

Algoritmy pro optoelektronické polohování až v šesti stupních volnosti

Algorithms for the Optoelectronic Positioning of up to Six Degrees
of Freedom

Bc. Tomáš Janík

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš JANÍK**
Osobní číslo: **A10289**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační technologie**

Téma práce: **Algoritmy pro optoelektronické polohování až v šesti stupních volnosti**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Vypracujte teoretický model daného problému.
3. Na modelu ověřte možnosti řešení.
4. Vypracujte vizualizaci modelu.
5. Vytvořte návrh implementace.
6. Demonstrujte výsledky a formulujte závěr.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. JIŘÍ, Žára a Jiří ŽÁRA. *Moderní počítačová grafika*. Vyd 1. Brno: Computer Press, 2004, 609 s. ISBN 80-251-0454-0.
2. FORSYTH, David a Jean PONCE. *Computer vision: a modern approach*. Vyd 1. London: Prentice Hall, c2003, 693 s. ISBN 01-308-5198-1.
3. GAVENDA, Tomáš. *Optoelektronické polohování nástroje vůči rovině ve více stupních volnosti s využitím v oblasti bezpečnostních technologií*. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
4. PRESS, William H., Saul A. TEUKOLSKY, William T. VETTERLING a Brian P. FLANNERY. *Numerical recipes: the art of scientific computing*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 1235 s. ISBN 978-052-1880-688.
5. ZELINKA, Ivan, Zuzana OPLATKOVÁ, Miloš ŠEDA, Pavel OŠMERA a František VČELARĚ. *Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace*. 1. české vyd. Praha: BEN, 2009, 534 s. ISBN 80-7300-218-3.
6. *Wolfram Mathematica 8 Documentation*. WOLFRAM RESEARCH. Wolfram Mathematica [online]. Oxfordshire, 2012 [cit. 2012-01-20]. Dostupné z: <http://reference.wolfram.com/mathematica/guide/Mathematica.html>

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Erik Král

Ústav počítačových a komunikačních systémů

Datum zadání diplomové práce:

24. února 2012

Termín odevzdání diplomové práce:

21. května 2012

Ve Zlíně dne 24. února 2012

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. Mgr. Roman Jašek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Práce si dává za úkol prozkoumat možnosti získávání údajů o vzájemné poloze světelného zdroje, roviny a kamery. Tyto tři objekty jsou umístěny v trojrozměrném prostoru. Polohu součástí budeme určovat na základě informace z kamery a dalších vlastností, jež budeme schopni o situaci vyslovit. Světelný zdroj bude vyzařovat pravidelný strukturovaný obrazec na rovinu před sebou. Obraz vzniklý na rovině bude následně snímán kamerou. Ke zkoumání možností řešení úkolu bude sestaven matematický model situace. Po té budeme pro obrazovou informaci z kamery hledat takové parametry modelu, které by jí odpovídaly. Pro vytvoření modelu a zobrazení situace bude jako softwarového nástroje využito programu Mathematica od společnosti Wolfram, jakož to i k následnému hledání řešení. Pro získávání parametrů modelu, bude kromě zmíněného softwarového produktu využito i evolučních výpočetních technik.

Klíčová slova: poloha, perspektivní projekce, translace bodu, rotace bodu, transformace bodu, polohování v prostoru, optimalizace, evoluční algoritmus

ABSTRACT

Thesis deals with way of obtaining position data of a light source, surface and a camera in three dimensional space. We will learn about the position of these parts thanks to information from camera and other information, that we can find out. Light source project structured symbol on surface with laser light. The light is recorded and analyzed. Than the mathematical model of the situation is made. Based on camera information we will look for such parameters of the model, to fit the situation. For model creation was used software Mathematica. Also evolution algorithms were used to obtain parameters of the model.

Keywords: location, perspective projection, object translation, object rotation, object transformation, space positioning, optimalization, evolution algorithm

Na tomto místě bych rád poděkoval v první řadě mému vedoucímu práce Ing. et Ing. Eriku Královi za trpělivost, čas a úsilí, které věnoval tématu této diplomové práce. Dále patří velký dík mé rodině, která mi umožnila pracovat na této práci. Nakonec bych rád také poděkoval škole, učitelům i všem ostatním, kteří mi nápomocni při psaní této práce.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 PROSTŘEDKY VYUŽITÉ K VYTVÁŘENÍ MODELU PROBLÉMU.....	11
1.1 SOUSTAVA SOUŘADNIC	11
1.2 KAMERA.....	11
1.3 HOMOGENNÍ SOUŘADNICE.....	13
1.4 ROTACE A TRANSLACE V PROSTORU.....	13
1.4.1 Matice translace.....	13
1.4.2 Matice rotace	14
1.4.3 Skládání transformací.....	15
1.5 VEKTOR.....	15
1.6 ROVNICE PŘÍMKY V PROSTORU.....	16
1.7 ROVNICE ROVINY	16
1.8 VZÁJEMNÁ POLOHA PŘÍMKY A ROVINY.....	17
2 PROSTŘEDKY PRO ŘEŠENÍ MODELU	18
2.1 VZDÁLENOST DVOU BODŮ V PROSTORU	18
2.1.1 Euklidovská metrika.....	18
2.1.2 Součtová metrika.....	18
2.1.3 Maximální metrika	19
2.1.4 Kvadratická odchylka.....	19
2.2 EVOLUČNÍ VÝPOČETNÍ TECHNIKY	19
2.2.1 Účelová funkce.....	20
2.2.2 Použitelnost evolučních algoritmů	20
II PRAKTICKÁ ČÁST	21
3 MODEL PROBLÉMU.....	22
3.1 MOŽNOSTI VYTVOŘENÍ MODELU.....	22
3.2 PROMĚNNÉ PARAMETRY	22
3.3 UVAŽOVANÁ STRUKTURA SVĚTELNÝCH PAPRSKŮ	23
3.4 TRANSFORMAČNÍ MATICE.....	23
3.5 MODEL ZDROJE SVĚTLA ZALOŽENÝ NA VZTAZÍCH V TROJÚHELNÍKU.....	24
3.6 MODEL SVĚTELNÉHO ZDROJE ZALOŽENÝ NA PRŮSEČÍKU PŘÍMKY A ROVINY	25
3.7 TRANSFORMACE V MODELU	28
3.8 DALŠÍ BODY V MODELU	30
3.9 ZOBRAZENÍ MODELU	31
4 HLEDÁNÍ PARAMETRŮ MODELU	34

4.1	ŘEŠENÍ GONIOMETRICKÝCH ROVNIC.....	34
4.2	MINIMALIZAČNÍ FUNKCE	34
4.3	VÝSLEDKY HLEDÁNÍ PARAMETRŮ	35
4.4	POROVNÁNÍ METOD ZÍSKÁVÁNÍ PARAMETRŮ PRO LASER.....	37
4.5	PRŮZKUM CITLIVOSTI NA ZMĚNU PARAMETRŮ.....	38
	ZÁVĚR	41
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	43
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	45
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	47
	SEZNAM OBRÁZKŮ	48
	SEZNAM TABULEK.....	49
	SEZNAM PŘÍLOH.....	50

ÚVOD

Na úvod se pokusíme nastínit situaci, kterou se bude práce zabývat. V práci se budeme snažit nalézt způsob určování polohy, na základě optické informace z jedné kamery a to za přičinění světelného zdroje, jenž vyzařuje do prostoru své paprsky pod daným úhlem. Světelný zdroj svítí na rovinu před sebou. Obraz na ní vzniklý je dále snímán kamerou. Informaci z kamery jsme schopni vyhodnocovat a získat tak souřadnice bodů na rovině kamery.[1] Právě informace z kamery o souřadnicích bodů se bude práce snažit využít, spolu s informací o úhlu šíření paprsků světelného zdroje a dalšími vlastnostmi, které budeme schopni o modelu vyslovit. V práci by měl být na základě analytické geometrie sestaven matematický model, s jehož pomocí bychom měli být schopni získávat polohu jednotlivých částí modelu.

Zpočátku se budeme zabývat prostředky pro matematický popis částí modelu a možnostmi pohybu jeho částmi. Dále popíšeme nástroje, které nám pomohou s vyhodnocováním kvality řešení. Potom se zaměříme na prostředky pro hledání řešení modelu, nebo lze také říci pro získání polohy částí modelu z jeho vstupních informací.

V praktické části se budeme zabývat konkrétním popisem modelu, jeho částí, parametrů a prostředků pro pohyb částí modelu. Určíme postup, který pro pohyb modelu budeme používat. V tomto postupu budeme také definovat vztahy pro realizaci pohybu. Následně se budeme zabývat řešením modelu, respektive získáváním parametrů, které určují vzájemnou polohu kamery, roviny a světelného zdroje. Další část se pak bude zabývat zkoumáním vhodnosti několika algoritmů, schopných řešit matematicky popsáný model.

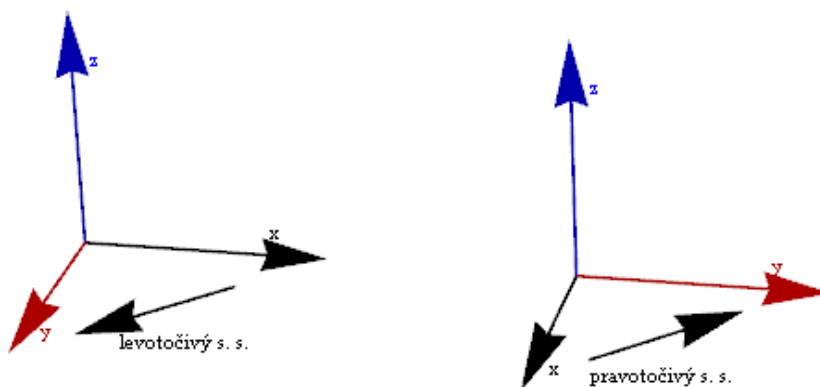
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PROSTŘEDKY VYUŽITÉ K VYTVÁŘENÍ MODELU PROBLÉMU

K vyřešení zadání práce musíme využít řadu různých poznatků z oblasti prostorové geometrie, počítačové grafiky a hardwarového vybavení. Tato kapitola se bude zabývat prostředky, které nám umožní sestavit matematický model situace.

1.1 Soustava souřadnic

Abychom mohli pracovat s termíny jako poloha nebo délka, je nejdříve třeba nadefinovat souřadný systém, ve kterém budeme souřadnice bodů určovat. Pro trojrozměrné prostory se používají dva pravouhlé souřadné systémy, levotočivý a pravotočivý, jak lze vidět na obrázku (Obr. 1). Jestliže vztyčený palec otevřené dlaně bude ukazovat od počátku souřadného systému směrem ke kladným hodnotám osy z , pak zbylé prsty levé, případně pravé ruky, nám určí směr otočení kladné části osy x o 90° tak, že získáme kladnou část osy y .



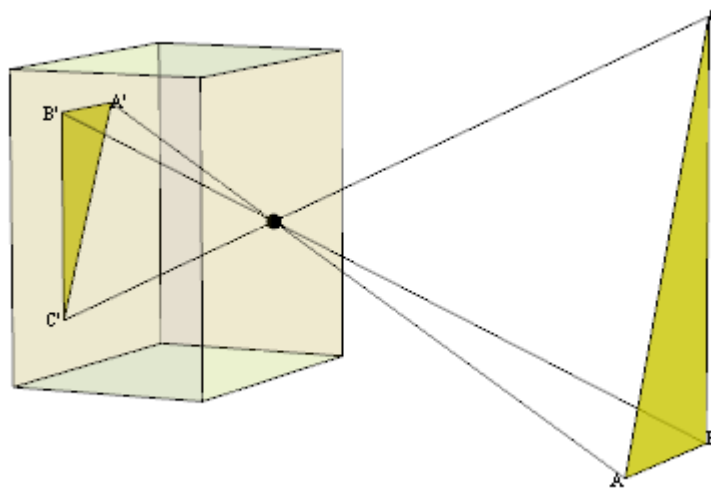
Obr. 1 Pravouhlé souřadné systémy[2]

Obrázek (Obr. 1) vykresluje kladné části os a černá šipka mezi osami x a y ukazuje, kterým směrem musíme otočit kladnou část osy x , abychom získali kladnou část osy y . Pro naši práci budeme používat pravotočivého souřadného systému, protože je využit v programu Wolfram Mathematica, který budeme používat.[2]

1.2 Kamera

Dnes máme mnoho různých zařízení, schopných zaznamenat obraz. První model fotoaparátu byl vynalezen nejspíše už v 16. století. Neměl objektiv, ale byl zkonstruován,

jako temná komora s malou dírkou pro vniknutí světelného paprsku. Pro svou jednoduchost je uvažován tento model i pro náš případ. Kameru lze jednoduše připodobnit uzavřené krabici, jež má v přední stěně díрку a na zadní protější stěně projekční plochu, tzn. snímací zařízení či stínítko. Dírkový projekční model navrhl už na začátku 15. století Filippo Brunelleschi. Dírková kamera obraz získaný na stínítku zrcadlí, jak horizontálně, tak vertikálně. Velikostně obraz neodpovídá reálnému objektu, jak vidíme na obrázku (Obr. 2).



