

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY A MECHATRONIKY
Odbor mechaniky a mechatroniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
System pro zobrazování obrázců na plochu
prostřednictvím galvomechanismu

Praha, 2018

Jiří Braný



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Braný** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **457569**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Systém pro zobrazování obrazců na plochu prostřednictvím galvomechanismu

Název bakalářské práce anglicky:

A system for displaying shapes on 2D surface using galvomechanism

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši základních principů servomechanismu
2. Navrhněte simulační model galvomechanismu umožňující kontrolu nasměrování laserového paprsku
3. Realizujte laboratorní model galvomechanismu navrženého v bodě 2.
4. Proveďte testování modelu
5. Kriticky zhodnoťte dosažené výsledky

Seznam doporučené literatury:

- Valášek, M. a kol.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT, Praha 1996
- Femmam S., Control, Servo?mechanisms and System Regulation, Wiley, 2017

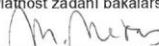
Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Martin Nečas, MSc., Ph.D., odbor mechaniky a mechatroniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **17.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:

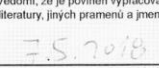

Ing. Martin Nečas, MSc., Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

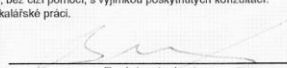

prof. Ing. Milan Ruzička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.


30.7.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze za odborného vedení vedoucího práce. Veškeré zdroje informací, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze, dne

Podpis:

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Martinu Nečasovi MSc. Ph.D. za odborné vedení práce, ochotu při poskytování rad i připomínek a vstřícnost během konzultací. Také bych chtěl poděkovat Bc. Ondřeji Pištorovi za rady, pomoc s programováním a při výrobě.

Anotační list

Jméno autora:	Jiří Braný
Název bakalářské práce:	Systém pro zobrazování obrazců na plochu prostřednictvím galvomechanismu
Anglický název:	A system for displaying shapes on 2D surface using galvomechanism
Akademický rok:	2017/2018
Obor studia:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav/odbor:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor mechaniky a mechatroniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Martin Nečas MSc. Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran: 54 počet obrázků: 54 počet příloh: 1CD
Klíčová slova:	projekce, projektor, galvo, galvoscaner, zobrazování
Keywords:	Projection, projector, galvo, galvoscaner, displaying
Anotace:	Cílem práce je vytvoření galvomechanismu s příslušným řešením geometrie systému a promítání na nakloněné promítací plochy bez deformací zobrazovaných obrazců.
Abstract:	The aim of the thesis is to create galvomechanism with appropriate solution of system geometry and projection on tilted projection surfaces without deformation of the displayed figures.

Obsah

Úvodní strana.....	1
Zadání bakalářské práce	3
Prohlášení	5
Poděkování	7
Anotační list	9
1 Úvod	12
2 Cíle práce	12
3 Popis problematiky	13
3.1 Druhy zobrazování na stěnu.....	13
3.1.1 Promítání - historie	13
3.1.2 Lampové projektory	13
3.1.3 Laserové projektory.....	20
3.2 Servomechanismy	22
3.2.1 Proudová regulační smyčka	23
3.2.2 Rychlostní regulační smyčka.....	26
3.2.3 Polohová řídicí smyčka	26
3.3 Galvoscaner.....	28
3.3.1 Princip galvoscaneru	28
3.3.2 Zrcadla	30
3.3.3 F-Theta scan lens (F-Lens).....	30
3.3.4 Využití galvoscanerů.....	31
3.4 Geometrie	34
3.4.1 Goniometrická metoda.....	34
3.4.2 Maticová metoda	34
4 Bezpečnost.....	35
5 Matematický model.....	37
5.1 První varianta	37
5.1.1 Základní geometrie	37
5.1.2 Matlab 1	41
5.2 Druhá varianta	44
5.2.1 Konstrukční geometrie	44
5.2.2 Matlab 2.....	45
6 Konstrukce.....	47

6.1	První návrh.....	47
6.2	Druhý návrh.....	47
7	Závěr	50
8	Zdroje.....	51
9	Seznam obrázků.....	53

1 Úvod

Mechanismy pro směřování paprsku tvoří dnes velmi důležitou součást zobrazovacích, výrobních a skenovacích technických zařízení. Schopnost přesně polohovat pozici např. laserového paprsku je zcela zásadní pro technologie jako jsou laserové popisovačky, gravírování, medicínské aplikace s využitím přesného zacílení laserového paprku atd. Většina servomechanismů pro směřování paprsku je založena na principu galvoscaneru. Toto zařízení se v principu skládá ze dvou nezávisle ovládaných natáčecích zrcátek, jichž konkrétní natočení ve spojitosti k příslušnou geometrií celé optické soustavy vede k zacílení paprsku žádaným směrem. Tato práce se zabývá popisem zobrazovacích systémů, řízením servomechanismů a následně detailním popisem galvoscaneru.

2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je porozumět galvomechanismu a vytvořit vlastní experimentální model funkčního galvomechanismu. Vedlejšími cíli je vytvořit funkční matematický model galva a dokázat promítat bez zkosení promítaného obrazce pod libovolným úhlem promítání.

3 Popis problematiky

3.1 Druhy zobrazování na stěnu

3.1.1 Promítání - historie

Vše začalo již dávno, odkdy jsme byli schopni ovládat světlo. Tehdy jsme si začali hrát s vlastním stínem a stínem ostatních předmětů. Nejstarší zobrazování obrazů na stěnu představovala hra s vlastním stínem od bodového zdroje světla. Za první promítání na stěnu se považuje stínohra s loutkami ze staré Číny (přes dva tisíce let stará forma lidového umění). Tato forma umění se vyznačuje stínem, který vzniká. Kdy se na plátně mezi plátnem a zdrojem světla odehrává děj příběhu pomocí loutek. Stín vytváří loutky, které se vkládají mezi promítací plátno a zdroj světla. Loutky se vyrábí z poloprůsvitného materiálu, a tak není vidět jen profil postav, ale celé tělo s všemi svými částmi. Děj, který se často doprovází. Často doprovázené mluveným slovem, zpěvem nebo hrou na hudební nástroje jako v dnešním divadle [1].

Okomentoval(a): [C1]: Žádné pohadky.....

Okomentoval(a): [C2]: Napojení, ,kdy....

Po stínohře lze bych zařadil za další vývojový krok podstatný pokrok v promítání na stěnu považovat vynález A. Kirchera ze 17. století z Říma, který vymyslel „magickou lucernu“. Díky objektivu a zdroji světla, mohl na stěnu promítat přes průhlednou fólii. Zdrojem světla byla tehdy stále ještě nejvíce používána svíčka [2].

Dalším zlomem je filmová prvotina bratří Lumiérů z roku 1895, kteří promítali příjezd parní lokomotivy na nádraží. Za vznikem filmového pásu stojí T. A. Edison. Mnoho dalších vědců a vynálezců poté přispělo k rozvoji, aby kinematografie v dnešní podobě svými optickými objevy v oblasti optiky také úspěšila pokroky v této problematice [2].

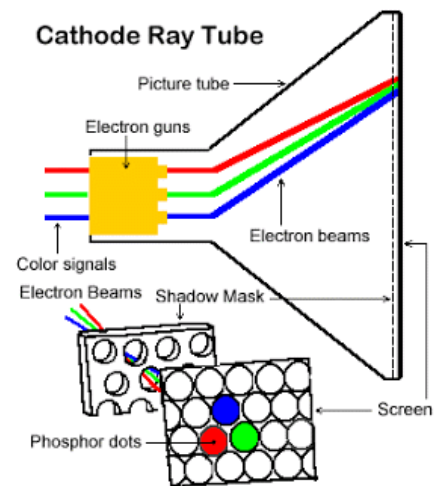
3.1.2 Lampové projektor

V dnešní době se k promítání obrazu na stěnu nejčastěji používají dataprojektory. Dataprojektor je zařízení, které promítá obraz na stěnu (zeď, plátno a v uměleckých případech i na jakkoliv zakřivenou plochu). V současnosti existuje několik vzájemně odlišných technologií, které se liší použitým principem, cenou a kvalitou zobrazení [3]. dosahují různých výsledků. Záleží, které parametry upřednostníme při pořizování tohoto zařízení. Jestli je to rozměry a hmotnost, zobrazovací vlastnosti nebo cena.

V současnosti existuje 5pět základních druhů projektorů: CRT projektor (cathod ray tube), DLP projektor (digital light processing), LCD projektor (liquid crystal display), LCoS projektor (liquid crystal on semiconductor) a LED projektor (light emitting diode) [3].

3.1.2.1 CRT

Projektor CRT (cathod ray tube) je z dataprojektorů historicky nejstarší. Pro svoji zastaralou technologii a energetickou náročnost už se tento typ projektoru dnes již moc nepoužívá. Kromě zastarání a již zmíněné energetické náročnosti obvykle vykazuje také a, protože má velké rozměry a hmotnost a je těžký. Mezi přednosti CRT projektoru patří především vysoké rozlišení, dobrý kontrast i sytost barev. Principiálně se podobá CRT obrazovkám [3].



Obr. 1 CRT barevný projektor – princip¹

Princip této technologie CRT je zobrazen na Obr. 1. Technologie CRT sestává ze v-tří různých elektronových dělobrazovacích hlavách, z nichž každé které promítá na stěnu individuální paprsek elektronů, které po dopadu na vrstvu luminoforu na stínítku excitují pouze jednu konkrétní barvu příslušnou danému elektronovému dělu (červená, zelená a modrá - RGB). Interakcí skládáním těchto tří barev se v daném bodě vytváří svítící bod s příslušnou barvou pak dostaneme obraz libovolné barvy (až 16,7 milionů barev). Při osmibitovém rozlišení intenzity paprsku každého elektronového děla je možné interakčně vytvořit celkem 16,7 milionů různých barevných odstínů [3].

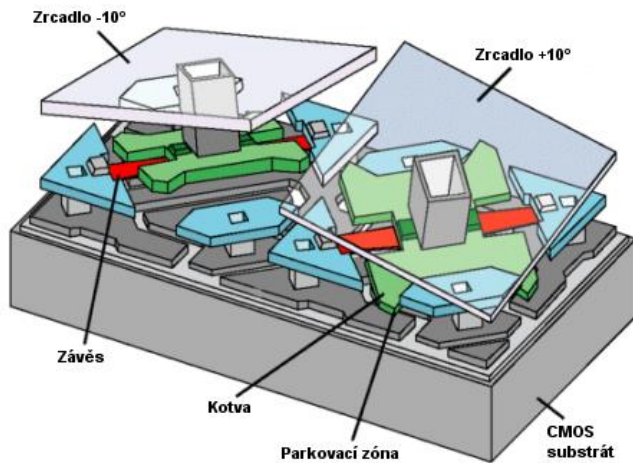
Naformátováno: Titulek, zarovnání na střed, Odsazení: Vlevo: 1.25 cm, První řádek: 0 cm

3.1.2.2 DLP

Jádrem projektoru DLP (digital light processing) je DMD čip (digital micromirror device). DMD čip se skládá z tisíce malých nákloných zrcadel, které se mohou natočit až o 10° (zvětšení zobrazeno na Obr. 2). Počet zrcadel určuje rozlišení výsledného obrazu, protože každé zrcátko reprezentuje jeden pixel (odrazový bod) na zobrazované ploše. U rozlišení 1920x1080 se na DMD čipu nachází 2 073 600 zrcadel. Přibližné rozměry jednoho zrcátka jsou 16x16 µm. Tedy reálná velikost čipu u rozlišení 1920x1080 je kolem 31x18 mm. Zrcátka mají jen dvě polohy – zapnuto a vypnuto. Při zapnutí odrážejí světelný svazek do objektivu. Při vypnutí se pak světelné svazky odráží mimo objektiv. Tyto dvě polohy se mohou měnit až tisíckrát za sekundu. Regulováním počtu změn poloh zapnuto a vypnuto vznikají odstíny jednotlivých barev (tzn. intenzitou složek RGB) [4].

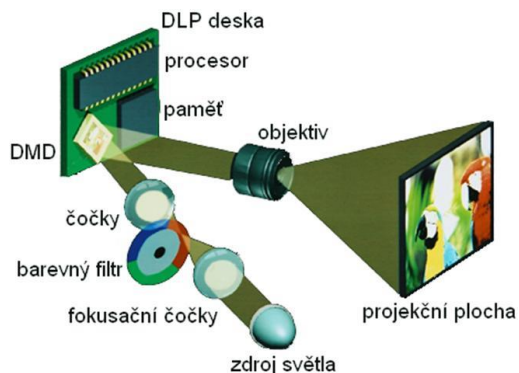
¹ Crt.gif. In: *Obsoletetelleye museum* [online]. 2014 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <http://4.bp.blogspot.com/rCLCrJ5tbRo/TW1ZldxbCII/AAAAAAAAAGc4/DrtVLvf8fAI/s1600/crt.gif>

Naformátováno: Odsazení: První řádek: 0 cm



Obr. 2 Zrcadla v DMD čipu - zvětšen²

U některých DLP projektorů se nachází pouze jeden DMD čip. Mezi čipem a světelným zdrojem je umístěn rotační disk s barevným filtrem (zobrazeno na Obr. 3), který propouští buď 4 barvy světla (RGB a bílou), nebo jen RGB. Červená, zelená a modrá slouží ke skládání barev a bílá ke zvýšení jasu. Rychlost rotačního disku musí být přesně synchronizována s DMD čipem. Správnou časovou synchronizaci zajišťuje řízení pomocí procesoru a paměti umístěné na DLP desce [4].



Obr. 3 DLP projektor - princip³

² Dlp_princip.png. In: *PC tuning* [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: https://pctuning.tyden.cz/ilustrace3/kuchar/technologie_projektoru/dlp_princip.png

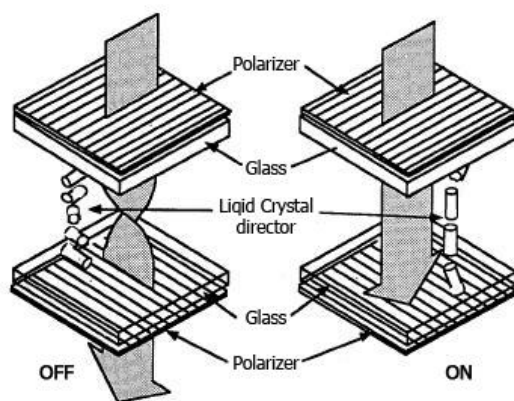
³ Image028.jpg. In: *J. Reichl - Encyklopedie fyziky* [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/data/optika/33_opticke_pristroje_soubory/projektory/image028.jpg

U dražších DLP projektorů jsou DMD čipy tři. Každý čip pro jednu RGB barvu. Optické hranoly zajišťují složení obrazu ze všech tří barevných složek před objektivem, kterým obraz putuje na promítací plochu [4].

