých markerů je odvozena od velikosti měřeného objektu a pohybuje se v průměrech od 1 mm do několika cm. Důležitý je přitom výběr míst, kde bude měřený objekt polepen. Přesné polohy nebo deformace právě těchto diskrétních bodů se budou následně měřením zjišťovat.

Zároveň s nekódovanými body se k objektu přidávají kódované body, které systému následně pomáhají při svazování jednotlivých snímků. Do fotografované scény se přidávají ještě tzv. měřítkové tyče (scale bars), které mají přesně nadefinovanou délku a umožňují systému určit měřítko pro měřený objekt. Kódované a nekódované body a měřítkové tyče jsou vidět na Obr. 1-17.



Obr. 1-17 Kódované a nekódované body; vybavení systému TRITOP [17]

Pořizování snímků

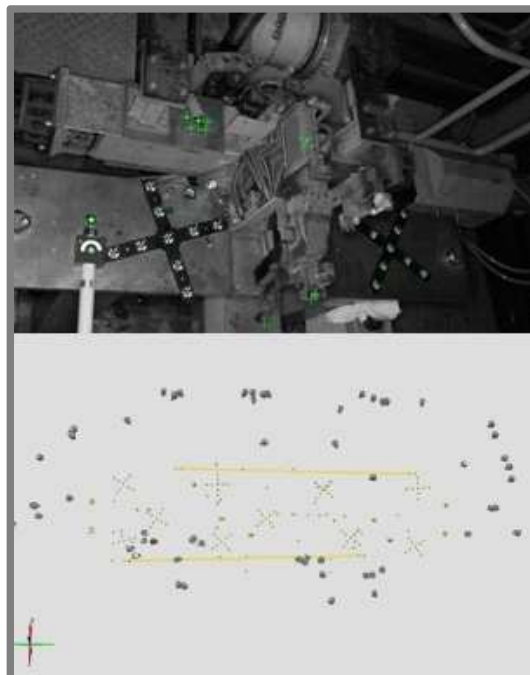
Na základě pravidel fotogrammetrie uvedených výše se pořídí dostatečný počet snímků zkoumaného objektu. K pořizování snímků není třeba žádný velký systém, pořizují se z ruky pomocí digitální zrcadlovky. Při fotografování je opět nutné se řídit pravidly pro optimální výslednou fotografii uvedenými výše. Proces fotografování je vidět na Obr. 1-18.



Obr. 1-18 Fotografování měřené scény [17]

Automatizovaný výpočet

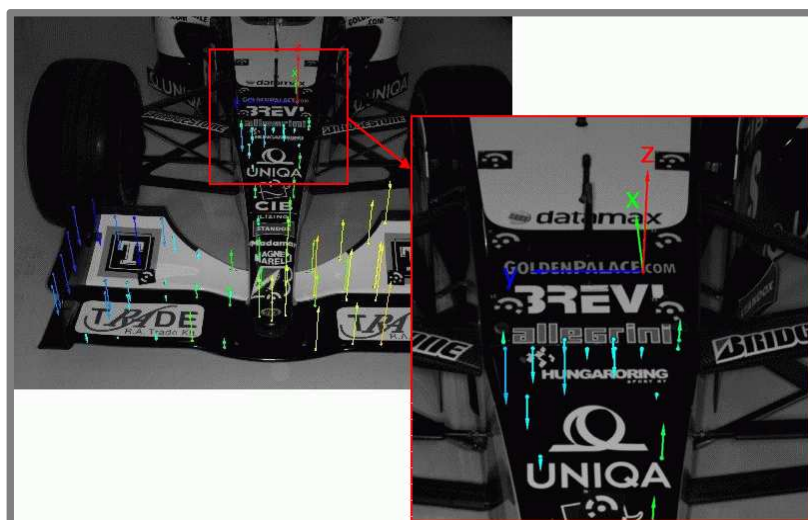
Ze získaných snímků vypočítá software TRITOPu automaticky souřadnice měřených bodů a polohy, ze kterých byly snímky pořízeny. Software také určí, s jakou přesností jsou dané výsledky vypočítány, případně které body nemohou být dostatečně přesně spočítány kvůli nedostatku snímků. Software také umožňuje korigovat výsledky, které jsou zkreslené například z důvodu světelných odrazů, které systém považuje za měřící body, ručním odebráním těchto bodů z výběru. Výsledky výpočtu jsou patrné z Obr. 1-19.



Obr. 1-19 Výsledky měření systémem TRITOP [17]

Zpracování výsledků měření

Systém TRITOP a jeho software poskytuje kromě možnosti určit přesné polohy měřených bodů v prostoru také možnost další práce se získanými daty. Jednou z možností je porovnání mezi více měřeními stejného objektu za různých podmínek (např. zatížení a vyvolaná deformace) a porovnání výsledků z těchto měření, jak je vidět například na Obr. 1-20. Druhou možností je porovnání výsledků měření s dostupnými CAD daty.



Obr. 1-20 Porovnání dvou různých měření pomocí systému TRITOP [19]

1.5 Možnosti automatizace

1.5

1.5.1 Python

1.5.1

Jedná se o moderní dynamický objektově orientovaný programovací jazyk, který vyvinul v roce 1991 Guido van Rossum. Jednou z hlavních předností Pythonu je, že oproti jiným programovacím jazykům lze vytvářet aplikace mnohem rychleji. Zároveň pokud člověk s programováním začíná, může první programy a aplikace začít vytvářet téměř okamžitě, na rozdíl od jiných jazyků. Další velkou výhodou je to, že jeho vývoj je otevřený a díky tomu vzniká velké množství knihoven a modulů. Python je vyvíjen jako multiplatformní, respektive na platformě nezávislý. Funguje tak stejně na operačních systémech Windows, Unix, OS/2 i na systémech počítačů Macintosh. Python je navíc zcela zdarma (BSD-like licence) [20].

Následující ukázka zápisu kódu v jazyce Python uvádí program, který vezme dva stejně velké seznamy a vrátí seznam součtu jednotlivých prvků.

```
def SoucetPrvkuSeznamu (seznam1, seznam2):  
    vysledek = []  
    for i in range (len(seznam1)):  
        vysledek.append(seznam1[i] + seznam2[i])  
    return vysledek
```

Python se dále vyznačuje těmito charakteristikami [20] [21]:

- Jednoduchá a konzistentní syntaxe a sémantika
- Vhodný pro psaní skriptů i vývoj rozsáhlých projektů
- Automatická správa paměti
- Podpora široké a aktivní komunity uživatelů
- Vysoká možnost tvorby a použití modulů
- Schopnost integrovat ho s jinými programovacími jazyky a využít tak i jejich výhod (např. C/C++ a jeho schopnost rychlejších výpočtů)

1.5.2 Automatizace systémů firmy GOM

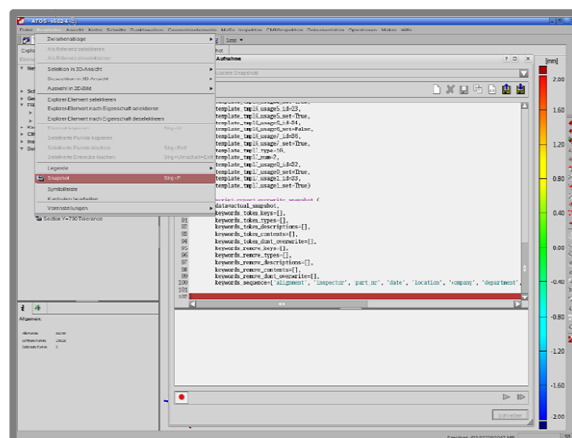
Všechny systémy firmy GOM (ATOS, TRITOP, PONTOS, ARAMIS, ARGUS) nabízejí rozhraní v jazyce Python. Systémy mají přímou podporu automatizace. To znamená, že jakákoliv funkce spustitelná v grafickém prostředí je dostupná v prostředí tvorby maker.

Systémy firmy GOM tedy nabízejí celkem tři stupně automatizace [22]:

1. Tvorba skriptu

Systémy v sobě obsahují prostředí tvorby maker. Jedná se o vývojové prostředí jazyka Python, které dále umožňuje kromě klasického programování v tomto jazyce práci s proměnnými a parametry daného systému. Umožňuje také jednoduchým způsobem zaznamenávat příkazy prováděné v grafickém prostředí. Tyto příkazy mohou být následně jakkoliv upravovány.

Tvorba skriptů je vhodná jak pro automatizaci jednoduchých opakovaných procesů, tak pro automatizaci celého průběhu práce (měření, registrace, kontrola kvality, analýza, generování zpráv z měření).



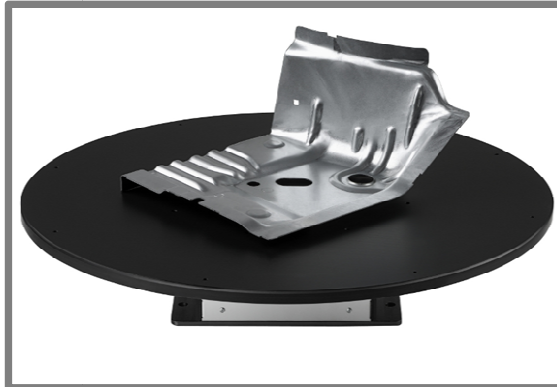
Obr. 1-21 Prostředí tvorby maker [22]

2. Rotační stůl (jednoosý)

Druhou možností automatizace je využití rotačního stolu. Využití je zatím u systému ATOS pro skenování. Jedná se o kombinaci ručního a automatického měření. Obsluha musí dílec ustavit na stůl, stanovit kroky rotace, případně otočit skenovaný dílec nebo udělat dodatečné snímky.

Se systémem ATOS se dle [22] používají následující dva rotační stoly:

- Malý rotační stůl (ROT 50) - nosnost 0,5 kg, průměr 200 mm
 - Velký rotační stůl (ROT 640) - nosnost 150 kg, průměr 640 mm
- Stoly umožňují přímé ovládání z prostředí ATOS.

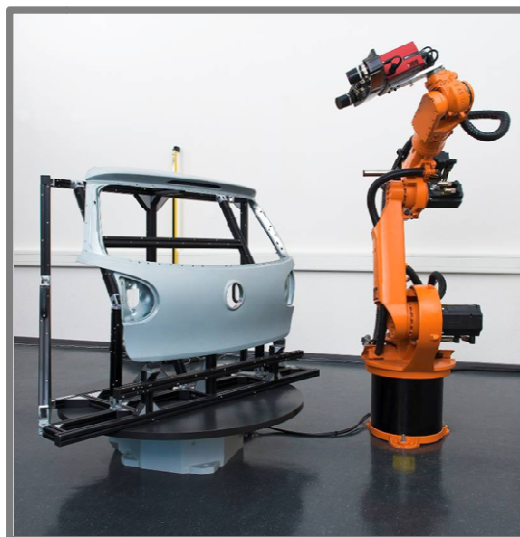


Obr. 1-22 Velký rotační stůl ROT 640 [22]

3. Robot (6 a víceosý)

Senzor je připevněný k hlavě robota. Dosah je odvislý od dosahu robota, obvykle 3-4 m. Ovládání je opět možné přímo z prostředí systému ATOS. Systém má podporu offline programování, která umožňuje programování na základě CAD modelu, rozvržení robotického pracoviště nebo zvýšenou detekci kolizí.

U velkých dílců nebo k zefektivnění práce lze zkombinovat robota s rotačním stolem. U dlouhých dílců je možno využít lineárního posunu.



Obr. 1-23 Kombinace robota s rotačním stolem [22]

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

V průmyslové praxi je kladen vysoký důraz na rychlost spojenou s konečnými náklady na výrobu a také na opakovatelnost, která je především spojena se sériovou výrobou.

System TRITOP je fotogrammetrickým systémem pro měření rozměrů, odchylek a deformací součástí a zařízení především spojených se strojírenstvím nebo obecně s průmyslovou výrobou. Příprava měření sestává z kroků nalepení referenčních značek, přidání kódovaných bodů a měřítkových tyčí a nastavení parametrů fotoaparátu. Tyto kroky se postupem času stávají automatickými. Příprava měření je tak méně komplikovaná než u jiných způsobů měření.

Samotný proces měření zahrnuje pořizování snímků měřené scény, automatické zpracování naměřených dat systémem a následnou práci s naměřenými daty.

Pro zavedení fotogrammetrického měření do sériové výroby, nebo obecněji pro aplikaci na opakovaná měření z důvodu zrychlení tohoto procesu, je třeba proces měření automatizovat. Automatizace systému TRITOP nebyla ještě firmou GOM řešena.

Dalším důvodem pro automatizaci je ověření opakovatelnosti systému TRITOP. Opakovatelnost při neautomatizovaném procesu fotogrammetrického měření je poměrně těžko dosažitelná. Měření sice může probíhat na stejném objektu, stejně umístěném, se stejnými referenčními značkami, avšak pozice, ze kterých budou pořizovány snímky, budou pokaždé mírně odlišné. Proto je cílem zajistit naprosto shodné podmínky (tudíž i stejné polohy měřícího zařízení při pořizování snímků) a zjistit tak, zda bude při těchto měřeních dosaženo stejných, statisticky málo odlišných, výsledků.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Hlavní cíl

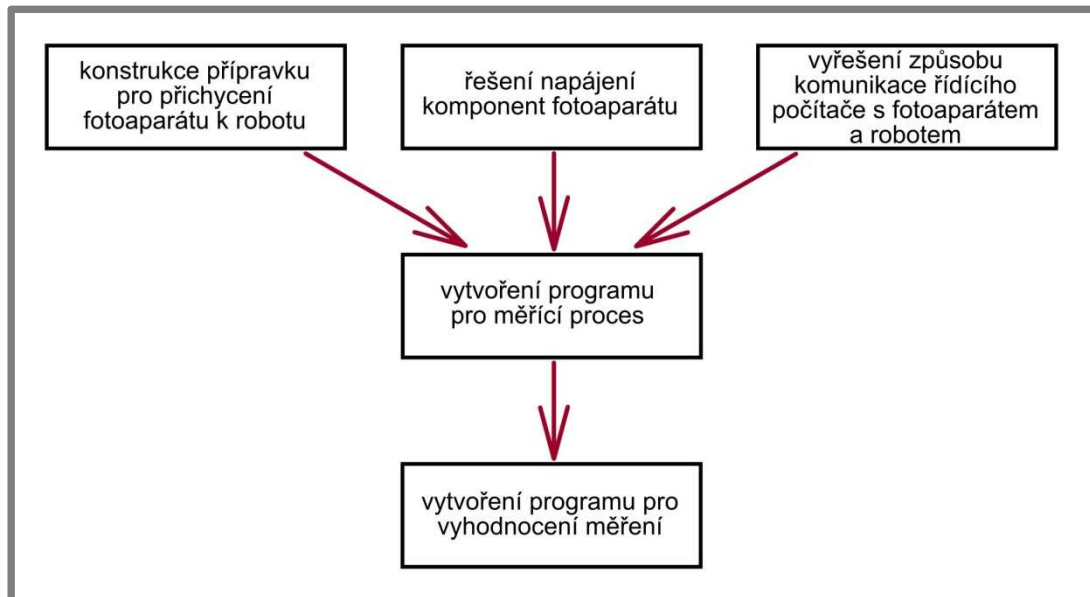
Primárním cílem práce je automatizace procesu měření optického měřicího systému TRITOP a následné automatizované zpracování naměřených dat. Proces měření (anglicky nazývaný processing) je fáze pořizování měřicích snímků pomocí průmyslového robota a fotoaparátu. Zpracování naměřených dat (anglicky nazývané postprocessing) zahrnuje automatizaci softwarového zpracování naměřených dat a statistické zpracování několikanásobného měření. Řešení bude prakticky ověřeno na vybraném příkladu z praxe. Práce je pro větší přehlednost rozdělena do uvedených dílčích cílů.

Dílčí cíle

- Konstrukce přípravku pro přichycení fotoaparátu k robotu
- Řešení napájení komponent fotoaparátu
- Vyřešení způsobu komunikace řídicího počítače s fotoaparátem a robotem
- Vytvoření programu pro měřicí proces
- Vytvoření programu pro vyhodnocení měření

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Metodika řešení daného problému vychází z dílčích cílů stanovených v předchozí kapitole. Některé dílčí cíle je možné vyřešit samostatně a jejich řešení tak probíhalo souběžně, jiné na sebe logicky navazují, a proto byly řešeny postupně. Obr. 4-1 naznačuje postup při řešení zadaného problému.



Obr. 4-1 Schéma metodiky řešení problému

- 1) *Konstrukce přípravku pro přichycení fotoaparátu k robotu*
Fotoaparát a celé měřicí zařízení musí být na robotu dobře připevněno, aby při manipulaci robota nedošlo k poškození fotoaparátu jeho oddělením od hlavy robota. Z důvodu možného poškození je také nutné vyřešit přichycení napájecích kabelů k ramenům robota.
- 2) *Řešení napájení komponent fotoaparátu*
Fotoaparát, blesk i odměřovací lasery jsou napájeny z baterií. K trvalému provozu je nutné zajistit, aby jejich napájení bylo nezávislé na výměně baterií.
- 3) *Vyřešení způsobu komunikace řídicího počítače s fotoaparátem a robotem*
Fotoaparát potřebuje obdržet signál, že je robot v požadované pozici a může dojít k pořízení snímku. Robot zároveň potřebuje dostat signál, že byla pořízena fotografie a může se tak přesunout do další pozice.
- 4) *Vytvoření programu pro měřicí proces*
Softwarové řešení pro samotný proces pohybu robota a pořizování snímků u konkrétního měřeného objektu.
- 5) *Vytvoření programu pro vyhodnocení měření*
Softwarové řešení vyhodnocení naměřených dat a jejich statistické zpracování.