Obr. 2 Model dírkové kamery[3]

Poměr velikosti reálného objektu a jeho obrazu na stínítku, lze vyjádřit jako poměr mezi souřadnicemi bodů objektu a souřadnicemi obrazových bodů si odpovídajících.

$$\begin{cases} x' = \lambda x \\ y' = \lambda y \\ f' = \lambda z \end{cases} \Leftrightarrow \lambda = \frac{x'}{x} = \frac{y'}{y} = \frac{f'}{z} \quad (1)$$

Souřadnice bodů na stínítku tedy dostaneme dle rovnice (2).

$$\begin{cases} x' = f' \frac{x}{z} \\ y' = f' \frac{y}{z} \end{cases} \quad (2)$$

Souřadnice obrazu v ose z je rovna ohniskové vzdálenosti. Uvedené vztahy předpokládají, že osa kamery je shodná s osou z a dířka kamery je umístěna v počátku souřadného systému.[3]

1.3 Homogenní souřadnice

V nehomogenních kartézských souřadnicích definujeme bod ve 3D prostoru, jako uspořádanou trojici čísel $[X, Y, Z]$, vyjadřující vzdálenost bodu od počátku souřadného systému v jednotlivých osách. V homogenních souřadnicích definujeme bod jako čtveřici čísel $[x, y, z, w]$, kde první trojice čísel vyjadřuje poměr vzdáleností v jednotlivých osách od počátku souřadného systému a doplňující čtvrté číslo tzv. váha bodu, slouží jako koeficient, kterým předchozí tři čísla vydělíme a dostaneme tak nehomogenní kartézské souřadnice. Toto tvrzení vyjadřuje vztah (3).

$$X = \frac{x}{w}, Y = \frac{y}{w}, Z = \frac{z}{w}, w \neq 0 \quad (3)$$

Výhodou vyjádření bodů pomocí homogenních souřadnic je, že při práci v prostoru lze provádět několik lineární transformací zároveň, pomocí jediné matice. Další výhodou homogenních souřadnic je, že vektorové operace mají hardwarovou podporu na současných čípech počítačových grafických karet.[4]

1.4 Rotace a translace v prostoru

Pro otáčení a posouvání bodů v prostoru můžeme použít výhod maticových transformací. Matice lze mezi sebou násobit a tak jednotlivé operace skládat. Matice ovšem nejsou jediným způsobem, jak provádět transformace v prostoru. Ty lze také provádět pomocí kvaternionů. My ale budeme využívat matic. Bod získaný transformací budeme značit čárkou za označením původního bodu, pro bod P tedy P' . Obecnou lineární transformaci budeme provádět tak, že bod P , vyjádřený homogenními souřadnicemi, zapsanými ve sloupcovém vektoru, budeme násobit čtvercovou maticí transformace A o rozměru 4×4 . Transformaci tedy zapíšeme jako:[4]

$$P' = A \cdot P. \quad (4)$$

1.4.1 Matice translace

Pro posun bodu v prostoru je definována jednotková matice o rozměru 4×4 , kde do posledního sloupce doplníme shora vektor posunutí $v = (v_x, v_y, v_z)$. Dostaneme tak matici T ze vztahu (5).

$$T(v_x, v_y, v_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & v_x \\ 0 & 1 & 0 & v_y \\ 0 & 0 & 1 & v_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Mluví-li se u translační matice o inverzní matici, doplní se do jednotkové matice záporný vektor posunutí. Dostaneme tak matici T^{-1} ze vztahu (6).[4]

$$T(-v_x, -v_y, -v_z) = T^{-1}(v_x, v_y, v_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -v_x \\ 0 & 1 & 0 & -v_y \\ 0 & 0 & 1 & -v_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.4.2 Matice rotace

K rotaci bodů kolem jednotlivých os se také používá čtvercových matic. Pro homogenní souřadnicový systém v 3D prostoru má matice rozměr opět 4×4 , jako u translační matice. Pro rotaci se v maticích využívá goniometrických funkcí. Matice a úhly jsou indexovány podle osy, kolem které zprostředkovávají rotaci.

$$R_x(\theta_x) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$R_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Inverzní matici rotace vytvoříme tak, že rotujeme o záporný úhel. Funkce kosinus je sudá, proto zůstane beze změny $\cos(-\alpha) = \cos \alpha$. Funkce sinus je lichá, proto se znaménko u funkce změní na minus $\sin(-\alpha) = -\sin \alpha$. Konkrétní případ inverzní transformace je uveden u inverzní matice pro rotaci kolem osy x ve vztahu (10).

$$R_x(-\theta_x) = R_x^{-1}(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & \sin(\theta_x) & 0 \\ 0 & -\sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Obdobně vytvoříme inverzní matice rotace pro zbylé dvě osy, osu y a osu z.[4]

1.4.3 Skládání transformací

Jelikož transformace provádíme za pomoci matic, je nutné dát pozor na pořadí matic, a také na pořadí, ve kterém matice násobíme. Je totiž rozdíl, zda nejprve rotujeme a pak posouváme, nebo nejdříve bod posuneme a pak rotujeme. Transformační matici získáme násobením matic dílčích transformací. Díky aplikaci transformací dle vztahu (4), musíme dílčí transformace přidávat zleva. Chceme-li aplikovat postupně transformace zastoupené maticemi A_1 , A_2 , pak pro získání matice transformace násobíme matice $A = A_2 A_1$. Vztah pro transformaci bodu vidíme v rovnici (11).

$$P' = A_2 A_1 P \quad (11)$$

Při vytváření inverzní transformační matice k matici, složené z několika transformací, musíme inverzní matice lineárních transformací aplikovat v opačném pořadí. Zvolili jsme pořadí transformací $A = A_2 A_1$. Pak inverzní transformační matici vypočítáme jako $A^{-1} = A_1^{-1} A_2^{-1}$. [4]

1.5 Vektor

Vektor je orientovaná úsečka, kterou lze libovolně posouvat v rovině či prostoru. Orientovaná úsečka má počáteční a koncový bod. Vektor má dán směr a velikost, nemá však jasně danou pozici. Mají-li tedy nějaké orientované úsečky v rovině či prostoru stejný směr a velikost, jsou reprezentovány stejným vektorem. Vektor se obvykle značí malým písmenem se šipkou nad ním, např. \vec{u} , nebo se také značí pomocí počátečního bodu a koncového bodu jedné z orientovaných úseček, které představuje. Jsou-li tedy těmito body A a B , pak značení vektoru bude \vec{AB} . Třetím používaným značením je malé písmeno zapsané tučným písmem následovně \mathbf{u} . Souřadnice vektoru se zapisují do kulatých závorek a získáme je, jako rozdíl počátečního a koncového bodu jedné

z orientovaných úseček, které může představovat. Například budeme-li se snažit určit velikost vektoru u , zadaného body A a B, takto zadaný vektor bude určen vztahem (12).[5]

$$u = B - A = (b_1 - a_1, b_2 - a_2, b_3 - a_3) = (u_1, u_2, u_3) \quad (12)$$

1.6 Rovnice přímky v prostoru

Přímky se zpravidla značí malými tiskacími písmeny. Nejčastěji se používají dva způsoby pro vyjádření přímky a to jsou parametrická rovnice a obecná rovnice přímky. Parametrické vyjádření přímky definuje za pomoci jednoho bodu, který na přímce leží a vektoru, který určuje směr přímky. Tento bod s vektorem jsou doplněny o takzvaný parametr, který umožňuje získat kterýkoliv bod na přímce. Zápis přímky pak vypadá tak, jak je uvedeno ve vztahu (13), kde bod A a vektor u definují přímku a souřadnice x, y, z určují pro různý parametr t všechny body, které na přímce leží.

$$\begin{aligned} x &= A_x + t \cdot u_x \\ y &= A_y + t \cdot u_y \\ z &= A_z + t \cdot u_z \end{aligned} \quad (13)$$

Další možností je vyjádření přímky její obecnou rovnicí. Tuto získáme součtem rovnic parametrického vyjádření přímky tak, abychom při něm vyloučili parametr. Získáme tak rovnici (14).

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (14)$$

Souřadnice x, y a z jsou souřadnicemi bodů, které leží na přímce. Konstanty a, b, c jsou souřadnicemi vektoru kolmého na přímku. Čísla $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ a normálový vektor musí mít nenulovou velikost.[6]

1.7 Rovnice roviny

Pro značení roviny se používá malých písmen řecké abecedy. Rovinu lze určit třemi body, které ovšem nesmí ležet na jedné přímce, dále dvěma různými přímkami, které se protínají v jednom společném bodě nebo také přímkou a bodem, který na přímce neleží. Stejně jako u přímky jsou dvě nejčastější vyjádření roviny parametrické a obecné. Pro rovinu s parametrickým vyjádřením využíváme jednoho bodu, který na rovině leží a dvou směrových vektorů, které nesmí mít stejný, nebo opačný směr. Parametrické rovnice

souřadnic x, y, z bodu, který leží v rovině, jsou zapsány ve vztahu (15), kde A je bod ležící v rovině, u, v jsou směrové vektory roviny a s, t jsou parametry, díky kterým lze získat každý bod roviny.[6]

$$\begin{aligned}x &= A_x + s \cdot u_x + t \cdot v_x \\y &= A_y + s \cdot u_y + t \cdot v_y \\z &= A_z + s \cdot u_z + t \cdot v_z\end{aligned}\tag{15}$$

Obecné vyjádření roviny má stejný tvar jako obecná rovnice přímky, jak je uvedeno ve vztahu (16). Opět se využívá normálového vektoru, ten je na rovinu kolmý.

$$ax + by + cz + d = 0\tag{16}$$

Souřadnice x, y, z jsou souřadnicemi bodů, které leží v rovině. Konstanty a, b, c jsou souřadnicemi vektoru kolmého k rovině. Čísla $a, b, c, d \in \mathfrak{R}$ a normálový vektor musí mít nenulovou velikost.[6][7]

1.8 Vzájemná poloha přímky a roviny

V prostoru mohou nastat tři vzájemné polohy přímky s rovinou. Přímka s rovinou jsou rovnoběžné a nemají žádný společný bod. Přímka s rovinou jsou různoběžné a mají jeden společný bod. Poslední možná vzájemná poloha je, že přímka leží v rovině a má s ní společné všechny své body. Pro náš model využíváme druhý případ se vzájemným průsečíkem. Pro zjištění polohy průsečíku využíváme parametrickou rovnici přímky a obecnou rovnici roviny. Z parametrické rovnice přímky dosadíme souřadnice x, y, z do obecné rovnice roviny a ze získané rovnice vypočítáme parametr, díky kterému, po dosazení do parametrického vyjádření přímky, získáme souřadnice průsečíku.[6]

2 PROSTŘEDKY PRO ŘEŠENÍ MODELU

Uvažovaná situace předpokládá, že kamerou budeme snímat souřadnice bodů vysvícené na rovině ψ . Získáme tak vstupní informaci do sestrojeného modelu situace. Z modelu nám vyplyne soustava goniometrických rovnic. K vyřešení těchto rovnic využijeme numerických metod řešení.

2.1 Vzdálenost dvou bodů v prostoru

Jestliže chceme jakýkoliv problém řešit numericky, je vždy důležité sestavit správně funkci pro vyhodnocování vzdálenosti dat naměřených a dat získaných z modelu situace. Pro určení vzdálenosti mezi body využíváme takzvaných metrických prostorů.

Metrický prostor je definován jako dvojice (P, ρ) , kde P je neprázdná množina a zobrazení $\rho: P \times P \rightarrow \mathfrak{R}_+$ splňuje pro každé $x, y, z \in P$ axiomy:

- $\rho(x, y) = 0$ právě když $x = y$ (axiom totožnosti),
- $\rho(x, y) = \rho(y, x)$ (axiom symetrie),
- $\rho(x, y) + \rho(y, z) = \rho(x, z)$ (axiom trojúhelníkové nerovnosti).