3.1.2.3 LCD

Projektor LCD (liquid crystal display) využívá dichronických zrcadel a LCD panelů (na Obr. 4). Dichronická zrcadla dokáží ze světelného svazku separovat jednotlivé základní barvy RGB. Potřebujeme tedy 2 dichronická zrcadla, abychom z bílého světla dostali tři světelné toky RGB. Dichronické zrcadlo propouští jen světlo o určité vlnové délce. Červené světlo má nejdelší vlnovou délku (625 až 740 nm) z viditelného spektra, zelené světlo kratší (520 až 565 nm) a modré pak nejkratší (430 až 500 nm). Na každý světelný tok pak připadá jeden LCD panel [3].

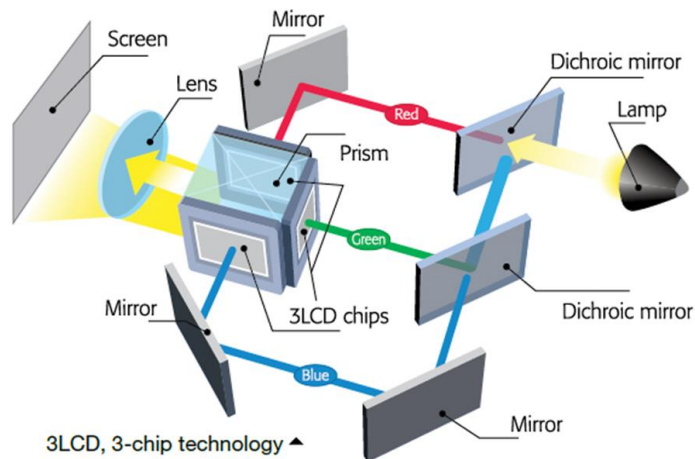
Přes LCD panel prochází světlo, když panel nemá aktivovaný tekutý krystal, který polarizuje procházející světlo. Z obou stran tekutého krystalu jsou polarizační fólie, které jsou vůči sobě pootočené o 90 stupňů (zobrazeno na Obr. 4). LCD panel se dělí na jednotlivé pixely, u kterých lze zapínáním a vypínáním tekutých krystalů měnit intenzitu světla [3].



Obr. 4 LCD panel - princip⁴

Světlo se z jednotlivých barevných složek RGB dále složí v optickém hranolu a putuje do objektivu jako na Obr. 5. LCD projektory mají horší životnost kvůli vypalování LCD panelů [3].

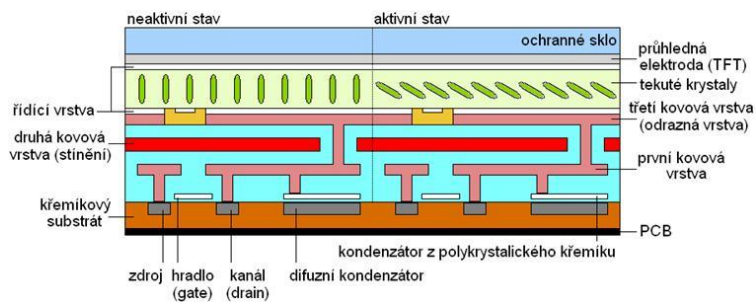
⁴ fig01.jpg. In: *Clover Display*. [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <http://www.cloverdisplay.com/images/fig01.jpg>



Obr. 5 LCD projektor - princip⁵

3.1.2.4 LCoS

Projektor LCoS (liquid crystal on semiconductor) se podobá kombinaci DLP a LCD projektoru. Místo DMD čipu se zrcátka se používá čip LCoS, který se dělí na jednotlivé odrazové body. Za každým z nich je metalická odrazová vrstva (znázorněno na Obr. 6). Místo pohybu zrcátek jako v technologii DMD čipu se jednotlivé odrazové body zapínají jako v technologii LCD panelu pomocí tekutého krystalu, který pak nechá projít polarizované světlo [5].



Obr. 6 LCoS čip – aktivní a neaktivní tekuté krystaly⁶

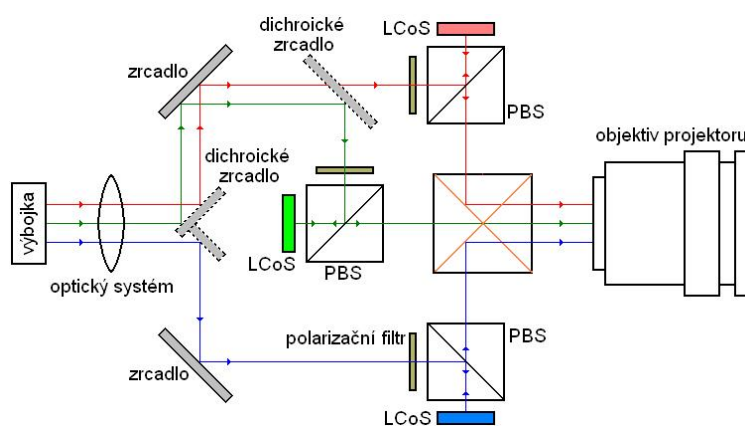
⁵ Image09(2).png. In: *Home Toys* [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: [https://www.hometoys.com/images/upload/images/image09\(2\).png](https://www.hometoys.com/images/upload/images/image09(2).png)

⁶ Image019.jpg. In: J. Reichl - *Encyklopedie fyziky* [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/data/E_dodatky_soubory/dmd_lcos/image019.jpg

Světlo ze zdrojového emitoru se nejdříve rozdělí pomocí dichroických zrcadel na RGB složky (zobrazeno na Obr. 7) jako u LCD. Poté se odrazí na PBS (polarizing beam splitter) směrem k LCoS čipu. Z LCoS čipu znovu prochází PBS a vstupuje do optického hranolu, kde se k němu přidávají ostatní barevné složky. Následuje objektiv a promítací plocha [5].

Intenzitu barvy udává doba zapnutí tekutého krystalu na LCoS čipu. Jako zdroj světla se nejčastěji používá výbojka [5].

Tato technologie je z projekčních technologií nejmladší a nejdražší, ale disponuje vysokou kvalitou barev i kontrastu [5].

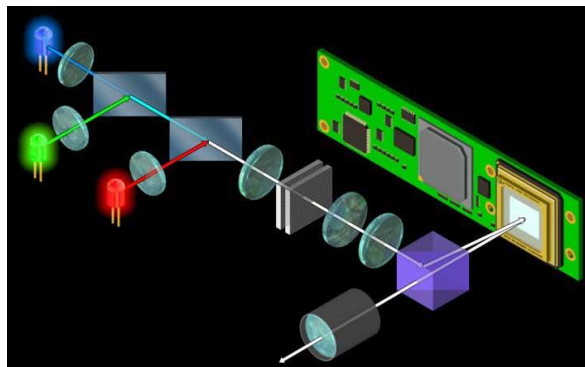


Obr. 7 LCoS projektor – vnitřní uspořádání⁷

3.1.2.5 LED

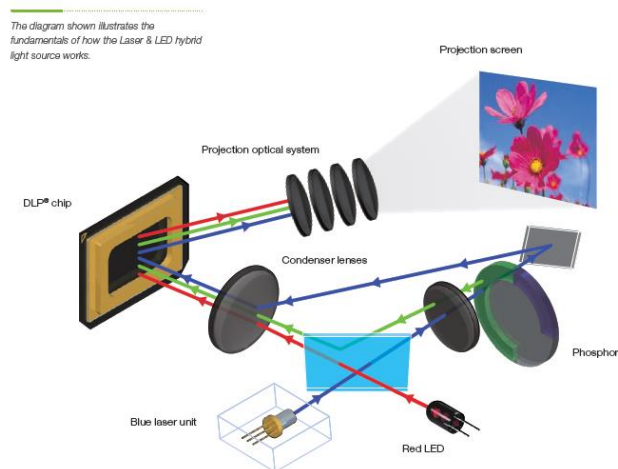
Projektory LED (light emitting diode) se podobají DLP projektorům, jen využívají jiný zdroj světla. Jako zdroj světla se u LED projektorů používají tři diody emitující světlo RGB (znázorněno na Obr. 8). Velikost LED projektoru se sice zmenší, ale jas se ve srovnání s DLP technologií výrazně zhorší [3].

⁷ Image032.jpg. In: J. Reichl - Encyklopedie fyziky [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/data/optika/33_opticke_pristroje_soubory/projektory/image032.jpg



Obr. 8 LED projektor - princip⁸

Existuje i kombinace laserového projektoru a LED projektoru. Tento hybridní projektor využívá fosforového kola (na Obr. 9), které mění modrému laserovému svazku světla po odrazu vlnovou délku na zelenou. Do barev RGB zbývá červená. Červené světlo emituje LED dioda. Světlo prochází na DMD čip a přes objektiv na promítací plochu, kde zobrazuje požadovaný obraz [15].



Obr. 9 LED-laser hybrid projektor - princip⁹

⁸ X305hls5679-o_ledoptics.jpeg. In: *Our Business News* [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: http://www.ourbusinessnews.com/wp-content/uploads/2012/09/x305hls5679-o_ledoptics.jpeg

⁹ Projector_technology_1.png. In: *Interaktivní projektory* [online]. 2014 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: http://www.interaktivni-projektory.cz/wp-content/uploads/2013/09/projector_technology_1.png

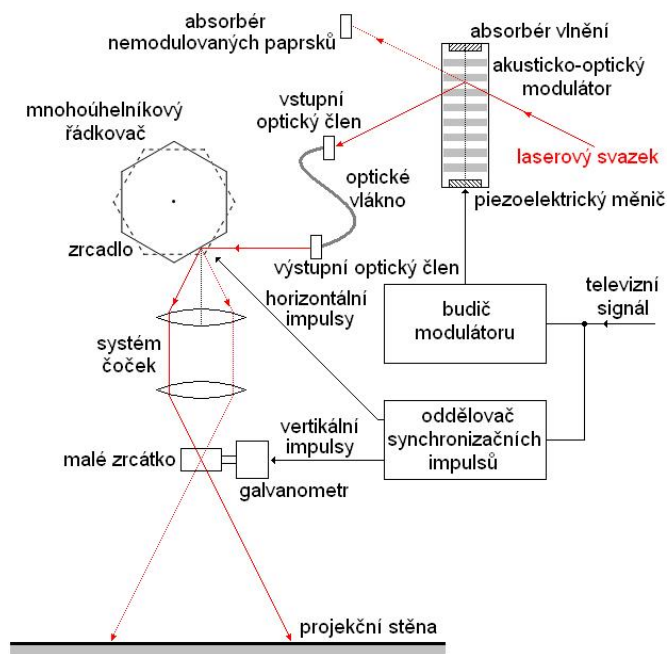
3.1.3 Laserové projektory

V neposlední řadě jsou tu laserové projektory. Existují dva základní typy laserových projektorů. První typ upravuje vlnovou délku světelného svazku akusticko-optickým modulátorem a paprsek pak odráží soustavou dvou zrcátek. Druhý typ laserového projektoru je založen na principu míchání RGB barev [6].

3.1.3.1 *Laserové projektory s akusticko-optickým modulátorem*

Základem změny barvy světelného svazku v tomto typu laserového projektoru je akusticko-optický modulátor, který je rozvíbrován vysokofrekvenčním signálem. Modulátor je vyroben ze dvou částí. První část akusticko-optického modulátoru tvoří piezoelektrický měnič, do nějž se přivádí vysokofrekvenční signál. Druhou část tvoří vlastní optický materiál modulátoru. Na optickém materiálu dochází k vnitřním periodickým deformacím. Způsobuje je piezoelektrický jev, který vzniká vysokofrekvenčním signálem na piezoelektrickém měniči. Deformace optického materiálu způsobují rozklad laserového paprsku na jednotlivé barvy světelného spektra. Požadovaná barva z difrakce odchází optickou soustavou na plátno. Zbytek vygenerovaného světla je pohlcen absorberem nemodulovaných paprsků [7].

Optická soustava laserového projektoru s akusticko-optickým modulátorem je složená z mnohoúhelníkového řádkovače, systému čoček a galvanometru se zrcátkem. Na ose řádkovače je připevněn hranol s podstavou pravidelného mnohoúhelníku a na každé straně je pak zrcadlo, které znázorňuje právě jednu řádku bodů z obrazu složeného z obdélníkového pole světelných bodů. Systém čoček v optické soustavě znovu svádí rozptýlené paprsky z řádkovače do jednoho bodu, kde se odráží od zrcátka připevněného na ose galvanometru (zobrazeno na Obr. 10). Zrcátko proto nemusí mít tak velkou plochu. Galvanometr zajišťuje polohu ve vertikálním směru. Pohyby galvanometru jsou závislé na rychlosti otáčení řádkovače a na počtu stran mnohoúhelníku. Synchronizace pohybů obou zařízení je nezbytně nutná k správnému zobrazení obrazu [7].

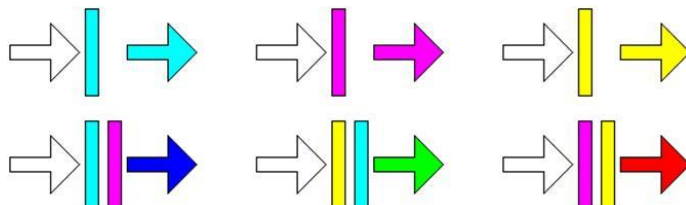


Obr. 10 Laserový projektor s modulátorem - princip¹⁰

3.1.3.2 Laserové projektory s RGB mísením barev

Na rozdíl od laserových projektorů s akusticko-optickým modulátorem se v laserových projektorech, které mísí RGB barvy, nahrazuje jeden světelný zdroj třemi lasery tří základních barev (červenou, zelenou a modrou), nebo laserem, který dokáže emitovat všechny tři barvy RGB. Průchod světla řídí závěrka. Funguje jako regulátor ještě před systémem správy barev. Systém správy barev je tvořen třemi filtry, které v různých kombinacích (zobrazeno na Obr. 11) vytvářejí celkem sedm barev. Sedmou barvou je bílá barva složená ze tří základních barev RGB bez filtru. Barevné filtry jsou z dichroických fólií. Ze světelného svazku se tak určité vlnové délky odstraňují (subtraktivní mísení barev) nebo naopak přidávají (aditivní mísení barev) [8].

