

ČESKÉ
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Kybernetika a robotika

Bakalářská práce

Měření barevných broušených kamenů

Jakub Drápela

Květen 2015

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Smutný, Ph.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Jakub Drápeš
Studijní program: Kybernetika a robotika (bakalářský)
Obor: Robotika
Název tématu: Měření barevných broušených kamenů

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s optickými vlastnostmi broušených kamenů.
2. Prostudujte literaturu na dané téma.
3. Navrhněte a postavte experimentální zařízení pro měření intenzity a směru šíření rovnoběžných světelných svazků broušeným kamenem.
4. Navrhněte a implementujte základní sadu programů pro vyhodnocení experimentálních dat
5. Provedte experimenty s reálnými kameny, výsledky zpracujte a vyhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

- [1] Reinitz, I. M., M. L. Johnson, T. S. Hemphill, A. M. Gilbertson, R. H. Geurts, B. D. Green, and J. E. Shigley (2001). Modelling the appearance of the round brilliant cut: An analysis of fire and more about brilliance. *Gems&Gemology* 37(3). Ed. by G. I. of America, 174-197. ISSN:0016-626X.
- [2] Sasian, J., J. Caudill, and P. Yantzer (2008). "Methods apparatus, and systems for valuating gemstones". US Patent 7,372,552. <https://www.google.com/patents/US7372552>.
- [3] Pohl, P. (2002). "Simulace průletu paprsků transparentním objektem". Supervisor: Vladimír Smutný. Prague, Czech Republic: Czech Technical University in Prague.
- [4] Bodlák, I. (2005). "Modelování a analýza broušeného kamene". Supervisor: Vladimír Smutný. Prague, Czech Republic: Czech Technical University in Prague.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vladimír Smutný

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

doc. Dr. Ing. Jan Kybic
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 20. 1. 2015



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Podpis autora práce



Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat za podporu při tvorbě této bakalářské práce. Poděkování patří především mému vedoucímu Ing. Vladimíru Smutnému, Ph.D. za poskytnuté konzultace, vstřícnost, ochotu a trpělivost.

Dále bych rád poděkovat rodině za podporu během studia. Nemalé díky patří také přátelům za silnou morální podporu a rady, které mi pomohly tuto práci realizovat.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a kalibrací soustavy pro měření šíření laserového svazku šperkařskými kameny. Zkalibrovaná soustava bude použita k porovnání naměřených výsledků z měřeného kamene s jeho matematickým modelem. Porovnáním lze zjistit tvar kamene a kvalitu brusů, čehož se využívá např. pro určení ceny kamene nebo k seřizování brusných kotoučů při výrobě.

Úkolem kalibrace navržené měřicí soustavy je nalezení správné transformace mezi pixely z pořízeného snímku a úhlem, pod kterým světelný paprsek opustil broušený šperk. Kalibrace probíhá postupně v několika krocích. Prvním krokem je nalezení projekční matice a radiálního zkreslení kamery. V dalším kroku s pomocí stereo-rekonstrukce hledáme parametry stínítka a nakonec optimalizujeme parametry laserového svazku. Pro optimalizaci použijeme nelineární metody minimalizace.

Klíčová slova: kalibrace kamery, korespondence obrazů, triangulační metoda, optimalizace parametrů

Abstract

This thesis describes the design and calibration of system for measuring the spread of the laser beam in the cut gemstone. Calibrated system will be used to compare results measured on the stone with its mathematical model. We can determine the shape and quality of the cut stone by comparing which is used e.g. to determine stone price or to adjust grinding wheel in the production.

The task of calibration is to find the correct transformation between the pixels in captured image and the direction of the light beam leaves the cut jewel. Calibration is carried out in several steps. The first step is to find the projection matrix and the radial distortion of the cameras. In the next step, we use stereo-reconstruction to find parameters of shade and then we optimize the parameters of the laser beam. We use nonlinear minimization methods to optimize.

Keywords: camera calibration, image correspondence, triangulation method, parameter optimization

Obsah

1	Úvod a motivace	1
2	Měřicí soustava a její matematický model	3
2.1	Popis soustavy	3
2.2	Model laseru	4
2.3	Model stínítka	4
2.4	Model kamery	5
2.4.1	Radiální zkreslení	6
2.5	Kalibrační obrazec	7
2.6	Kalibrační stolek	8
2.6.1	Parametrizace kalibračního stolku	9
2.6.2	Epipolární geometrie	11
2.6.3	Korespondence	11
2.7	Triangulační metoda	12
2.8	Stanovení parametrů stínítka	13
2.9	Intenzita laserové stopy	13
2.9.1	Jas stopy	13
2.9.2	HDR snímek	13
3	Kalibrace	14
3.1	Kalibrace kamery	14
3.2	Model stínítka	15
3.2.1	Určení stop v obraze	15
3.2.2	Korespondence obrazů	15
3.2.3	Triangulace	16
3.2.4	Odhad parametrů polokoule	16
3.3	Kalibrace azimutu a elevace	17
3.3.1	Odhad parametrů laseru a kalibračního stolku	17
3.3.2	Výpočet azimutu a elevace	17
3.4	Radiometrická kalibrace	18
4	Experimenty	19
4.1	Geometrická kalibrace	19
4.1.1	Použité součástky a jejich nastavení	19
4.1.2	Kalibrace kamery	23
4.1.3	Parametry stínítka	25
4.1.4	Korespondence obrazů	25
4.1.5	Triangulace	27
4.1.6	Odhad parametrů stínítka	27

4.1.7	Měření s kalibračním stolkem	30
4.1.8	Odhad parametrů kalibračního stolku a laseru . . .	31
4.2	Experimenty na reálných kamenech	33
5	Závěr	36
	Obsah přiloženého DVD	38

Seznam obrázků

1	Schéma měřicího zařízení pro průchod paprsku broušeným kamenem	2
2	Schéma matematického modelu laserového svazku	4
3	Schéma matematického modelu stínítka	4
4	Schéma matematického modelu kamery	5
5	Geometrická zkresení objektivů	6
6	Srovnání kalibračních obrazců	7
7	Schéma kalibrace kamery pomocí kalibračního obrazce	7
8	Ukázka kalibračního stolku	8
9	Technické informace elevačního goniometru kalibračního stolku	8
10	Model kalibračního stolku	10
11	Epipolární geometrie - pohled dvou kamer	11
12	Série snímků obrazce při kalibraci kamery	14
13	Umístění kalibračního obrazce a kalibračního stolku v měřicí soustavě	20
14	Umístění laseru, stínítka a kamery v měřicí soustavě	21
15	Experimentální zařízení	22
16	Mezivýsledky kalibrace kamery	23
17	Detekce vzoru obrazce u kalibrace kamery	24
18	Porovnání matematického modelu kamery s detekovanými body	25
19	Snímky stínítka z dvou pohledů kamer	26
20	Hledání korespondujících bodů z pohledů dvou kamer	26
21	Výsledek triangulační metody	27
22	Vývoj odhadu parametrů stínítka v 3D grafu	28
23	Vzdálenost bodů z triangulace od plochy stínítka	29
24	Vývoj odhadu parametrů polokoule s iteracemi	29
25	Kalibrace pomocí kalibračního stolku	30
26	Spojení laserových stop z kalibračních pozic stolku	31
27	Absolutní korelace odhadovaných parametrů	31
28	Závislost úhlových parametrů osy azimutu a osy laseru	32
29	Porovnání matematického modelu systému s detekovanými body	33
30	Barevné broušené kameny použité k experimentům	34
31	Výsledky zkoumaných kamenů - Deep Tanzanite a Hyacinth	35

Seznam tabulek

1	Počáteční a konečný odhad parametrů stínítka	30
2	Počáteční a konečný odhad úhlových parametrů laseru a kalibračního stolku	33
3	Počáteční a konečný odhad délkových parametrů laseru a kalibračního stolku	33
4	Barevné kameny použité k experimentům	34

Kapitola 1

Úvod a motivace

Broušené kameny nalézají své využití v oblasti šperkařství. S postupem času byly vyvinuty tvary kamenů s definovanou velikostí a sklonem jednotlivých fazet. Ideální tvary kamene nechávají vyniknout jeho záři, ohni a jiskření.

Broušení kamenů se provádí vodorovnými brusnými kotouči. Proces broušení kamene vyžaduje vysokou přesnost. Jen nepatrná odchylka sklonu nebo velikosti fazety od ideálního tvaru výrobku znamená zhoršení optických vlastností broušeného kamene. Proto je sklon fazet důležitým parametrem pro zhodnocení kvality brusu.

Optické vlastnosti kamene můžeme pozorovat při jeho nasvícení. Dopadající svazek světla se v kameni mnohonásobně odráží a láme, dokud kámen neopustí. Geometrie světelných svazků opouštějících kámen je pak podpisem každého kamene. Hodnocení výstupních světelných svazků je tedy přístup, kterým lze určit tvar kamene.

Znalost tvaru kamene, potažmo sklonu jednotlivých fazet, je důležitá např. při seřizování výroby nebo pro určení peněžní hodnoty broušeného kamene.

Centrum strojového vnímání na katedře kybernetiky Elektrotechnické fakulty ČVUT se dlouhodobě zabývá analýzou průchodu rovnoběžného paprsku světla broušeným kamenem.

Diplomová práce Petra Pohla [8] zavádí pro broušené kameny ideálních tvarů geometrický model se zohledněním jeho fyzikálních vlastností. Na počítačový model v simulaci dopadá svazek rovnoběžných paprsků světla, který se podle implementovaných matematických vzorců v kameni opakovaně odráží a láme. Svazky po vylomení z kamene nebo přímého odrazu mají definovaný směr, intenzitu a plochu. Směr svazků je vyjádřen v polárních souřadnicích jako elevace a azimut.

Na přístup Petra Pohla navázal Igor Bodlák. Ve své práci [3] řešil inverzní problém, tedy možnost porovnat výsledky výstupních svazků z počítačové simulace s reálným experimentem. Schéma experimentálního zařízení bylo stejné, jako na obr. 1. Zdrojem rovnoběžného svazku světla byl laser. Laserový svazek dopadal na broušený kámen a svazky vystupující z kamene byly zachyceny na půlkulovém stínítku. Scénu stínítka se snímala kamerou.

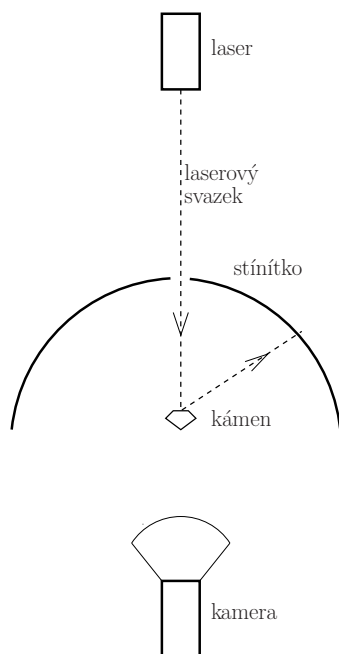
V obraze kamery se detekovaly laserové stopy a jejich pozice se převedla do azimutu a elevace. Následně se pomocí vhodným optimalizačních metod hledal matematický model kamene, jehož výsledky simulace co nejlépe odpovídaly naměřenému výsledku. Přitom se vycházelo z předpokladů:

- Kámen je umístěn ve středu koule určené tvarem půlkulového stínítka. Parametry koule se odhadovaly.
- Laserový svazek světla dopadá kolmo na tabulku kamene.

1.0 ÚVOD A MOTIVACE

Příspěvkem této práce je návrh a kalibrace zařízení pro měření parametrů na reálném kameni s cílem získat přesnější výsledky. Po sestavení měřicí soustavy zavádíme její matematický model. Poté provádíme kalibraci kamery, při níž odhadujeme její vnitřní a vnější parametry. Polohu stínítka zjistíme stereo-rekonstrukcí a následně optimalizujeme parametry laseru. Výstupem programu je seznam naměřených azimutů a elevací jednotlivých laserových stop zachycených v obraze kamery.

Součástí práce je detekce laserových stop v obraze, určení jejich intenzit a vyhodnocení naměřených výsledků.



Obrázek 1: Schéma měřicího zařízení - laserový svazek dopadá na kámen, kde se odráží a láme. Výstupní paprsky zachytí stínítko. Scénu půlkulového stínítka snímá kamera.

Kapitola 2

Měřicí soustava a její matematický model

2.1 Popis soustavy

Zdrojem světelného svazku je laser umístěný v horní části měřicí soustavy. Polohu laseru lze nastavovat v horizontální rovině posuvnými stolky. Nastavení polohy laseru provedeme na počátku experimentu. Po počátečním nastavení zůstává poloha laseru neměnná.

Svazek světla vystupující z laseru dopadá na kámen. Broušený kámen dopadající svazek opakovaně láme a odráží do okolí. Kámen pokládáme na podstavec válcovitého tvaru. Podstavec podpírá skleněná tabule uchycená v drážkách kovových profilů. Připevnění podstavce není třeba. Důležité je, aby světelný svazek dopadal na měřený kámen, neprocházel dál měřicí soustavou a nevstupoval do kamery.

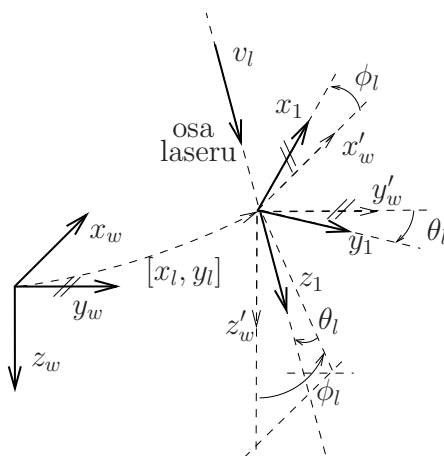
Výstupní laserové svazky opouštějící kámen v horním poloprostoru dopadají na půlkulové stínítko. Stejně jako v případě podstavce pro kámen je i stínítko uloženo na skleněné tabuli. Se stínítkem se často manipuluje. Opakovatelnost jeho založení zajišťují mechanické dorazy.

Laserové stopy promítnuté na plochu stínítka snímá kamera umístěná pod stínítkem. Počáteční pozice kamery se nachází přibližně v ose laserového svazku. S kamerou můžeme vykonávat odměřovaný vertikální a horizontální posun.

Měřicí soustava je jako celek přichycena na optickém stole. Schéma měřicí soustavy je na obr. 1 a v okótované verzi na obr. 14.

2.2 Model laseru

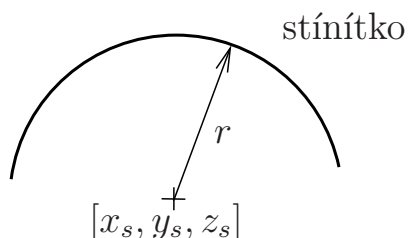
Laserový svazek pokládáme za rovnoběžný svazek paprsků eliptického tvaru. V matematickém vyjádření jej popisujeme jako přímku v prostoru se čtyřmi stupni volnosti. Tuto přímku procházející středem eliptické stopy laseru nazýváme osou laseru. Za parametry určující jednoznačnou polohu osy volíme x_L, y_L (souřadnice průsečíku osy laseru z rovinou $z_w = 0$ světového souřadného systému) a ϕ_L, θ_L (ϕ_L reprezentuje natočení osy laseru od osy z'_w okolo osy y'_w a θ_L následné otočení okolo osy x_1). Model laseru je nakreslen na obr. 2.