Zobrazení ρ pojmenováváme metrikou na P . Prvkům množiny P říkáme body a číslo $\rho(x, y)$ zvěme vzdáleností mezi body x, y . [8]

2.1.1 Euklidovská metrika

V euklidovském prostoru lze vypočítat vzdálenost dvou bodů, jako délku přímky mezi dvěma body. Například vzdálenost mezi body $A = [a_1, a_2]$ a $B = [b_1, b_2]$ vypočítáme dle vztahu (17). [9]

$$|AB| = \sqrt{(b_1 - a_1)^2 + (b_2 - a_2)^2} \quad (17)$$

2.1.2 Součtová metrika

Součtová metrika pro určování vzdálenosti mezi body používá součet absolutních hodnot rozdílů souřadnic bodů. Ve vztahu (18) je určena vzdálenost pro stejné body A, B . [8]

$$|AB| = \sum_{k=1}^2 |b_k - a_k| \quad (18)$$

2.1.3 Maximální metrika

Pro určování vzdálenosti bodů užívá maximální metrika největšího rozdílu v souřadnicích. Pro určení vzdálenosti mezi body A, B v této metrice je uveden vztah (19).[8]

$$|AB| = \max_{1 \leq k \leq 2} |b_k - a_k| \quad (19)$$

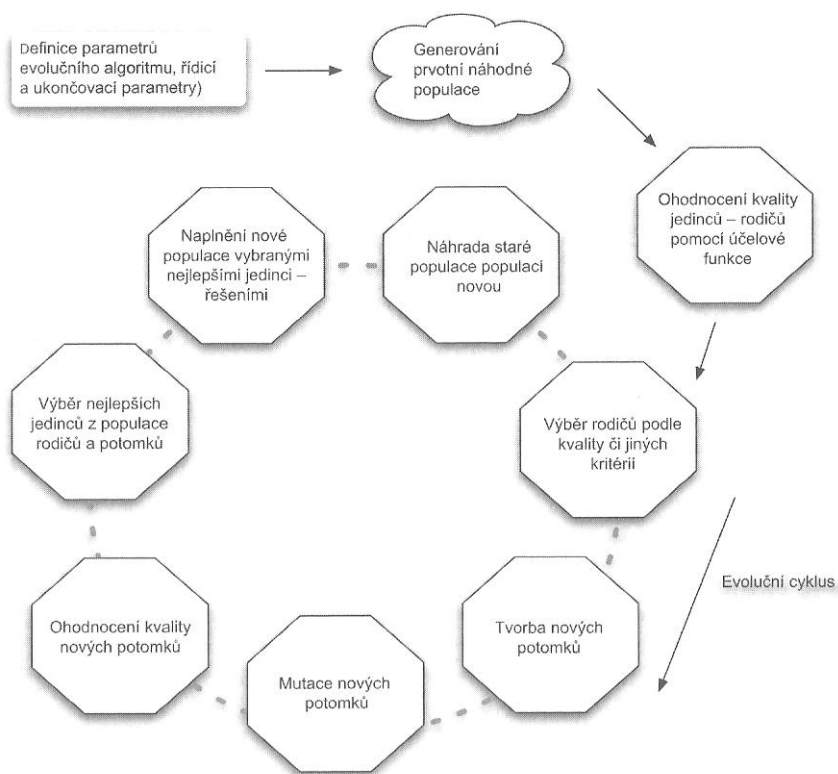
2.1.4 Kvadratická odchylka

Pro zjištění velikosti vzájemné odchylky dvou bodů lze kromě tří zmíněných metrik použít také součet kvadratických odchylek. Příklad využití pro užívané demonstrační body A, B je zapsán vztahem (20).

$$|AB| = \sum_{k=1}^2 (b_k - a_k)^2 \quad (20)$$

2.2 Evoluční výpočetní techniky

Evoluční výpočetní techniky jsou numerické algoritmy založené na principech Darwinovy a Mendelovy evoluční teorie. Většinu evolučních výpočetních technik tvoří evoluční algoritmy, ale do této skupiny patří také genetické programování, evoluční hardware atd. Na základě evoluční teorie je uznáváno tzv. evoluční dogma, které říká, že druhy se vyvíjejí tak, že rodiče zplodí potomka, který je při vzniku podroben mutaci. Jedinci populace nevhodní pro život umírají po generacích, čímž se uvolňuje místo pro nové potomky. Schéma tohoto cyklu je zakresleno na obrázku (*Obr. 3*).[10]



Obr. 3 Obecný cyklus evolučního algoritmu[10]

2.2.1 Účelová funkce

Účelová funkce je vztah, jehož optimalizací (nalezením minima nebo maxima funkce) dosáhneme požadovaných hodnot argumentů funkce. Dimenze problému je určena počtem hledaných parametrů funkce. Na určení vztahu pro výpočet této funkce musí být kladen velký důraz, kvůli důležitosti tohoto vztahu pro celé řešení modelu.[10]

2.2.2 Použitelnost evolučních algoritmů

Škála algoritmů, které se řadí mezi evoluční algoritmy, stále roste. Tyto algoritmy jsou inspirovány nejrůznějšími přírodními jevy a principy. Podobné je to i s využitím těchto algoritmů pro stále větší okruh nejrůznějších problémů, proto je důležité vybrat pro řešení konkrétního problému takový algoritmus, který je k řešení vhodný a dokáže nalézt dostatečně přesné řešení v přijatelném čase.[10]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 MODEL PROBLÉMU

Celý model je založen na třech součástech, tvoří jej zdroj strukturovaného světla, rovina, která je osvětlována, a dírková kamera. Model je umístěn v prostoru. Části modelu jsou posouvány a natáčeny. Zdroj světla je nasměrován na rovinu a vytváří na jejím povrchu strukturovaný obrazec. Povrch roviny je dále snímán dírkovou kamerou. Osvícenou rovinu budeme značit ψ a rovinu v kameře, na které vzniká obraz, budeme nazývat φ .

3.1 Možnosti vytvoření modelu

Důležitou otázkou pro model je, kam umístíme počátek souřadného systému. Dalším důležitým aspektem je, jak v našem modelu budeme reprezentovat zdroj světla. Při volbě, kam umístit počáteční bod modelu, záleží na tom, jak budeme reprezentovat části modelu. Pro reprezentaci světelného laserového zdroje jsme brali v úvahu strukturovaný zdroj světla uvedený v kapitole 3.5. Při řešení jsme ale usoudili, že vhodnějším, především z hlediska uvažování o situaci, je model světelného zdroje vyjádřený pomocí průsečíků přímek laserových paprsků a roviny ψ , jak je probráno v kapitole 3.6.

První model světelného zdroje, založený na vztazích v trojúhelníku, je umístěn v počátku souřadného systému a nasměrován tak, že svítí do kladného směru osy z , ve kterém je umístěna rovina ψ . Obraz vznikající na rovině je dále snímán kamerou, jež je umístěna také v počátku souřadného systému a její obrazová rovina φ má střed v bodě $[0,0,-f,1]$.

Druhý model světelného zdroje, založený na průsečíku přímky s rovinou, je vymyšlen tak, že střed souřadného systému je součástí roviny ψ , která je kolmá na osu z a světelný zdroj i s dírkou kamery jsou posunuty do kladného směru osy z a jsou natočeny ke středu souřadného systému.

3.2 Proměnné parametry

V modelu světelného zdroje, založeném na vztazích v trojúhelníku, můžeme měnit parametr h , který určuje souřadnici středu roviny ψ v ose z nebo-li, jak jsou od sebe vzdáleny zdroj světla a střed roviny ψ . Dále můžeme ovlivňovat úhly α a β , kterými natáčíme rovinu ψ v osách x a y .

Varianta světelného zdroje, ve které je hledán průsečík roviny a přímky, používá pro pohyb translačního vektoru $s = (s_x, s_y, s_z)$. Počítá se také s natáčením zdroje kolem jednotlivých os o úhly $\theta_{xl}, \theta_{yl}, \theta_{zl}$.

Dále používáme dalších šesti parametrů, které ovlivňují pozici a natočení dírkové kamery. Pozici kamery určuje translační vektor $t = (t_x, t_y, t_z)$, který kameru posouvá z počátku souřadnicového systému na souřadnice vektoru posunutí. Úhly $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ natáčejí kameru kolem os x, y, z.

3.3 Uvažovaná struktura světelných paprsků

Pro model využíváme světelného zdroje, který vyzařuje strukturovaný obrazec ve tvaru čtverce s průsečíkem úhlopříček. Respektive paprsky, které zdroj vyzařuje, vytvářejí na rovině kolmé k ose světelného zdroje body, představující rohy čtverce a průsečík úhlopříček tohoto čtverce. Paprsek průsečíku svírá s paprsky rohů úhel σ . Body v rozích čtverce jsme pojmenovali A, B, C, D a bod průsečíku úhlopříček značíme S.

3.4 Transformační matice

Při vytváření transformačních matic pro pohyb dírkovou kamerou postupujeme tak, jak je popsáno v kapitole 1.4. Pro náš model potřebujeme jak přímou transformační matici, tak matici inverzní. Transformační matice v sobě zahrnuje rotace kolem všech tří os v prostoru a také posunutí ve všech osách. Matice jsou definovány vztahy (21) a (22).

$$M(t, \theta) = T(t_x, t_y, t_z) \cdot R_z(\theta_z) \cdot R_y(\theta_y) \cdot R_x(\theta_x) \quad (21)$$

Pro inverzní matici musíme násobit inverzní matice transformací v opačném pořadí.

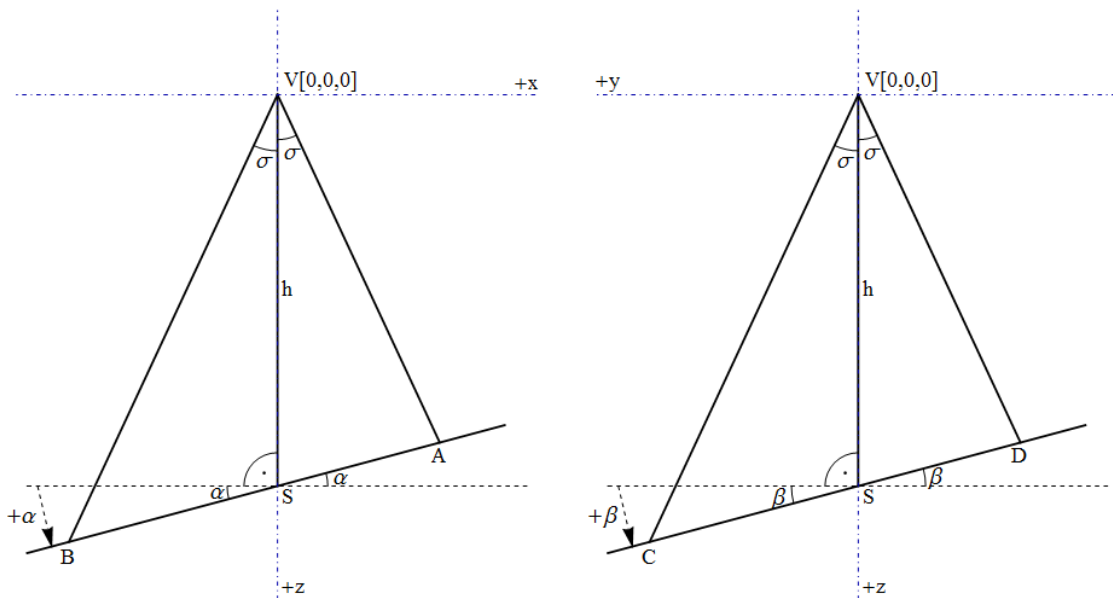
$$M^{-1}(t, \theta) = R_x^{-1}(\theta_x) \cdot R_y^{-1}(\theta_y) \cdot R_z^{-1}(\theta_z) \cdot T^{-1}(t_x, t_y, t_z) \quad (22)$$

V modelu světelného zdroje založeném na průsečících se využívá ještě druhé transformační matice. Kromě uvedené matice pro kameru se používá také matice pro pohyb se světelným zdrojem. Tuto matici budeme označovat L . Získáme ji stejným vztahem, jako předchozí matici, jen musíme dosadit úhly a translační vektor pro pohyb se zdrojem světla.

$$L(s, \theta_l) = T(s_x, s_y, s_z) \cdot R_z(\theta_{zl}) \cdot R_y(\theta_{yl}) \cdot R_x(\theta_{xl}) \quad (23)$$

3.5 Model zdroje světla založený na vztazích v trojúhelníku

Rovina kolmá na osu světelného zdroje je natáčena v ose x o úhel α a v ose y o úhel β . Poloha bodů A a B je ovlivňována úhlem α , poloha bodů C a D závisí na natočení roviny podle úhlu β , jak lze sledovat na obrázku (Obr. 4).