Časový harmonogram práce

I. - II. kvartál 2009

- Učení se práce se systémem TRITOP
- Práce na rešeršní části diplomové práce

III. kvartál 2009

- Sběr teoretických podkladů k řešenému problému

IV. kvartál 2009

- Řešení způsobu komunikace řídicího počítače s fotoaparátem a robotem
- Základy programování v jazyce Python

I. kvartál 2010

- Konstrukce přípravku pro přichycení fotoaparátu k robotu
- Řešení napájení komponent fotoaparátu
- Programování v jazyce Python v prostředí systému TRITOP

II. kvartál 2010

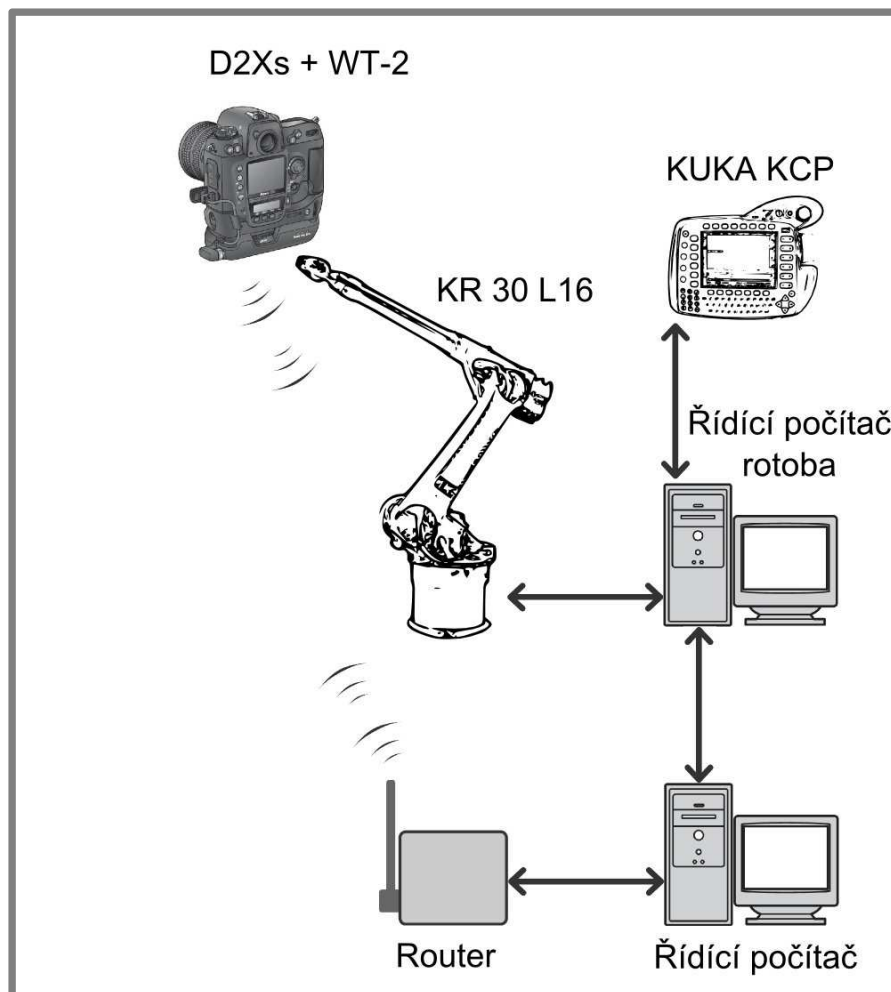
- Práce na programu pro měřicí proces
- Práce na programu pro vyhodnocení měření
- Testovací měření

5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

5.1 Konstrukční a přípravná část

5.1.1 Měřicí soustava

Měřicí soustavu tvoří průmyslový robot, jeho řídicí počítač a ovládací panel, fotoaparát, router a řídicí počítač. Schematicky je možné měřicí soustavu vyjádřit obrázkem Obr. 5-1.



Obr. 5-1 Schéma měřicí soustavy

a) Průmyslový robot

Jedná se o robota firmy KUKA s označením KR 30 L16. Jeho parametry jsou následující [23]:

KUKA KR 30 L16

- Hmotnost: 700 kg
- Maximální dosah: 3102 mm
- Počet os: 6
- Přesnost opakování: $\pm 0,15$ mm
- Mezní zátěž: 16 kg



Obr. 5-2 Robot KUKA KR 30 L16 [23]

b) Fotoaparát

Jedná se o soustavu, kterou tvoří fotoaparát Nikon D2Xs a blesk Nikon Speedlight SB-800. Jejich parametry [24]:

Nikon D2Xs

- Profesionální digitální zrcadlovka
- Snímač: 12,4 megapixelový CMOS (23,7 x 15,7 mm)
- Tělo fotoaparátu: hořčíková slitina
- Rozměry: (157,5 x 149,5 x 85,5) mm (šířka x výška x hloubka)
- Hmotnost: 1070 g
- Expoziční časy: 1/8000 – 30 s
- Rozsah ISO: 100 – 3200
- Rozhraní pro připojení: USB 2.0 nebo Wi-Fi
- Objektiv: manuální Nikkor 24 mm f/2,8
- Přibližný počet snímků: 3 800

Nikon Speedlight SB-800

- Rozměry: (70,6 x 127,4 x 91,7) mm (šířka x výška x hloubka)
- Hmotnost: 350 g (bez baterií)
- Napájení: 4 x 1,5V AA-alkalické nebo lithiové; 4 x 1,2 V AA-NiCd
- Směrné číslo: 38 (pro ohnisko 35 mm)
- Přibližný počet záblesků: 150



Obr. 5-3 Fotoaparát Nikon D2Xs a blesk Nikon Speedlight SB-800

c) Řídící počítač

Notebook Dell Latitude E6400:

- Procesor: Intel Core(TM)2 Extreme CPU Q9300 2,53GHz (čtyřjádrový)
- Paměť: 8 GB RAM
- Grafická karta: 1GB Quadro FX 3700M
- Disk: 2 x 500 GB
- Operační systém: GOM Linux (upravená verze SUSE Linux)
- Měřicí systém: GOM TRITOP v6.2.0-6

5.1.2 Měřený objekt

Jako měřený objekt byl vybrán lisovaný plech z koncernu VW (viz. Obr. 5-4), který se používá ve firmě MCAE k prezentačním a testovacím účelům. Plech má rozměry přibližně (330 x 270 x 180) mm. Obsahuje dva kruhové a jeden oválný otvor. Při testovacím měření budou středy dvou kruhových otvorů využity jako jedny z měřených parametrů.

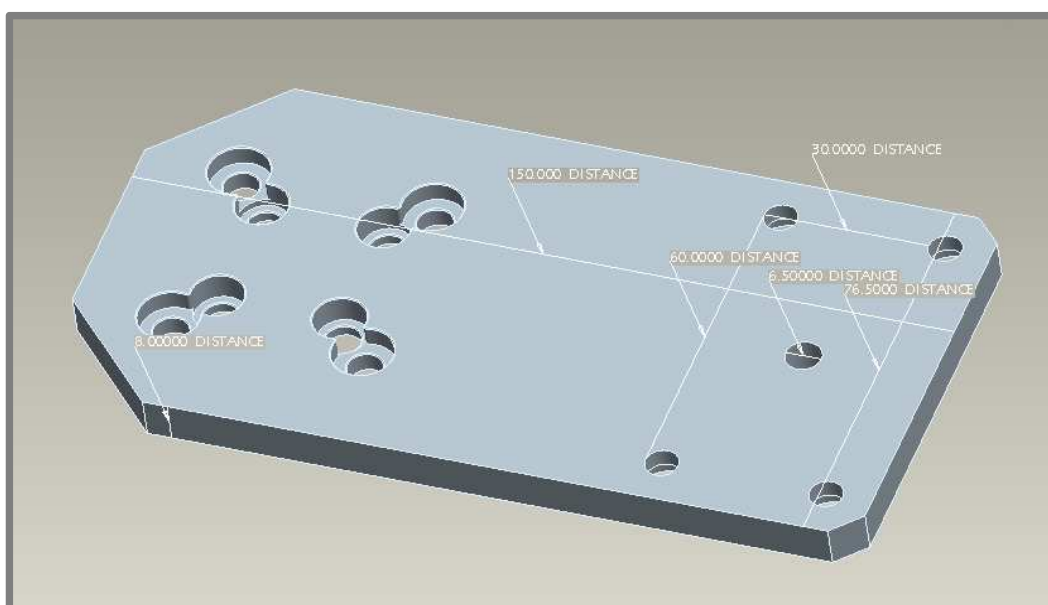


Obr. 5-4 Měřený objekt - lisovaný plech

5.1.3 Konstrukce přichycení fotoaparátu k hlavě robota

Hlava robota je osazena osmi dírami průměru 8 mm na roztečné kružnici o průměru 50 mm. Fotoaparát má díru se závitem standardního průměru pro uchycení na stativ (1/4 palce). Ve firmě MCAE byla k dispozici základová deska (viz. Obr. 5-5), která se používá pro uchycení optického systému ATOS k robotu. Tato deska byla základem pro konstrukci přípravku pro uchycení fotoaparátu. Rozměry v obrázku jsou v milimetrech.

Do desky je možné vyvrtat v přední části (v Obr. 5-5 v pravé části) jednu díru ve středu mezi stávajícími dírami pro stativový šroub. Ten by stačil pro uchycení fotoaparátu, pokud by byl v klidové poloze. Robot s fotoaparátem se však bude při měření pohybovat poměrně vysokými rychlostmi a s velkými zrychleními. Proto jsem přistoupil ke konstrukci přípravku, který by zajistil bezpečnou polohu fotoaparátu na této desce a na hlavě robota i v průběhu měření.



Obr. 5-5 Základová deska

Požadavky na konstrukci

Hlavní požadavky na konstrukci přípravku pro přichycení fotoaparátu k robotu:

- Dostatečně pevné a bezpečné přichycení celku
- Zachovaný přístup k ovládacím prvkům fotoaparátu
- Snadná montáž přípravku k hlavě robota
- Snadná montáž fotoaparátu k přípravku

Z výše uvedených požadavků na konstrukci nakonec vzešla jednoduchá konstrukce převážně svařovaná a spojovaná šroubovými spoji. Tato konstrukce se vyznačuje následujícími hlavními prvky (viz Obr. 5-6 a Obr. 5-7):

1. *Upevnění těla fotoaparátu stativovým šroubem skrz díru v upevňovací desce*
Jedná se o hlavní upevnění fotoaparátu k hlavě robota. Výhodou je to, že se jedná o uchycení přímo v ose fotoaparátu procházející i osou objektivu. Stativový šroub je také poměrně masivní – 1/4 palce je 6,35 mm. Šroub však

drží fotoaparát pouze ve spodní části a to způsobuje při jeho naklonění velký ohybový moment ve šroubu. Další nevýhodou je, že se jedná o vícenásobný šroubový spoj, protože stativový šroub je našroubován do Wi-Fi modulu, který je dalším šroubem teprve připojen k tělu fotoaparátu (viz Obr. 5-6).

2. *Opěrky těla fotoaparátu zepředu a zezadu zamezující jeho naklání*

Tyto opěrky jsou zhotoveny jak ve vertikálním tak v horizontálním směru tak, aby se přesně opíraly v místech, kde na fotoaparátu nejsou žádné ovládací prvky. Vhodné umístění je obtížné z přední i zadní strany, jak je vidět na Obr. 5-6. Na koncích jsou opěrky opatřeny silikonovými čepičkami, které eliminují poškození způsobené přímým kontaktem kovových opěrek. Přední opěrky jsou odsuvné, aby bylo možné do přípravku fotoaparát umístit.

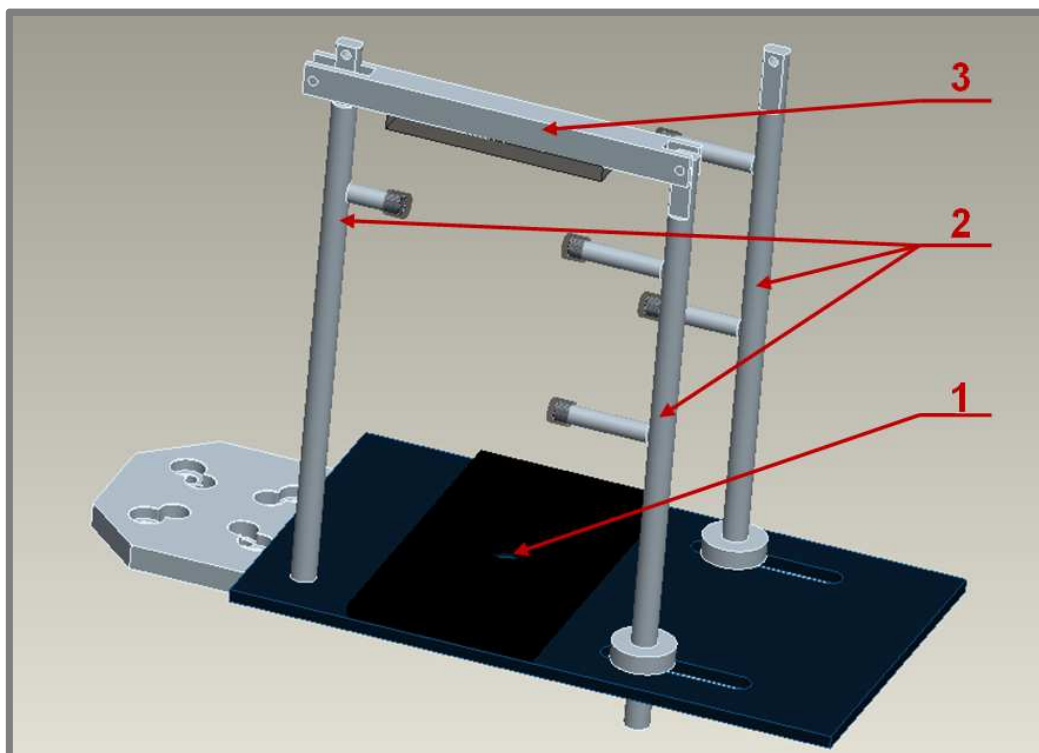
3. *Přítlačovací závora zamezující vypadnutí fotoaparátu při jeho otočení poloze, kdy by pouze visel na stativovém šroubu*

Očekává se, že fotoaparát bude pracovat v polohách, kdy bude viset ve vertikální poloze a visel by tak pouze na stativovém šroubu. Konstrukce proto obsahuje závoru, která přitlačuje fotoaparát k upevňovací desce, brání vypadnutí fotoaparátu a snižuje namáhání stativového šroubu. Je taktéž vybavena silikonovou opěrkou, protože se opírá v místě horního displeje fotoaparátu (viz Obr. 5-6).



Obr. 5-6 Pohledy na možná místa pro uchycení fotoaparátu

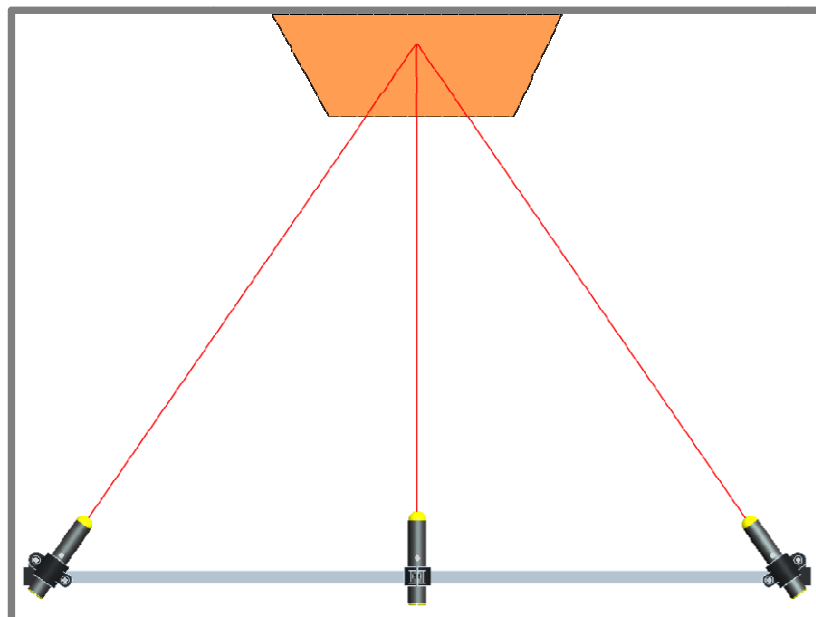
Návrh konstrukce přípravku pro přichycení vytvořená v prostředí software Pro/ENGINEER je na Obr. 5-7. Hotová konstrukce je na obrázku Obr. 5-8. Výkres sestavy přípravku je součástí práce jako Příloha 9.



Obr. 5-7 Přípravek pro přichycení fotoaparátu



Obr. 5-8 Přípravek pro přichycení fotoaparátu – hotová konstrukce



Obr. 5-11 Schéma funkce odměřovacích laserů

Jedná se o jednoduchou konstrukci sestavenou z hliníkového profilu a dílů vyrobených metodou FDM. Tyto díly jsou spolu spojené šroubovými spoji, které zároveň slouží k jejich natáčení. Použité lasery jsou jednoduchými laserovými ukazovátky. Detail uchycení bočního laseru je na Obr. 5-12.



Obr. 5-12 Uchycení bočního laseru

5.1.5 Napájení komponent fotoaparátu a laserů

Fotoaparát, blesk a zaměřovací lasery jsou napájeny z bateriových zdrojů - Fotoaparát Li-ion baterií EN-EL4a o kapacitě 2500 mAh a napětí 11,1 V, blesk čtyřmi tužkovými AA 1,2 V Ni-MH, Ni-Cd nebo 1,5 V alkalickými bateriemi a lasery třemi 1,5 V knoflíkovými bateriemi.

Životnost jednotlivých komponent na baterie je různá. U fotoaparátu se například dle [24] uvádí životnost 3800 snímků na jedno nabití baterií. Nepočítá se však s použitím

Wi-Fi adaptéru, při jehož použití se životnost rapidně zkracuje. U blesku SB-800 se opět dle [24] uvádí životnost na baterie přibližně 130 záblesků (na plný výkon). U laserů je životnost na baterie proměnlivá, značně závisí na kvalitě použitých baterií. Pohybuje se však v řádu hodin trvalého provozu.

Pokud má být systém plně automatizovaný, je třeba zajistit, aby i jednotlivé komponenty byly nezávislé na bateriových zdrojích a mohly fungovat teoreticky bez omezení. Proto jsem vymyslel a navrhl následující způsoby napájení pro uvedené tři komponenty:

1. Fotoaparát Nikon D2Xs

U fotoaparátu jsem se nejprve snažil nalézt řešení v oficiální komerční podobě. Bylo to především z důvodu jednoduchosti takového řešení a také s ohledem na vysoké pořizovací náklady fotoaparátu a s tím související obavy spojené s případným neúspěchem jiného řešení. K fotoaparátu je možné dokoupit volitelný síťový zdroj napětí Nikon EH-6 (viz. Obr. 5-13).



Obr. 5-13 Napájecí adaptér Nikon EH-6 [24]

Cena tohoto zdroje se pohybuje okolo 3 000 Kč [27]. Protože se jedná o poměrně velkou cenovou položku, bylo ve firmě MCAE rozhodnuto, že bude později pořízena v případě, že se celý systém osvědčí a bude se uvažovat o jeho širším využití.

2. Blesk Nikon SB-800

U blesku jsem postupoval stejným způsobem a snažil se nejprve nalézt oficiální variantu napájení. V tomto případě jsem však nebyl úspěšný. K blesku Nikon SB-800 není vyráběno síťové napájení, pouze doplňující bateriové zdroje. Další možností bylo použití speciálního napájecího zdroje Turbo AC od firmy Quantum [28]. Ten umožňuje napájení současně blesku i fotoaparátu, avšak kvůli ceně v přepočtu okolo 11 000 Kč a dovozu z USA jsem jej vyhodnotil jako nevhodné řešení.

Jako použitelné a také konečné řešení jsem navrhl napájení pomocí běžného síťového adaptéru o napětí 5 V a náhradních bateriových vložek.

