

ČESKÉ
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Kybernetika a robotika

Diplomová práce

Automatické odhadování plošek broušeného kamene

Jakub Drápela

Květen 2017

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Jakub Drápela**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Automatické odhadování orientace plošek broušeného kamene**

Název tématu anglicky: **Automatic Estimation of Cut Stone Facet Orientation**

Pokyny pro vypracování:

1. Připravte přehled stavu vědění v oblasti metod pro měření tvaru broušených kamenů.
2. Navrhněte algoritmy pro odhadování orientace faset broušených kamenů z obrazů stop vycházejících z kamene ozářeného laserovým svazkem.
3. Implementujte navržené algoritmy a otestujte je na skutečných kamenech.
4. Výsledky vyhodnoťte.
5. Zdokumentujte algoritmy a experimentální výsledky.

Seznam odborné literatury:

- [1] Kutulakos, K. N., Steger, E.: A theory of refractive and specular 3d shape by light-path triangulation. International Journal of Computer Vision 76 (1), 13-29, Jan. 2008
- [2] Miyazaki, D., Ikeuchi K.: Shape Estimation of Transparent Objects by Using Inverse Polarization Ray Tracing. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (Volume: 29, Issue: 11, Nov. 2007)

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Smutný, Ph.D. (K 13133)

Datum zadání diplomové práce: 14. prosince 2016

Platnost zadání do¹: 30. září 2018

Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 14. 12. 2016

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.



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

Tímto bych chtěl poděkovat za podporu při tvorbě této diplomové 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 morální podporu a rady, které mi pomohly tuto práci realizovat.

Abstrakt

Tato práce se zabývá automatickým odhadem orientace faset broušeného kamene s využitím informace světelných svazců vystupujících z ozářeného kamene.

Vstupem do optimalizačního algoritmu je snímek s obrazy svazků na stínítku. Princip odhadu orientace faset spočívá v porovnání geometrie naměřených svazků s geometrií simulovaných svazků. Parametry simulovaného modelu kamene jsou upravovány gradientním optimalizačním algoritmem.

První část práce je zaměřena na detekci světelných stop v obraze a výpočet parametrů odpovídajících svazků. Detekce stop je založena na přítomnosti maximálně stabilních extrémních oblastí (MSER) v obraze. Druhá část obsahuje návrh algoritmů k nalezení korespondujících dvojic svazků.

Výsledky jsou demonstrovány na broušeném kamenu typu šatonová růže s 12 bočními fasetami.

Klíčová slova: počítačové vidění, MSER, sledování paprsků, hledání korespondencí, broušené kameny

Abstract

This thesis describes the automatic estimation of cut stone facet orientation with the use of information about the parallel light beam propagation.

The principle of the stone facet estimation is a comparison of simulated output beams geometry and measured beams geometry. Geometry is estimated from beam traces on the screen. Parameters of the simulated model are estimated by the gradient optimization algorithm.

The first part of thesis is focused on the light beams detection and calculating the parameters of the corresponding beams. The light beams detection is based on the presence of the maximally stable extremal regions (MSER) in the image. The second part contains the light beam matching algorithms.

The results are demonstrated on chaton rose with the twelve side facets.

Keywords: computer vision, MSER, ray-tracing, light beam matching, cut stones

Obsah

1	Úvod a motivace	1
2	Metody pro odhad tvaru kamene	2
2.1	Triangulace, polarizace a profilprojektor	2
2.2	Předchozí práce	3
3	Fyzikální model	6
3.1	Model kamene	6
3.2	Model svazku	6
3.3	Model stínítka	9
3.4	Model kamery	9
4	Detekce světelných stop v obraze	10
4.1	Jevy v obraze	10
4.2	Předchozí práce	12
4.3	MSER (maximal stable extremal region) detektor	12
4.4	Implementace	13
4.4.1	Filtrace	13
4.4.2	Detekce	13
4.4.3	Okolí stínítka	13
4.4.4	Pozadí snímku	14
4.4.5	Odstranění nežádoucích detekcí	15
4.5	Výsledek detekce	15
4.6	Určení parametrů svazku	16
4.6.1	Základní parametry	16
4.7	Detektor ocásků	18
5	Parametry kamene viva12	22
6	Nový pozorovatelný příznak svazků	23
6.1	Vzájemná rotace kamene a zdrojového svazku	23
6.2	Změna směru vystupujících paprsků	24
6.3	Modelování pohybu svazků	25
7	Terminologie	29
7.1	Simulované svazky	29
7.2	Pozorované svazky	29

8	Optimalizace orientace faset	30
8.1	Schéma optimalizačního procesu	30
8.2	Optimalizované kritérium	31
8.3	Plná vs. zjednodušená simulace	32
8.3.1	Plná simulace	32
8.3.2	Zjednodušená simulace	32
8.4	Podmíněnost	33
8.4.1	Třída svazků 1A a 1B	33
8.4.2	Třída 3A	33
8.5	Pozorování	33
8.5.1	Vzájemná poloha svazků	33
8.5.2	Orientace kamene	36
8.5.3	Zakřivení faset	36
8.5.4	Svazky s vysokou citlivostí	37
9	Korespondence svazků	38
9.1	Obtížnost úlohy	38
10	Klasifikace příznaků	42
10.1	Ground truth	42
10.2	Změna zářivého toku se změnou parametrů kamene	42
10.3	Závislost zářivého toku	43
10.4	Závislost parametrů ocásků	45
10.4.1	Směrový úhel	45
10.4.2	Velikost	46
11	Automatická optimalizace - algoritmy	47
11.1	Zavedení symbolů	47
11.2	Použité algoritmy	47
11.2.1	Korespondence svazků třídy 1A	47
11.2.2	Korespondence svazků třídy 3A	49
11.2.3	Korespondence svazků třídy 5D	50
11.2.4	Korespondence svazků podle ocásků	51
11.2.5	Korespondence svazků podle polohy v obraze a zářivého toku	52
11.3	Automatická optimalizace parametrů faset	53
12	Ověření správnosti korespondencí	55
12.1	Množiny korespondencí	55
12.2	Rozhodovací algoritmus	55
12.3	Simulace dat	56
12.4	Oddělitelnost	56
12.5	Rozdělení svazků do množin	57
12.6	Vhodné zvolení optimalizační a kritériální množiny	57

12.7 Výběr kritériální množiny	60
12.7.1 Výběr množiny kandidátů	60
13 Výsledky	62
13.1 Vybrané kameny	62
13.2 Uložení broušených kamenů při měření	62
13.3 Přesnost počátečního odhadu	62
13.4 Vyhodnocení přesnosti metody	63
14 Závěr	64
Přílohy	66
A Rozdělení svazků do tříd	66
B Nástroj pro ruční přiřazení korespondujících svazků	76
B.1 Návod k obsluze	76
B.2 Ovládací panely	77
C Obsah příložených DVD	81

Seznam obrázků

2.1	Sarine Diascan S+	2
2.2	Schéma experimentu	3
2.3	Měřicí soustava	4
3.1	Detail aproximace přechodu mezi fasetami	6
3.2	Příklad snímaného obrazu s vyznačením obrazů svazků a ocásků	7
3.3	Vznik ocásků	8
3.4	Poměrná velikost intenzity ocásku případ lomu ze vzduchu do skla	8
3.5	Poměrná velikost intenzity ocásku případ lomu ze skla do vzduchu	9
4.1	Popis objektů v obraze	10
4.2	Vliv odrazu od podstavce na pozadí snímku	11
4.3	Splynutí dvou různých svazků	11
4.4	Problémové detekce	11
4.5	Jasové řezy	12
4.6	Detekce okolí stínítka	13
4.7	Filtrace pozadí	14
4.8	Ukázka detekce světelných stop v obraze	15
4.10	Detektor ocásků - stopa v obraze	18
4.11	Detektor ocásků - detekce stopy	19
4.12	Detektor ocásků - polární graf	19
4.13	Detekce ocásků - zpracování polárního grafu	20
4.14	Detektor ocásků - příklad detekce	21
5.1	Šatonová růže s označenými fasetami a parametry. Pohled shora je zobrazen vlevo, bokorys vpravo	22
6.1	Odraz světelného paprsku od zrcadla	23
6.2	Odraz světelného paprsku od rotujícího zrcadla	24
6.3	Kritický úhel a totální odraz	24
6.4	Závislost změny lomeného úhlu na změně úhlu dopadu	25
6.5	Dráhy pohybu svazků při rotaci kamene	26
6.6	Histogram velikosti rotace vystupujících svazků	26
6.7	Kruhový histogram směru rotace svazků - <i>viva12</i>	27
6.8	Kruhový histogram směru rotace svazků - šaton	28
8.1	Diagram s principem odhadu orientace faset broušených kamenů	30
8.2	Časová náročnost simulace LADOK	32
8.3	Lom a odraz paprsku v optickém klínu	34
8.4	Obrazy svazků ve snímku	35
8.5	Svazek blízko kritického úhlu	37
9.1	Vzdálenost obrazu korespondujících svazků - fáze 0	39
9.2	Vzdálenost obrazu korespondujících svazků - fáze 1	40
9.3	Vzdálenost obrazu korespondujících svazků - konečná fáze	41
10.1	Histogram variačního koeficientu zářivého toku svazků pro data z 10 snímků různých kamenů typu <i>viva12</i>	43
10.2	Závislost zářivého toku simulovaných a pozorovaných svazků	44
10.3	Závislost zářivého toku simulovaných a pozorovaných svazků - detail	44

10.4	Odhad pravděpodobnostní funkce rozdílu směrového úhlu mezi pozorovanými a simulovanými ocásky.	45
10.5	Závislost velikosti simulovaných a pozorovaných ocásků.	46
12.1	Graf oddělitelnosti S	59
12.2	Změna kritéria korespondencí třídy 9G	61
12.3	Změna kritéria korespondencí třídy 7D	61
A.1	Svazky třídy 3C a 9J.	66
A.2	Svazky třídy 1A-6B.	73
A.3	Svazky třídy 6D-8A.	74
A.4	Svazky třídy 8B-9I.	75
B.1	Porovnání stylů vykreslení simulovaného svazku.	76
B.2	Ilustrace přiřazení simulovaného svazku ke stopě.	77
B.3	Panel s nastavením parametrů kamene.	77
B.4	Panel pro výběr množiny simulovaných svazků.	78
B.5	Panel pro volbu optimalizovaných parametrů.	78
B.6	Panel pro kontrolu korespondencí svazků.	79
B.7	Panel pro výběr optimalizační úlohy.	79
B.8	Panel pro volbu výsledků kalibrace.	79
B.9	Panel pro změnu sklonu normál faset.	80
B.10	Panel pro zobrazení výsledků optimalizace.	80

Seznam tabulek

12.1	Střední hodnota S - tabulka č. 1.	58
12.2	Střední hodnota S - tabulka č. 2.	59
12.3	Tabulka oddělitelnosti S pro třídy svazků v kritériální množině. .	60
12.4	Tabulka oddělitelnosti S pro třídy svazků z množině kandidátů. .	60
13.1	Výsledek automatické optimalizace orientace faset.	63
A.1	Dopadové fasety svazků tříd 1A-5E.	67
A.2	Dopadové fasety svazků tříd 6A-7A.	68
A.3	Dopadové fasety svazků tříd 7B-7H.	69
A.4	Dopadové fasety svazků tříd 8A-9A.	70
A.5	Dopadové fasety svazků tříd 9B-9F.	71
A.6	Dopadové fasety svazků tříd 9G-9J.	72

Kapitola 1

Úvod a motivace

Drahé kameny jsou lidstvem od pradávna vyhledávány. Jsou symbolem krásy, bohatství a moci. Z počátku se kameny leštily do oblých tvarů a stávaly se součástí šperků. S vývojem civilizace se začaly drahé kameny brousit, aby se zvýraznil lom světla a lesk minerálu. Broušením vznikaly rovinné fasety. Kombinací faset s definovanou velikostí a sklonem se vyvinuly standardní tvary jako brilliant, trilliant, rosette, baguette apod. Drahé a velmi cenné suroviny jako diamant se brousí pouze ručně. Méně cenné suroviny jsou opracovávány převážně automatickými stroji.

Cenu broušených kamenů určují čtyři základní parametry. Mezi ně patří čistota, barva, hmotnost a kvalita brusů.

Čistotu určuje množství příměsí v materiálu kamene a praskliny či vzduchové bubliny, které mohou vzniknout při tvorbě krystalu.

Broušené kameny dělíme do široké řady odstínů. Barva kamene závisí na jeho chemickém složení. Důležitá je jednotnost barvy celého kamene.

Hmotnost souvisí s velikostí kamene. U diamantů se hmotnost určuje v karátech a je natolik důležitá, že se v některých případech volí kompromis mezi hmotností a kvalitou brusů.

Brus je důležitá mechanická úprava kamene. Mezi parametry hodnotící kvalitu brusů patří kvalita povrchového opracování faset. Fasety se brousí rovinnými brusnými kotouči. Broušením mohou vzniknout rýhy, škrábance, prohlubně, abraze na hranách (zbroušení přechodu mezi fasetami), povrchová oxidace a nové fasety. Kámen je třeba brousit s vysokou přesností. Každá odchylka velikosti a úhlu fasety od ideálního tvaru zhorší optické vlastnosti kamene. Orientace faset je důležitým parametrem pro zhodnocení kvality brusů.

Jedním z nástrojů ke zkoumání optických vlastností broušeného kamene je nasvícení jeho povrchu světelným svazkem. Na fasetách broušeného kamene dochází ve zjednodušeném případě k odrazu a lomu světelného svazku. Z toho důvodu se dopadající svazek roztříští na řadu světelných svazků různých tvarů. Svazky vystupující z kamene jsou definovány směrem šíření, plochou průřezu, zářivým tokem a polarizací. Tyto svazky určují geometrii kamene.

Tato práce navazuje na dlouhodobý výzkum v Centru strojového vnímání na katedře kybernetiky Elektrotechnické fakulty ČVUT.

Cílem práce je detekovat svazky vycházející z kamene a navrhnout inverzní metodu, která z pozorovaných svazků určí geometrii kamene. Zaměříme se na broušené kameny o průměru v jednotkách milimetrů a složitějšího tvaru než čtverec.

Kapitola 2

Metody pro odhad tvaru kamene

2.1 Triangulace, polarizace a profilprojektor

3D rekonstrukce objektů je častá úloha počítačového vidění. Existuje řada sofistikovaných metod, které z více pohledů kamer vytvoří model objektu s vysokou přesností. Většina z používaných algoritmů není použitelná pro průhledné objekty, jako je broušený kámen. Pro odhad tvaru broušeného kamene musíme použít specializované metody, které uvažují zákony lomu a odrazu či polarizaci světla.

Kutulakos et al. [9] přichází s myšlenkou triangulace cesty světelného paprsku. Cestu definují pozice zdrojů světla, odrazy či lomy od rozhraní a pozice kamer. Ukazuje, za jakých podmínek lze vypočítat pozice dopadu paprsku na rozhraní zároveň s normálou tohoto elementu.

Miyazaki a Ikeuchi [8] vyhodnocují polarizace odraženého světla od měřeného objektu. Model objektu je určen na základě Fresnelových rovnic [1]. Toto měření je zdlouhavé a vyžaduje složité měřicí zařízení.

Pro měření a vyhodnocení brusu diamantů se komerčně využívají produkty firmy Sarine [14]. Optická cesta je uspořádána jako profilprojektor tzn. zdroj kolimovaného světla, kámen, kamera. Kámen se při měření otáčí okolo vertikální osy. Otáčením kamene získáme sérii mnoha snímků. Vyhodnocením snímků získáme model kamene.



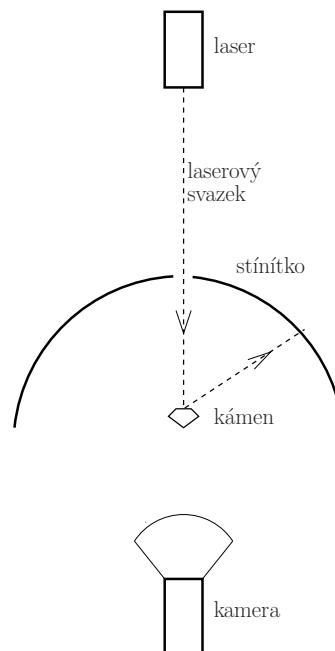
Obrázek 2.1: Sarine Diascan S+. Převzato z [13].

■ 2.2 Předchozí práce

LADOK

Základním nástrojem dlouhodobého výzkumu v Centru strojového vnímání na katedře kybernetiky Elektrotechnické fakulty ČVUT při zkoumání broušených kamenů je software LADOK [12] od Petra Pohla. Simulační program LADOK zavádí pro broušený kámen geometrický model ve formě konvexního mnohostěnu. Na povrch kamene dopadá svazek rovnoběžných paprsků světla homogenní intenzity a známého směru. LADOK simuluje odrazy, lomy a dělení svazků na povrchu kamene. Svazky po opuštění kamene mají známý směr, zářivý tok, plochu a tvar. Tento software rozšířil Igor Bodlák [6] o výpočet polarizace. Matematický model kamene obohatil Martin Straka [15]. Přechody mezi fasetami modeloval jako posloupnost většího počtu menších faset.

Software LADOK simuluje experiment na obr. 2.2. V tomto experimentu je zdrojem světla laser. Laserový svazek dopadá na broušený kámen, kde se roztrhne na mnoho menších svazků. Ty jsou po opuštění kamene zachyceny na stínítku. Stínítko snímáme kamerou a získáváme obraz svazků na stínítku ve formě digitálního obrazu.

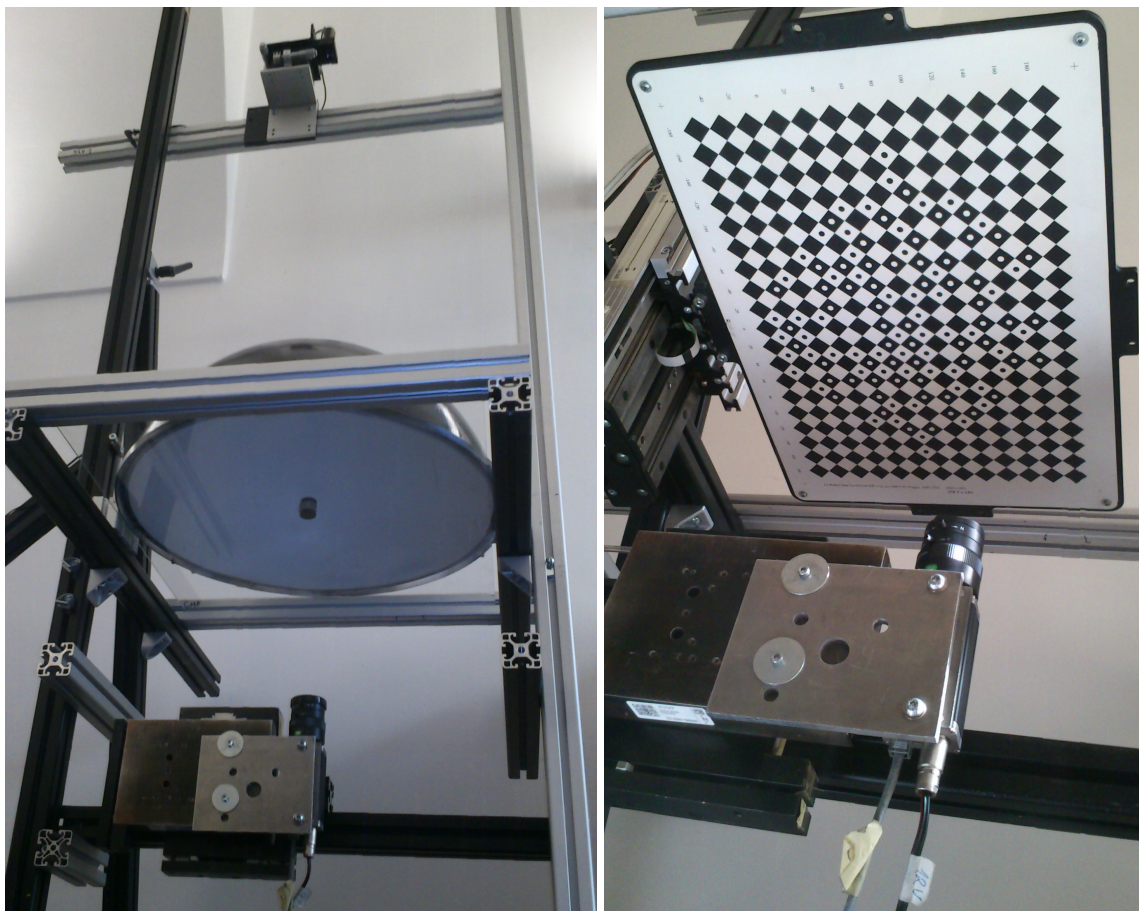


Obrázek 2.2: Nákres principu experimentu. Laser produkuje svazek světla, který dopadá na celou plochu kamene. V kameni se svazek rozdělí na mnoho svazků. Svazky vystupující z kamene v horní polovině dopadnou na stínítko. Stínítko snímá kamera. Převzato z [7].

2.2 PŘEDCHOZÍ PRÁCE

Měřicí soustava

Experimentální soustavu máme sestavenou (obr. 2.3) a zkalibrovanou [7]. Výstupem experimentu je snímek s obrazy svazků. Všechny příklady snímků v této práci jsou vykresleny v invertované podobě. Z [7] známe transformaci mezi obrazem svazku na stínítku a směrem, ve kterém opouští kámen.



Obrázek 2.3: Experimentální soustava pro zachycení svazků vycházejících z kamene ozářeného laserovým svazkem. Vlevo: sestavená měřicí soustava. Zdroj laserového svazku je umístěn v horní části. Laserový svazek prochází otvorem ve stínítku a dopadá na kámen položený na podstavci. Svazky vycházející z kamene v horní polovině dopadnou na půlkulové stínítko. Podstavec a stínítko jsou položeny na skleněné tabuli. Obraz stínítka snímá kamera. Vpravo: sestavení soustavy při kalibraci kamery. Převzato z [7].

LAM

Igor Bodlák [5] umožnil porovnání dat reálného experimentu s výsledky počítačové simulace. Navrhl optimalizaci kritéria hodnotící rozdíl vzdálenosti stop z experimentu a odrazů stop simulace na stínítku. Optimalizovaly se parametry faset kamene a kámen se tak deformoval, aby se dosáhlo co nejlepší shody v zadaném kritériu. Software pro řešení inverzní úlohy nazval zkratkou LAM.

LAM byl použitelný pouze pro broušený kámen čtvercového tvaru. Z důvodu složitosti přiřazení stop z experimentu k obrazům simulovaných svazků při osvětlení celého kamene se v LAMu zaměřil vstupní laserový svazek pouze do určitých míst kamene. Tím vzniklo redukované množství svazků a korespondence se simulovanými svazky se výrazně zjednodušila. Nevýhodou tohoto přístupu jsou rozměry kamene, které musí být několikanásobně větší než průměr laserového svazku. Metoda je prakticky nepoužitelná pro kameny o rozměrech v jednotkách milimetru.

Příspěvek práce

V této práci osvítime laserovým svazkem celý kámen. Zaměříme se na kameny šatonové růže s plochým spodkem a 12 bočními fasetami. Tyto kameny se ve zkratce nazývají *viva12*. Rozměry kamenů budou v řádech milimetrů.

K robustní detekci obrazu svazků z digitálního obrazu použijeme MSER detektor [10]. Z výsledku detekce určíme parametry stop. Sestavíme program, pomocí kterého bude možno manuálně párovat obrazy svazků broušeného kamene se simulovanými stopami.

Optimalizací z LAMu získáme náklony faset. Parametry svazků prozkoumáme pomocí cílených experimentů. Navrhne algoritmus pro *viva12*, který určí automaticky orientaci faset kamene. Výstupem programu budou odchylky úhlů faset kamene od jejich ideální pozice.

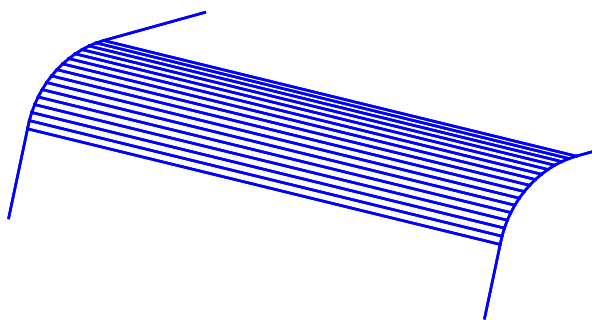
Kapitola 3

Fyzikální model

3.1 Model kamene

Broušený kámen je modelován jako konvexní mnohostěn [12]. Brusné kotouče považujeme za dokonale rovinné. Uchycení kamene při broušení zjednodušíme na absolutně tuhé bez známek pružnosti či ohybu. Fasety potom můžeme modelovat jako rovinné plochy. Orientace a umístění fasety získáme z výkresu nebo předchozího měření.

Přechody mezi fasetami jsou v ideálním případě ostré hrany. Z důvodu abraze hran v procesu výroby kamene jsou hrany obroušeny do přibližně oblého tvaru. K přiblížení modelu reálnému obroušení hran aproximujeme hranu množstvím rovinných faset se vzájemnou polohou odpovídající poloměru křivosti hrany.



Obrázek 3.1: Detail aproximace přechodu mezi fasetami.

3.2 Model svazku

Svazek světla v LADOKU reprezentuje nerozbíhající se konvexní hranol. Vlivem odrazu a lomu se konvexní tvar zachová. Fasety jsou také konvexní, proto se konvexita zachová i při štěpení svazku. Po opuštění kamene jsou svazky definovány zářivým tokem, plochou a směrem, které lze vyjádřit pomocí azimutu a elevace. Stokesovy koeficienty definují polarizaci svazku [6].

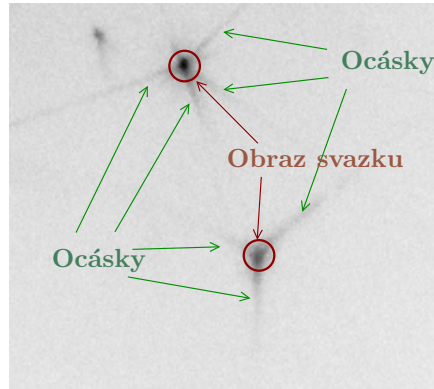
Zaznamenána je celá cesta svazku. V každém bodě trasy známe směr a tvar svazku vyjádřený pomocí polygonu.

Model nepostihuje situace, při kterých dochází k rozbíhavosti světla.

- Pokud jsou v materiálu přítomné nečistoty, praskliny, vzduchové bubliny apod., světelný svazek se rozptýlí.
- Rozptyl světelných svazků vzniká také vlivem nedokonalého vyleštění faset, a to jak při lomu tak při odrazu.
- Přítomnost hran v kameni způsobí ohyb světla (difrakci) [2].

Ocásky

V ideálním případě lze ve snímaném obraze pozorovat pouze dopady světelných svazků, které vznikly kombinací odrazů a lomů zdrojového svazku od faset broušeného kamene. U reálného kamene ovšem v obraze pozorujeme tenké slábnoucí přímky vycházející ze stopy světelného svazku, ocásky. Tyto ocásky vznikají díky lomu/odrazu světelného svazku od neostrých hran broušeného kamene.



Obrázek 3.2: Příklad snímaného obrazu s vyznačením obrazů svazků a ocásků.

Vznik ocásků si ukážeme při lomu světla na oblé hraně kamene. Situaci budeme uvažovat v 2D prostoru, kde platí obecně stejné principy jako ve 3D. Světlo nahradíme paprsky světla se směrem šíření \vec{v}_i .

Zvolíme dvě fasety svírající úhel 45° . Přechod mezi fasetami aproximujeme. Vznikne posloupnost úseček, které propojují fasety. Každé úsečce přiřadíme normálový vektor \vec{n} .

Aplikací Snellova zákona a zákona odrazu na \vec{n} a \vec{v}_i vypočítáme směr lomu a odrazu světelných paprsků.

Z Fresnelových rovnic [1] víme, že dochází nejen k lomu světla, ale část světla se odrazí. Poměr intenzity odraženého a lomeného světla závisí na polarizaci světla a dopadajícím úhlu. V této ukázce uvažujeme nepolarizované světlo.

Na obr. 3.3 dopadají paprsky světla ze vzduchu na sklo i ze skla do vzduchu. V obou případech se odražené i lomené paprsky projeví na stínítku jako ocásky.

Pokusíme se prozkoumat jak se mění intenzita ocásku v závislosti na úhlu β . Úhel β uvádí absolutní úhlovou odchylku směru odraženého, resp. lomeného svazku na hraně od směru odraženého, resp. lomeného svazku přes fasetu **1**.

Pro úhel β určíme poměr intenzity ocásku I_β a intenzity dopadajícího paprsku I_0 .

$$\frac{I_\beta}{I_0} = \frac{\rho_{max}}{\rho_\beta} \cdot R_\beta \quad (3.1)$$

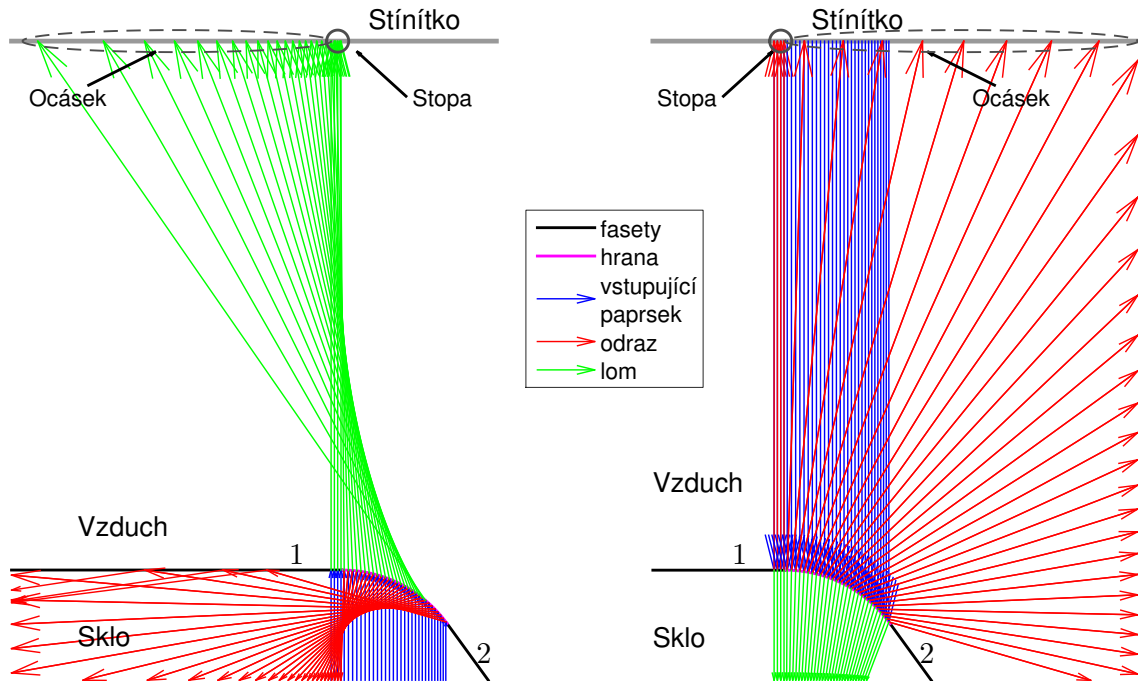
pro odražené paprsky a

$$\frac{I_\beta}{I_0} = \frac{\rho_{max}}{\rho_\beta} \cdot (1 - R_\beta) \quad (3.2)$$

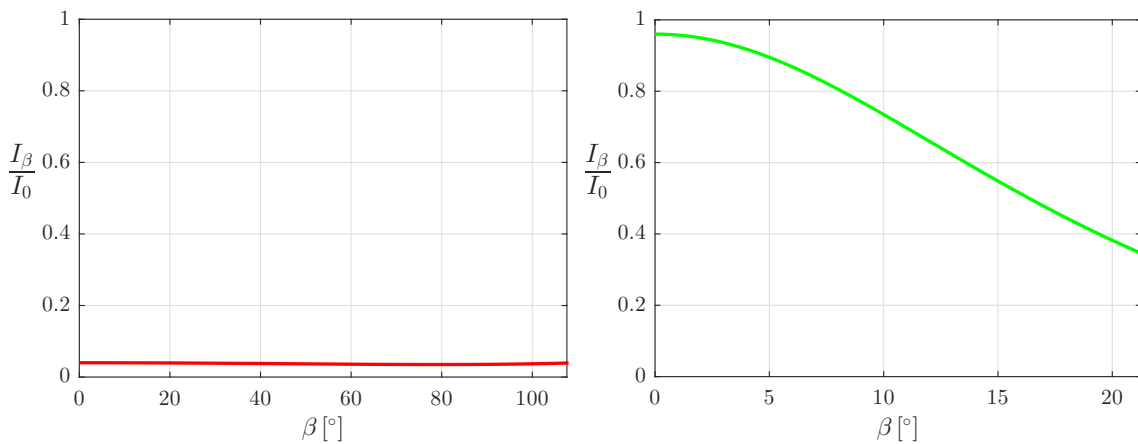
pro lomené paprsky, kde

- ρ_β - hustota paprsků pro daný úhel β ,
- ρ_{max} - maximální hustota paprsků,
- R_β - odrazivost z Fresnelových rovnic [1].