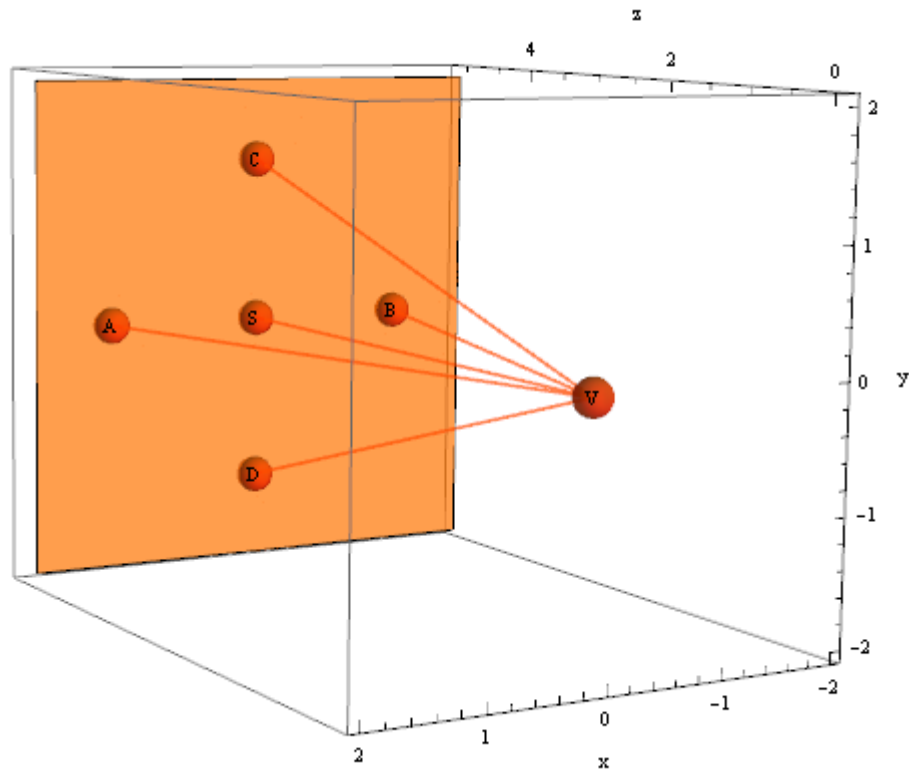


Obr. 4 Náklon roviny ψ

Z obrázku (Obr. 4) lze odvodit vztahy platící v trojúhelníku, dle sinovy věty a tvrzení o součtu úhlů v trojúhelníku.[1] Na základě těchto poznatků dále můžeme zapsat souřadnice bodů A, B, C, D, S, které jsou zapsány vztahem (24).

$$\begin{aligned}
 A &= [h \cdot \cos \alpha \cdot \sin \sigma \cdot \sec(\alpha - \sigma), 0, h \cdot \cos \alpha \cdot \cos \sigma \cdot \sec(\alpha - \sigma), 1] \\
 B &= [-h \cdot \cos \alpha \cdot \sin \sigma \cdot \sec(\alpha + \sigma), 0, h \cdot \cos \alpha \cdot \cos \sigma \cdot \sec(\alpha + \sigma), 1] \\
 C &= [0, h \cdot \cos \beta \cdot \sin \sigma \cdot \sec(\beta + \sigma), h \cdot \cos \beta \cdot \cos \sigma \cdot \sec(\beta + \sigma), 1] \\
 D &= [0, -h \cdot \cos \beta \cdot \sin \sigma \cdot \sec(\beta - \sigma), h \cdot \cos \beta \cdot \cos \sigma \cdot \sec(\beta - \sigma), 1] \\
 S &= [0, 0, h, 1]
 \end{aligned} \tag{24}$$

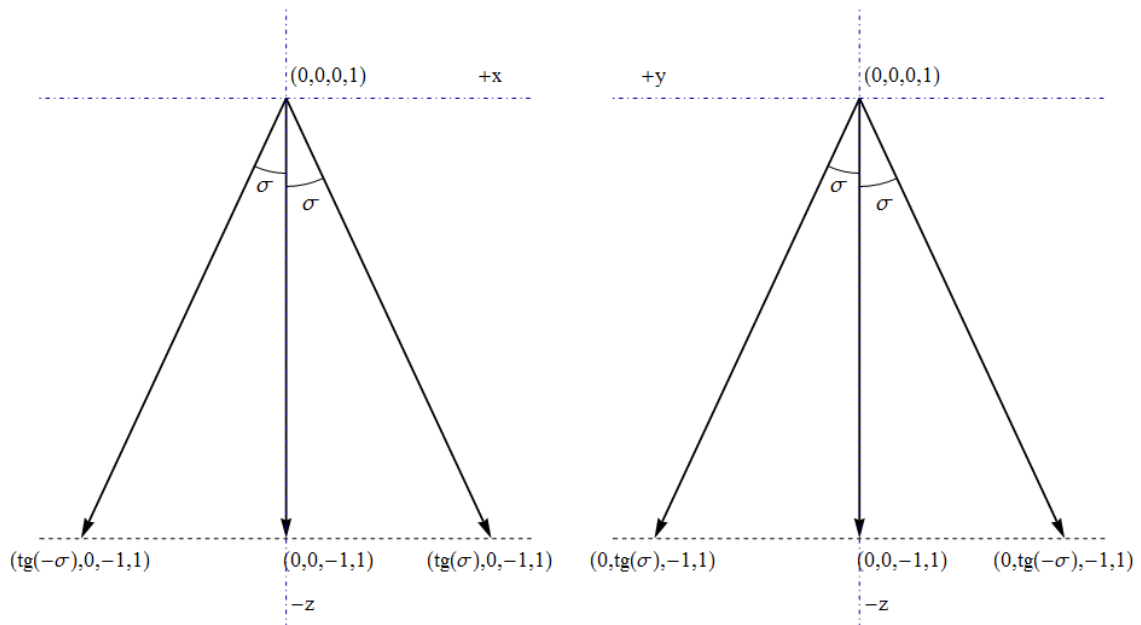
Tento model světelného zdroje, který osvětluje rovinu ψ , kterou lze naklánět v osách x a y, přibližovat či oddalovat, je znázorněn na obrázku (Obr. 5).



Obr. 5 Model osvětlení roviny ψ

3.6 Model světelného zdroje založený na průsečíku přímky a roviny

Pro model světelného zdroje, který je založen na průsečíku přímky a roviny, využíváme vlastnosti, že laserové paprsky se rozbíhají z jednoho bodu pod stejným úhlem do kladné a záporné poloosy x a y a mezi nimi je umístěn středový paprsek. Pro úhel σ , ve kterém se krajní paprsky rozbíhají od středového paprsku, si nadefinujeme vektory, které odpovídají našemu modelu světelného zdroje. Vektory získáme pomocí rozdílu dvou bodů, vyjádřených homogenními souřadnicemi. První bod umístíme do počátku souřadnicového systému $[0,0,0,1]$. Druhý bod vždy dle odpovídajících poloos na souřadnice $[x, y, -1, 1]$, kde je vždy jedna ze souřadnic x, y rovna nule. Všechny body mají souřadnici v ose z rovnu minus jedné, to kvůli směru, do kterého je zdroj světla natočen. Určili jsme si souřadnici v ose z a známe také úhel σ , pod kterým se paprsky rozbíhají, takže lehce spočítáme v pravouhlém trojúhelníku chybějící souřadnice v osách x a y . Popsanou situaci vidíme na obrázku (Obr. 6).



Obr. 6 Vektory světelného zdroje

Pro vektory šíření paprsků získáváme souřadnice ze vztahu (25).

$$\begin{aligned}
 v_A &= (tg(\sigma), 0, -1, 0) \\
 v_B &= (tg(-\sigma), 0, -1, 0) \\
 v_C &= (0, tg(\sigma), -1, 0) \\
 v_D &= (0, tg(-\sigma), -1, 0) \\
 v_S &= (0, 0, -1, 0)
 \end{aligned} \tag{25}$$

Máme tedy počáteční bod a směrové vektory šíření paprsků. Teď dříve než budeme hledat průsečík přímek paprsků a roviny ψ , musíme, jak počáteční bod, tak vektory transformovat. Kdybychom nejprve hledali průsečíky paprsků s rovinou ψ , pozdější transformace by způsobila, že by se průsečíky nenacházely na rovině ψ . Transformaci provedeme maticí $L(s, \theta_i)$, která je definována výše ve vztahu (23). Jelikož nejdříve provádíme rotaci a až pak translaci, na počáteční bod paprsků, umístěný zatím v počátku souřadného systému, nebude mít rotace žádný vliv a pouze se posune na svou novou pozici. Vektory laserových paprsků se naopak jenom potočí v jednotlivých osách. Protože využíváme homogenních souřadnic, nebude mít translace na vektory žádný vliv. Počáteční bod paprsků jsme v prvním modelu světelného zdroje označili V , toto značení tedy zachováme i v tomto modelu. Transformační vztahy jsou zapsány ve vztahu (26).

$$\begin{aligned}
 V &= L \cdot [0,0,0,1] \\
 v'_A &= L \cdot v_A \\
 v'_B &= L \cdot v_B \\
 v'_C &= L \cdot v_C \\
 v'_D &= L \cdot v_D \\
 v'_S &= L \cdot v_S
 \end{aligned} \tag{26}$$

Z předchozího textu vyplývá, že na bod V bychom mohli použít pouze translaci a vektory jen rotovat, což je zapsáno vztahem (27). Tato varianta je výpočetně méně náročná, protože můžeme bez jakékoli operace určit souřadnice bodu V z vektoru s a při výpočtu matice transformace pro světelný zdroj nemusíme násobit čtyři matice, ale jenom tři matice pro rotaci světelného zdroje.

$$\begin{aligned}
 V &= s + [0,0,0,1] = [s_x, s_y, s_z, 1] \\
 v'_A &= R_z(\theta_{zl}) \cdot R_y(\theta_{yl}) \cdot R_x(\theta_{xl}) \cdot v_A \\
 v'_B &= R_z(\theta_{zl}) \cdot R_y(\theta_{yl}) \cdot R_x(\theta_{xl}) \cdot v_B \\
 v'_C &= R_z(\theta_{zl}) \cdot R_y(\theta_{yl}) \cdot R_x(\theta_{xl}) \cdot v_C \\
 v'_D &= R_z(\theta_{zl}) \cdot R_y(\theta_{yl}) \cdot R_x(\theta_{xl}) \cdot v_D \\
 v'_S &= R_z(\theta_{zl}) \cdot R_y(\theta_{yl}) \cdot R_x(\theta_{xl}) \cdot v_S
 \end{aligned} \tag{27}$$

Dříve než se pustíme do hledání průsečíků, musíme určit obecnou rovnici roviny ψ . Pro určení obecné rovnice roviny je třeba bod, který na rovině leží a normálový vektor. Jelikož jsme v tomto modelu umístili rovinu tak, aby na ní ležel počáteční bod souřadného systému a aby ležela kolmo k ose z , vezmeme jako bod roviny bod $[0,0,0]$ a vektor kolmý k rovině např., vektor $(0,0,1)$. Po dosazení vektoru a bodu do obecné rovnice roviny určíme hodnotu poslední neznámé d . Dosazení je provedeno ve vztahu (28).

$$0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + d = 0 \tag{28}$$

Rovnici roviny ψ zapíšeme, jak je uvedeno ve vztahu (29).

$$0 \cdot x + 0 \cdot y + 1 \cdot z + 0 = 0 \tag{29}$$

Nyní můžeme hledat průsečíky přímek, s počátečním bodem V a směrovými vektory $v'_A, v'_B, v'_C, v'_D, v'_S$, s rovinou ψ . Podle obecné rovnice roviny je jasné, že průsečíky musí

mít souřadnici v ose z nulovou, jako všechny body ležící na rovině ψ . Tyto nalezneme, jak je popsáno v kapitole 1.8. Výpočet jednoho průsečíku je proveden ve vztahu (30).

$$\begin{aligned}
 1 \cdot \left(V_z + t \cdot v_{Az} \right) &= 0 \\
 t_A &= -\frac{V_z}{v_{Az}} \\
 x_A &= V_x + t_A \cdot v_{Ax} \\
 y_A &= V_y + t_A \cdot v_{Ay} \\
 z_A &= V_z + t_A \cdot v_{Az} \\
 A &= [x_A, y_A, z_A]
 \end{aligned} \tag{30}$$

Každý z paprsků má svůj vektor šíření a pro získání průsečíku, tak musí mít i svůj vlastní parametr pro nalezení průsečíku s rovinou ψ .

Nalezením všech průsečíků se dostáváme do stejné fáze řešení, jako u prvního modelu světelného zdroje. Rozdílem mezi oběma světelnými modely je, že pro dosažení stejné vizuální situace je nutné volit jiné transformační parametry, kvůli přemístění počátku souřadného systému.