Napětí: při napájení na baterie se napětí pohybuje v rozmezí 4,8 V (4 1,2 V Ni-MH nebo Ni-Cd baterie) až 6 V (4 1,5 V alkalické baterie), proto je napětí zdroje 5 V dostatečné.

Proud: při zátěži (při záblescích) jsem naměřil odebíraný proud v rozmezí 300 - 400 mA. Použitý zdroj umožňuje odebírat maximálně 2 000 mA, takže opět splňuje tyto požadavky.

Konstrukce bateriových vložek:

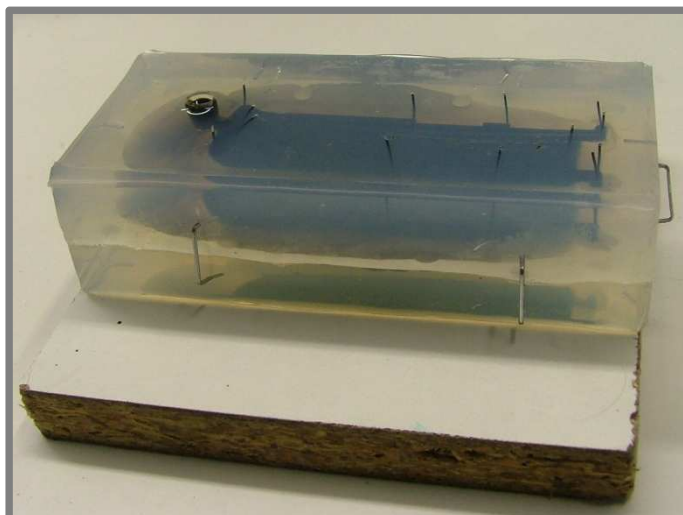
Baterie jsou v blesku umístěny vedle sebe do série, takže pouze první a poslední baterie dosedá na kontakty plus a mínus. Proto stačilo připojit vývody z adaptéru na tyto dva kontakty. To jsem provedl pomocí náhradních bateriových vložek vyrobených metodou FDM (viz. Obr. 5-14).



Obr. 5-14 Bateriové vložky do blesku

Dále bylo třeba vyřešit problém s přivedením kabelů do bateriového prostoru. Ten je totiž uzavřen odsuvnou a výkyvnou krytkou a není zde prostor pro jejich přivedení. Proto jsem se rozhodl vyrobit náhradní krytku, do které bych mohl vyvrtat díru a touto dírou vést přívodní kabely. Krytku jsem vyrobil metodou vakuového lití z materiálu PX 223, který by měl simulovat vlastnosti ABS plastu. Má tedy modul pružnosti 2300 MPa, pevnost v ohybu 60 MPa a prodloužení 11% [29]. Proces odlévání je vidět na Obr. 5-15. Hotový odlitek i s originálem je na Obr. 5-16 (originální kryt je dole, vyrobený odlitek je nahoře).

Výsledný komplet pro napájení laseru je opatřen konektorem 5,5 x 2,1 mm pro připojení k adaptéru (viz. Obr. 5-17).



Obr. 5-15 Výroba krytu bateriového prostoru blesku



Obr. 5-16 Kryt bateriového prostoru; originál dole, kopie nahoře

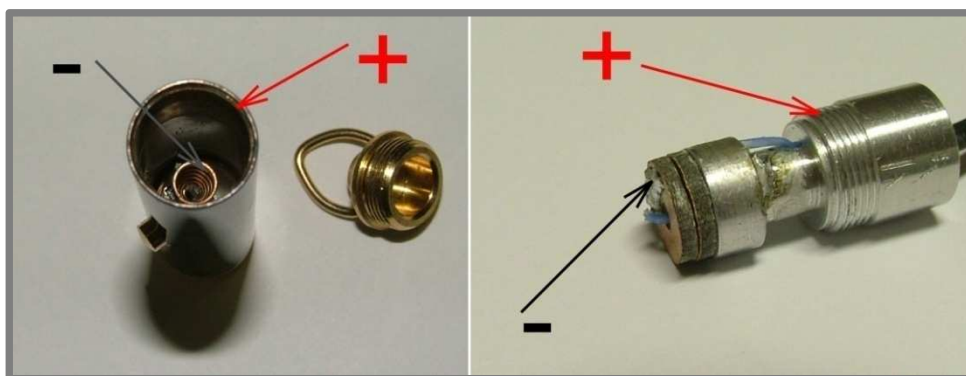


Obr. 5-17 Napájení blesku - komplet

3. Odměřovací lasery

Lasery jsou běžně napájeny ze tří knoflíkových baterií o napětí 3 x 1,5 V, celkově tedy 4,5 V. Po otestování jsem zjistil, že každý z laserů neodebírá více jak 100 mA a napájecí napětí se může pohybovat v poměrně širokém rozmezí a nevadí, když dosahuje i 5 V. Proto jsem se rozhodl napájet lasery ze stejného síťového adaptéru jako blesk.

Baterie jsou v laseru uspořádány do série, přičemž první baterie se svým minusovým pólem opírá o vnitřní pružinku laseru a poslední o zadní kryt. Ten je vodivě propojen s tělem laseru, plusovým pólem. Proto jsem navrhl, nechal vyrobit a upravil hliníkovou vložku, která se přední izolovanou stranou a přivedeným minusovým pólem opírá o pružinku. Přes závit na těle vložky je do těla laseru přiveden plusový pól (viz. Obr. 5-18).



Obr. 5-18 Uspořádání el. pólů v laseru; vložka k napájení laseru

5.1.6 Způsob uchycení kabelů

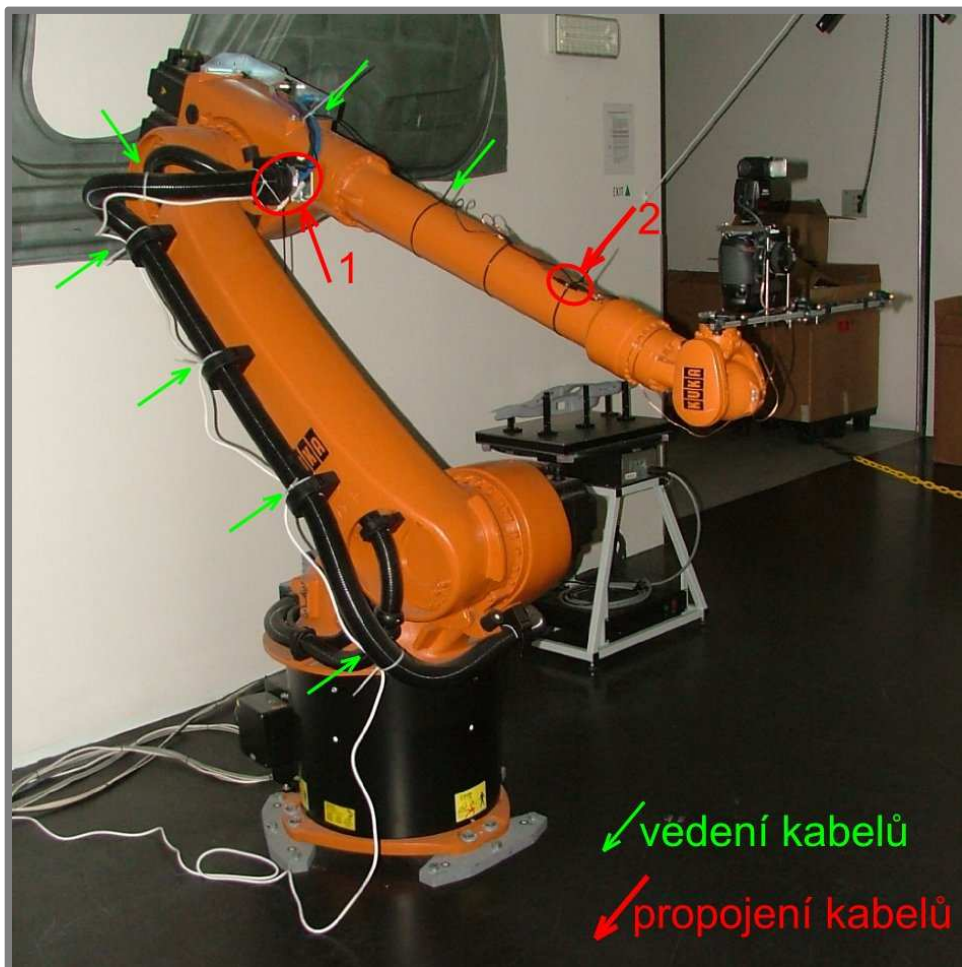
Napájení komponent fotoaparátu je spojené s problémem vedení jejich napájecích kabelů po robotu. Hlavním požadavkem, který musí být splněn, je vedení kabelů tak, aby nemohlo dojít k jejich zamotání okolo hlavy robota nebo jejich poškození (přiskřípnutí).

Ve svém řešení jsem postupoval obdobně jako v případě, kdy je na hlavě robota upevněna skenovací hlava systému ATOS. Kabely jsou vedeny po jednotlivých ramenech robota s dostatečnou rezervou v místech kloubů, aby nedošlo k nebezpečnému natažení kabelu. Kabely jsou k tělu robota připevněny elektrikářskými svazovacími páskami. Ty umožňují jednoduché připevnění a představují vhodné řešení, pokud nemá být systém na robotu trvale připevněn (což je situace ve firmě MCAE).

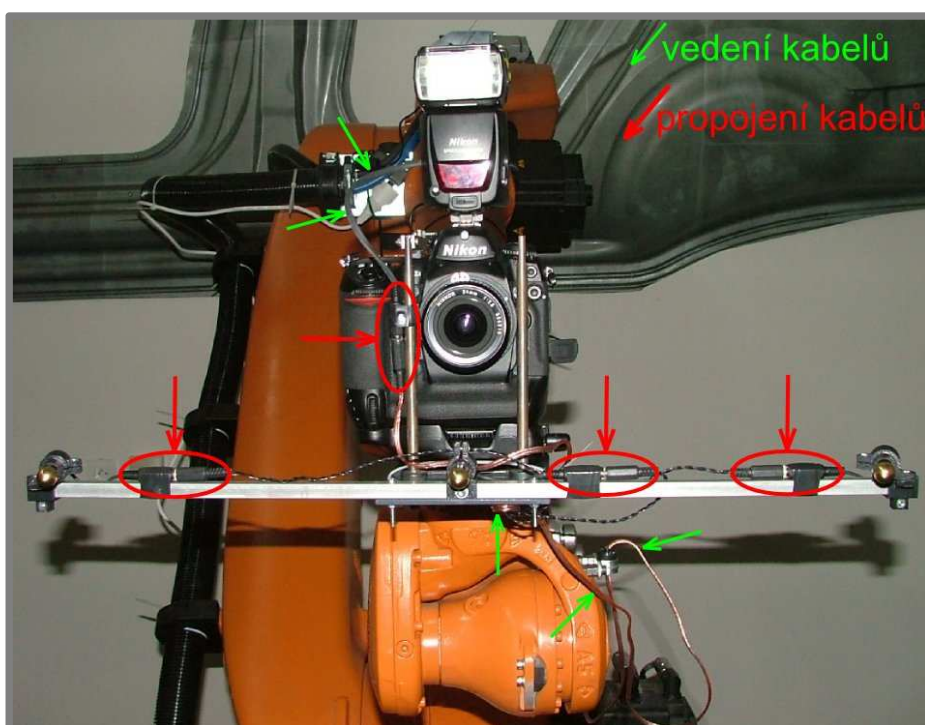
Kabely jsou až k hlavě složeny ze tří prvků. Prvním je síťový kabel (230 V), který vede až k prostoru u třetí osy robota, kde je připojen 5 V adaptér (viz. Obr. 5-19 číslo 1). Výstup z adaptéru je na rameni mezi osami tři a čtyři připojen konektorem 2,1 x 5,5 mm k vyrobenému rozbočovacímu kabelu (viz. Obr. 5-19 číslo 2). Ten vede dále až pod přípravek pro přichycení fotoaparátu.

Vedení kabelů na samotné hlavě robota již není omezeno pohyby robota. Ze spodní přípravy pro přichycení fotoaparátu je kabel rozveden k jednotlivým komponentám - blesku a třem laserům (viz. Obr. 5-20).

Na vedení kabelů je nutné dbát již v průběhu definování pozic robota, aby nedošlo k jejich zamotání v důsledku příliš velkého natočení některých os!



Obr. 5-19 Vedení kabelů po těle robota



Obr. 5-20 Vedení kabelů k jednotlivým komponentům

5.1.7 Komunikace řídicího počítače s fotoaparátem a robotem

Při využití fotoaparátu Nikon D2Xs s Wi-Fi adaptérem Nikon WT-2 umožňuje systém TRITOP okamžité odesílání pořízených fotografií přes Wi-Fi rozhraní do počítače. Tento způsob urychluje celé měření, protože se po dokončení měřicí části nemusí čekat na stažení měřících snímků do počítače, ale fotografie jsou načítány systémem okamžitě po pořízení.

V průběhu automatizovaného měření však bude třeba, aby fotoaparát také dostával vhodným způsobem signál z řídicího počítače, že robot je v požadované pozici a fotoaparát tak může pořídit snímek. Robot se následně přesune do další pozice a fotoaparát musí dostat stejný signál znovu. Tento proces se stále opakuje. Způsobů vyslání signálu je několik:

a) kabelovou spouští

První možností je využití kabelové spouště. Firma Nikon nabízí několik variant kabelových spouští. Jednou z nich je drátová spoušť MC-22 s 10pinovým konektorem pro připojení k fotoaparátu a se třemi banánkovými konektory pro spouštěč (viz Obr. 5-21). U této varianty řešení by bylo nutné vyřešit přechod mezi USB (respektive COM portem) a banánkovými konektory. V programu by se pak vyskytovaly příkazy pro odeslání signálu na port USB (COM) a přes něj dále na drátovou spoušť a do fotoaparátu. Z důvodu velké složitosti řešení a nalezení výhodnější varianty jsem tuto variantu dále nerozváděl.

Tato varianta řešení by měla pravděpodobně uvedené výhody a nevýhody:

Výhody:

- oficiální řešení firmy Nikon

Nevýhody:

- drahá varianta (asi 1900 Kč + prodlužovací kabel MC-21 asi 2200 Kč) [31]
- příliš složité řešení (přechod mezi USB a banánkovými konektory; vyslání signálu na USB (COM) port)
- omezení délkou kabelu, nutnost vedení kabelu po těle robota



Obr. 5-21 Kabelová spoušť MC-22 [30]

b) bezdrátovou spouští

Druhou možností je využití bezdrátové spouště. V této oblasti se vyskytly následující dvě varianty řešení:

1. *Nikon ML-3 Modulite Remote Control Set*

Jedná se o bezdrátovou spoušť firmy Nikon. Spoušť pracuje na principu infračerveného záření a skládá se z přijímače, který se připojuje deseti-pinovým konektorem k fotoaparátu a vysílače, který se drží v ruce (viz. Obr. 5-22). Toto řešení by již bylo bezdrátové, ale mělo by velké množství nevýhod a problémů, jež by bylo třeba vyřešit. Jedním z hlavních by bylo propojení řídicího PC s vysílačem a odeslání signálu přes USB (COM) port.

Výhody:

- bezdrátové řešení
- oficiální řešení firmy Nikon

Nevýhody:

- drahá varianta (cena okolo 5600 Kč) [31]
- příliš složité řešení (propojení řídicího PC s vysílačem signálu)
- nutné přesné nasměrování vysílače na přijímač → z důvodu pohybu robota v průběhu měření je toto řešení v zásadě nepoužitelné



Obr. 5-22 Bezdrátová spoušť Nikon ML-3 [30]

2. *Phottix Plato 2.4GHz Wireless Remote*

Jedná se o neoficiální bezdrátovou spoušť firmy Phottix. Spoušť pracuje na principu radiového signálu operujícího na frekvenci 2,43Ghz. Skládá se opět z přijímače, který se připojuje 10pinovým konektorem k fotoaparátu a vysílačem, který se za běžného použití drží v ruce (viz. Obr. 5-23). Stejně jako u předchozího řešení by bylo nutno vyřešit propojení řídicího PC s vysílačem. Toto řešení však již neobsahuje závažnou překážku uvedenou v předchozím případě, radiový signál může pracovat všesměrově až v rozsahu 100m.

Výhody:

- bezdrátové řešení s neomezeným směrovým rozsahem a dosahem až 100m

Nevýhody:

- stále poměrně vysoká cena (asi 1300 Kč) [32]
- příliš složité řešení (propojení řídicího PC s vysílačem signálu)
- v některých zemích nebo i velkých výrobních závodech je omezeno používání zařízení využívajících rádiového signálu



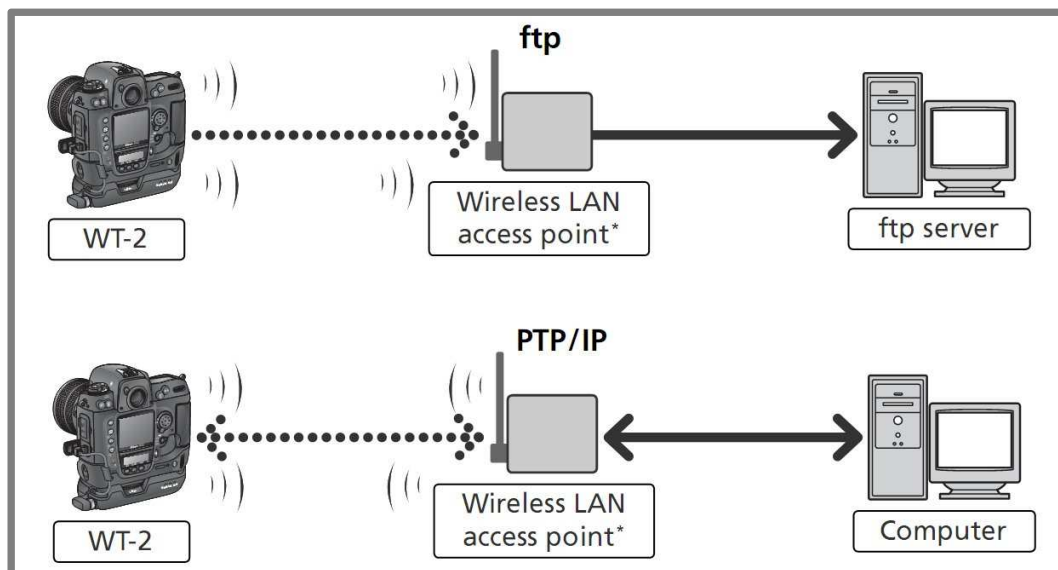
Obr. 5-23 Bezdrátová spoušť Phottix Plato 2.4GHz [33]

Obě tyto varianty jsem později zavrhl a dále nerozvíjel. U první varianty to bylo z důvodu její nepoužitelnosti na pohybující se robotu. V obou variantách by pak bylo velmi složité propojit vysílač signálu s řídicím PC. Jednalo by se o rozsáhlé elektrotechnické řešení spojené s programováním (odeslání signálu přes USB nebo COM port, propojení s prostředím Pythonu). Hlavním důvodem k upuštění od těchto variant však bylo nalezení vhodnějšího řešení.

c) softwarově přes Wi-Fi rozhraní

Třetí možností řešení komunikace je využití Wi-Fi adaptéru WT-2. Vzhledem k tomu, že adaptér se při měření bude používat k odesílání fotografií do řídicího PC (jak bylo uvedeno na začátku kapitoly 5.1.7), bylo by jeho použití i k přijímání signálu ideálním řešením.