3.2 MODEL SVAZKU



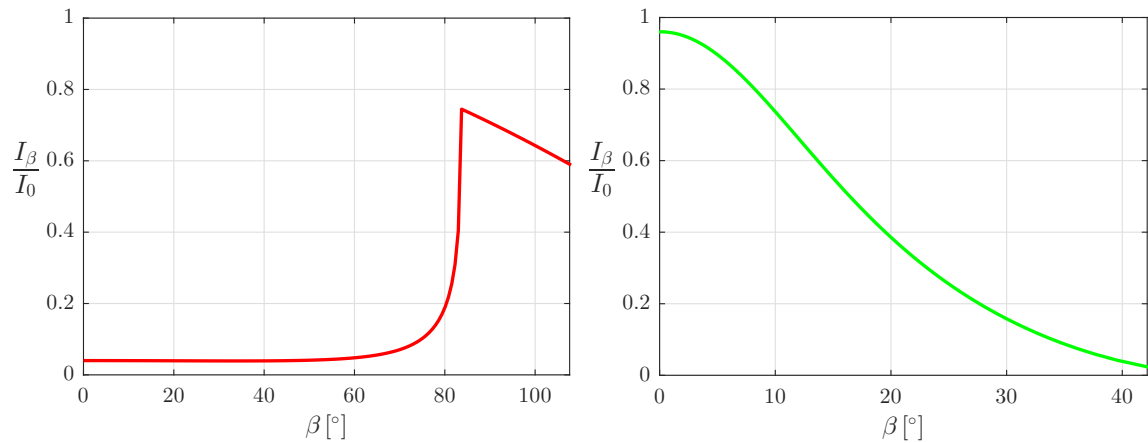
Obrázek 3.3: Vznik ocásků na stínítku při dopadu světelných paprsků na hranu mezi fasetami 1 a 2. Vlevo: paprsky se lámou ze skla do kamene. Vpravo: paprsky se lámou ze vzduchu do skla. Situace pro index lomu vzduchu $n_a = 1$ a index lomu skla $n_g = 1.5$.



Obrázek 3.4: Poměrná velikost intenzity ocásků v závislosti na úhlu β pro případ lomu ze vzduchu do skla. Vlevo: odraz. Vpravo: lom.

Z grafů 3.4 a 3.5 je patrné, že ocásky budeme pozorovat různě dlouhé a z vysokou variabilitou z hlediska intenzity.

Intenzita a délka ocásku je ovlivněna i dalšími faktory, jako je např. délka a ostrost hrany. Všechny faktory, které ovlivňují intenzitu ocásku, prozatím nejsme schopni v programu LA-DOK zahrnout do matematického modelu, proto pro prování svazků bude užitečná především informace o směru ocásku.



Obrázek 3.5: Poměrná velikost intenzity ocásků v závislosti na úhlu β pro případ lomu ze skla do vzduchu. Vlevo: odraz. Vpravo: lom.

Třídy svazků

Svazky jsou definovány podle posloupnosti dopadových faset. Tento způsob popisu při opakovaném použití není přehledný. Pro lepší orientaci svazky rozdělíme do tříd a budeme pracovat pouze s názvem třídy. Rozdělení do tříd je v příloze A.

■ 3.3 Model stínítka

Po dopadu laserového svazku na stínítko se záření difuzně odrazí. Odrazivé vlastnosti materiálu závisí na úhlu dopadajícího světla a lze je matematicky popsat pomocí modelu zvaného BRDF (Bidirectional reflectance distribution function). Část rozptýleného světla dopadne na stínítko do okolí ostatních stop.

■ 3.4 Model kamery

Použitý CCD snímač má 2050×2050 pixelů. Každému pixelu odpovídá jeden samostatný snímač, který funguje na principu počítání přicházejících fotonů po dobu expozice. Počet přicházejících fotonů v daném časovém intervalu se řídí Poissonovým rozdělením. Pravděpodobnost, že napočítáme n fotonů je

$$P(X = n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}, \quad (3.3)$$

kde λ je střední hodnota a X náhodná veličina, která popisuje dopad fotonů na snímač.

Kapitola 4

Detekce světelných stop v obraze

4.1 Jevy v obraze

Pro analýzu vlastností broušeného kamene je důležité detekovat světelné stopy vzniklé dopadem laserových svazků na stínítko. Zároveň je třeba určit parametry stop, které se budou porovnávat s parametry svazků matematického modelu kamene.

Intenzitu pixelu I můžeme vyjádřit pomocí Poissonova rozdělení jako

$$I = \text{Pois}(I_s + I_p + I_o), \quad (4.1)$$

kde I_s reprezentuje příspěvek světelného svazku, I_p intenzitu pozadí a I_o intenzitu světelných ocásků. Jedním z úkolů detektoru je oddělit pozadí od zbývajících složek intenzit.

Jednoduchým postupem pro určení intenzity pozadí by bylo prahování obrazu nad konstantní úrovní. V našem obraze však typicky konstantní není (kapitola 3.3).

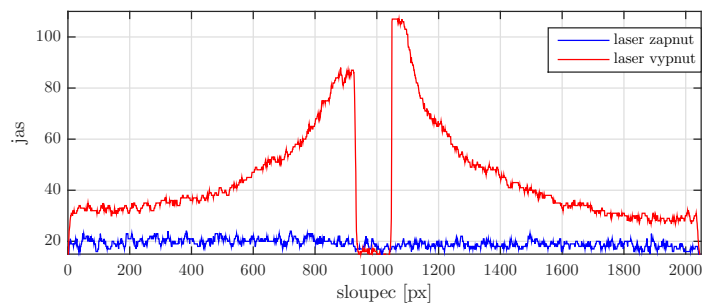


Obrázek 4.1: Popis objektů v obraze.

Rozdílné pozadí se může také vytvořit odrazem zdrojového svazku od jiných předmětů, než broušeného kamene. Hlavním příspěvkem je v tomto případě odraz od podstavce, na který pokládáme broušený kámen (obr. 4.8).

Hodnotu pozadí potřebujeme znát, abychom ze snímku mohli vypočítat světelný tok pro jednotlivé dopadající laserové svazky. Určení intenzity pozadí v každém pixelu komplikuje obraz podstavce na kámen a okolí stínítka. Zde je intenzita světla podstatně nižší, než na povrchu stínítka. Vysoká změna jasu v obraze komplikuje určení pozadí.

V okolí stínítka můžeme detekovat falešné svazky, které je třeba odstranit.



Obrázek 4.2: Jasové úrovně ve vybraném řádku obrazu. Řádek protíná obraz podstavce. V případě červené charakteristiky dopadá na podstavec laserový svazek, rozptyluje se a dopadá na stínítko. Modrou charakteristiku pozorujeme, pokud je laser vypnutý.

Světelné stopy se mohou překrývat. Pro odlišení příspěvků jednotlivých svazků je třeba obraz prahovat v několika úrovních jasu.

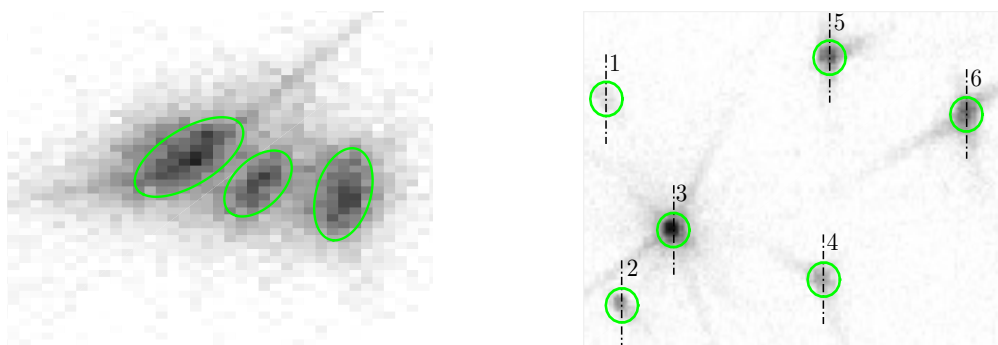
V místě, kde je vysoká koncentrace svazků mohou svazky dopadnout tak blízko sebe, že splynou v jednu stopu (obr. 4.3).



Obrázek 4.3: Ilustrace slynutí dvou různých svazků. V pravém i levém snímku se nachází typově stejné laserové svazky. Na levém obrázku dopadly na stínítko příliš blízko sebe. V tomto případě nejsme schopni rozlišit příspěvek obou svazků a detekujeme pouze jednu stopu.

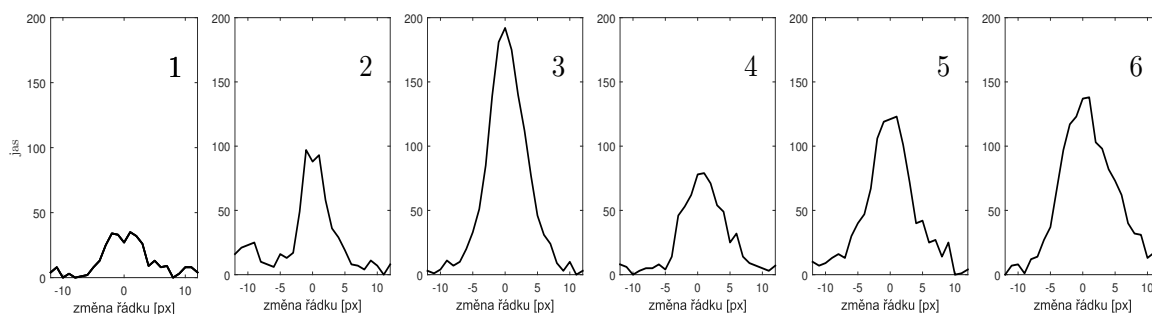
Obraz je třeba filtrovat. Filtrováním snížíme šum v odraze, ale zároveň zmenšíme kontrast mezi stopami.

Ne všechny svazky vystupující z kamene je možné detekovat. Svazky s vícenásobným odrazem postupně ztrácí zářivý tok. Po dopadu na stínítko mohou být nerozlišitelné od šumu a jejich detekce je prakticky nemožná. Pro stopy s nízkým jasem bude detekce často selhávat.



Obrázek 4.4: Problémové detekce. Nalevo jsou laserové stopy blízko u sebe. Stopy je nutné od sebe oddělit. Na pravém snímku jsou znázorněny výrazné rozdíly mezi velikostí a intenzitou stop. Je nutné použít víceúrovňový detektor.

4.3 MSER (MAXIMAL STABLE EXTREMAL REGION) DETEKTOR



Obrázek 4.5: Jasové řezy ve totožném sloupci obrazu. Řez protíná pixel s maximální hodnotou jasu ve stopě. Číslování řezů odpovídá indexům stop na obr. 4.4.

4.2 Předchozí práce

V předchozí práci [7] jsme neměli možnost detekovat stopy s nízkým jasem. Překrývající se svazky nebylo možné oddělit.

Bohatší pojetí problému se objevilo v Bodlákově práci [5]. Snímek se prahoval více než jedním prahem. Z oblastí nad prahem se sestavila stromová struktura. Světelné stopy se určily jako listy stromu s dostatečnou významností. Tento přístup je však pro svou výpočetní náročnost nepoužitelný pro snímky s rozlišením 2050×2050 , které máme k dispozici.

Naše úloha detekce je velmi podobná detekci hvězd a galaxií v astronomických snímcích. V oblasti astronomie se hojně používá program s názvem Source Extractor [4]. Tento program má za sebou dlouholetý vývoj, je optimalizován z hlediska rychlosti a odzkoušený širokou veřejností. Tento software lze po naladění parametrů použít i pro náš případ. Nevýhodou však je, že nelze spustit v operačním systému Windows, který využíváme.

Po testu různých detektorů jsme se rozhodli pro detekci laserových stop v obraze využít relativně nový přístup uvedený J. Matasem et al. [10] v roce 2002 – MSER detektor.

4.3 MSER (maximal stable extremal region) detektor

MSER detektor hledá v obraze maximálně stabilní extrémní oblasti. Původně byl využit pro robustní nalezení korespondencí mezi dvěma snímky stejného objektu pořízených z různého místa a v současné době se používá v mnoha oblastech počítačového vidění.

Princip spočívá v několikaúrovňovém prahování obrazu podle intenzity a nalezení spojitých oblastí, které jsou nad či pod prahovou hodnotou. Mezi úrovněmi jsou nalezeny korespondující oblasti a za MSER oblasti jsou označeny ty, jejichž velikost z předchozí úrovně se se zvyšující úrovní příliš nezměnila.

Výhodou MSER detektoru je invariance vůči afinní transformaci intenzity a vůči změně měřítka, což umožňuje současnou detekci malých a velkých oblastí s různou intenzitou. Podle studie [11], která porovnává MSER detektor s ostatními typy detektorů významných oblastí, dosáhl MSER detektor skvělých výsledků v detekci oblastí s vysokou hustotou a variabilní změnou velikosti. MSER detektor se tedy zdá být vhodným kandidátem pro detekci laserových stop v obraze.

4.4 Implementace

4.4.1 Filtrace

Nejprve se pokusíme minimalizovat Poissonův šum v obraze. Šum redukuje konvolucí s maskou, která se skládá z prvků odpovídajících Gaussově funkci. Parametry filtru: velikost masky – 3 px, směrodatná odchylka $\sigma = 0.7$ px.

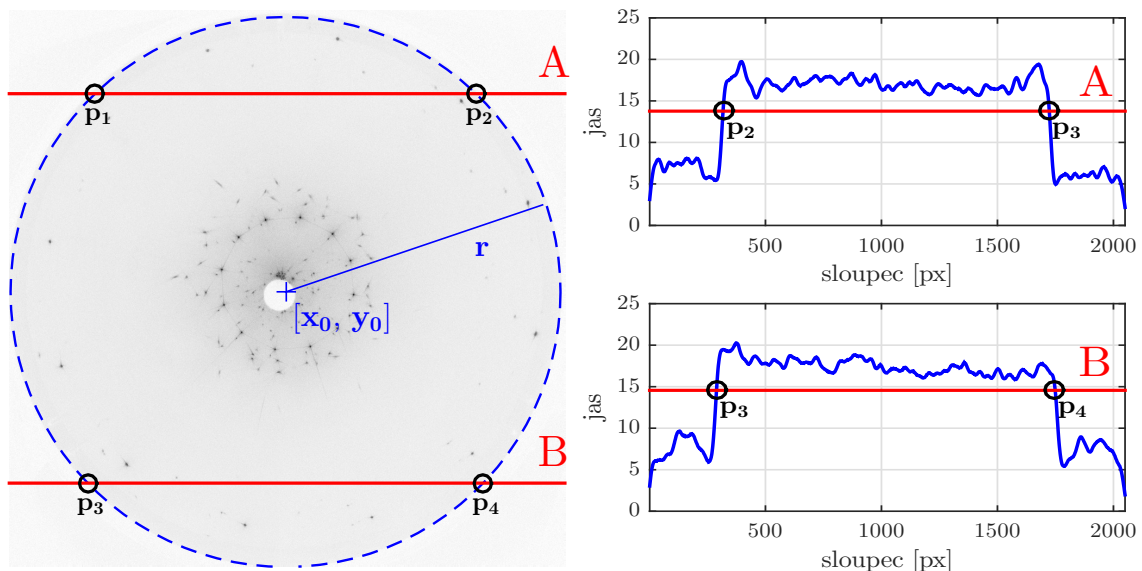
4.4.2 Detekce

Dalším krokem je detekce MSER oblastí ve filtrovaném snímku. MSER detektor je již implementován v prostředí MATLAB ve funkci *detectMSERFeatures*. Pro aplikaci této funkce na snímek se světelnými stopami je třeba nastavit základní parametry detektoru. Mezi ně patří frekvence prahování snímku, maximální a minimální velikost MSER oblasti a dostatečná stabilita oblasti.

- **Frekvence prahování snímku.** – Určuje velikost kroku mezi prahovacími úrovněmi jasu (obr. 4.9). Prahování se používá pro nalezení extrémních oblastí, na kterých se testuje stabilita.
- **Dostatečná stabilita oblasti.** – Velikost stabilní oblasti se při změně úrovně prahu intenzity příliš nemění.

4.4.3 Okolí stínítka

Okraj stínítka má tvar kružnice. Kružnici popisuje funkce $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$, kde $[x, y]$ je bod na kružnici, $[x_0, y_0]$ střed kružnice a r její poloměr. Je zřejmé, že k určení parametrů kružnice potřebujeme nalézt minimálně 3 body ležící na kružnici.



Obrázek 4.6: Jasové řezy A a B. Detekujeme body na kružnici p_1 , p_2 , p_3 a p_4 . Metodou nejmenších čtverců odhadneme parametry kružnice x_0 , y_0 a R .

Body na kružnici nalezneme pomocí sečen. Sečny sestrojíme ve dvou řádcích snímku. Sestrojením sečny získáme jasový řez v celé šířce snímku. Fotonový šum jasu vyfiltrujeme

4.4 IMPLEMENTACE

konvolucí s Gaussovým filtrem. Velikost filtru volíme 21 px a směrodatnou odchylku $\sigma = 20$ px.

Vyfiltrovaný jas oddělíme prahem. Práh určuje střední hodnota jasu v daném řezu. Nalezneme sloupce, kde je jas vyšší než prahové hodnoty. Sloupec s minimálním resp. maximálním počtem pixelů určuje bod na kružnici.

Každá sečna protíná kružnici ve dvou bodech, proto dostaneme celkem čtyři body na kružnici. Parametry kružnice určíme metodou nejmenších čtverců.

Okolí stínítka poté definuje funkce

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 > r^2. \quad (4.2)$$

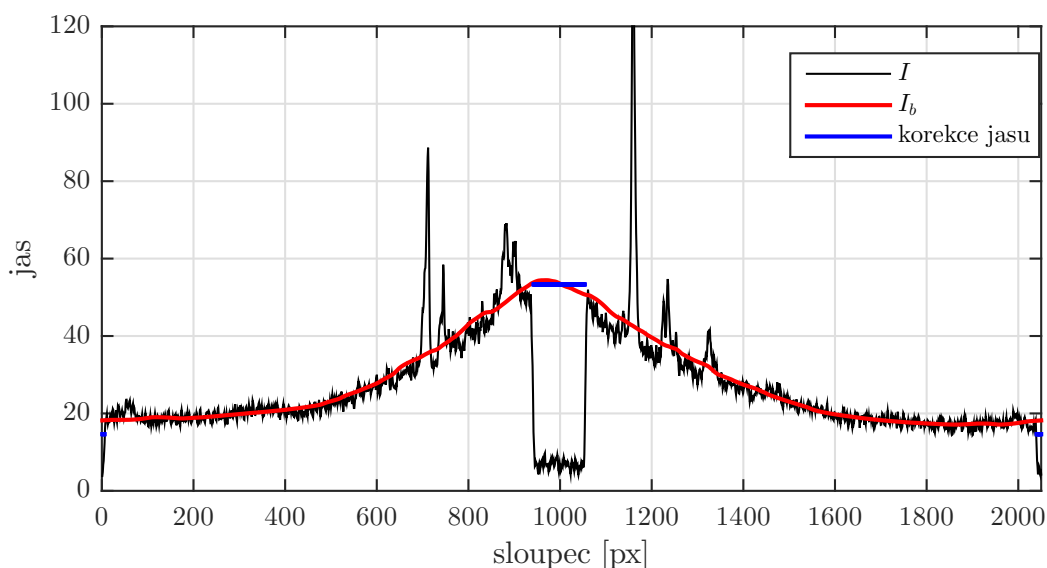
4.4.4 Pozadí snímku

V obraze nalezneme podstavec a okolí stínítka. Podstavec je specifický nízkou střední hodnotou jasu a jeho obraz je téměř ideální kruh. V seznamu MSER oblastí proto podstavec snadno nalezneme. Okolí stínítka již známe (kap. 4.4.3).

Velikost jasu v okolí stínítka nastavíme na hodnotu odvíjející se od střední hodnoty jasu snímku. Jas pixelů v oblasti podstavce nastavíme na střední hodnotu jasu pixelů v blízkém okolí podstavce.

Pozadí následně určíme konvolucí s Gaussovým filtrem. Tento filtr ignoruje vysoké změny jasu v obraze. Parametry filtru: velikost masky – 201 px, směrodatná odchylka $\sigma = 201$ px.

Samotná konvoluce s tímto filtrem by s použitím standardní funkce `conv2` byla příliš časově náročná, proto konvoluci provádíme efektivnějším způsobem, který využívá rozkladu masky filtru na singulární čísla.



Obrázek 4.7: Filtrace pozadí v HDR snímku znázorněná v řádku obrazu protínajícím obraz podstavce na kámen.

■ 4.4.5 Odstranění nežádoucích detekcí

Výstupem detektoru je soubor MSER oblastí. U výrazné světelné stopy dostaneme data ve formě pyramidy MSER oblastí podle jednotlivých úrovní intenzity.

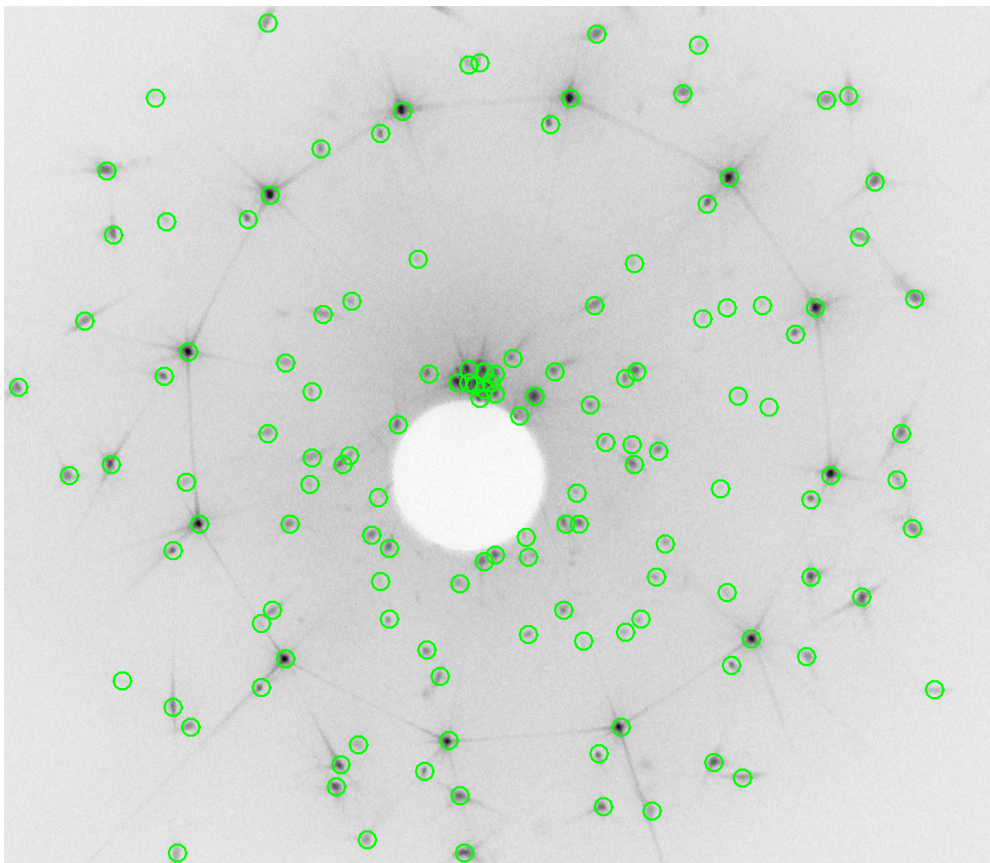
MSER detektor však najde nejen oblasti s výrazně vyšší intenzitou, ale i oblasti s nižší intenzitou než okolí. Ty je třeba vyřadit, protože nerepresentují světelnou stopu, kterou hledáme.

K odstranění nežádoucích detekcí použijeme následující postup.

1. Od filtrovaného snímku odečteme pozadí.
2. Ve vzniklém snímku vypočítáme střední hodnotu jasu MSER oblastí.
3. Pokud je střední hodnota jasu záporná, MSER oblast odstraníme.

■ 4.5 Výsledek detekce

Úspěšnost detekce světelných stop v obraze navrženého detektoru je srovnatelná s výsledkem detekce programu *Source Extractor* [4]. Použití MSER detektoru je oproti [4] výhodné v tom, že přesně vymezuje oblast v obraze, kde se stopa nachází. Toho využíváme k určení parametrů svazků (kapitola 4.6 a 4.7). Ukázka detekce je na obrázku 4.8.



Obrázek 4.8: Ukázka detekce světelných stop v obraze.

4.6 Určení parametrů svazku

Základním parametrem svazku je směr šíření popsáný azimutem a elevací. Směr šíření svazku snadno dopočítáme, pokud nalezneme jeho obraz. Pozici světelné stopy v obraze lze určit jako polohu pixelu s maximálním jasem v detekované oblasti. Šum v obraze situaci komplikuje. Z obr. 4.5 vidíme, že pixel s maximálním jasem nemusí vždy určovat pozici dopadu a navíc nemusí být unikátním maximem.

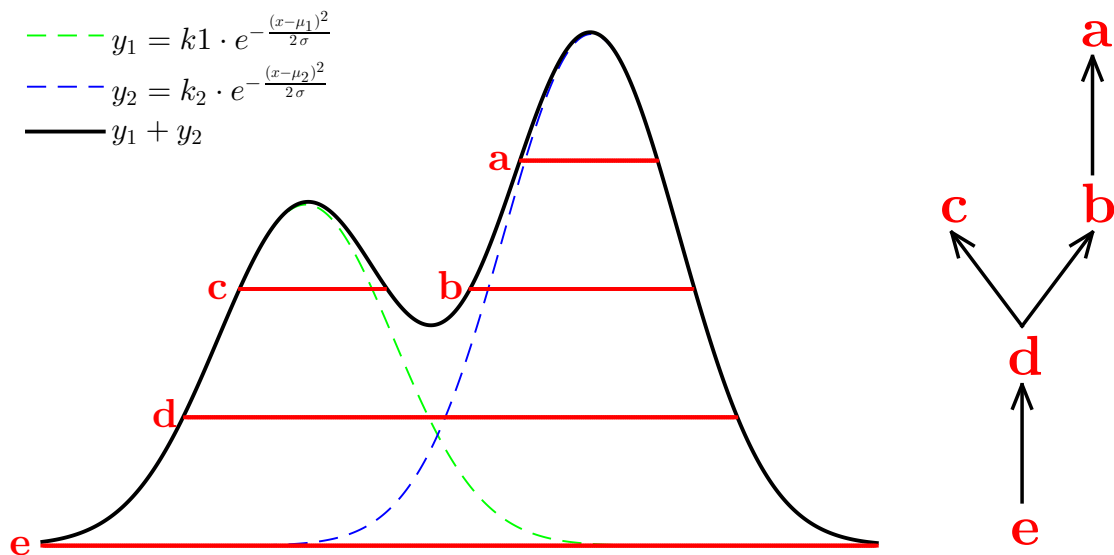
Velikost obrazu měřeného svazku závisí především na jeho rozbíhavosti. Svazek od opuštění kamene do dopadu na stínítko vlivem rozbíhavosti několikanásobně zvýší svoji plochu, a proto nejsme schopni určit plochu svazku. Ze stejného důvodu nemůžeme u měřeného svazku odečítat intenzitu. Za předpokladu, že rozbíhavost svazků není příliš velká, se zářivý tok svazku zachová a můžeme jej po odečtení pozadí vypočítat.

V okolí obrazu svazků jsou patrné ocásky. Detekce ocásků a jejich klasifikace je popsána v samostatné kapitole 4.7.

Rozbíhavost svazků nemusí být ve všech směrech stejná. Na stínítku tak svazky tvoří stopy různých tvarů. Tvar stopy definujeme pomocí 3 parametrů.

4.6.1 Základní parametry

Máme detekované MSER oblasti. Nalezneme průniky oblastí a sestavíme stromovou strukturu. Kořenem stromu bude oblast s největší plochou a postupně se budou přidávat oblasti menší. Princip je patrný z 2D pohledu na prahovací úroveň MSER detektoru v obr. 4.9, kde vidíme i princip tvorby stromu. Výsledkem bude řada stromů s různým počtem listů. Počet všech listů určuje počet detekovaných stop v obraze.



Obrázek 4.9: Ilustrace překrytí stop v 2D řezu. Výsledná charakteristika je součtem dvou Gaussových funkcí. Červeně jsou zakresleny prahovací úrovně MSER detektoru. Vpravo vidíme stromovou strukturu MSER oblastí a-f. Kořenem stromu je vrstva e. Vrstva d je jediný vnitřní uzel stromu. Listy představují vrstvy c a a. Důležité jsou podstromy e→d, c, b→a.

Cíleně prohledáváme jednotlivé stromy a nalézáme uzly, ze kterých počítáme parametry svazků.

- **Azimut a elevace** – Pozici dopadu světelného svazku určíme jako střed eliptické aproximace oblasti odpovídající listu stromu. Pomocí transformace z [7] získáme azimut a elevaci.
- **Zářivý tok** – Od filtrovaného snímku odečteme pozadí (obr. 4.7) a získáme snímek, ze kterého budeme odečítat intenzitu pixelů. Algoritmus výpočtu zářivého toku je následující:

1. t_0 = původní strom; $i = 0$; $q = 0$; n_0 = počet listů v t_0 ;
2. Ve stromu t_i nalezneme podstromy τ_1, \dots, τ_n maximální velikosti bez vnitřních uzlů stromu t_i a obsahující jeden list stromu t_i .
3. Nalezneme kořeny ξ_1, \dots, ξ_n podstromů τ_1, \dots, τ_n . Kořeny odpovídají oblastem s množinou pixelů $\mathbb{M}_{q+1}, \dots, \mathbb{M}_{q+n}$.
4. Pokud $i = 0$ vypočítáme zářivý tok

$$\sum_{k=1} \phi_{e_j} = \frac{\sum_{k \in \mathbb{M}_j} I_k}{N_j}, \quad j \in \{1, \dots, n_0\} \quad (4.3)$$

kde I_k je jas pixelu k ve snímku a N_j je počet pixelů v množině \mathbb{M}_j . Index j odpovídá indexu stopy ve stromu t_0 .

Pokud $i > 0$ nalezneme množiny $\mathbb{P}_1, \dots, \mathbb{P}_n$. \mathbb{P}_l je množina indexů listů, které jsou v t_0 potomkem uzlu ξ_l , kde $l \in 1, \dots, n$. Zářivý tok stop upravíme.

$$\phi_{e_j} = \frac{\phi_{e_j} \frac{\sum_{\{k \in \mathbb{M}_{q+l} \cap \{\mathbb{M}_1^c \cup \mathbb{M}_2^c \cup \dots \cup \mathbb{M}_q^c\} \mid \{1, 2, \dots, q\} = \mathbb{P}_l\}} I_k}{\sum_{q \in \mathbb{P}_l} \phi_{e_q}}}{N_{q+l}} + \phi_{e_j} \quad j \in \mathbb{P}_l \quad (4.4)$$

5. $i = i + 1$; $q = q + n$;
 6. Pokud $n \neq 1$ odstraníme podstromy τ_1, \dots, τ_n z grafu t_{i-1} , získáme strom t_i a opakujeme od kroku 2.
- **Tvar** – Pro každou MSER oblast je určena elipsa, která uzavírá danou oblast. U této elipsy lze určit orientaci a velikost hlavních poloos.

Každé stopě odpovídá jeden list stromu. Nalezneme cestu \mathcal{C} , která je cestou od kořene k listu.