3.7 Transformace v modelu

Pro model jsme určili, že pořadí transformací bude následující. Nejprve rotujeme kolem osy x pak y a z, nakonec scénu posunujeme. Pro inverzní transformaci je pořadí opačné. Jelikož model dírkové kamery počítá s umístěním dírky kamery v počátku souřadného systému a nerotovanou kamerou, je nutné scénu do této pozice transformovat. Tuto operaci provedeme za pomoci inverzní matice transformace kamery, kterou vynásobíme všechny body vysvícené na rovinu ψ , jak je uvedeno ve vztahu (31)

$$\begin{aligned}
 Ap &= M^{-1} \cdot A \\
 Bp &= M^{-1} \cdot B \\
 Cp &= M^{-1} \cdot C \\
 Dp &= M^{-1} \cdot D \\
 Sp &= M^{-1} \cdot S
 \end{aligned} \tag{31}$$

Dále provedeme projekci bodů na obrazovou rovinu kamery ϕ (32). Při projekci ztrácíme souřadnice v ose z. Získáváme body v rovině, jejichž souřadnice můžeme vyčíst na obrázcích z kamery.

$$\begin{aligned}
Ap' &= \left[-f \frac{Ap_x}{Ap_z}, -f \frac{Ap_y}{Ap_z} \right] \\
Bp' &= \left[-f \frac{Bp_x}{Bp_z}, -f \frac{Bp_y}{Bp_z} \right] \\
Cp' &= \left[-f \frac{Cp_x}{Cp_z}, -f \frac{Cp_y}{Cp_z} \right] \\
Dp' &= \left[-f \frac{Dp_x}{Dp_z}, -f \frac{Dp_y}{Dp_z} \right] \\
Sp' &= \left[-f \frac{Sp_x}{Sp_z}, -f \frac{Sp_y}{Sp_z} \right]
\end{aligned} \tag{32}$$

Informaci o velikosti souřadnic bodů v ose z potřebujeme pro zobrazení celého uvažovaného modelu, proto ji určíme jako ohniskovou vzdálenost dírkové kamery orientovanou v souřadném systému, jak je zapsáno vztahem (33).

$$\begin{aligned}
A' &= \left[-f \frac{Ap_x}{Ap_z}, -f \frac{Ap_y}{Ap_z}, -f, 1 \right] \\
B' &= \left[-f \frac{Bp_x}{Bp_z}, -f \frac{Bp_y}{Bp_z}, -f, 1 \right] \\
C' &= \left[-f \frac{Cp_x}{Cp_z}, -f \frac{Cp_y}{Cp_z}, -f, 1 \right] \\
D' &= \left[-f \frac{Dp_x}{Dp_z}, -f \frac{Dp_y}{Dp_z}, -f, 1 \right] \\
S' &= \left[-f \frac{Sp_x}{Sp_z}, -f \frac{Sp_y}{Sp_z}, -f, 1 \right]
\end{aligned} \tag{33}$$

Následně musíme body v kameře transformovat do skutečné polohy kamery, tentokrátě přímou transformací kamery, která je provedena ve vztahu (34).

$$\begin{aligned}
A_{phi} &= M \cdot A \\
B_{phi} &= M \cdot B \\
C_{phi} &= M \cdot C \\
D_{phi} &= M \cdot C \\
S_{phi} &= M \cdot S
\end{aligned} \tag{34}$$

3.8 Další body v modelu

Pro zobrazení celého modelu, rovin ψ a φ a vyznačení pozice dírký kamery, potřebujeme nalézt souřadnice dalších devíti bodů. Po čtyřech pro každou rovinu a jeden pro dírký kamery.

Začneme těmi jednoduššími, a to dírkou kamery a její rovinou. Určíme je tak, že si vykreslíme model kamery s dírkou v počátku. Body označíme, jako *Lens* pro dírký kamery a *Phi1*, *Phi2*, *Phi3*, *Phi4* pro rohy pravoúhlého čtyřúhelníku, kterým naznačíme obrazovou rovinu φ dírkové kamery. Polovinu velikosti šířky a výšky plochy nahradíme konstantami $a, b \in \mathfrak{R}$, kde $a > 0, b > 0$, protože při využití reálné kamery se rozměry čipu u každého modelu mohou lišit. Souřadnice bodů pro vykreslení modelu kamery jsou zapsány ve vztahu (35).

$$\begin{aligned}
 \textit{Lens} &= [0,0,0,1] \\
 \textit{Phi1} &= [a,b,-f,1] \\
 \textit{Phi2} &= [a,-b,-f,1] \\
 \textit{Phi3} &= [-a,b,-f,1] \\
 \textit{Phi4} &= [-a,-b,-f,1]
 \end{aligned}
 \tag{35}$$

Všechny body ze vztahu (35) dále transformujeme pomocí přímé matice transformace kamery M do pozice kamery. Operace je zaznamenána vztahem (36).

$$\begin{aligned}
 \textit{Lens}' &= M \cdot \textit{Lens} \\
 \textit{Phi1}' &= M \cdot \textit{Phi1} \\
 \textit{Phi2}' &= M \cdot \textit{Phi2} \\
 \textit{Phi3}' &= M \cdot \textit{Phi3} \\
 \textit{Phi4}' &= M \cdot \textit{Phi4}
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

Další čtyři body, značme je *Psi1*, *Psi2*, *Psi3*, *Psi4*, musíme získat pro zobrazení roviny ψ . Pro model založený na průsečících s rovinou světelného zdroje je situace jednoduchá za souřadnice v osách x a y dosadíme konstantu $c \in \mathfrak{R}$ o velikosti poloviční šířky žádané pro rovinu ψ a za souřadnici v ose z dosadíme nulu. Souřadnice jsou určeny vztahem (37).

$$\begin{aligned}
 \textit{Psi1} &= [c,c,0,1] \\
 \textit{Psi2} &= [c,-c,0,1] \\
 \textit{Psi3} &= [-c,c,0,1] \\
 \textit{Psi4} &= [-c,-c,0,1]
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

U modelu světelného zdroje založeného na vztazích v trojúhelníku je situace poněkud složitější. Musíme získat rovnici roviny ψ , a pak navrhnout souřadnice x, y pro body na zobrazení roviny. Z těchto souřadnic a rovnice roviny lze pak vypočítat souřadnice bodů v ose z .

Začneme tedy získáním obecné rovnice roviny. Pro tento účel využijeme bodů A, B, C . Nejdříve spočítáme dva směrové vektory roviny, pak vektorovým součinem získáme vektor n , kolmý k těmto dvěma směrovým vektorům. Dosazením jednoho z bodů a normálového vektoru do obecné rovnice roviny získáme rovnici, ze které dopočítáme konstantu d . Následně můžeme zapsat obecnou rovnici roviny. Celý postup je zapsán vztahem (38).

$$\begin{aligned} AB &= B - A \\ AC &= C - A \\ n &= AB \times AC \\ d &= -(n_x A_x + n_y A_y + n_z A_z) \\ n_x x + n_y y + n_z z + d &= 0 \end{aligned} \quad (38)$$

Vzorec pro získání souřadnice z je zachycen vztahem (39).

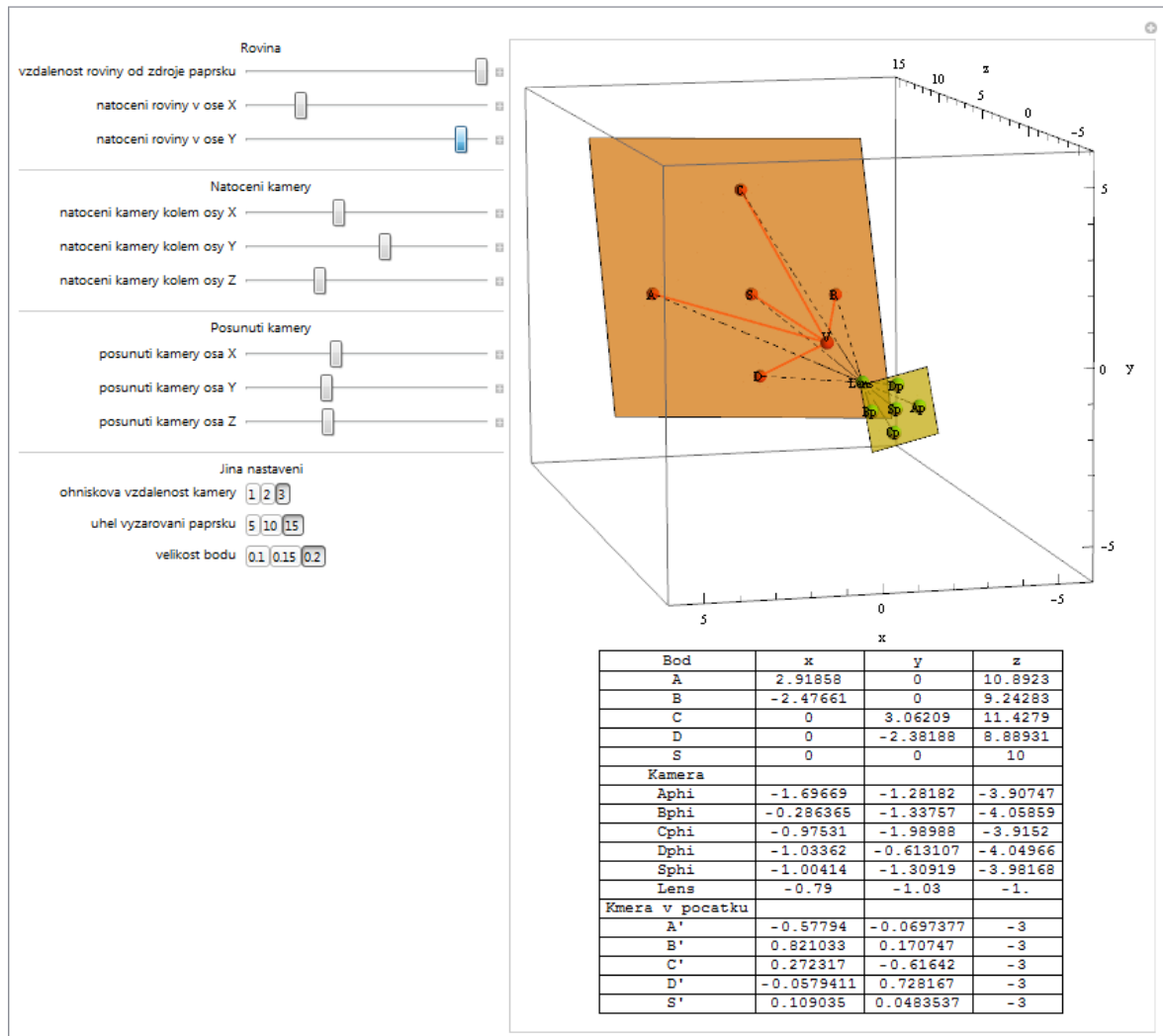
$$z = -\frac{n_x x + n_y y + d}{n_z} \quad (39)$$

Aby byla rovina zobrazena v dostatečném rozsahu, bereme pro souřadnice x, y , jejich krajních zobrazovacích bodů, k násobek odpovídajících souřadnic bodů, které na ní mají být zobrazeny, což jsou body A, B, C, D, S . Souřadnice bodů roviny ψ v osách x a y jsou zachyceny vztahem (40).