Obrázek 2: Modelu laserového svazku - bod $[x_L, y_L]$ v rovině xy , rotace okolo osy y o úhlu ϕ_L a následná rotace okolo osy x . v_l znázorňuje vektor laserového svazku.

2.3 Model stínítka

Při hledání vhodného matematického popisu ztotožníme plochu stínítka s plochou koule o čtyřech stupních volnosti. Parametry popisující polohu koule jsou souřadnice středu koule x_s, y_s a z_s ve světovém souřadném systému $x_w y_w z_w$ a poloměr r .



Obrázek 3: Model stínítka - kulová výseč se středem v bodě $[x_s, y_s, z_s]$ a poloměrem r

2.4 Model kamery

Hledáme matematický model kamery, který každému bodu scény se souřadnicemi \mathbf{X} přiřadí souřadnici \mathbf{x} v rovině promítání. Vycházíme z modelu dírkové (pinhole) kamery. S tímto modelem středového promítání můžeme odhadovat vnitřní a vnější parametry kamery.

Na schématu 4 lze popsat vnitřní parametry kamery podle [9]. Zavádíme souřadný systém kamery $x_c y_c z_c$ se středem promítání C . Osa z_c je kolmá k průmětně.

Rovina průmětny má svůj souřadný systém uv . Bázové vektory uv svírají úhel θ . Bod $[u_0 v_0]$ určuje průnik roviny promítání a osy z_c . Parametry a (poměr hran pixelu) a θ (úhel mezi bázovými vektory uv) reprezentují deformaci pixelů od ideálního čtvercového tvaru. Ohnisková vzdálenost f značí vzdálenost středu promítání od roviny průmětny.

Parametry kamery lze popsat pomocí matice kamery \mathbf{K} o velikosti 3×3 .

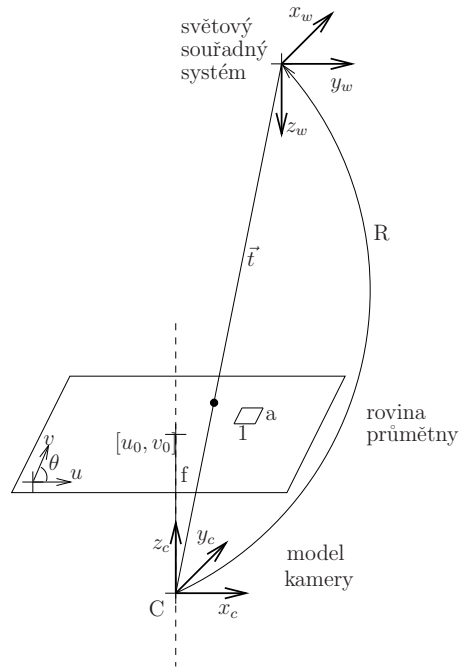
$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & -f \cos \theta & u_0 \\ 0 & f / (a \sin \theta) & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Díky vysoké kvalitě technologie výroby pixelů si můžeme model zjednodušit. Vyráběné snímací čipy jsou tak přesné, že pixely lze považovat, pro naše účely za čtvercové neboli $\theta = 90^\circ$, $a = 1$. Po zjednodušení máme tři vnitřní parametry kamery: f, u_0, v_0 .

Mějme souřadný systém scény $x_w y_w z_w$. Transformaci ze souřadného systému kamery do souřadného systému scény popisují rotační matice \mathbf{R} a translace \vec{t} . Matice rotace \mathbf{R} má tři stupně volnosti. Stejný počet stupňů volnosti má i translační vektor \vec{t} . Vnějších parametrů máme celkem šest.

Všech devět parametrů popisuje projekční (projektivní) matice kamery \mathbf{P}

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix}. \quad (2)$$



Obrázek 4: Model kamery - scénu ve světovém souřadném systému $x_w y_w z_w$ snímáme kamerou se středem promítání v bodě C . Obraz se zobrazuje v rovině průmětny.

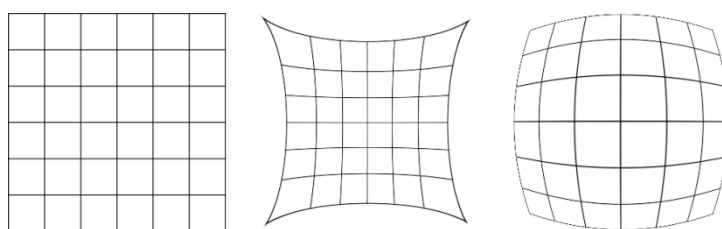
Lineární matematický model kamery můžeme definovat jako:

$$\lambda \mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{X}, \quad (3)$$

neboli vektor $\mathbf{P}\mathbf{X}$ odpovídá λ -násobku souřadnic v rovině promítání, kam se promítne bod z prostoru \mathbf{X} . Jinými slovy λ určuje, kde na přímce určené bodem \mathbf{x} a středem promítání se nachází bod \mathbf{X} .

■ 2.4.1 Radiální zkreslení

Protože skutečné promítání scény optickou soustavou se liší od ideálního lineárního modelu dírkové kamery, zavádíme radiální zkreslení podle [5].



Obrázek 5: Geometrická zkreslení objektivů - zleva je nakreslen geometricky nezkraslený obraz. Vedle něj negativní radiální zkreslení *poduškovitost* (*pincushion*) a vpravo pozitivní radiální zkreslení *soudkovitost* (*barrel*). Převzato z [2].

U širokoúhlých objektivů se velkou měrou projevuje právě pozitivní radiální zkreslení (na obrázku 5 vpravo). Toto zkreslení již nelze popsat lineární transformací. Jako řešení se využívá aproximační polynom sudého stupně $P(r)$. Sudý stupeň polynomu vyplývá ze středové symetrie zkreslení. r značí radiální vzdálenost bodů zatížených radiálním zkreslením $[u_d, v_d]$ od středu radiálního zkreslení $[u_0, v_0]$:

$$r = \sqrt{(u_d - u_0)^2 + (v_d - v_0)^2}, \quad (4)$$

$$P(r) = 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6. \quad (5)$$

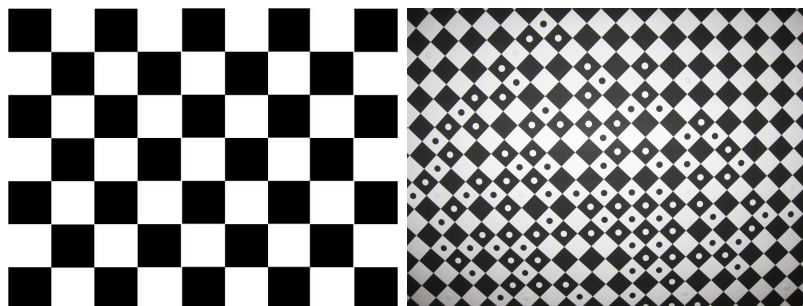
Koeficienty radiálního zkreslení k_1, k_2 a k_3 jsou hledanými parametry při procesu kalibrace kamery. Nalezení odzkreslených bodů $[u_n, v_n]$ vyjádříme vztahem:

$$u_n = u_0 + P(r)(u_d - u_0), \quad (6)$$

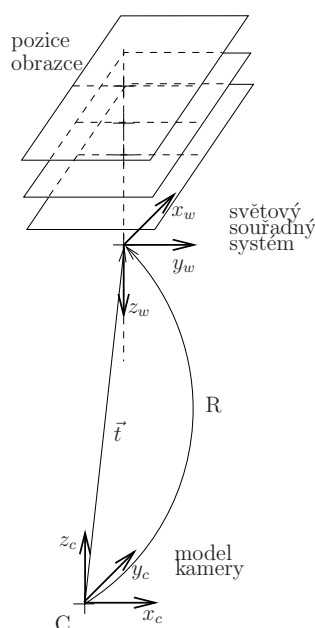
$$v_n = v_0 + P(r)(v_d - v_0). \quad (7)$$

2.5 Kalibrační obrazec

Kalibrační obrazec používáme k zjištění parametrů matematického modelu kamery. Obrazec má pro naše účely speciální vzor a je učen pro kalibraci na laboratorních zařízeních. Vzor obsahuje prvky pro přesné nalezení kalibračních bodů a prvky pro jejich jednoznačnou identifikaci.



Obrázek 6: Srovnání kalibračních obrazců - vlevo klasický obrazec (převzat z [6]) a vpravo námi používaný obrazec pro laboratorní účely (převzat z [10]).



Obrázek 7: Schéma kalibrace pomocí obrazce - obrazec nastavujeme do známých pozic v souřadném systému $x_w y_w z_w$. Scénu snímáme s kamerou se středem promítání v bodě C . Matice \mathbf{R} a vektor \vec{t} vyjadřují transformaci bázových vektorů.

Proces kalibrace kamery využívá vlastností kalibračního obrazce. Rohy čtverců v obraze lze nalézt s vysokou přesností a zjistit tak promítnuté body z roviny obrazce. Černé a bílé kruhy slouží k jednoznačné identifikaci jednotlivých rohů čtverců.

Celý obrazec lze posouvat posuvným stolem v ose z o známé úseky.

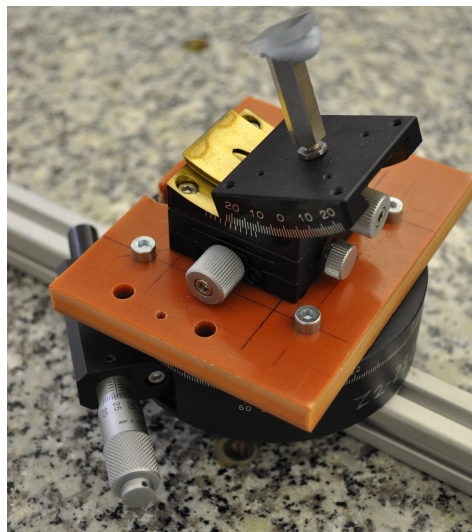
Polohy rohů čtverců v různých polohách obrazce jsou body v prostoru se známými souřadnicemi používaných při kalibraci kamery.

Použitím kalibračního obrazce zavádíme nový souřadný systém ve scéně. Nový souřadný systém ztotožníme se světovým souřadným systémem $x_w y_w z_w$. Stejně jako na obrázku 7.

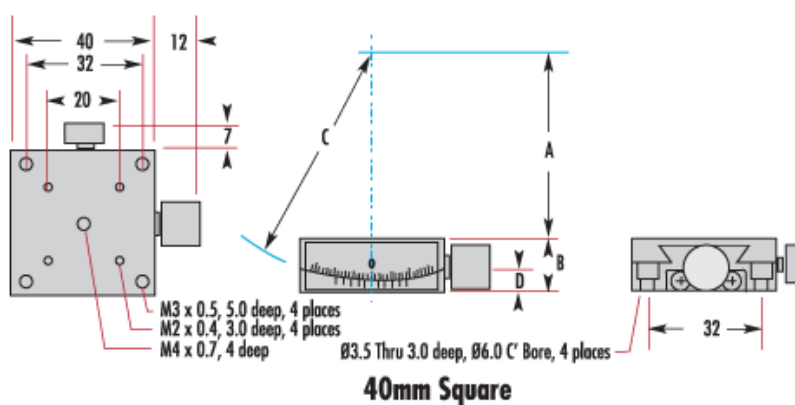
2.6 Kalibrační stolec

Kalibrační stolec využíváme k odhadu parametrů laserového paprsku. Stolec je sestaven z několika komponent. Komponenty umožňují rotaci kolem osy azimutu a osy elevace. Třetí osu kalibračního stolku nebudeme používat. Zrcátko je umístěno co nejblíže průsečíku osy elevace a azimutu. Laser dopadá na zrcátko a odráží se na stínítko.

Otáčení kolem osy azimutu zajišťuje 360° goniometr umístěný ve spodní části stolečku. Díky dvojici goniometrů nad plastovou propojkou dokážeme natáčet stolec ve dvou osách kolem fixního bodu. Elevaci nastavujeme horním goniometrem. Technické informace horního goniometru jsou v obrázku 9.



Obrázek 8: Kalibrační stolec - dole 360° goniometr, nad ním plastová destička pro montáž dvou goniometrů s vodorovnou osou otáčení. Zrcátko je umístěno co nejblíže osy otáčení.



Obrázek 9: Technické informace horního goniometru - rozměry: A = 35mm, B = 16mm, C = 47mm, rozsah - 40°. Převzato z [1].

■ 2.6.1 Parametrizace kalibračního stolku

Cílem parametrizace kalibračního stolku je určení polohy odrazového zrcátka pomocí zadaných parametrů.

Na začátku parametrizace určujeme model stolku. Přitom vycházíme z dohledatelných technických dat (např. goniometru na obr. 9) a z dat, které odměříme posuvným měřítkem.

Na zrcátku zavádíme souřadný systém $x_m y_m z_m$. Bázový vektor z_m ztotožníme s normálovým vektorem roviny zrcátka. Kalibrační stolec modelujeme jako otevřený kinematický řetězec. Transformaci mezi světovým souřadným systémem a souřadným systémem zrcátka můžeme vyjádřit jako postupné rotace a posuny souřadného systému.

Ve vzniklém modelu (obr. 10) určujeme parametry k optimalizaci a ty parametry, jejichž hodnotu zafixujeme. Často nelze říct, která parametrizace je nejlepší. Při volbě parametrů musíme dbát na to, aby nepřesně fixované parametry velkou měrou negativně neovlivnily výsledek kalibrace.