Orientace je určena jako medián orientací elips všech MSER oblastí v cestě \mathcal{C} . Velikosti hlavních poloos jsou určeny podle MSER oblasti, která je uprostřed cesty \mathcal{C} .

4.7 Detektor ocásků

Se znalostí směru a velikosti ocásků detekovaných svazků dostáváme nové informace, které mohou přispět k jejich správnému párování se svazky z matematického modelu kamene.

Ve snímaném obraze nelze rozpoznat všechny vznikající ocásky, ale pouze ty s dostatečně velkou intenzitou.

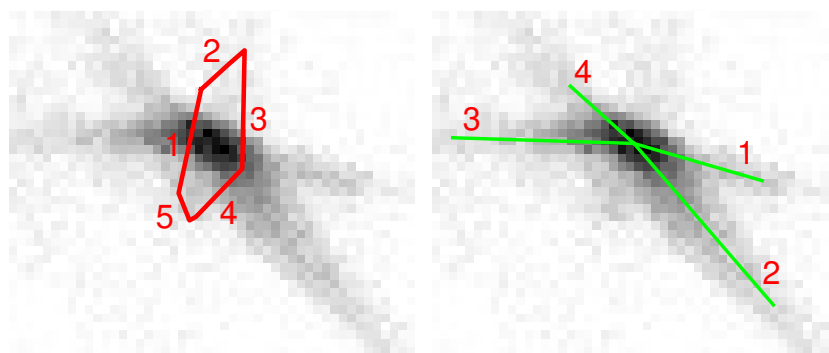
Princip detektoru ocásků zjednodušeně spočívá v převodu okolí stopy do polárních souřadnic (vzdálenost ρ a směrový úhel ϕ) a nalezení směru, kde je patrný výrazný vzestup intenzity jasu oproti okolí. Zvýšená intenzita jasu je typicky důsledkem přítomnosti ocásku v obraze.

Abychom mohli rozvinout okolí stopy do polárního grafu, musíme si být vědomi překážek komplikující detekci ocásků.

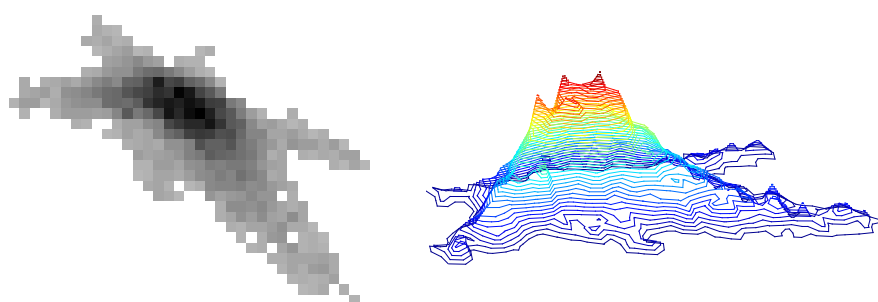
- V blízkém okolí jedné stopy se může nacházet další stopa. V polárním grafu se tato blízká stopa jeví jako ocásek a dochází k falešné detekci.
- Různé stopy a ocásky mají v obraze různou velikost. Je třeba efektivně určovat vzdálenost ρ , do které budeme převádět okolí stopy do polárního grafu. Pokud zvolíme malé ρ , nepokryjeme oblast, kde se vyskytují ocásky. Příliš velké ρ zvýší časovou náročnost výpočtu.
- Polární graf je citlivý na určení pozice dopadu svazku.

Elegantní řešení přináší použití MSER detektoru, pomocí něhož získáme vymezení oblasti, a tím i vzdálenosti ρ , kde se stopa i s ocásky nachází. Se znalostí oblastí náležící jednotlivým stopám jsme schopni od sebe stopy částečně oddělit a redukovat množství falešných detekcí. Na druhou stranu sousední stopa může ležet na pozici ocásku a odstraněním sousední stopy odstraníme současně i ocásek, který prozatím nejsme schopni v případě překrytí oddělit. Vzhledem k rozmanitosti stop, co do velikosti, intenzity, množství a tvaru ocásků apod., není jednoduché stopu matematicky modelovat. Pokud by se podařilo vytvořit dostatečně přesný kompaktní model stopy, je možné uvažovat o situaci, kdy budeme schopni od sebe separovat překrývající se stopy a ocásky.

Pro znázornění postupu a mezivýsledků jsme si vybrali laserovou stopu (obr. 4.10, 4.11), která v obraze nekoliduje s další výraznou stopou. Zvolená stopa vznikla dopadem svazku třídy 6C. V obraze jsou patrné čtyři ocásky různé intenzity.



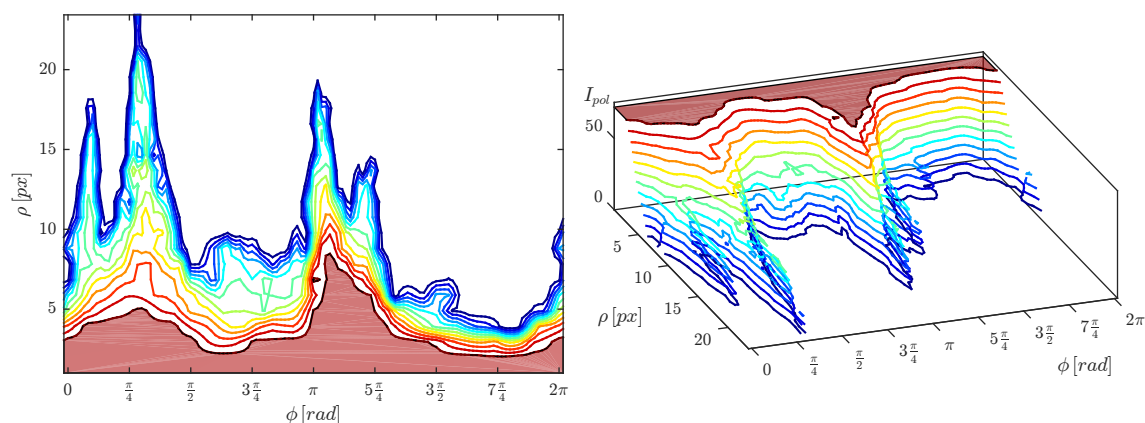
Obrázek 4.10: Vybraná světelná stopa k ilustraci algoritmu k detekci ocásků. Stopa vznikla dopadem svazku třídy 6C na stínítko. Vlevo: 70× zvětšený polygon simulovaného svazku. Polygon je ohraničen hranami kamene. Na hranách vznikají ocásky. Vpravo: ocásky detekované v obraze. Číslování ocásků odpovídá číslování hran na obrázku vlevo, tzn. na hraně 1 vzniká ocásek 1 atd.



Obrázek 4.11: Stejná světelná stopa jako na obr. 4.10. Vlevo: detekovaná MSER oblast. Vpravo: 3D pohled na stopu.

Jednotlivé kroky algoritmu

- Vybereme stopu, u které chceme identifikovat ocásky, a ze snímku vybereme oblast (obr.4.10), která náleží zkoumané stopě.
- U vybrané oblasti odečteme intenzitu okolí I_o a vypočítáme střední hodnotu intenzity I_m . Intenzitu pixelů omezíme maximálně na intenzitu o velikosti $2 \cdot I_m$ a potom ke všem pixelům přičteme intenzitu I_m . Důvodem tohoto kroku je snaha odstranit nežádoucí vlastnosti velkého šumu v hodnotách intenzity v blízkém okolí těžiště stopy a také to, že chceme zvětšit relativní příspěvek pixelů s nižší intenzitou do součtového kritéria 4.5.
- Oblast převedeme do polárních souřadnic (ρ, ϕ) . Intenzitu I_{pol} v polárním grafu $I_{pol} = f(\phi, \rho)$ určujeme pomocí bipolární interpolace, která pro větší efektivitu vynechává oblasti mimo oblast stopy, kde $I_{pol} = 0$. Důležitým parametrem při interpolaci je velikost vzorkování f_ϕ úhlu ϕ , resp. vzorkování f_ρ vzdálenosti ρ . Experimentálně jsme zvolili $f_\phi = 3^\circ$ a $f_\rho = 1$ px. Interpolaci počítáme v intervalech $\phi \in \langle 0, 2\pi \rangle$ a $\rho \in \langle 1, \rho_{max} \rangle$, kde ϕ_{max} je maximální vzdálenost všech pixelů v oblasti stopy od její pozice.



Obrázek 4.12: Dva pohledy na intenzitu okolí stopy převedené do polárního grafu I_{pol} zobrazené pomocí vrstevnic.

- Provedeme součet intenzit I_{pol} pro jednotlivé úhly ϕ od minimální do maximální vzdálenosti ρ a získáme závislost $I_\phi = f(\phi)$, kde

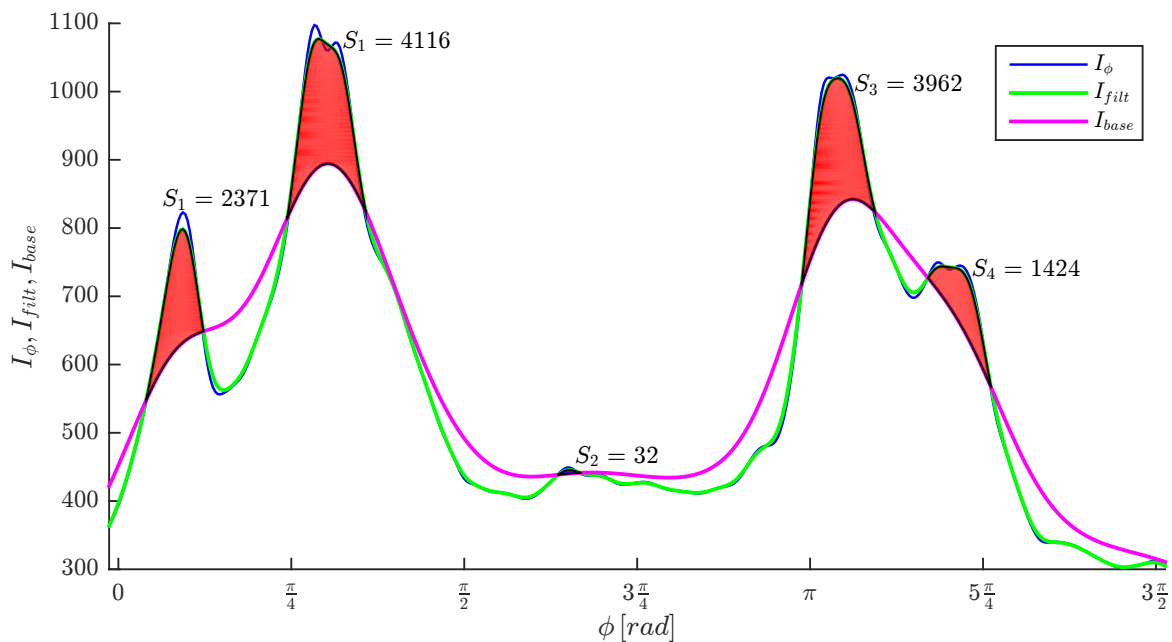
4.7 DETEKTOR OCÁSKŮ

$$I_{\phi_i} = \sum_{j=1}^{\rho_{max}} I_{pol}(i, j), \quad i \in \left\{0, \frac{3}{180}\pi, \dots, 2\pi\right\}. \quad (4.5)$$

Následně na I_{ϕ} aplikujeme kubickou interpolaci sousedních hodnot s 5krát citlivějším vzorkováním $f_{\phi_2} = \frac{f_{\phi}}{5}$ a rozšíříme rozsah ϕ na $\phi \in \langle -\frac{\pi}{2}, \frac{5}{2}\pi \rangle$.

- Graf závislosti $I_{\phi} = f(\phi)$ filtrujeme konvolucí s Gaussovou funkcí $g(x)$ se směrodatnou odchylkou $\sigma = 1.2^\circ$ a získáme referenční závislost I_{filt} .

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \quad (4.6)$$



Obrázek 4.13: Grafické vysvětlení funkce algoritmu pro detekci ocásků.

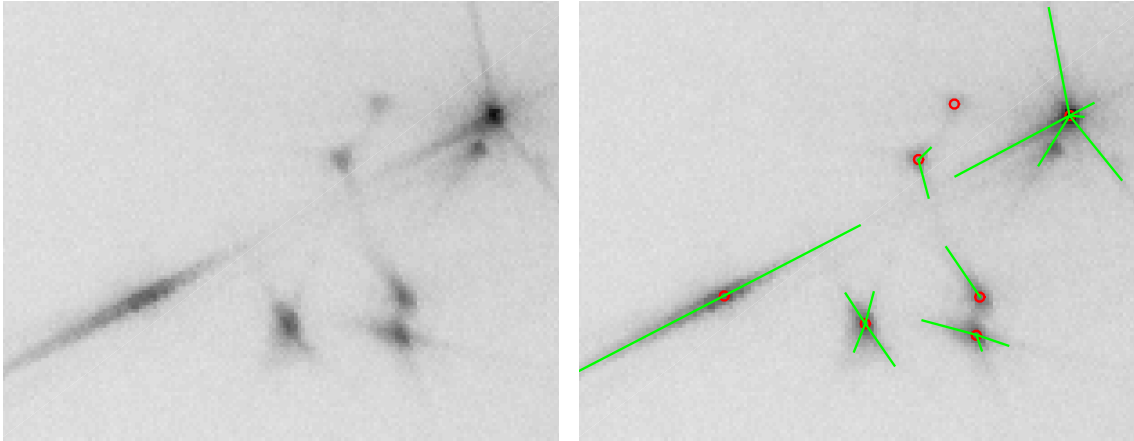
- Na graf I_{filt} následně opakovaně aplikujeme konvoluci, tentokrát s Gaussovou funkcí $g(x)$ s vyšší směrodatnou odchylkou $\sigma = 4.8^\circ$, abychom získali základnu I_{base} , kterou budeme porovnávat se signálem I_{filt} .
- Nalezneme souvislé oblasti $\mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_n$, kde graf I_{filt} má větší hodnotu než I_{base} a sečteme rozdíly I_{filt} a I_{base} v jednotlivých vzorcích. Velikost součtu S_1, \dots, S_n závisí na vzorkovací frekvenci f_{ϕ_2} .

$$S_i = \sum_{\phi_j: \phi_j \in \mathcal{R}_i} I_{filt}(\phi_j) - I_{base}(\phi_j), \quad i \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (4.7)$$

- Za ocásek uvažujeme oblast \mathcal{R}_i , kde je součet S_i větší než prahovací úroveň s_{th} (pro f_{ϕ_2} je $s_{th} = 500$). Směr ocásku φ je určen jako úhel, ve kterém je graf I_{filt} v dané

oblasti maximální a velikost ocásku ϱ_i určuje ρ_{max} a poměr součtu S_i k maximálnímu pro danou stopu.

$$\varphi_i = \arg \max_{\phi_j: \phi_j \in \mathcal{R}_i} I_{filt}(\phi_j), \quad \varrho_i = \frac{S_i}{\max_{j \in \{1, \dots, n\}} S_j} \rho_{max}. \quad (4.8)$$



Obrázek 4.14: Ukázka funkce detektoru ocásků na vybraném vzorku z obrazu.

Kapitola 5

Parametry kamene viva12

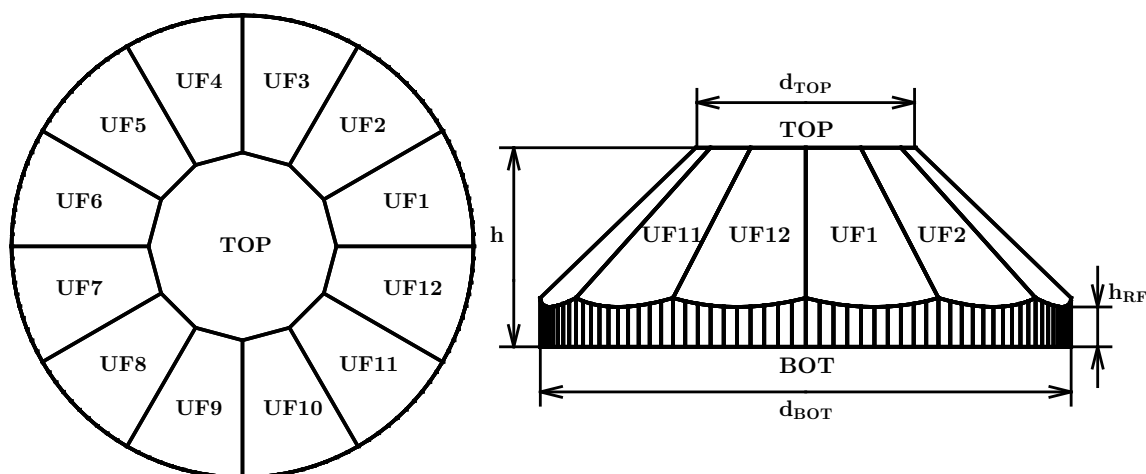
Šatonová růže má 14 rovinných faset. Fasety označujeme zkratkami TOP, BOT a UF1 - UF12, kde

- TOP – tabulka,
- BOT – spodek,
- UF1-UF12 – 12 bočních faset.

Označené fasety máme na obrázku 5.1 spolu s vyznačenými parametry

- d_{TOP} – průměr tabulky,
- d_{BOT} – průměr spodku,
- h – výška kamene,
- h_{RF} – výška lemu.

Poznamenejme, že lem modelujeme množstvím faset, které po spojení aproximují oválný tvar. Tyto fasety mají v simulaci absorpční charakter. Světelné svazky, které dopadnou na lem, zaniknou.



Obrázek 5.1: Šatonová růže s označenými fasetami a parametry. Pohled shora je zobrazen vlevo, bokorys vpravo.

Kapitola 6

Nový pozorovatelný příznak svazků

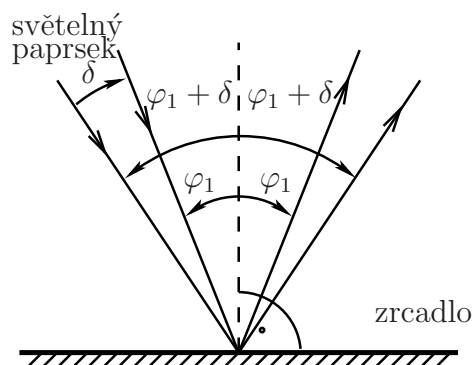
6.1 Vzájemná rotace kamene a zdrojového svazku

Pokusíme se nalézt směr či velikost rotace světelných svazků při rotaci kamene nebo při naklonění zdroje dopadajícího světelného svazku.

Rotace kamene kolem osy způsobí změnu vlastností vystupujících světelných svazků (směru, zářivého toku, intenzity, vlastnosti ocásků atd.). Za určitých okolností může světelný svazek zcela vymizet. Tato situace nastává například při lomu světelného svazku z kamene do okolí. Když vlivem rotace překročíme kritický úhel, nedochází k lomu světelného svazku, ale k totálnímu odrazu na fasetě. Světelný svazek zanikne při posunu světelného svazku mimo fasetu, a to jak při odrazu, tak při lomu. Ze stejných důvodů, proč mohou světelné svazky vymizet, mohou naopak vzniknout svazky nové.

Uvažujeme zjednodušenou situaci, kdy světelný svazek nahradíme světelným paprskem ležícím v jeho pomyslném těžišti.

Světelný paprsek necháme dopadat na zrcadlo pod úhlem φ_1 . Paprsek se od zrcadla odráží podle známého zákona odrazu pod úhlem φ_1 . Při vychýlení světelného paprsku o úhel δ v kladném směru úhlu φ_1 je odražený úhel $\varphi_1 + \delta$. Úhel odraženého paprsek se změní o úhel δ .

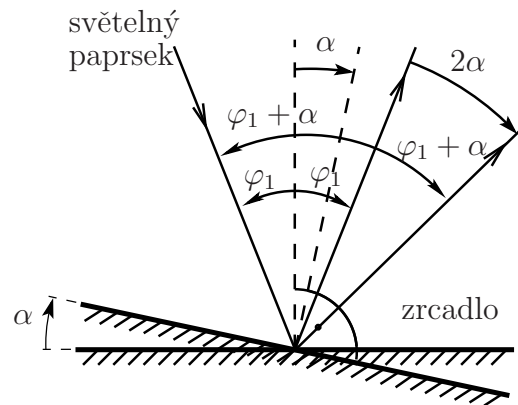


Obrázek 6.1: Odraz světelného paprsku od zrcadla. Změna úhlu dopadajícího světelného paprsku vyvolá stejně velkou změnu úhlu odraženého paprsku.

Jiná situace nastává při rotaci zrcadla kolem osy o úhel α v záporném směru. Světelný paprsek dopadá na zrcadlo pod úhlem $\varphi_1 + \alpha$ a odráží se pod úhlem $\varphi_1 + \alpha$. Úhel odraženého paprsku se v tomto případě změní o úhel 2α .

Při rotaci kamene docílíme stejné změny odraženého paprsku jako při rotaci světelného zdroje o dvojnásobný úhel v opačném směru. Proto budeme dále uvažovat pouze rotaci kamene.

6.2 ZMĚNA SMĚRU VYSTUPUJÍCÍCH PAPRSKŮ



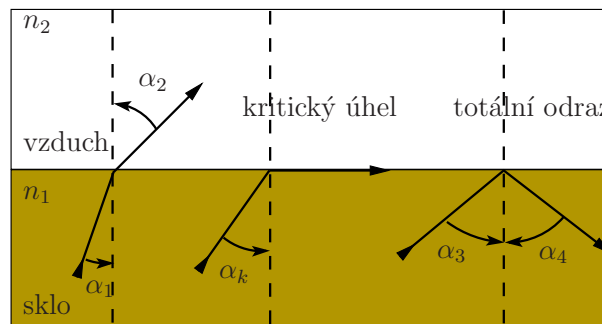
Obrázek 6.2: Odraz světelného paprsku od rotujícího zrcadla. Rotace zrcadla vyvolá dvojnásobnou změnu velikosti úhlu odraženého paprsku.

6.2 Změna směru vystupujících paprsků

Pokud by docházelo pouze k odrazu od zrcadel v dvojrozměrné rovině, tak by naše zkoumání postrádalo smysl. Výstupní paprsek by se vždy otočil o dvojnásobek úhlu rotace kamene, a to ve stejném směru.

S uvažováním materiálu kamene s konstantním indexem lomu $n_1 > 1$ a okolí s indexem lomu $n_2 = 1$ se situace dramaticky mění. Vezměme si příklad lomu světelného paprsku z kamene přes rovinnou fasetu. Úhel dopadajícího paprsku na fasetu označme α_1 a úhel lomeného svazku α_2 , pak můžeme podle Snellova zákona psát:

$$n_1 \sin(\alpha_1) = n_2 \sin(\alpha_2) = \sin(\alpha_2).$$



Obrázek 6.3: Tři případy, které mohou nastat při dopadu světelného paprsku na fasetu. Zleva lom paprsku z kamene, dopad pod kritickým úhlem a totální odraz.

Zkoumejme změnu výstupního úhlu α_2 na změně úhlu α_1 . Nejprve si vyjádříme úhel α_2 následně zderivujeme podle α_1 .

$$\alpha_2 = \arcsin(n_1 \sin \alpha_1) \quad (6.1)$$

$$\frac{d\alpha_2}{d\alpha_1} = \frac{n_1 \cos \alpha_1}{\sqrt{1 - n_1^2 \sin^2 \alpha_1}} \quad (6.2)$$

Pokud se dostáváme ke kritickému úhlu ($\alpha_1 = \alpha_k$), dochází k totálnímu odrazu.

$$\sin \alpha_2 = 1 \implies \sin \alpha_1 = \frac{1}{n_1} \quad (6.3)$$

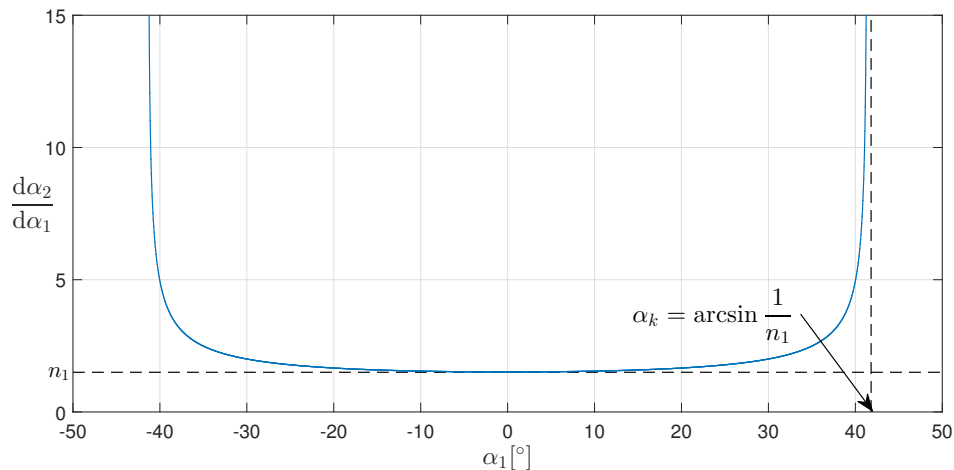
Výpočtem limity rovnice 6.2 v okolí kritického úhlu pro $n_1 > 1$ dostaneme

$$\lim_{\alpha_1 \rightarrow \alpha_k} \frac{d\alpha_2}{d\alpha_1} = \frac{n_1 \cos(\arcsin \frac{1}{n_1})}{\sqrt{1 - n_1^2 \frac{1}{n_1^2}}} \rightarrow \infty. \quad (6.4)$$

Z grafu 6.4 zjistíme, že minimum funkce $\frac{d\alpha_2}{d\alpha_1}$ vychází pro $\alpha_1 = 0^\circ$. Po dosažení

$$\left. \frac{d\alpha_2}{d\alpha_1} \right|_{\alpha_1=0^\circ} = \frac{n_1}{\sqrt{1-0}} = n_1. \quad (6.5)$$

Velikost změny posunu světelného svazku tedy může být teoreticky libovolně větší než je index lomu n_1 .



Obrázek 6.4: Závislost změny lomeného úhlu na změně úhlu dopadu. Pro kritický úhel α_k roste k nekonečnu. Graf funkce popsané vztahem 6.4.

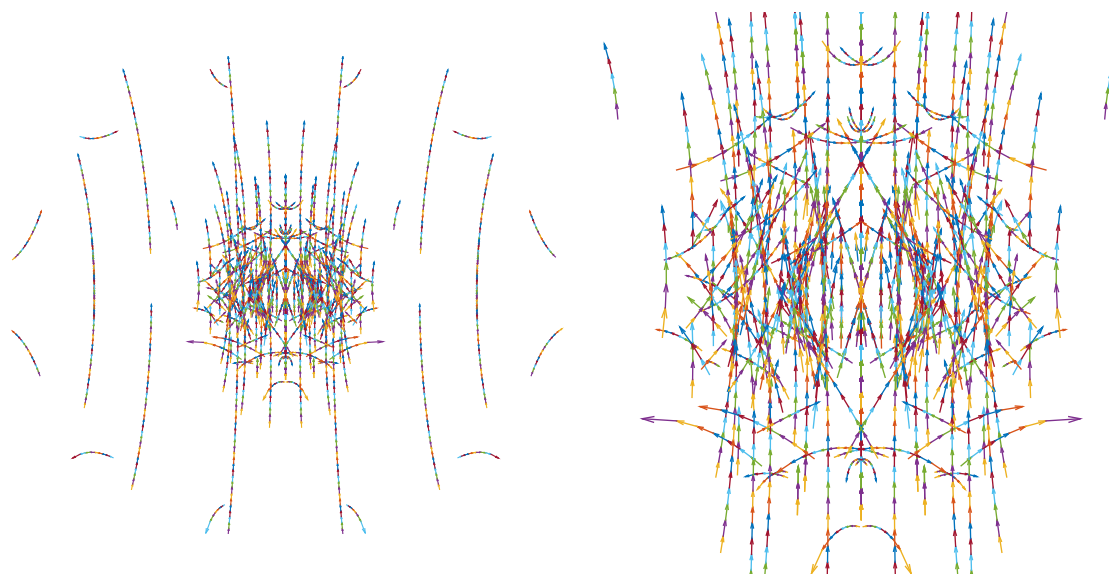
6.3 Modelování pohybu svazků

V programu LADOK jsme provedli experiment s rotací broušeného kamene *viva12*.

Rotací kamene okolo osy kolmé ke spodku kamene dostaneme pouze soustředné kružnice. Kámen jsme tedy rotovali kolem vodorovné osy procházející středem spodku kamene o konstantní úhel v každém kroku. Zaznamenali jsme směry vystupujících svazků při různých pozicích kamene. Výsledek jsme vykreslili do polárního grafu. Ze dvou po sobě následujících pozic kamene jsme šipkou spojili pozici svazků se stejným seznamem dopadových faset. Výsledný obrazec je znázorněn na obr. 6.5.

Z praktického hlediska nás mohou zajímat pouze svazky, které vytvoří po dopadu na stínítko detekovatelnou stoupu.

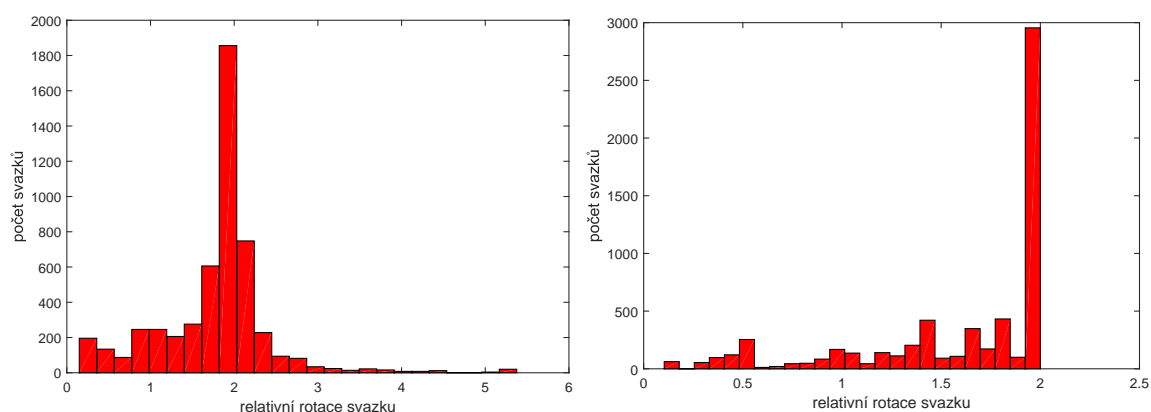
6.3 MODELOVÁNÍ POHYBU SVAZKŮ



Obrázek 6.5: Dráhy směru svazků vycházejících z kamene *viva12* získané pomocí simulačního programu LADOK při rotaci kamene. Zobrazeny jsou pouze svazky s významným zářivým tokem vycházející v horního poloprostoru kamene. Vpravo detail na střed obrázku vlevo.

Pro lepší představu o změně směru jednotlivých svazků nám může být užitečný kruhový histogram znázorňující směr jejich pohybu (obr. 6.5). Podstatná většina svazků se posouvá ve směru rotace kamene, což není příliš nápomocné při jejich identifikaci.

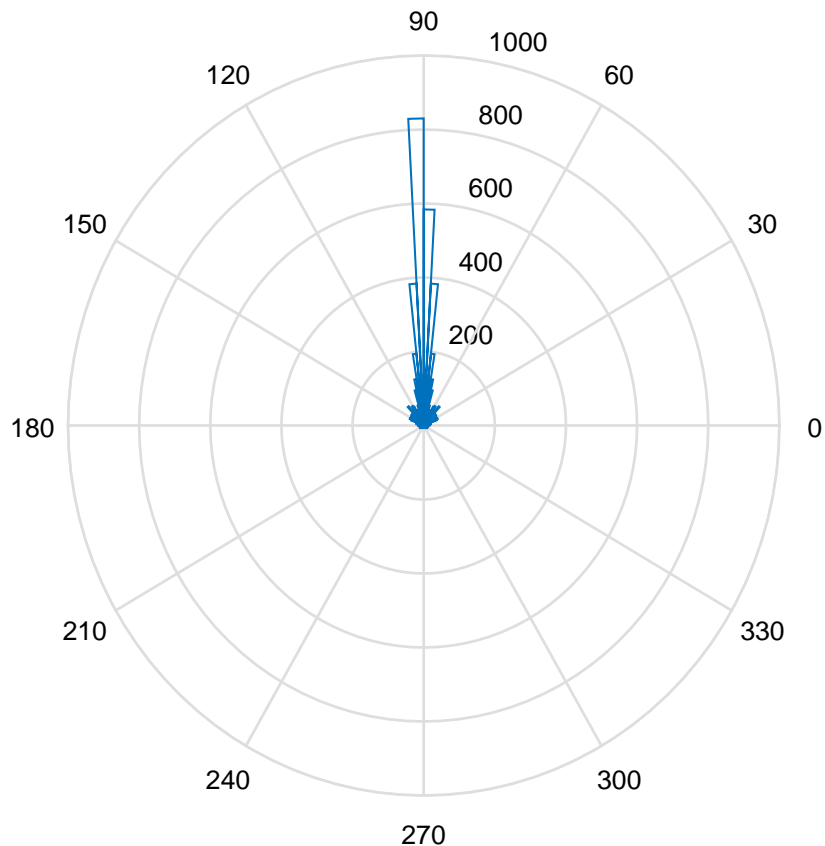
Existují však svazky, které jsou svým pohybem charakteristické a lze je tedy oddělit od ostatních. Kritérium pro rozpoznání svazků nemusí být pouze směr pohybu, ale jak vidíme na obr. 6.5 i velikost úhlu rotace. V neposlední řadě přichází v úvahu i změna zářivého toku svazků, změna velikosti ocásků a další.