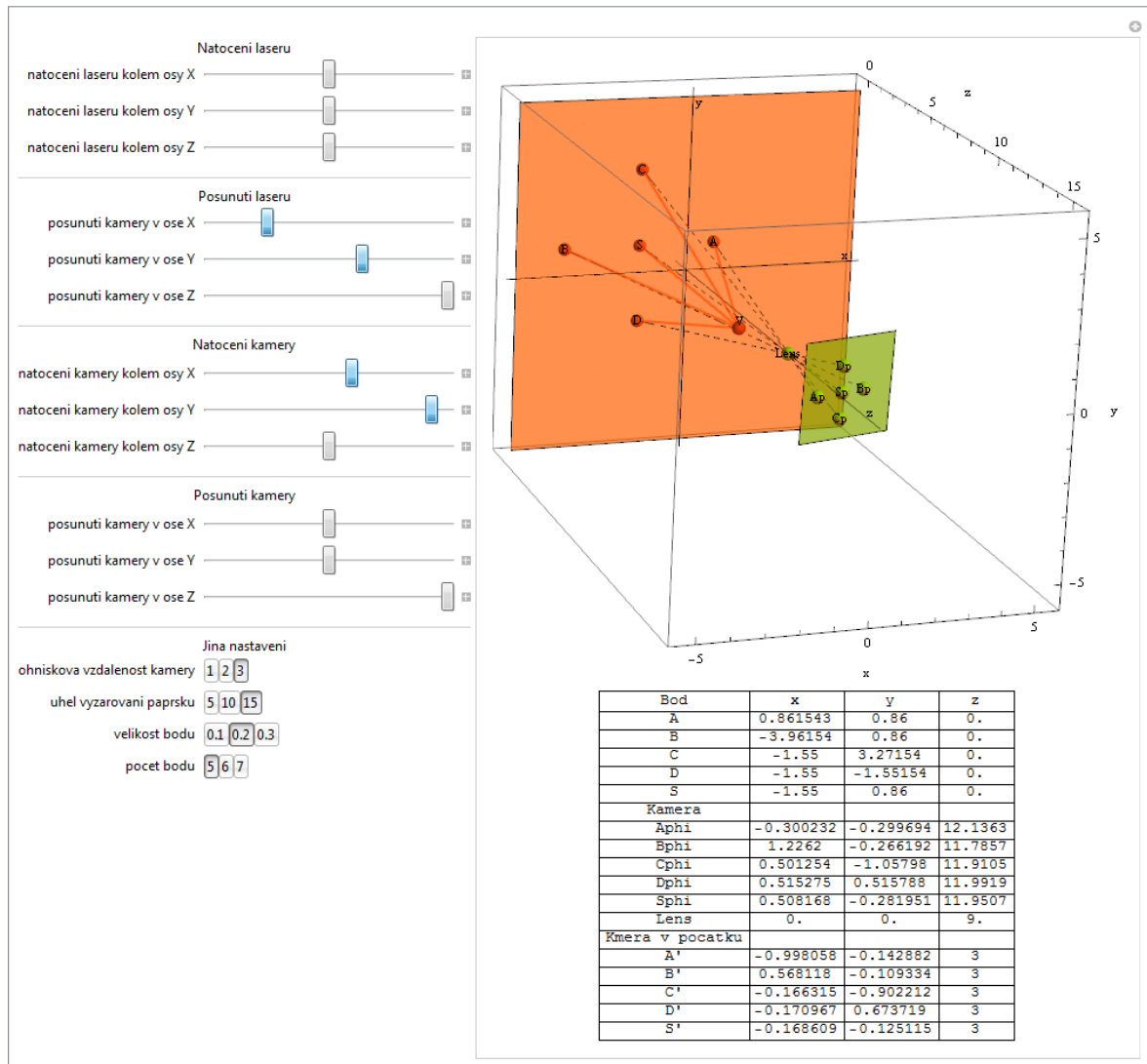
$$\begin{aligned} Psi1 &= [kA_x, kC_y, Psi1_z, 1] \\ Psi2 &= [kA_x, kD_y, Psi2_z, 1] \\ Psi3 &= [kB_x, kC_y, Psi3_z, 1] \\ Psi4 &= [kB_x, kD_y, Psi4_z, 1] \end{aligned} \quad (40)$$

3.9 Zobrazení modelu

Pro zobrazení modelu jsme použili program Mathematica, konkrétně funkce Graphics3D. Zobrazení souřadnic bodů v modelu je zajištěno funkcí Grid a nastavování parametrů modelu je umožněno funkcí Manipulate. Vyobrazení modelu je pak zachyceno na obrázcích (Obr. 7) a (Obr. 8).



Obr. 7 Zobrazení scény s modelem světelného zdroje, založeném na vztazích v trojúhelníku



Obr. 8 Zobrazení scény s modelem světelného zdroje, založeném na průsečících

4 HLEDÁNÍ PARAMETRŮ MODELU

Po zkonstruování modelu se teď zaměříme na řešení sestaveného modelu situace. Navržený model nám umožňuje různé polohování svých jednotlivých částí. Parametry modelu, kterými tyto polohy navozujeme, bereme jako neznámé parametry, které bychom rádi s jeho pomocí získali. Jsou to tyto parametry:

- vektor s ,
- úhly $\theta_{xl}, \theta_{yl}, \theta_{zl}$,
- vektor t
- úhly $\theta_x, \theta_y, \theta_z$.

Při získávání parametrů modelu počítáme s tím, že známe úhel σ , pod kterým se paprsky světelného zdroje rozbíhají. Dále považujeme za známou ohniskovou vzdálenost kamery f . Pro řešení modelu počítáme s využitím polohy bodů naměřených v kameře.

4.1 Řešení goniometrických rovnic

Protože model situace využívá ve své konstrukci goniometrických funkcí úhlových parametrů a vzhledem ke složitosti rovnic, v nichž jsou parametry obsaženy, Mathematica nedokázala nalézt analytické řešení problému, k čemuž jsme zkusili využít funkce Solve. Rozhodli jsme se tedy pro numerické řešení rovnic modelu. Využili jsme funkce NMinimize, která hledá minimum funkce a umožňuje také zadat omezující podmínky pro prostor, na kterém se minimum funkce má nalézt. Funkce NMinimize má k dispozici řadu numerických metod. Konkrétně umí využívat Nelder-Meadovy metody, Diferenciální evoluci, Simulované žihání a Slepý algoritmus.[11] Dále jsme použili také evolučních výpočetních technik SOMA a Diferenciální evoluce, které jsou k dispozici na webových stránkách pana profesora Ivana Zelinky.[12]

4.2 Minimalizační funkce

Protože evoluční výpočetní techniky se snaží nalézt extrém funkce, abychom mohli těchto technik využít, musíme takovouto funkci nadefinovat. Efektivním řešením je pro definici funkce využít vzdálenosti bodů, jejichž souřadnice vyčteme z nasnímaných snímků

kamery, budeme je značit Ac, Bc, Cc, Dc, Sc , a bodů, které po dosazení parametrů získáme z modelu situace, jako body kamery v počátku souřadného systému Ap', Bp', Cp', Dp', Sp' , jež jsou určeny vztahem (32). Funkci určenou pro minimalizaci zapíšeme vztahem (41).

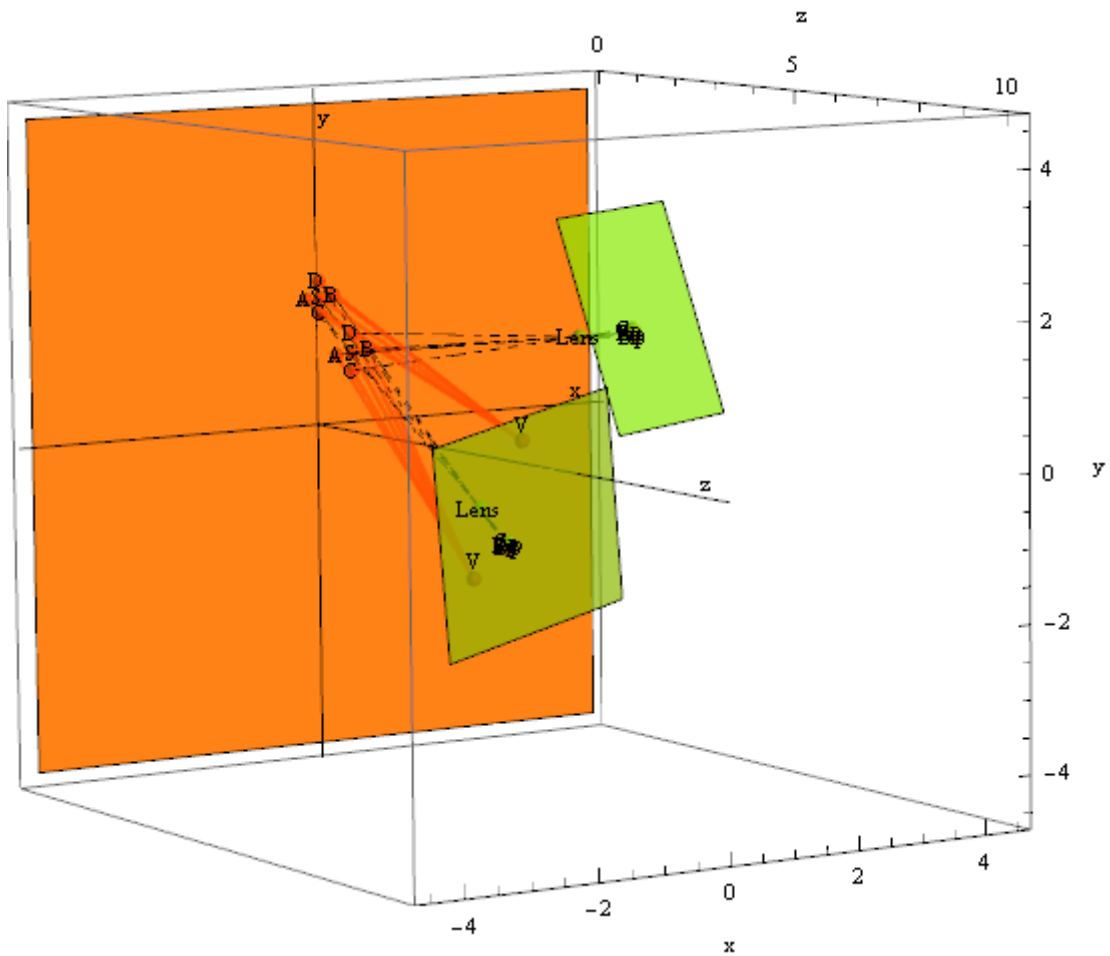
$$\begin{aligned} fMin = & |Ac_x - Ap'_x| + |Ac_y - Ap'_y| + |Bc_x - Bp'_x| + |Bc_y - Bp'_y| + \\ & + |Cc_x - Cp'_x| + |Cc_y - Cp'_y| + |Dc_x - Dp'_x| + |Dc_y - Dp'_y| + \\ & + |Sc_x - Sp'_x| + |Sc_y - Sp'_y| \end{aligned} \quad (41)$$

Pro definici vzdálenosti bodů mezi sebou je používána Součtová metrika a vzdálenosti dvojic bodů jsou pak sečteny.

4.3 Výsledky hledání parametrů

Pro nalezení parametrů numerickými výpočetními technikami musíme zvláště pro úhly omezit rozsah, na kterém je úhel hledán. Jinak by se mohlo stát, že by nalezená řešení mohla, vzhledem k využitým goniometrickým funkcím s jejich periodickými vlastnostmi, být nalézána mimo požadovaný interval $\langle -\pi, \pi \rangle$. Pro hledání parametrů jsme určili intervaly, pro úhly $\langle -\frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{12} \rangle$ a pro posunutí v ose x a y $\langle -3, 3 \rangle$ a v ose z $\langle 3, 9 \rangle$.

Model vykazoval pro hledání všech dvanácti parametrů polohování svých částí nejednoznačnost výsledků. Z toho jsme učinili závěr, že pro sadu souřadnic naměřených bodů z kamery je možno nalézt více sad parametrů modelu, které jim odpovídají. Jedno z takových řešení je zachyceno na obrázku (Obr. 9).



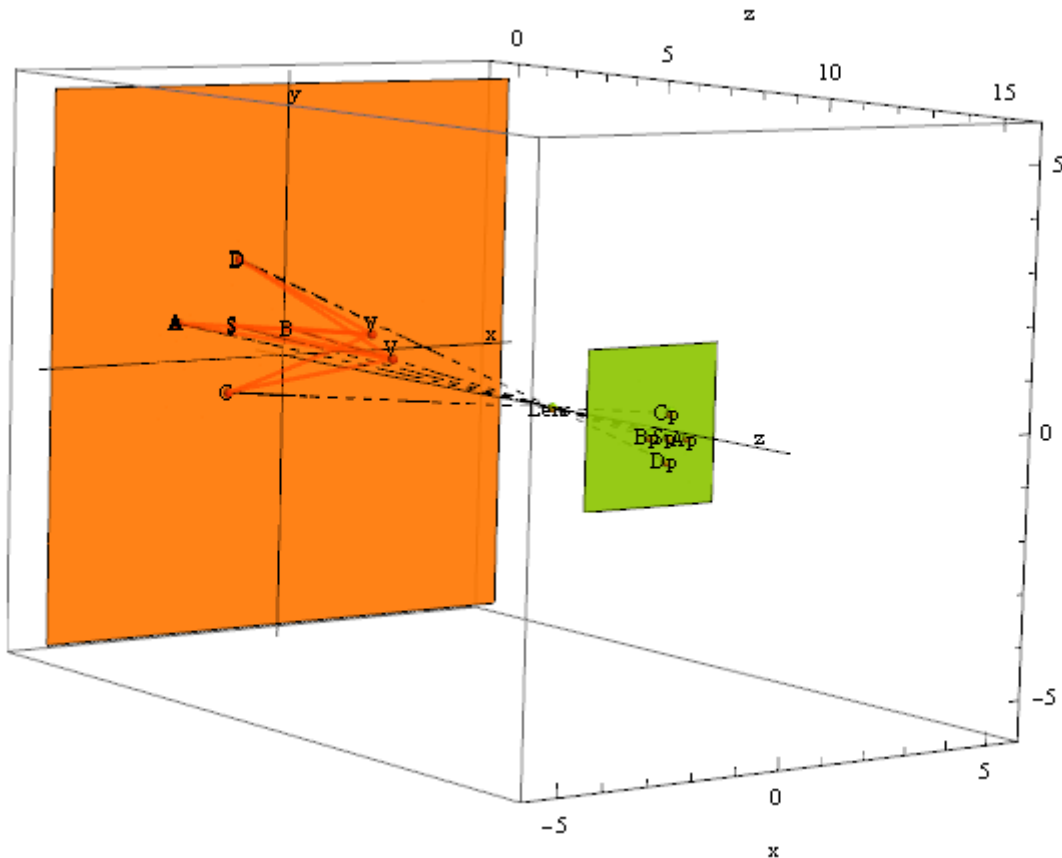
Obr. 9 Nejednoznačné řešení modelu

Parametry modelu zachyceného na obrázku (Obr. 9) je možno vyčíst na obrázku (Obr. 10).