V běžném užití pracuje adaptér ve spojení s fotoaparátem v režimu FTP. To znamená, že tento mód umožňuje vytvořit na řídicím PC FTP server, na který se nahrají právě pořizované snímky nebo snímky již uložené ve fotoaparátu. V tomto případě se však jedná jen o jednosměrnou komunikaci z WT-2 adaptéru do PC (viz. horní část na Obr. 5-24) a není možné posílat signál z PC do WT-2 adaptéru. K tomu slouží mód PTP/IP. Jak je vidět ve spodní části Obr. 5-24, jedná se o obousměrnou komunikaci, kdy jak řídicí PC, tak adaptér WT-2, mohou přijímat a odesílat signály.



Obr. 5-24 FTP a PTP/IP komunikace adaptéru WT-2 [30]

Po bližším prozkoumání této možnosti komunikace mezi řídicím PC a fotoaparátem byly nalezeny dvě varianty, jak skutečnou komunikaci zajistit:

1. Nikon Camera Control Pro 2 (nikonusa)

Jedná se o oficiální software od firmy Nikon, který slouží ke vzdálenému ovládní fotoaparátu přes USB kabel, Firewire kabel nebo Wi-Fi. Software umožňuje po připojení a spárování PC a fotoaparátu (v mém případě pomocí Wi-Fi přes WT-2 adaptér) nastavovat parametry fotoaparátu. Jsou jimi například čas závěrky, citlivost ISO a v případě užití jiného než plně manuálního objektivu i clona a ohnisková vzdálenost (viz Obr. 5-25). Následně je software schopný dát fotoaparátu signál pro pořízení snímku a následné uložení snímku na harddisk počítače.

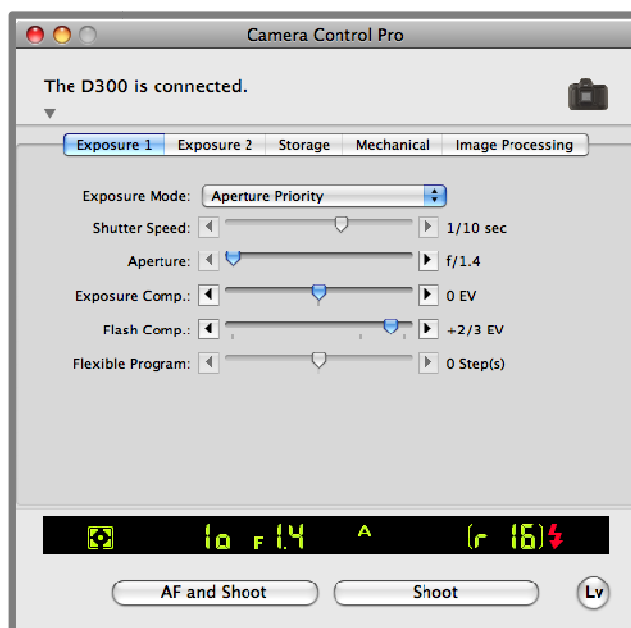
Tím by se jednalo o ideální variantu řešení problému s komunikací mezi řídicím PC a fotoaparátem. Nese však v sobě několik problémů. Prvním je fakt, že se jedná o uzavřený software a bylo by velmi obtížné, pokud vůbec možné, dát v určený moment softwaru signál pro pořízení snímku z prostředí TRITOPu a programovacího jazyku Python. Druhým problémem je, že software pracuje pouze pod operačním systémem Windows a Mac OS X, zatímco systém TRITOP pracuje pod operačními systémy Linux a Windows, avšak z důvodu použití robota musí pracovat pod systémem Linux.

Výhody:

- Bezdrátové řešení využívající pouze současné vybavení používané při měření se systémem TRITOP
- Oficiální řešení firmy Nikon
- Široké možnosti nastavení fotoaparátu pomocí software

Nevýhody:

- Náklady na pořízení software (asi 4000 Kč)
- Nesnadné propojení do systému TRITOP pomocí Pythonu
- Nepracuje pod operačním systémem Linux



Obr. 5-25 Ovládací prostředí software Camera Control Pro 2 [34]

2. *gPhoto2* [35]

Jedná se o Open Source nástroj vydávaný pod licencí GNU LGPL (GNU Lesser General Public Licence) [36] a pracující pod operačním systémem Linux. Umožňuje přes příkazovou řádku ovládat přes 1200 různých digitálních fotoaparátů. Software využívá ke své komunikaci protokolu PTP (Picture Transfer Protocol), případně PTP/IP u fotoaparátů, umožňujících oboustrannou komunikaci mezi počítačem a fotoaparátem.

Software umožňuje spojení na portech USB, Serial, Disk a PTP/IP. To znamená, že u některých fotoaparátů je umožněn pouze přenos dat jako u velkokapacitního média, u jiných, které to podporují, je možné fotoaparáty částečně nebo kompletně ovládat. Použitý fotoaparát Nikon D2Xs patří mezi skupinu fotoaparátů, které lze ovládat. Ovládání je možné jednak přes port USB a po určitém čase, hledání řešení a komunikaci s vývojáři software bylo nalezeno řešení i pro komunikaci na portu PTP/IP a využití Wi-Fi. Toto řešení bylo nakonec posouzeno jako ideální pro danou aplikaci a bude dále popsáno v následující kapitole 5.2.1.

Výhody:

- Bezdrátové řešení využívající pouze současné vybavení používané při měření se systémem TRITOP
- Široké možnosti nastavení fotoaparátu pomocí software
- Možnost zprostředkovaně přistupovat k software ze systému TRITOP přes jazyk Python
- Jedná se o OpenSource, bezplatné použití

Nevýhody:

- OpenSource nemusí být vždy plně spolehlivé a podporované

5.2 Softwarová část

5.2.1 Softwarové řešení komunikace fotoaparátu s řídicím počítačem

Jak bylo uvedeno výše, pro komunikaci mezi fotoaparátem a řídicím počítačem byl vybrán software gPhoto2. Jednalo se o ideální variantu, která však stále měla dva problémy, které bylo nutno vyřešit.

- 1) Spouštění příkazů nástroje gPhoto2 není přímo z Pythonu možné, ale je k tomu možné využít speciální modul subprocess, obsažený ve standardní knihovně.
- 2) Funkce software gPhoto2 s použitým fotoaparátem při komunikaci přes USB port je podporována a při zapojení byla i s úspěchem ověřena. Komunikace na portu PTP/IP s využitím Wi-Fi adaptéru WT-2 není běžně podporována.

Řešení uvedených problémů

Využití modulu subprocess [37]

Jazyk Python už při základní instalaci obsahuje vestavěné moduly (programy, které obsahují předem naprogramované funkce) a dále je možné další moduly přidávat. Moduly obsahují třídy a funkce, ty mohou být dále specifikované celou řadou argumentů.

Modul jazyka Python subprocess, slouží k přístupu k procesům, které jsou spustitelné v příkazové řádce. Umožňuje jejich spouštění, přístup k jejich vstupům, výstupům a chybovým hlášením a obstarává návratový kód.

Běžný příkaz nástroje gPhoto2 pro pořízení snímku a jeho uložení, který se zadává v příkazové řádce, vypadá následovně:

```
gphoto2 --capture-image-and-download
```

Modul obsahuje jedinou třídu, Popen, s argumenty třídy uvedenými v závorce:

```
subprocess.Popen(args, bufsize=0, executable=None, stdin=None, stdout=None, stderr=None, preexec_fn=None, close_fds=False, shell=False, cwd=None, env=None, universal_newlines=False, startupinfo=None, creationflags=0)
```

Z uvedených argumentů jsem ve svém řešení použil pouze argumenty args a shell, stdout a stderr. Argument args obsahuje řetězec nebo sekvenci argumentů programu. shell specifikuje, zda se mají uvedené argumenty zpracovat, jako by se jednalo o řetězec obsahující příkazy, zadané naprosto stejným způsobem v příkazové řádce. stdout reprezentuje data z výstupu prováděného příkazu a stderr jeho chyby.

Další použitý příkaz je metoda třídy Popen nazvaná communicate. Ta slouží ke komunikaci mezi spuštěným příkazem a Pythonem. Obsahuje dvojici - první prvek reprezentuje data z výstupu (stdout) a druhý chyby (stderr). Ty slouží ke kontrole, zda příkaz probíhá korektně. Výsledná série příkazů pro pořízení snímku v prostředí TRITOPu a jazyce Python bude vypadat následovně:

```
capture = subprocess.Popen(["gphoto2 --capture-image-and-download"],
                           stdout=subprocess.PIPE, stderr=subprocess.PIPE, shell=True)
StdZpr, ErrZpr=capture.communicate()
```

Wi-Fi komunikace

Problém s komunikací přes Wi-Fi se podařilo vyřešit díky komunikaci s hlavním tvůrcem software gPhoto2, Marcusem Meisnerem. Po konzultaci s ním jsem se dopracoval k vhodnému řešení.

Kromě toho, že fotoaparát musí podporovat vzdálené snímání, musí být pro korektní fungování daného typu fotoaparátu známy některé parametry. Mezi ty základní patří:

- Port, na kterém je fotoaparát připojen (serial:, usb:, disk:, ptpip:)
- Typ fotoaparátu; v mém případě to je „Nikon D2X SLR (PTP mode)“
- ID fotoaparátu; v případě připojení na portu usb: je to USBID, u ptpip: portu je to GUID; v obou případech se jedná o hexadecimální řetězec specifikující daný typ fotoaparátu
- U Wi-Fi komunikace je třeba ještě znát IP adresu daného zařízení

U podporovaných fotoaparátů je USBID známé, takže při zadání správného typu fotoaparátu nebo při korektní autodetekci je USBID načteno automaticky a nemusí se specifikovat. Na druhé straně GUID je známé jen u některých fotoaparátů, u značky Nikon jsou to například některé modely třídy Coolpix. U modelu D2Xs, respektive Wi-Fi adaptéru WT-2, které zajišťuje komunikaci s počítačem, GUID známé nebylo. V průběhu komunikace odesílá fotoaparát (Wi-Fi adaptér) pro ověření opakovaně GUID do řídicího počítače. Tak tomu je také u oficiálního software od firmy Nikon Wireless Connecting Utility, která slouží ke spárování fotoaparátu a počítače pro následné použití již dříve zmíněného software Camera Control Pro 2. Z Wi-Fi komunikace mezi prvně zmíněným programem a fotoaparátem bylo získáno příslušné GUID.

Při zadání výše uvedených parametrů pro použitý fotoaparát a zjištěného GUID se podařilo Wi-Fi komunikaci zprovoznit. Použito bylo i stejné nastavení fotoaparátu jako při komunikaci v režimu FTP.

Součástí mého řešení tedy je i textový soubor s nastavením software gPhoto2 (soubor /home/jméno_usera/.gphoto/settings), kde musí být uvedeno správné GUID, IP adresa fotoaparátu a další potřebné parametry.

5.2.2 Softwarové řešení komunikace robota s řídicím počítačem

5.2.2

Práce s robotem je ze systémů firmy GOM podporována pouze v prostředí systému ATOS. Protože jsou však všechny systémy vyvinuty v programovacím jazyce Python, jsou některé příkazy záměnné ve více systémech, případně záměnné s malými úpravami.

Ukázka příkazu pro zadání pozice robota:

```
##### Pozice 1 #####
gom.script.sys.execute_shell_command (
    command='gom-move --device=KUKA_V5 --port=/dev/ttyUSB0 --exec "set_speed 25;
set_accel 25; set_position \\\"8.092864E-01 -1.349994E+02 1.561217E+02 -1.798825E+02
8.718830E+01 1.784749E+02 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
0.000000E+00 0.000000E+00\\\" ',
    comment='1')
```

V uvedeném příkazu jsou kromě specifikace robota a portu pro komunikaci s ním uvedeny parametry rychlosti a zrychlení jeho pohybů. Hlavní částí příkazu jsou pak definice natočení v jednotlivých šesti osách.

Robot v tomto případě pracuje v módu, kdy jsou zadány pouze jeho jednotlivé pozice, aniž by bylo definováno, jakým způsobem se má do příslušných pozic dostat.

To obstarává inverzní kinematika robota. Robot se nepohybuje po předem definovaných trajektoriích, a proto není třeba problém pohybu mezi jednotlivými pozicemi řešit.

Pro správné fungování příkazů je nutné, aby byl robot na programovacím přístroji KUKA Control Panel (KCP) přepnutý do automatického režimu AUT. Následně v něm musí být spuštěn program GOM, který spouští programovou smyčku čekající na příkazy z prostředí nějakého systému (ATOS, TRITOP) firmy GOM.

5.2.3 Postup při automatizovaném měření

Následuje popis postupu při automatizovaném měření. Tento postup je vztažen ke konkrétní zkušební součásti, ale stejný (nebo obdobný) postup bude použit i při jakékoliv jiné měřené součásti.

Jednotlivé fáze měření:

1) Výběr měřené součásti a její příprava

Příslušné řešení je vytvořeno pro konkrétní součást (sestavu), a proto je její výběr logickým prvním krokem.

V mém případě byl jako měřená součást vybrán lisovaný plech uvedený v kapitole 5.1.2.

Příprava součásti znamenala polepení dostatečným množstvím nekódovaných bodů v náhodných pozicích a poté v pozicích vhodných pro vytvoření adaptérů pro středy děr a ustavení souřadného systému.

Obecně je pro měření možné zvolit jakoukoliv součást, pro jejíž změření má robot dostatečný rozsah.

2) Definování adaptérů

Adaptéry jsou pomocné nástroje systémů GOM. Umožňují automatické rozpoznání stejné skupiny bodů (entit) v různých měřeních a případné nahrazení skupiny bodů jedním nebo více vybranými body. Bližší popis funkce adaptérů je popsána v kapitole 5.2.5 v bodě 2.

U vybrané součásti jsem definoval tyto tři adaptéry:

- a. Střed malé díry
- b. Střed velké díry
- c. Body pro 3-2-1 transformaci (viz. seznam použitých zkratk, symbolů a veličin)

Definování adaptéru probíhá následujícím postupem:

Výběr bodů pro adaptér → vytvoření adaptéru → přidání a identifikace adaptéru v projektu.

Například pro střed velké díry to znamenalo nalepit v jejím okolí 4 body (minimálně 3). Dále po nafocení a výpočtu projektu (automatizovaně nebo ručně) definovat nový adaptér výběrem těchto 4 bodů a bodu na kulovém adaptéru vloženém do díry. Tím se v systému vytvoří nový adaptér, který je poté v dalším měření stejné součásti ve výpočtu přidán, identifikován a vytvoří se bod ve středu díry a v rovině zbývajících 4 bodů.

3) Teaching - definování pozic robota

V tomto kroku se definují pozice robota, odkud bude při měření pořizovat snímky. Na hlavu robota se připevní přípravek pro přichycení fotoaparátu, fotoaparát a rameno s lasery. Pomocí programovacího přístroje KCP se v testovacím provozu robota T1 najede do první pozice. Pohledem do hledáčku fotoaparátu se zkontroluje záběr a nastavení správné ohniskové vzdálenosti. Na tuto vzdálenost se nastaví odměřovací lasery. Dále se pomocí KCP a programu Teaching.py nadefinují zbývající pozice robota. Program Teaching.py byl vytvořen ve firmě MCAE Systems s.r.o. a slouží k uložení aktuální pozice robota do textového souboru ve formátu, který je následně systém TRITOP schopný zpracovat.

KCP nabízí několik kartézských souřadnicových systémů robota:

- a. WORLD - počáteční souřadnicový systém pro souřadnicové systémy ROBOTROOT a BASE
- b. ROBOTROOT - leží v noze robota, popisuje pozici robota ve vztahu k WORLD
- c. BASE - souřadnicový systém obráběného dílu
- d. TOOL - souřadnicový systém nástroje

Dále existují dvě možnosti manuálního pohybu robota:

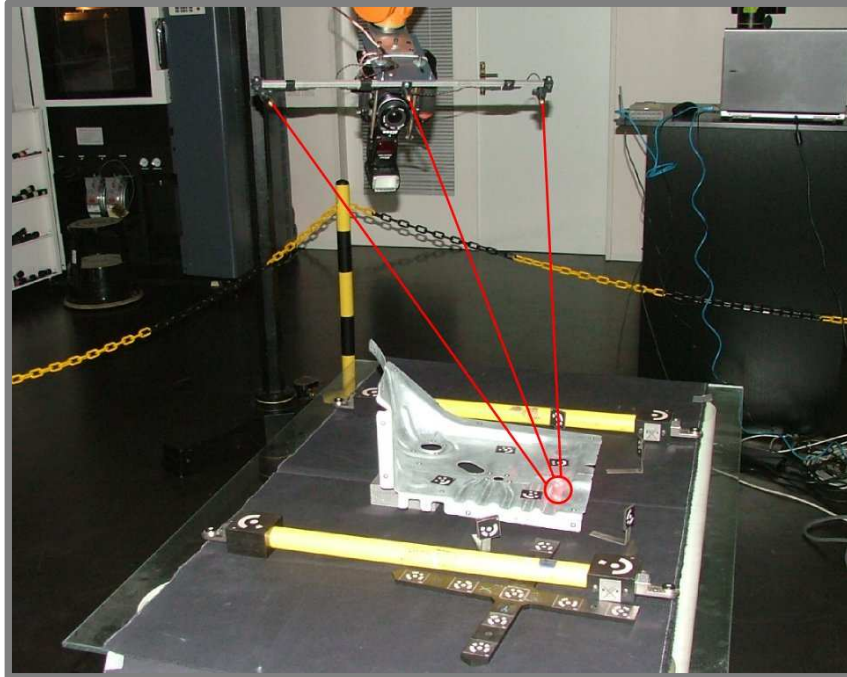
- a. Kartézský pohyb - TCP (Tool Center Point) se pohybuje v pozitivním nebo negativním směru podél os některého souřadnicového systému
- b. Osově specifický pohyb - pohyb každou osou zvlášť v pozitivním nebo negativním směru [38]

Ve svém řešení jsem využil dvě varianty pohybu. Prvním byl kartézský pohyb v souřadnicovém systému nástroje (TOOL). TCP byl nadefinován v ose objektivu a v ohniskové vzdálenosti fotoaparátu, takže robot poté opisoval své pohyby okolo měřeného objektu. Druhým byl osově specifický pohyb v souřadnicovém systému WORLD. Tímto jsem korigoval polohu robota v pozicích, kam se předchozí variantou nebylo možné dostat.

Důležitou součástí této fáze je také zajištění, aby byla měřená součást v příštích měřeních v totožné pozici vůči robotu.