¹⁰ Image034.jpg. In: J. Reichl - Encyklopedie fyziky [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/data/optika/33_opticke_pristroje_soubory/projektory/image034.jpg

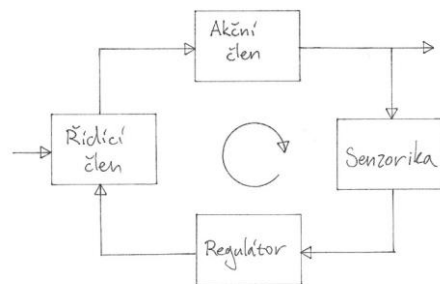


Obr. 11 Kombinace tří barevných filtrů¹¹

Druhou možností jak mísit barvy v laserovém projektoru, který emituje barvy RGB, je použít PCAOM (PolyChromatic Acousto Optic Modulator). Modulátor PCAOM umožňuje kontinuální kontrolu jasu jednotlivých složek laseru. Například utlumením zeleného světelného svazku vzniká složením červené a modré barva fialová. Modulátor PCAOM zvládá měnit barvy rychleji než systém s dichromickými filtry. Na promítací ploše tak vznikají sytější barvy [8].

3.2 Servomechanismy

Servomechanismus, zkráceně servo, je automatické zařízení se zpětnovazebním řízením k regulaci polohy, rychlosti či zrychlení některého prvku mechanismu. Servomechanismus se typicky skládá z regulátoru, regulované soustavy (např. servomotoru), sensorů a aktuátorů (akčních členů), jak je ilustrováno na Obr. 12. Uzavřením zpětné vazby vzniká regulační smyčka, která má u dynamických systémů za cíl žádaným způsobem modifikovat jejich frekvenční odezvy. Významným problémem u servomechanismů bývá kromě správného naladění parametrů regulátoru především problém s jejich celkovou stabilitou. Aplikací příliš vysokých hodnot konstant zpětnovazebního zesílení může dojít k celkové destabilizaci celé soustavy. Toto je nežádoucí stav [16], [18].



Obr. 12 Smyčka zpětnovazebního řízení

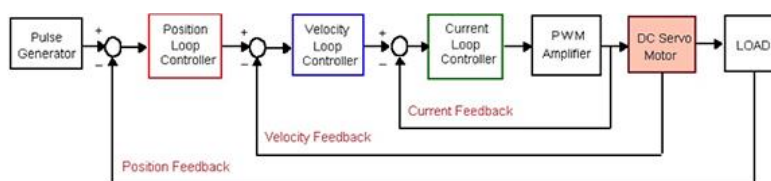
Zpětná vazba je obvykle realizována prostřednictvím automatických sensorů (elektrických, magnetických, optických...) a aktuátorů (pneumatických,

¹¹ Image038.jpg. In: J. Reichl - Encyklopedie fyziky [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/data/optika/33_opticke_pristroje_soubory/projektory/image038.jpg

elektrických, hydraulických atd.). Tuto zpětnou vazbu může ale zprostředkovat i člověk tím, že odečítá hodnoty měřené na čidlech a adekvátně reguluje akční veličinu. Příkladem může být řízení pohybu auta plynovým pedálem [16].

V oblasti řízení pohybu prostřednictvím elektrických servopohonů rozlišujeme obecně několik základních úrovní zpětnovazebního řízení dle veličiny, kterou považujeme za řízenou z hlediska funkčnosti daného zařízení.

Rozlišujeme tak řízení na úrovni proudu (síla), rychlosti a polohy. Základní strukturou pro realizaci tohoto řízení je princip kaskádní regulace [17].



Obr. 13 Kontrolní smyčky¹²

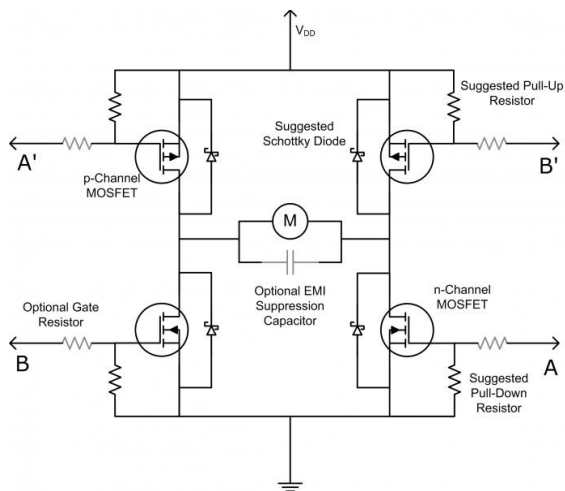
Vnitřní proudová regulační smyčka má za úkol zajišťovat adekvátní regulaci proudu (respektive síly). Prostřední rychlostní smyčka pak zajišťuje adekvátní rychlostní odezvu a poslední vnější smyčka zajišťuje sledování polohy. Kaskádní uspořádání vychází z principu, že každá podřízená smyčka má vyšší frekvenční pásmo propustnosti než smyčka umístěná nad ní. Řízení proudu probíhá vzhledem k časovým konstantám procesu nárůstu proudu ve vinutí (dáno indukčností a odporem vinutí) na úrovni desítek kHz. Je vhodné, aby tato frekvence byla v ultrasonické oblasti, aby motor nevydával nepříjemné austické emise. Rychlostní smyčka má typicky pásmo propustnosti do 500 Hz a polohová smyčka typicky desítky Hz. Ideální přenos servomechanismu by byl charakterizován nekonečnou šířkou frekvenčního pásma a vedl by v principu k přenosu s amplitudou 1 v celém frekvenčním rozsahu. Vzhledem k fyzikálním omezením aktuátorů a dynamice interagující soustavy je toto fyzikálně obtížně splnitelné. Každá regulační smyčka tak vykazuje jistou míru kompromisu mezi dosažitelnou dynamikou reakční odezvy a stabilitou celé soustavy [17].

3.2.1 Proudová regulační smyčka

Proudová regulační smyčka reguluje požadovaný proud ve vinutí elektromotoru. Regulaci je možné zajistit mnoha způsoby, historicky bylo toto řízení realizováno pomocí analogových obvodů. V posledních cca. 30 letech došlo k postupné digitalizaci řízení proudu a většina servomečniců dnes k řízení proudu používá techniku PWM (pulzně šířkovou modulaci). Tento princip umožňuje generovat analogové hodnoty filtrováním digitálního spínacího signálu.

¹² Control loop. In: *Digi-Key Corporation* [online]. 2018, 2017-09-27 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/-/media/Images/Article%20Library/TechZone%20Articles/2017/September/An%20Easier%20Approach%20to%20High-Performance%20Current%20Loop%20Control%20Design/article-2017september-an-easier-approach-fig2.jpg?ts=1d0cf264-bb5d-4349-bd1e-fadafe7181df&la=en-US>

V případě elektrických motorů je tato filtrace zprostředkována indukčností a odporem samotného vinutí [17].

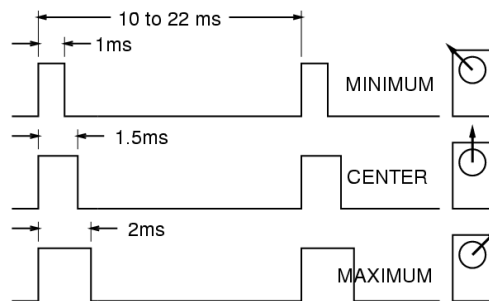


Obr. 14 H-Bridge¹³

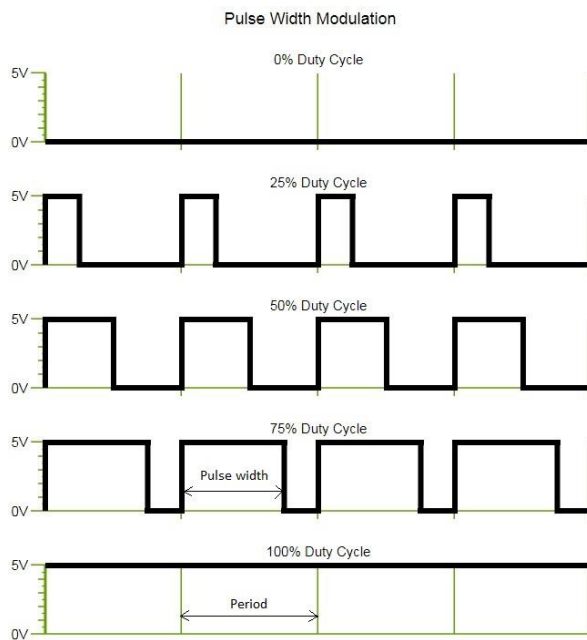
H-Bridge je elektronická součástka umožňující reverzaci chodu motoru. Její pomocí v kombinaci s PWM řízením lze pak bez problémů ovládat téměř všechny servomotory [19].

PWM (pulzně šířková modulace) se u servomotorů používá nejčastěji. Signál nabývá hodnot 1 a 0 (0-5 V). V dané sekvenci (periodě), která se opakuje každých cca 10-25 ms, se poloha serva určuje dobou trvání, kdy signál nabývá hodnoty 1. Poloha je zobrazena na Obr. 15. Tyto signály generují i zpracovávají mikroprocesory. Galvanické oddělení serva je obvykle zajištěno pomocí izolačních optočlenů [16].

¹³ FzZyh.png: H-Bridge. In: *Electrical engineering* [online]. 2018, 2017-05-22 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://i.stack.imgur.com/FzZyh.png>



Obr. 15 PWM - poloha¹⁴



Obr. 16 PWM – Pulsně šířková modulace¹⁵

V moderních zařízeních, které realizují proudovou smyčku na bázi FPGA, lze dostahovat až MHz frekvencí řídicí proudové smyčky. Toto je důležité obzvláště v případě přesného řízení síly v systémech s velmi nízkou indukčností (ironless linear motors). Těchto vysokých frekvencí lze nově dosahovat i pomocí

¹⁴ Servo_pwm_pulses.gif: PWM. In: *Projectedneuralactivity* [online]. 2018, 30/12/2012 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: http://4.bp.blogspot.com/-RoXuyoxFQXI/UN953PdeCqI/AAAAAAAAAHs/MCyAovmWcwY/s400/servo_pwm_pulses.gif

¹⁵ Servopi-pwmduy.svg: PWM. In: *ABelectronics UK* [online]. 2018 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.abelectronics.co.uk/docs/kb/servopi/servopi-pwmduy.svg>

mikrokontroleru TMS320F28379D od firmy Texas Instruments, která realizuje tzv. Fast Current Loop softwarově [20].

3.2.1.1 Problematika měření proudu

V praxi se uplatňuje několik hlavních způsobů jak měřit proud ve vinutí servomotoru. Nejpoužívanější je technika měření úbytku napětí na rezistoru, kdy jsme pomocí tohoto úbytku napětí a Ohmova zákona schopni určit proud protékajícím rezistorem. Tento rezistor se zařazuje do obvodu vinutí a má hodnoty 1 Ohm a nižší, aby na něm při vysokých proudech nedocházelo k velkým tepelným ztrátám. Tento způsob měření proudu je cenově velmi dostupný a používá se obvykle pro proudové smyčky s proudy do cca 1A.

Nákladnějším způsobem měření proudu je dedikované čidlo, obvykle na principu Hallovy sondy. Tento způsob poskytuje obdobné výsledky jako měření pomocí proudového rezistoru, kdy je výstupní napětí přímo úměrné procházejícímu proudu. Nevýhodou je časová prodleva senzoru, která dosahuje řádu několika μs v důsledku reakční doby zesilovacích obvodů [21].

3.2.2 Rychlostní regulační smyčka

Rychlostní smyčka reguluje hodnoty otáček. V mnoha případech se používá jako hlavní řídicí smyčka například u vřeten obráběcích strojů, u kterých není zapotřebí řídit polohu. Často se pod ni zařazuje proudová smyčka, která zlepšuje dynamiku regulace [17].

Měření rychlosti se přímou metodou provádí velmi obtížně. Snáze dokážeme změřit zrychlení nebo polohu v čase, ze kterých lze hodnoty rychlosti vypočítat. Rychlost je definována jako přírůstek dráhy za čas. Časový úsek měření by měl být tedy nekonečně malý, abychom dokázali změřit okamžitou rychlost. Proto se rychlost často vypočítává z polohy prostředním časové diference [22].

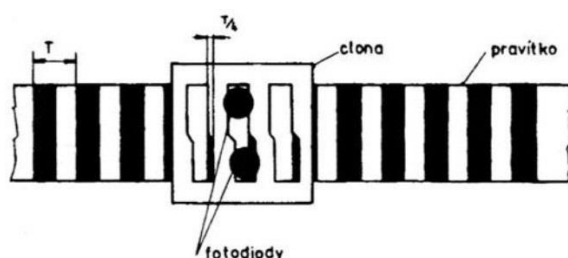
Senzory, jimiž se měří rychlost, bývají dvojího typu, a to kontaktní a bezkontaktní. Kontaktní však mohou přímo ovlivnit měřenou rychlost, proto se pro přesnější hodnoty používají bezkontaktní. Senzory využívají pro měření rychlosti vlastností optiky, magnetické indukce, ultrazvuku, Hallova efektu atd. [22].