txl	-1.34927	tx	1.3728	txl	-0.465386	tx	-0.926772
tyl	-1.33523	ty	1.54709	tyl	0.413131	ty	-0.493015
tzl	6.41463	tz	4.73637	tzl	6.22624	tz	5.88974
éxl	0.335695	éx	-0.312974	éxl	0.210762	éx	0.158915
éyl	-0.287865	éy	0.512264	éyl	-0.0959397	éy	0.12903
ézl	-0.00900275	éz	-0.00301631	ézl	0.0598578	éz	0.193675
Bod	x	y	z	Bod	x	y	z
A	0.315507	0.958709	-8.88178×10^{-16}	A	-0.170291	1.76681	8.88178×10^{-16}
B	0.8321	1.00519	0.	B	0.27717	1.80285	8.88178×10^{-16}
C	0.568644	0.722804	0.	C	0.0662342	1.55844	8.88178×10^{-16}
D	0.573364	1.24697	8.88178×10^{-16}	D	0.0389027	2.0145	0.
S	0.570975	0.981694	-8.88178×10^{-16}	S	0.0526705	1.78477	0.
Kamera				Kamera			
Aphi	1.60253	1.67494	5.76552	Aphi	-1.05401	-0.873106	6.88036
Bphi	1.49719	1.67177	5.82605	Bphi	-1.1315	-0.883415	6.89126
Cphi	1.54929	1.72801	5.77591	Cphi	-1.09561	-0.841811	6.89113
Dphi	1.55476	1.61541	5.81444	Dphi	-1.08919	-0.914769	6.88037
Sphi	1.55194	1.67342	5.79459	Sphi	-1.09241	-0.878215	6.88576
Lens	1.3728	1.54709	4.73637	Lens	-0.926772	-0.493015	5.88974
Kmera v pocatku				Kmera v pocatku			
A'	-0.304531	-0.188506	1	A'	-0.323832	-0.192677	1
B'	-0.426007	-0.192176	1	B'	-0.402609	-0.187817	1
C'	-0.356167	-0.132899	1	C'	-0.359726	-0.153466	1
D'	-0.369992	-0.251233	1	D'	-0.366027	-0.227224	1
S'	-0.36287	-0.190269	1	S'	-0.36287	-0.190269	1

Obr. 10 Parametry a souřadnice bodů modelu

Abychom mohli získat řešení modelu, je tedy nutné, získat další informace, které by model pomohly vyřešit. Druhou možností je získat pozici kamery či zdroje záření, zafixovat ji a dále hledat pouze pozici jedné části modelu. My pro další řešení budeme počítat s neměnnou pozicí kamery, což nám umožní získávat pozici zdroje světla, jak lze vidět na obrázku (Obr. 11).



Obr. 11 Řešení modelu s nepohyblivou kamerou

Z obrázku řešení modelu je vidět, že nejsme schopni nalézt parametry, určující pozici zdroje světla přesně. Mezi pozicí, ve které je umístěn zdroj světla, a pozicí zdroje světla, získanou z modelu výpočtem, je vzdálenost charakterizující přesnost řešení. Tuto použijeme pro hodnocení kvality technik, které budeme testovat na vhodnost řešení naší situace.

4.4 Porovnání metod získávání parametrů pro laser

Za účelem nalezení vhodného algoritmu pro řešení modelu jsme otestovali metody, které jsme měli k dispozici. V nastavení funkce NMinimize, můžeme ovlivňovat sedm parametrů. Tyto jsou popsány na webových stránkách [11]. Určili jsme tedy nastavení

funkce a zvolili metodu, kterou má funkce využít a nechali ji pracovat. Nastavili jsme parametry AccuracyGoal na hodnotu 20 a PrecisionGoal na hodnotu 19. Zbylá nastavení jsme ponechali na základních hodnotách.

Pro algoritmus SOMA jsme zvolili hodnoty parametrů z tabulky (Tab. 1).

Tab. 1 Nastavení parametrů algoritmu SOMA

PopSize	Migrations	Step	PathLength	PRT	MinDiv
7	30	0.17	4	0.17	-1

Jednotlivé parametry algoritmu jsou popsány v knize [10]. Nastavení pro Diferenciální evoluci pana profesora Zelinky je zapsáno v tabulce (Tab. 2) a je popsáno v téže knize jako předchozí nastavení.

Tab. 2 Nastavení parametrů algoritmu Diferenciální evoluce

NP	Generations	F	Cr
30	60	0.8	0.2

Algoritmy jsme testovali na stovce předem spočítaných sad souřadnic z kamery. Zaznamenávali jsme kvalitu nalezeného řešení, jeho průměrnou hodnotu, minimální a maximální hodnotu, rozptyl řešení. Zaznamenávali jsme taktéž čas, který algoritmy pro nalezení výsledků spotřebovaly. Výsledky měření můžeme vidět na obrázku (Obr. 12). Pro hodnocení kvality řešení jsme využili euklidovské vzdálenosti mezi bodem, ve kterém je zdroj světelného záření a bodem, do kterého jej určilo řešení modelu.

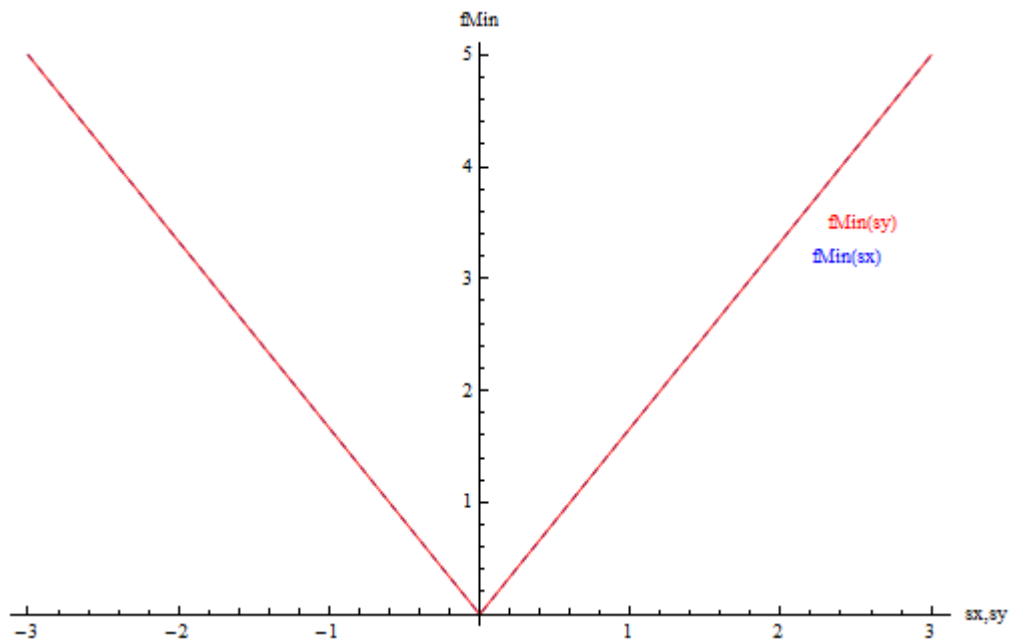
Metoda	Minimální vzdálenost	Maximální vzdálenost	Průměrná vzdálenost	Rozptyl vzdálenosti	Čas nalezení parametru
NelderMead	0.0350437	2.87872	0.914579	0.337976	171.164
DifferentialEvolution	0.0252317	1.17755	0.431157	0.0770776	488.611
SimulatedAnnealing	0.0000167262	2.76162	0.927091	0.400683	162.927
RandomSearch	2.01366×10^{-7}	0.195534	0.00406613	0.000747659	1128.54
SOMA	0.0300539	1.65268	0.496864	0.134617	505.6
Differential evolution - Zelinka	0.108931	2.7879	0.891639	0.261128	183.332

Obr. 12 Výsledky měření kvality a rychlosti řešení

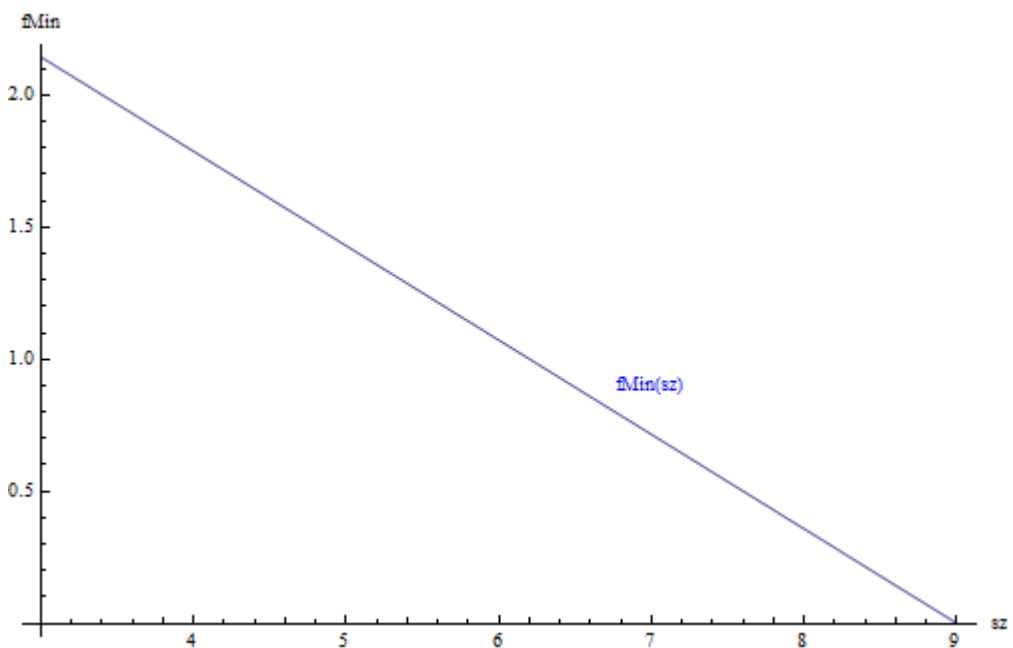
4.5 Průzkum citlivosti na změnu parametrů

Při předešlém získávání řešení modelu jsme zjistili, že parametry modelu je třeba najít co možná nejpřesněji. Abychom zjistili citlivost řešení modelu na vychýlení parametrů, podrobili jsme model následující analýze. U modelu určíme jeho parametry hodnot $s = t = (0,0,9)$, $\theta_{xl} = \theta_{yl} = \theta_{zl} = 0$ a $\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$. Z modelu tak získáme souřadnice

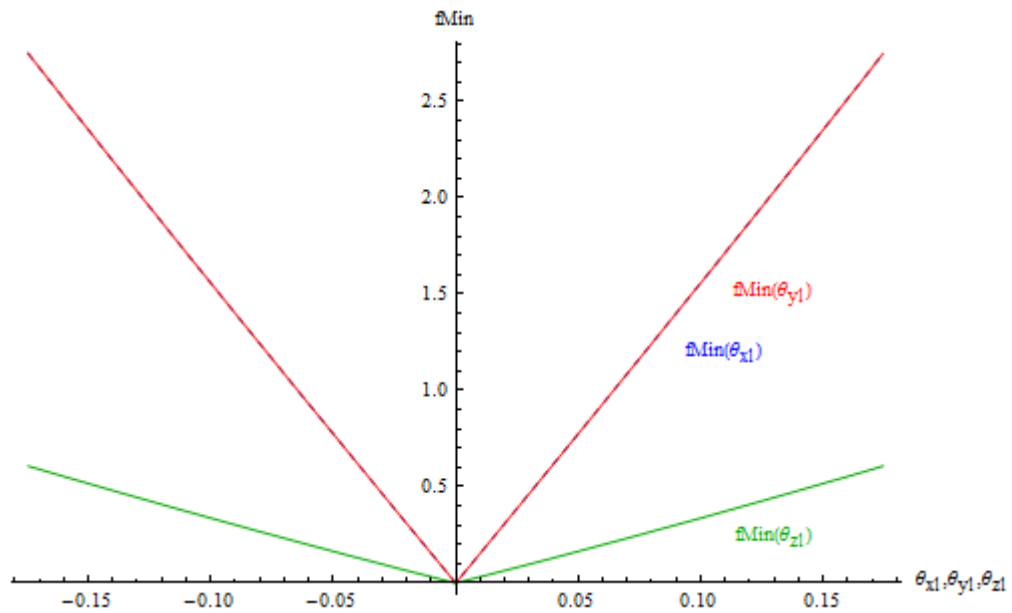
bodů z kamery, následně vypočítáváme hodnoty funkce $fMin$ pro stejné parametry modelu, ale vždy s jedním proměnným parametrem, ovlivňujícím pozici zdroje světla. Hodnotu funkce určíme pro rozsah hledání parametru při řešení modelu. Výsledky pak zaznamenáváme do grafů, které si můžeme prohlédnout na obrázcích (Obr. 13), (Obr. 14) a (Obr. 15).