Obr. 5-26 KUKA Control Panel (KCP)



Obr. 5-27 Režim učení robota - zvýraznění paprsků laseru

4) Příprava programu pro měření

Jak je uvedeno dále v kapitole 5.2.4, program pro měření se skládá z příkazů pro pozice robota a příkazů pro pořízení snímku. Pozice robota jsou uloženy v textovém souboru z programu Teaching.py. Tyto pozice se vloží do nového programu Mereni.py (viz. Obr. 5-28) a za každou pozici se přidají příkazy pro pořízení a odeslání snímku zpět do počítače.

Program se poté musí odzkoušet v automatickém režimu AUT, zda nemůže při následném měření dojít k případným kolizím.

```

71 RobotCheck()
72 ##### Pozice 1 ##### 1. ze čtyř kalibračních snímků - 0°
73 gom.script.sys.execute_shell_command (
74   command='gom-move --device=KUKA_V5 --port=/dev/ttyUSB0 --exec "set_speed 25; set_accel 25; set_position \\*8.092864E-01 -1.349994E+02 1.561217E+02 -1.79882
75   comment='1')
76
77
78 MakePicture()
79
80
81 ##### Pozice 2 ##### 2. ze čtyř kalibračních snímků - 90°
82 gom.script.sys.execute_shell_command (
83   command='gom-move --device=KUKA_V5 --port=/dev/ttyUSB0 --exec "set_speed 25; set_accel 25; set_position \\*9.547478E+00 -1.255141E+02 1.417890E+02 -8.93130
84   comment='1')
85
86
87 MakePicture()
88
89
90 ##### Pozice 3 ##### 3. ze čtyř kalibračních snímků - 180°
91 gom.script.sys.execute_shell_command (
92   command='gom-move --device=KUKA_V5 --port=/dev/ttyUSB0 --exec "set_speed 25; set_accel 25; set_position \\*-2.774167E+00 -1.205002E+02 1.309661E+02 -2.7344
93   comment='1')
94
95
96 MakePicture()
97
98
99 ##### Pozice 4 ##### 4. ze čtyř kalibračních snímků - 270°
100 gom.script.sys.execute_shell_command (
101   command='gom-move --device=KUKA_V5 --port=/dev/ttyUSB0 --exec "set_speed 25; set_accel 25; set_position \\*-1.373207E+01 -1.254610E+02 1.410830E+02 8.48975
102   comment='1')
103
104
105 MakePicture()
106
107

```

Obr. 5-28 Ukázka části programu Mereni.py

5) Příprava programu pro vyhodnocení

Výhodou systémů firmy GOM je, že každý příkaz nebo krok, který je proveden ručně, je možné zaznamenat v podobě sekvence příkazů modulu jazyka Python gom. Tyto příkazy lze pak jednoduše vložit do vytvářeného skriptu případně je jakýmkoliv způsobem upravit.

Toho jsem využil v přípravě programu pro vyhodnocení měření. Nejprve jsem provedl přípravu výpočtu projektu ručně (nedefinování měřítkových tyčí, fotoaparátu, objektivu,...), tento proces zaznamenal a kód poté upravil tak, aby fungoval univerzálněji.

Dalším krokem bylo přidání příkazů pro přidání a identifikaci adaptérů v projektu. Tyto adaptéry byly definovány v kroku 2. Tyto body nejsou přímo body daného měření, a proto jsou v jejich okolí pomocí jednoduchého algoritmu nalezeny skutečné body daného měření.

Důležitým krokem je 3-2-1 transformace do předem zvolených a pomocí adaptérů nalezených bodů.

Vybraná data z měření jsou následně pomocí série příkazů exportována do textového souboru. Po celé sérii měření jsou pomocí nedefinovaných statistických charakteristik polohy měřeného souboru provedeny statistické výpočty a data jsou přidána do textového souboru.

Ukázka části kódu programu pro vyhodnocení je na Obr. 5-29.

```

418 # Add adapters to project #
419 gom.script.adapter.add_adapter_definitions (
420     data=[gom.app.tri_projects[-1]],
421     categories=gom.ListVector (['user_defined', 'user_defined'], ['system_default', 'user_profile', 'user_defined']),
422     adapter_names=['BodyProSS', 'Strad1', 'Strad2'])
423
424 # Identify adapters #
425 gom.script.adapter.identify_adapters (data=[gom.app.tri_projects[-1]])
426
427
428 ### Hledání nekodovaných bodů projektu v okolí adaptérů ###
429 NumberOfSelectedPoints=gom.app.tri_projects[-1].get ('prj_num_pts')
430 print NumberOfSelectedPoints
431 Okoll=2 # v jakém okolí se bude hledat: v mm
432
433 # Vybere všechny nekodované body
434 SelectedPoints=[]
435 for point in range (NumberOfSelectedPoints):
436     Uncoded=gom.app.tri_projects[-1].objectpoints[point].get ('pt')
437     if Uncoded=="uncoded point" or Uncoded=="ellipse feature point":
438         SelectedPoints.append(gom.app.tri_projects[-1].objectpoints[point].get ('id'))
439     print SelectedPoints
440
441 # Vytvoří seznam obsahující všechny nekodované body ve formátu [ID,x,y,z]
442 listOfPoints=[]
443 for point in SelectedPoints:
444     pointList=[]
445     pointID=point
446     XCoord=PriradSour ('x',point)
447     YCoord=PriradSour ('y',point)
448     ZCoord=PriradSour ('z',point)
449     pointList.append(pointID)
450     pointList.append(XCoord)
451     pointList.append(YCoord)
452     pointList.append(ZCoord)
453     listOfPoints.append(pointList)

```

Obr. 5-29 Ukázka části programu Vypocet.py

6) Měření

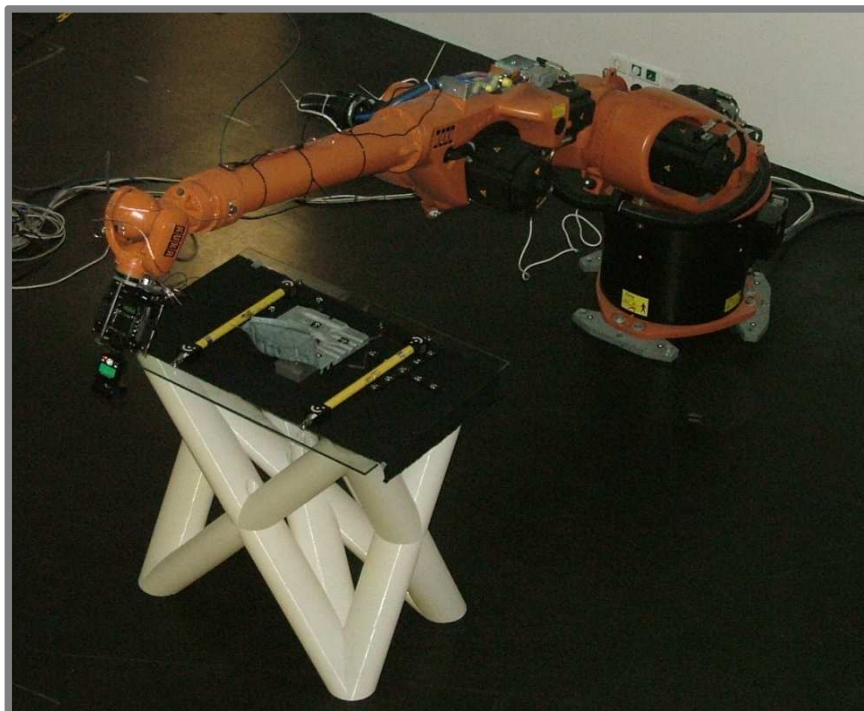
Fáze měření je závěrečnou fází, ve které se využijí podklady ze všech předešlých přípravných fází. Představuje realizaci samotného měření zvoleného objektu.

Před samotným měřením je nutné připravit měřený objekt, což zahrnuje také přidání měřítkových tyčí, kódovaných bodů a kulových adaptérů (v tomto zvoleném případě). Celá měřená scéna musí být ve shodné pozici vůči poloze robota, jako při režimu definování pozic robota (fáze 3).

Dále je nutné připravit měřicí zařízení, tedy fotoaparát s bleskem. Ty je třeba upevnit na hlavu robota pomocí přípravku pro přichycení a vyvést napájecí kabely po těle robota.

Při započetí měření robot najede do první měřicí pozice a uživatel je vyzván, aby zkontroloval a případně nastavil ohniskovou vzdálenost fotoaparátu a jeho clonové číslo.

Po těchto přípravných krocích uživatel zvolí adresář, do kterého má být měření uloženo a poté se provede celá fáze měření a vyhodnocení tak, jak je popsáno ve fázích 4 a 5. Obr. 5-30 ukazuje průběh měření.



Obr. 5-30 Průběh měření

5.2.4 Metodika postupu pro softwarové řešení

Jak je uvedeno v dílčích cílech této práce (kapitola 3), měly být vytvořeny dva programy. První pro proces měření a druhý pro proces vyhodnocení měření. Programy (respektive skripty) vznikly nakonec čtyři, ale to pouze s ohledem na větší přehlednost a srozumitelnost kódu. Jedná se tedy o jeden řídicí program (**Automatizace.py**), program pro proces měření (**Mereni.py**), program pro vyhodnocení měření (**Vypocet.py**) a pomocný program (**Check.py**).

Vývojové diagramy pro vytvořené programy jsou uvedeny v přílohách jako přílohy 2-5.

5.2.5 Volba metodiky ustavení souřadného systému

V kapitole 5.2.3 bylo uvedeno, že k ustavení souřadného systému byl využit adaptér definující 3 body pro následnou 3-2-1 transformaci. Nebylo však uvedeno žádné odůvodnění výběru této varianty jako nejvhodnější.

V průběhu svého řešení jsem našel dvě varianty výběru bodů pro ustavení souřadného systému:

1) Hledání bodů podle jejich identifikačního čísla (ID)

Tato metoda hledání tří bodů pro ustavení je založena na přečíslování všech nekódovaných bodů v projektu a následné nalezení bodů s konkrétními ID, která náleží hledaným třem bodům. K přečíslování bodů by byl využit program, který jsem jako cvičný vytvořil v začátcích činnosti na diplomové práci. Tento program umožňuje přečíslování bodů ve směru kterékoliv osy s ohledem na zbývající dvě (viz. první obrázek v Příloze 6).

Předpokladem tedy je, že po přečíslování bodů v každém následujícím měření budou mít hledané body stejné ID. To však nelze zaručit vždy. Na součást může být přidán nějaký další bod nebo může systém zaznamenat nějaký odlesk a rozpoznat jej jako bod a tím posléze dojít ke zcela jiným než hledaným bodům.

Výhodou tohoto řešení je, že není nutné definovat adaptér a teoreticky i odlepit body a nalepit je jinam, případně zvolit jiné body pro definování souřadného systému.

Nevýhodou je již zmíněná nespolehlivost při hledání bodu podle jeho ID.

2) Hledání bodů pomocí adaptéru

Metoda definování adaptéru je zběžně popsána v kapitole 5.2.3. Nejprve se vyberou minimálně tři body, které mají adaptér definovat. Čím více bodů, tím je metoda přesnější a spolehlivější. U vybraných bodů systém vypočítá jejich vzájemné vzdálenosti a ty si uloží jako parametry definující příslušný adaptér. Při dalším měření, přidání a identifikaci adaptérů se systém snaží nalézt takovou kombinaci bodů se stejnými vzájemnými vzdálenostmi jako má definováno u daného adaptéru.

Při definování adaptéru se zároveň definuje, jaký bod se má/jaké body se mají vytvořit. V mém případě ustavení jsem tedy vytvořil tři body v místech tří ze čtyř vybraných bodů pro tvorbu adaptéru (viz. druhý obrázek v Příloze 6). Tyto body měly posléze sloužit k ustavení souřadného systému.

V příštím měření se při přidání adaptéru tyto body opět nově vytvoří. Mohou se následně použít k přímému ustavení souřadného systému nebo jako v mém případě se v jejich nejbližším okolí vyhledají skutečné nekódované body a do těchto se systém ustaví.

Výhodou této metody je spolehlivost nalezení právě těch bodů, které hledáme.

Nevýhodou je náročnější příprava při definování adaptéru. Dále také možnost, že bude některý bod definujících adaptér odlepen nebo přesunut na jiné místo. V tomto případě by identifikace adaptéru při dalším měření selhala.

V této konkrétní aplikaci byla zvolena jako vhodnější druhá varianta. U jiné aplikace je možné využít i první variantu, pokud bude uznána jako vhodnější.

5.3 Analýza výsledků

5.3.1 Ověření funkčnosti řešení na sérii měření

V průběhu řešení diplomové práce jsem provedl řadu testovacích měření a zde uvádím výsledky vybraného měření, které bylo provedeno za uvedených podmínek:

- Měření provedeno 19. května 2010 mezi 12.00 a 13.00
- Použito 19 kódovaných a 35 nekódovaných referenčních bodů
- Blesk nastaven na 1/8 svého výkonu
- Fotoaparát s nastavením: clona 8 a zaostřeno na vzdálenost 1,1 m

Provedl jsem celkem 10 po sobě jdoucích měření, kterých bylo následně využito pro statistické vyhodnocení opakovatelnosti systému. Měření následovala bezprostředně po sobě. Jedno měření proběhlo v průměru během 3:40 minuty, celkový čas potřebný pro 10 měření byl tedy 37 minut. Každé měření proběhlo podle popsané fáze měření v kapitole 5.2.3 a zahrnovalo tedy jak samotné měření pomocí robota, tak i vyhodnocení systémem TRITOP.

Měření byly vyhodnoceny prostorové souřadnice středů dvou děr vzhledem ke zvolenému souřadnému systému. Výsledky 10násobného měření byly statisticky zpracovány a byly uvedeny ve výsledném reportu z měření, který je součástí jako Příloha 1.

5.3.2 Statistické ověření opakovatelnosti systému

Jedním z důvodů pro automatizaci systému TRITOP bylo ověření opakovatelnosti systému za splněných podmínek opakovatelnosti. Ty jsou při použití robota a při měřeních bezprostředně následujících po sobě splněny.

Při provedených deseti měřeních bylo sledováno celkem osm parametrů:

- Celkové odchytky měření [px]
- Odchytky měřítkových tyčí [mm]
- Souřadnice x , y a z středu díry 1 [mm]
- Souřadnice x , y a z středu díry 2 [mm]

Z uvedených pak byly pro stanovení opakovatelnosti systému vybrány dva, celkové odchytky měření a odchytky měřítkových tyčí. Jedná se o parametry, které definují celkovou přesnost měření.

Tab. 1 Měření - odchytky

Měření	Celkové odchytky měření [px]	Odchytky měřítkových tyčí [mm]
1	0.03414	0.01064
2	0.03428	0.00841
3	0.03648	0.00848
4	0.03495	0.00780
5	0.03524	0.00860
6	0.03471	0.01042
7	0.03642	0.00729
8	0.03603	0.00678
9	0.03530	0.00794
10	0.03557	0.01035

Statistické vyhodnocení opakovatelnosti systému [39]:*Celkové odchytky měření*

Aritmetický průměr: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{0,03414+0,03428\dots+0,03557}{10} = 0,035312 \text{ px}$

Rozpětí: $x_{max} - x_{min} = 0,03648 - 0,03414 = 0,00234 \text{ px}$

Rozptyl: $s^2 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \bar{x}^2 = \frac{0,03414^2+0,03428^2\dots}{10} - 0,035312^2 = 6,11 \cdot 10^{-7} \text{ px}^2$

Směrodat. odchylka: $s = \sqrt{s^2} = \sqrt{6,11 \cdot 10^{-7}} = 0,00078181 \text{ px}$

Medián: $\tilde{x} = \frac{1}{2} \left[x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right] = \frac{0,035242 + 0,035296}{2} = 0,035269 \text{ px}$

Odchytky měřítkových tyčí

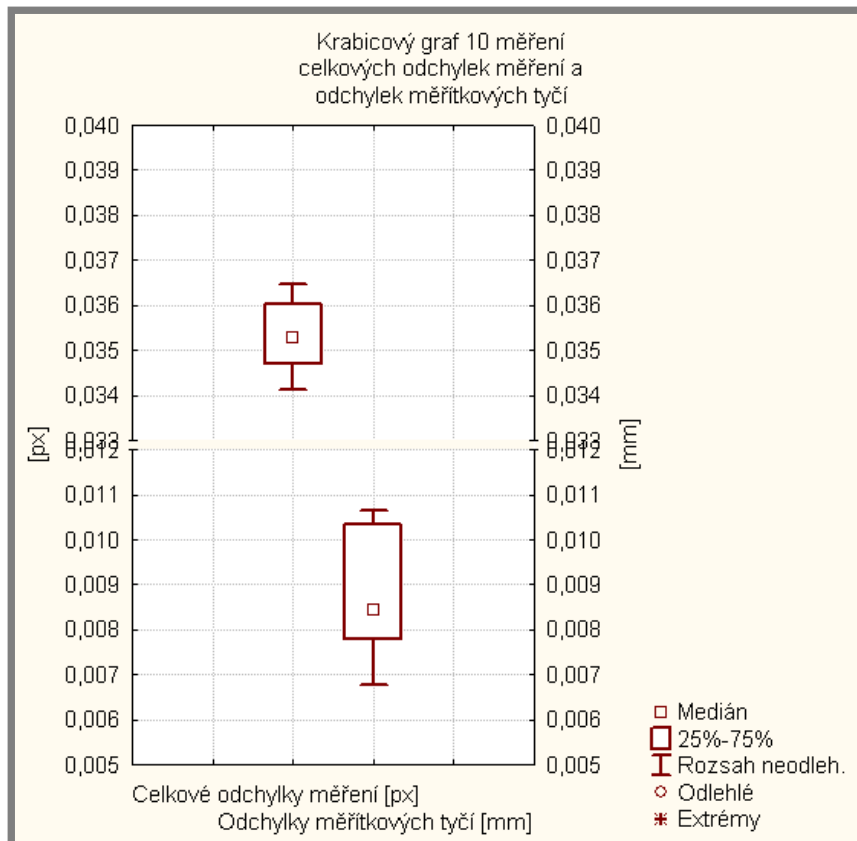
Aritmetický průměr: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{0,01064+0,00841\dots+0,01035}{10} = 0,00867 \text{ mm}$

Rozpětí: $x_{max} - x_{min} = 0,00678 - 0,01064 = 0,00386 \text{ mm}$

Rozptyl: $s^2 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \bar{x}^2 = \frac{0,01064^2+0,00841^2\dots}{10} - 0,00867^2 = 1,66 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$

Směrodat. odchylka: $s = \sqrt{s^2} = \sqrt{1,66 \cdot 10^{-6}} = 0,0012899 \text{ mm}$

Medián: $\tilde{x} = \frac{1}{2} \left[x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right] = \frac{0,008413 + 0,008485}{2} = 0,008449 \text{ mm}$



Obr. 5-31 Krabicový graf pro celkové odchylky a odchylky měřítkových tyčí

Odchylky měřítkových tyčí udávají přesnost měření vztaženou ke konkrétnímu měřenému objemu. V tomto případě se jedná o objem přibližně (1 x 1 x 1) m. Z grafu na Obr. 5-31 je patrné rozložení hodnot tohoto parametru (i parametru celkových odchylek měření) v průběhu uskutečněných deseti měření. Parametrem, kterým je možné hodnotit opakovatelnost systému, je směrodatná odchylka. U odchylek měřítkových tyčí dosahuje směrodatná odchylka hodnoty 0,00129 mm.