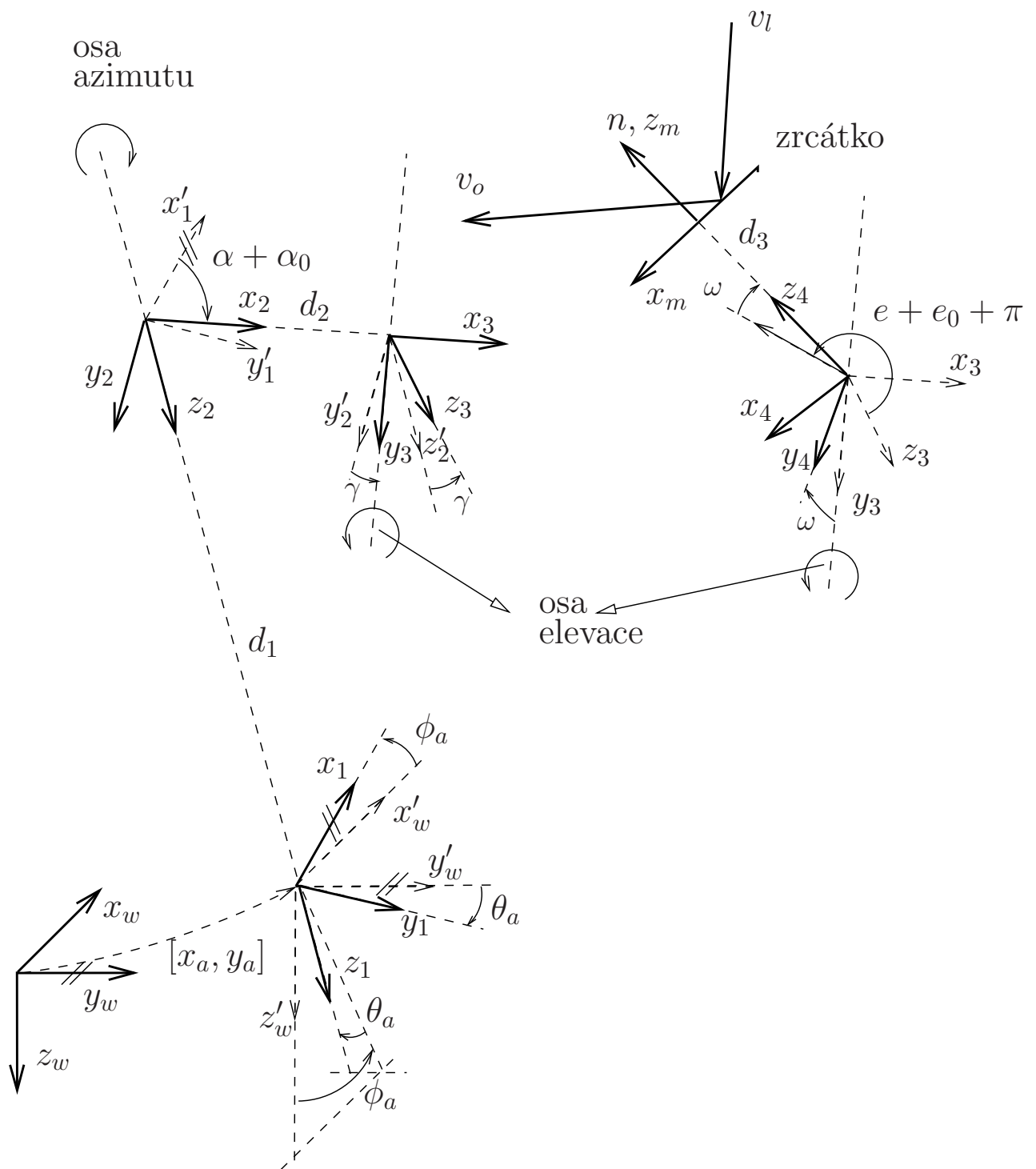
Parametry stolku:

- x_a, y_a - souřadnice průsečíku azimutální osy s rovinou xy světovém souřadném systému pro $z = 0$,
- ϕ_a - rotace bázových vektorů kolem osy y'_w a θ_a - rotace bázových vektorů kolem osy x'_w představují odklonění azimutální osy od z -ové osy světového souřadného systému,
- d_1 - posun v ose z_1 opačným směrem - posun do roviny xy , kde jsou k sobě azimutální a elevační osa k sobě nejbližší,
- α_0 - rotace souřadného systému kolem osy z_2 - značí počáteční nastavení azimutu, od kterého se začíná hodnota azimutu odečítat,
- d_2 - posun v ose x_2 - vzdálenost azimutální osy od osy elevace (vznikne nedokonalým spojením jednotlivých komponent),
- γ - rotace souřadného systému kolem osy x_3 - nekolmost osy azimutu a osy elevace,
- e_0 - rotace souřadného systému kolem osy y_3 - naklonění roviny zrcátka,
- ω - rotace souřadného systému kolem osy x_4 - náklon zrcátka v druhé rovině,
- d_3 - posun v ose z_4 - vzdálenost roviny zrcátka od osy elevace.

Kloubové souřadnice:

- α - rotace kolem osy z_2 - azimut odečtený z 360° goniometru kalibračního stolku,
- e - rotace okolo osy y_3 - elevace nastavená horním goniometrem.

2.6 KALIBRAČNÍ STOLEK



Obrázek 10: Model kalibračního stolku - bázové vektory x_w, y_w, z_w posouváme a rotujeme kinematickým řetězcem pomocí zvolených parametrů a kloubových souřadnic, dokud se neztotožní s bázovými vektory zrcátka x_m, y_m, z_m . Osou elevace rotujeme $3\times$. Pro přehlednost je rozkreslena na dvou různých místech. v_l znázorňuje vektor dopadajícího laserového svazku a vektor v_o jeho odraz od zrcátka.

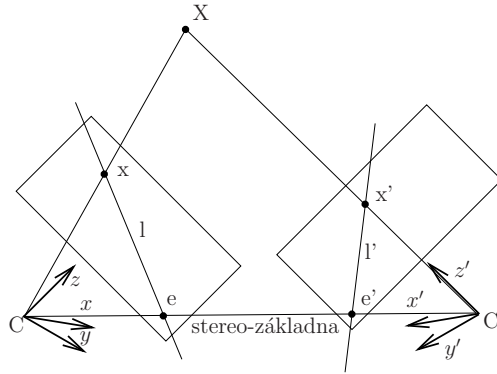
Transformaci mezi souřadnou soustavou $x_w y_w z_w$ a souřadnou soustavou $x_m y_m z_m$ popisujeme transformační maticí \mathbf{T} složené z rotační matice \mathbf{R} a posuvného vektoru \vec{t} . Při hledání jednotlivých transformací budeme počítat buď jen s rotací $\mathbf{R}_{(xyz)}(\alpha)$ o úhel α okolo jedné z os xyz (posuvný vektor nulový), nebo s posunem $\mathbf{P}(\vec{t})$ (jednotková rotační matice). Výsledný transformační vztah:

$$\mathbf{T} = \mathbf{P} \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ 0 \end{pmatrix} \mathbf{R}_y(\phi_a) \mathbf{R}_x(\theta_a) \mathbf{P} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -d_1 \end{pmatrix} \mathbf{R}_z(\alpha + \alpha_0) \mathbf{P} \begin{pmatrix} d_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \mathbf{R}_x(\gamma) \mathbf{R}_y(e + e_0) \mathbf{R}_x(\omega) \mathbf{P} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

■ 2.6.2 Epipolární geometrie

Parametry kulového stínítka zjistíme z 3D poloh stop laseru na jeho povrchu. 3D souřadnice těchto stop zjistíme stereo-rekonstrukcí podle [5].

Rekonstrukce 3D scény je úloha počítačového vidění. My se zaměříme na výpočet bodů v prostoru pomocí pohledu dvou kamer. Schéma je na obrázku 11.



Obrázek 11: Epipolární geometrie - kamery se středem promítání C a C' pozorují bod v prostoru X . Promítnuté body x a x' leží na epipolární přímce l resp. l' .

Se dvěma kamerami se středem promítání C a C' a souřadnými soustavami $x_c y_c z_c$ a $x'_c y'_c z'_c$ pozorujeme bod X v prostoru. Bod X se nám promítne do roviny průmětny jako bod x resp. x' .

Stereo-základnou nazýváme přímkou vzniklou spojením středů promítání obou kamer. Průsečíky základny s průmětnami označíme jako bod e a e' . Základna se však s průmětnami nemusí vždy protnout. Přímkou l a l' protínající body x a e resp. x' a e' nazýváme epipolárními přímkami.

Epipolární přímkou využíváme proto, že bod v prostoru zobrazen v jedné průmětně jako x se bude v druhé průmětně nacházet právě na epipolární přímce l' .

■ 2.6.3 Korespondence

Na prostorovou scénu se díváme dvěma kamerami. V každém pohledu vybíráme body zájmu. Těmi jsou body s odlišnými vlastnostmi od okolních bodů v obraze. Běžné metody pro tento účel používají např. Harrisův detektor hledající místa v obraze, kde se

2.7 TRIANGULAČNÍ METODA

mění gradient ve dvou směrech. Z bodů zájmu je následně třeba vybrat ty korespondující. V našem případě budou korespondujícími body stopy laseru na stínítku.

Úlohou korespondence rozumíme nalezení bodů \mathbf{x} a \mathbf{x}' znázorněných na obrázku 11. Pro tyto potřeby používáme fundamentální matici \mathbf{F} . Fundamentální matice reprezentuje transformaci mezi bodem \mathbf{x} v průmětně prvního pohledu a epipolární přímkou l' v pohledu druhém. Matematicky lze vyjádřit takto:

$$l' = \mathbf{F}\mathbf{x}. \quad (9)$$

Víme, že korespondující bod \mathbf{x}' leží na epipolární přímce l' , platí tedy $\mathbf{x}'l' = 0$. Pro korespondující body platí podmínka:

$$\mathbf{x}'^T \mathbf{F}\mathbf{x} = 0. \quad (10)$$

■ 2.7 Triangulační metoda

Dostáváme se k problému, kdy známe korespondující body \mathbf{x} a \mathbf{x}' a projekční matice kamer \mathbf{P} a \mathbf{P}' . Z modelu kamery vyplývají podle [11] vztahy:

$$\lambda_1 \mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{X}, \quad (11)$$

$$\lambda_1 \mathbf{x}' = \mathbf{P}'\mathbf{X}, \quad (12)$$

$$\text{kde : } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}' = \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} (\mathbf{p}_1^i)^T \\ (\mathbf{p}_2^i)^T \\ (\mathbf{p}_3^i)^T \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Po rozepsání rovnic 12 pomocí 13 se dosazením lze zbavit koeficientů λ_1 a λ_2 . Rovnice můžeme přepsat do tvaru:

$$u(p_3^1)^T \mathbf{X} = (p_1^1)^T \mathbf{X} \quad u'(p_3^2)^T \mathbf{X} = (p_1^2)^T \mathbf{X}, \quad (14)$$

$$v(p_3^1)^T \mathbf{X} = (p_2^1)^T \mathbf{X} \quad v'(p_3^2)^T \mathbf{X} = (p_2^2)^T \mathbf{X}. \quad (15)$$

Zavedením matice \mathbf{D}

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} u(\mathbf{p}_3^1)^T - (\mathbf{p}_1^1)^T \\ u'(\mathbf{p}_3^2)^T - (\mathbf{p}_1^2)^T \\ v(\mathbf{p}_3^1)^T - (\mathbf{p}_2^1)^T \\ v'(\mathbf{p}_3^2)^T - (\mathbf{p}_2^2)^T \end{bmatrix}, \quad (16)$$

dospějeme ke soustavě rovnic maticově vyjádřené vztahem 17. Řešením soustavy rovnic 17 získáme bod v prostoru \mathbf{X} .

$$\mathbf{D}\mathbf{X} = \mathbf{0}. \quad (17)$$

■ 2.8 Stanovení parametrů stínítka

Nalezené body z předchozího kroku proložíme kulovou plochou. Střed a poloměr kulové plochy ztotožníme s parametry stínítka 2.3.

■ 2.9 Intenzita laserové stopy

■ 2.9.1 Jas stopy

Dynamika jasu laserových stop dopadajících na plochu stínítka je však tak vysoká, že celou stopu nedokážeme pokrýt jedním dynamickým rozsahem kamery.

Volbou expozičního času nebo nastavením clony vybíráme tu část dynamického rozsahu scény, kterou přeneseme do obrazu. Body mimo dynamický rozsah kamery se buď podexponují do černé, nebo přexponují do bílé (saturované body).

■ 2.9.2 HDR snímek

Použitím HDR (High Dynamic Range) snímku zajistíme pokrytí velkého dynamického rozsahu. Jedním z možností rekonstrukce HDR obrázku je složení obrázku ze snímků s různými expozičními. U pořizování snímku volíme takové expozice, abychom jednotlivými snímky pokryli celý dynamický rozsah. Dobu expozice postupně snižujeme dokud nejsou všechny pixely bez saturace.

Laserový svazek si představujeme jako tok fotonů o určité vlnové délce. Při rekonstrukci HDR obrázku počítáme počet fotonů dopadených na snímací čip za jednotku času (intenzita I). Ze snímku vybereme nesaturované pixely a jejich intenzitu vydělíme časem expozice. Celkovou intenzitu pixelu určíme jako vážený průměr všech expozic bez saturace. Vyjádřeno vztahem:

$$I = \frac{\sum_{i=i_{nesat}}^n j_i}{\sum_{i=i_{nesat}}^n t_i} . \quad \begin{array}{ll} i_{nesat} & - \text{první nesaturovaná expozice} \\ j & - \text{jas pixelu} \\ t & - \text{čas expozice} \end{array} \quad (18)$$

Při vizuálním zobrazení HDR dat však nastává problém. Obyčejný lineární převod do intervalu $\langle 0, 255 \rangle$ způsobuje ztmavení celého obrázku, protože ve scéně se objevují velmi jasné světelné stopy laseru. Zajímavé body s nízkým jasnem jsou namapovány blízko černé a stávají se nepozorovatelnými.

Vylepšení nastává s použitím logaritmického převodu, kdy zobrazujeme $\log I$. Velmi jasné body jsou posunuty do oblasti kolem bílé a zůstává větší rozsah jasů pro vizualizaci dalších zajímavých oblastí.

Kapitola 3

Kalibrace

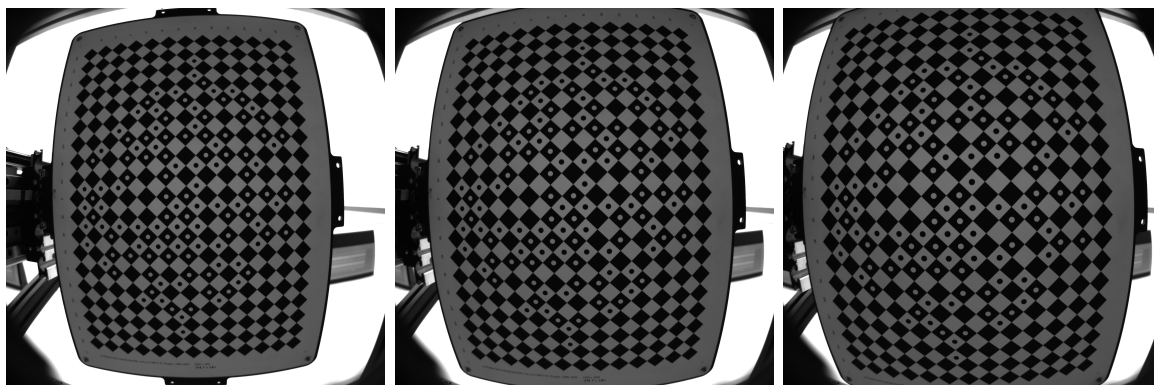
3.1 Kalibrace kamery

Kalibrace kamery má za úkol odhadnout parametry matematického modelu kamery určeného v kapitole 2.4. Pro tento účel využíváme programového balíčku [12]. Po lehké modifikaci jej lze použít i pro náš případ.