Obr. 13 Graf citlivosti modelu na parametry s_x, s_y



Obr. 14 Graf citlivosti modelu na parametr s_z



Obr. 15 Graf citlivosti modelu na parametry $\theta_{xl}, \theta_{y1}, \theta_{zl}$

Z grafů je zjevné, že s odchylkou jednoho parametru od ideální pozice hodnota funkce lineárně roste. Také lze pozorovat, že závislost funkce na parametrech ovlivňujících pozici v osách x a y je několikrát větší než u odpovídajícího parametru v ose z. Vidíme, že parametr natočení laseru v ose x ovlivňují minimalizovanou funkci stejnou měrou, jako parametr natočení v ose y a stejně je tomu také s parametry posunutí v osách x a y. Nejvíce je hodnota funkce ovlivněna parametry natočení laseru kolem os x a y.

ZÁVĚR

Pro situaci, kterou jsme popsali v úvodu, se nám podařilo v této práci nalézt model. K tomuto úkolu jsme definovali soustavu souřadnic. Pro snímání jsme použili model dírkové kamery. Rovinu osvětlenou světelným zdrojem jsme popsali obecnou rovnicí a pro světelný zdroj jsme navrhli dva jeho možné popisy, a to model světelného zdroje vycházející ze vztahů v trojúhelníku a druhý, sestavený na základě průsečíků přímek paprsků a roviny ψ , jež je před zdroj umístěna. Části modelu se nám podařilo pomocí transformací a popisu modelů umístit v prostoru. Transformace jsme prováděli maticí translace a maticemi rotací kolem os pravoúhlého souřadného systému. Model situace se nám pak podařilo zobrazit pomocí softwaru Mathematica a s využitím funkce Manipulate se nám povedlo zobrazený model rozpohybovat. Funkce Graphics3D nám model umožňuje natáčet a prohlížet z nejrůznějších úhlů.

Dále jsme se snažili prozkoumat řešení situace. Pro řešení jsme počítali s tím, že pro něj máme k dispozici dvourozměrné souřadnice bodů A, B, C, D, S vyčtené z kamery, ohniskovou vzdálenost f dírkové kamery a úhel σ , pod kterým se paprsky světelného zdroje rozbíhají od středového paprsku. Pomocí modelu jsme získali několik sad souřadnic z kamery a pro tyto vstupní informace se snažili nalézt výchozí parametry modelu, kterými jsme je získali. K tomuto jsme použili funkce NMinimize, která minimalizovala funkci součtu vzdáleností součtové metriky mezi danými body z předchozího výpočtu a body získanými z modelu pro dosazované parametry. Takto získaná řešení pro model se světelným zdrojem, založeném na průsečících přímek paprsků a roviny ψ vykazovala nejednoznačnost. To znamená, že pro zadané souřadnice bodů model není schopen získat stejných dvanáct parametrů, jako bylo nastaveno a je nutné pro model získat další vstupní informace. Rozhodli jsme se tedy zafixovat pozici kamery vůči rovině, čímž jsme omezili počet hledaných vstupních parametrů na šest. Byl to vektor posunutí světelného zdroje s a úhly jeho natočení $\theta_{xl}, \theta_{yl}, \theta_{zl}$. I po omezení počtu hledaných parametrů byla nalezená řešení často dosti odlišná. Jako příčinu tohoto jevu jsme uvedli nepřesné nalezení souřadnic bodů v kameře. Toto bylo důvodem pro hledání takového nastavení funkce NMinimize, aby hodnota minimalizované funkce byla co nejbližší nule, a také pro vyzkoušení algoritmu SOMA a Differential evolution získaných z webových stránek UTB, které jsou pojaty jako oficiální webové stránky evoluční výpočetní techniky SOMA. Jak vyplývá

z tabulky na obrázku (*Obr. 12*), nejlépe z testovaných technik, vzhledem k přesnosti, dopadlo náhodné hledání, ovšem jeho časová náročnost byla velmi vysoká. Zajímavého výsledku dosáhla také diferenciální evoluce funkce NMinimize, která byla více jak dvakrát rychlejší. Algoritmy SOMA a diferenciální evoluce, získané od pana profesora Zelinky, se nám zřejmě nepovedlo ideálně pro náš model nastavit, a proto jejich výsledky nebyly výrazné. Nakonec jsme zjišťovali, na který z parametrů je minimalizovaná funkce nejcitlivější. Dozvěděli jsme se tak, že pro nastavené konstanty je model nejnáchylnější k nepřesnému nalezení úhlů θ_{xl}, θ_{yl} .

V práci se podařilo sestavit matematický model zadané situace zdroje světla, roviny a kamery. Tento model jsme zobrazili. Zjistili jsme, že vstupní data z kamery, ohnisková vzdálenost kamery a informace o dané struktuře světla nám nedovolí získat numericky všech dvanáct parametrů modelu, proto jsme omezili hledání parametrů modelu na ty, které ovlivňují pozici zdroje světla a počítali se známými parametry pro kameru. Zbýlých šest neznámých parametrů jsme již byli schopni dopočítat. V praxi by nám tento model mohl umožnit určit polohu a natočení tělesa, na němž by byl připevněn zdroj strukturovaného světla pomocí jedné kamery se známou polohou vůči osvětlené rovině.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

For the situation, which we tried to describe in Introduction, we could not find solution model. For this purpose we defined coordinate system. For recording of the camera we used pinhole camera. We described surface with the laser light with general equation. For describing laser light we used two different ways. Firstly laser light description using triangle relations and second based on point of intersection with surface ψ . We placed parts of the model by transformation and model description in space. Transformation was made by a matrix translation and by rotation of matrices around axes. Finally we used software Mathematica to visualize the model of the situation. We used function Manipulate to view it and function Graphics3D to rotate it in 3D space.

We tried to find solution of the situation. We used two-dimensional coordinates A, B, C, D, S obtained from camera to achieve that. We also used focal length f of pinhole camera and angle σ , which symbolize angle of divergence of laser light. Thanks to the model we obtained several coordinates from camera and for entering information we tried to obtain parameters of the model. To achieve that we used function NMinimize, which minimize sum function of distance of metrics between coordinates of later calculation and recent results from model. We faced ambiguity though. This mean, that for given coordinates model could not find twelve right parameters, which we set at the beginning. We had to get another information. We tried to fix position of the camera in face of surface. This way we limited number of desired parameters to six. These were shifting vector of light source s and its turning angles $\theta_{xl}, \theta_{yl}, \theta_{zl}$. Unfortunately even after limiting number of output founded solutions were very different from the right result. We specified as cause of this phenomenon inaccurate detection of coordinates in camera. Then we tried to find such setting of function Nminimize to get value of the function very close to zero. The reason was to try algorithm SOMA and Differential evolution, which we got from TBU web pages. These are official pages of algorithm SOMA. At the picture (*Obr. 12*) the best results were obtained from random search, from accuracy point of view. This method was most time consuming. Interesting values got differential evolution of the function NMinimize, that was more than twice faster. Algorithms SOMA a differential evolution from professor Zelinka did not get best results because we could not find the

right setting. At last we tried to find, on which parameter is our minimized function most sensitive. We found out, that these are the angles θ_{xl}, θ_{yl} .

In this thesis we made mathematical model of the situation of light source, surface and camera. We pictured this model and found out, that incoming data from camera, focal length and information about structure of the light could not determine obtaining all of the settings of the model. Than we limited searched parameters of the model only to those, which affect location of light source. We computed with known parameters. Than we could get the rest of the unknown parameters. In reality this model could help us to get coordinates and rotation of field with the light source on it with known position of light to the surface.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GAVENDA, Tomáš. Optoelektronické polohování nástroje vůči rovině ve více stupních volnosti s využitím v oblasti bezpečnostních technologií. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [2] FOLEY, James D., Andries VAN DAM, Steven K. FEINER a John F. HUGHES. *Computer Graphics: Principles and Practice*. Second edition in C. Cornell University: Addison-Wesley Professional, 1995, s. 201-225. ISBN 0-201-84840-6.
- [3] FORSYTH, David a Jean PONCE. *Computer vision: a modern approach*. London: Prentice Hall, c2003, 693 s. ISBN 01-308-5198-1.
- [4] ŽÁRA, Jiří, Bedřich BENEŠ, Jiří SOCHOR a Petr FELKEL. *Moderní počítačová grafika: kompletní průvodce metodami 2D a 3D grafiky*. druhé, přepracované a rozšířené vydání. Brno: Computer Press, 2004, 609 s. ISBN 80-251-0454-0.
- [5] HAVRLANT, Lukáš. Vektory. *Matematika polopatě* [online]. 2006-2011 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.matweb.cz/vektory>
- [6] KONČEL, Jan. *Analytická geometrie: Geometrie v prostoru* [online]. ©2009 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: http://www.karlin.mff.cuni.cz/katedry/kdm/diplomky/jan_koncel/prostor.php?kapitola=parametrickeVyjadreniPrimky
- [7] Analytická geometrie - Obecná rovnice roviny. VOJÁČEK, Jakub. *Matematika pro každého* [online]. 2008 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://maths.cz/clanky/analyticka-geometrie-obecna-rovnice-roviny.html>
- [8] KUTOVÁ, Lenka. *Úplné a kompaktní metrické prostory*. Brno, 2009. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/174691/prif_b/BP.pdf. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce prof. RNDr. Ondřej Došlý, DrCs.
- [9] MARTIŠEK, Dalibor. *Matematické principy grafických systémů*. 1. vyd. Brno: Littera Kovařík, 2002, s. 19. ISBN 80-85763-19-2.

- [10] ZELINKA, Ivan, Zuzana OPLATKOVÁ, Miloš ŠEDA, Pavel OŠMERA a František VČELAŘ. *Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace*. 1. české vyd. Praha: BEN, 2009, 534 s. ISBN 978-80-7300-218-3.
- [11] WOLFRAM RESEARCH. *Wolfram Mathematica 8: Documentation center* [online]. © 2012 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://reference.wolfram.com/mathematica/guide/Mathematica.html>
- [12] Source Codes. ZELINKA, Ivan a Josef VYBÍRAL. *SOMA Homepage* [online]. 2003, 03.08.2005 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.fai.utb.cz/people/zelinka/soma/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SOMA Self-Organizing Migrating Algorithm

TBU Tomas Bata University in Zlin

UTB Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Pravoúhlé souřadné systémy[2]</i>	11
<i>Obr. 2 Model dírkové kamery[3]</i>	12
<i>Obr. 3 Obecný cyklus evolučního algoritmu[10]</i>	20
<i>Obr. 4 Náklon roviny ψ</i>	24
<i>Obr. 5 Model osvětlení roviny ψ</i>	25
<i>Obr. 6 Vektory světelného zdroje</i>	26
<i>Obr. 7 Zobrazení scény s modelem světelného zdroje, založeném na vztazích v trojúhelníku</i>	32
<i>Obr. 8 Zobrazení scény s modelem světelného zdroje, založeném na průsečících</i>	33
<i>Obr. 9 Nejednoznačné řešení modelu</i>	36
<i>Obr. 10 Parametry a souřadnice bodů modelu</i>	36
<i>Obr. 11 Řešení modelu s nepohyblivou kamerou</i>	37
<i>Obr. 12 Výsledky měření kvality a rychlosti řešení</i>	38
<i>Obr. 13 Graf citlivosti modelu na parametry s_x, s_y</i>	39
<i>Obr. 14 Graf citlivosti modelu na parametr s_z</i>	39
<i>Obr. 15 Graf citlivosti modelu na parametry $\theta_{xl}, \theta_{yl}, \theta_{zl}$</i>	40

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Nastavení parametrů algoritmu SOMA</i>	38
<i>Tab. 2 Nastavení parametrů algoritmu Diferenciální evoluce</i>	38

SEZNAM PŘÍLOH

- P I DVD nosič s elektronickou verzí práce a zdrojovými kódy pro zobrazení a řešení modelu