Obrázek 6.6: Vlevo: histogram velikosti úhlu rotace vystupujících svazků z kamene *viva12* z obrázku 6.5. Vlivem lomu je relativní rotace v mnoha případech větší než 2. V okolí kritického úhlu roste k nekonečnu. Pokud ztotožníme indexy lomu kamene a okolí, tak relativní rotace nebude větší než 2. To lze vidět na histogramu vpravo.

Vykresleme si histogram (obr. 6.6 vlevo) relativní velikosti úhlu rotace vystupujících

svazků. Z něj je patrné, že řada svazků rotuje o více než dvojnásobek úhlu rotace kamene α , což potvrzuje teorii o relativní změně směru svazků z rovnice 6.4.

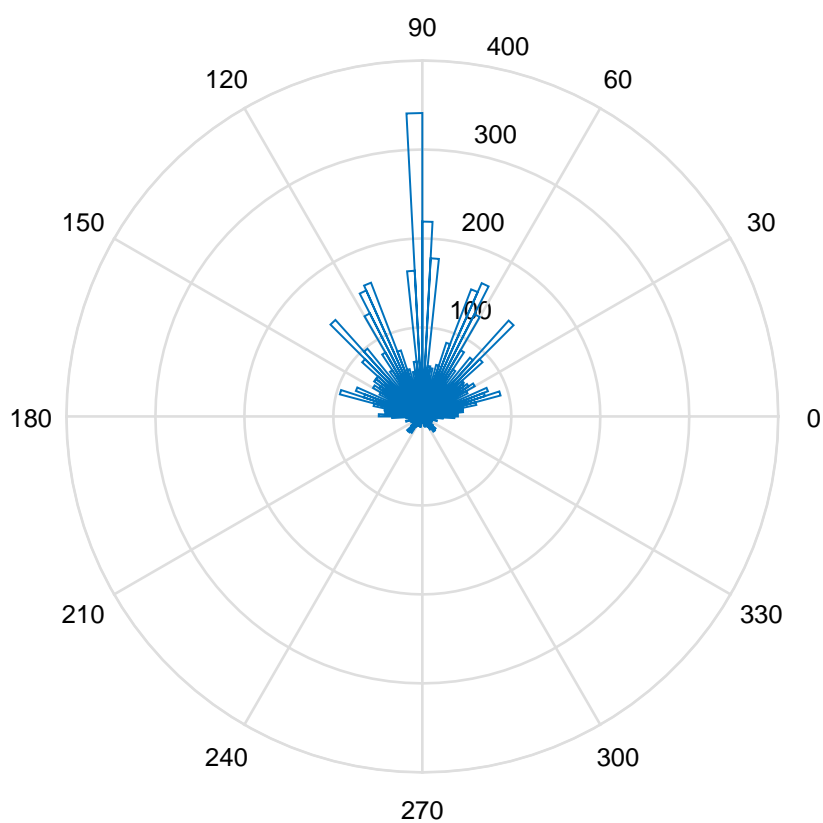


Obrázek 6.7: Kruhový histogram směru rotace vystupujících svazků kamene *viva12* z obrázku 6.5. Většina svazků se pohybuje ve směru rotace kamene.

Pokud vezmeme kámen o stejném indexu lomu, jako je okolí, nedochází k lomu. Potom by se nemělo docházet k rotaci výstupního svazku o úhel větší než 2α , způsobená právě rozdílným indexem lomu. Pro potvrzení této teorie jsme provedli stejnou simulaci jako v předchozím případě. Indexy lomu kamene a jeho okolí jsme ztotožnili a výsledek simulace ukázal, že rotace výstupních svazků úhel větší než 2α se již nevyskytují. To nám dokládá zhotovený histogram (obr. 6.6 vpravo).

Téměř konstantní směrovost rotace svazků u kamene *viva12* zmenšuje význam příspěvku této vlastnosti k lepšímu rozpoznání světelných stop. Pokud ovšem provedeme stejný experiment na broušeném kameni jiného tvaru, dostaneme rozdílný výsledek. Například u šatonu, svým tvarem složitějším než *viva12*, je směr rotace svazků rozmanitější. Velká část z nich samozřejmě rotuje ve směru rotace kamene. Jak ale vidíme z kruhového histogramu (obr. 6.8), lze rozlišovat i velké množství stop pohybujících se např. pod úhlem 45° . U šatonu tedy může znalost směru pohybu svazků při rotaci kamene nemalou měrou pomoci v jejich rozpoznání.

6.3 MODELOVÁNÍ POHYBU SVAZKŮ



Obrázek 6.8: Kruhový histogram směru rotace vystupujících svazků z šatonu při rotaci kamene.

Kapitola 7

Terminologie

Je důležité rozlišit svazky získané pomocí simulace v LADOKu a svazky získané experimentálním měřením. Proto zavedeme *simulované* a *pozorované* svazky.

7.1 Simulované svazky

1. Získáme potřebné parametry kamene, který zkoumáme. Zdrojem může být technický výkres nebo předchozí měření.
2. Sestavíme model, který bude přibližně určovat tvar kamene. Tento model budeme považovat za *referenční*.
3. V programu LADOK simulujeme průlet svazku *referenčním* modelem. Pro simulaci je důležité znát polarizaci zdrojového svazku a index lomu kamene.
4. Výsledkem simulace jsou parametry *simulovaných* svazků.

7.2 Pozorované svazky

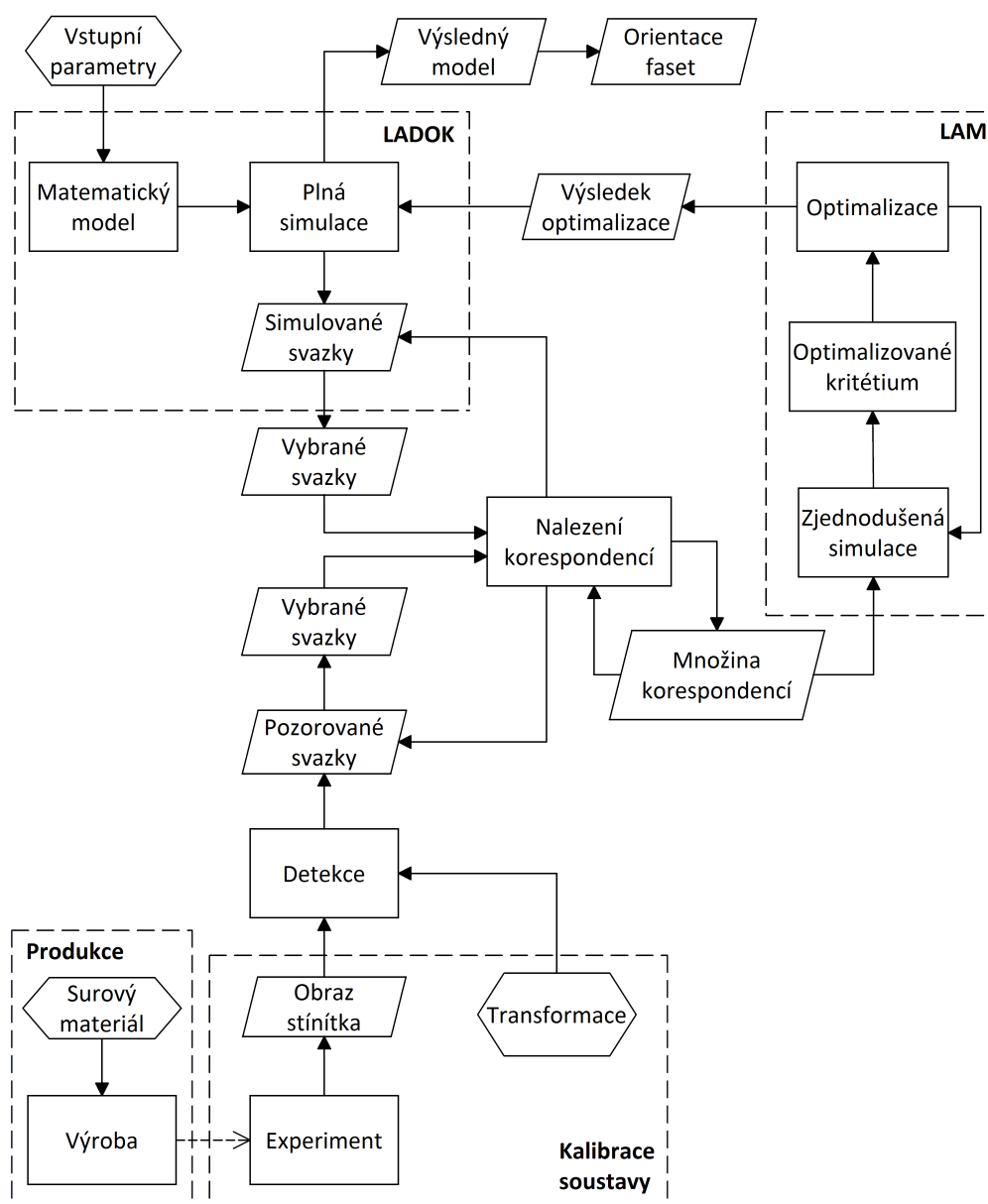
Předpokladem pro získání parametrů pozorovaných svazků je sestavení a kalibrace měřicí soustavy podle [7].

1. Opracovaný kámen umístíme do měřicí soustavy.
2. Provedeme experiment průchodu svazku kamenem podobný situaci v simulačním programu LADOK.
3. Získáme obraz dopadu svazků na stínítko.
4. V obraze detekujeme světelné stopy (kapitola 3.4).
5. Z detekovaných stop vypočítáme parametry *pozorovaných* svazků (kapitola 4.6).

Kapitola 8

Optimalizace orientace faset

8.1 Schéma optimalizačního procesu



Obrázek 8.1: Diagram s principem odhadu orientace faset broušených kamenů.

■ 8.2 Optimalizované kritérium

Optimalizační algoritmus je převzat z LAMu [5]. Na rozdíl od LAMu využíváme optimalizační algoritmus nejen k odhadu parametrů faset kamene, ale také k odhadu indexu lomu kamene a jeho orientace v měřicí soustavě.

Definujeme kritériální funkci, kterou budeme optimalizovat. Funkci lze popsat vztahem

$$\vec{\varepsilon} = h(\vec{x}, \vec{v}, \vec{l}, \vec{p}), \quad (8.1)$$

jejíž parametry popisují:

\vec{x} Vektor parametrů, které nastavuje optimalizační algoritmus.

Parametry faset, index lomu

Jedná se převážně o parametry r uvolněných faset. Každou fasetu lze parametrizovat pomocí úhlové změny normálového vektoru \vec{n} (2 parametry) a změny vzdálenosti d fasety od souřadného systému (1 parametr). Optimalizační metoda nemá dostatečnou citlivost na změny vzdálenosti d fasety [5]. Tento parametr proto považujeme za konstantu. Nově lze mezi optimalizované parametry přidat index lomu kamene n_i . Celkově máme $2r + q$ parametrů, kde q je 1 pokud je mezi \vec{x} parametr n_i , jinak je q rovno 0.

Orientace

Orientaci kamene popisujeme rotací kolem vertikální osy R_z a dvou parametrů definujících náklon kamene R_x, R_y .

\vec{v} Popisuje směr zdrojového svazku světla.

\vec{l} Obsahuje pole seznamů dopadových faset svazků. Seznam je využit pro výpočet směru výstupního svazku. Délka pole musí být rovna s .

\vec{p} Obsahuje směrové vektory pozorovaných svazků. Směr popisujeme pomocí souřadnic azimutu a elevace. Pokud pro výpočet optimalizačního kritéria použijeme s pozorovaných svazků, bude mít vektor \vec{p} délku $2s$.

$\vec{\varepsilon}$ Představuje vektor odchylek v elevaci a azimutu simulovaných a pozorovaných svazků.

V LAMu [5] byla tato odchylka měřena jako chyba v pozici dopadu laserového svazku na stínítku. Důvodem proč bylo využíváno toto kritérium byla citlivější odezva při změně vektoru svazku. Hlavním důvodem volby azimutu a elevace pro výpočet optimalizačního kritéria v této práci je rychlost výpočtu. Odpadá totiž potřebný výpočet, který transformuje směrový vektor do souřadnic na stínítku. Vektor $\vec{\varepsilon}$ má $2s$ prvků.

8.3 Plná vs. zjednodušená simulace

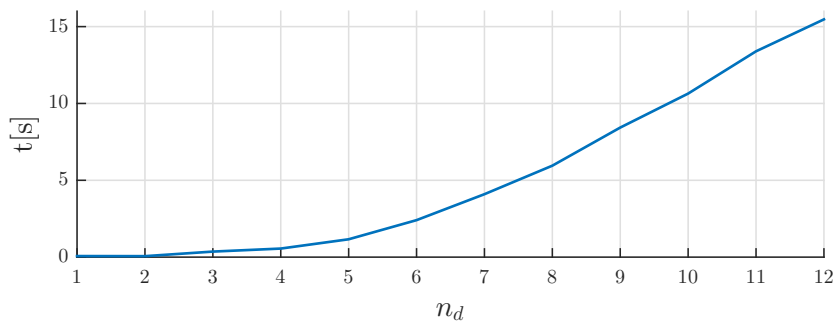
V optimalizačním cyklu je použito dvou simulací, které simulují průlet světla broušeným kamenem.

8.3.1 Plná simulace

Plnou simulací rozumíme klasický program LADOK, který modeluje odraz a lom svazků v konvexním tělese. Nevýhodou algoritmu je ale to, že simulace trvá příliš dlouho na to, aby mohla být úspěšně použita v optimalizačním procesu.

Časová náročnost simulace v LADOKu

U matematické simulace programu LADOK můžeme nastavit, do jaké hloubky budou simulovány výstupní svazky. Při řešení se můžeme omezit na svazky s maximálním počtem dopadových faset n_d . V grafu 8.2 je zakreslena časová závislost programu LADOK při výpočtu simulovaných svazků kamene *viva12* po různý počet dopadových faset.



Obrázek 8.2: Výpočetní doba simulace simulovaných svazků v programu LADOK v závislosti na počtu dopadových faset svazků.

Vzhledem ke strmému nárůstu časové náročnosti simulace programu LADOK budeme před každým výpočtem volit minimální n_d , tak abychom získali informace o všech simulovaných svazcích, které v dané situaci potřebujeme.

8.3.2 Zjednodušená simulace

Základní myšlenkou vedoucí ke vzniku zjednodušené simulace je skutečnost, že se optimalizované parametry \vec{x} při optimalizaci parametrů faset příliš nemění. Za tohoto předpokladu si podstatná část svazků zachová posloupnost dopadových faset. Vynecháme proto kontrolu vzniku či zániku svazků.

Zjednodušená simulace vyřadí z plné simulace zbytečné výpočty, které v procesu optimalizace nevyžíváme. Jediné, co potřebujeme znát, je směr výstupních svazků. Pro výpočet směru nahradíme svazky nekonečně tenkými paprsky a můžeme s nimi pracovat jako s vektory. Fasety kamene reprezentujeme pomocí normálového vektoru.

Zjednodušená simulace přistupuje k paprsku jednotlivě. Funkci pro výpočet vektoru výstupního paprsku \vec{v}_o lze vyjádřit jako

$$\vec{v}_o = g(\vec{v}_i, \vec{N}), \quad (8.2)$$

kde \vec{v}_i je vektor vstupního paprsku. Vektor \vec{N} obsahuje normály $\vec{n}_1, \dots, \vec{n}_m$ faset, na které svazek dopadá. Normály jsou seřazené v pořadí, které odpovídá dopadovým fasetám při šíření paprsku od zdroje ke stínítku.

Při výpočtu musíme vědět, která faset svazek odrazí a která lomí. Situace je jednoduchá. Pokud $m = 1$, potom muselo dojít pouze k odrazu od fasety. Pokud $m > 1$ odpovídají normály \vec{n}_1 a \vec{n}_m fasetám, přes které se svazek lomí. Na ostatních fasetách se svazek odrazí.

Zjednodušená simulace v LAMu navíc počítá polohu, kam paprsek na fasetu dopadl. Výpočet polohy paprsku byl kvůli rychlosti výpočtu odstraněn.

8.4 Podmíněnost

Základní otázkou optimalizačního problému je, zda úloha dostatečně podmíněná. První podmínku, kterou musíme splnit, je získat minimálně stejný počet nezávislých rovnic, jako je počet optimalizovaných parametrů.

V optimalizačním kritériu máme celkem $2r + q$ nezávislých rovnic. Základní podmínkou je, že počet korespondujících svazků musí být minimálně $s + q$.

8.4.1 Třída svazků 1A a 1B

Od tříd **1A** a **1B** lze obecně čekat velmi dobrou podmíněnost. Jednotlivý svazek z těchto tříd dopadne pouze na jednu fasetu a směr odraženého svazku jednoznačně určuje parametry fasety, od které se svazek odrazil. Pokud by náš matematický model přesně odpovídal reálnému experimentu, potom postačí nalézt korespondence třídy **1A** a **1B**, abychom určili orientaci všech faset kromě spodku. Tyto třídy nepodmiňují index lomu kamene.

8.4.2 Třída 3A

Korespondencí svazků třídy **3A** (např. UF1–TOP–BOT) získáme 2 rovnice $\Delta\varepsilon$ pro elevaci a $\Delta\alpha$ pro azimut, které jsou závislé na parametrech dopadových faset UF1, TOP a BOT. Problém spočívá v tom, že tato korespondence určuje pouze vzájemnou polohu dopadových faset a nelze u této třídy očekávat dobrou podmíněnost. Abychom mohli optimalizovat náklon faset, potřebujeme znát další třídy korespondencí. Vhodná může být např. třída **5D**, což se podrobněji dozvíme v kapitole 8.5.1.

8.5 Pozorování

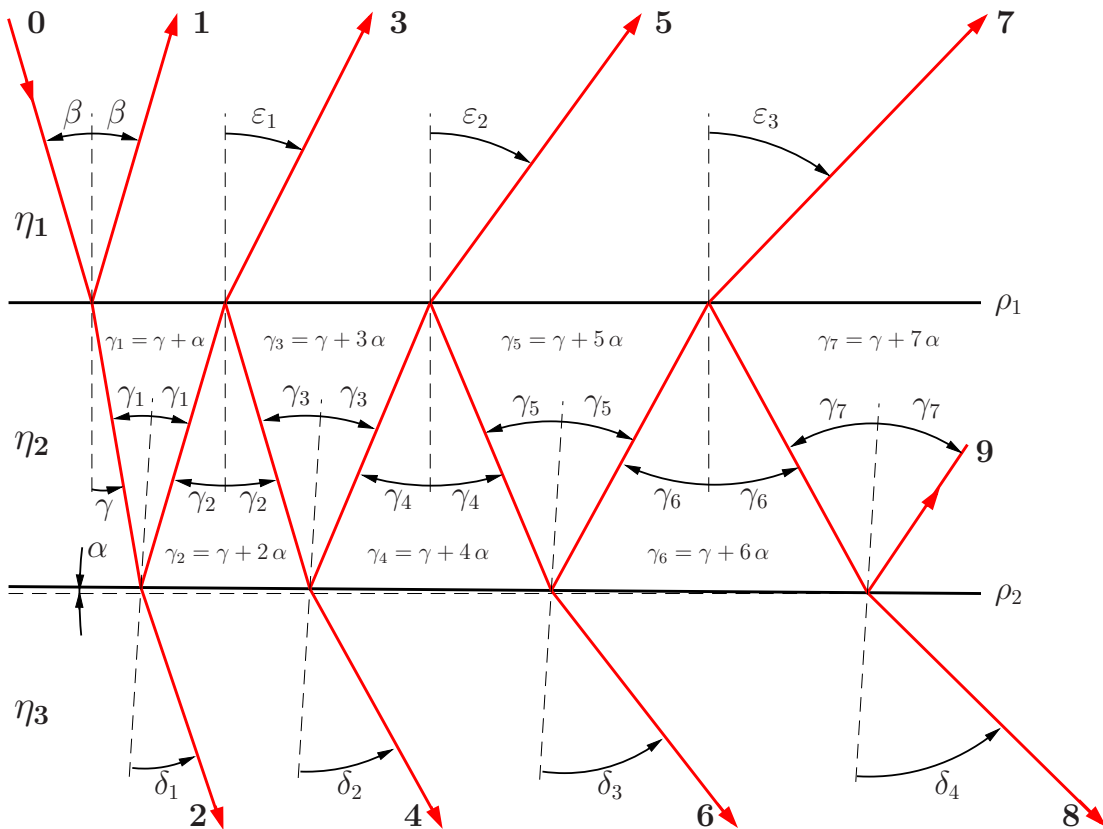
8.5.1 Vzájemná poloha svazků

Simulujeme průlet světelného svazku optickým klínem (obr. 8.3). Prostředí s indexy lomu η_1 , η_2 a η_3 oddělují rozhraní ρ_1 a ρ_2 . Tato rozhraní mezi sebou svírají úhel α .

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \sin \beta\right) \quad (8.3)$$

$$\varepsilon_1 = \arcsin\left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \sin(\gamma + 2\alpha)\right) \rightarrow \begin{cases} \alpha > 0, & \varepsilon_3 > \varepsilon_2 > \varepsilon_1 > \beta \\ \alpha = 0, & \varepsilon_3 = \varepsilon_2 = \varepsilon_1 = \beta \\ \alpha < 0, & \varepsilon_3 < \varepsilon_2 < \varepsilon_1 < \beta \end{cases} \quad (8.4)$$

8.5 POZOROVÁNÍ



Obrázek 8.3: Lom a odraz paprsku v optickém klínu.

η_1	index lomu vzduchu,
η_2	index lomu materiálu kamene,
η_3	index lomu odrazivé vrstvy,
ρ_1	tabulka,
ρ_2	spodek,
0	zdrojový svazek,
1	svazek třídy 1B – TOP,
3	svazek třídy 3B – TOP–BOT–TOP,
5	svazek třídy 5E – TOP–BOT–TOP–BOT–TOP,
7	svazek třídy 7H – TOP–BOT–TOP–BOT–TOP–BOT–TOP,
2,4,6,8	tyto svazky nevznikají - na rozhraní ρ_2 dochází pouze k odrazu.

Svazek dopadá na rozhraní ρ_1 pod úhlem β . Na obrázku 8.3 je tento svazek reprezentován jako paprsek č. 0.

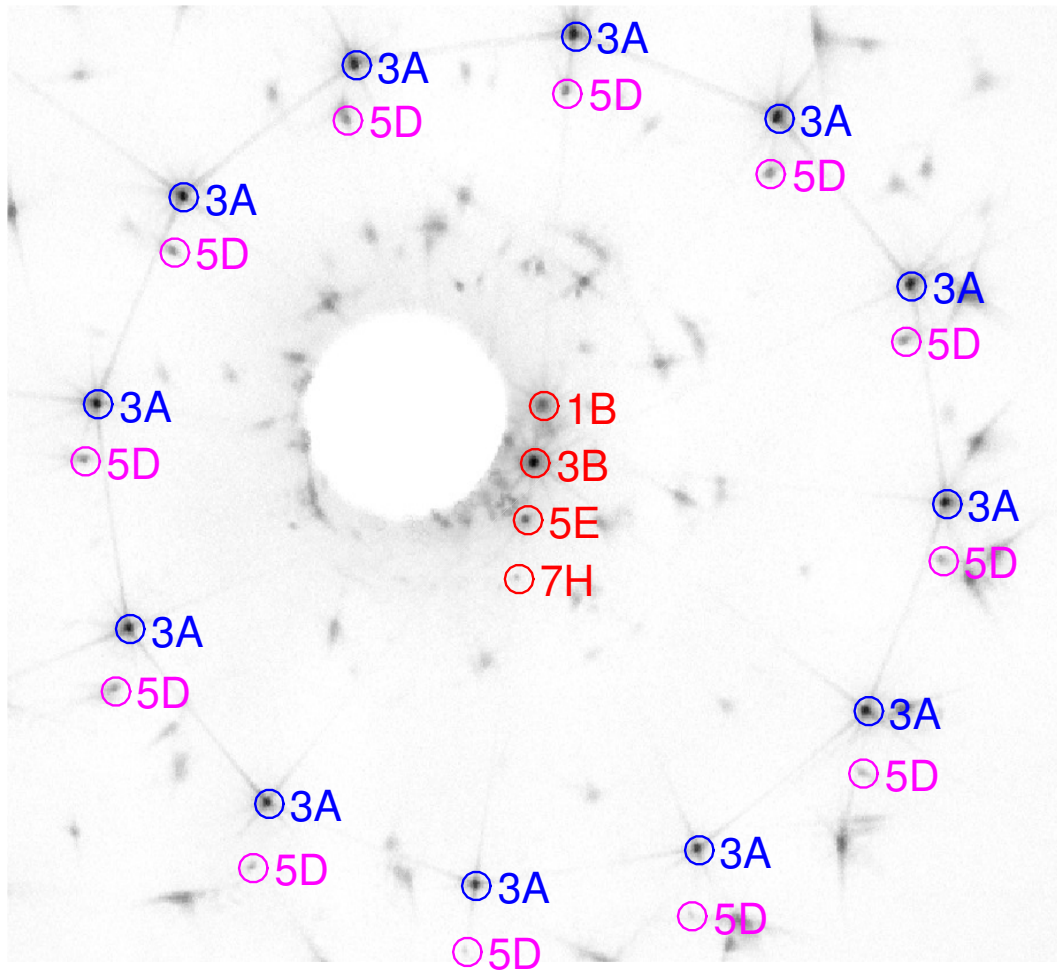
Svazek světla můžeme charakterizovat velikostí zářivého toku ϕ_e . Z Fresnelových rovnic [1] víme, že pokud na rozhraní ρ_1 nedochází k totálnímu odrazu, tak po dopadu svazku na rozhraní vznikne odražený a lomený svazek. Jaká bude velikost zářivého toku odraženého svazku $\phi_{e_{reflect}}$ závisí na polarizaci světla, dopadajícím úhlu a poměrem mezi indexy lomu prostředí, které odděluje rozhraní ρ_1 .

$$\phi_e = \phi_{e_{reflect}} + \phi_{e_{refract}} \quad (8.5)$$

Při dopadajícím úhlu $\beta = 0^\circ$ a indexech lomu $\eta_1 = 1$, $\eta_2 = 1.5$ se 4% dopadajícího zářivého toku odrazí. $\frac{\phi_{e_{reflect}}}{\phi_e} = 0.04$, $\frac{\phi_{e_{refract}}}{\phi_e} = 0.96$.

Z principu šíření světla optickým prostředím pozorujeme svazky 0 až 9 se specifickým směrem šíření.

V šatonové růži nastává stejný optický jev mezi tabulkou (TOP) a spodkem (BOT). V reálné situaci nejsou fasety TOP a BOT rovnoběžné. Důsledkem toho svazky **1B**, **3B**, **5E** a **7H** svírají s normálou tabulky různý úhel. Svazek třídy **3B** bude mít vždy největší zářivý tok. Zajímavé je, že tyto svazky leží ve stejné rovině. Tato rovina je určena vzájemnou orientací mezi normálou tabulky a normálou spodku.



Obrázek 8.4: Zvýraznění obrazů svazků ve snímku. Svazky třídy **1B**, **3B**, **5E** a **7H** dopadají pouze na fasetu TOP a BOT. Svazky třídy **3A** a **5D** dopadnou nejprve na boční fasetu a poté následuje jeden resp. dva dopady na dvojici faset BOT-TOP.

Dopad svazků **1B**, **3B**, **5E** a **7H** na stínítko můžeme pozorovat na obr. 8.4. Pokud bychom byli schopni přiřadit alespoň 2 tyto stopy ke svazkům, můžeme určit orientaci tabulky a spodku. Situaci ovšem komplikuje fakt, že ne vždy můžeme nalézt obrazy těchto svazků, protože jsou často zastíněny podstavcem, na který pokládáme měřený kámen.

U svazků třídy **3A** a **5D** dochází k podobnému optickému jevu pouze s tím rozdílem, že svazek do kamene nevstupuje tabulkou, ale boční fasetou. Dvojice svazků třídy **3A** a **5D** se stejnou první dopadovou fasetou leží v jedné rovině. Tato dvojice určuje vzájemnou orientaci mezi normálou tabulky a normálou spodku. Pro jednoznačné určení této orientace je však nutné znát orientaci bočních faset.

■ 8.5.2 Orientace kamene

Kámen je do měřicí soustavy umístěn ručně tak, aby se vertikální osa kamene nacházela v těžišti dopadajícího zdrojového svazku. Takto je zajištěna poloha kamene, ovšem rotace kamene okolo vertikální osy může být libovolná.

Podle plochy, na kterou pokládáme kámen nemůžeme automaticky určit orientaci fasety BOT. Podstavec není pevně přichycen a mezi fasetou BOT a podstavcem je nanášena řada vrstev. Pokud nejsou tyto vrstvy nanášeny rovnoměrně je kámen v měřicí soustavě nakloněn.

Rotace a náklon kamene musí být nalezeny před optimalizací parametrů faset.

■ 8.5.3 Zakřivení faset

Kameny se brousí rovinnými brusnými kotouči, proto předpokládáme, že fasety jsou ideálně rovné a lze je popsat pomocí normály. Svazky nemusí dopadat na celou plochu fasety, ale pouze na vymezenou část fasety. Pokud dochází k zakřivení fasety, může se normála popisující tento element plochy lišit od normály fasety. Zakřivení fasety kamene vzniká především kvůli pružnému uchycení kamene při broušení.

Pokud vzdálenost fasety od souřadnicového systému klesne, zvýší se plocha fasety. Plocha sousedních faset naopak klesne. Řada svazků dopadá pouze na okraj faset. Posun fasety doprovází změna zářivého toku některých svazků, které mohou i zcela zaniknout.

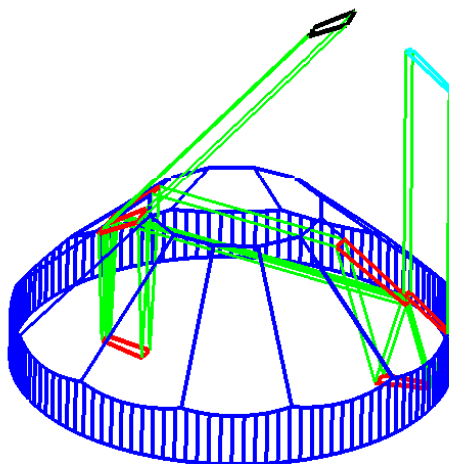
Zakřivenou fasetu můžeme aproximovat jako část kulové či válcové plochy s vysokým poloměrem křivosti.

Pozorujeme vliv vzdálenosti fasety od souřadnicového systému na změnu zářivého toku svazků (viz kapitola 10.2). K výrazné změně dochází především u svazků s nízkým zářivým tokem. Při posunu fasety dochází ke změně zářivého toku svazků, které jsou omezeny minimálně jednou hranou posouvané fasety.

V současné době nedokážeme vliv vzdálenosti rozlišit. Je ale možné, že informace o změně zářivého toku se vzdáleností fasety může v budoucnu vést ke vzniku vhodné metody, pomocí které určíme vzdálenost fasety.