Lze tedy říci, že systém má při daných podmínkách opakovatelnosti přesnost, která je vyjádřena směrodatnou odchylkou parametru odchylek měřítkových tyčí, 0,00129 mm.

Přesnost opakování je patrná také z hodnot rozpětí souřadnic středů děr 1 a 2. Hodnota rozpětí se u všech šesti parametrů (souřadnice x , y a z pro dvě díry) pohybuje do 0,007 mm. Rozložení naměřených hodnot je patrné z grafů v Příloze 8.

6.1 Rozbor získaných výsledků a splnění cílů

Primárním cílem této diplomové práce bylo automatizovat procesy měření a vyhodnocení při fotogrammetrickém měření systémem TRITOP. Tento cíl se podařilo splnit, protože byly splněny i všechny stanovené dílčí cíle.

Podařilo se vytvořit přípravek pro přichycení fotoaparátu, který představuje dostatečné zajištění proti oddělení fotoaparátu od hlavy robota při jakémkoliv poloze robota.

Bylo vyřešeno napájení jednotlivých komponent fotoaparátu i odměřovacích laserů. Systém tak není závislý na výdrži baterií, ale může pracovat kontinuálně bez nutnosti jejich výměny. Napájení samotného fotoaparátu není součástí řešení, ale v případě, že se systém osvědčí a bude se uvažovat o jeho širším použití, bude oficiální adaptér dokoupen.

Podařilo se nalézt vhodné řešení komunikace řídicího počítače s fotoaparátem a robotem. Komunikace s fotoaparátem je zajištěna pomocí linuxového nástroje gPhoto2 a modulu jazyka Python subprocess. Komunikace s robotem je zajištěna implementací příkazů ze systému ATOS do systému TRITOP.

Byly vytvořeny programy pro procesy měření a vyhodnocení. Celkem se jedná o čtyři skripty vytvořené v systému TRITOP v jazyce Python (asi 1 300 řádků kódu). Programy jsou vytvořeny pro zvolený praktický příklad (lisovaný plech), ale jsou podrobně popsány a lze je modifikovat pro další využití a jiná měření. Programy automaticky provedou celou fázi měření, vyhodnocení měření i statistické zpracování vícenásobného měření.

Automatizací systému byly také splněny podmínky opakovatelnosti, a proto mohla být stanovena opakovatelnost systému. Výsledky, reprezentované směrodatnou odchylkou odchylek měřítkových tyčí při deseti měřeních, ukázaly opakovatelnost systému 0,00129 mm.

6.2 Možnost další návaznosti na diplomovou práci

Počet měření pro výpočet opakovatelnosti systému představuje poměrně malý statistický soubor. Proto by bylo vhodné provést větší počet měření a podrobnější statistické zpracování dat.

Režim definování pozic robota by pravděpodobně bylo možné usnadnit a zrychlit využitím nové verze systému ATOS 7. Ta totiž obsahuje virtuální místnost, která umožňuje virtuální práci s robotem a definování pozic robota pro skenování s tímto systémem. Změnou parametrů skenovacího senzoru by bylo možné simulovat fotoaparát používaný v systému TRITOP. Tím by se tato fáze značně zjednodušila a zrychlila.

Automatizované řešení je v současném stavu poměrně náročné na přípravu a je vytvořeno pro zvolený konkrétní případ. Adaptéry jsou definovány pro daný kus a u jiného kusu téže série by je nebylo možné použít, protože referenční body by byly nalepeny do odlišných pozic. Bylo by proto vhodné najít řešení, které by umožňovalo měření celé série kusů (například použitím přípravku pro ustavení dílu s pevně definovaným souřadným systémem), usnadnilo by přípravnou fázi a zároveň by rozšířilo řešení na více než jeden měřený kus.

Předpokládá se, že výsledky této diplomové práce budou prezentovány v recenzovaném impaktovaném časopisu.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PAVLIDIS, George, et al. Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. In *Journal of Cultural Heritage*. Xanthi, Greece : Democritus University of Thrace, Department of Architectural Engineering, 2007. s. 93-98.
- [2] BERALDIN, J-Angelo, et al. Active 3D sensing. In *Modelli E Metodi per lo studio e la conservazione dell'architettura storica*. Pisa : University: Scuola Normale Superiore, 2000. s. 22-46. Dostupný z WWW: <<http://www1.cs.columbia.edu/~allen/PHOTOPAPERS/beraldin.pdf>>.
- [3] SOKOVIC, M., KOPAC, J. RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development. In *Journal of Materials Processing Technology*. Ljubljana (Slovenia) : University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, 2006. s. 398-403.
- [4] SOKOVIC, M., CEDILNIK, M., KOPAC, J. Use of 3D-scanning and reverse engineering by manufacturing of complex shapes. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Achievements in Mechanical and Materials Engineering*. Ljubljana (Slovenia) : University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, 2005. s. 601-604.
- [5] CHUA, Chee Kai, LEONG, Kah Fai, LIM, Chu Sing. *Rapid prototyping : Principles and Applications*. Lim Chu Sing. 2nd illustrated edition. New Jersey : World Scientific, 2003. 420 s. ISBN 9812381171.
- [6] *Quality Inspection Services : 3D Scanning Inspection* [online]. 2007 [cit. 2009-06-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.3dscanco.com/services/quality-inspection.cfm>>.
- [7] PRADOSE, Emmanuel. *PERCEPTION : Interpretation and Modeling of Images and Videos* [online]. INRIA, c2005 [cit. 2009-06-21]. Dostupný z WWW: <http://perception.inrialpes.fr/people/Prados/img/SFS/face_reconstruction_by_shape_from_shading.jpg>.
- [8] *Modeling : 3D shape retrieval from texture deformations* [online]. [2004] [cit. 2009-06-21]. Dostupný z WWW: <http://www.medicine.mcgill.ca/physio/cullenlab/corentin/research_files/modeling/fig_html/shape-results.jpg>.
- [9] FAVARO, Paolo. *Depth from focus/defocus* [online]. 2002 , On 25 Jun 2002, 16:45. [cit. 2009-06-21]. Dostupný z WWW: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/FAVARO1/dfd_tutorial.html>.

- [10] *Audi-sport.net* [online]. 2007 , October 9th, 2008 [cit. 2009-06-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.audi-sport.net/vb/showthread.php?t=60835>>.
- [11] LINDER, Wilfried. *Digital Photogrammetry : A Practical Course*. 3rd ed. edition. (May 11, 2009). 220 s. ISBN-10: 3540927247.
- [12] LUHMANN, Thomas, et al. *Close Range Photogrammetry : Principles, Techniques and Applications*. 1st edition. Caithness (UK) : Wiley, 2006. 528 s. ISBN 9780470106334.
- [13] *The Basics of Photogrammetry* [online]. Melbourne FL (USA) : Geodetic Systems, Inc., c1996-2007 , Last modified: Tuesday, October 24, 2006 13:32 [cit. 2009-06-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.geodetic.com/Whatis.htm>>.
- [14] PIHAN, Roman. *Foto Román : Slovník fotografických pojmů* [online]. c2002-2009 , Last update 28.1.2009 [cit. 2009-06-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.foto-roman.cz/glossary2.htm>>.
- [15] PIHAN, Roman. *Fotografovani.cz : Expozice - 1. Expoziční základy* [online]. c2003 , 09.03.2006 [cit. 2009-06-24]. Dostupný z WWW: <http://www.fotografovani.cz/art/fozak_df/rom_expozice1.html>.
- [16] BEHRING, Dirk, et al. Optical Coordinate Measuring Techniques for the Determination and Visualization of 3D Displacements in Crash Investigations. *Society of Automotive Engineers, Inc.* [online]. 2001 [cit. 2009-06-24]. Dostupný z WWW: <http://www.gom.com/CONTAINER/files/crash_testing.pdf>.
- [17] *GOM : Optical Measuring Techniques* [online]. 2009 [cit. 2009-06-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.gom.com/>>.
- [18] *MCAE Systems* [online]. 2009 [cit. 2009-06-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.mcae.cz/>>.
- [19] *GOM : Optical Measuring Techniques* [online]. c2007 [cit. 2009-06-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.marubeni-sys.com/de/gom/>>.
- [20] HARMS, Daryl, MCDONALD, Kenneth. *Začínáme programovat v jazyce Python*. 2. opravené vydání: Computer Press, 2008. 472 s. ISBN 9788025121610.
- [21] LUTZ, Mark, ASCHER, David. *Naučte se Python*. 1. vydání: Grada, 2003. 360 s. ISBN 9788024703671.
- [22] PETERS, D. *ATOS - Automatizace optických měření* [prezentace]. Říjen 2008.

- [23] *KUKA: Průmyslové roboty, Střední mezní zátěž* [online]. 2010 [cit. 2010-04-25]. Dostupný z WWW: <http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/medium/kr30_116_2/start.htm>.
- [24] *NIKON Cameras: Product Archive* [online]. 2010 [cit. 2010-04-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.nikonusa.com/Find-Your-Nikon/Product-Archive/index.page>>.
- [25] *Fotoaparát.cz: Rádce fotografa* [online]. 2009 [cit. 2010-04-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.fotoaparát.cz/article/10113/1>>.
- [26] *GOM mbH: Pontos v6 User Manual* [software]. Germany, 2007.
- [27] *DVF: Nikon EH-6* [online]. 2010 [cit. 2010-04-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.digitalni-videokamery-fotoaparaty.cz/prislusenstvi-pro-digitalni-zrcadlovky/akumulatory-nabijecky-gripy/nikon-eh-6-2252.html>>.
- [28] *Quantum: Quantum Turbo AC* [online]. 2010 [cit. 2010-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://qtm.com/?page=3151&qmode=c>>.
- [29] *Axson Technologies: PX 223 HT* [online]. 27.12.2007 [cit. 2010-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.axson-na.com/TDSs/TDS-px223.pdf>>.
- [30] *NIKON Cameras* [online]. 2010 [cit. 2010-04-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.nikonusa.com/>>.
- [31] *Nikon market* [online]. 2010 [cit. 2010-05-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.nikon-market.cz>>.
- [32] *Phottix: Phottix Plato* [online]. 2009 [cit. 2010-05-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.phottixstore.com/phottix-plato.html>>.
- [33] POT, Martin, *Photography Blog: Review: Phottix Plato 2.4GHz Wireless Remote* [online]. 2010 [cit. 2010-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://martybugs.net/blog/blog.cgi/gear/PhottixPlatoWirelessRemote.html>>.
- [34] SOUKUP, Michal, *mefoto.cz: Nikon Camera Control Pro 2* [online]. 2010 [cit. 2010-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.mefoto.cz/2009/02/02/nikon-camera-control-pro-2/>>.
- [35] *gPhoto: Freedom from film* [online]. 2010 [cit. 2010-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.gphoto.org/>>.
- [36] *GNU Operating System* [online]. 2010 [cit. 2010-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.gnu.org/>>.

- [37] *Python v2.6.5 documentation: subprocess - Subprocess management* [online]. Last updated on May 21, 2010 [cit. 2010-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://docs.python.org/library/subprocess.html>>.
- [38] *KUKA: Návod k použití a programování* [software]. KUKA Roboter GmbH: Německo, 20.07.2006.
- [39] KARPÍŠEK, Z. *Matematika IV. : Statistika a pravděpodobnost*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 170 s. ISBN: 8021425229

8 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
3-2-1 transformace	Metoda transformace souřadného systému pomocí roviny (definované třemi body), přímkou (definované dvěma body) a jedním bodem
3D	třídídimenzionální
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
B	rovina snímku
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device (druh obrazového snímače)
CMM	Coordinate measuring machine
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor (druh obrazového snímače)
FDM	Fused Deposition Modeling
FTP	File Transfer Protocol
GOM	Gesellschaft für optische Messtechnik
ISO	citlivost fotoaparátu dle normy ISO 5800
KCP	KUKA Control Panel
PTP/IP	Picture Transfer Protocol/Internet Protocol
R	matice rotace
RE	Reverse Engineering
RP	Rapid Prototyping
TCP	Tool Center Point
TOF	Time of Flight
USB	Universal Serial Bus

Symbol	Jednotka	Popis
z	[m]	vzdálenost zdroje a objektu
v	[m.s ⁻¹]	rychlost světla
τ	[s]	doba letu paprsku
f	[mm]	ohnisková vzdálenost objektivu
F	[-]	clonové číslo
a	[mm]	zaostřená vzdálenost
c	[mm]	ohnisková vzdálenost
C	[mm]	rozptylový kroužek - povolené rozostření na senzoru
x, y	[mm]	souřadný systém snímku
x_H, y_H	[mm]	souřadnice ohniska v rovině snímku
x_P, y_P	[mm]	souřadnice bodu P promítnutého do roviny snímku
X, Y, Z	[mm]	souřadný systém objektu
X^*, Y^*, Z^*	[mm]	pomocný souřadný systém
X_O, Y_O, Z_O	[mm]	souřadnice středu promítání O
X_P, Y_P, Z_P	[mm]	souřadnice pozorovaného bodu P
X_P^*, Y_P^*, Z_P^*	[mm]	pomocné souřadnice pozorovaného bodu P
dx, dy	[mm]	zkreslení čočky

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Rozdělení 3D povrchového a objemového měření [2]	13
Obr. 1-2 Rozdělení 3D měření pomocí světelných vln [2].....	14
Obr. 1-3 Příklad laserového skenování [2].....	15
Obr. 1-4 Příklad skenování triangulačním světelným skenerem [2]	15
Obr. 1-5 Příklad skenování skenerem typu Time-of-flight [2].....	16
Obr. 1-6 Příklad skenování s využitím siluety [1].....	16
Obr. 1-7 Příklad skenování s využitím stínů [7].....	17
Obr. 1-8 Příklad skenování s využitím textury [8]	17
Obr. 1-9 Příklad skenování s využitím změny zaostření [9]	18
Obr. 1-10 Příklad skenování s využitím Moiré efektu [2].....	18
Obr. 1-11 Rapid prototyping – příklad použití [10]	20
Obr. 1-12 Inspekce s využitím dat získaných optickým skenováním [17].....	20
Obr. 1-13 Zorné pole čočky [13]	21
Obr. 1-14 Princip procesu fotogrammetrie [13]	22
Obr. 1-15 Projekce u matematického modelu kamery [9].....	23
Obr. 1-16 Svázání projekčních svazků [16]	24
Obr. 1-17 Kódované a nekódované body; vybavení systému TRITOP [17].....	25
Obr. 1-18 Fotografování měřené scény [17]	26
Obr. 1-19 Výsledky měření systémem TRITOP [17].....	26
Obr. 1-20 Porovnání dvou různých měření pomocí systému TRITOP [19]	27
Obr. 1-21 Prostředí tvorby maker [22]	28
Obr. 1-22 Velký rotační stůl ROT 640 [22]	29
Obr. 1-23 Kombinace robota s rotačním stolem [22].....	29
Obr. 4-1 Schéma metodiky řešení problému	32
Obr. 5-1 Schéma měřicí soustavy.....	34
Obr. 5-2 Robot KUKA KR 30 L16 [23].....	35
Obr. 5-3 Fotoaparát Nikon D2Xs a blesk Nikon Speedlight SB-800.....	36
Obr. 5-4 Měřený objekt - lisovaný plech.....	36
Obr. 5-5 Základová deska.....	37
Obr. 5-6 Pohledy na možná místa pro uchycení fotoaparátu	38
Obr. 5-7 Přípravek pro přichycení fotoaparátu.....	39
Obr. 5-8 Přípravek pro přichycení fotoaparátu – hotová konstrukce	39
Obr. 5-9 Hledáček fotoaparátu Nikon D2Xs [25]	40
Obr. 5-10 Určení úhlu natočení kamer u systému PONTOS [26].....	40
Obr. 5-11 Schéma funkce odměřovacích laserů.....	41
Obr. 5-12 Uchycení bočního laseru	41
Obr. 5-13 Napájecí adaptér Nikon EH-6 [24]	42
Obr. 5-14 Bateriové vložky do blesku.....	43
Obr. 5-15 Výroba krytu bateriového prostoru blesku.....	44
Obr. 5-16 Kryt bateriového prostoru; originál dole, kopie nahoře	44
Obr. 5-17 Napájení blesku - komplet	44
Obr. 5-18 Uspořádání el. pólů v laseru; vložka k napájení laseru.....	45
Obr. 5-19 Vedení kabelů po těle robota	46
Obr. 5-20 Vedení kabelů k jednotlivým komponentům.....	46
Obr. 5-21 Kabelová spoušť MC-22 [30]	47
Obr. 5-22 Bezdrátová spoušť Nikon ML-3 [30].....	48

Obr. 5-23 Bezdrátová spoušť Phottix Plato 2.4GHz [33].....	49
Obr. 5-24 FTP a PTP/IP komunikace adaptéru WT-2 [30]	50
Obr. 5-25 Ovládací prostředí software Camera Control Pro 2 [34].....	51
Obr. 5-26 KUKA Control Panel (KCP).....	55
Obr. 5-27 Režim učení robota - zvýraznění paprsků laseru	56
Obr. 5-28 Ukázka části programu Mereni.py	56
Obr. 5-29 Ukázka části programu Vypocet.py	57
Obr. 5-30 Průběh měření	58
Obr. 5-31 Krabicový graf pro celkové odchylky a odchylky měřítkových tyčí	62