Pro účel kalibrace používáme kalibrační obrazec popsany v kapitole 2.5.

Kroky kalibrace:

- **Zaostření kamery** - Kameru je třeba zaostřit na kulové stínítko. Nastavení už v průběhu kalibrace a jejím používání měnit nebudeme.
- **Pořízení kalibračních obrazů** - Pořizujeme snímky ve třech různých polohách lišících se souřadnicí z . Snímky je třeba pořizovat v blízkosti roviny ostrosti kamery. Rozmazané obrázky neumožňují správnou kalibraci, protože hrany v kalibračním obrazci pak nejsou detekovány a kalibrační program selže.



Obrázek 12: Příklad správně pořízené série snímků - měníme z -ové souřadnice roviny obrazce blízko roviny ostrosti. Pixely bílých čtverců obrazce nejsou v saturaci.

- **Spuštění programu** - V průběhu programu se zobrazují mezivýsledky detekce hran v obrazci a z nich následná detekce čtvercového vzoru. Příklad detekce lze pozorovat na obrázku 17. Výsledek odhadu parametrů kamery zhodnotíme podle obrázku 18. Při správné kalibraci se residua detekovaných bodů v obrazci od matematického modelu kamery pohybují do dvou pixelů (až na několik výjimek).

■ 3.2 Model stínítka

V dalším kroku odhadujeme parametry modelu pŕlkulového stínítka popsané v kapitole 2.3.

Kámen umístíme na stojánek v měřicí soustavě 2.1 a necháme na něj dopadat laserový svazek. Laserové stopy na stínítku použijeme pro určení modelu. Kámen vybíráme takový, aby byly světelné stopy rozmístěny rovnoměrně po celé ploše stínítka.

Kameru posouváme ve směru osy y do dvou poloh. Osu y volíme proto, aby korespondující body neležely na základně (obr. 11). Pokud bychom posouvali kamerou ve vertikálním směru, odhad modelu stínítka neproběhne správně.

Ve snímcích detekujeme laserové stopy (3.2.1) a nalezneme korespondující body (3.2.2). Triangulační metodou (3.2.3) zjistíme body v prostoru. Nalezené body proložíme kulovou plochou (3.2.4) s odhadnutými parametry stínítka.

■ 3.2.1 Určení stop v obraze

Z pořízených snímků určujeme souřadnice laserových stop. Obraz oprahejeme např. polovinou možného maxima jasu. Pixely nad prahem následně rozdělíme do souvislých oblastí. Příliš malé oblasti za laserové stopy nepokládáme. Těžiště laserové stopy určíme jako průměr všech poloh pixelů s intenzitami jasů z jedné oblasti. S těžištěm potom dále pracujeme.

■ 3.2.2 Korespondence obrazů

Když máme k dispozici těžiště stop a parametry kamery, můžeme přistoupit k hledání korespondujících bodů. Nejdříve souřadnice nalezených stop odzkreslíme radiálním zkreslením nalezeným v 3.1. Na snímek poté můžeme použít lineární model (reprezentován projekční maticí).

Z projekční matice kamery na první (\mathbf{P}) a druhé (\mathbf{P}') pozici spočteme fundamentální matici \mathbf{F} . Pro korespondující body (\mathbf{x} a \mathbf{x}') platí vztah 10, jak je popsáno v kapitole 2.6.3.

Vztah 10 však platí pouze v případě poloh stop nezkreslených šumem a kvantizací poloh. Na reálných datech bychom nulovou vzdálenost bodu do epipolární přímky čekali velmi zřídka.

Počítáme tedy se vztahem:

$$x'^T \mathbf{F} x = e, \quad (19)$$

, kde e značí vzdálenost bodu od epipolární přímky. Z rovnice 19 vypočteme e pro všechny nalezené body z prvního snímku se všemi ze snímku druhého. Stejný postup použijeme ještě jednou, s tím rozdílem, že pohledy prohodíme. V tomto případě tedy hledáme, jak dobře korespondují body z druhého snímku s body z prvního. Předtím tomu bylo naopak. Získáme dvě matice s velikostí $n \times m$, kde n je počet nalezených stop v prvním obraze a m počet stop nalezených v obraze druhém.

3.2 MODEL STÍNÍTKA

Hledáme minima jednotlivých řádků v první matici a minima jednotlivých sloupců z druhé matice. Pokud maticové indexy minim souhlasí, označíme body reprezentující řádek a sloupec za korespondující dvojice \mathbf{x} a \mathbf{x}' . Takto prohledáme celou matici a nalezneme korespondence.

Postup hledání minim opakujeme ještě dvakrát. Množina uvažovaných bodů je zmenšena o již nalezené korespondující dvojice \mathbf{x} a \mathbf{x}' .

Ve výsledku máme přiřazení bodů, která však zpravila nejsou stoprocentně správně. Nekorespondující body budou odstraněny při odhadu parametrů polokoule 3.2.4. Příklad nalezených korespondencí lze vidět na obrázku 20.

3.2.3 Triangulace

Triangulační metodou popsanou v kapitole 2.7 zjišťujeme polohy světelných stop v prostoru. Správná detekce laserových stop, vhodný posun kamery a bezchybné přiřazení korespondujících bodů nám zajistí, že vypočtené body budou ležet blízko půlkulového stínítka.

Triangulační vztahy 12, 13, 15 a 16 jsou založeny na principu, že se epipolární přímky (2.6.2) protnou v jednom bodě. Ve skutečnosti se neprotnou a za hledaný bod považujeme ten, který má k oběma přímkám nejbližší. Konečného výsledku se dopočítáme s pomocí singulárního rozkladu matice \mathbf{D} (16).

3.2.4 Odhad parametrů polokoule

Body získané triangulační metodou (3.2.3) prokládáme kulovou plochou.

Ze známé rovnice koule

$$\sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2} - r = 0 \quad (20)$$

hledáme parametry středu $[x_s, y_s, z_s]$ a poloměr r .

Souřadnice $[x, y, z]$ nahradíme body z triangulace. Vytvoříme odchylkovou funkci, která určí odchylku ϵ každého bodu. Bude vypadat následovně:

$$\sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2} - r = \epsilon \quad (21)$$

Pro další postup opět využijeme metodu nejmenších čtverců, tentokrát nelineární. Ještě předtím však potřebujeme určit počáteční odhady hodnot parametrů. Střed určíme přibližně vzhledem k souřadné soustavě kalibru použitým při kalibraci kamery. Poloměr odměříme.

Z triangulace získáme body v 3D prostoru. Ne všechny jsou však použitelné pro určení parametrů koule. Ty co leží hodně mimo kouli degradují výsledek odhadu.

Po prvním odhadu odebereme dva body s největší odchylkou ϵ a znovu použijeme nelineární metodu nejmenších čtverců. Takto iterujeme ještě několikrát. Počet iterací by měl být takový, abychom odstranili přibližně 25% bodů.

Nakonec se dobereme k výsledku, jehož přesnost lze sledovat v grafu 23 znázorňující odchylky prostorových bodů od plochy koule.

■ 3.3 Kalibrace azimutu a elevace

Kalibrační stolek používáme k odhadu parametrů laserového paprsku uvedených v kapitole 2.2.

Se stolem popsaným v kapitole 2.6 pohybujeme nastavováním azimutu od 0° do 360° a při konstantní elevaci a pořizujeme snímky. Poté změním elevaci a postup opakujeme. Všechny snímky spojíme do jednoho obrázku maximem a detektorem popsaným v oblasti 3.2.1 najdeme laserové stopy. Výsledek spojení bodů může vypadat podobně jako na obrázku 26. Nalezené body následně odzkreslíme radiálním zkreslením.

Velké rozměry kalibračního stolku a jeho uchycení na kovovém profilu znemožňují měření ve všech nastavených azimutech a elevacích, protože laserové stopy na stínítku jsou zakryté z pohledu kamery, proto některá data budou chybět. Chybějící data lze vyzorovat z obrázku 26.

Z předchozích výpočtů známe parametry kamery a stínítka. Pozici v prostoru, kam laserový svazek dopadl určíme vyřešením soustavy rovnic modelu kamery 7 a kulové plochy 20. Průniky získáme dva. Nás zajímá pouze ten ve větší vzdálenosti od kamery.

■ 3.3.1 Odhad parametrů laseru a kalibračního stolku

U modelu 2.6.1 určíme počáteční odhady parametrů. Některé jsou zřejmé (např. úhly natočení laserového paprsku budou téměř nula) a jiné odměříme.

Z modelu jsme schopni při nastavených parametrech vypočítat pozici roviny zrcátka a jeho normálový vektor \vec{n} . Místo odrazu laserového svarku určuje průnik osy laseru s rovinou zrcátka. K výpočtu odraženého vektoru odraženého paprsku \vec{v}_o použijeme vztah

$$\vec{v}_i \vec{n} = \vec{v}_o \vec{n}, \quad (22)$$

kde \vec{v}_i je vektor laserového svazku.

Ze známého vektoru \vec{v}_o zjistíme průnik odraženého paprsku se stínítkem a tento bod promítneme pomocí projekční matice a radiálního zkreslení do obrazu. Výsledek porovnáváme s detekovanými body a pro každý detekovaný bod vypočítáme odchylku ϵ , která reprezentuje vzdálenost bodů v pixelech.

U odhadu parametrů stolku používáme opět lineární metodu nejmenších čtverců jako u odhadu parametrů stínítka. Optimalizovanými parametry jsou zároveň parametry stolku a parametry laserového svazku.

■ 3.3.2 Výpočet azimutu a elevace

Z odhadnutých parametrů z předchozích kapitol můžeme určit velikost azimutu a elevace laserových paprsků opouštějících broušený kámen. Kámen položíme na podstavec a necháme na jeho plochu dopadat laserový svazek.

Postupem uvedeným v kapitole 3.4 pořídíme HDR snímek scény. Ve snímku detekujeme laserové stopy. Nalezené stopy odzkreslíme radiálním zkreslením. Ze známého lineárního modelu kamery a parametrů stínítka určíme pozici laserových stop na stínítku.

3.4 RADIOMETRICKÁ KALIBRACE

Z-ovou souřadnici pozice kamene určíme kvalifikovaným odhadem. Přitom vycházíme z odhadnutých parametrů stínítka a velikosti podstavce. Zbylé souřadnice dostaneme z průniku roviny xy s laserovým paprskem. Vektor laserového paprsku opouštějící kámen \vec{v}_o určuje bod na stínítku a pozice kamene.

Elevace je potom úhel mezi vektorem \vec{v}_o a osou laseru. Azimut určíme z roviny xy pomocí funkce atan2 .

■ 3.4 Radiometrická kalibrace

HDR obraz skládáme z několika snímků scény. Snímky se od sebe liší dobou expozičního času a pokrývají celý dynamický rozsah jasu scény na stínítku. Princip skládání HDR obrázku je popsán v kapitole 2.9.2.

Předtím, než budeme rekonstruovat HDR snímek, musíme ze snímků odstranit tepelný šum. Šum odhalíme v obraze při pozorování tmavé scény. Objektiv kamery zakryjeme krytkou a pro všechny expoziční časy použité při snímání scény pořídíme černý obrázek. Nejistotu měření zmenšíme pořízením 10 snímků a jejich následným zprůměrováním.

Ze snímků scény odstraníme šum tak, že od něj odečteme černý obrázek s odpovídajícím expozičním časem. Saturované pixely však jednoduchým odečtením přestanou být v saturaci. Potřebujeme, aby v saturaci (jas 255) zůstaly, proto je před odečtením detekujeme a po odečtení vrátíme zpět do saturace. Hodnotu 225 používáme jako příznak saturace pixelu.

Obrázky očištěné od šumu složíme do HDR snímku pomocí vztahu 18.

Kapitola 4

Experimenty

V této kapitole probereme experimenty prováděné v laboratoři počítačového vidění. K experimentům je použita měřicí soustava popsaná v kapitole 2.1. V části 4.1 je rozebrán kalibrační proces. Kapitola 4.2 ukazuje použití výsledků kalibrace na měření broušených kamenů.

4.1 Geometrická kalibrace

Jak už bylo řečeno dříve, cílem geometrické kalibrace je určit parametry matematického modelu kamery, parametry půlkulového stínítka a laserového svazku. Pro měření kamenů v kapitole 4.2 tedy potřebujeme znát projekční matici \mathbf{P} kamery a její radiální zkreslení, poloměr a střed půlkulového stínítka a přímku laserového paprsku.

4.1.1 Použité součástky a jejich nastavení

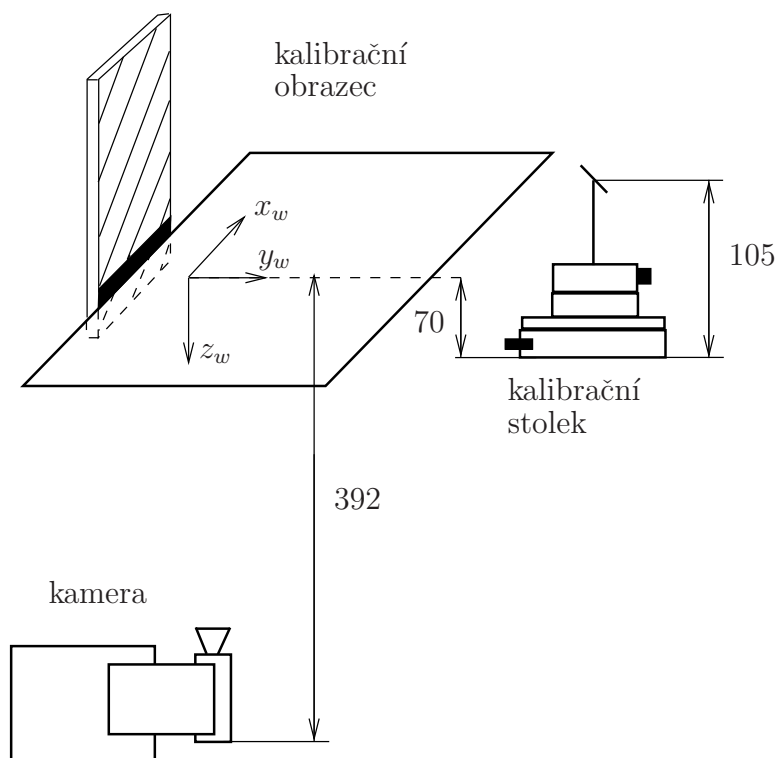
Popíšeme si přístroje a součástky použité k experimentálnímu měření. Pro opakovatelnost výsledků experimentu je důležité jejich umístění v měřicí soustavě.