■ 8.5.4 Svazky s vysokou citlivostí

Existují svazky, které dopadají na fasetu pod téměř kritickým úhlem, např. svazek na obr. 8.5. Výstupní směr těchto svazků je vysoce citlivý na sklon fasety. Tyto svazky dobře určují sklon elementu plochy fasety, na kterou dopadají. Pokud je fasetka zakřivená, mohou tyto svazky negativním způsobem ovlivnit optimalizované kritérium, což ve výsledku vyústí k nežádoucímu sklonu fasety a oddálení korespondujících svazků dopadajících na jinou část plochy fasety. Tento problém by mohl být odstraněn s použitím vhodnější parametrizace faset.



Obrázek 8.5: Svazek třídy **6B**. Na poslední fasetu dopadá blízko kritického úhlu, proto je citlivější na sklon fasety než většina ostatních svazků.

Kapitola 9

Korespondence svazků

Svazky vzcházející z ozářeného kamene vytvoří na stínítku specifický obrazec. Matematický model idealizované verze situace vytvoří podobný obrazec.

Nalezení skutečného sklonu faset vyžaduje nalezení korespondujících svazků. Korespondence je uspořádaná dvojice pozorovaného a simulovaného svazku. Korespondující svazky mají stejnou posloupnost dopadových faset.

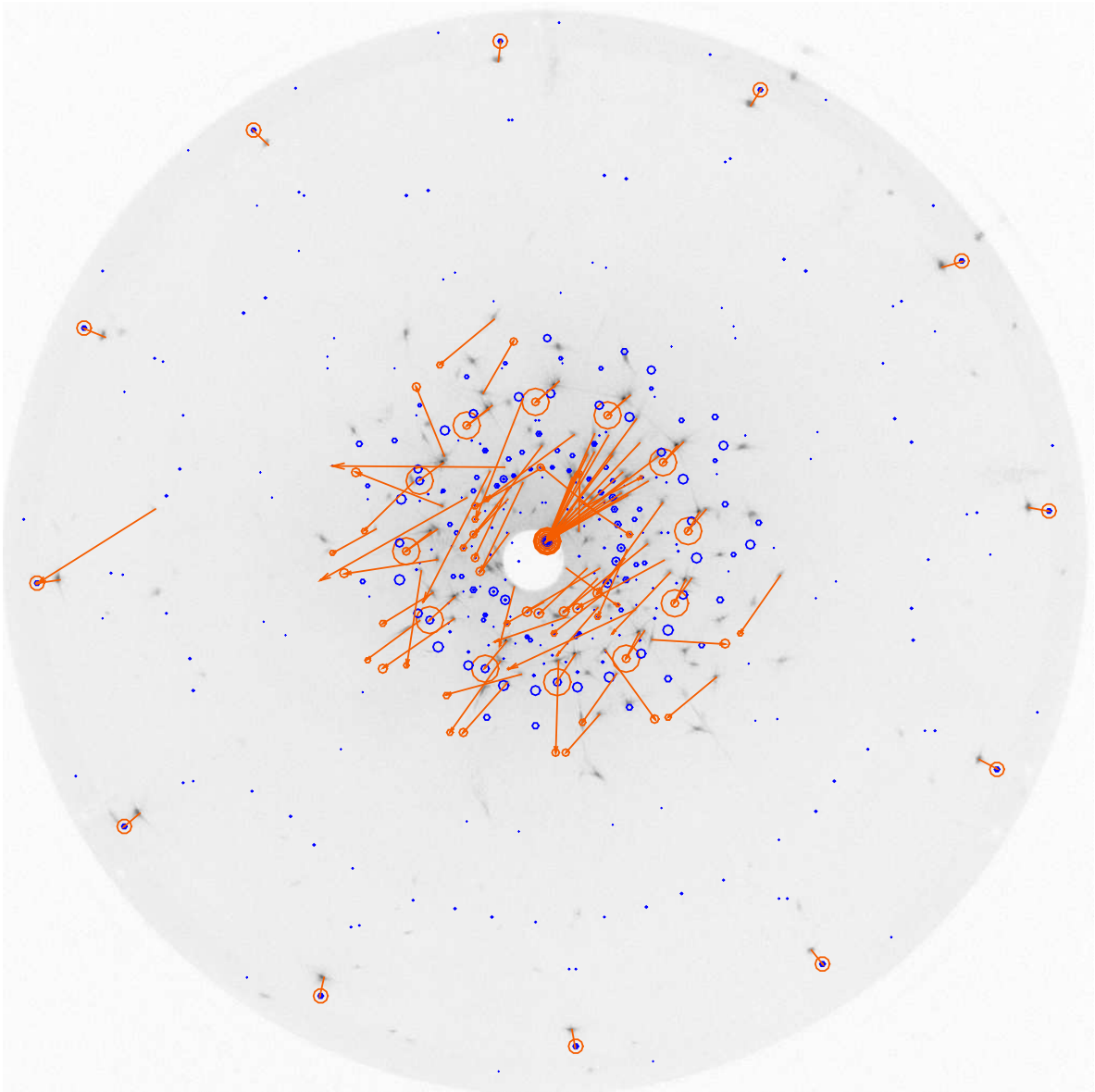
9.1 Obtížnost úlohy

Korespondence nelze nalézt všechny najednou. Na snímku 9.1 jsou zobrazeny vzdálenosti obrazu korespondujících svazků po optimalizaci náklonu a rotace kamene. Existuje mnoho jiných svazků, které jsou blíže simulovaným svazkům, což znesnadňuje úhlu korespondence. Situace je navíc komplikována tím, že řada simulovaných svazků, kterým v odraze odpovídá pozorovaný svazek neexistuje a naopak. Ve fázi optimalizace na obrázku 9.1 neexistuje 36 % těchto simulovaných svazků.

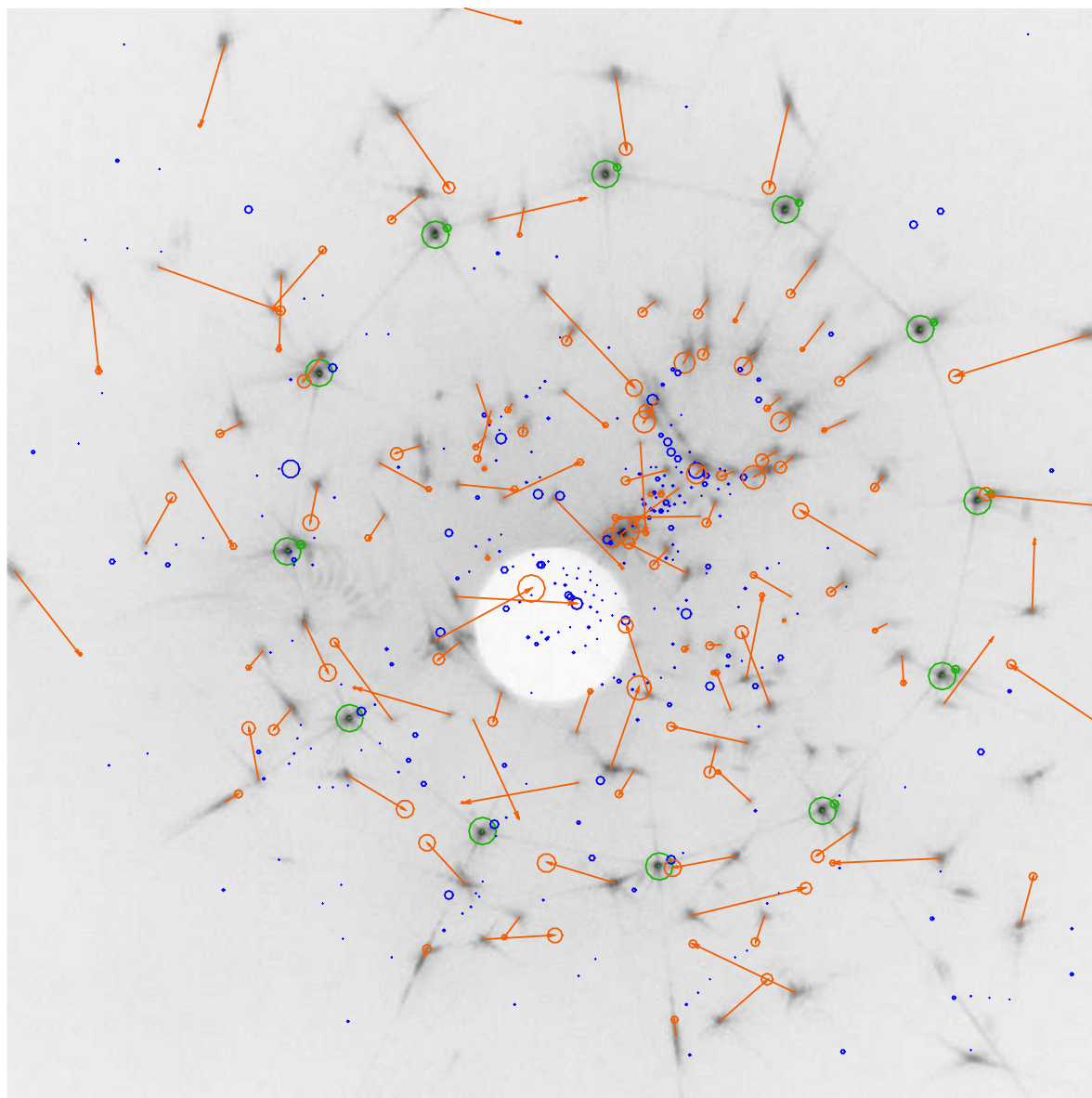
V prvním kroku lze nalézt korespondence pouze pro vybrané třídy svazků. Jedná se o třídy **1A**, **3A** a ne vždy detekované třídy **3B** a **5D** viz obr. 8.4.

Čekali bychom, že pokud optimalizujeme náklon faset s korespondencemi svazků, které lze určit v počátku, budou obrazy ostatních korespondujících svazků téměř totožné. Na obr. 9.2 ovšem vidíme, že ani v tomto případě nelze určit všechny korespondence. Vzdálenosti obrazů korespondujících svazků jsou stále znatelné. Zvláště pak máme problém nalézt korespondence v oblastech s vysokou hustotou svazků. Je zřejmé, že korespondence budeme muset nacházet ve více krocích a postupně parametry faset přibližovat ke konečnému výsledku sklonu.

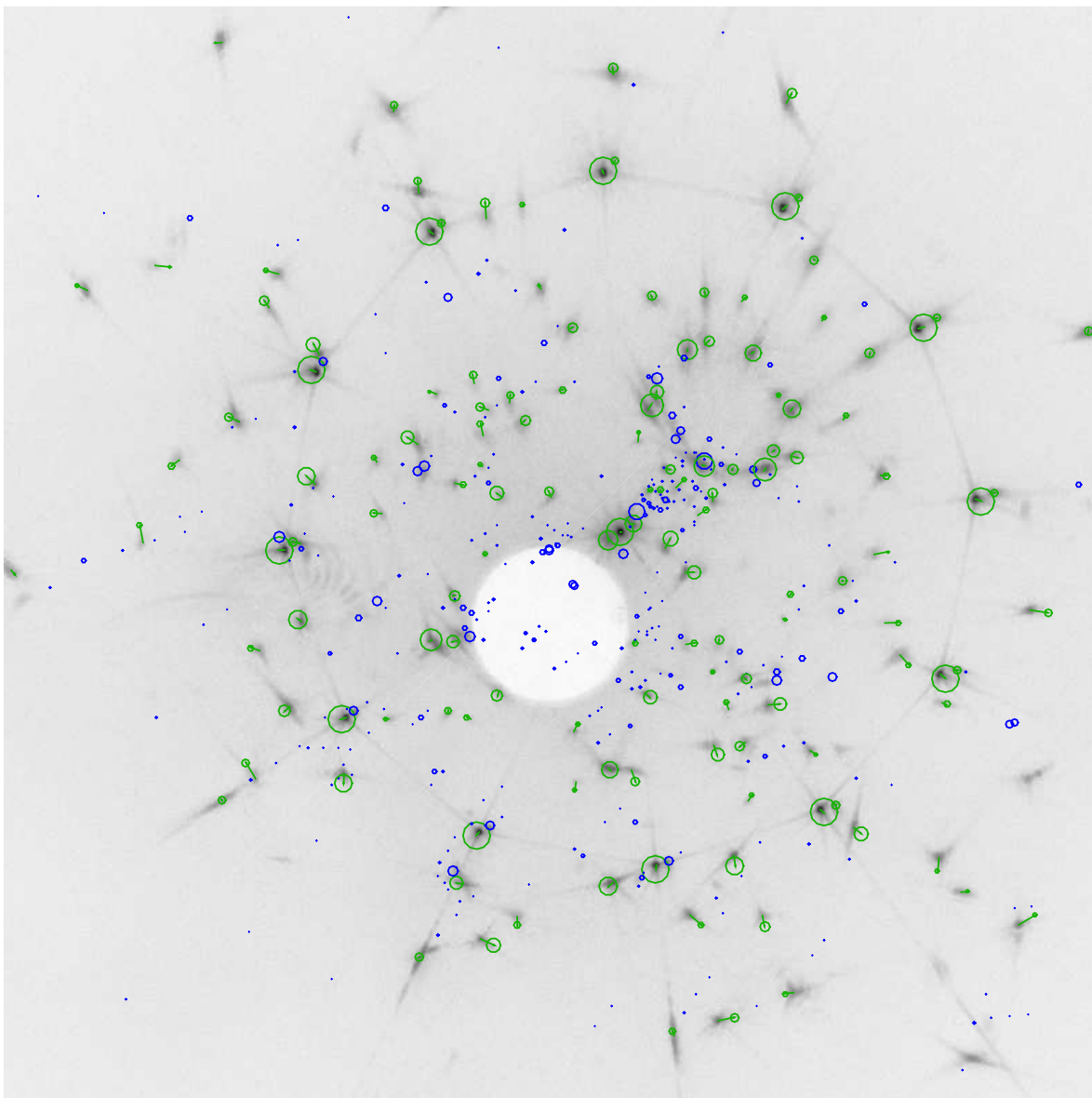
Indikátorem, zda jsme nastavili správně parametry faset kamene, je rozdíl parametrů pozorovaných a simulovaných svazků. Po optimalizaci náklonu faset podle korespondujících svazků (obr. 9.3) vidíme, že směry korespondujících svazků v mnoha případech nesouhlasí. Navíc můžeme pozorovat svazky, ke kterým neexistuje vhodný referenční svazek a naopak vidíme také volné simulované svazky. Na tyto nepřesnosti má vliv zakřivení faset, neurčitost vzdálenosti faset, nepřesná kalibrace, detekce atd.



Obrázek 9.1: Vzdálenost obrazu korespondujících svazků po optimalizaci náklonu a rotace kamene *viva12* podle korespondencí třídy **1A**. Kružnice znázorňují simulované svazky. Čím vyšší je zářivý tok svazku, tím vyšší je poloměr kružnice. Vektory směřují od obrazu pozorovaného svazku k obrazu korespondujícího simulovaného svazku. Modrou barvou jsou zobrazeny volné simulované svazky.



Obrázek 9.2: Detail na střední část snímku 9.1. Vzdálenost obrazu korespondujících svazků po optimalizaci náklonu faset podle korespondencí, které lze spolehlivě nalézt. Zelenou barvou jsou zobrazeny korespondence použité při optimalizaci parametrů kamene. Modrou barvou jsou zobrazeny simulované svazky, pro které nebyl nalezen korespondující pozorovaný svazek.



Obrázek 9.3: Detail na střední část snímku 9.1. Vzdálenost obrazu korespondujících svazků po optimalizaci náklonu faset podle všech korespondujících svazků. Zelená barva: korespondující dvojice svazků. Modrá barva: volné simulované svazky.

Kapitola 10

Klasifikace příznaků

Nalézt korespondující dvojice pozorovaných a simulovaných svazků pouze pomocí směru svazků je prakticky nemožné. Proto se pokusíme využít další příznaky, které nám pomohou eliminovat nesprávné korespondence. Víme, že u pozorovaných svazků můžeme kromě směru určit zářivý tok a detekovat ocásky (kapitola 4.6).

Prozkoumáme parametry pozorovaných a simulovaných svazků s cílem navrhnout jednoduchý klasifikátor. Nalezení závislosti parametrů zjednoduší úlohu korespondence svazků.

10.1 Ground truth

Abychom mohli hledat závislosti mezi parametry pozorovaných a simulovaných svazků, potřebujeme získat data s korespondujícími svazky. Toho dosáhneme tak, že ručně upravujeme množinu korespondencí a optimalizujeme náklon faset pomocí programu v příloze B. Proces ručního přiřazování svazků ukončíme, když nalezneme dostatečně přesný sklon faset. Takto nalezené korespondence považujeme za správné.

Ručně určené korespondence označujeme výrazem "ground truth" podobně jako v oblasti strojového učení, kde slouží jako přesná data v trénovací množině pro určení statistických modelů. Použití výrazu "ground truth" je ovšem v našem případě sporné, neboť určení množiny korespondencí závisí na osobě, která tuto úlohu provádí. To, co v našem případě označujeme jako "ground truth", je množina, o které se domníváme, že by měla obsahovat správné korespondence svazků, ale v našem případě nemůžeme s naprostou jistotou tvrdit, že tomu tak je.

10.2 Změna zářivého toku se změnou parametrů kamene

Chceme zjistit, jak je zářivý tok svazků závislý na změně parametrů faset.

Máme k dispozici korespondující svazky z měření 10 různých kamenů typu *viva12*. Při určení "ground truth" jsme zároveň odhadli skutečné sklony faset a matematické modely kamenů. Vezmeme si postupně každý z těchto modelů a měníme náklon normály vybrané fasety o jeden stupeň ve čtyřech kolmých směrech. Nakonec normálu vrátíme zpět na původní hodnotu. Takto nakloníme normály všech 14 faset kamene. Dostaneme 4×14 modelů kamene plus jeden původní.

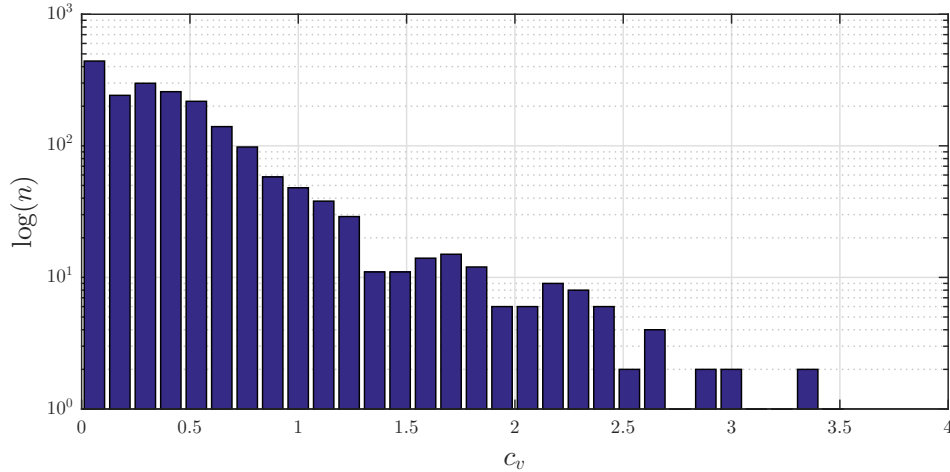
Nakloněním normály fasety vznikne nový model kamene. Pro tento model pomocí LADOKu vypočítáme parametry svazků. Pokud se zářivý tok svazku od původního modelu změnil, zapamatujeme si jeho hodnotu. Pro jednotlivý svazek dostaneme vektor hodnot zářivého toku $\vec{\phi}_e$.

Abychom mohli porovnat změnu zářivého toku, který se může u svazků řádově lišit, vyjádříme změnu toku pomocí variačního koeficientu c_v . Variační koeficient je výsledkem podílu směrodatné odchylky a střední hodnoty vektoru $\vec{\phi}_e$.

$$c_v = \frac{\sigma(\vec{\phi}_e)}{E(\vec{\phi}_e)} \quad (10.1)$$

Určíme variační koeficient simulovaných svazků a výsledek ze všech 10 kamenů zaneseme do histogramu na obr. 10.1. V histogramu vidíme, že existuje nezanedbatelný počet svazků, pro které změna náklonu fasety o 1° znamená změnu zářivého toku o více než polovinu původní hodnoty. Je zřejmé, že obdobně se bude měnit zářivý tok svazků při posunu fasety.

Výsledek naznačuje, že nebude snadné nalézt funkci, která by definovala vztah mezi zářivým tokem simulovaných a pozorovaných svazků.



Obrázek 10.1: Histogram variačního koeficientu zářivého toku svazků pro data z 10 snímků různých kamenů typu *viva12*.

10.3 Závislost zářivého toku

Broušený kámen je ozářen laserovým svazkem o vlnové délce 670 nm. Při průchodu světelného svazku kamenem se část záření absorbuje a přemění se na teplo. Absorpce záření závisí na odstínu kamene, proto si vybereme kameny stejného odstínu. V našem případě zvolíme odstín *Hyacint*, který se vyznačuje nízkou absorpcí zdrojového svazku.

Korespondující svazky jsme určili pro 4 kameny odstínu *Hyacint*, kde každý kámen byl $3 \times$ s různou rotací umístěn do měřicí soustavy. S korespondencemi z 12 snímků pracujeme jako s celkem a dostaneme množinu uspořádaných dvojic pozorovaných a simulovaných svazků.

Pozorované svazky charakterizuje zářivý tok $\vec{\phi}_{e_m}$ a simulované svazky zářivý tok $\vec{\phi}_{e_r}$. Cílem je nalézt funkci h , pro kterou

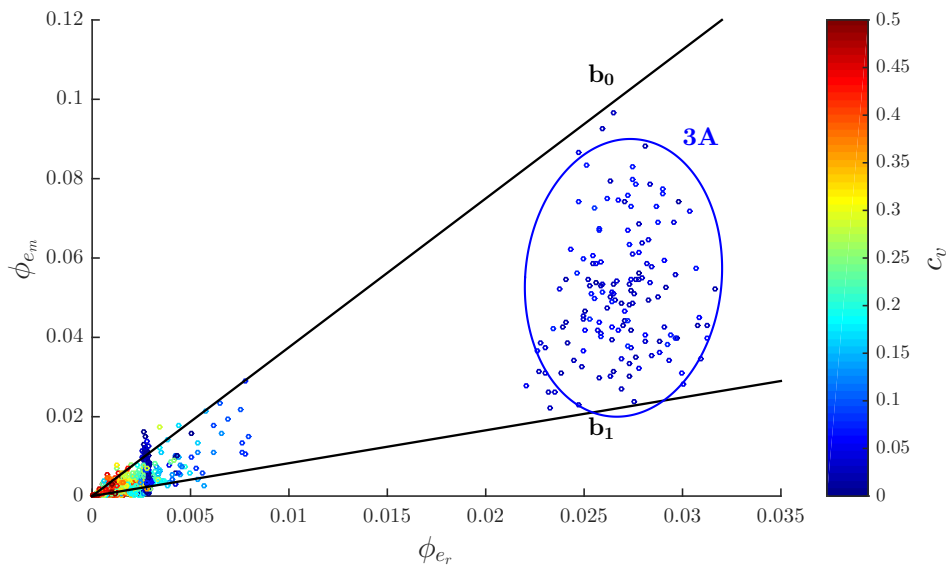
$$\phi_{e_m} = h(\phi_{e_r}) . \quad (10.2)$$

Abychom mohli porovnat data z více měření, vyjádříme si zářivý tok pozorovaných svazků jako jejich poměr ku součtu zářivého toku všech pozorovaných svazků v jednotlivém snímku.

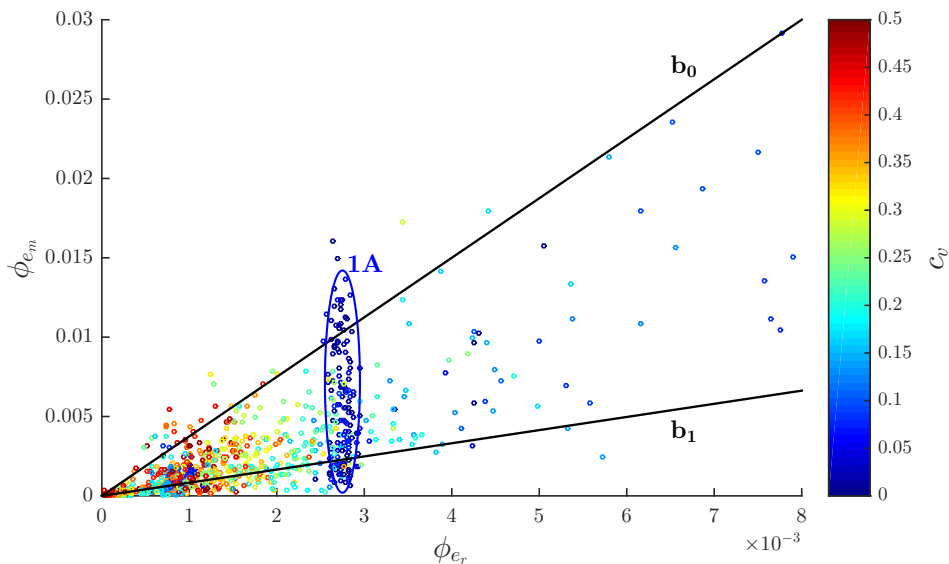
Závislost $\phi_{e_m} = f(\phi_{e_r})$ vyneseme do grafu na obr. 10.2, kde jsou vykresleny pouze svazky s variačním koeficientem c_v menším než 0.5.

Výsledek není příliš optimistický. Data v grafu jsou příliš rozptýlena na to, abychom mohli nalézt spolehlivou funkci popisující závislost 10.2. Důvodů může být hned několik.

10.3 ZÁVISLOST ZÁŘIVÉHO TOKU



Obrázek 10.2: Závislost velikosti zářivého toku pozorovaných svazků na velikosti zářivého toku simulovaných svazků. Zobrazeny jsou pouze svazky s variačním koeficientem zářivého toku větším než 0.5. Výsledky pro odstín *Hyacint*. Vynechány jsou svazky třídy **3B**. Přímký b_0 a b_1 naznačují, že rozptyl zářivého toku pozorovaných svazků roste s velikostí zářivého toku simulovaných svazků. Svazky třídy **3A** jsou zvýrazněny.



Obrázek 10.3: Detail obrázku 10.2. Vynechány jsou svazky třídy **3A** a **3B**. Svazky třídy **1A** jsou zvýrazněny.

Víme, že v modelu kamene nejsou postihnuty všechny skutečnosti ovlivňující velikost zářivého toku stop. Můžeme zmínit například to, že v modelu není zahrnuta čistota materiálu, která nemusí a prakticky ani není v celém materiálu konstantní. Nedokonalé proleštění fasety ovlivňuje rozptylové parametry světelného svazku. Změna parametrů fasety vede ke změně plochy fasety, tedy i ke změně plochy svazku, který je omezen hranou této fasety. Malá změna parametrů fasety může vést k velké změně zářivého toku svazku, což jsme si ukázali v kapitole 10.2. Tyto a další vlastnosti v konečném důsledku vyústí v chybu údaje na ose y v grafu na obr. 10.2.

Na druhé straně musíme počítat s nejistotou určení zářivého toku pozorovaných svazků vznikající při výpočtu parametrů svazků z obrazu. Mezi zásadní problémy patří šum, překrývání stop, difuzní odrazivost svazků či odhad pozadí snímku.

10.4 Závislost parametrů ocásků

Zajímáme se o to, jak může přispět znalost ocásků pozorovaných a simulovaných svazků k nalezení korespondující dvojice.

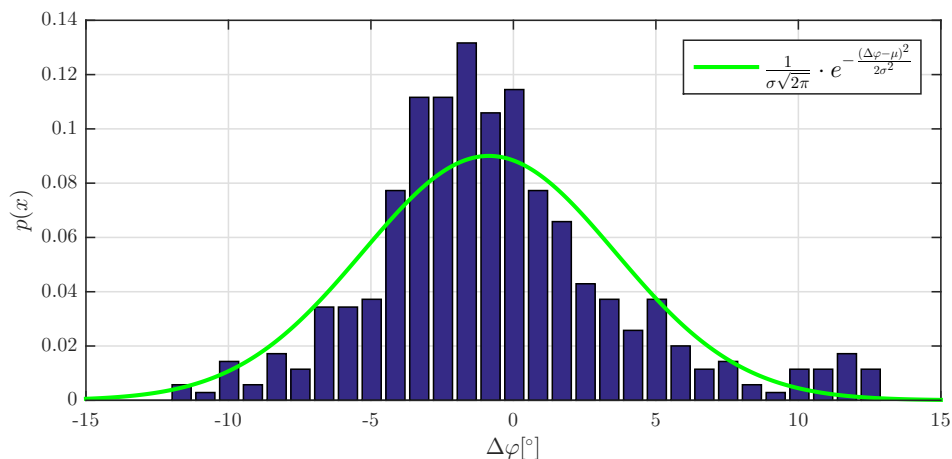
Korespondující ocásky nalezneme pomocí jednoduchého algoritmu založeného na podobnosti směru ocásků korespondujících stop. Takto nalezené korespondence zkontrolujeme a případně upravíme. Máme k dispozici data korespondujících ocásků pro 25 snímků celkem deseti kamenů *viva12*.

Ocásky parametrizujeme pomocí velikosti ρ a směrového úhlu ϕ . Z korespondujících ocásků získáme parametry pozorovaných ocásků $\vec{\rho}_m$ a $\vec{\varphi}_m$ a k nim odpovídající simulované parametry $\vec{\rho}_r$ a $\vec{\varphi}_r$.

10.4.1 Směrový úhel

U směrového úhlu potřebujeme vědět, do jaké míry souhlasí směr pozorovaného a směr simulovaného ocásku. Vypočítáme rozdíl směrových úhlů $\Delta\vec{\phi}$ a vyneseme do grafu 10.4 rozložení pravděpodobnosti.

$$\Delta\vec{\phi} = \vec{\varphi}_m - \vec{\varphi}_r \quad (10.3)$$



Obrázek 10.4: Odhad pravděpodobnostní funkce rozdílu směrového úhlu mezi pozorovanými a simulovanými ocásky. Aproximace Gaussovou křivkou s parametry $\sigma = 4.43^\circ$ a $\mu = -0.86^\circ$.

10.4 ZÁVISLOST PARAMETRŮ OCÁSKŮ

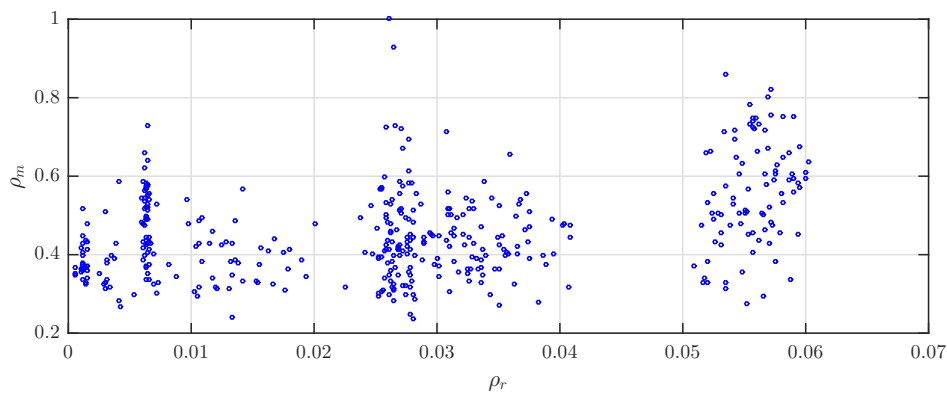
Pravděpodobnostní rozdělení na obr. 10.4 lze aproximovat Gaussovou funkcí

$$f(\Delta\varphi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\Delta\varphi-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (10.4)$$

s rozptylem $\sigma = 4.43^\circ = 0.077$ rad a střední hodnotou $\mu = -0.86^\circ = -0.15$ rad. Tato funkce může sloužit jako základ pro určení podobnosti ocásků.

10.4.2 Velikost

Vykreslili jsme si závislost velikosti pozorovaných ocásků na velikosti simulovaných ocásků. Graf na obr. 10.5 obsahuje pouze náhodně vybrané vzorky závislosti $\rho_m = f(\rho_r)$, kde ρ_m a ρ_r jsou normované velikosti pozorovaných, resp. simulovaných ocásků. Zdá se, že mezi velikostmi pozorovaných a simulovaných ocásků není takřka žádná souvislost. Nejsme schopni nalézt funkci f , která by popisovala závislost $\rho_m = f(\rho_r)$.