3.2.3 Polohová řídicí smyčka

Polohová řídicí smyčka zajišťuje servofunkci systému na úrovni sledování polohy. Ideálně se požadovanou polohu snaží zajistit v co nejkratším čase a bez překmitů. Senzory, které se používají na měření vzdálenosti, využívají různých fyzikálních vlastností a podle způsobu předávání informace o poloze se dělí na analogové a číslicové. Analogové senzory udávají polohu změnou odporu, indukčnosti, napětí atd. Číslicové snímače předávají samotnou hodnotu polohy pomocí číslic. Dále můžeme tyto senzory rozdělit na absolutní a inkrementální polohové senzory. Absolutní odměřování zajišťuje přesnou polohu, která se nemění ani při resetování čidla. Inkrementální senzory snímají pouze přírůstek od počáteční polohy, která se nastaví při zapnutí systému na aktuální polohu. Proto se u servomechanismu s inkrementálními čidly často používají koncové senzory polohy a vždy po zapnutí systému dojde k referaci celé soustavy servomechanismu. Referace u absolutních odměřování není potřeba [17], [14].

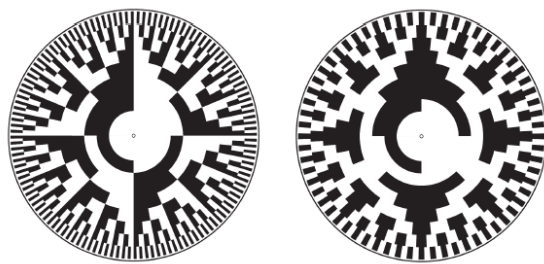
Jako odporový snímač polohy se používá potenciometr, často se umísťuje do modelářských serv. Pro bezkontaktní měření lze používat ultrazvukové snímače, které měří vzdálenost odraženým impulsem a u nichž známe rychlost šíření zvuku v měřeném prostředí. Podobný způsob měření vzdálenosti realizují interferometry. Interferometry vysílají světelné paprsky a soustavou optických hranolů se do nich paprsky vrací. Z vrácených složených (interferovaných) paprsků pak lze vypočítat vzdálenost, o kterou se koncový hranol posunul [14].

Jedním z velmi důležitých digitálních snímačů je optický enkodér. Enkodér má vždy zabudované pravítko nebo kotouček s průhlednými a neprůhlednými proužky, které se pravidelně střídají. Přesnost enkodéru je daná množstvím těchto střídajících se proužků. Dohromady tyto „černobílé“ proužky (jako na Obr. 17) tvoří pásy, nad kterými jsou vždy dvě vychýlené fotodiody. Díky fázovému posuvu fotodiody je enkodér schopný rozlišit směr pohybu [14].



Obr. 17 Pás enkodéru¹⁶

Kotoučky do absolutního enkodéru používají Grayův kód, který se v jednom kroku mění pouze v jedné číslici binárního kódu. Měření v jedné otáčce tak lze považovat za absolutní. Kotouček s binárním kódem je zobrazen vlevo na Obr. 18 a kotouček s Grayovým kódem napravo [14].



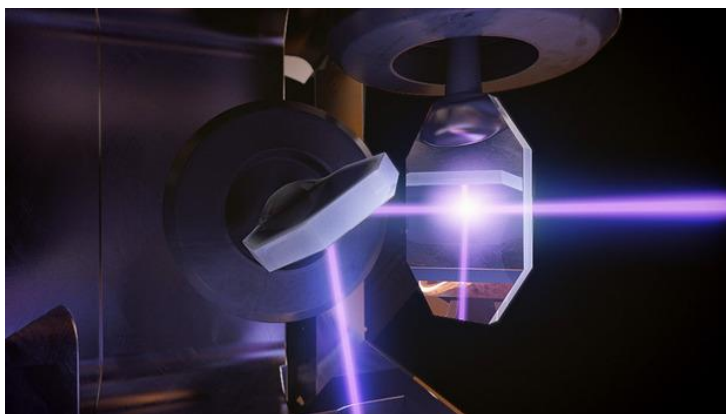
Obr. 18 Dva druhy kotoučů enkodéru¹⁷

¹⁶ Image037.jpg. In: *Výukové texty* [online]. 2011, 2014 [cit. 2018-08-05]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka/Data/mereni_polohy/uvod_soubory/image037.jpg

¹⁷ Obrazek3_3.png. In: *Srovnání lokalizačních technik* [online]. 2011, 2011 [cit. 2018-08-05]. Dostupné z: http://marek.sk.sweb.cz/lokalizace/obrazek3_3.png

3.3 Galvoscanner

3.3 Protože se v různých zdrojích liší základní pojmy ze skenovací oblasti, jsou v následujícím odstavci jednotlivé pojmy rozlišené a popsány. Galvoscanner je celý skenovací systém (také se mu říká zkráceně galvo, galvo systém nebo galvo mechanismus). Skenováním se mnohdy myslí samotné vychylování paprsku do přesné pozice (nezáleží, zda se jedná o měření vzdálenosti bodu od přístroje nebo gravírování či vypalování). Skenovací hlava je soustava dvou zrcátek, která se rotačně vychylují. K vychylování paprsku se používají motory s enkodéry nebo galvanometry. Osa galvanometru se v závislosti na velikosti procházejícího proudu vytáčí o několik stupňů (galvanometr byl vynalezen v roce 1820 k detekci a měření proudu) [23].



Obr. 19 Skenovací hlava¹⁸

3.3.1 Co to je? Princip galvoscanneru

Skenovací systémy se obvykle skládají ze tří různých částí, jedná se o části optické, elektronické a elektromechanické. Optická část zahrnuje generování paprsku, jeho modulace a úpravy. Elektronický subsystém se zabývá sběrem dat, jejich zpracováním a mimo jiné i generováním požadovaných polohových souřadnic. Elektromechanická část zahrnuje umístění a řízení paprsku, což je důležitý aspekt pro tuto práci [9].

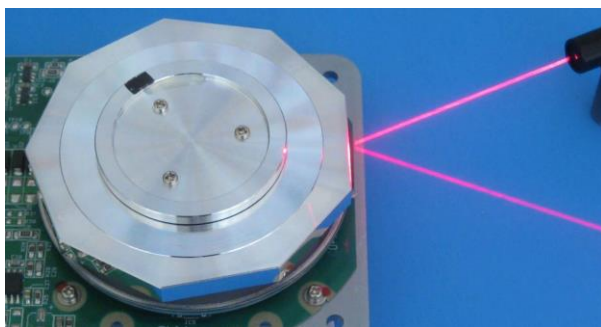
Laserové deflektory jsou pouze jedním dílčím systémem celkového systému snímání. Nicméně je to oblast, která má značný význam v jakémkoliv skenovacím systému. Princip skenovacích systémů spočívá v tom, že namísto elektronových paprsků se odrážejí světelné paprsky. Vychylování světla je relativně složité. Ve srovnání s vychylováním elektronových paprsků má však tu výhodu, že je mnohem stabilnější vůči vnějšímu rušení. Například systémy založené na CRT musí být magneticky stíněné, aby se zabránilo zkreslení dopadajících elektronových paprsků [9].

¹⁸ FormLabs-1_2B-lasers-thumb-620x349-84138.jpg. In: *Cool Hunting* [online]. 2018, 2014 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: http://assets.coolhunting.com/coolhunting/mt_asset_cache/2014/06/FormLabs-1_2B-lasers-thumb-620x349-84138.jpg

Dokonce i při vývoji mají mnohé vysoce výkonné lasery laserové hlavy hmotnost v řádu několika kilogramů. Jedna metoda, jak zabránit mechanickému problému přemístování takové váhy vysokou rychlostí, je jednoduše odrazem laserového paprsku zrcadlem s hmotností v řádu gramů nebo méně. Tato zrcadla mají povlaky optimalizované pro specifické délky vln a mají odrazivost okolo 99 %. O zrcadlech více v další podkapitole. Existují dvě základní konfigurace skenování laserového paprsku pomocí této metody. Jednou je polygonální skener a druhou galvanometrové skenery [9].

3.3.1.1 Polygonální skenery

Polygonální skenery mají několik rovinných zrcadlových ploch, které na sebe navazují a jsou obrácené směrem od osy otáčení. Každá plocha je od osy otáčení stejně vzdálená. Zrcadlová sestava je typicky namontována na hřídel elektromotoru pro vytvoření rotačního pohybu. Významnou vlastností polygonálního skeneru je takzvané rastrové snímání, což znamená, že skener opakovaně vytváří mnoho jednosměrných přímých skenů. Výhodou polygonálních skenerů je rychlost, široké úhly skenování a stabilita rychlosti. Nicméně vzhledem k vysoké setrvačnosti jsou polygonální skenery považovány za nepraktické pro aplikace vyžadující rychlé změny rychlosti skenování nebo zastavování uprostřed skenování. Principiálně se podobají laserovým projektorům s akusticko-optickým modulátorem [9].



Obr. 20 Hranol polygonálního skeneru¹⁹

3.3.1.2 Galvanometrové skenery

Galvanometrový skener se skládá ze servomotoru s omezenou rotací (používá se galvanometr nebo klasická serva řízená PWM signálem), na kterém je namontováno zrcadlo. Toto servo je navrženo tak, aby byla momentová charakteristika vysoce lineární. Tento typ skeneru je výrazně pomalejší než polygonální skener, pokud jde o rychlost skenování za sekundu. Má však lepší flexibilitu z hlediska sledování profilů (polohy) a schopnosti zastavit uprostřed skenování. To polygonální skener neumožňuje. Výběr skeneru závisí tedy na aplikaci, pro kterou bude skener využíván [9].

¹⁹ Polygon-mirror-scanning-LIDAR-beam-1024x546.jpg. In: *Precision laser scanning* [online]. 2018, 2017 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://precisionlaserscanning.com/wp-content/uploads/2017/12/Polygon-mirror-scanning-LIDAR-beam-1024x546.jpg>

3.3.2 Zrcadla

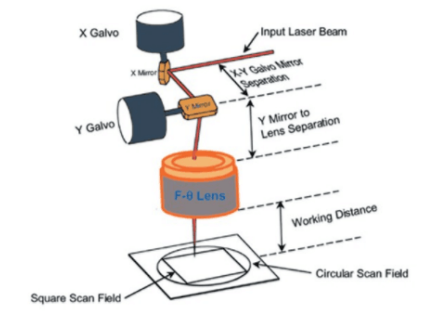
K výrobě vysoce výkonných zrcadel skeneru se obvykle používá beryllium. Má ve srovnání s jinými zrcadlovými materiály včetně karbidu křemíku, taveného oxid křemičitého i křemíku nejnižší hustotu materiálu $1,85 \text{ g/cm}^3$ a nejvyšší tuhost $160 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Zadní část zrcadel se často navrhuje s odlehčenou konstrukcí, která při vysokých otáčkách zachová rovinnost zrcadla. Komerčně dostupná skenovací hlava s těmito konstrukčními prvky může běžně pracovat při rychlosti skenování 50 rad/s . Umět detekovat polohu zrcátka s vysokou přesností a zajistit efektivní řízení polohy je klíčem k přesnému skenování [10].



Obr. 21 Zrcadla pro galvoscanerů²⁰

3.3.3 F-Theta scan lens (F-Lens)

U galvomechanismů, které se používají pro gravírování do kovů a v nichž jsou implementovány vysoce výkonné lasery, se za servomechanismus se zrcátka vkládá optická soustava. Někdy se optická soustava vkládá i před servomechanismus, pokud je laserový paprsek příliš výkonný. Optická soustava před servomechanismem nejdříve paprsek rozptýlí do širšího svazku, aby jeho výkon nebyl přenesen na zrcátka v jednom bodě a nedošlo i přes jejich maximální odrazivost k jejich poškození (natavení). Po vychýlení paprsku paprsek projde druhou optickou soustavou (F-Lens), která umožňuje soustředění rozptýlených světelných paprsků do jednoho bodu. Největší čočkou, kterou vyrábí Thor Labs, lze skenovat pole o rozměrech $156,7 \times 156,7 \text{ mm}$ [24].



Obr. 22 F-Lens²¹

²⁰ ImageForArticle_971(2).jpg. In: AZO Optics [online]. 2018, 2014 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: [https://www.azooptics.com/images/Article_Images/ImageForArticle_971\(2\).jpg](https://www.azooptics.com/images/Article_Images/ImageForArticle_971(2).jpg)

²¹ 20180324144322_36098.png. In: Giaì photonics Co.,Ltd [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: http://www.giaiphotonics.com/photo/giaiphotonics/editor/20180324144322_36098.png

3.3.4 Využití galvoscanerů

Primárním účelem galvoscanerů je určování vzdálenosti mezi skenovací hlavou a dopadem laserového paprsku. Odkláněním paprsku ve skenovací hlavě tak mohou bez problémů určit vzdálenosti mnoha bodů v prostoru a oskenovat tak daný objekt nebo přímo samotný prostor.

Těchto vlastností se využívá zejména ve stavebnictví, kde mají skenovací hlavy sice pomalejší skenovací rychlost (kolem 2500 bodů za vteřinu), zato mají větší skenovací zorné pole (360°x270°, kde zbytek prostoru zabírá samotný skenovací přístroj). Další důležitou vlastností je přesnost měření požadované vzdálenosti. Ta se pohybuje kolem několika milimetrů na měřenou vzdálenost kolem jednoho kilometru. Takovéto přístroje vyrábí například firmy Leica, Callidus, Riegl a Trimble. Bývají doplněny o digitální kameru, která snímá právě měřenou oblast. Toho se využívá v geodézii při měření terénu [11].

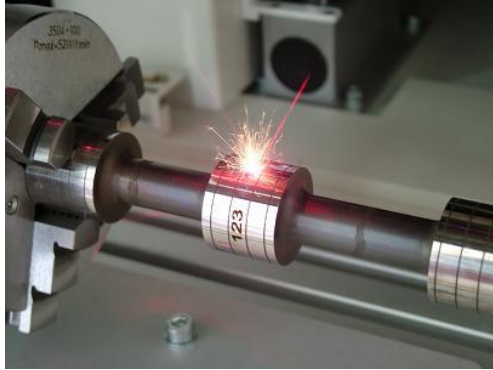


Obr. 23 Leica HDS 3000²²

Dalším odvětvím, které profituje z vlastností skenovacích hlav, je výrobní průmysl. Ve výrobním průmyslu se používají dvě podobné technologie na stejném principu galva (vychylování paprsku). První technologie je stejná jako ve stavebnictví, tady skenovací varianta galva. Oproti skenování terénu se zde klade větší důraz na přesnost měřené vzdálenosti (v řádech μm) a přesnost polohy světelného paprsku.