- **Zdroj světla** - jako zdroj světla používáme při experimentech laser značky Lasiris o vlnové délce 670 nm a výkonem 5 mW. Laser dovoluje rozostřit paprsek, čehož využíváme při měření kamenů.
Jak lze sledovat na obrázku 15 vpravo nahoře, zdroj světla je uchycen na posuvných stolcích LINOS. Stolek v levoprávním posunu nastavujeme na 10.24 mm a v předozadním na 11.27 mm.
- **Kamera** - obraz snímáme kamerou Basler piA2400-12gm s rozhraním Gigabit Ethernet a snímkovou frekvencí 12 *fps*. Kamera má rozlišení 2448 × 2050 pixelů. My využijeme pouze čtvercový obraz 2050 × 2050. Dobu expozice lze nastavit od 60 μ s do 80 ms při bitové hloubce 12 bitů, kódujících monochromatický obraz. Používáme objektiv computar H2Z0414C-MP 1/2" Varifocal Lens (ohnisková vzdálenost 4 mm) se clonou až 1.4. Při běžném měření je clona zcela otevřena. Kamera je namontována na posuvné stolky Cobrabid. Detailní pohled na kameru je na obrázku 15 vpravo dole.
- **Kalibrační obrazec** - kalibrační obrazec popsáný v 2.5 je umístěn na desce v rovině xy . Přiřevněn je k posuvnému stolku OPTEN. Řídící jednotkou MARS2 můžeme nastavovat hodnotu posunu stolku a měnit tak vertikální pozici kalibračního obrazce (osa z_w). Počáteční pozici ($z = 0$) nastavujeme do vzdálenosti 392 mm od spodní hrany kamery. V předozadním směru (osa x_w) posouváme

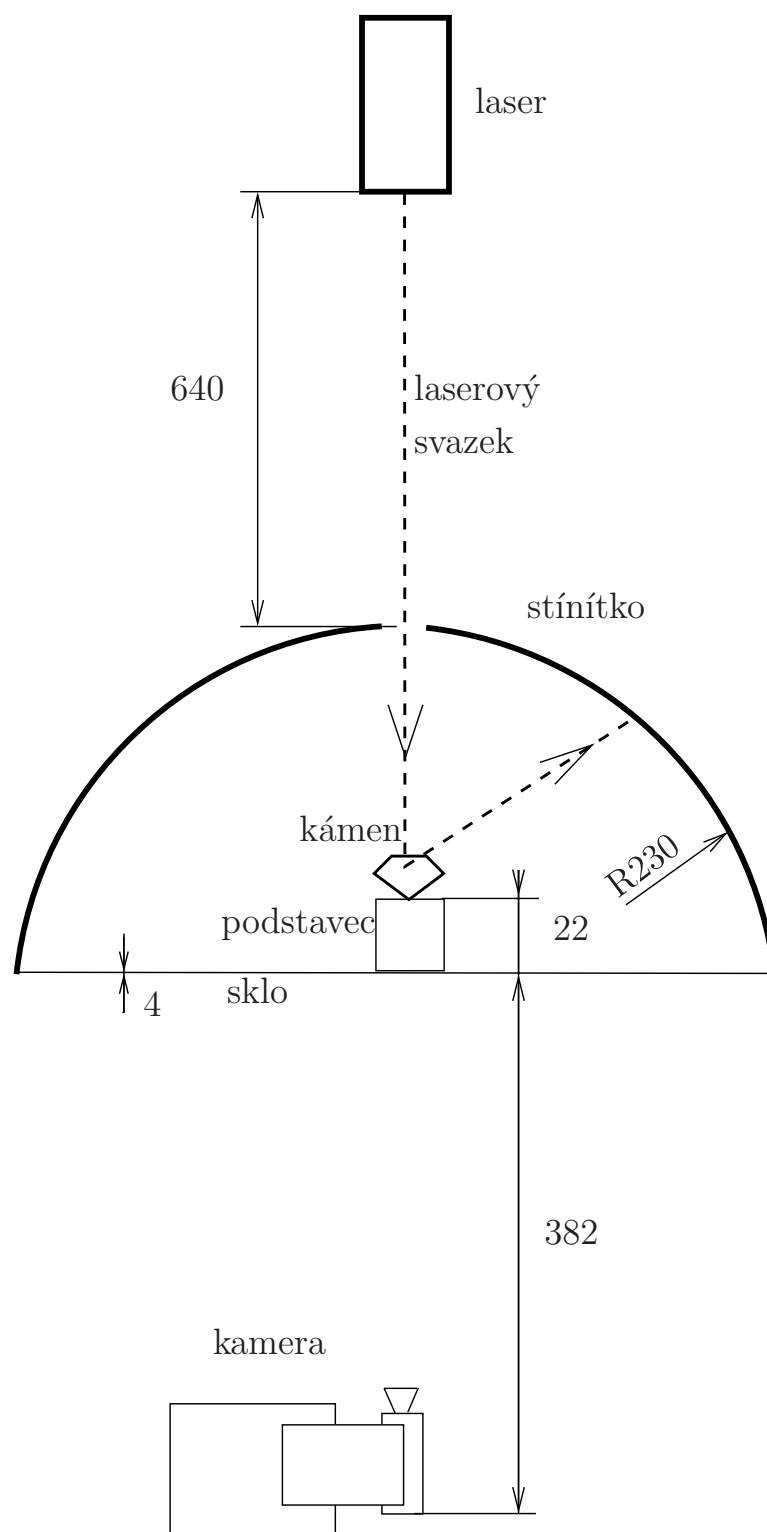
4.1 GEOMETRICKÁ KALIBRACE

kalibrem tak, aby osa y_w protínala přímku laserového svazku. Následně kalibr připevníme ke konstrukci.

- **Kalibrační stolek** - sestaven z goniometrů, plastové spojky a zrcátka. Podrobnější popis nalezneme v kapitole 2.6. Polohu stolku v rovině xy určuje osa laserového svazku protínající střed zrcátka. Dno stolku umístujeme 60 mm pod spodní část stínítka.

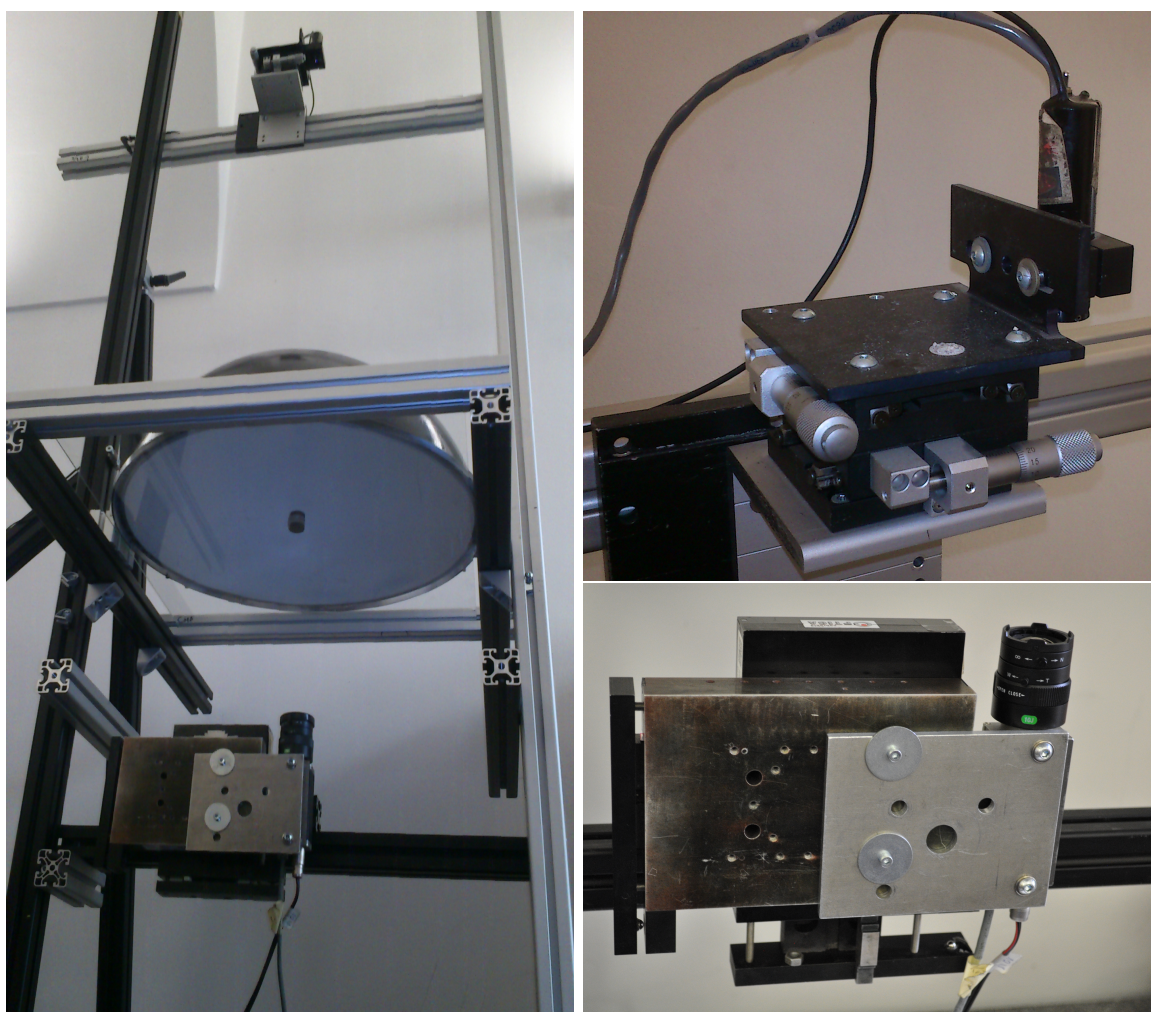


Obrázek 13: Umístění kalibračního obrazce a kalibračního stolku v měřicí soustavě - vzdálenost roviny obrazce je měřena od spodní hrany kamery. Osa y_w protíná osu laseru. Laser dopadá na střed zrcátka kalibračního stolku.



Obrázek 14: Umístění laseru, stínítka a kamery v měřicí soustavě - vyznačena vzdálenost mezi spodní hranou kamery a spodní částí skla, na kterém je položeno stínítko a podstavec na kámen. Pozice laseru je dána vzdáleností od otvoru ve stínítku.

4.1 GEOMETRICKÁ KALIBRACE



Obrázek 15: Experimentální zařízení - vlevo je složení měřicí soustavy k měření kamenů, vpravo nahoře vidíme detailní pohled na uchycení kamery a dole zase pohled na kameru, právě posunutou ve vertikálním směru.

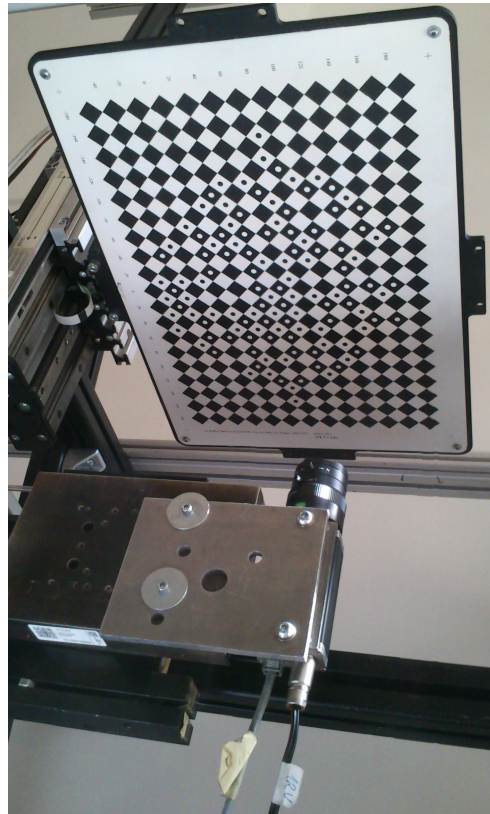
■ 4.1.2 Kalibrace kamery

Ke kalibraci kamery používáme již vytvořený program [12] implementovaný v prostředí MATLAB. Pro nás je důležité pořídit snímky kalibračního obrazce zajišťující dobrou detekci hran v obraze a vhodně zvolit posun obrazce. Hodnotu z -ové souřadnice nastavujeme pomocí řídicí jednotky MARS 2 na -5 mm, -27 mm a -55 mm.

Na obrázku 17 znázorněna detekce vzoru obrazce. Výběr kandidátů na hrany čtverců v obrazi a detekce kódu nejsou bezchybné. Z toho důvodu je určeno pouze jádro kalibračního vzoru a body, které neodpovídají vzoru jsou vyřazeny.

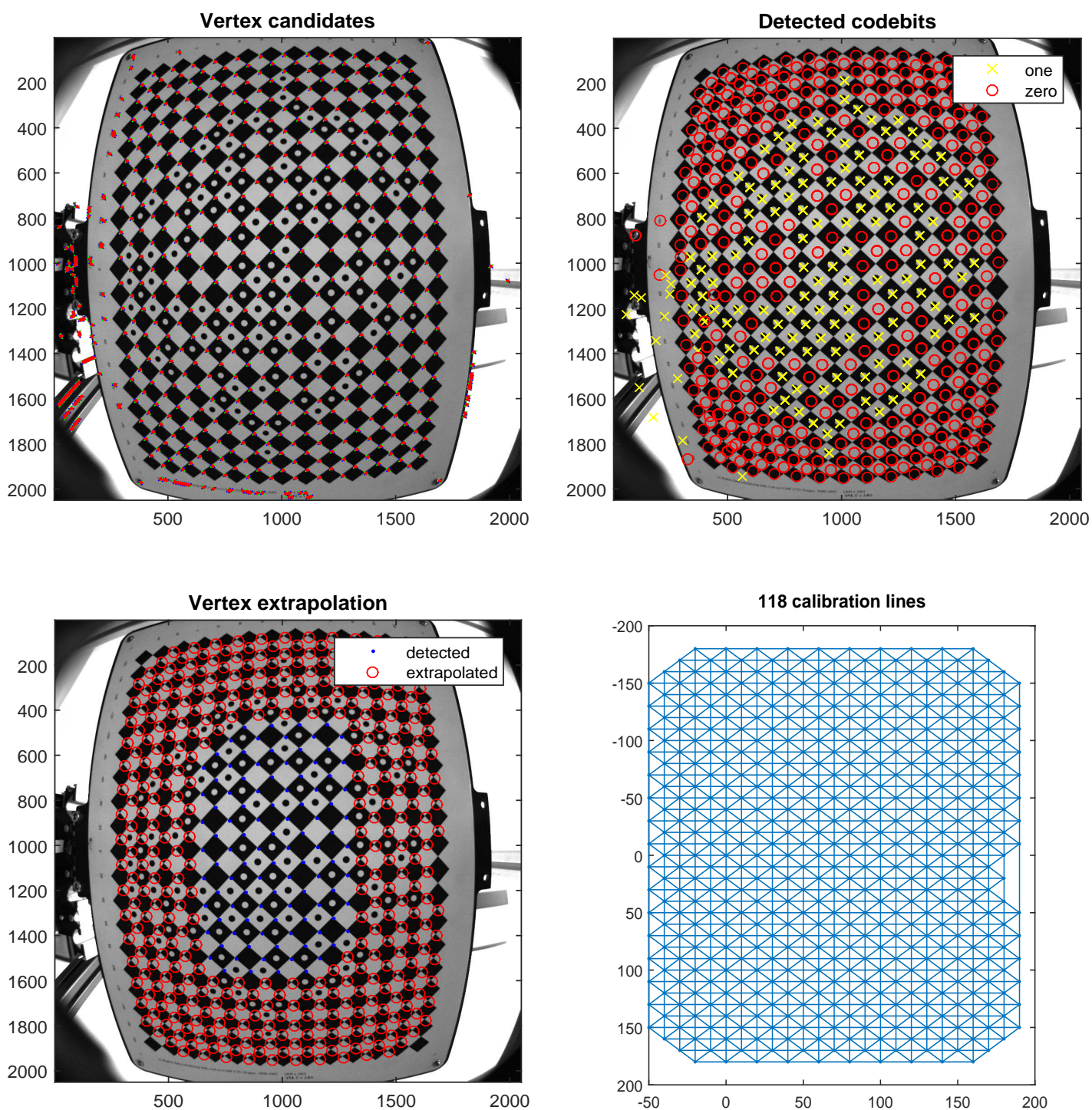
Vzor kalibračního obrazce byl detekován téměř celý. Přitom pro úspěšnost kalibrace stačí, když se detekuje pouze část obrazce.