Obrázek 10.5: Závislost velikosti pozorovaných ocásků ρ_m na velikosti simulovaných ocásků ρ_r pro náhodně vybranou podmnožinu korespondujících ocásků.

Kapitola 11

Automatická optimalizace - algoritmy

11.1 Zavedení symbolů

Uvedeme algoritmy využitě pro hledání korespondencí pozorovaných a simulovaných svazků a popíšeme jejich aplikaci pro automatické určení náklonu faset broušených kamenů. Předtím, než se začneme zabývat navrženými přístupy, je třeba sjednotit značení jednotlivých parametrů svazků.

Simulované svazky dělíme do tří disjunktních množin.

- \mathcal{R}_c – uspořádaná r_c -tice svazků, pro které byl nalezen korespondující svazek,
- \mathcal{R} – uspořádaná r -tice svazků, ke kterým můžeme přiřadit korespondující savek,
- \mathcal{R}_o – uspořádaná r_o -tice svazků, kterým není možné přiřadit korespondující svazek.

Platí, že $\mathcal{R} = (\mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_r)$. Dále definujeme uspořádanou r' -tici $\mathcal{R}' = \mathcal{R} \cup \mathcal{R}_o$. $r' = r + r_o$.

Podobně dělíme pozorované svazky na \mathcal{M}_c , \mathcal{M} , \mathcal{M}_o a \mathcal{M}' , kde $\mathcal{M} = (\mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_m)$.

Algoritmy pracují s informacemi o směru, obrazu a zářivém toku ϕ_e svazků. Směr vyjadřujeme pomocí azimutu α a elevace ε . Polohu obrazu svazku určuje x a y souřadnice.

Parametry simulovaných svazků označujeme $\vec{\alpha}_r$, $\vec{\varepsilon}_r$, $\vec{\phi}_{e_r}$, \vec{x}_r a \vec{y}_r . Pro pozorované svazky platí označení $\vec{\alpha}_m$, $\vec{\varepsilon}_m$, $\vec{\phi}_{e_m}$, \vec{x}_m a \vec{y}_m . Platí, že $\vec{\alpha}_r = \alpha_r(\mathcal{R})$, $\vec{\alpha}_m = \alpha_m(\mathcal{M})$ apod.

Množinu korespondujících svazků značíme \mathcal{C} . Jednotlivá korespondence C_i je uspořádaná dvojice (R_j, M_k) , $C_i \subseteq \mathcal{C}$. $\alpha_r(C_i)$ označuje azimut simulovaného svazku R_j , kde R_j je simulovaný svazek z korespondující dvojice C_i . $\alpha_r(\mathcal{C})$ vektor $(\alpha_r(C_1), \dots, \alpha_r(C_n))$, kde n je počet uspořádaných dvojic v množině \mathcal{C} .

11.2 Použité algoritmy

Korespondence hledáme buď pro specifickou třídu svazků nebo pro svazky, které splní požadované parametry.

11.2.1 Korespondence svazků třídy 1A

Víme, že svazky třídy **1A** se odráží od faset **UF1** – **UF2**. Úhlová odchylka normály simulované fasety od skutečné normály se projeví dvojnásobnou úhlovou odchylkou simulovaného svazku od pozorovaného. Očekáváme, že rozdíl mezi simulovanými a reálnými parametry faset není příliš velký. Proto lze očekávat, že pozorované svazky třídy **1A** budou mít velmi podobný směr jako simulované. Přibližně tedy známe směr těchto svazků.

Na stínítku se v blízkém okolí stop třídy **1A** mohou nacházet pouze stopy s řádově nižším zářivým tokem. Tato vlastnost je zajištěna geometrií kamene *viva12* a provedením experimentu. Pokud známe zářivý tok stop, můžeme v obraze snadno nalézt svazek třídy **1A**.

Parametry algoritmu

- d_{max} – maximální vzdálenost pozorovaného svazku od simulovaného,
- n_{min} – minimální počet pozorovaných svazků, v blízkém okolí simulovaného svazku, s nižším zářivým tokem než zářivý tok potenciálního korespondujícího pozorovaného svazku.

Popis algoritmu

1. Definujeme proměnné $\alpha_c = 0$, $\varepsilon_c = 0$, $\mathcal{C} = \emptyset$, $\mathcal{C}_l = \emptyset$.
2. $i = 0$.
3. Vypočítáme kritérium hodnotící vzdálenost mezi svazky

$$\vec{d} = \sqrt{(\alpha_r(\mathbf{R}_i) \cdot \vec{\mathbf{1}} - \vec{\alpha}_m - \alpha_c \cdot \vec{\mathbf{1}})^2 + (\varepsilon_r(\mathbf{R}_i) \cdot \vec{\mathbf{1}} - \vec{\varepsilon}_m - \varepsilon_c \cdot \vec{\mathbf{1}})^2}.$$
4. Vybereme uspořádanou k -tici svazků \mathcal{N} z \mathcal{M} , která odpovídá rostoucí posloupnosti \vec{d} a omezení na $\vec{d} < d_{max}$. $\mathcal{N}_1 \sim \arg \min(d)$ tak, že $\mathcal{N} = (M_a, \dots, M_b)$, kde $a = \arg \min(\vec{d})$ a $b = \arg \min\left(\frac{1}{\vec{d} - d_{max}}\right)$. Dále bude platit, že $N_1 = M_a$ a $N_k = M_b$ apod.
5. Nalezneme uspořádanou k -tici \mathcal{O} takovou, že $\mathcal{O} = (N_1, N_e, N_f, \dots, N_g)$, kde $e = \arg \min(\phi_{em}(N_1), \phi_{em}(N_2))$, $f = \arg \min(\phi_{em}(N_1), \phi_{em}(N_2), \phi_{em}(N_3))$ a $g = \arg \min(\phi_{em}(N_1), \dots, \phi_{em}(N_k))$.
6. Určíme vektor $\vec{n}_{\mathcal{O}}$ o velikosti k udávající četnost prvků z množiny \mathcal{N} v množině \mathcal{O} . Pokud $O_q = O_s$, tak $n_{\mathcal{O}}(q) = n_{\mathcal{O}}(s)$, pro $q = \{1, \dots, k\}$ a podobně $s = \{1, \dots, k\}$.
7. Určíme minimální l , které splňuje alespoň jednu z podmínek $n_{\mathcal{O}}(l) > n_{min}$ a $l = k$. Do množiny \mathcal{C} přidáme korespondenci (\mathbf{R}_i, N_l) .
8. Pokud $i \neq r$, tak $i = i + 1$ a opakujeme body 3 až 7.
9. Pokud $\mathcal{C}_l \neq \mathcal{C}$, vypočítáme korekční parametry $\alpha_c = \text{median}(\alpha_r(\mathcal{C}) - \alpha_m(\mathcal{C}))$, $\varepsilon_c = \text{median}(\varepsilon_r(\mathcal{C}) - \varepsilon_m(\mathcal{C}))$, položíme \mathcal{C}_l rovno \mathcal{C} a opakujeme body 2 až 8.
10. Z \mathcal{C} odstraníme korespondence, ve kterých se obraz simulovaného svazku nachází mimo obraz stínítka.
11. Optimalizujeme náklon kamene (kapitola 8.2).
12. Podle výsledku optimalizace upravíme model kamene a přepočítáme parametry simulovaných svazků. Opakujeme bod 1 až 10. V příští iteraci tento bod vynecháme.
13. Z \mathcal{C} odstraníme prvky, ve kterých se obraz simulovaného svazku nachází mimo obraz stínítka.

■ 11.2.2 Korespondence svazků třídy 3A

Po optimalizaci podle třídy **1A** máme dobře odhadnuté parametry faset **UF1** - **UF12**. Pomocí rotace a náklonu kamene odhadneme přibližně parametry faset **TOP** a **BOT**. Podstatné je, že svazek třídy **3A** dopadá na tabulku **TOP** pod výrazně menším úhlem, než je kritický úhel. To zajišťuje přijatelnou citlivost směru svazků na změnu parametrů dopadových faset.

Simulované svazky třídy **3A** mají po třídě **3B** druhý nejvyšší zářivý tok. Ostatní třídy se vyznačují řádově nižším zářivým tokem. Podle zářivého toku ϕ_{e_r} lze tedy snadno oddělit svazky tříd **3A** a **3B** od ostatních svazků. Simulovaných svazků třídy **3A** a **3B** je celkem 13. V obraze často nastává situace, že svazek třídy **3B** nedetekujeme, protože je jeho obraz zakrytý podstavcem na kámen.

Další vlastnost, která dobře charakterizuje svazky třídy **3A** jsou dlouhé a intenzivní ocásky. Při hledání korespondencí můžeme využít párování svazků podle charakteru ocásků (kapitola 11.2.4). Výhodou algoritmu je to, že dokáže za vhodného nastavení nalézt korespondující svazky, a to i v případě vysokých směrových odchylek svazků. Nevýhodou je necitlivost na ostatní parametry svazků.

Popis algoritmu

1. Redukujeme počet pozorovaných svazků a vytvoříme uspořádanou 13-tici \mathcal{M} obsahující 13 pozorovaných svazků s nejvyšší hodnotou zářivého toku.
2. Podle podobnosti ocásků nalezneme počáteční odhad množiny korespondencí \mathcal{C} (kapitola 11.2.4). Parametry algoritmu: $\sigma = 0.2$, $L_{min} = 2$, $\Delta\alpha_{max} = 35^\circ$, $\Delta\varepsilon_{max} = 15^\circ$.
3. Uvolníme pouze parametry faset **TOP** a **BOT**. V tomto kroku prohlásíme parametry těchto dvou faset za totožné a optimalizujeme parametry uvolněných faset (kapitola 8.2). Pokud neznáme dostatečně přesně index lomu kamene optimalizujeme také index lomu.
4. Podle výsledku optimalizace upravíme model kamene a přepočítáme parametry simulovaných svazků. Pro finální odhad množiny korespondencí \mathcal{C} použijeme algoritmus v kapitole 11.2.1 od bodu 1 do bodu 10. \mathcal{R} bude uspořádaná 24-tice simulovaných svazků třídy **1A** a **3A**. \mathcal{M} bude obsahovat všechny pozorované svazky.
5. K optimalizovaným parametrům přidáme parametry faset **UF1** až **UF12** a optimalizujeme.

11.2.3 Korespondence svazků třídy 5D

Svazky třídy **5D** můžeme v obraze pozorovat, pokud existuje úhlová odchylka mezi fasetou **TOP** a **BOT** (kapitola 8.5.1). Předpokládáme, že pokud nějaká odchylka vznikne, bude max. 1°. Také předkládáme, že normály faset **UF1** až **UF12** nejsou vůči pravidelnému tvaru *viva12* příliš vychýleny.

Podstatné je, že známe polohu svazků třídy **3A**. Za výše uvedených okolností lze pozorovat vzor určující vzájemnou polohu dvojice svazků třídy **3A** a **5D**, které mají v seznamu stejné dopadové fasety např. dvojice (UF1-TOP-BOT, UF1-TOP-BOT-TOP-BOT). Vzájemnou polohu mezi všemi těmito páry lze popsat pomocí polárních souřadnic vzdáleností ρ a úhlem φ .

Polohu j -tého pozorovaného svazku popisujeme souřadnicemi $x_m(M_j)$ a $y_m(M_j)$. Pozorované svazky rozdělíme na uspořádanou n -tici \mathcal{N} obsahující 12 svazků třídy **3A** a uspořádanou o -tici \mathcal{O} obsahující zbylé svazky.

Parametry algoritmu

- ρ_{max} – maximální vzdálenost obrazu korespondujících svazků třídy **3A** a **5D** v pixelech,
- $\Delta\rho$ – maximální absolutní odchylka úhlu v obraze mezi párem svazků třídy **3A** a **5D**,
- $\Delta\varphi$ – maximální absolutní odchylka vzdálenosti v obraze mezi párem svazků třídy **3A** a **5D**,
- p_{min} – minimální počet nalezených dvojic.

Algoritmus

1. Vypočítáme Euklidovu vzdálenost obrazů jednotlivých svazků

$$\rho_{j,k} = \sqrt{(x_m(N_j) - x_m(O_k))^2 + (y_m(N_j) - y_m(O_k))^2}$$

pro $j = \{1, \dots, n\}$ a $k = \{1, \dots, o\}$.

Směrový úhel určíme podle vztahu $\varphi_{j,k} = \arctan \frac{y_m(N_j) - y_m(O_k)}{x_m(N_j) - x_m(O_k)}$.

2. Vybereme svazky vzdálené méně než ρ_{max} a dostaneme vektor vzdáleností $\vec{\rho}$ a směrových úhlu $\vec{\varphi}$.

$$\{\varphi_{j,k} \subseteq \vec{\varphi}, \rho_{j,k} \subseteq \vec{\rho} \mid \rho_{j,k} < \rho_{max}\} \text{ pro } j = \{1, \dots, n\} \text{ a } k = \{1, \dots, o\},$$

kde $\vec{\varphi} = (\varphi_{j_1, k_1}, \dots, \varphi_{j_s, k_s}) = (\varphi_1, \dots, \varphi_s)$ a $\vec{\rho} = (\rho_{j_1, k_1}, \dots, \rho_{j_s, k_s}) = (\rho_1, \dots, \rho_s)$.

3. Definujeme funkce $g(x) \rightarrow \begin{cases} 1, & |x| < \Delta\rho \\ 0, & jinak \end{cases}$, $h(x) \rightarrow \begin{cases} 1, & |x| < \Delta\varphi \\ 0, & jinak \end{cases}$.

Pro vektor \vec{x} délky n platí $g(\vec{x}) = (g(x_1), \dots, g(x_n))$ a $h(\vec{x}) = (h(x_1), \dots, h(x_n))$.

Nechť $a = \arg \max_{q=\{1, \dots, s\}} \sum_{i=1}^s g(\varphi_i - \varphi_q) \cdot h(\rho_i - \rho_q)$. Potom $\vec{v} = g(\vec{\varphi} - \varphi_a \cdot \vec{\mathbf{1}}) + h(\vec{\rho} - \rho_a \cdot \vec{\mathbf{1}})$.

4. Nalezeme množinu potenciálních korespondencí \mathcal{C}' . $\{(R_t, O_{k_q}) \subseteq \mathcal{C}' \mid v_q > 1\}$ pro $q = \{1, \dots, s\}$, kde R_t je simulovaný svazek třídy **5D** se stejnou první dopadovou fasetou jako pozorovaný svazek N_{j_q} třídy **3A**.
5. Pokud \mathcal{C}' obsahuje alespoň p_{min} prvků, přidáme \mathcal{C}' do množiny korespondencí \mathcal{C} .

11.2.4 Korespondence svazků podle ocásků

Ocásky svazků definujeme pomocí velikosti a směrového úhlu. Počet ocásků simulovaného svazku závisí na počtu stran polygonu, kterým popisujeme tvar svazku. Intenzitu ocásku v simulaci určuje zářivý tok svazku a velikost hrany, na které ocásek vzniká.

Velikost $\vec{\xi}_r(\mathbf{R}_i)$ a směrový úhel $\vec{\psi}_r(\mathbf{R}_i)$ ocásků i -tého simulovaného svazku \mathbf{R}_i určuje vektor o délce n_i . $\vec{\xi}_r(\mathbf{R}_i) = (\xi_{r_1}(\mathbf{R}_i), \dots, \xi_{r_{n_i}}(\mathbf{R}_i))$, $\vec{\psi}_r(\mathbf{R}_i) = (\psi_{r_1}(\mathbf{R}_i), \dots, \psi_{r_{n_i}}(\mathbf{R}_i))$, kde n_i je počet ocásků \mathbf{R}_i .

Detekce ocásků pozorovaného svazku je popsána v kapitole 4.7. Obecně platí, že v obraze jsou detekovatelné ocásky, pro které byla v odpovídající simulaci vypočítána přijatelná velikost.

Velikost ocásků j -té měřené stopy značíme $\vec{\rho}_m(\mathbf{M}_j)$, směrový úhel $\vec{\varphi}_m(\mathbf{M}_j)$.

Podobnost ocásků hodnotíme především na základě podobnosti směru ocásků. Velikost ocásků určuje váhu příspěvku ho hodnotícího kritéria.

Parametry algoritmu

- $\Delta\alpha_{max}$ – maximální absolutní odchylka azimutu pozorovaného svazku od simulovaného,
- $\Delta\varepsilon_{max}$ – maximální absolutní odchylka elevace pozorovaného svazku od simulovaného,
- σ – citlivost kritériální funkce na úhlovou odchylku ocásků,
- L_{min} – minimální velikost kritéria $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{r \times m}$ pro přidání dvojice svazků do množiny korespondencí \mathcal{C} .

Algoritmus

1. $i = 1$

2. Normujeme velikost simulovaných ocásků $\vec{\xi}_r(\mathbf{R}_i) = \frac{\vec{\xi}_r(\mathbf{R}_i)}{\max(\vec{\xi}_r(\mathbf{R}_i))}$.

3. Ze simulovaných ocásků vybereme pouze ty s dominantní intenzitou a získáme vektor velikostí $\vec{\rho}_r(\mathbf{R}_i)$ a směr $\vec{\varphi}_r(\mathbf{R}_i)$ o délce n_k .

$$\{\psi_{r_k}(\mathbf{R}_i) \subseteq \vec{\varphi}_r(\mathbf{R}_i), \xi_{r_k}(\mathbf{R}_i) \subseteq \vec{\rho}_r(\mathbf{R}_i) \mid \xi_{r_k}(\mathbf{R}_i) > \xi_{min}\}, \text{ kde } k = \{1, \dots, n_i\}.$$

4. Nalezneme uspořádanou n -tici \mathcal{N} z pozorovaných svazků \mathcal{M} .

$$\{\mathbf{M}_j \subseteq \mathcal{N} \mid |\alpha_r(\mathbf{R}_i) - \alpha_m(\mathbf{M}_j)| < \Delta\alpha_{max}, |\varepsilon_r(\mathbf{R}_i) - \varepsilon_m(\mathbf{M}_j)| < \Delta\varepsilon_{max}\}, \text{ kde } j = \{1, \dots, m\}.$$

5. Pokud $\mathbf{M}_j \subseteq \mathcal{N}$,

$$\mathbf{L}(i, j) = \sum_{k=1}^{n_k} \sum_{l=1}^{n_l} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(\varphi_{r_k}(\mathbf{R}_i) - \varphi_{m_l}(\mathbf{M}_j))^2}{2\sigma^2}} \cdot \sqrt{\rho_{r_k}(\mathbf{R}_i) \rho_{m_l}(\mathbf{M}_j)}, \quad (11.1)$$

jinak $\mathbf{L}(i, j) = 0$, pro $j = \{1, \dots, m\}$, kde n_l je počet ocásků \mathbf{M}_j .

6. Pokud $i \neq r$, $i = i + 1$ a opakujeme kroky 2 až 5.

7. Korespondující svazky nalezneme podle vzájemně nejvyššího kritéria v \mathbf{L} s minimální velikostí L_{min} . Korespondující dvojice $(\mathbf{R}_i, \mathbf{M}_j) \subseteq \mathcal{C}$, pokud $i = \arg \max_{q=\{1, \dots, r\}} \mathbf{L}(q, j)$,

$$j = \arg \max_{q=\{1, \dots, m\}} \mathbf{L}(i, q) \text{ a } \mathbf{L}(i, j) > L_{min}.$$

■ **11.2.5 Korespondence svazků podle polohy v obraze a zářivého toku**

Tento algoritmus se snaží o to nalézt dvojici svazků, které se promítnou na podobnou pozici v obraze a mají vysoký zářivý tok. Snažili jsme se nalézt funkci, která by charakterizovala závislost mezi zářivým tokem ϕ_{e_r} simulovaných stop a zářivým tokem ϕ_{e_m} pozorovaných stop (kapitola 10.3). Jednoduchou funkci jsme však nenašli. Ke korespondenci svazků budeme místo absolutní velikosti zářivého toku využívat relativní velikost zářivého toku vzhledem k ostatním svazkům v blízkém okolí.

Parametry algoritmu

- $d_{m_{max}}$ – maximální vzdálenost simulovaných svazků v pixelech $d_{m_{max}} = 80$ px,
- $d_{r_{max}}$ – maximální vzdálenost simulovaného svazku od pozorovaného svazku v pixelech, $d_{r_{max}} = 50$ px,
- L_{max} - maximální velikost kritéria $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{r' \times m'}$ pro přidání dvojice svazků do množiny korespondencí \mathcal{C} .

Algoritmus

1. $j = 1$, $\vec{w}_{m'} = \vec{\mathbf{1}}$, $\vec{w}_{r'} = \vec{\mathbf{1}}$.
2. Nalezneme 3 svazky $(M'_a, M'_b, M'_c) \subset \{\mathcal{M}' \setminus M'_j\}$ s nejmenší Euklidovou vzdáleností obrazu (d_a, d_b, d_c) od obrazu svazku M'_j .

$$d_a = \sqrt{\left(x_m(M'_j) - x_m(M'_a)\right)^2 + \left(y_m(M'_j) - y_m(M'_a)\right)^2}.$$

3. Necht $f(M'_x) \rightarrow \begin{cases} \phi_{e_m}(M'_x), & d_x < d_{m_{max}}, \phi_{e_m}(M'_j) > 1 \\ 1, & \text{jinak} \end{cases}$ potom

$$\phi_{m'_{max}} = \max\left(\phi_{e_m}(M'_j), f(M'_a), f(M'_b), f(M'_c)\right).$$

4. Nastavíme váhy pozorovaných svazků.

$$w_{m'_q} = \frac{\phi_{max}}{f(M'_q)} \text{ pro } q = \{j, a, b, c\}.$$

5. Nalezneme uspořádanou s -tici $\mathcal{S} = (S_1, \dots, S_s)$ simulovaných svazků z \mathcal{R}' .

$\{\mathcal{R}'_i \subseteq \mathcal{S} \mid d_{i,j} < d_{r_{max}}\}$ pro $i = \{1, \dots, r'\}$, kde

$$d_{i,j} = \sqrt{\left(x_m(M'_j) - x_r(\mathcal{R}'_i)\right)^2 + \left(y_m(M'_j) - y_r(\mathcal{R}'_i)\right)^2}.$$

6. $w_{r'_j} = \max(\phi_{e_r}(\mathcal{S}))$.

7. Dokud $j \neq n'$, $j = j + 1$ a opakujme body 2 až 6.

8. Necht $g(x) \rightarrow \begin{cases} x, & x > 1 \\ 1, & \text{jinak} \end{cases}$, potom můžeme určit kritériální funkci

$$\mathbf{L}(i, j) = d_{i,j} \cdot w_{m'_j} \cdot g\left(\frac{\phi_{r_i}(\mathcal{R}'_i)}{w_{r'_j}}\right). \tag{11.2}$$

9. Potenciální korespondence \mathcal{C}' nalezneme podle vzájemně nejnižší velikosti kritéria v \mathbf{L} , které nepřekročí hodnotu L_{max} . Korespondující dvojice $(R'_i, M'_j) \subseteq \mathcal{C}'$, pokud

$$i = \arg \min_{q=\{1, \dots, r'\}} \mathbf{L}(q, j), j = \arg \min_{q=\{1, \dots, m'\}} \mathbf{L}(i, q) \text{ a } \mathbf{L}(i, j) < L_{max}.$$
10. Vybereme korespondence z \mathcal{C}' , které můžeme přidat do množiny korespondencí \mathcal{C} . Korespondence musí obsahovat simulovaný svazek z \mathcal{R} a zároveň pozorovaný svazek z množiny \mathcal{M} .

■ 11.3 Automatická optimalizace parametrů faset

Před zahájením optimalizace je třeba změřit zkoumaný kámen a určit parametry kamene d_{TOP} , d_{BOT} , h a h_{RF} (viz kapitola 4.7).

Před popisem postupu optimalizace upozorníme na skutečnosti, o kterých se nebudeme v postupu zmiňovat. Pokud neuvedeme, které fasety optimalizujeme, budou optimalizovány stejné parametry jako v předchozím kroku. Simulované svazky se přepočítávají vždy, když dojde ke změně parametrů kamene. Když nalezneme dvojici korespondujících svazků, automaticky ji přidáme do množiny korespondencí \mathcal{C} .

Postup optimalizace

1. Detekujeme pozorovatelné svazky v obraze a určíme jejich parametry (kapitola 3.4).
2. Podle předem změřených parametrů kamene sestavíme matetický model v programu LADOK a vyřešíme simulované svazky jednou dopadovou fasetou.
3. Požijeme algoritmus uvedený v kapitole 11.2.1 a nalezneme korespondence svazků třídy **1A**. Optimalizujeme nejdříve náklon a rotaci kamene a poté parametry faset **UF1-UF12**.

Parametry algoritmu jsou následující $d_{max} = 0.32 \text{ rad}$, $n_{min} = 5$.

4. Požijeme algoritmus uvedený v kapitole 11.2.2 a nalezneme korespondence svazků třídy **3A**. Optimalizujeme parametry faset **UF1-UF12**, **TOP** a **BOT**, u faset **TOP** a **BOT** zachováme rovnoběžnost.
5. Nalezneme svazky třídy **5D** podle algoritmu v 11.2.3. Pokud je detekce svazků třídy **5D** neúspěšná, zachováme rovnoběžnost faset **TOP** a **BOT** a optimalizujeme parametry faset.

Parametry algoritmu: $\rho_{max} = 35 \text{ px}$, $\Delta\rho = 2.5 \text{ px}$, $\Delta\varphi = 0.3 \text{ rad}$, $p_{min} = 5$.

6. Pokud existují simulované svazky třídy **3C** nalezneme k nim odpovídající pozorované svazky. Použijeme algoritmus pro hledání korespondencí podle ocásků (kapitola 11.2.4). Pokud jsme našli nějakou korespondenci, optimalizujeme parametry faset.

Parametry algoritmu: $\Delta\alpha_{max} = 2^\circ$, $\Delta\varepsilon_{max} = 5^\circ$, $\sigma = 0.05$, $L_{min} = 10$.

Máme množinu korespondujících dvojic svazků \mathcal{C} obsahující svazky třídy **1A**, **3A**, **3C** a **5D**. Tyto korespondence jsou ve většině případů bezchybné, proto zavedeme referenční množinu korespondencí $\mathcal{C}_{ref} = \mathcal{C}$.

11.3 AUTOMATICKÁ OPTIMALIZACE PARAMETRŮ FASET

7. Položíme $\mathcal{C} = \mathcal{C}_{ref}$. Nalezneme korespondence svazků tříd **6A**, **6B**, **6C** a **6D**. Postup lze rozdělit na více kroků.
 - a) Nalezneme potenciální množinu korespondencí \mathcal{C}' . Použijeme algoritmus 11.2.5 s parametrem $L_{max} = 30$.
 - b) Pro potenciální korespondence \mathcal{C}' vypočítáme kritérium podobnosti \mathbf{L} podle ocásků z rovnice 11.1. Pokud je pro danou dvojici svazků kritérium větší než 10, přidáme korespondenci do množiny \mathcal{C} .
 - c) Pro zbylé referenční svazky tříd **6A**, **6B**, **6C** a **6D** nalezneme korespondence podle ocásků (kapitola 11.2.4). Nastavení parametrů algoritmu: $\Delta\alpha_{max} = 7^\circ$, $\Delta\varepsilon_{max} = 5^\circ$, $\sigma = 0.05$ a $L_{min} = 10$.
8. Nalezneme obraz simulovaných svazků třídy **7C** a **7D**. Tyto svazky jsou v ideálním případě rovnoběžné. Pokud bude nastavení faset takové, že se tyto svazky dostatečně rozbíhají, pokusíme se k nim nalézt korespondující svazky podle bodu 7a a 7b.
9. Pokud v bodě 7 a 8 nalezneme méně než tři korespondující svazky, vybereme volné simulované svazky s $\phi_{e_r} > 1\%$ a elevací větší než 15° . Pro vybrané simulované svazky nalezneme korespondující svazky podle ocásků (kapitola 11.2.4) s parametry $\Delta\alpha_{max} = 25^\circ$, $\Delta\varepsilon_{max} = 10^\circ$, $\sigma = 0.2$ a $L_{min} = 8$.
10. Optimalizujeme parametry faset a $2\times$ opakujeme body 7 až 9, po nichž opět proběhne optimalizace faset.
11. Hledáme korespondence v oblastech, kde je malá hustota pozorovaných svazků. Nalezneme pozorované svazky, které mají v obraze nejbližší sousední pozorovaný svazek dále než 50 px. Vybereme simulované svazky se zářivým tokem minimálně 0.1% a elevací minimálně $\min(\varepsilon_r(\mathcal{C}))$. Pro nalezení korespondencí použijeme algoritmus v kapitole 11.2.5 s parametrem $L_{max} = 50$ a optimalizujeme parametry faset. Opakujeme $2\times$.
12. Současnou množinu korespondencí budeme uvažovat pouze jako potenciální $\mathcal{C}' = \mathcal{C}$ a ponecháme si pouze referenční korespondence $\mathcal{C} = \mathcal{C}_{ref}$.
13. Vybereme simulované svazky se zářivým tokem minimálně 0.1% a elevací minimálně $\min(\varepsilon_r(\{\mathcal{C} \cup \mathcal{C}'\})) - 3^\circ$. Svazky spárujeme pomocí algoritmu v kapitole 11.2.5 s parametrem $L_{max} = 20$.
14. Bod 13 $2\times$ opakujeme a poté optimalizujeme parametry faset.
15. Určení korespondencí a optimalizaci podle bodů 12, 13 a 14 dvakrát a dostaneme konečný výsledek orientace faset broušených kamenů.

Kapitola 12

Ověření správnosti korespondencí

Máme k dispozici algoritmy, pomocí kterých jsme schopni nalézt korespondující svazky. U některých, zvláště u algoritmů v kapitole 11.2.4 a 11.2.5, můžeme kromě správných korespondencí nalézt řadu falešných dvojic svazků.

Chceme nalézt metodu schopnou rozhodnout, zda jsou korespondence správné či nesprávné.

12.1 Množiny korespondencí

Přicházíme s nápadem rozdělit množiny na čtyři disjunktní množiny.

- **Optimalizované** – Do množiny optimalizovaných korespondencí patří korespondence, o kterých jsme si velmi jisti, že jsou správné. Tato množina korespondencí určuje model kamene.
- **Kriteriální** – Kriteriální množina korespondencí složí k výpočtu hodnotícího kritéria. Do této množiny patří, stejně jako do množiny optimalizovaných korespondencí, spolehlivě určitelné korespondence.
- **Kandidátské** – Korespondence, o kterých chceme rozhodnout, zda jsou či nejsou správné.
- **Ostatní** – Korespondence nehodící se ani do jedné z předchozích množin. Typicky svazky příliš vzdálené a svazky s nízkým zářivým tokem.

12.2 Rozhodovací algoritmus

Množina optimalizovaných korespondencí určujeme model kamene. Pro tento model je pro kriteriální množinu korespondencí vypočítáno optimalizační kritérium z rovnice 8.1 (dále pouze jako *kritérium*) a určen jeho součet $\varepsilon_0 = \sum \vec{\varepsilon}$.

Vybereme jednu korespondenci z množiny kandidátů a přidáme ji do množiny optimalizovaných korespondencí. Podle množiny optimalizovaných korespondencí odhadneme nový model kamene. Na tomto modelu vypočítáme srovnávací *kritérium* pro množinu kriteriálních korespondencí $\varepsilon_c = \sum \vec{\varepsilon}$.

Změna optimalizačního kritéria je potom

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_c. \quad (12.1)$$

Pokud je $\Delta\varepsilon > \varepsilon_t$, kde ε_t je rozhodovací práh, prohlásíme tuto korespondenci za správnou a ponecháme v množině optimalizovaných korespondencí. V opačném případě korespondenci odstraníme.

Čekali bychom, že optimální práh ε_t by mohl být roven nule. Po přidání správné korespondence do množiny optimalizovaných bude $\varepsilon_0 > \varepsilon_c$ a pokud přidáme falešnou korespondenci, tak $\varepsilon_0 < \varepsilon_c$.

■ 12.3 Simulace dat

Pro ověření vhodnosti metody použijeme simulační program LADOK.

Vytvoříme ideální model kamene *viva12*. Změníme náhodně náklon faset ideálního modelu a z faset vytvoříme *deformovaný* model kamene. Změna náklonu je náhodně vybrána z normálního rozdělení se střední hodnotou $\mu = 0$ a směrodatnou odchylkou $\sigma = 0.5^\circ$.