Druhou variantou používanou ve výrobním průmyslu je samotné vychylování světelného svazku o vyšším výkonu. Touto variantou lze gravírovat nápisy, značky, firemní loga a další umělecké nebo technologicky důležité obrazce. Vypalovat lze do kůže, papíru, dřeva, plastu, skla i kovů. Pro řezání laserem je vhodnější si pořídit stroj, který bude nést celou laserovou hlavu. Dalším využitím druhé varianty je například zapékaný tisk barev nebo bodové svařování [12].

²² 12_37b.jpg. In: *Stavebnictví3000* [online]. 2018, 2006 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: http://www.stavebnictvi3000.cz/obr/clanky2/2005/12_37b.jpg



Obr. 24 Popisování laserem²³

Další vývoj zajistil obor aditivní technologie. Na principu galvomechanismu se zakládají tři laserové aditivní technologie. Všechny se pak kategorizují pod LAM.

- LAM – Laser Additive Manufacturing – vytváření 3D objektu vrstvou po vrstvě s použitím laseru jako zdroje tepla
- SLA – Stereolitografie – vytvrzování polymerů UV laserem
- SLS – Selective Laser Sintering – zapékání vrstev prášku CO₂ laserem
- SLM - Selective Laser Melting – natavení vrstev prášku vláknovými lasery



Obr. 25 Metoda SLM²⁴

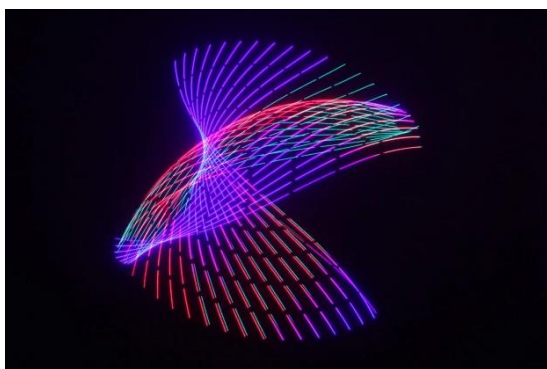
Prášky v těchto aditivních technologiích jsou nejčastěji kovové, polymerové (fotoreaktivní pryskyřice) nebo i keramické. Jednou z výzev pro vytváření precizních výtisků je zrovnoměnění hustoty výkonu laseru na celé ploše. Nerovnoměrnost způsobuje zrychlování a zpomalování galvomechanismu na koncích šrafování a vykreslování.

²³ Lt3.JPG. In: *Tech Magazin* [online]. 2018, 15/1/2014 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/obrazky/tm122013/lt3.JPG>

²⁴ Image2_chad-web.jpg. In: *NIST* [online]. 2018, 2016 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: https://www.nist.gov/sites/default/files/images/2016/09/15/image2_chad-web.jpg

Z těchto tří technologií vykazuje v posledních letech nejrychlejší růst selektivní laserové tavení (SLM). Vyrábí se funkční části, které přicházejí do automobilového, vojenském a kosmického průmyslu [10].

V neposlední řadě se galvomechanismy objevují v průmyslu zábavním. Většina lasershow na koncertech a světelných festivalech se spoléhá právě na tento systém. Například firma Magnumlightning vyrábí RGB laserové projektory, které nevykreslují plošné obrazce, ale jen profil zobrazovaného objektu. Spolu s vychytávkami od LaserDock software lze takové projektory použít na hraní starých arkádových her jako je Space Impact, Asteroids a jim podobné [25].

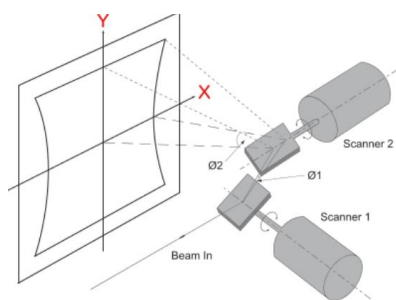


Obr. 26 Promítání na stěnu²⁵

²⁵ Laserdock2.jpg. In: *Wicked Lasers* [online]. 2018, 2017 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: http://www.wickedlasers.com/catalog/view/theme/techno_split/image/laserdock2.jpg

3.4 Geometrie

V geometrii galva se jedná o prostorovou úlohu, v níž se využívá Snellova zákona. Snellův zákon říká, že úhel odrazu se rovná úhlu dopadu. Existují dvě varianty, jak dosáhnout výsledku. Uvažovat o úloze v celku a propočítat se k promítanému bodu v námi zvolených souřadnicích. Druhou variantou je si úlohu rozdělit a jednotlivé části počítat zvlášť, ale stejným způsobem. Obě varianty se řeší v kartézských souřadnicích.



Obr. 27 Základní geometrie²⁶

3.4.1 Goniometrická metoda

Goniometrická metoda umožňuje rychlé řešení jednodušších úloh. Pro vyšší úspěšnost je lepší si vše řádně narýsovat. V goniometrické metodě se hledají závislosti mezi vzdálenostmi a úhly, které popisují goniometrické funkce. U složitějších úloh trvá hledání řešení mnohem déle a je neintuitivní. Goniometrická metoda popisuje právě jednu konkrétní geometrii systému, která je pevně stanovená [26].

3.4.2 Maticová metoda

V maticové metodě se používají matice pro transformaci souřadnic v prostoru. Metoda umožňuje obecnější řešení, které lze poté s minimálními změnami aplikovat na libovolnou konstrukci. Navíc se celá úloha skenovací hlavy rozdělí na tři skoro stejné části. Jedna část úlohy se pak definuje jako libovolně natočená rovina v prostoru, kterou protíná přímka z daného směru, která se v bodě průniku odráží podle Snellova zákona [27].

²⁶ Glavos-Positioning-Error.png. In: *Tecnica* [online]. 2018, 12.6. 2015 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <http://tecnica.com/wp-content/uploads/2015/06/Glavos-Positioning-Error.png>

4 Bezpečnost

Veškerá laserová zařízení spadají pod nařízení vlády č. 1/2008 Sb. O ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Toto vládní nařízení se vztahuje na umělé zdroje vlnového záření o délkách 100 nm až 1 mm (ultrafialové záření, viditelné záření a infračervené záření).

Elektromagnetické vlny laseru se běžně vyskytují i v přírodě, ale nevyskytují se v takové intenzitě a rovnoběžnostech svazku. Nebezpečí úrazu při práci s laserem se nejvíce týká očí a kůže. Ochrana zavřením očí nebo úhybem je příliš pomalá oproti rychlosti světelného svazku. Existují tabulky pro jednotlivé vlnové délky, které udávají maximální přípustnou dobu vystavení záření tak, aby nedošlo k okamžitému nebo pozdějšímu poranění. Každá tabulka je pro jinak výkonný laser. Nebezpečí úrazu hrozí obzvláště po odrazu od zrcadel [13].

Doba expozice t [s]	$< 10^{-9}$	10^{-9} až 10^{-7}	10^{-7} až $1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$ až $5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$ až 10	10 až 10^3	10^3 až 10^4	10^4 až $3 \cdot 10^6$
Vlnová délka λ [nm]								
180 až 302,5		30 J.m^{-2}						
302,5 až 315	$3 \cdot 10^{10} \text{ W.m}^{-2}$	$C_1 \text{ J.m}^{-2}$ $t < T_1$		$C_2 \text{ J.m}^{-2}$ $t \geq T_1$		$C_3 \text{ J.m}^{-2}$		
315 až 400		$C_1 \text{ J.m}^{-2}$				10^6 J.m^{-2}	10 W.m^{-2}	
400 až 550	$5 \cdot 10^6 \text{ W.m}^{-2}$	$5 \cdot 10^3 \text{ J.m}^{-2}$		$18 \cdot t^{0,75} \text{ J.m}^{-2}$		100 J.m^{-2}		10^2 W.m^{-2}
550 až 700				$t < T_2$		$10^2 \cdot C_3 \text{ J.m}^{-2}$	$10^2 \cdot C_3 \text{ W.m}^{-2}$	
700 až 1050	$5 \cdot 10^6 \cdot C_4 \text{ W.m}^{-2}$	$5 \cdot 10^3 \cdot C_4 \text{ J.m}^{-2}$		$18 \cdot C_4 \cdot t^{0,75} \text{ J.m}^{-2}$			$3,2 \cdot C_4 \text{ W.m}^{-2}$	
1050 až 1400	$5 \cdot 10^7 \text{ W.m}^{-2}$	$5 \cdot 10^2 \text{ J.m}^{-2}$			$90 \cdot t^{0,75} \text{ J.m}^{-2}$		16 W.m^{-2}	
1400 až 10^6	10^{11} W.m^{-2}	100 J.m^{-2}	$5600 \cdot t^{0,25} \text{ J.m}^{-2}$			1000 W.m^{-2}		

Obr. 28 Tabulka pro přímý pohled do svazku²⁷

Na Obr. 28 je zobrazena tabulka, kde jsou zapsány maximální hodnoty ozáření laserem při přímém pohledu do svazku. Na Obr. 29 jsou vidět hodnoty na mezi bezpečnosti pro odražený paprsek nebo plošný svazek vnikající na sítnici.

²⁷ Sbírka zákonů Česká republika: Nařízení č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. 2008. Břeclav: Moraviapress. ISBN 1211-1244.

Doba expozice Vlnová délka t [s] λ [nm]	$< 10^{-9}$		10^{-9} až 10^{-7}	10^{-7} až 10	10 až 10^3	10^3 až 10^4	10^4 až $3 \cdot 10^4$
	200 až 302,5	30 J.m ⁻²					
302,5 až 315	$3 \cdot 10^{10}$ W.m ⁻²	C_1 J.m ⁻²		C_2 J.m ⁻²		C_2 J.m ⁻²	
315 až 400		C_1 J.m ⁻²		10^4 J.m ⁻²		10 W.m ⁻²	
400 až 550	10^{11} W.m ⁻² .sr ⁻¹	$10^5 \cdot C_4 \cdot t^{0,33}$ J.m ⁻² .sr ⁻¹		$2,1 \cdot 10^3$ J.m ⁻² .sr ⁻¹		21 W.m ⁻² .sr ⁻¹	
550 až 700		$10^5 \cdot C_4 \cdot t^{0,33}$ J.m ⁻² .sr ⁻¹		$2,1 \cdot C_3 \cdot 10^3$ J.m ⁻² .sr ⁻¹		21 C ₃ W.m ⁻² .sr ⁻¹	
700 až 1050	$10^{11} \cdot C_4$ W.m ⁻² .sr ⁻¹	$10^5 \cdot C_4 \cdot t^{0,33}$ J.m ⁻² .sr ⁻¹		$3,8 \cdot 10^4 \cdot C_4 \cdot t^{0,33}$ J.m ⁻² .sr ⁻¹		$6,4 \cdot 10^3 \cdot C_4$ W.m ⁻² .sr ⁻¹	
1050 až 1400	$5 \cdot 10^{11}$ W.m ⁻² .sr ⁻¹	$5 \cdot 10^5 \cdot t^{0,33}$ J.m ⁻² .sr ⁻¹		$1,9 \cdot 10^5 \cdot t^{0,33}$ J.m ⁻² .sr ⁻¹		$3,2 \cdot 10^4$ W.m ⁻² .sr ⁻¹	
1400 až 10^6	10^{11} W.m ⁻²	100 J.m ⁻²	$5600 \cdot t^{0,25}$ J.m ⁻²	1000 W.m ⁻²			

Obr. 29 Tabulka pro plošný svazek nebo difúzní odraz²⁸

Na Obr. 30 jsou zapsány maximální hodnoty pro ozáření kůže laserovým paprskem. V těchto třech tabulkách naleznete i konstanty, které jsou zobrazeny v Obr. 31.

Doba expozice Vlnová t [s] délka λ [nm]	$< 10^{-9}$		10^{-9} až 10^{-7}	10^{-7} až 10	10 až 10^3	10^3 až $3 \cdot 10^4$
	200 až 302,5	30 J.m ⁻²				
302,5 až 315	$3 \cdot 10^{10}$ W.m ⁻²	C_1 J.m ⁻²		C_2 J.m ⁻²		$C_2 \cdot 10^3$ W.m ⁻²
315 až 400		C_1 J.m ⁻²		10^4 J.m ⁻²		10 W.m ⁻²
400 až 1400	$2 \cdot 10^{11}$ W.m ⁻²	200 J.m ⁻²	$11 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ J.m ⁻²	2000 W.m ⁻²		
1400 až 10^6	10^{11} W.m ⁻²	100 J.m ⁻²	$5600 \cdot t^{0,25}$ J.m ⁻²	1000 W.m ⁻²		

Obr. 30 Tabulka pro expozici na kůži²⁹

Parametr	Vlnová délka λ [nm]	
	od	do
$C_1 = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$	302,5	400
$T_1 = 10^{0,8(\lambda - 295)} \cdot 10^{-15}$ s	302,5	315
$C_2 = 10^{0,2(\lambda - 295)}$	302,5	315
$T_2 = 10 \cdot 10^{0,02(\lambda - 550)}$ s	550	700
$C_3 = 10^{0,015(\lambda - 550)}$	550	700
$C_4 = 10^{(\lambda - 700) / 500}$	700	1050

Obr. 31 Tabulka konstant³⁰

²⁸ Sbírka zákonů Česká republika: Nařízení č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. 2008. Břeclav: Moraviapress. ISBN 1211-1244.

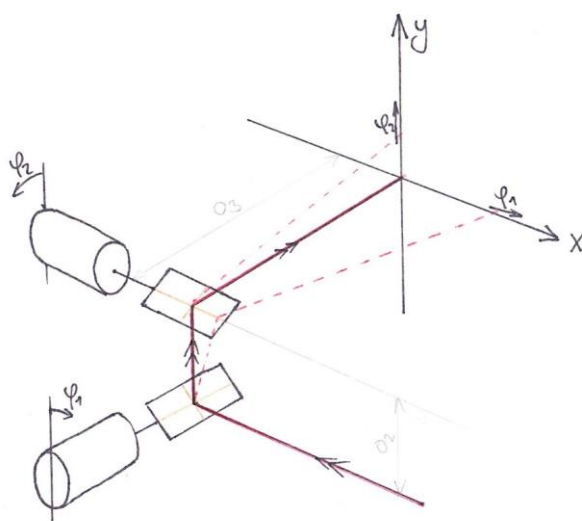
²⁹ Sbírka zákonů Česká republika: Nařízení č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. 2008. Břeclav: Moraviapress. ISBN 1211-1244.