Ze tří poloh obrazce, lišících se v souřadnici z (příklad na obr. 12) se odhadnou parametry kamery. Porovnání matematického modelu s odhadnutými parametry je graficky znázorněno na obr. 18. Chyba v pixelech je vzdálenost bodu detekovaného na kalibračním obrazci a bodu odpovídajícímu matematického modelu kamery měřená v obraze. Více jak 90% chyb je menších než 2 pixely. S ohledem na šum v obraze je to přijatelný výsledek.

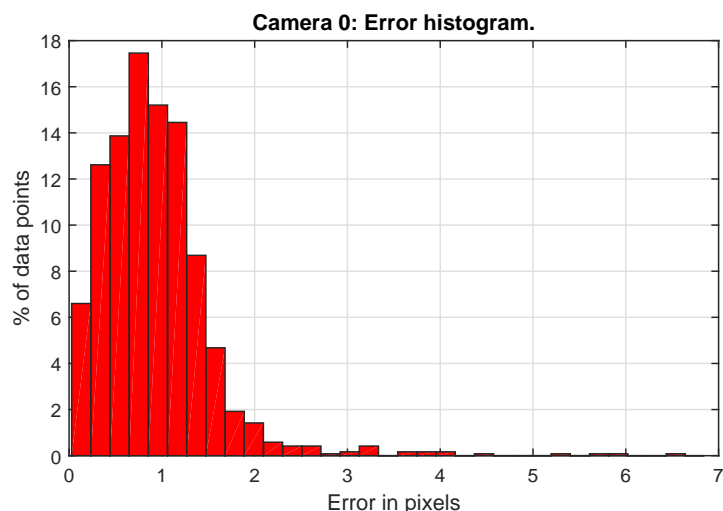


Obrázek 16: Kalibrace kamery - kalibrační obrazec je uchycen na posuvném stolku OPTEN. Kamera snímá nastavené polohy obrazce.

4.1 GEOMETRICKÁ KALIBRACE



Obrázek 17: Detekce vzoru u kalibrace kamery - vlevo nahoře jsou červeně znázorněni kandidáti na rohy čtverců v obrazci. Nahoře vpravo je zobrazen výsledek detekce vzoru kalibračního terče. Křížkem jsou označeny čtverce vyplněné kruhem. Dole vlevo vidíme určené jádro a okolo červeným kolečkem rohy odpovídající kandidátům. Poslední obrázek vpravo dole ukazuje nalezené kalibrační přímky obrazce.



Obrázek 18: Porovnání matematického modelu kamery s detekovanými body - chyba vyjádřená v pixelech ve zkráceném obraze

■ 4.1.3 Parametry stínítka

Pro nalezení parametrů stínítka si připravíme pohled dvou kamer. V první pozici není ani jeden z posuvných stolků kamery vychýlen. Posunutím kalibračního stolku v horizontálním směru o 55mm se dostaneme do druhé pozice.

Kalibraci kamery z předchozí části 4.1 provedeme pro oba pohledy.

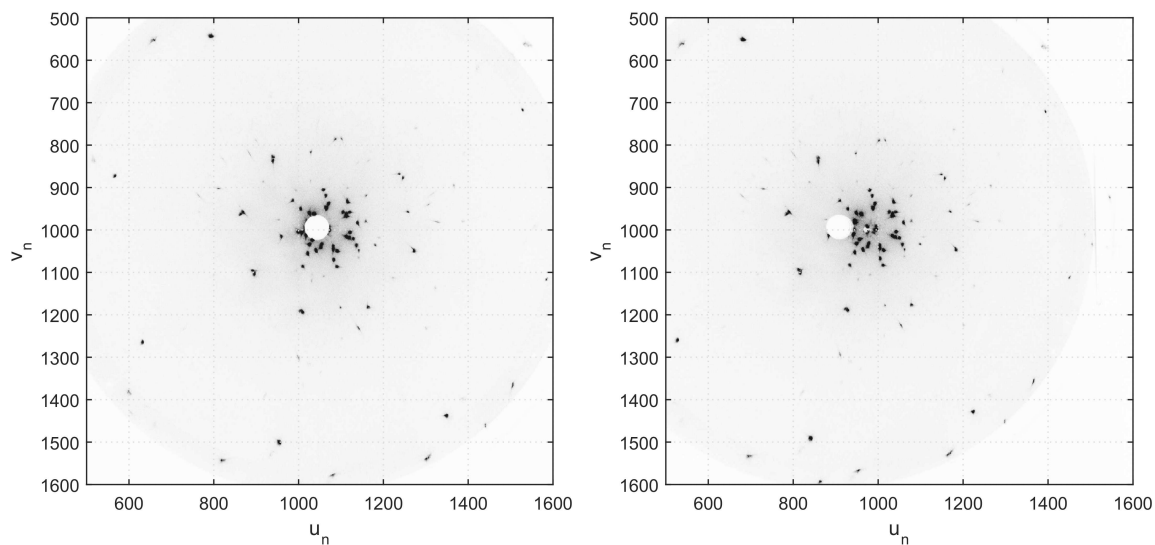
Připravíme si kámen s velkým rozptylem laserového paprsku. My jsme si pro tento účel vybrali šaton. Na kámen necháme dopadat laserový svazek. Snímky pořízené ze dvou pohledů jsou zobrazeny na obrázku 19.

■ 4.1.4 Korespondence obrazů

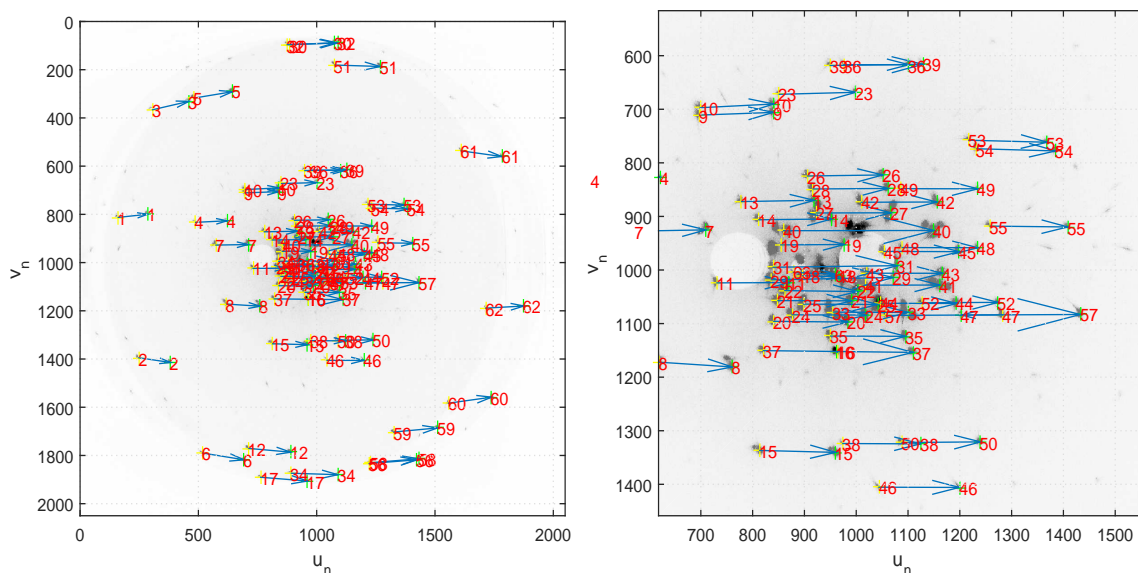
Ve snímcích 19 najdeme laserové stopy detektorem popsaným v kapitole 3.2.1. Korespondence nalezených laserových stop určíme stejným postupem, jako je uvedeno v kapitole 3.2.2.

Výsledek nalezených korespondencí je na obrázku 20. Korespondence bodů ležících dále od středu jsou v tomto případě správně určeny. Problémy v nalezení korespondencí nastávají v oblasti blízko středu obrazu. Hustota bodů je zde vysoká a ač to z obrázku není příliš patrné, objevují se zde chybná přiřazení. Chyby odstraňujeme v sekci 4.1.6.

4.1 GEOMETRICKÁ KALIBRACE



Obrázek 19: Pohled na laserové stopy z pohledů dvou kamer - vlevo stolky kamery bez posunu, vpravo kamera s posunem v horizontálním směru

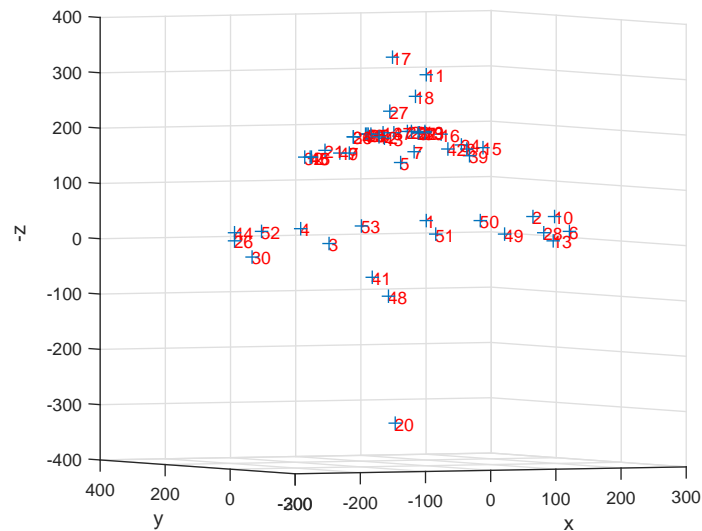


Obrázek 20: Korespondence obrazů - vlevo pohled na celou plochu stínítka v vyznačenými korespondencemi. Vpravo detail středu stínítka.

4.1.5 Triangulace

Korespondence bodů máme nalezené. Nyní můžeme přistoupit k hledáním bodů v prostoru pomocí triangulační metody popsané v 2.7.

Prostorový graf 21 zobrazuje výsledky výpočtu bodů v prostoru. Většina z nich leží



Obrázek 21: Výsledek triangulační metody - nalezené body v prostoru

v blízkosti stínítka. Hodnoty v z -ových souřadnicích pro lepší představivost při vykreslování násobíme -1 . Nekorespondující dvojice bodů jsou zde zřejmé. Konkrétně se jedná o dvojice č. 17, 11, 18, 27, 20, 48 a 41.

4.1.6 Odhad parametrů stínítka

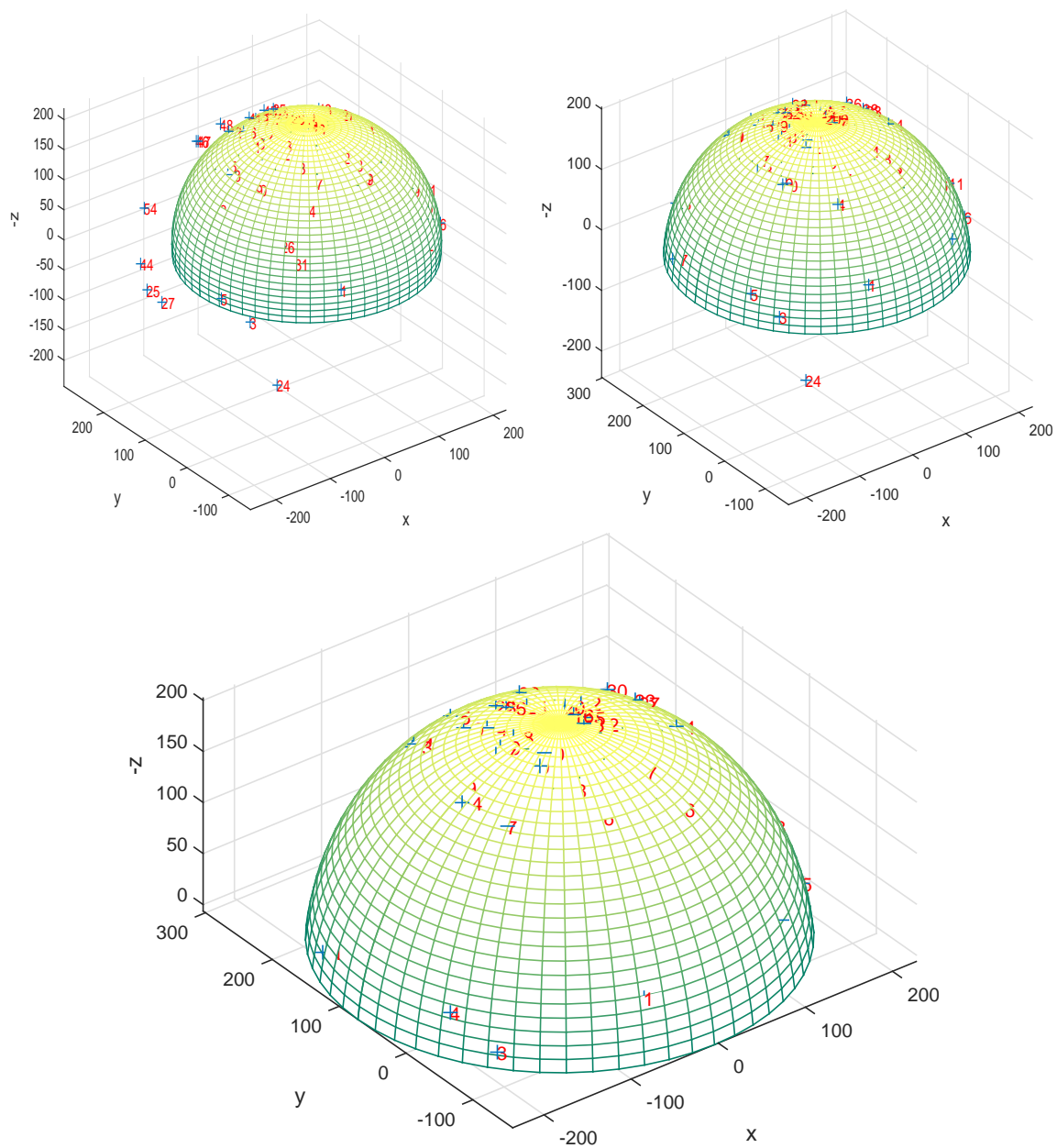
Optimalizaci parametrů půlkulového stínítka provedeme postupem popsaným v kapitole 3.2.4. Prvním krokem optimalizace je prvotní odhad parametrů koule. Výsledek kvalifikovaného odhadu:

$$x_s = 0 \text{ mm}, y_s = 80 \text{ mm}, z_s = 30 \text{ mm} \text{ a } r = 230 \text{ mm}.$$

V našem případě proces optimalizace opakujeme $11 \times$. Při každé iteraci odstraňujeme 2 body s největší absolutní odchylkou ϵ . S tímto krokem se mění i číslování bodů v prostoru. S jedenáctou iterací se dostáváme k věrohodnému výsledku.