Pro *deformovaný* model vypočítáme pomocí programu LADOK výstupní svazky s maximálně 11 dopadovými fasetami. Svazky promítneme do obrazu. Pozici svazků v obraze zašumíme náhodným výběrem z normálního rozdělení se střední hodnotou $\mu = 0$ a směrodatnou odchylkou, která odpovídá polovině maximální citlivosti dopadových faset svazku výstupního úhlu. Odrazová faseta má citlivost 2. U lomu za citlivost fasety dosazujeme $\frac{d\alpha_2}{d\alpha_1}$ z rovnice 6.2, tj. změnu lomeného úhlu α_2 na změně úhlu dopadu α_1 (kapitola 6.2). Zašuměné pozice svazků představují simulaci pozorovaných svazků.

Vybereme korespondence do optimalizované množiny korespondencí. Podle množiny optimalizovaných korespondencí optimalizujeme kámen a dostaneme referenční optimalizovaný model.

Zvolíme množinu kriteriálních korespondencí a vypočítáme ε_0 .

Vybereme množinu kandidátských korespondencí a ke každému kandidátovi nalezneme podle kritéria **L** z rovnice 11.2 nejbližší nesprávnou korespondenci.

Do optimalizované množiny přidáváme jednotlivě správné či nesprávné kandidátské korespondence. Podle rozšířené množiny optimalizovaných korespondencí optimalizujeme sklon faset kamene, určíme ε_c a následně $\Delta\varepsilon$.

Metoda předpokládá, že po optimalizaci se model nezmění natolik, aby se mohly zaniknout některé svazky, obsažené v množině kriteriálních korespondencí.

■ 12.4 Oddělitelnost

Ke každé správné kandidátské korespondenci máme určenou jednu špatnou. Počet správných a špatných korespondencí je stejný a je roven n_c .

Máme daný rozhodovací práh ε_{t_0} . Číslo n_t určuje počet správných korespondencí, pro které $\Delta\varepsilon < \varepsilon_{t_0}$ a n_f počet falešných korespondencí s $\Delta\varepsilon > \varepsilon_{t_0}$.

Potom oddělitelnost definujeme jako

$$S = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{n_t + n_f}{n_c}. \quad (12.2)$$

Z rovnice 12.2 je zřejmé, že $S \in \langle 0, 1 \rangle$ a v ideálním případě, kdy prahem oddělíme všechny správné a špatné korespondence, je S rovno 1. Optimální práh ε_t určujeme pro S maximální. Oddělitelnosti kandidátských korespondencí budeme dále uvažovat pouze pro optimální práh.

■ 12.5 Rozdělení svazků do množin

Množiny optimalizovaných a kritériálních korespondencí jsme se rozhodli sestavit z korespondencí deseti tříd **1A**, **3A**, **6A**, **6B**, **6C**, **6D**, **7A**, **7B**, **8A** a **9A**. Korespondence svazků třídy **1A** a **3A** nalezneme spolehlivě (kapitoly 11.2.1 a 11.2.2).

Svazky tříd **6A**, **6B**, **6C**, **6D**, **7A** a **7B** dobře určují ocásky a zářivý tok. Jejich korespondence jsou s vysokou pravděpodobností správné.

Hustota ostatních svazků v blízkém okolí svazků tříd **8A** a **9A** je nízká, proto pro mě snadněji nalezneme korespondující svazky.

V době, kdy jsme testovali tuto metodu, jsme nebyli schopni spolehlivě nalézt korespondence svazků třídy **5D**. Sběr dat je extrémně časově náročný, proto jsme tuto třídu zařadili pouze do množiny kritériálních korespondencí. Kritériální množina obsahuje dalších 26 tříd svazků, které lze často detekovat v našich experimentech a mají ve své cestě maximálně 9 dopadových faset.

■ 12.6 Vhodné zvolení optimalizační a kritériální množiny

Připravili jsme experiment hodnotící vhodnost kombinace tříd svazků v optimalizované a kritériální množině. Máme na výběr z 10 tříd. Pokud chceme, aby v každé množině byla alespoň jedna třída svazků, dostaneme 1022 možných kombinací. Pro tolik kombinací nejsme z časového omezení schopni provést dostatečný počet výpočtů, abychom mohli zjistit, která z kombinací je nejvhodnější.

Počet kombinací omezíme. Množina optimalizovaných korespondencí bude obsahovat 6 tříd svazků a kritériální množina zbývajících 4 třídy svazků. Optimalizované korespondence vybereme tak, abychom zajistili, že optimalizační úloha bude dobře podmíněna a my bychom mohli při optimalizaci uvolnit všechny fasety. V optimalizační množině tak bude minimálně jedna třída z dvojice tříd **1A** a **3A**, minimálně 3 třídy ze čtveřice **6A**, **6B**, **6C** a **6D** a minimálně minimálně jedna ze čtveřice **7A**, **7B**, **8A** a **9A**. Tímto způsobem je možné sestavit 72 kombinací optimalizované a kritériální množiny.

Data sbíráme podle bodu 12.3. Jeden stejný *deformovaný* model a simulované měřené svazky použijeme pro všechny možné kombinace optimalizované a kritériální množiny. Pro každou kombinaci získáme hodnoty $\Delta\varepsilon$ pro správné a špatné korespondence a určíme odělitelnost S . Po výpočtu pro všechny kombinace vypočítáme nový *deformovaný* model a simulované měřené svazky a výpočet opakujeme.

Celkem jsme provedli výpočet pro 10 *deformovaných* modelů a dostali 10 hodnot S pro každou kombinaci. Při použití procesoru o frekvenci 2.4 GHz je doba výpočtu přibližně 42 dní.

Střední hodnota S pro jednotlivé kombinace je zapsána v tabulkách 12.1 a 12.2 a znázorněna v grafu 12.1. Mezi výslednými hodnotami S není u jednotlivých korespondencí výrazný rozdíl. Z tabulky lze vypořozovat, že korespondence třídy **1A** je dobré umístit do optimalizované množiny a třídu **3A** do množiny kritériálních korespondencí. Nejméně vhodná se zdá kombinace č. 47.

12.6 VHODNÉ ZVOLENÍ OPTIMALIZAČNÍ A KRITERIÁLNÍ MNOŽINY

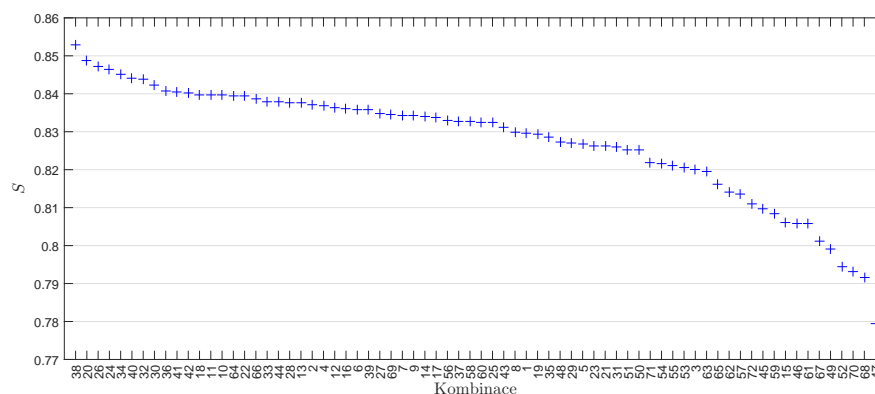
Kombinace č.	Optimalizační množina						Kriteriální množina				S
38	1A	6A	6C	6D	8A	9A	3A	6B	7A	7B	0.853
20	1A	6A	6B	6C	6D	9A	3A	7A	7B	8A	0.849
26	1A	6A	6B	6C	8A	9A	3A	6D	7A	7B	0.847
24	1A	6A	6B	6C	7B	8A	3A	6D	7A	9A	0.846
34	1A	6A	6C	6D	7A	8A	3A	6B	7B	9A	0.845
40	1A	6B	6C	6D	7A	8A	3A	6A	7B	9A	0.844
32	1A	6A	6B	6D	8A	9A	3A	6C	7A	7B	0.844
30	1A	6A	6B	6D	7B	8A	3A	6C	7A	9A	0.842
36	1A	6A	6C	6D	7B	8A	3A	6B	7A	9A	0.841
41	1A	6B	6C	6D	7A	9A	3A	6A	7B	8A	0.841
42	1A	6B	6C	6D	7B	8A	3A	6A	7A	9A	0.840
18	1A	6A	6B	6C	6D	7B	3A	7A	8A	9A	0.840
11	1A	3A	6A	6C	6D	8A	6B	7A	7B	9A	0.840
10	1A	3A	6A	6C	6D	7B	6B	7A	8A	9A	0.840
64	3A	6A	6C	6D	7B	8A	1A	6B	7A	9A	0.839
22	1A	6A	6B	6C	7A	8A	3A	6D	7B	9A	0.839
66	3A	6A	6C	6D	8A	9A	1A	6B	7A	7B	0.839
33	1A	6A	6C	6D	7A	7B	3A	6B	8A	9A	0.838
44	1A	6B	6C	6D	8A	9A	3A	6A	7A	7B	0.838
28	1A	6A	6B	6D	7A	8A	3A	6C	7B	9A	0.838
13	1A	3A	6B	6C	6D	7A	6A	7B	8A	9A	0.838
2	1A	3A	6A	6B	6C	7B	6D	7A	8A	9A	0.837
4	1A	3A	6A	6B	6C	9A	6D	7A	7B	8A	0.837
12	1A	3A	6A	6C	6D	9A	6B	7A	7B	8A	0.836
16	1A	3A	6B	6C	6D	9A	6A	7A	7B	8A	0.836
6	1A	3A	6A	6B	6D	7B	6C	7A	8A	9A	0.836
39	1A	6B	6C	6D	7A	7B	3A	6A	8A	9A	0.836
27	1A	6A	6B	6D	7A	7B	3A	6C	8A	9A	0.835
69	3A	6B	6C	6D	7A	9A	1A	6A	7B	8A	0.834
7	1A	3A	6A	6B	6D	8A	6C	7A	7B	9A	0.834
9	1A	3A	6A	6C	6D	7A	6B	7B	8A	9A	0.834
14	1A	3A	6B	6C	6D	7B	6A	7A	8A	9A	0.834
17	1A	6A	6B	6C	6D	7A	3A	7B	8A	9A	0.834
56	3A	6A	6B	6D	7A	8A	1A	6C	7B	9A	0.833
37	1A	6A	6C	6D	7B	9A	3A	6B	7A	8A	0.833
58	3A	6A	6B	6D	7B	8A	1A	6C	7A	9A	0.833
60	3A	6A	6B	6D	8A	9A	1A	6C	7A	7B	0.833
25	1A	6A	6B	6C	7B	9A	3A	6D	7A	8A	0.832
43	1A	6B	6C	6D	7B	9A	3A	6A	7A	8A	0.831
8	1A	3A	6A	6B	6D	9A	6C	7A	7B	8A	0.830
1	1A	3A	6A	6B	6C	7A	6D	7B	8A	9A	0.830
19	1A	6A	6B	6C	6D	8A	3A	7A	7B	9A	0.829
35	1A	6A	6C	6D	7A	9A	3A	6B	7B	8A	0.829
48	3A	6A	6B	6C	6D	9A	1A	7A	7B	8A	0.827
29	1A	6A	6B	6D	7A	9A	3A	6C	7B	8A	0.827

Tabulka 12.1: Tabulka středních hodnot oddělitelnosti S pro kombinace optimalizované a kriteriální množiny č. 1.

12.6 VHODNÉ ZVOLENÍ OPTIMALIZAČNÍ A KRITERIÁLNÍ MNOŽINY

Kombinace č.	Optimalizační množina						Kriteriální množina				S
29	1A	6A	6B	6D	7A	9A	3A	6C	7B	8A	0.827
5	1A	3A	6A	6B	6D	7A	6C	7B	8A	9A	0.827
23	1A	6A	6B	6C	7A	9A	3A	6D	7B	8A	0.826
21	1A	6A	6B	6C	7A	7B	3A	6D	8A	9A	0.826
31	1A	6A	6B	6D	7B	9A	3A	6C	7A	8A	0.826
51	3A	6A	6B	6C	7A	9A	1A	6D	7B	8A	0.825
50	3A	6A	6B	6C	7A	8A	1A	6D	7B	9A	0.825
71	3A	6B	6C	6D	7B	9A	1A	6A	7A	8A	0.822
54	3A	6A	6B	6C	8A	9A	1A	6D	7A	7B	0.822
55	3A	6A	6B	6D	7A	7B	1A	6C	8A	9A	0.821
53	3A	6A	6B	6C	7B	9A	1A	6D	7A	8A	0.820
3	1A	3A	6A	6B	6C	8A	6D	7A	7B	9A	0.820
63	3A	6A	6C	6D	7A	9A	1A	6B	7B	8A	0.820
65	3A	6A	6C	6D	7B	9A	1A	6B	7A	8A	0.816
62	3A	6A	6C	6D	7A	8A	1A	6B	7B	9A	0.814
57	3A	6A	6B	6D	7A	9A	1A	6C	7B	8A	0.813
72	3A	6B	6C	6D	8A	9A	1A	6A	7A	7B	0.811
45	3A	6A	6B	6C	6D	7A	1A	7B	8A	9A	0.810
59	3A	6A	6B	6D	7B	9A	1A	6C	7A	8A	0.809
15	1A	3A	6B	6C	6D	8A	6A	7A	7B	9A	0.806
46	3A	6A	6B	6C	6D	7B	1A	7A	8A	9A	0.806
61	3A	6A	6C	6D	7A	7B	1A	6B	8A	9A	0.806
67	3A	6B	6C	6D	7A	7B	1A	6A	8A	9A	0.801
49	3A	6A	6B	6C	7A	7B	1A	6D	8A	9A	0.799
52	3A	6A	6B	6C	7B	8A	1A	6D	7A	9A	0.794
70	3A	6B	6C	6D	7B	8A	1A	6A	7A	9A	0.793
68	3A	6B	6C	6D	7A	8A	1A	6A	7B	9A	0.792
47	3A	6A	6B	6C	6D	8A	1A	7A	7B	9A	0.780

Tabulka 12.2: Tabulka středních hodnot oddělitelnosti S pro kombinace optimalizované a kriteriální množiny č. 2.



Obrázek 12.1: Graf oddělitelnosti S z tabulky 12.1 a 12.2.

12.7 Výběr kritériální množiny

Data z experimentu v kapitole 12.6 použijeme, abychom prozkoumali, které třídy svazků jsou vhodné pro výpočet referenčního kritéria ε_0 .

Postupujeme pro všechny jednotlivé třídy svazků. Vybereme případy, kdy daná třída svazků byla použita k výpočtu ε_0 . Pro správné i nesprávné korespondence vypočítáme novou hodnotu $\Delta\varepsilon$, kde je kritériální množina omezená pouze na danou třídu. Pro všechny nově vypočítané $\Delta\varepsilon$ určíme celkovou oddělitelnost S . Výsledky jsou znázorněny v tabulce 12.3.

Z výsledků vyplývá, že nejméně vhodné třídy pro zařazení do množiny kritériálních korespondencí jsou třídy **6A** a **6B**.

Třída	1A	3A	6A	6B	6C	6D	7A	7B	8A	9A
S	0.778	0.795	0.795	0.676	0.644	0.791	0.794	0.793	0.716	0.804

Tabulka 12.3: Tabulka oddělitelnosti S pro třídy svazků v kritériální množině.

12.7.1 Výběr množiny kandidátů

K nejzajímavějším výsledkům se dostaneme pokud se podíváme na výsledky z hlediska vhodnosti tříd svazků v kandidátské množině.

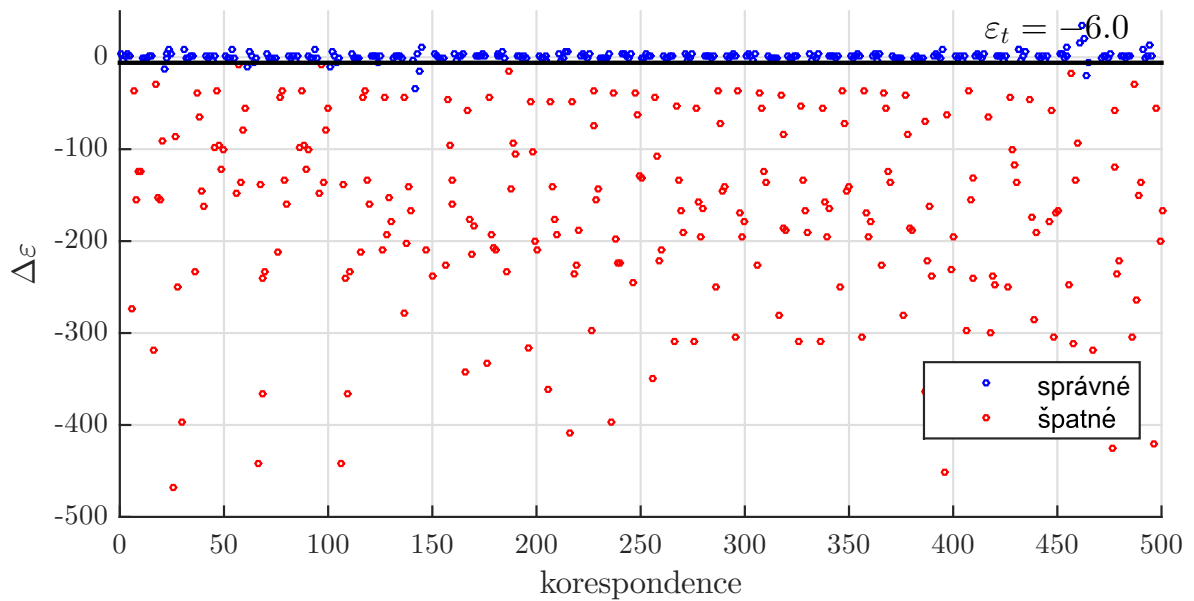
Postupujeme jednotlivě pro třídy svazků v kandidátské množině. Vezmeme data z experimentu 12.6 a vybereme pouze taková $\Delta\varepsilon$, která odpovídají dané třídě svazků.

Opět tedy dostaneme data s $\Delta\varepsilon$ pro správné a špatné korespondence, ze kterých spočítáme oddělitelnost S . Nyní jsou tyto data rozděleny podle tříd svazků v množině kritériálních korespondencí.

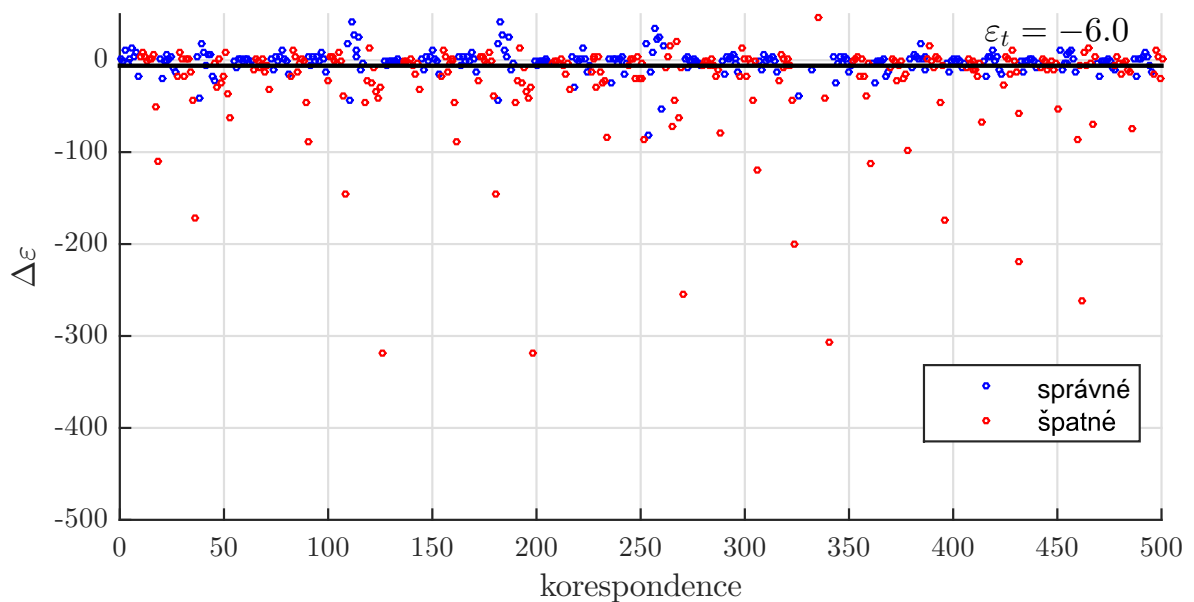
Velikosti S pro jednotlivé třídy svazků jsou zapsány v tabulce 12.4. Z výsledků je zřejmé, že korespondence některých tříd lze prahováním $\Delta\varepsilon$ spolehlivě rozdělit na správné a špatné korespondence (třída **8B**, **8C**, **8D** a **9D**). Naopak pro korespondence třídy **5B**, **7C** a **7D** tato metoda nevede k efektivnímu třídění korespondencí.

Třída	1B	3B	5A	5B	5C	5D	5E	6E	6F	7C
S	0.982	0.924	0.954	0.454	0.936	0.975	0.614	0.912	0.925	0.583
Třída	7D	7E	7F	7G	7H	8B	8C	8D	9B	9C
S	0.594	0.914	0.940	0.671	0.829	1.000	0.996	0.998	0.963	0.935
Třída	9D	9E	9F	9G	9H	9I	9J			
S	1.000	0.883	0.914	0.949	0.972	0.925	0.932			

Tabulka 12.4: Tabulka oddělitelnosti S pro třídy svazků z množině kandidátů.



Obrázek 12.2: Graf $\Delta\varepsilon$ pro prvních 500 korespondencích třídy **9G**. Správné a špatné korespondence oddělíme prahem $\varepsilon_t = -9.0$. Výsledná oddělitelnost $S = 0.949$.



Obrázek 12.3: Graf $\Delta\varepsilon$ pro prvních 500 korespondencích třídy **7D**. Třídění korespondencí podle prahu $\varepsilon_t = -6.0$ nevede ke uspokojivému výsledku. Výsledná oddělitelnost $S = 0.594$.

Kapitola 13

Výsledky

13.1 Vybrané kameny

Navržené algoritmy jsme použili pro automatickou optimalizaci kamenů tvaru *viva12* podle algoritmu z kapitoly 11.3. Vybrali jsme 14 kamenů pěti odstínů. Nejčastěji zastoupený odstín je *Crystal*, průhledné sklo. Soupis použitých kamenů je v tabulce 13.1.

13.2 Uložení broušených kamenů při měření

Každý z kamenů jsme do měřicí soustavy umístili minimálně 3×. Uložení kamene se při dalším měření lišilo hlavně v rotaci kamene kolem svislé osy.

Abychom mohli porovnat výsledky optimalizace parametrů faset u jednotlivých kamenů, potřebujeme znát uložení kamene. Snažili jsme se o to, aby byly kameny otočeny přibližně o 120° v případě tří vzorků a 90° pro čtyři vzorky. Přesnou rotaci kamene však neznáme.

Za ideálního stavu, kdy je kámen souměrný, nejsme schopni dobře odhadnout vzájemnou rotaci uložení kamene při opakovaném měření. U použitých kamenů jsou fasety náhodně vychýleny od ideálního náklonu a vzájemnou rotaci kamene proto odhadneme, pokud docílíme maximální shody sklonů faset.

Výsledky automatické optimalizace kamene upravíme na shodnou orientaci kamene.

13.3 Přesnost počátečního odhadu

Na výsledek optimalizace orientace faset má vliv počáteční odhad parametrů faset. Chyba počátečního odhadu orientace faset nesmí být příliš vysoká, abychom byli schopni nalézt korespondence základních tříd svazků (**1A**, **3A** a **5D**). Při optimalizaci sklonu faset podle základních tříd svazků poté optimalizační algoritmus nalezne zpravidla stejné lokální minimum nezávisle na počátečním odhadu orientace.

Na výsledek optimalizace má v dalším postupu zásadní vliv počáteční odhad vzdáleností faset od počátku souřadného systému kamene. Optimalizační algoritmus vzdálenost faset nemění. Chyba odhadu vzdáleností faset se projeví nejen ve velikosti zářivého toku simulovaných svazků, ale také v přítomnosti některých svazků, což může snadno vést k nesprávnému určení korespondujících svazků. Bohužel nemáme k dispozici přístroj, kterým bychom vzdálenost faset změřili, proto nesmí být chyba počátečního odhadu vzdálenosti fasety od počátku souřadného systému kamene příliš vysoká.

13.4 Vyhodnocení přesnosti metody

Chyby odhadu azimutu a elevace

Orientaci normál parametrizujeme za pomoci azimutu a elevace. Pro jednotlivé fasety UF1–UF12 vypočítáme směrodatnou odchylku azimutů a směrodatnou odchylku elevací. Střední hodnota směrodatných odchylek azimutů je v tabulce 13.1 značena jako $E(\sigma_\alpha)$ a pro elevaci jako $E(\sigma_\varepsilon)$. Pro fasety TOP a BOT nemá cenu určovat azimut a elevaci, protože tyto normály jsou blízko singulárního bodu.

Směr normál

Pro každé dva výsledky optimalizace sklonu fasety nalezneme úhel, který mezi sebou svírají normály hodnocené fasety. Pro n měření fasety dostaneme $(n-1)!$ hodnot s velikostí úhlového rozdílu. Střední hodnota úhlových rozdílů pro všechny kombinace dané fasety a pro všechny fasety je v tabulce 13.1 zapsána ve sloupci $E(\delta_n)$.

Chyba orientace vybroušených faset

Tento parametr hodnotí nepřesnost výroby jednotlivých kamenů. Uvádíme ji zde pro porovnání chyby měření a chyby výroby. U jednotlivých kamenů aplikujeme vektorový součet na všechny 3 resp. 4 výsledky normál fasety. Nalezneme úhel $\Delta\varphi$, který svírá vektor vzniklý vektorovým součtem s výkresovou normálou fasety. Střední hodnota úhlu $\Delta\varphi$ pro všech faset kamene je v tabulce 13.1 zapsána ve sloupci $E(\Delta\varphi)$.

Kámen č.	Odstín	d_{BOT} [mm]	h [mm]	d_{TOP} [mm]	n	$E(\sigma_\alpha)$ [°]	$E(\sigma_\varepsilon)$ [°]	$E(\delta_n)$ [°]	$E(\Delta\varphi)$ [°]
1	Hyacint	2.90	1.24	1.10	3	0.16	0.07	0.16	1.39
2	Violet	2.82	1.16	1.15	3	0.33	0.16	0.36	3.72
3	Citrine	2.86	1.14	1.20	3	0.17	0.12	0.23	3.03
4	Hyacint	2.90	1.24	1.10	3	0.19	0.01	0.20	5.10
5	Hyacint	2.90	1.28	1.10	3	0.18	0.14	0.24	6.15
6	Hyacint	2.88	1.28	1.00	4	0.20	0.21	0.32	1.01
7	Crystal	2.88	1.26	1.10	3	0.23	0.38	0.48	2.88
8	Crystal	2.88	1.26	1.15	3	0.22	0.22	0.33	4.36
9	Light Amethyst	2.82	1.10	1.10	3	0.44	0.31	0.53	3.53
10	Crystal	4.80	1.90	1.86	3	0.25	0.23	0.35	1.63
11	Crystal	4.78	1.80	2.10	3	0.36	0.22	0.39	2.61
12	Crystal	3.96	1.60	1.60	4	0.39	0.32	0.48	1.48
13	Crystal	2.00	0.94	0.80	3	0.24	0.46	0.57	3.13
14	Crystal	2.00	0.92	0.80	3	0.40	0.40	0.60	3.92
Průměr						0.27	0.23	0.37	3.14

Tabulka 13.1: Popis rozměrů a barvy kamenů typu *viva12* použitých při experimentech s výsledky automatické optimalizace orientace faset.

Kapitola 14

Závěr

V rámci této práce byl navrhnout, implementován a experimentálně vyzkoušen postup pro automatický odhad orientace faset broušených kamenů typu *viva12* o rozměrech v jednotkách milimetrů. Vstupem do optimalizačního algoritmu je snímek s obrazy svazků na stínítku, které vystupujících z ozářeného kamene. Princip odhadu orientace faset spočívá v porovnání geometrie naměřených svazků s geometrií simulovaných svazků.

První část práce se zabývá detekcí světelných stop v obraze. Detekce spočívala ve zpracování výsledku detekce maximálně stabilních extrémních oblastí. Úspěšnost navržené detekce stop je srovnatelná s výsledkem detekce komerčně využívaného programu pro detekci hvězd na noční obloze. U pozorovaných svazků byl určen zářivý tok, směr šíření a detekovány ocásky vznikající v okolí obrazu svazku z důvodu neostrých hran kamene.

Druhá část práce byla zaměřena na hledání korespondencí simulovaných a pozorovaných svazků. Bylo ukázáno, že úloha korespondence svazků je obtížná. Byl navrhnout a implementován iterativní postup pro nalezení korespondujících svazků.

Výsledky automatické optimalizace ukazují, že orientaci faset kamene lze podle navrženého postupu opakovaně odhadnout s přesností v řádech desetin úhlového stupně, zatímco pozorovaná výrobní chyby jsou v řádech stupňů.

Byla navržena metoda pro ověření správnosti korespondujících dvojic svazků. Aplikovatelnost metody byla prozkoumána pomocí simulace v programu LADOK. Bylo ukázáno, že tato metoda funguje spolehlivě pouze pro korespondence vybraných tříd svazků.

V této práci byl zároveň popsán nový příznak svazku definující směr a velikost úhlu rotace svazku při rotaci kamene. Znalost tohoto příznaku může zjednodušit úlohu korespondencí svazků zejména pro složitější tvary kamenů.

Tato práce přináší návod, jak postupovat při odhadu orientace faset broušených kamenů. Využití práce pro jiné tvary kamenů vyžaduje podrobný průzkum parametrů vystupujících svazků z ozářeného kamene.

Literatura

- [1] Michael Bass et al. *Handbook of Optics, Third Edition Volume I: Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments(Set) - chapter 12. Polarization*. 3. vyd. New York, NY, USA: McGraw-Hill, Inc., 2010. ISBN: 0071498893, 9780071498890.
- [2] Michael Bass et al. *Handbook of Optics, Third Edition Volume I: Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments(Set) - chapter 3. Diffraction*. 3. vyd. New York, NY, USA: McGraw-Hill, Inc., 2010. ISBN: 0071498893, 9780071498890.
- [3] E. Bertin. *SExtractor v2.5 User's Manual*. Institut d'Astrophysique & Observatoire de Paris. URL: <http://terapix.iap.fr/IMG/pdf/sextractor.pdf>.
- [4] E. Bertin a S. Arnouts. "SExtractor: Software for source extraction." In: 117 (červ. 1996), s. 393–404.
- [5] Igor Bodlák. "Modelování a analýza broušeného kamene". Czech Technical university in Prague, 2005.
- [6] Igor Bodlák. *Rozšíření toolboxu LADOK, Semestrální práce*. Czech Technical University in Prague, 2004.
- [7] Jakub Drápela. "Měření barevných broušených kamenů". Czech Technical university in Prague, 2015.
- [8] Katsushi Ikeuchi a Daisuke Miyazaki. "Shape Estimation of Transparent Objects by Using Inverse Polarization Ray Tracing". In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence* 29 (2007), s. 2018–2030. ISSN: 0162-8828. DOI: [doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TPAMI.2007.1117](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.1117).
- [9] Kiriakos N. Kutulakos a Eron Steger. "A Theory of Refractive and Specular 3D Shape by Light-Path Triangulation". In: *International Journal of Computer Vision* 76.1 (2008), s. 13–29. ISSN: 1573-1405. DOI: [10.1007/s11263-007-0049-9](https://doi.org/10.1007/s11263-007-0049-9). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11263-007-0049-9>.
- [10] J. Matas et al. "Robust Wide Baseline Stereo from Maximally Stable Extremal Regions". In: *Proc. BMVC*. 2002, s. 36.1–36.10. ISBN: 1-901725-19-7.
- [11] K. Mikolajczyk et al. "A comparison of affine region detectors". In: *International Journal of Computer Vision* (2005).
- [12] Petr Pohl. "Simulace průletu paprsků transparentním objektem". Czech Technical university in Prague, 2002.
- [13] Sarine. *DiaScan S+*. <http://files.jewellerynetasia.com/FileUpload/migrateddata/UserUploadImage/Showroom/Product/400/102ce128-4d0f-4402-8c92-4fb7be884d8a.jpg>. JewelleryNetAsia, [Online; accessed 2017-05-18], Obrázek ve formátu PNG.
- [14] Cut & Symmetry Archives Sarine. *Sarine - A World leading company in the diamond industry new - Sarine*. http://sarine.com/?product_category=cut-symmetry. Copyright ©2017 Sarine [cit. 17.05.2017].
- [15] Matěj Straka. *Tails of beam simulation in LADOK, Semester project*. Czech Technical University in Prague, 2013.