³⁰ Sbírka zákonů Česká republika: Nařízení č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. 2008. Břeclav: Moraviapress. ISBN 1211-1244.

5 Matematický model

5.1 První varianta

Nejdříve se řešila problematika základní geometrie. Osy rotace zrcátek leží v tomto případě přesně v odrazové ploše. Primárně bylo důležité získat dopřednou a inverzní závislost mezi natočením zrcátek a polohou promítaného bodu na natočené ploše. Pokud inverzní i dopředná závislost bude zobrazovat stejné výsledky, můžeme si být jistí, že geometrie je správně popsána a lze ji aplikovat na experimentální model.

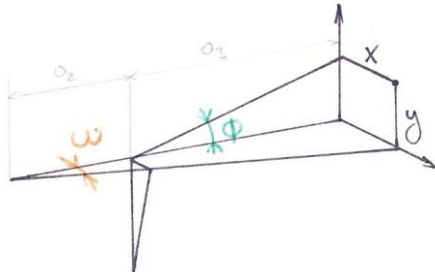


Obr. 32 Základní geometrie pro goniometrickou úlohu

Do dopředné závislosti vložíme hodnoty úhlů natočení zrcátek a získáme hodnoty souřadnic promítaného bodu. U zpětné (inverzní) je to naopak. Vložíme souřadnice promítaného bodu a získáme úhly natočení zrcátek.

5.1.1 Základní geometrie

Z Obr. 33 je patrná závislost vyjádřená v rovnici 1.1 a 1.2 pomocí funkce tangens. Nejdříve zjišťujeme parametry bez naklonené promítací plochy.

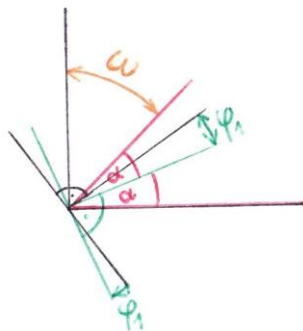


Obr. 33 Naklonené souřadnice bodu

$$\operatorname{tg}(\omega) = \left(\frac{x}{o_2 + o_3} \right) \quad (1.1)$$

$$\operatorname{tg}(\phi) = \left(\frac{y}{o_3} \right) \quad (1.2)$$

Další podstatná závislost je mezi natočením normály odrazové plochy a úhlu vychýlení laserového paprsku. Počáteční natočení zrcátka je vždy 45° od příchozího paprsku, aby příchozí a odchozí paprsek svíraly mezi sebou pravý úhel. Z Obr. 34 vyjádříme rovnicemi 1.3 a analogicky pak pro druhé zrcátko rovnicí 1.4.



Obr. 34 Závislost natočení zrcátka a odrazového úhlu omega

$$\omega = 2 * \varphi_1 \quad (1.3)$$

$$\phi = 2 * \varphi_2 \quad (1.4)$$

Dále je nutné si zobrazit obecné naklonění promítací plochy a vypočítat polohu bodu A' na naklonené ploše (zobrazeno na Obr. 35). Nový bod A' neleží na původní přímce laserového paprsku, proto se musí vypočítat i jiné naklápěcí úhly (ω' a ϕ'), které podléhají podobným závislostem jako 1.1 až 1.4.

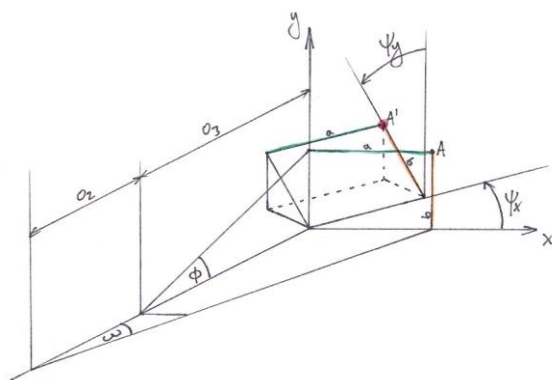
Na Obr. 35 a Obr. 36, kde a a b jsou souřadnice bodu A, zjistíme tyto závislosti:

$$b_s = b * \sin(\Psi_y) \quad (1.5)$$

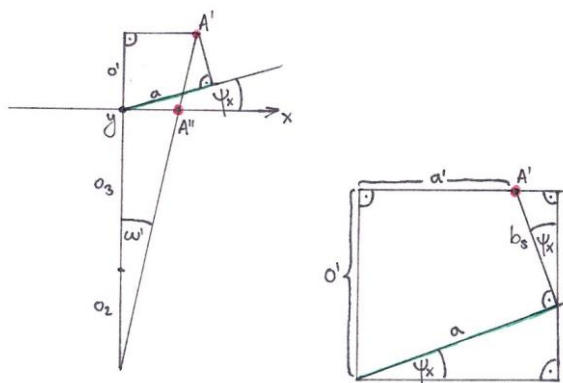
$$a' = a * \cos(\Psi_x) - b * \sin(\Psi_x) * \sin(\Psi_y) \quad (1.6)$$

$$o' = a * \sin(\Psi_x) + b * \cos(\Psi_x) * \sin(\Psi_y) \quad (1.7)$$

$$\text{tg}(\omega') = \frac{a'}{o' + o_2 + o_3} \quad (1.8)$$



Obr. 35 Naklopení souřadnicového systému

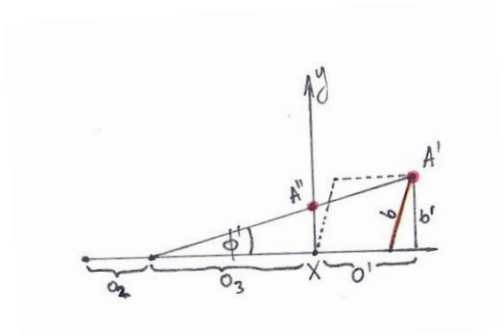


Obr. 36 Pohled shora na naklopený souřadnicový systém

Z Obr. 37 pak závislosti doplníme ještě o:

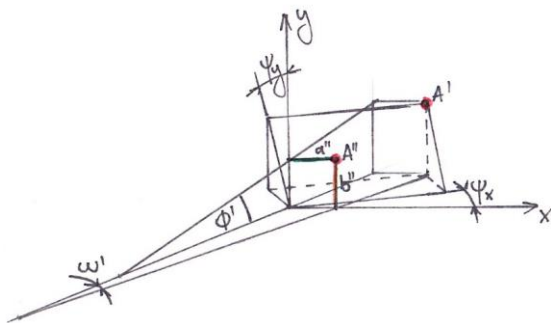
$$b' = b * \cos(\Psi_y) \quad (1.9)$$

$$\operatorname{tg}(\Phi') = \frac{b'}{o' + o_3} \quad (1.10)$$



Obr. 37 Pohled z boku na naklonený souřadnicový systém

Pro kontrolu dopředné a inverzní závislosti jsme si vytvořili bod A'' na imaginární ploše, na kterou by bylo promítáno, kdyby se promítací plocha naklopila do počátečního stavu (tzn. bez naklopení od obou os). Natočení zrcátěk však zůstalo stejné. Pokud by souřadnice bodu A'' byly stejné v obou případech, můžeme si být jistí, že jsou závislosti správné.



Obr. 38 Kontrolní bod A''

5.1.2 Matlab 1

Nejdříve bylo nutné upravit závislosti do vztahů, se kterými Matlab dokáže pracovat. Prvními kódy se staly funkce dopředné a inverzní metody. Jejich kódy jsou na Obr. 39 a Obr. 40.

```
function[a,b,a3,b3]=prdoopr(filu, fi2u,o2,o3,x,y)

natx=x*pi/180; %natoceni/naklopeni osy x - rotace kolem y
naty=y*pi/180; %natoceni/naklopeni osy y - rotace kolem x
fi1r=2*filu*2*pi/360;
fi2r=2*fi2u*2*pi/360;

p=sin(natx)*tan(fi1r)-cos(natx);

b=tan(fi2r)*(o3-sin(natx)*tan(fi1r)*(o2+o3)/p)/(cos(naty)-sin(naty)*(cos(natx)*tan(fi2r)+
+(sin(natx)*sin(natx)+tan(fi1r)*sin(natx)*cos(natx))/p));

a=sin(naty)*(-b*sin(natx)-tan(fi1r)*(b*cos(natx)+o2+o3))/p;
o1=b*sin(naty)*cos(natx)+a*sin(natx);
a2=a*cos(natx)-b*sin(natx)*sin(naty);
b2=b*cos(naty);

a3=a2*(o2+o3)/(o1+o2+o3);
b3=b2*(o3)/(o1+o3);
```

Obr. 39 Dopředná funkce

```
function[filu,fi2u,a3,b3,a2,b2,o1]=prinrv(a, b, o2, o3, x, y)

natx=x*pi/180; %natoceni/naklopeni osy x - rotace kolem y
naty=y*pi/180; %natoceni/naklopeni osy y - rotace kolem x
o1=b*sin(naty)*cos(natx)+a*sin(natx);
a2=a*cos(natx)-b*sin(natx)*sin(naty);
b2=b*cos(naty);
fi1r=atan(a2/(o1+o2+o3));
fi2r=atan(b2/(o1+o3));

filu=fi1r/2/2/pi*360;
fi2u=fi2r/2/2/pi*360;
a3=a2*(o2+o3)/(o1+o2+o3);
b3=b2*(o3)/(o1+o3);
```

Obr. 40 Inverzní funkce

Na správnost vztahů byla vytvořena zkouška, která porovnává výpočet imaginárního bodu A" z obou metod. Kód zkoušky je zobrazen na

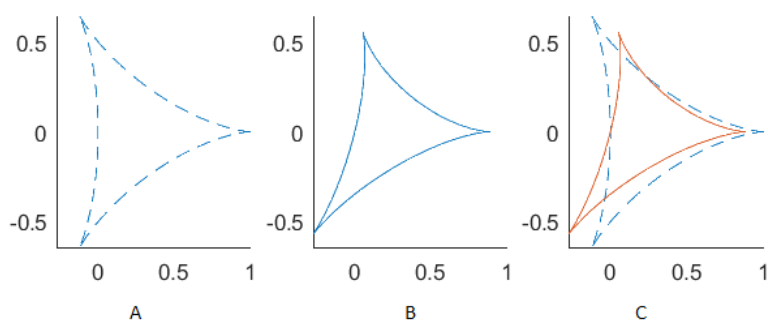
```
%zkouska:
[a,b,a4,b4]=prdoopr(10,10,10,20,5,45);
[j,k,a3,b3,a2,b2,o1]=prinrv(a,b,10,20,5,45);
%j a k by neměly vyjít hodnoty jako zadané v dopředné, jsou to nové úhly
%a4!=a3 a b4!=b3 na imaginární ploše

% [a,b,a3,b3]=prdoopr(filu, fi2u,o2,o3,x,y)
% [filu,fi2u,a3,b3,a2,b2,o1]=prinrv(a, b, o2, o3, x, y)
% A=[a,b], A"=[a4,b4]
% filu, fi2u jsou úhly zrcátka ve stupních
% x,y je naklopení promítací plochy ve stupních
% a2=a' b2=b'
```

Výsledky:

a	13.2585
a2	12.2262
a3	8.6551
a4	8.6551
b	15.9316
b2	11.2654
b3	6.9586
b4	6.9586
j	8.0465
k	9.5922
o1	12.3780

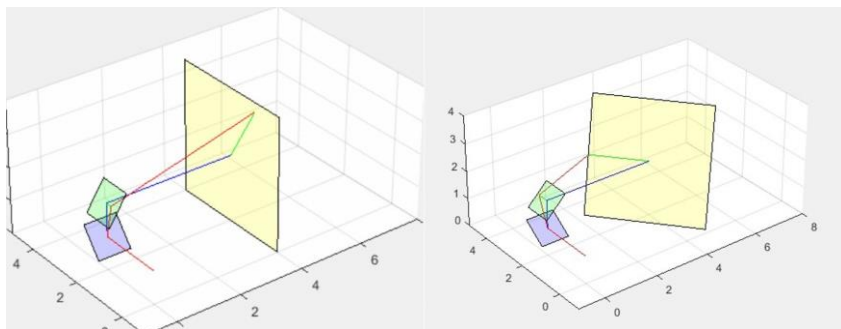
Obr. 41 Zkouška dopředné a inverzní metody



Obr. 42 Test naklopení

Po kladném výsledku zkoušky byl zhotoven model 2D grafu (zobrazen na Obr. 42). V prvním okně A grafu je obrazec promítaný na nakloněnou rovinu. V okně B je obrazec, který by se promítl na imaginární plochu bez naklopení. V okně C jsou pak obrazce pospolu. Rotace promítací plochy je 45° kolem osy y a 20° kolem osy x.

Model 2D grafu nebyl vizuálně dostačující. Byl proto zhotoven kód, který vytváří 3D model s zobrazováním laserem a je na něm vidět i naklápění samotných zrcátek při promítání. U modelu lze nastavit vzdálenost o2 – vzdálenost mezi osami zrcátek, o3 – vzdálenost mezi druhým zrcátkem a promítací plochou a naklopení promítací plochy. Graf 3D modelu na Obr. 43 je doplněn o červené úsečky, které simulují vychýlený paprsek, a modré úsečky, které simulují počáteční polohu a zároveň o2 a o3.