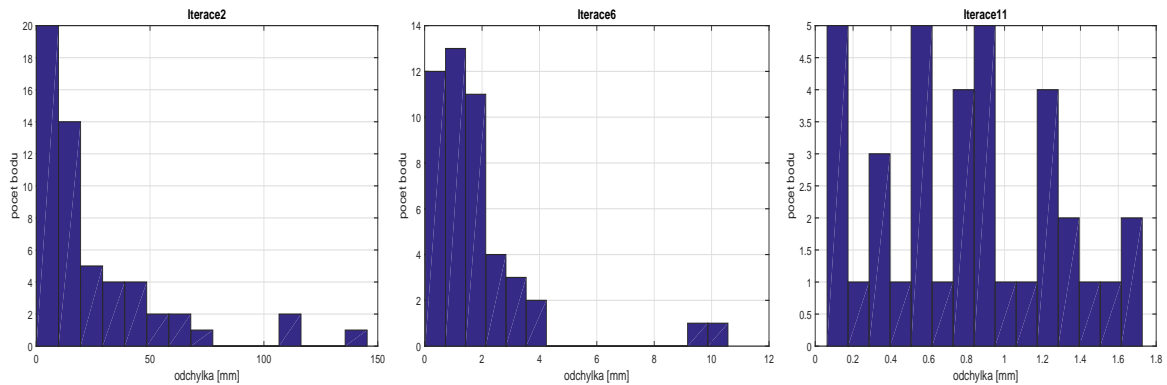
V grafem 22 lze sledovat postupný vývoj odhadu. Postupně pro 2., 5. a 11. iteraci. Plocha stínítka se postupně přibližuje bodům v prostoru. Body, které neleží na stínítku se postupně vyřazují.

4.1 GEOMETRICKÁ KALIBRACE



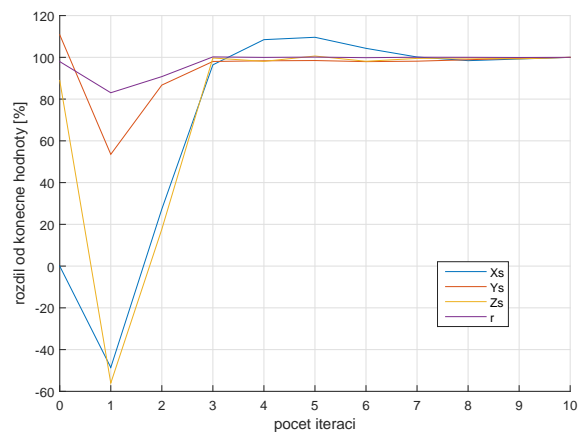
Obrázek 22: Vývoj odhadu parametrů stínítka v 3D grafu - vlevo nahoře stav po 2. iteraci, vpravo nahoře stav při 5. iteraci a dole po 11. iteraci konečný odhad.

Odchyly prostorových bodů od plochy koule se s iteracemi zmenšují. Grafické znázornění lze sledovat na obr. 23. Na grafu 2. iterace mohou za vysokou odchylkou nekorespondující body. Po jejich odstranění při 6. iteraci mohou největší odchyly způsobovat zašumění obrazu nebo nepřesnost detekce těžiště laserové stopy.



Obrázek 23: Vzdálenost bodů z triangulace plochy stínítka - vlevo stav odchylek po 2. iteraci, uprostřed velikosti odchylek po 6. iteraci a vpravo konečný stav po 11. iteraci.

Změny odhadovaných parametrů zobrazuje graf 24. Zde je patrné postupné přibližování hodnot parametrů ke konečnému odhadu.



Obrázek 24: Vývoj odhadu parametrů polokoule s iteracemi - optimalizované parametry se postupně přibližují ke konečné hodnotě.

4.1 GEOMETRICKÁ KALIBRACE

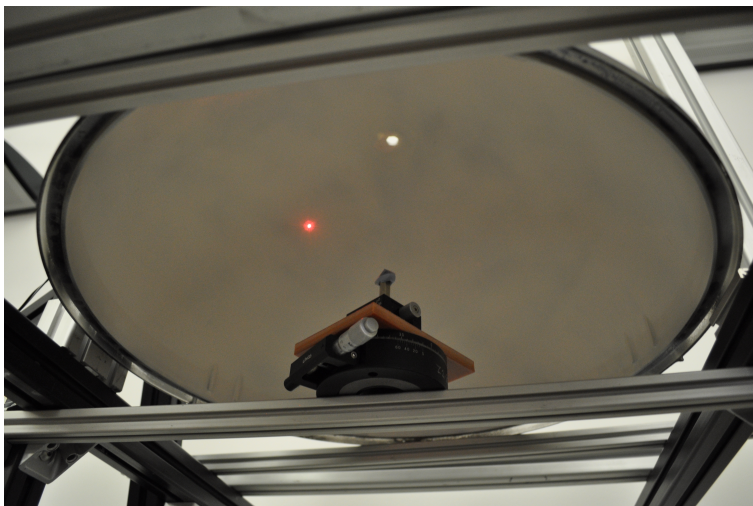
Výsledek odhadovaných parametrů:

Odhad	x_c	y_c	z_c	r
Počáteční [mm]	0	80	30	230
Po optimalizaci [mm]	-5.4877	72.1977	33.7333	234.775

Tabulka 1: Počáteční a konečný odhad parametrů stínítka

■ 4.1.7 Měření s kalibračním stolkem

Parametry laseru odhadujeme s pomocí kalibračního stolku popsaného v kapitole 2.6. Stolek umístíme tak, aby doprostřed zrcátka dopadal laserový svazek a snímáme odrazy zachycené a stínítku.

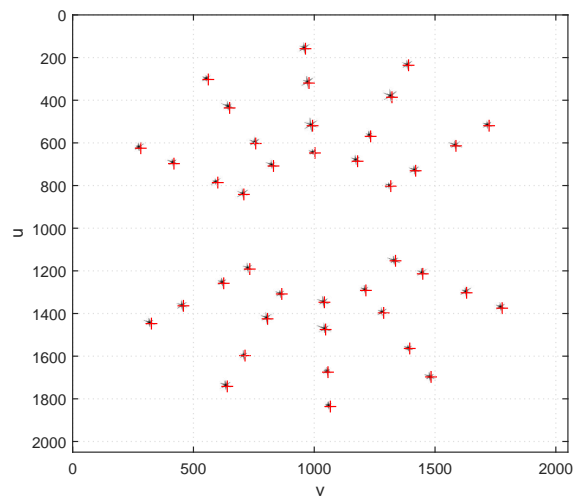


Obrázek 25: Kalibrace pomocí kalibračního stolku

Stopa odraženého a nerozptýleného laserového svazku má vysoký jas. Abychom mohli získat HDR snímek, změníme clonu objektivu a posuneme tak dynamický rozsah kamery.

K měření použijeme skript *posTableHDR*. Ve skriptu předem definujeme měřené hodnoty azimutu a elevace. Naše volba azimutu je 10° až 340° s krokem 30° . Elevaci nastavujeme -2° , 5° , 15° a 22.5° na horním goniometru.

Naměřené laserové stopy spojíme do jednoho snímku. Výsledek vidíme na obrázku 26.



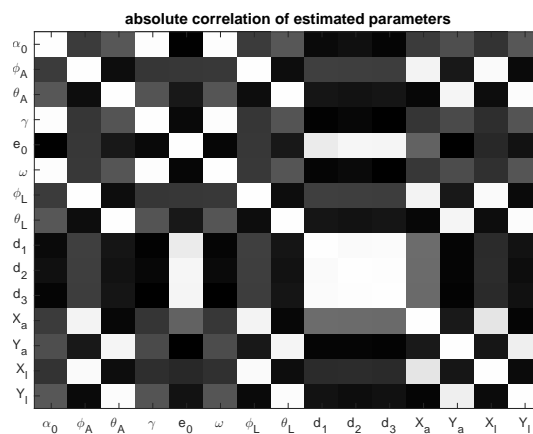
Obrázek 26: Spojení laserových stop z kalibračních pozic stolku

4.1.8 Odhad parametrů kalibračního stolku a laseru

Detekované stopy z měření s kalibračním stolkem použijeme k výpočtu odchylek postupem popsaným v kapitole 3.3.1.

Optimalizační algoritmus použitý k odhadu parametrů minimalizuje vypočítaná residua. Zjišťujeme, že algoritmus uváže v různých lokálních minimech při různých počátečních odhadech. Proto se musíme podívat zpět na parametrizaci kalibračního stolku na obr. 10.

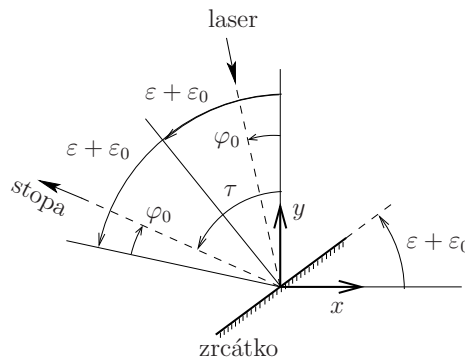
Spustili jsme optimalizační algoritmus z pěti počátečních bodů pro každý jeden zafixovaný parametr. Mezi výsledky jsme hledali korelované parametry, což by poukazovalo na to, že náš model může být přeparametrizován. Lineární vztahy mezi parametry lze najít pomocí korelace na obr. 27.



Obrázek 27: Absolutní korelace odhadovaných parametrů - bílé jsou vyznačeny dvojice, které spolu silně korelují.

4.1 GEOMETRICKÁ KALIBRACE

Zjišťujeme, že dvojice parametrů ϕ_l, ϕ_a a θ_l, θ_a nelze určit zároveň. Problém vysvětlíme popsáním obr. 28.



Obrázek 28: Závislost úhlových parametrů osy azimutu a osy laseru.

Úhel osy laseru značíme φ_0 a úhel osy azimutu ε_0 . Úhel τ označuje výsledný úhel mezi osou y a odraženým paprskem. Z obrázku je zřejmé, že

$$\tau = 2(\varepsilon + \varepsilon_0) - \varphi_0, \quad (23)$$

potom platí:

$$\forall \varphi_0 \exists \varepsilon_0 = \frac{\varphi_0}{2}, \quad (24)$$

tedy pro každý odklon laseru φ_0 existuje offset zrcátka ε_0 , který produkuje stejné směry stop τ . Ve 3D prostoru je směr paprsků principiálně stejný.

Proto při měření nastavujeme kalibrační stolek a zrcátko tak, aby při počáteční elevaci e_0 se laserový svazek od zrcátka odrazil co nejpřesněji zpět na zdroj laserového paprsku při otáčení okolo azimutální osy. Tak můžeme se značnou přesností říci, že $\phi_l = \phi_a$ a $\theta_l = \theta_a$.

Obr. 27 ukazuje špatnou podmíněnost parametrů d_2, d_3 a γ . Vzdálenost d_2 a úhel γ vyjadřují nepřesnost montáže goniometrů. Pro spojení goniometrů je použita téměř ideálně rovná destička a propojovací otvory jsme vytvářeli s co největší přesností. Vzdálenost d_3 určuje vzdálenost zrcátka od elevační osy. Pomocí posuvného měřítka jsme se jí snažili co nejvíce přiblížit. Proto pro další optimalizaci zafixujeme parametry d_2, d_3 a γ na hodnotách: $d_2 = 0$ mm, $d_3 = 0$ mm a $\gamma = 0^\circ$.

Za podmíněk: $\phi_l = \phi_a$ a $\theta_l = \theta_a$, jsou osy laseru a azimutu rovnoběžné. Z přesnosti úhlu γ vyplývá to, že zrcátko muselo být po nastavení odrazu laserového svazku s vysokou přesností kolmé na osu azimutu a osu elevace. Parametry e_0 a ω reprezentující naklonění zrcátka můžeme tedy také zafixovat. Velikost úhlu e_0 získáme odečtením z goniometru a úhel ω zafixujeme na nule. Zafixováním je parametr e_0 roven 22.5° a parametr ω roven 0° .

Fixované parametry: $d_2 = 0$ mm, $d_3 = 0$ mm, $\gamma = 0^\circ$, $e_0 = 22.5^\circ$ a $\omega = 0^\circ$.

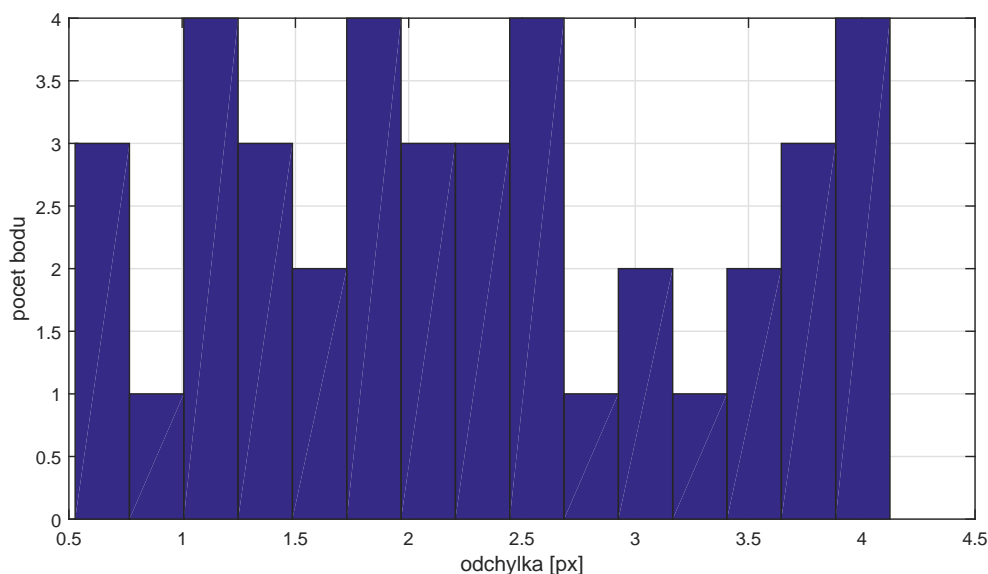
Výsledky optimalizace:

Odhad	α_0	ϕ_a	θ_a	ϕ_l	θ_l
Počáteční [°]	-45	0	0	0	0
Po optimalizaci [°]	-47.9817	-0.1528	-0.4269	-0.1528	-0.4269

Tabulka 2: Počáteční a konečný odhad úhlových parametrů laseru a kalibračního stolku

Odhad	d_1	X_a	Y_a	X_l	Y_l
Počáteční [mm]	-30	-5.4877	72.1977	-5.4877	72.1977
Po optimalizaci [mm]	-29.1976	-3.8937	69.6459	-6.7345	71.6756

Tabulka 3: Počáteční a konečný odhad délkových parametrů laseru a kalibračního stolku



Obrázek 29: Porovnání matematického modelu systému detekovanými body - chyba vyjádřená v pixelech ve zkrasleném obraze.