10 SEZNAM TABULEK

10

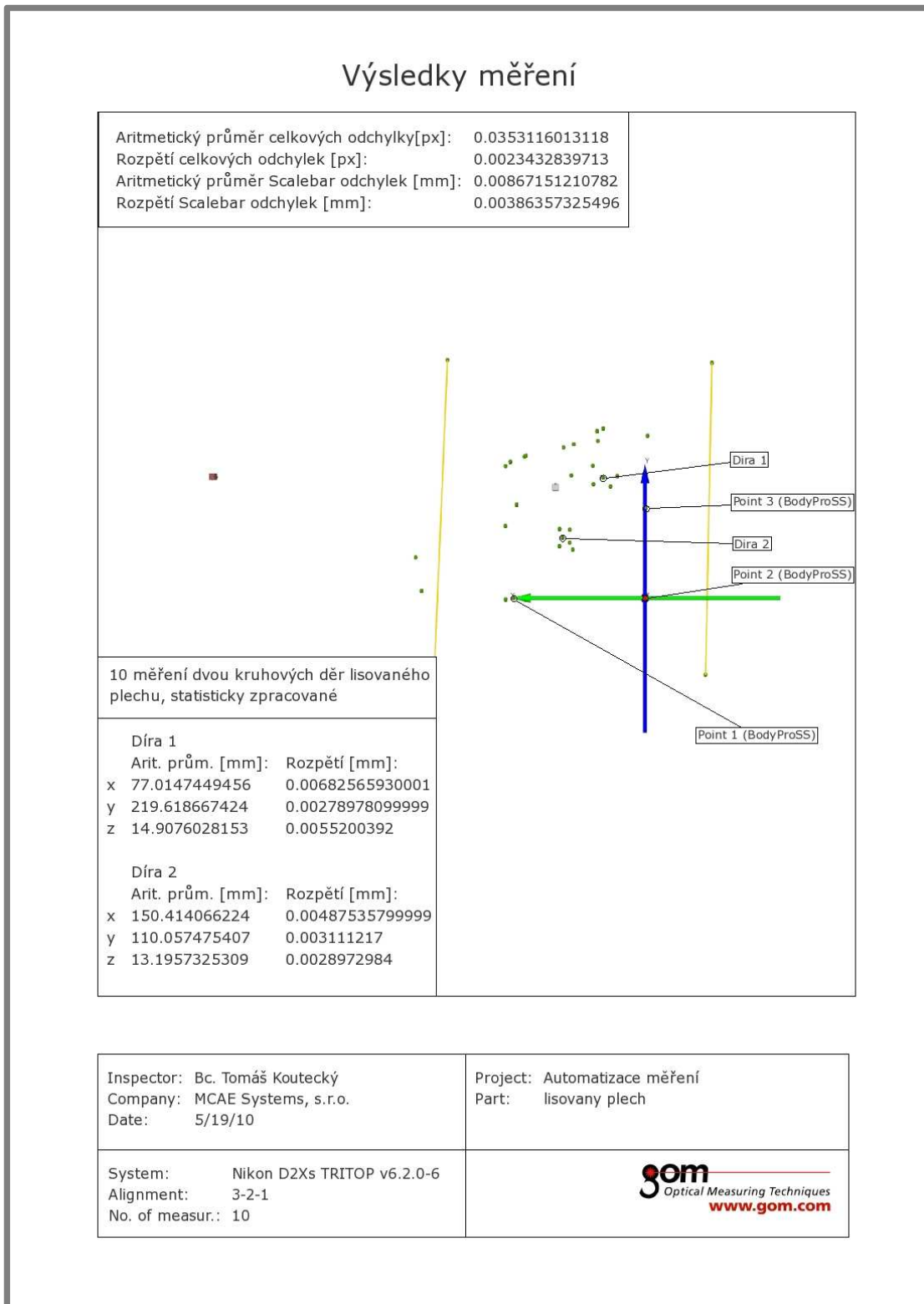
Tab. 1 Měření - odchylky60

11 SEZNAM PŘÍLOH

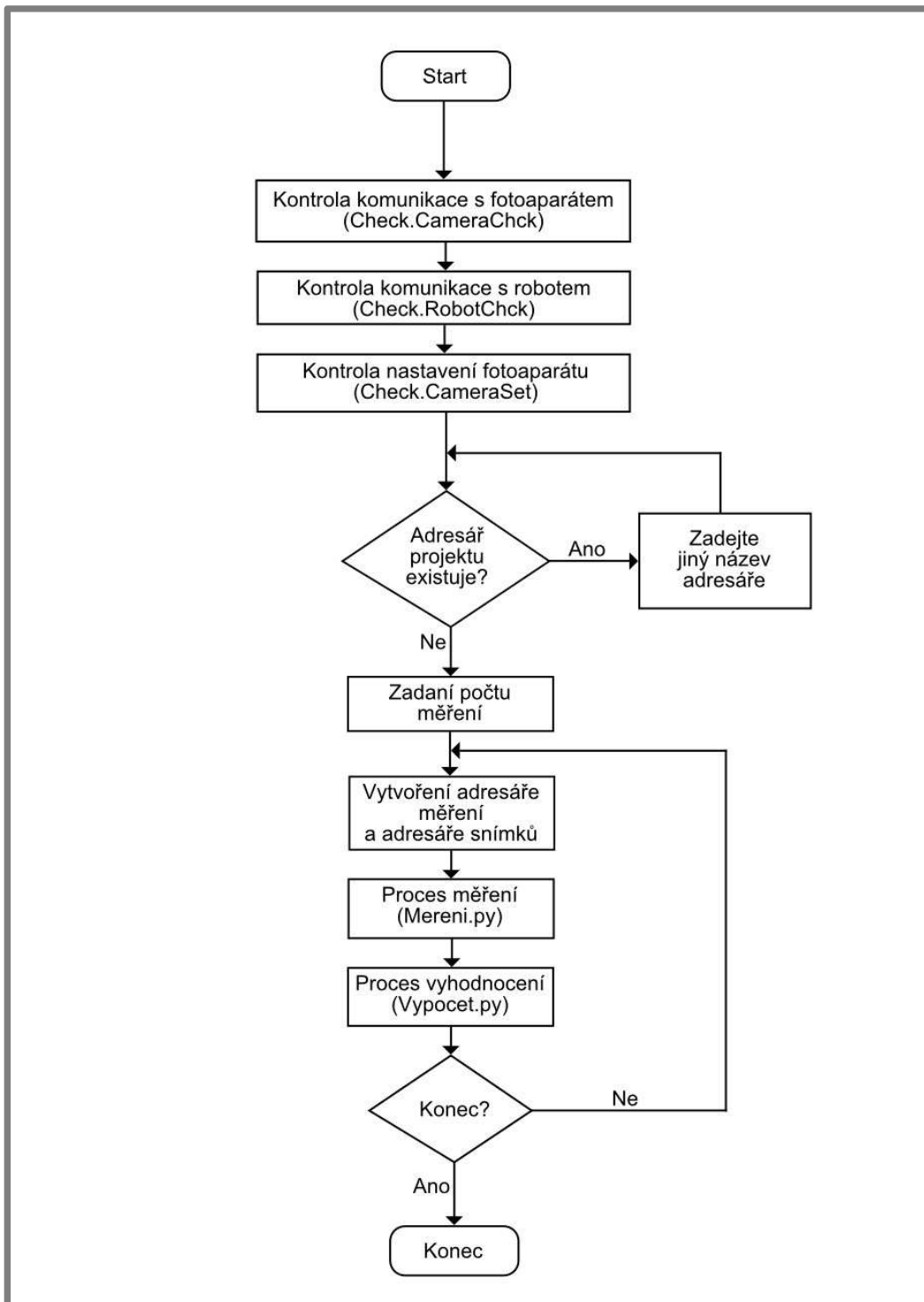
Příloha 1: Výstupní zpráva (report) z měření.	73
Příloha 2: Vývojový diagram programu Automatizace.py.....	74
Příloha 3: Vývojový diagram programu Mereni.py	75
Příloha 4: Vývojový diagram programu Vypocet.py	76
Příloha 5: Vývojový diagram programu Check.py.....	77
Příloha 6: Metody ustavení souřadného systému - přečíslováním bodů, definováním adaptéru.....	78
Příloha 7: Celkové náklady vynaložené na konstrukci přípravku pro přichycení fotoaparátu, odměřovací lasery a napájení komponent.	79
Příloha 8: Krabicové grafy pro polohu děr 1 a 2 v průběhu 10 měření vytvořené v programu STATISTICA.	80
Příloha 9: Výkres sestavy přípravku pro přichycení fotoaparátu	3-O95-01/00

Příloha 1: Výstupní zpráva (report) z měření.

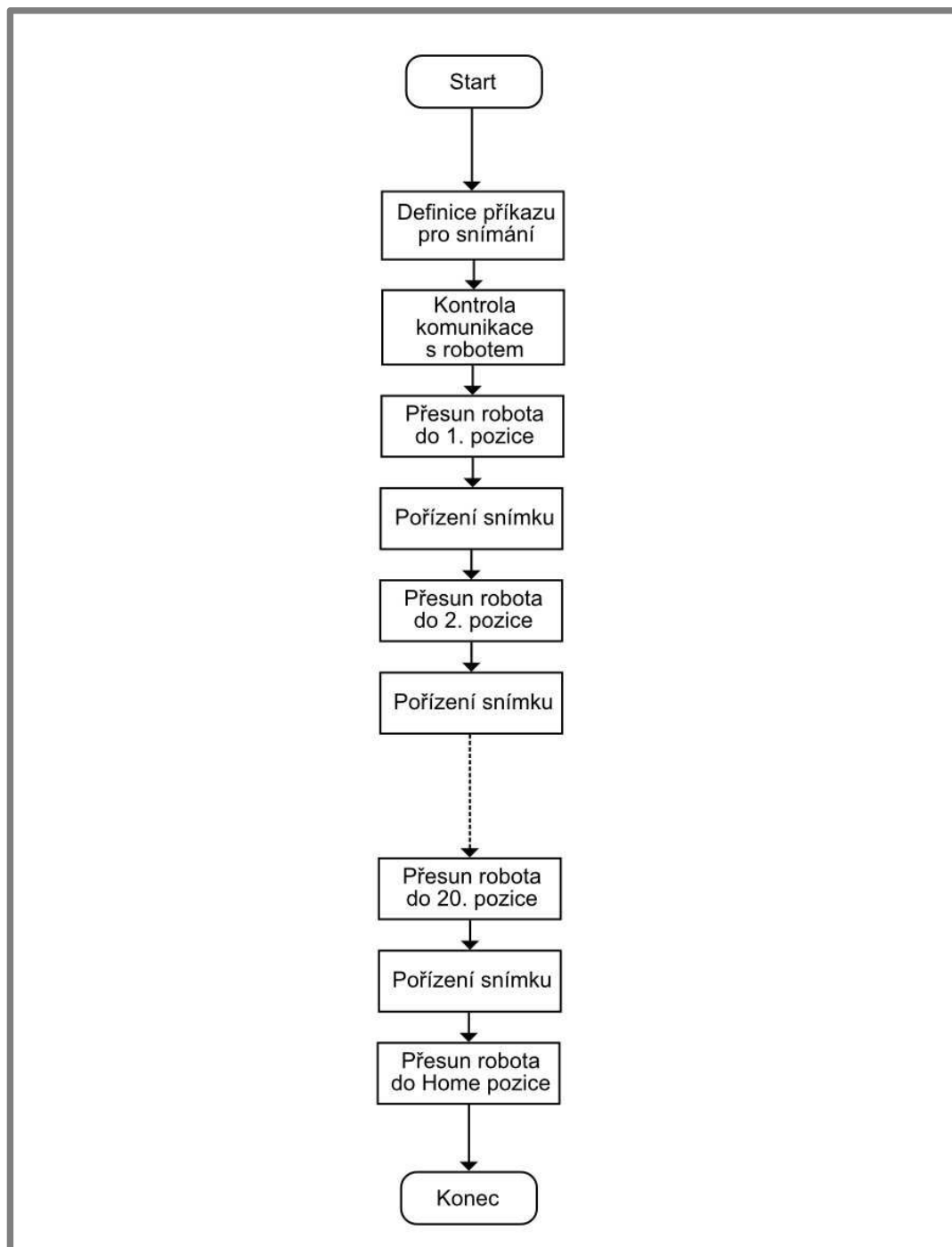
Pozn.: Výsledné hodnoty jsou statisticky zpracované pro 10 po sobě jdoucích měření.



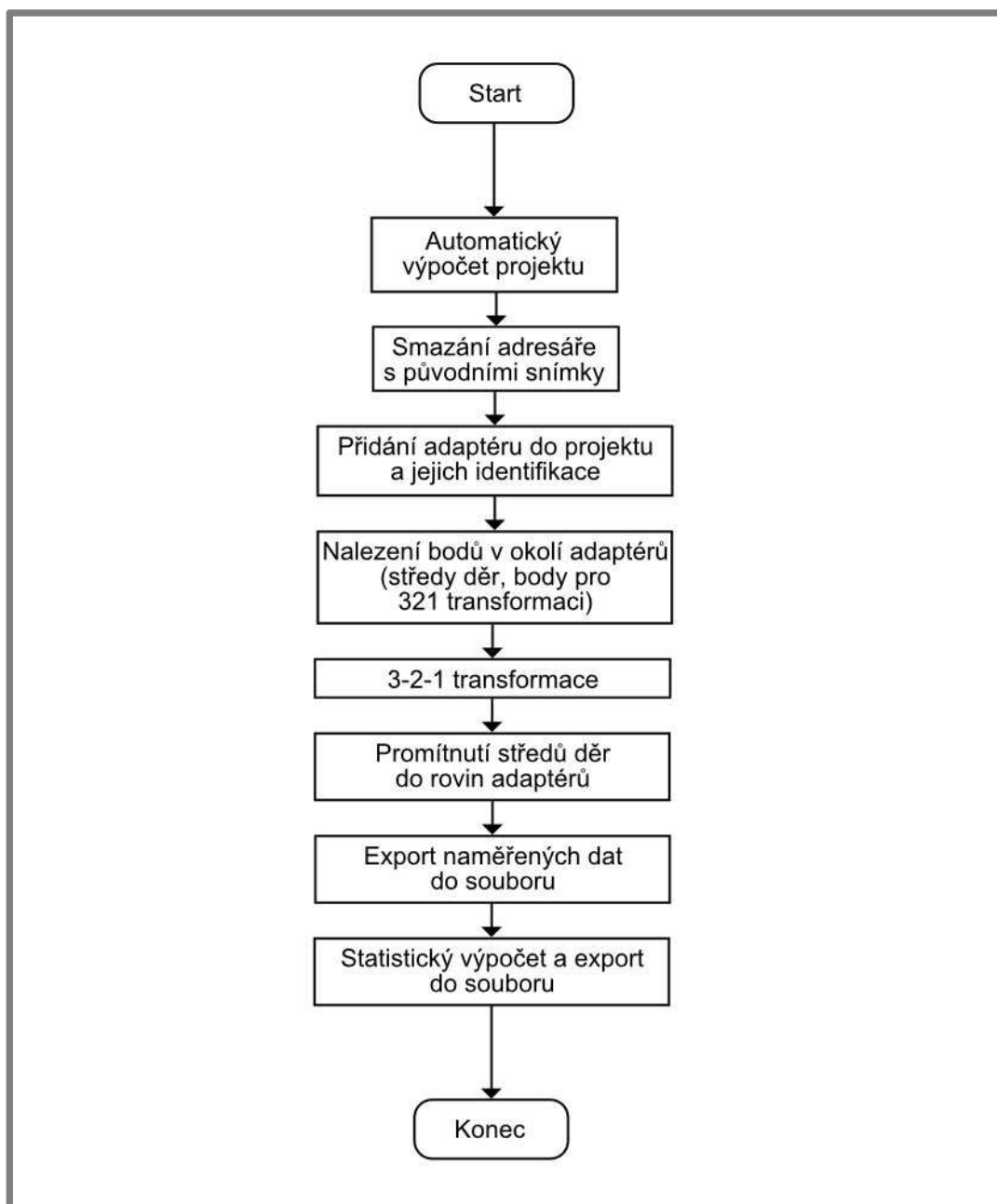
Příloha 2: Vývojový diagram programu Automatizace.py



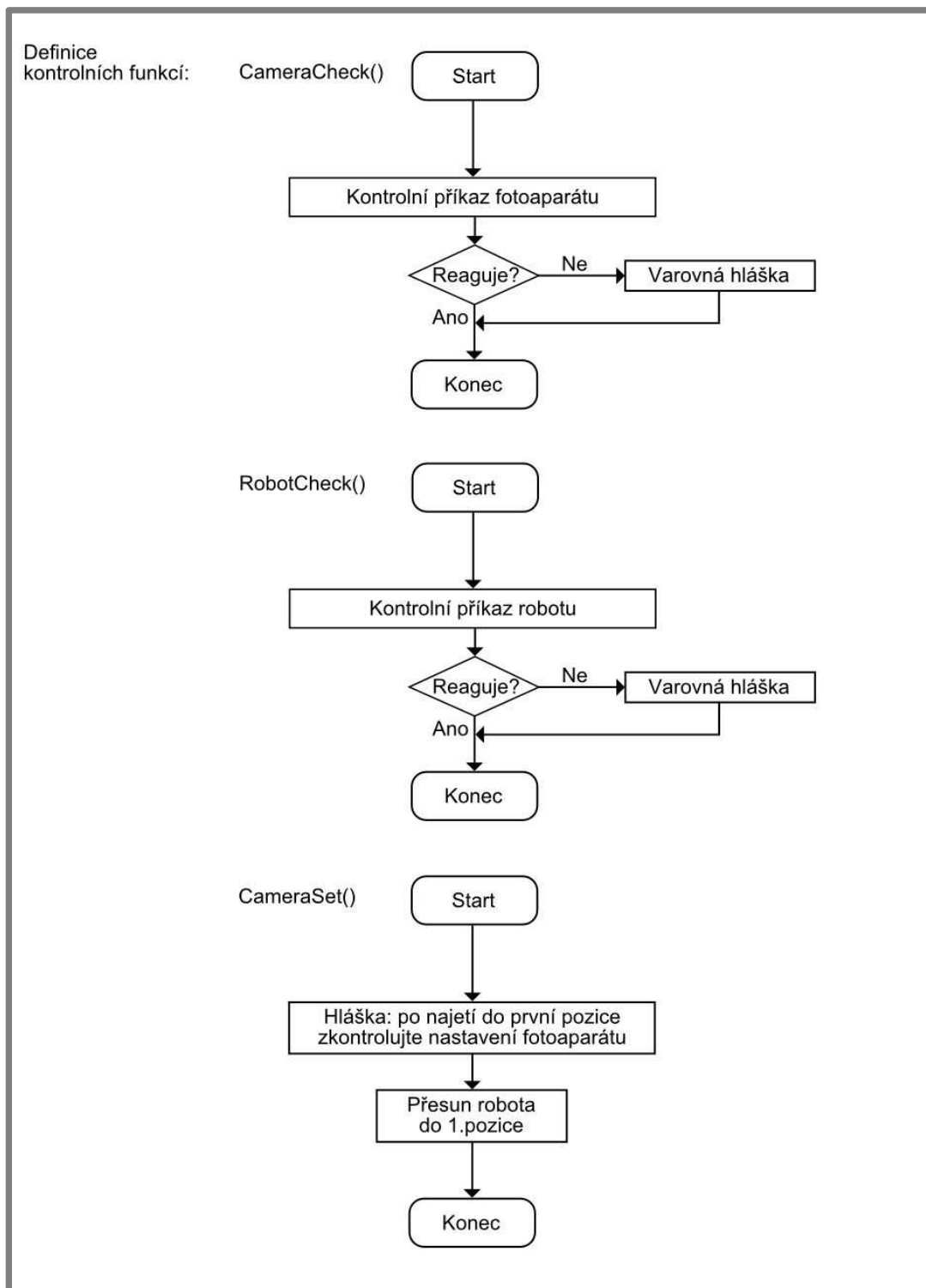
Příloha 3: Vývojový diagram programu Mereni.py