Obr. 43 Nenakloněná a nakloněná promítací plocha – vykreslování kružnice

Kód pro naklopenou plochu můžete vidět na Obr. 44.

```
view(3);

o2=1;
o3=4;
rotx=-40; %naklopení steny kolem osy x
roty=20; %naklopení steny kolem osy y

axis equal; grid on
xlim([-1 o3+4]);
ylim([-1 5]);
zlim([0 o2+3]);
camproj('perspective')

pocet_bodu = 5;
laser = line(zeros(1,pocet_bodu),zeros(1,pocet_bodu),zeros(1,pocet_bodu),'Color','red');
osa = line([0 0 o3],[2 2 2],[1 1+o2 1+o2],'Color','blue');
os1 = line([0 0],[2 2],[1+o2 1+o2],'Color','green');
os2 = line([o3 o3],[2 2],[1+o2 1+o2],'Color','green');

tzr1= hgtransform;
tzr2= hgtransform;
tklop= hgtransform;

% zed = patch([4 4 4 4],[0 0 4 4],[0 4 4 0],ones(1,4),'FaceColor','yellow','FaceAlpha', 0.1)
klop = patch([0 0 0 0],[2 2 -2 -2],[2 -2 -2 2],ones(1,4),'FaceColor','yellow','Parent',tklop,'FaceAlpha', 0.2);
zr1 = patch([0.5 0.5 -0.5 -0.5],[0.5 -0.5 -0.5 0.5],[0 0 0 0],ones(1,4),'FaceColor','blue','Parent',tzr1,'FaceAlpha', 0.2);
zr2 = patch([0.5 0.5 -0.5 -0.5],[0.5 -0.5 -0.5 0.5],[0 0 0 0],ones(1,4),'FaceColor','green','Parent',tzr2,'FaceAlpha', 0.2);

for i=0:0.01:2*pi;
    %vypocet pozadovane polchy
    z=2;
    X_end=x*cos(i);
    Y_end=y*sin(i);
    %inverzni
    [f11,f12,a3,b3,a2,b2,o1]=prinv(X_end,Y_end,o2,o3,rotx,roty);
    f1z=f11*2*pi/360;
    f1r=f12*2*pi/360;
    o=tan(f1z*2)*(o2)+2;

    x1 = [0 0 0 o1+o3];
    y1 = [0 2 c a2+2];
    z1 = [1 1 1+o2 b2+1+o2];

    set(laser,'XData',x1,'YData',y1,'ZData',z1);

    xos1=[0 0];
    yos1=[2 c];
    zos1=[1+o2 1+o2];
    set(os1,'XData',xos1,'YData',yos1,'ZData',zos1);
    xos2=[o3 o1+o3];
    yos2=[2 a2+2];
    zos2=[1+o2 b2+1+o2];
    set(os2,'XData',xos2,'YData',yos2,'ZData',zos2);

    Tyz = makehgtform('translate',[0 2 1]);
    Trx = makehgtform('xrotate',pi/4-f1r);
    set(tzr1,'Matrix',Tyz*Trx);

    Tyz2 = makehgtform('translate',[0 2 1+o2]);
    Try = makehgtform('yrotate',-pi/4-f1z);
    set(tzr2,'Matrix',Tyz2*Try);

    Tset = makehgtform('translate',[o3 2 1+o2]);
    %Tr = makehgtform('yrotate',roty*pi/180,'zrotate',rotx*pi/180);
    Tx = makehgtform('zrotate',-rotx*pi/180);
    Ty = makehgtform('yrotate',roty*pi/180); % v grafu je osa z, kdežto v papirech má x jako v promítací ploše
    set(tklop,'Matrix',Tset*Tx*Ty);

    pause(0.01);
end
```

Obr. 44 Kód pro 3D graf

Kód byl následně ještě rozšířen o modul zajišťující ukládání animovaných grafů do formátu gif. Kód tohoto modulu je zobrazen na Obr. 45.

```
...
...
filename = 'o2_1o3_4x_0y_0.gif';
pocetsnimku=40;
F(pocetsnimku) = struct('cdata', [], 'colormap', []);
i = 1;
for angle=linspace(0,2*pi,pocetsnimku)
...
...
    drawnow
    F(i) = getframe;
    im = frame2im(F(i));
    [imind,cm] = rgb2ind(im,256);
    % Write to the GIF File
    if i == 1
        imwrite(imind,cm,filename,'gif','Loopcount',inf,'DelayTime',0.005);
    else
        imwrite(imind,cm,filename,'gif','WriteMode','append','DelayTime',0.005);
    end

    i = i + 1;

    pause(0.01);
end
```

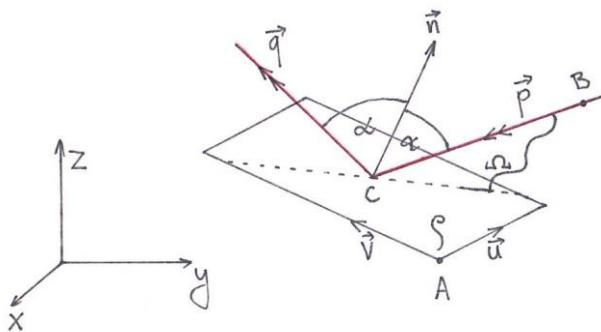
Obr. 45 Kód pro gif

5.2 Druhá varianta

Díky novým poznatkům bylo usouzeno, že první varianta řešení nebude postačující a dostatečně univerzální vůči malým změnám, které nelze zanedbat. Příkladem této změny je vyosení zrcátka byť jen o jediný milimetr. Snaha vyřešit vyosení zrcátka goniometricky dopadla neúspěchem. K univerzálnosti nás dovede maticová metoda. Úloha se tak může rozložit na tři stejné podúlohy, které budeme řešit analytickou geometrií.

5.2.1 Konstrukční geometrie

Rozložením celé úlohy vzniká podstatně jednodušší podúloha oproti goniometrické metodě. Celá geometrie podúlohy je ilustrována na **Chybal Nenalezen zdroj odkazů..** Jedná se o rovinu p volně položenou v prostoru, kterou definuje bod A a dva vektory U a V . Rovina p představuje zrcátko pouze s jedním stupněm volnosti (rotace). Vektor P představuje příchozí paprsek a definuje ho bod B a jeho směr v prostoru. Odrazem vektoru P od roviny p v bodě C vzniká vektor Q , který je definován bodem C a úhlem α podle Schnellova zákona. Vektor Q také náleží rovině Ω , která vzniká z bodu C a vektorů P a N , kde vektor N je normálový vektor roviny p .



Obr. 46 Geometrie podúhly

5.2.2 Matlab 2

Nejdříve byl vytvořen kód „Ray_bounce.m“, který naleznete v příloze na CD a kterým lze vypočítat bod C a vektor odchozího paprsku Q z Obr. 46. Poté byly vytvořeny dva kódy využívající tento zásadní kód v navazujících posloupnostech. První kód dopředného vztahu (na Obr. 47) bylo snazší vytvořit, neboť dokáže postupně využívat zadané úhly a vypočítávat souřadnice promítaného bodu. Druhý kód pro inverzní vztah (na Obr. 48) bylo nutné doplnit o výpočet rovnic, kde úhly natočení zrcátek se zapisovaly jako symbolické proměnné. Následný výpočet úhlů $fi1_y$ a $fi2_y$ zajistila funkce vpsolve.

```
function I = dopredna(fi1_y,fi2_y,naklop)

Inic1 % nastavení 1. zrcadla (fi1_y) a laseru
Inic2 % nastavení 2. zrcadla (fi2_y)
Inic3 % nastavení promítací plochy

% s naklopením
% param3.fi_x=naklop.x;
% param3.fi_y=pi/2+naklop.y;

% bez naklopení
param3.fi_x= 0;
fi3_y= pi/2;

ray_out1 = Ray_bounce(param1,fi1_y,ray_in);
%ray_out1 je odraz od prvního zrcadla
ray_out2 = Ray_bounce(param2,fi2_y,ray_out1);
%ray_out2 je odraz od druhého zrcadla
ray_out3 = Ray_bounce(param3,fi3_y,ray_out2);
%ray_out3 je odraz od promítací plochy

ray_out3 %souřadnice bodu v prostoru

end

Inic1:
% Rovina zrcadla (offset - vyosení zrcátka od rotace)
param1.x_base = 0;
param1.y_base = 1;
param1.z_base = 0;
param1.d_offset = 0;
param1.fi_x = 0;
fi1_y = pi/4; %naklápění zrcátka fi1_y
param1.fi_z = pi/2;

% Vektor paprsku (bod zdroje a směr)
ray_in.ray_source_x = 0;
ray_in.ray_source_y = 0;
ray_in.ray_source_z = 0;

ray_in.ray_vect_x = 0;
ray_in.ray_vect_y = 1;
ray_in.ray_vect_z = 0;

Inic2:
% Rovina zrcadla (offset - vyosení zrcátka od rotace)
param2.x_base = 0;
param2.y_base = 1;
param2.z_base = 1;
param2.d_offset = 0;
param2.fi_x = 0;
fi2_y = pi/4; %naklápění zrcátka fi2_y
param2.fi_z = 0;

Inic3:
% Rovina zrcadla (offset - vyosení zrcátka od rotace)
param3.x_base = 1;
param3.y_base = 1;
param3.z_base = 1;
param3.d_offset = 0;
param3.fi_x = 0; %natočení kolem osy z - jako druhé
fi3_y = pi/2; %naklopení kolem do roviny
param3.fi_z = 0;
```

Obr. 47 Dopředný vztah – maticová metoda

```

function angles = inverzni(point, naklop)
point.x=1;
point.y=1;
point.z=1;

Inic1 % nastavení 1. zrcadla (fi1_y jako syms) a laseru
Inic2 % nastavení 2. zrcadla (fi2_y jako syms)
Inic3 % nastavení promítací plochy
% s naklopením
% param3.fi_x=naklop.x;
% param3.fi_y=pi/2+naklop.y;

% bez naklopení
param3.fi_x = 0;
fi3_y = pi/2;

ray_out1 = Ray_bounce(param1, fi1_y, ray_in);
%ray_out1 je odraz od prvního zrcadla
ray_out2 = Ray_bounce(param2, fi2_y, ray_out1);
%ray_out2 je odraz od druhého zrcadla
ray_out3 = Ray_bounce(param3, fi3_y, ray_out2);
%ray_out3 je odraz od promítací plochy

e1=ray_out3.ray_source_x-point.x;
e2=ray_out3.ray_source_y-point.y;
e3=ray_out3.ray_source_z-point.z;

[f1, f2]=vpasolve([0==e1, 0==e2, 0==e3], [fi1_y, fi2_y], [pi/4, pi/4]);

% f1 % výsledek rovnice = úhlu 1. zrcátka
% f2 % výsledek rovnice = úhlu 2. zrcátka
end

Inic1: % Rovina zrcadla (offset - vyosení zrcátka od rotace)
param1.x_base = 0;
param1.y_base = 1;
param1.z_base = 0;
param1.d_offset = 0;
param1.fi_x = 0;
syms fi1_y %naklápění zrcátka fi1_y
param1.fi_z = pi/2;

% Vektor paprsku (bod zdroje a směr)
ray_in.ray_source_x = 0;
ray_in.ray_source_y = 0;
ray_in.ray_source_z = 0;

ray_in.ray_vect_x = 0;
ray_in.ray_vect_y = 1;
ray_in.ray_vect_z = 0;

Inic2: % Rovina zrcadla (offset - vyosení zrcátka od rotace)
param2.x_base = 0;
param2.y_base = 1;
param2.z_base = 1;
param2.d_offset = 0;
param2.fi_x = 0;
syms fi2_y %naklápění zrcátka fi2_y
param2.fi_z = 0;

Inic3: % Rovina zrcadla (offset - vyosení zrcátka od rotace)
param3.x_base = 1;
param3.y_base = 1;
param3.z_base = 1;
param3.d_offset = 0;
param3.fi_x = 0; %natočení kolem osy z - jako druhé
fi3_y = pi/2; %naklopení kolem do roviny
param3.fi_z = 0;

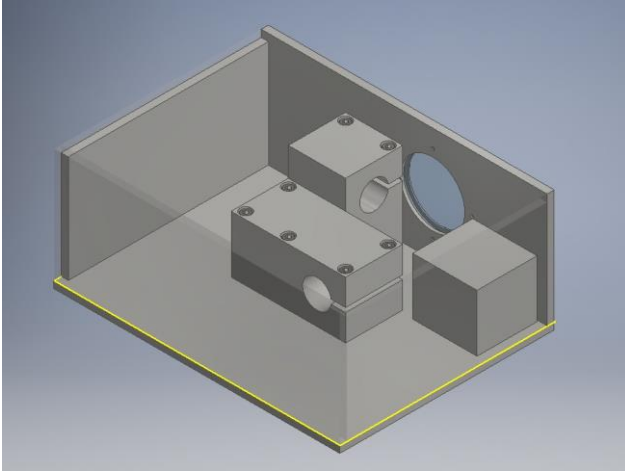
```

Obr. 48 Inverzní vztah – maticová metoda

6 Konstrukce

6.1 První návrh

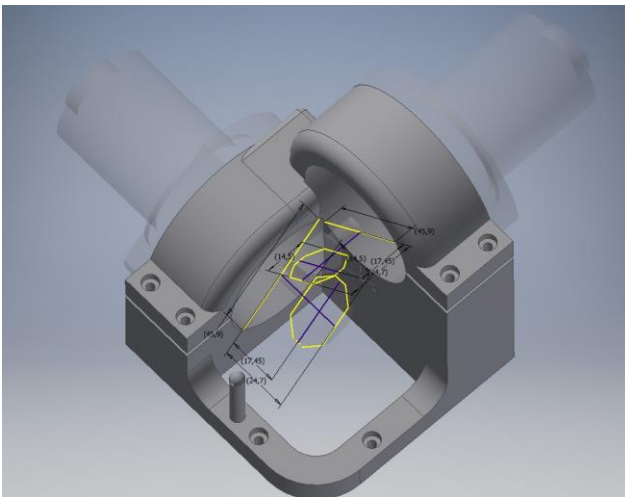
První návrh byl pouze koncepční. Koncept zahrnoval umístění motorů, jejich druh uložení a sevření, polohu laserové hlavy a možnou aparaturu na uzavření do jednoho celku. Koncept je ilustrován na Obr. 49.