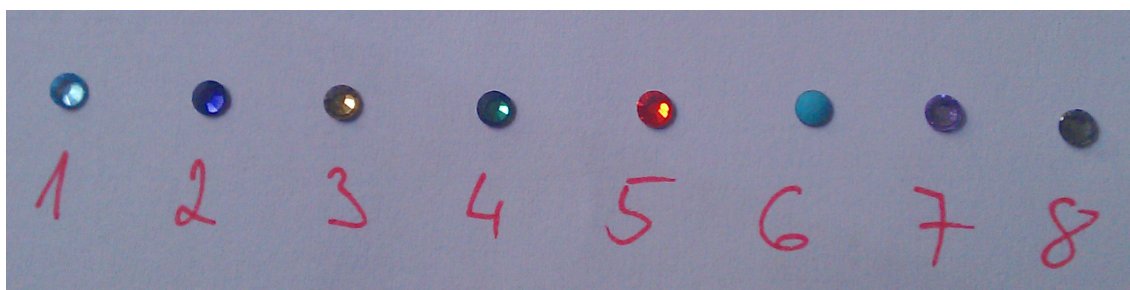
4.2 Experimenty na reálných kamenech

Po zkalibrování celé soustavy můžeme přikročit ke experimentům na reálných kamenech. Ke zkoumání vybíráme skleněné kameny různých odstínů typu šatonová růže o velikosti SS10 (2.7 – 2.8 mm) s dvanácti broušenými fasetami. Tyto kameny se řadí mezi kameny s plochým spodkem a používají se zejména k nalepování či nažehlování na různé podklady. Použité kameny jsou popsány v tabulce 4 a vyfocené na obr. 30.

4.2 EXPERIMENTY NA REÁLNÝCH KAMENECH

Kámen č.	Typ	Velikost
1	Aquamarine	SS10
2	Deep Tanzanite	SS10
3	Gold Beryl	SS10
4	Green Turmaline	SS10
5	Hyacinth	SS10
6	Turquoise	SS10
7	Violet	SS10
8	Black Diamond	SS10

Tabulka 4: Barevné kameny použité k experimentům - popis barevných kamenů odpovídá obr. 30.



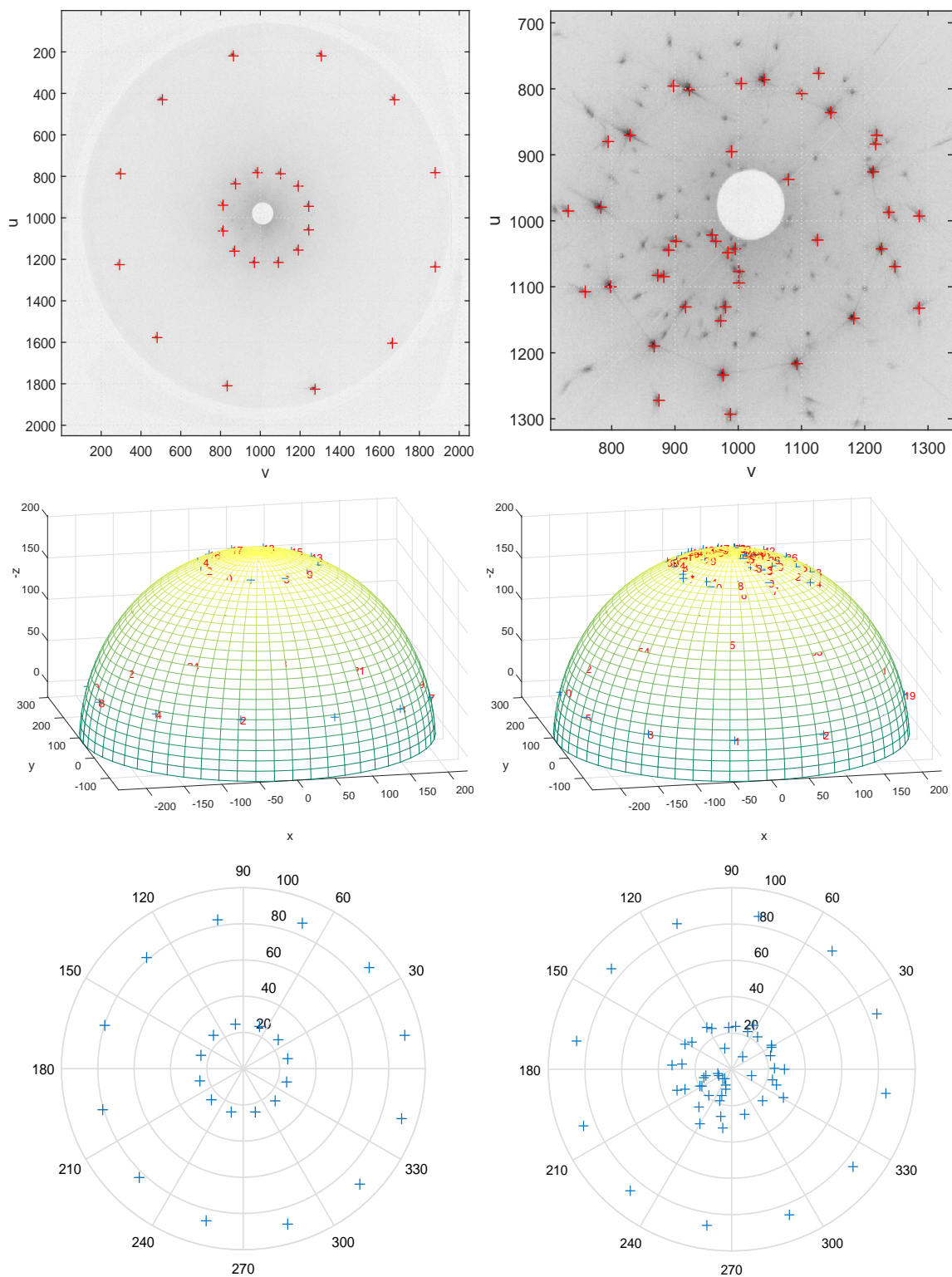
Obrázek 30: Barevné šatonové růže použité k experimentům - popis jednotlivých kamenů nalezneme v tabulce 4.

Všechny nasnímané kameny s vyhodnocením jsou na přiloženém DVD. Na obr. 30 jsou zobrazeny výsledky pro šatonové růže odstínu Deep Tanzanit (2) a Hyacinth (5). Můžeme zde pozorovat rozdílný útlum intenzity laserového svazku pro různé odstíny. S použitím zdroje laserového svazku s jinou vlnovou délkou, bychom dostali rozdílné výsledky.

Kámen Deep Tanzanit má značný útlum intenzity laserového svazku, proto jsou na stínítku pouze stopy s velkou intenzitou. Důsledkem přímého odrazu laserového svazku od fazet kamene jsou stopy na okraji stínítku s velikostí elevace blízko 90° . Přímý odraz od tabulky kamene prošel otvorem ve stínítku nebo jeho stopu zakrývá podstavec. Odrazy s elevací blízko 25° vznikly postupně lomem svazku do kamene, odrazem od spodní plošky a vylomením z kamene.

Kámen Hyacinth má díky svému odstínu útlum intenzity menší než kámen (2). Na stínítku lze pozorovat nejen stopy s charakterem jako na kameni (2), ale i stopy vzniklé dvou a vícenásobným odrazem uvnitř kamene.

4.2 EXPERIMENTY NA REÁLNÝCH KAMENECH



Obrázek 31: Výsledky zkoumaných šatonových růží - Deep Tanzanite (2) vlevo a Hyacinth (5) vpravo. V horní grafy představují HDR snímky stínítka z vyznačenými detekcemi laserových stop. U Hyacintu je detail na střed obrazu. Uprostřed máme stopy vyznačené na stínítku. Spodní graf je výsledkem kalibrace. Azimut a elevace ve stupních stop jsou polárními souřadnicemi bodů v grafem.

Kapitola 5

Závěr

V rámci této práce byla navrhnutá soustava pro měření šíření laserového svazku šperkařským kamenem. Pro sestavenou soustavu byl určen matematický model světelného zdroje, stínítka a kamery.

Pro nalezení vnitřních a vnějších parametrů kamery byl použit kalibrační obrazec určený pro kalibraci kamery na laboratorních přístrojích. S použitím programu [12] byly velmi přesně odhadnuty parametry kamery.

Parametry stínítka byly nalezeny s pomocí stereo-rekonstrukce. Experimentální kámen se umístil do měřicí soustavy. Z experimentů bylo zjištěno, že výběr kamene s velkým rozptylem je důležitý pro správný odhad parametrů. Laserový svazek dopadající na tabulku brusu vlivem optických vlastností kamene zanechal laserové stopy na stínítku. Z pohledů dvou kamer na scénu stínítka k sobě byly přiřazeny korespondující laserové stopy a triangulační metodou vypočítány body v prostoru. Body v prostoru byly proloženy kolovou plochou. Parametry kulové plochy byly ztotožněny s parametry stínítka. Tato metoda určí polohu a poloměr půlkulového stínítka s milimetrovou přesností.

K nalezení parametrů světelného zdroje byl použit kalibrační stolek složený z goniometrů a odrazového zrcátka. Laserový svazek dopadal na zrcátko a zaznamenávaly se stopy na stínítku při nastavených hodnotách azimutu a elevace. Naměřené stopy se porovnávaly s výsledky matematického modelu a minimalizoval se rozdíl výsledků v obraze. Prvotní výsledky optimalizace ukazovaly na špatnou podmíněnost modelu kalibračního stolku, proto byly parametry známé s vysokou přesností zafixovány.

Složení obrazů s různými expozičními časy do HDR snímku je možné měřit intenzitu jasu laserových stop na stínítku. Zkalibrovanou soustavu poté lze použít k měření parametrů broušených kamenů, což jsme vyzkoušeli na reálných kamenech. Naplnili jsme tak zadání této práce.

Výsledky experimentů ukazují, že nakalibrovat kameru a zjistit parametry stínítka lze při dodržení správného postupu s vysokou přesností a nenastávají zde žádné problémy. Stanovení parametrů laseru však považujeme za obtížný úkol. Nezbytná fixace velmi přesně známých parametrů kalibračního stolku sice přináší očekávané výsledky, lepším řešením se ale zdá použití pouze dvouosého stolku menších rozměrů, který by při kalibraci méně zakrýval stínítka z pohledu kamery. Měli bychom tak při optimalizaci k dispozici data pokrývající větší prostor stínítka.

Práce zároveň přináší ucelený návod, jak postupovat při opakované kalibraci měřicí soustavy. Důležité rozměry jsou zakótovány a postup důkladně zdokumentován, takže se mohou porovnávat výsledky kalibrace i po opětovném složení soustavy.

Literatura

- [1] Anonymous. *40° Travel, 40 × 40 mm Stage Size Metric Goniometer - technical information*. <http://www.edmundoptics.com/optomechanics/translation-stages-slides/rotary-positioners/metric-goniometres/55838/>. Edmund Optics, USA, [Online; accessed 2015-05-20]. 2014.
- [2] Anonymous. *Radial lens distortion*. <http://www.intechopen.com/source/html/44946/media/image17.png>. Intech - open science, [Online; accessed 2015-04-25], Obrázek ve formátu PNG.
- [3] Igor Bodlák. “Modelování a analýza broušeného kamene”. Dis. Czech Republic: Czech Technical university in Prague, 2005.
- [4] Ramani Duraiswami. *Epipolar Geometry and the Fundamental Matrix*. <http://www.umiacs.umd.edu/~ramani/cmsc828d/lecture27.pdf>. University of Maryland, [Online; accessed 2015-04-28].
- [5] R. I. Hartley a A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Second. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, 2004.
- [6] Sanjiv Singh Ivan Kirigin. *Camera calibration*. <https://www.frc.ri.cmu.edu/projects/buzzard/calibrationWrapper/index.shtml>. Robotics Institute, Carnegie Mellon University [Online; accessed 2015-04-13].
- [7] Havelna Martin. “Pořizování HDR dat”. Dis. Czech Republic: Faculty of Mathematics a Physics, Charles University in Prague, 2005.
- [8] Pohl Petr. “Simulace průletu paprsků transparentním objektem”. Dis. Czech Republic: Czech Technical university in Prague, 2002.
- [9] Radim Šára. *Canonical Perspective Camera - Pinhole Camera*. <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/TDV/2014W/lectures/tdv-2014-02.pdf>. Czech Technical university in Prague, [Online; accessed 2015-04-30].
- [10] Radim Šára. *Kalibrace radiálního zkreslení - příklady kalibračních obrazců*. https://cw.felk.cvut.cz/w/_media/courses/a4m33tdv/cviceni/rdcalibimg2.jpg. Czech Technical university in Prague, [Online; accessed 2015-04-13], Obrázek ve formátu JPG. 2010.
- [11] Radim Šára. *The Triangulation Problem*. <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/TDV/2014W/lectures/tdv-2014-06-annotated.pdf>. Czech Technical university in Prague, [Online; accessed 2015-05-01].
- [12] M. Matoušek V. Zyka R.Šára O. Sychrovský. *Balíček programů rd calibration . Zdrojový kód pro Matlab*. Center for Machine Perception. Czech Technical University in Prague, 2009.

Obsah přiloženého DVD

Přiložené DVD obsahuje soubor se spustitelnými programy na kalibraci měřicí soustavy v prostředí MATLAB, snímky z experimentů, fotodokumentaci měřicí soustavy a bakalářskou práci v PDF souboru.

Obsah DVD:

- *cut_Stone_Calibration* - spustitelné programy na kalibraci měřicí soustavy
 - *camera* - funkce pro práci s kamerou
 - *geoCalib* - funkce pro kalibraci měřicí soustavy
 - *radioCalib* - funkce pro radiometrickou kalibraci
 - *rd_calibration* - balíček funkcí pro kalibraci kamery
 - *sample* - snímky kamenů s vyhodnocenými výsledky
 - *stone* - snímky kamenů určeného ke hledání korespondencí
 - *table* - snímky pořízené při měření s kalibračním stolkem
 - *target* - snímky kalibračního obrazce
- *images* - snímky z experimentů
- *photos* - fotodokumentace měřicí soustavy
- *mt.pdf* - text bakalářské práce