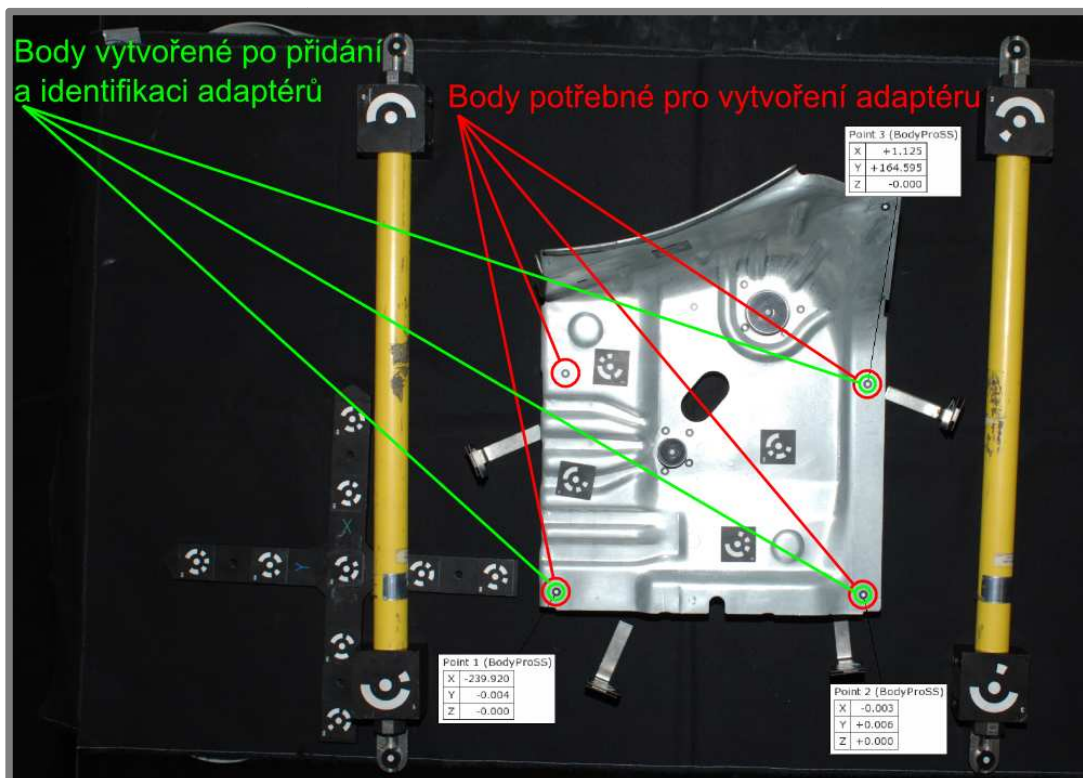
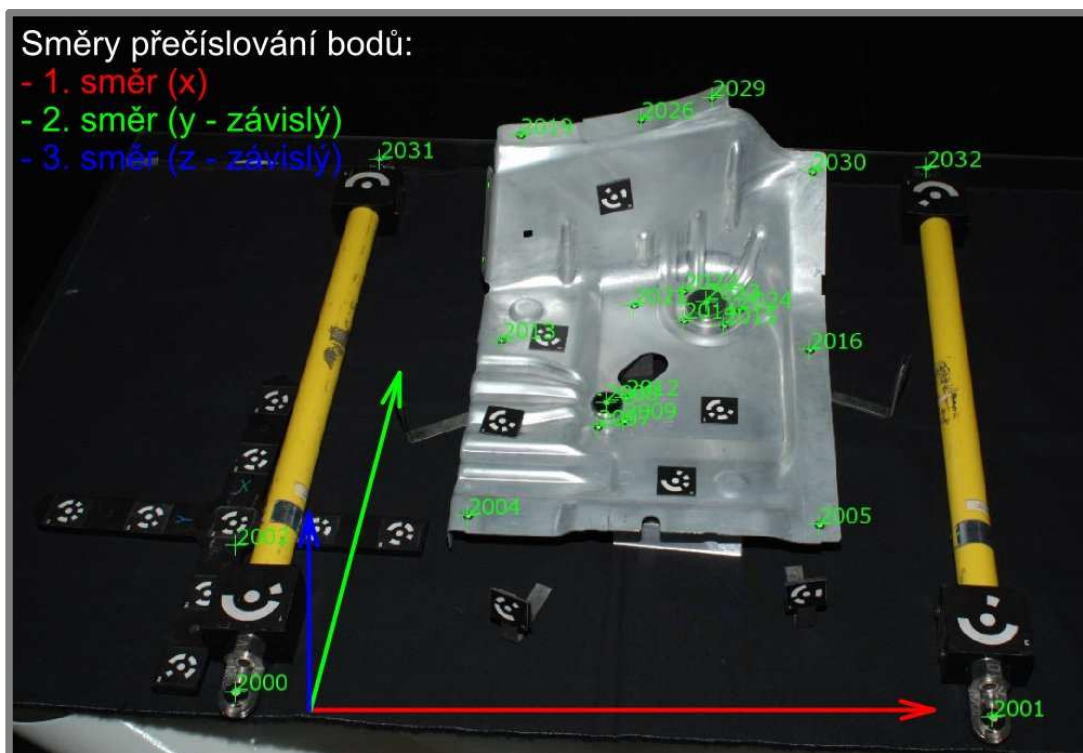
Příloha 4: Vývojový diagram programu Vypocet.py



Příloha 5: Vývojový diagram programu Check.py



Příloha 6: Metody ustavení souřadného systému - přečíslováním bodů, definováním adaptéru

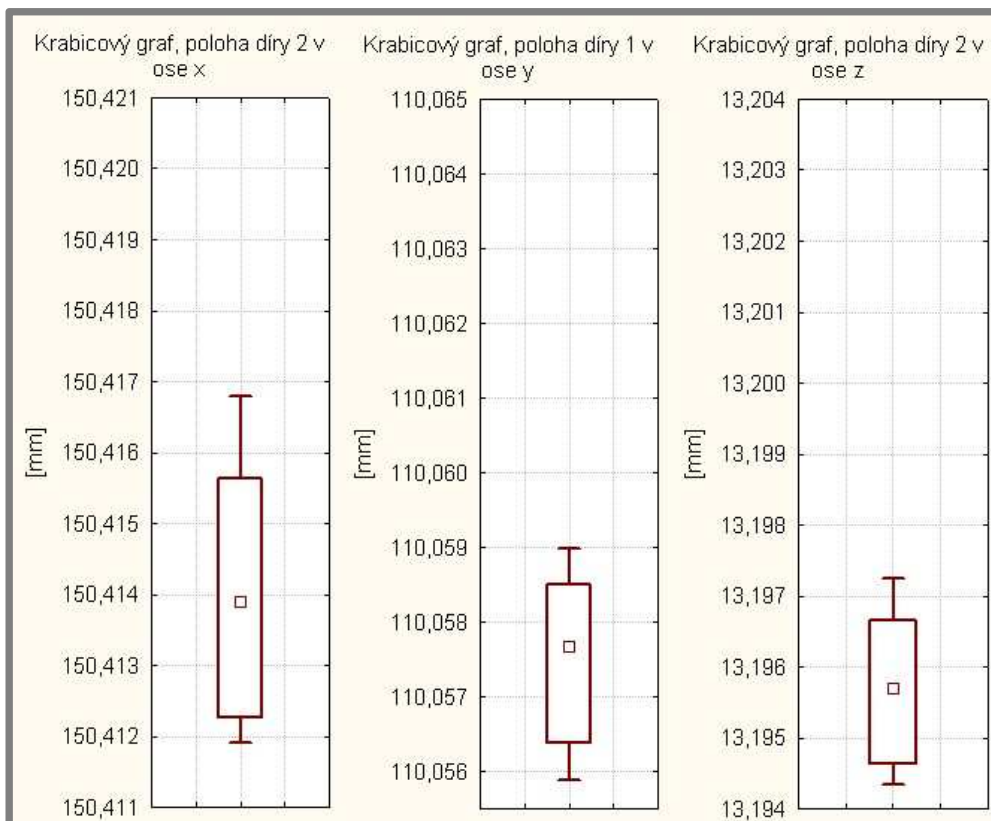
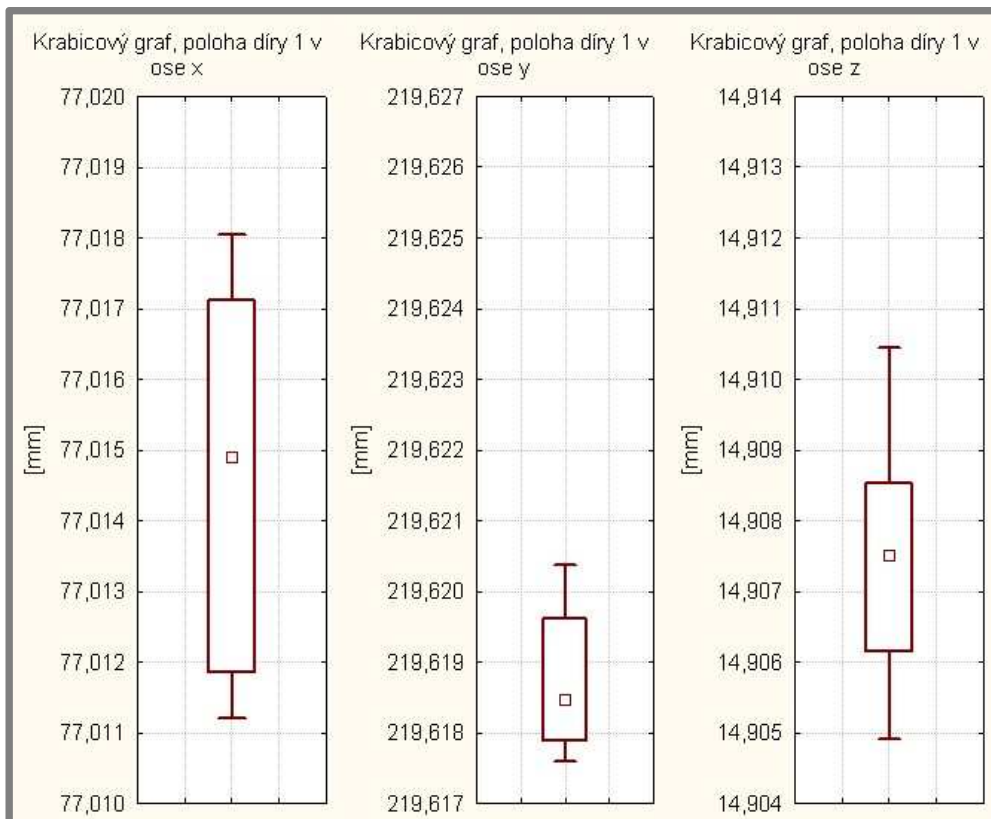


Příloha 7: Celkové náklady vynaložené na konstrukci přípravku pro přichycení fotoaparátu, odměřovací lasery a napájení komponent.

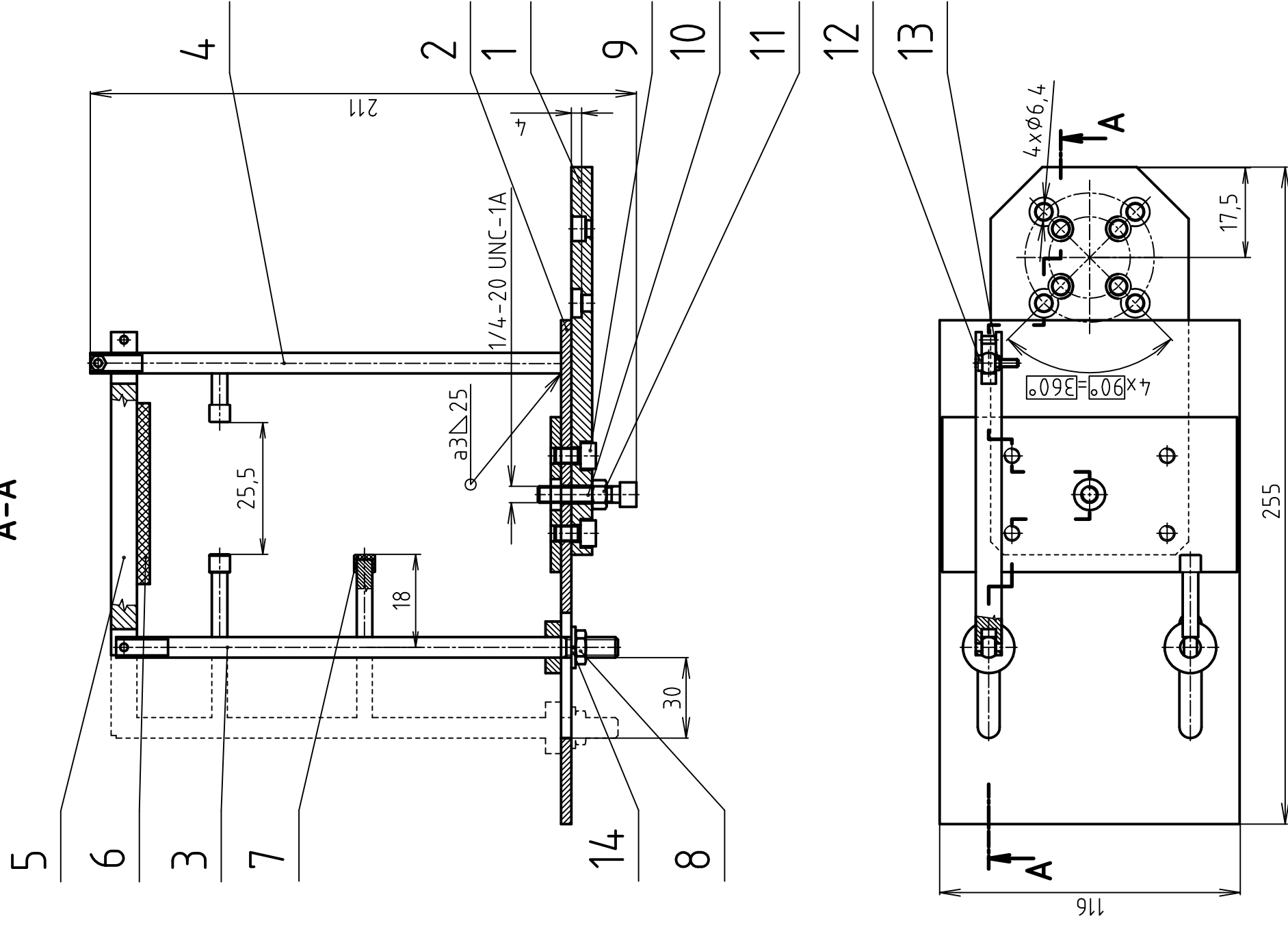
Pozn.: Do celkových nákladů nebyly započítány položky poskytnuté firmou MCAE Systems s.r.o. (např. položky vyrobené metodou FDM).

Číslo položky	Název	ks	cena/ks [Kč]	Dodavatel	Celkem [Kč]
1	Konektor 2.1x5.5mm, zdířka DC	1	9	GME	9
2	Laserové ukazovátko	3	99	GME	297
3	Napájecí adaptér 5V/2000mA	1	135	GME	135
4	Alkalická knoflíková baterie LR44 1,5 V	9	2,9	GME	26,1
5	Smršťovací bužírka 4mm	0,5	17,5	GME	8,75
6	Smršťovací bužírka 2mm	1	11,5	GME	11,5
7	Šroub M3x6 – půlkulatá hlava	8	0,5	GME	4
8	Plochá podložka pozinkovaná 4mm	6	0,2	GME	1,2
9	Konektor 2.1x5.5mm, zdířka DC	4	11	GME	44
10	Křížový samořezný šroub 2.2x6.5mm	2	0,7	GME	1,4
11	Pájecí očko M4x18 Ag	10	0,5	GME	5
12	Kabel – dvoulinka 2x0,5mm	4	6	GME	24
13	Smršťovací bužírka 3mm	3	15	GME	45
14	Zásuvka napájecí kabelová (female) prům. 2.1x5.5mm, L=9mm	4	5,5	GES	22
15	Zástrčka napájecí kabelová (male) prům. 2.1	1	25,9	GES	25,9
16	Šňůra síťová prodlužovací 250V/10A, 1 zásuvka, 5m, bílá	1	119	GES	119
17	Izolační páska 15/10-černá	1	7	Vichr	7
18	Šroub M3x10	20	0,3	železářství	6
19	Matice M3	20	0,18	železářství	3,6
20	Šroub M3x18	2	0,35	železářství	0,7
21	Podložka M3	4	0,2	železářství	0,8
22	1/4 x 1.1/4, 12.9 šroub s vnitř. Šestihr. UNC 1936	1	28,5	FABORY	28,5
23	1/4, ST.5 ZN matice UNC MB	2	2,9	FABORY	5,8
24	M7, D125-1A OC.ZN plochá podložka MB	2	0,55	FABORY	1,1
25	Přípravek pro přichycení fotoaparátu	1	450	výroba	450
Celkem					1282,35

Příloha 8: Krabicové grafy pro polohu děr 1 a 2 v průběhu 10 měření vytvořené v programu STATISTICA.



A-A



Číslo polož.	Název - označení Výkres - norma	Polotovary Materiál	Hmot. J	Množ.
1	ZÁKLADOVÁ DESKA 4-095-28/01		0,2	1
2	SPODNÍ DESKA 4-095-28/02	P4-200x120 ČSN 42 5310 11 373.1	0,7	1
3	OPĚRKA PŘEDNÍ - SVAREK 4-095-28/03		0,15	2
4	OPĚRKA ZADNÍ - SVAREK 4-095-28/04		0,1	1
5	ZÁKLOPNÁ HRAZDA - SESTAVA 4-095-28/05		0,1	1
6	OPĚRKA HORNÍ-SILIKONOVÁ 4-095-28/06		0,01	1
7	OPĚRKA BODOVÁ-SILIKONOVÁ 4-095-28/07		0,005	5
8	MATICE M8 DIN 439B/A2		0,003	2
9	ŠROUB M6x10 DIN 912/A2		0,003	4
10	ŠROUB UNC 1/4-20x1.1/4 ANSI 1936		0,004	1
11	MATICE UNC 1/4 ANSI B18.2.2		0,002	1
12	ŠROUB M3x14 DIN 7985/A2		0,002	1
13	MATICE M3 DIN 439B/A2		0,001	1
14	PODLOŽKA M8 DIN 125A/A2		0,001	2

Struktura povrchu:		Hrany: $\pm 0,3$	$\pm 0,3$	Měřítka	Přesnost ISO 2768-mH Tolerování ISO 8015 Promítání $\begin{matrix} \text{---} \\ \text{---} \end{matrix}$
Materiál		Hmotnost 1,5 kg		CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016	
Druh dokumentu		Název PŘÍPRAVEK PRO			
Kreslil		PŘÍCHYCNÍ FOTOAPARÁTU			
Schválil		Číslo dokumentu			
Datum vydání		3-095-01/00			