Obr. 49 Koncept galvoscanneru

6.2 Druhý návrh

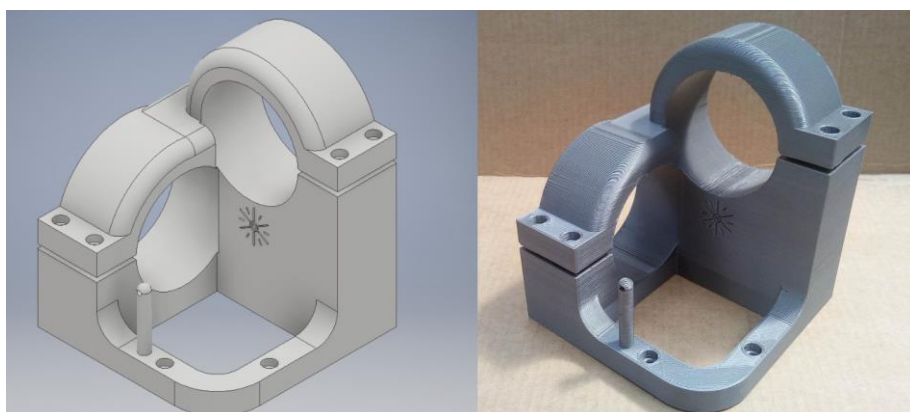
Po získání motorů s enkodéry byl zkoncipován druhý model vytvořený pro konkrétní rozměry motorů. Modely byly vytvořeny v programu Inventor od firmy Autodesk. Model je zobrazen na Obr. 50.



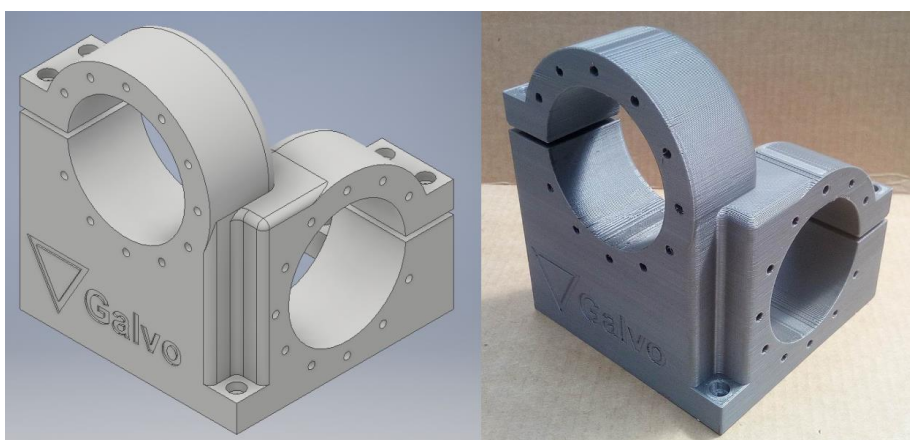
Obr. 50 Držák na motory

Osy zrcátek jsou od sebe vzdáleny na nejmenší bezpečnou vzdálenost při plném otočení motorů. Čím blíže jsou zrcátka u sebe, tím širší je zorný úhel promítání, pokud se při pohybování nebudou dotýkat.

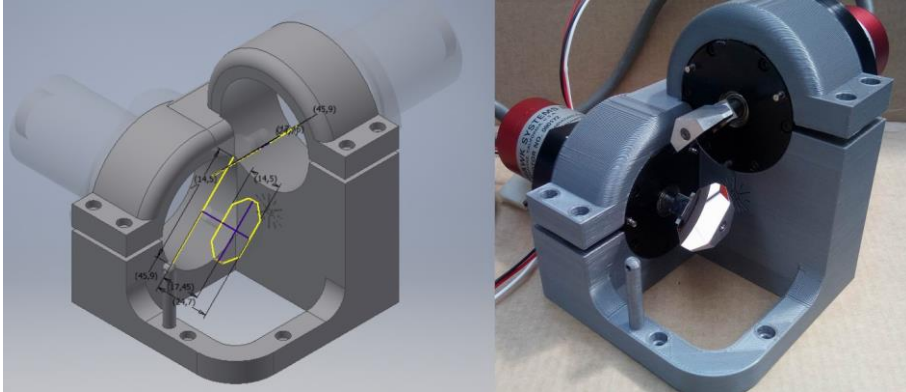
Plastový model vytiskl Bc. Ondřej Pištora na své 3D tiskárně. Fotky modelu jsou zobrazeny na Obr. 51 a Obr. 52. Na Obr. 53 a Obr. 54 je pak zobrazen model i s umístěnými motory s enkodéry a zrcátka.



Obr. 51 3D model přední strany

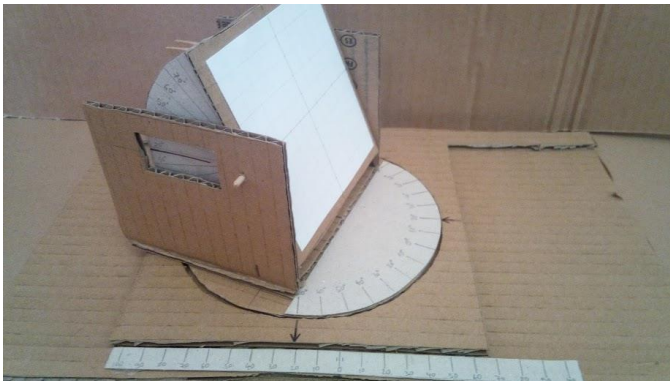


Obr. 52 3D model zadní strany



Obr. 53 Model s motory

Dalším důležitým výrobkem byla naklápěcí stěna pro testování jednotlivých vzdáleností a různých úhlů naklopení promítací plochy. Je důležité, aby vše rotovalo kolem počátečního bodu tzn. aby se při neměnném posunu a libovolném natočení středový bod promítací plochy nacházel na stejném místě. Model naklápěcí stěny je zobrazen na Obr. 54.



Obr. 54 Model naklápěcí stěny

7 Závěr

V práci byl popsán způsob vytvoření matematického modelu galvoscaneru pro promítání nezdeformovaných obrazců pod libovolným úhlem promítání. V prvních kapitolách byly shromážděny informace o druzích promítání na stěnu a různých typech projektorů. V další kapitole následovalo seznámení se servomechanismy a jejich řízením. V následující teoretické kapitole byly nashromážděny základní údaje o galvoscanerech a jejich využití. Celá jedna kapitola byla pak věnována bezpečnosti práce s neionizujícím zářením.

V této práci byly vytvořeny dva matematické modely galvoscaneru. První model byl vytvořen goniometrickou metodou a druhý metodou maticovou, která je mnohem univerzálnější. V závěru práce bylo vytvořeno několik konceptů galvoscanerů a vyrobena skenovací hlava spolu s testovací náklonnou promítací plochou. Sestavení a testování experimentálního modelu nebylo z časových důvodů uskutečněno, ale na tomto projektu se bude nadále pracovat.

8 Zdroje

- [1] Kultura v Číně. In: *ESOtravel* [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <https://cina.esotravel.cz/kultura/>
- [2] SADOUL, Georges. *Histoire de l'art du cinéma (1951): Dějiny filmu, Od Lumiéra až do doby současné*. Praha: Orbis, 1958. 486 s.
- [3] 03_dataprojektory.pdf. In: *Outech-Haviřov* [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: http://www.outech-havirov.cz/chmiel/files/dt/mdt/03_dataprojektory.pdf
- [4] DLP projektory. In: *J.Reichl - Encyklopedie fyziky* [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1566-dlp-projektory>
- [5] LCoS projektory. In: *J.Reichl - Encyklopedie fyziky* [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1567-lcos-projektory>
- [6] Laserové projektory. In: *J.Reichl - Encyklopedie fyziky* [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1568-laserove-projektory>
- [7] Laserové projektory - typ I. In: *J.Reichl - Encyklopedie fyziky* [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1569-projektory-typu-i>
- [8] Laserové projektory - typ II. In: *J.Reichl - Encyklopedie fyziky* [online]. 2018 [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/157-projektory-typu-ii>
- [9] KEANE, John. *FULL STATE FEEDBACK CONTROL OF GALVANOMETER SCANNING SYSTEM* [online]. Dublin, 1994 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: http://doras.dcu.ie/18798/1/John_Keane.pdf. Dublin city university.
- [10] LUO, Xi, Jin LI a Mark LUKAS. *Galvanometer Scanning Technology for Laser Additive Manufacturing* [online]. USA, 2017 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://www.cambridgetechnology.com/sites/default/files/2017%20SPIE%20Galvanometer%20Scanning%20Technology%20for%20Laser%20Additive%20Manufacturing%20Paper.pdf>. Cambridge.
- [11] KAŠPAR, Milan. *Laserové skenovací systémy a uplatnění ve stavebnictví* [online]. 2.1.2016 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/laserove-skenovaci-systemy-a-uplatneni-ve-stavebni/>
- [12] LEONARDO, Technology. [online]. 3/2015 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:24973/znacici-a-gravirovaci-lasery-solaris-v-digitalni-podobě>
- [13] SVOBODA, Pavel. *Laserový projektor*. Brno, 2015. Diplomová práce. VUT Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.
- [14] *Měřený objekt, přístroje a snímače* [online]. 2014 [cit. 2018-08-05]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka/Data/mereni_polohy/uvod.htm
- [15] Casio's Laser and Led hybrid light source. *Casio computer* [online]. 2018 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <https://web.casio-intl.com/projector/event/201602/>

- [16] *Malé servomechanismy pro robotiku a mechatroniku* [online]. 2011 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/wp-content/uploads/2011/10/servomechanismy.pdf>
- [17] RON, Martin. *Řízení polohového servomechanismu s ohledem na dynamickou tuhost výstupu* [online]. 2012 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/c/c3/Bp_2012_ron_martin.pdf. Bakalářská práce. CVUT FEL. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Honců, CSc.
- [18] *Regulační technika* [online]. 2012 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=18785&revision=-1&instance=2>
- [19] NEDELKOVSKI, Dejan. *Arduino DC Motor Control Tutorial – L298N | PWM | H-Bridge* [online]. 2017 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-dc-motor-control-tutorial-l298n-pwm-h-bridge/>
- [20] *Fast Current Loop Library* [online]. Texas Instruments, 2017 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sprac80/sprac80.pdf>
- [21] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2007, 137 s. ISBN 978-80-01-03730-0. Skripta.
- [22] PETR, Kolář. *Senzory pro měření rychlosti* [online]. [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/bmms/.%5Cprojekty_2004%5CKolar%5Csenzor%20rychlosti.html. Semestrální práce. FEKT VUT.
- [23] *Galvanometer* [online]. 2008 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <https://prugalvanometer.weebly.com/history.html>
- [24] *F-Theta Scan Lenses* [online]. 2018 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6430
- [25] *LaserDock Lasershow Projectors: LD1000 Home Laser Show System* [online]. 2018 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://www.magnumlighting.com/ld1000/images/LD1000-Manual-20180113.pdf>
- [26] *Goniometrie* [online]. FEL CVUT, Katedra matematiky, 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://math.feld.cvut.cz/0educ/predpokl/msu4.pdf>
- [27] STRACHOTA, Pavel. *Geometrické transformace pomocí matic* [online]. FJFI CVUT v Praze, 2010 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: http://saint-paul.fjfi.cvut.cz/base/sites/default/files/POGR/POGR2/07.maticove_transformace.pdf

9 Seznam obrázků

Obr. 1 CRT barevný projektor – princip.....	14
Obr. 2 Zrcadla v DMD čipu - zvětšení.....	15
Obr. 3 DLP projektor - princip.....	15
Obr. 4 LCD panel - princip.....	16
Obr. 5 LCD projektor - princip.....	17
Obr. 6 LCoS čip – aktivní a neaktivní tekuté krystaly.....	17
Obr. 7 LCoS projektor – vnitřní uspořádání.....	18
Obr. 8 LED projektor - princip.....	19
Obr. 9 LED-laser hybrid projektor - princip.....	19
Obr. 10 Laserový projektor s modulátorem - princip.....	21
Obr. 11 Kombinace tří barevných filtrů.....	22
Obr. 12 Smyčka zpětnovazebního řízení.....	22
Obr. 13 Kontrolní smyčky.....	23
Obr. 14 H-Bridge.....	24
Obr. 15 PWM - poloha.....	25
Obr. 16 PWM – Pulsně šířková modulace.....	25
Obr. 17 Pás enkodéru.....	27
Obr. 18 Dva druhy kotoučů enkodéru.....	27
Obr. 19 Skenovací hlava.....	28
Obr. 20 Hranol polygonálního skeneru.....	29
Obr. 21 Zrcadla pro galvoscanery.....	30
Obr. 22 F-Lens.....	30
Obr. 23 Leica HDS 3000.....	31
Obr. 24 Popisování laserem.....	32
Obr. 25 Metoda SLM.....	32
Obr. 26 Promítání na stěnu.....	33
Obr. 27 Základní geometrie.....	34
Obr. 28 Tabulka pro přímý pohled do svazku.....	35
Obr. 29 Tabulka pro plošný svazek nebo difúzní odraz.....	36
Obr. 30 Tabulka pro expozici na kůži.....	36
Obr. 31 Tabulka konstant.....	36
Obr. 32 Základní geometrie pro goniometrickou úlohu.....	37
Obr. 33 Naklonené souřadnice bodu.....	38
Obr. 34 Závislost natočení zrcátka a odrazového úhlu omega.....	38
Obr. 35 Naklonění souřadnicového systému.....	39
Obr. 36 Pohled shora na nakloněný souřadnicový systém.....	39
Obr. 37 Pohled z boku na nakloněný souřadnicový systém.....	40
Obr. 38 Kontrolní bod A".....	40
Obr. 39 Dopřená funkce.....	41
Obr. 40 Inverzní funkce.....	41
Obr. 41 Zkouška dopředné a inverzní metody.....	41
Obr. 42 Test naklonění.....	42
Obr. 43 Nenaklonená a nakloněná promítací plocha – vykreslování kružnice.....	42
Obr. 44 Kód pro 3D graf.....	43
Obr. 45 Kód pro gif.....	44
Obr. 46 Geometrie podúlohy.....	45

Obr. 47 Dopředný vztah – maticová metoda.....	45
Obr. 48 Inverzní vztah – maticová metoda.....	46
Obr. 49 Koncept galvoscaneru	47
Obr. 50 Držák na motory.....	47
Obr. 51 3D model přední strany	48
Obr. 52 3D model zadní strany	48
Obr. 53 Model s motory	49
Obr. 54 Model naklápěcí stěny.....	49