Přílohy

A Rozdělení svazků do tříd

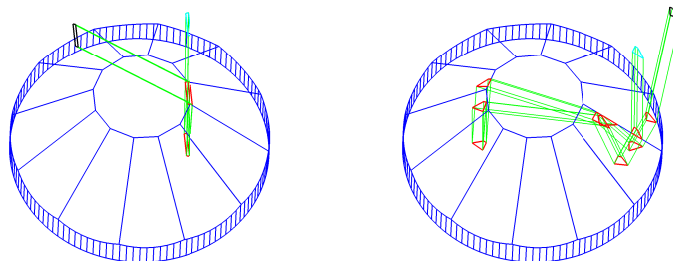
Typ svazku definujeme podle pořadí dopadových faset, pro svazky s vyšším počtem dopadových faset popis podle dopadových faset nepřehledný. Pro lepší orientaci v textu dělíme svazky do tříd.

Název je u všech tříd dvouciferný. První cifra udává počet dopadových faset. Zde se pohybujeme od 1 do 9. Svazky s větším počtem dopadových faset než 9 nejsme schopni na stínítku rozpoznat a definovat je nemá smysl.

Na pozici druhé cifry se objevují znaky abecedy A-Z. Svazky s jednotným počtem odrazů se začínají značit od písmene A. Svazky, které nemají dostatečný zářivý tok a nelze je spařit na stínítku neuvádíme.

Svazky popisujeme pro situaci, kdy směrový vektor zdrojového svazku je přibližně kolmý k rovině spodku. Pokud bychom kámen orientovali jinak, řada svazků by přestala existovat a zároveň by se objevily i nové nepopsané třídy svazků.

Rozdělení svazků do tříd je zapsáno v tabulkách A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 a A.6.



Obrázek A.1: Příklad 3D pohledu na svazek třídy 3C vlevo a třídy 9J vpravo.

Třída	Dopadové fasety									Počet
1A	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
1B	TOP									1
3A	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
3B	TOP-BOT-TOP									1
3C	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	12
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
5A	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
5B	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
5C	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
5D	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
5E	TOP-BOT-TOP-BOT-TOP									1

Tabulka A.1: Dopadové fasety svazků tříd 1A-5E.

A ROZDĚLENÍ SVAZKŮ DO TŘÍD

Třída	Dopadové fasety									Počet
6A	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
6B	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
6C	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
6D	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
6E	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
6F	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
7A	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...		

Tabulka A.2: Dopadové fasety svazků tříd 6A-7A.

Třída	Dopadové fasety									Počet
7B	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
7C	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
7D	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
7E	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
7F	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
7G	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
7H	TOP-BOT-TOP-BOT-TOP-BOT-TOP									1

Tabulka A.3: Dopadové fasety svazků tříd 7B-7H.

A ROZDĚLENÍ SVAZKŮ DO TŘÍD

Třída	Dopadové fasety									Počet
8A	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
8B	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...	
8C	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
8D	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	...	
9A	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	TOP	...	
	UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...		

Tabulka A.4: Dopadové fasety svazků tříd 8A-9A.

A ROZDĚLENÍ SVAZKŮ DO TŘÍD

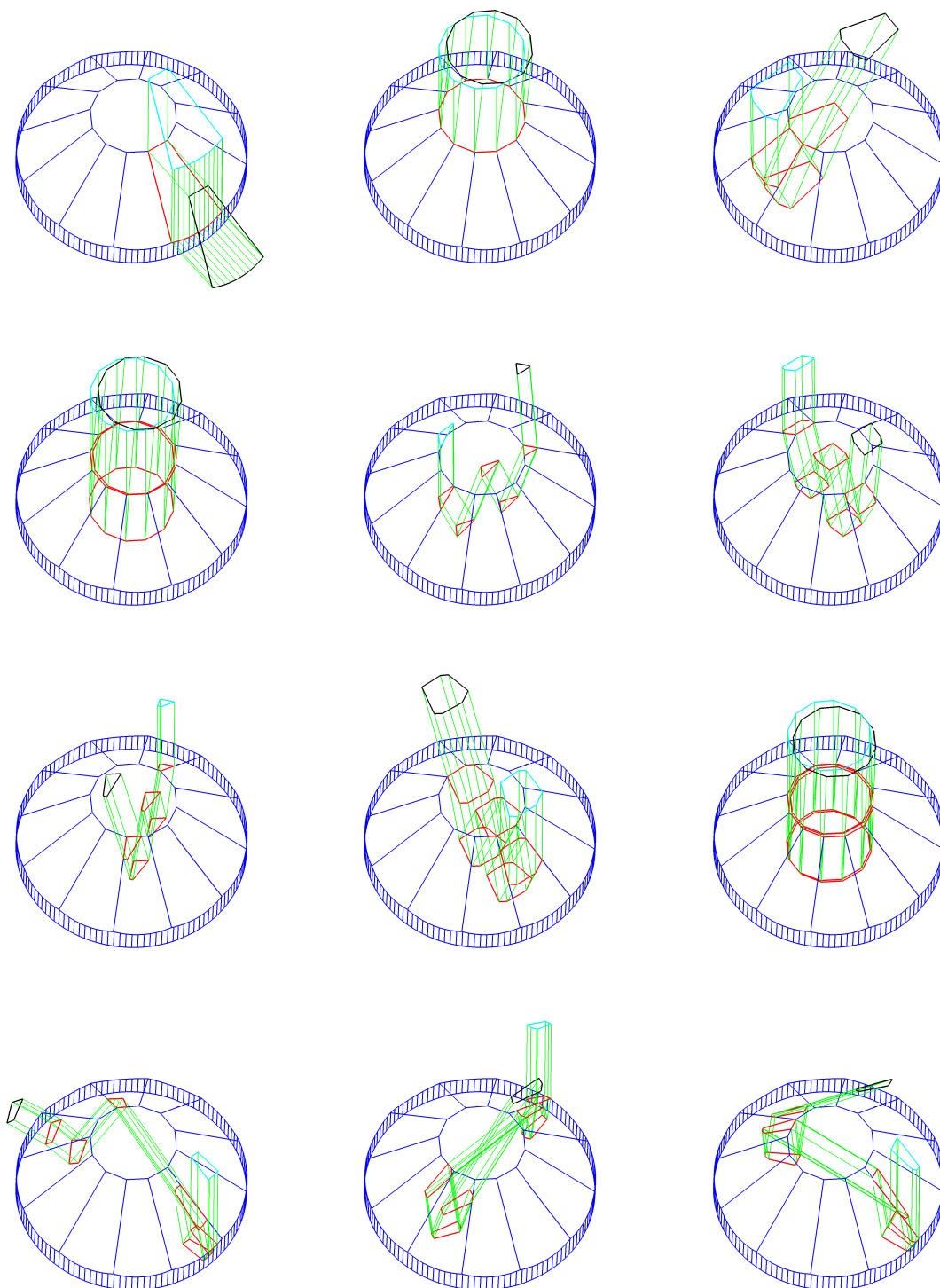
Třída	Dopadové fasety									Počet
9B	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	...		
9C	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...		
9D	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...		
9E	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...		
9F	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	...		

Tabulka A.5: Dopadové fasety svazků tříd 9B-9F.

A ROZDĚLENÍ SVAZKŮ DO TŘÍD

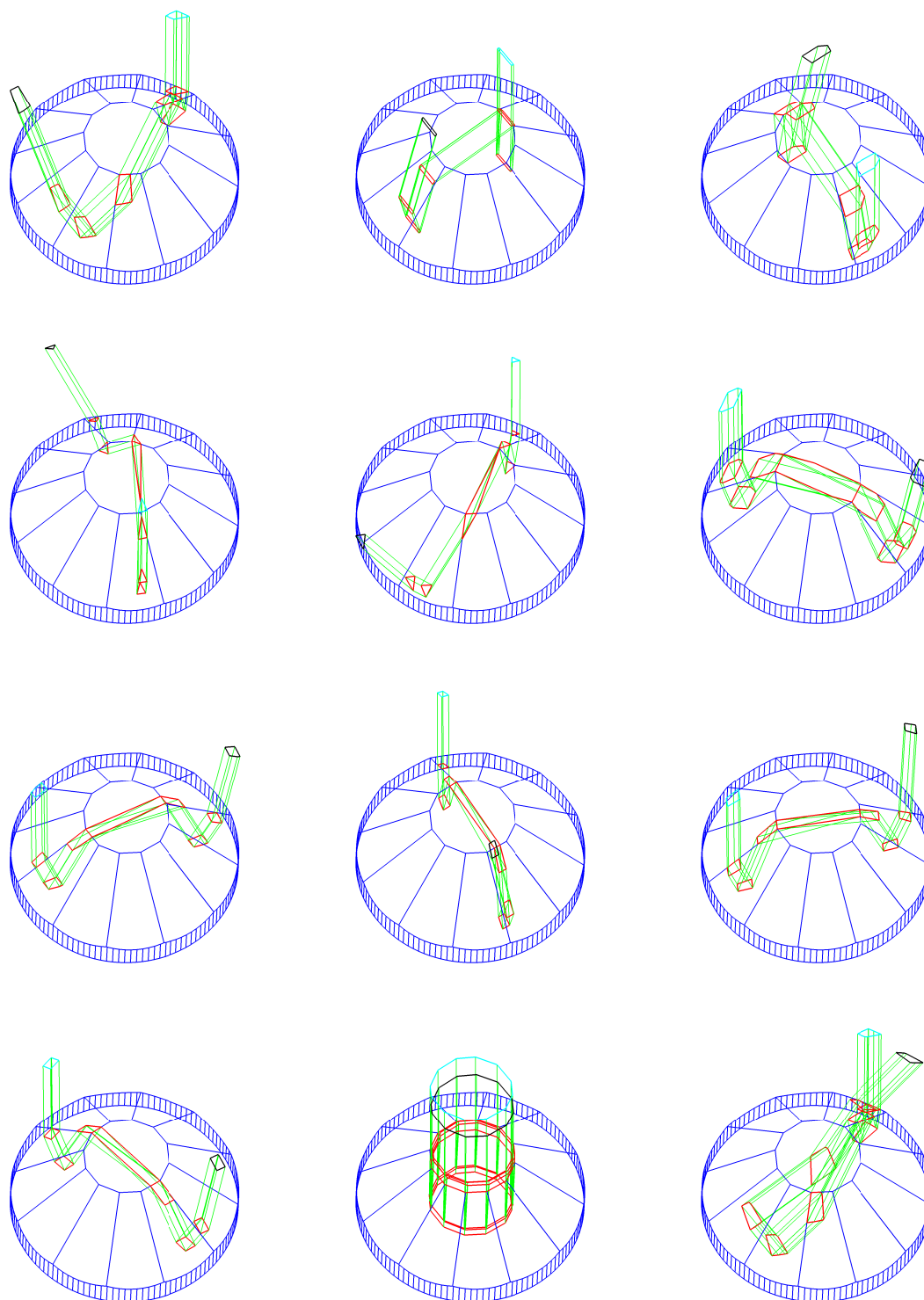
Třída	Dopadové fasety									Počet
9G	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	...	
	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	UF3	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...		
9H	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...		
9I	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...		
9J	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...	12
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...	
	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	UF1	UF2	...	
	UF12	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	...	
	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	BOT	...	
UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	...		

Tabulka A.6: Dopadové fasety svazků tříd 9G-9J.

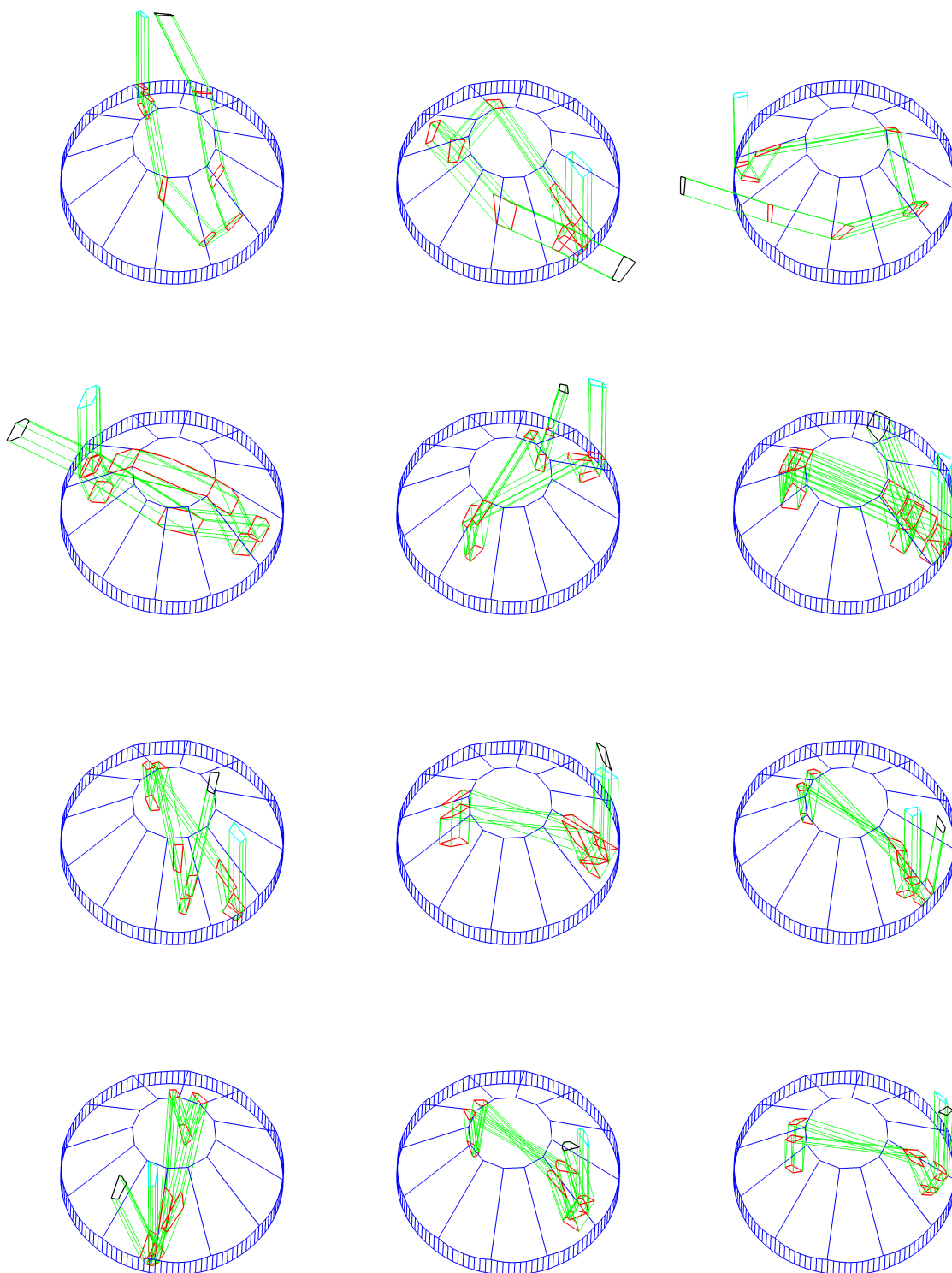


Obrázek A.2: Příklad 3D pohledu na svazek tříd 1A, 1B, 3A, 3B, 5A, 5B, 5C, 5D, 5E, 6A a 6B. Značeno zleva doprava a shora dolů.

A ROZDĚLENÍ SVAZKŮ DO TŘÍD



Obrázek A.3: Příklad 3D pohledu na svazek tříd 6D, 6E, 6F, 7A, 7B, 7C, 7D, 7E, 7F, 7G, 7H a 8A. Značeno zleva doprava a shora dolů.



Obrázek A.4: Příklad 3D pohledu na svazek tříd 8B, 8C, 8D, 9A, 9B, 9C, 9D, 9E, 9F, 9G, 9H a 9I.

■ B Nástroj pro ruční přiřazení korespondujících svazků

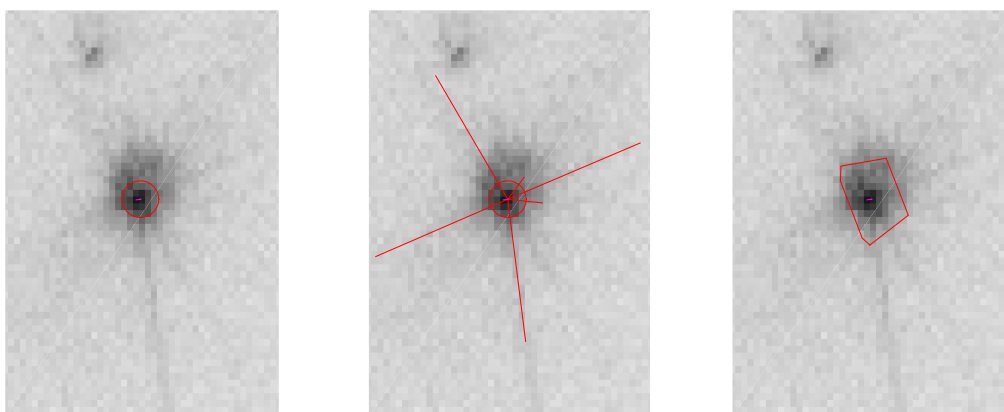
GUI program, který umožňuje ruční přiřazení korespondujících svazků kamene spustíme příkazem *handOptimization*.

■ B.1 Návod k obsluze

Na začátku je zapotřebí vybrat snímek optimalizovaného kamene. Snímek vybereme v menu *File – Open – Image*. Po výběru snímku proběhne detekce stop v obraze a v pracovním okně se zobrazí vybraný snímek. V pracovním okně jsou na vybraný snímek zakresleny simulované svazky. Pozice vykreslení simulovaných svazků určuje transformace z [7]. Množina simulovaných svazků odpovídá nastavení programu.

Nastavení programu lze měnit pomocí ovládacích panelů (viz kapitola B.2). V menu *View* lze volit, které panely budou zobrazeny v pracovním okně.

Svazky lze vykreslit třemi různými styly. Výchozí styl *RadFlux* vykresluje velikost svazků podle hodnoty zářivého toku. Styl *Tails* přikreslí simulované ocásky. U stylu *Polygon* je na pozici dopadu světelného svazku pomocí polygonu znázorněn tvar svazku při dopadu na stínítko, který je vůči reálným rozměrům mnohonásobně zvětšen. Vykreslené svazky lze zvětšovat či zmenšovat pomocí klávesnice +, resp. –. Styl volíme v panelu *Draw setting* v kolonce *Style*.



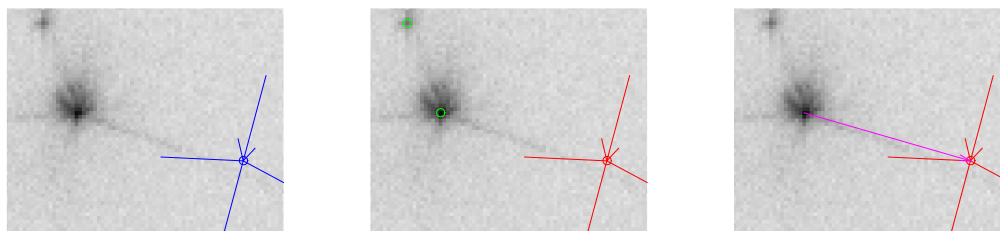
Obrázek B.1: Porovnání stylů vykreslení simulovaného svazku. Zleva *RadFlux*, *Tails* a *Polygon*.

Pokud chceme ručně přiřadit korespondující svazky, je třeba mít zvolené okénko *Enable hand pairing* v panelu *Correspondences*.

Pracovní okno je nastaveno tak, že reaguje na akce ovládacích prvků na optické myši. Stiskem levého tlačítka myši v oblasti snímku vybereme simulovaný svazek, který je nejbližší kurzoru myši. Po výběru svazku se zobrazí všechny detekované stopy a vybraný svazek. Opětovným stiskem levého tlačítka vybereme stopu, která spolu se svazkem utvoří korespondující pár. Po spárování se zobrazí opět pouze simulované svazky, kde jsou však barevně odděleny svazky tvořící korespondující pár. Opětovným výběrem simulovaného svazku, který již byl spárován, odstraníme odpovídající korespondující pár.

Stiskem pravého tlačítka myši vykreslíme aktuální model kamene s vyznačenou cestou vybraného svazku.

Změnou polohy kolečka optické myši lze snímek přiblížit či oddálit, což umožňuje snadné zaměření na detaily snímku. Návrat do původního zobrazení umožňuje menu *Action – Reset axis*.



Obrázek B.2: Ilustrace přiřazení simulovaného svazku ke stopě. Vlevo: volný svazek. Uprostřed: vybraný svazek a zobrazené stopy. Vpravo: vytvořený pár svazek/stopa. Vykresleno stylem *Tails*.

Soubor s množinou korespondujících svazků lze uložit v menu *File–Save–Correspondences*. Menu *File–Save–GUI* umožňuje uložit celé uživatelské rozhraní.

Množinu korespondujících svazků přepíšeme, pokud načteme uložené korespondence pomocí menu *File–Open–Correspondences*. Menu *File–Open–Ground truth* slouží k načtení množiny správných korespondencí. Správné korespondence se porovnají s aktuální množinou korespondencí a dochází ke změně barvy, kterou jsou vykresleny simulované svazky. Zelenou barvou jsou značeny správné korespondence. Modrou barvou jsou značeny volné svazky a korespondence, u kterých nelze ověřit správnost. Červená barva náleží nesprávným korespondencím.

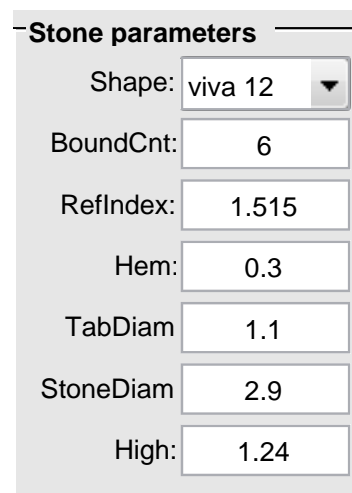
V menu *Action–Optimize rotation* spustíme optimalizaci rotace a náklonu kamene podle korespondencí svazků třídy **1A**. Optimalizaci orientace faset spustíme v menu *Action–Optimize params..* Po optimalizaci dojde k překreslení simulovaných svazků.

■ B.2 Ovládací panely

Parametry kamene

Změřené parametry kamene (viz kapitola 4.7) lze nastavit v panelu *Stone parameters* na obrázku B.3. Parametr *BoundCnt* lze měnit v průběhu optimalizace. Ostatní parametry je třeba nastavit před zahájením optimalizace. Jednotky rozměrů a souřadnice jsou uváděny v milimetrech, úhly ve stupních.

- *Shape* – definuje tvar kamene. Pro tuto verzi je dostupná pouze *viva12*.
- *BoundCnt* – určuje maximální počet dopadových faset simulovaných svazků v programu LADOK.
- *RefIndex* – index lomu kamene. Pokud je optimalizován index lomu kamene, odpovídá tato hodnota výsledku optimalizace.
- *Hem* – velikost lemu kamene.
- *TabDiam* – průměr tabulky kamene.
- *StoneDiam* – průměr spodku kamene.
- *High* – výška kamene.

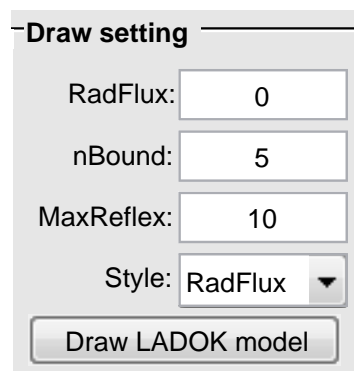


Obrázek B.3: Panel s nastavením parametrů kamene.

Zobrazení simulovaných svazků

Panel *Draw setting* na obr. B.4 slouží k redukci vykreslovaných simulovaných svazků. Redukce vykreslených svazků zrychlí běh programu a může pomoci v orientaci mezi jednotlivými svazky.

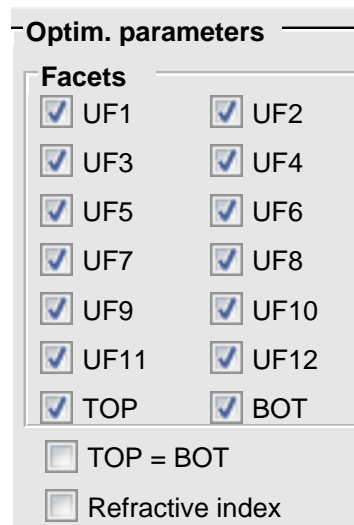
- *RadFlux* – určuje minimální zářivý tok svazků. Vykresleny jsou simulované svazky se zářivým tokem ϕ_r vyšším než $\frac{RadFlux}{10000}$.
- *nBound* – určuje počet dopadových faset vykreslených svazků. Pokud je *nBound* rovno nule, jsou vykresleny všechny svazky.
- *MaxReflex* – omezuje vykreslení svazků na maximální počet dopadových faset *MaxReflex*.
- *Style* – definuje styl vykreslení simulovaných svazků. Přehled stylů je na obr. B.1.
- *Draw LADOK model* - slouží k vykreslení aktuálního modelu kamene v programu LADOK.



Obrázek B.4: Panel pro výběr množiny simulovaných svazků.

Optimalizované parametry

V panelu *Optim. parameters* na obr. B.5 můžeme volit optimalizované parametry. Mezi tyto parametry patří parametry faset a index lomu kamene. Lze vybírat jednotlivě optimalizované fasety UF1–UF12, TOP a BOT. Pokud zvolíme TOP=BOT budou parametry faset TOP a BOT během optimalizace považovány za totožné. Kolonku *Refractive index* zaškrtneme, pokud chceme optimalizovat index lomu kamene.

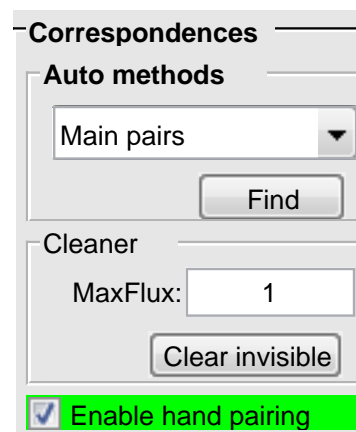


Obrázek B.5: Panel pro volbu optimalizovaných parametrů.

Korespondence svazků

V panelu *Correspondences* na obr. B.6 můžeme upravovat korespondence svazků. Korespondence může být přiřazena ke svazku, který odpovídá výběru v panelu *Draw setting* na obr. B.4.

- *Auto methods* – obsahuje automatické metody pro určení korespondujících svazků. *Main pairs* nalezne korespondence tříd **1A**, **3A** a **5D**. *Tails* nalezne korespondence svazků podle algoritmu 11.2.4. *RadFlux* určí korespondující svazky na základě algoritmu 11.2.5.
- *Cleaner* – slouží k odstranění korespondencí, které jsou z vysoké pravděpodobnosti nesprávné. Po vyplnění pole *MaxFlux* jsou odstraněny všechny korespondence, kde simulovaný svazek má zářivý tok nižší než $\frac{MaxFlux}{10000}$. *Clear invisible* odstraní korespondence, pro které simulovaný svazek v aktuálním modelu neexistuje.
- *Enable hand pairing* – povolí ruční korespondenci simulovaných a pozorovaných svazků.

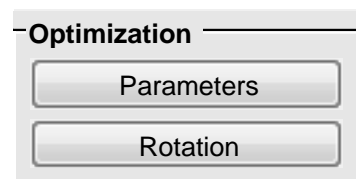


Obrázek B.6: Panel pro kontrolu korespondencí svazků.

Optimalizace

Panel *Optimization* na obr. B.7 slouží k volbě optimalizační úlohy.

- *Parameters* – optimalizují se parametry faset podle výběru v panelu *Optim. parameters* na obr. B.5.
- *Rotation* – optimalizuje se rotace a sklon kamene.

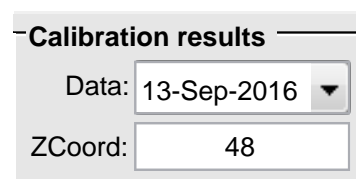


Obrázek B.7: Panel pro výběr optimalizační úlohy.

Výsledky kalibrace

Panel *Calibration results* na obr. B.8 slouží k načtení výsledků kalibrace.

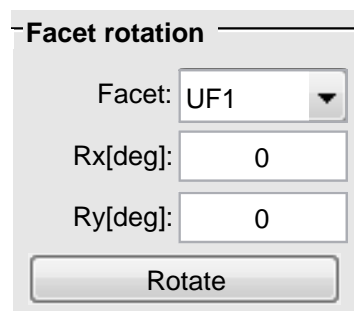
- *Data* – výsledek kalibrace podle data. Soubory s výsledky kalibrace jsou v určeném adresáři.
- *ZCoord* – upraví z souřadnici kamene.



Obrázek B.8: Panel pro volbu výsledků kalibrace.

Rotace faset

Panel *Facet rotation* na obr. B.9 slouží k rotaci vybrané fasety. Fasetu vybereme v nabídce *Facet*, zadáme úhel rotace R_x v ose x a R_y v ose y . Stiskem *Rotation* natočíme vybranou fasetu o zvolený úhel. Po rotaci kamene se přepočítají simulované svazky.



Obrázek B.9: Panel pro změnu sklonu normál faset.

Parametry faset

Panel *Facet parameters* na obr. B.10 slouží ke zobrazení výsledků optimalizace. Parametr α_{ref} označuje azimut počátečního dohadu normály fasety. Parametr $\Delta\alpha$ ukazuje změnu azimutu optimalizovaného modelu vůči původnímu odhadu. Podobně pro elevaci ε . Uvedené výsledky jsou v úhlových stupních.

Facet parameters														
	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	UF7	UF8	UF9	UF10	UF11	UF12	TOP	BOT
α_{ref}	26.762	57.091	87.561	118.040	148.392	178.522	-151.591	-121.921	-92.381	-62.840	-33.191	-3.339	-90.641	89.359
$\Delta\alpha$	-0.1216	-0.1936	-0.2874	-0.5412	-0.4233	-0.3125	-0.2229	-0.4995	0.4641	0.2568	0.7748	0.5793	-26.848	-30.257
ε_{ref}	42.953	42.618	42.485	42.591	42.906	43.343	43.785	44.113	44.242	44.140	43.831	43.398	0.879	179.121
$\Delta\varepsilon$	0.9792	0.9503	0.9045	1.0369	0.9728	1.2661	1.2659	1.1506	1.1022	1.0672	1.0973	1.0688	-1.5219	1.7906

Obrázek B.10: Panel pro zobrazení výsledků optimalizace.

■ C Obsah příložených DVD

Obsah práce je rozdělen do dvou DVD. První DVD obsahuje kompletní program pro odhad sklonu faset broušeného kamene typu *viva12*, kompletní dokumentaci a text diplomové práce v PDF souboru. Na druhém DVD je uložena experimentální část práce.

DVD 1

- *facet_Orientation_Estimator*
 - *20160914-viva12* – snímky kamenů použitých v experimentech, obsahuje výsledky optimalizace.
 - *autoOptimization* – automatický odhad parametrů faset.
 - *calibration_results* – výsledky kalibrace měřicí soustavy.
 - *corres_alg* – algoritmy pro nalezení korespondujících svazků.
 - *handOptimization* – program s grafickým uživatelským rozhraním pro ruční odhad orientace faset kamene *viva12*. Návod k programu je v příloze B.
 - *image_recognition* – obsahuje programy pro kalibraci měřicí soustavy a detekci stop v obraze.
 - *ladok* – simulace LADOK.
 - *lam* – optimalizační program LAM [5].
 - *stone* – snímky kamene z kalibrace stínítka.
 - *table* – snímky kalibračního stolku z kalibrace laseru.
 - *target* – snímky kalibračního obrazce z kalibrace kamery.
- *doc_thesis* – dokumentace.
- *drapelaThesis.pdf* – text diplomové práce.

DVD 2

- *facet_Orientation_Estimator*
 - *experiments* – složka s experimenty.