



Detekce výrobků ze skla pomocí laserového paprsku

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 - Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 - Strojní inženýrství
Autor práce: **Marek Donátek**
Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D



Originál zadání

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

6. 6. 2019

Marek Donátek

Poděkování

Děkuji panu Ing. Vlastimilu Hotařovi Ph.D., za trpělivost, vedení a cenné rady, které mi pomohly zpracovat tuto bakalářskou práci. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ondřeji Matúškovi za veškerou odbornou pomoc a za pomoc při experimentech v laboratoři.

Detekce výrobků ze skla pomocí laserového paprsku

Abstrakt

V bakalářské práci se zabývám problematikou snímání tvaru povrchu transparentních materiálů pomocí laseru. V práci jsou uvedeny možné metody snímání povrchu a následného získání tvaru předmětů. Dále je zmíněna detekce povrchu předmětů pomocí laseru, možnosti použití laseru při detekci povrchu transparentních materiálů a problematiku jeho využití. Poté je řešen návrh a konstrukce laboratorního zařízení. Další experimentální část je věnována detekci tvaru skleněného vzorku pomocí bodových laserů.

Klíčová slova

Laser, odraz, sklo, snímání

Detection of glass products using a laser beam

Abstract

This bachelor thesis deals with the problem of scanning the surface shape of transparent materials using a laser. There are possible methods of surface sensing and subsequent obtaining of objects shape. Furthermore, laser surface detection of objects, the possibility of using the laser to detect the surface of transparent materials and the problems of its use are mentioned. Then the design and construction of laboratory equipment is solved. Another experimental part is devoted to the detection of the shape of the glass sample using point lasers.

Keywords

Laser, reflection, glass, scanning

Obsah

Úvod	8
1. Triangulační metody	9
1.1. Aktivní triangulace	9
1.1.1. Světelný paprsek (1D triangulace)	9
1.1.2. Světelný pruh (2D triangulace)	10
1.1.3. Strukturovaný světelný svazek (3D triangulace)	11
1.2. Pasivní triangulace	11
1.2.1. Stereoidění	12
2. Lasery	13
2.1. NUV lasery	14
2.2. NIR lasery	14
3. Detekce povrchu objektů pomocí laseru	14
3.1. Měření vzdálenost/tloušťky	14
3.1.1. Princip	14
3.1.2. Zařízení na trhu	15
3.2. Vytvoření virtuálního 3D modelu	15
4. Možnosti použití laseru pro detekci objektů z transparentních materiálů a objektů s lesklým povrchem	16
4.1. Popis problému	18
4.2. Využití odrazu	18
5. Experimenty	20
5.1. Návrh laboratorního zařízení	20
5.2. Návrh experimentů	22
5.3. Zhotovení a výsledky experimentů	23
5.3.1. Sklon proti směru laseru	23
5.3.2. Sklon ve směru laseru	27
5.3.3. Sklon vlevo ve směru laseru	29
5.3.4. Sklon vpravo ve směru laseru	31
5.3.5. Prohnuté sklo	33
5.4. Vyhodnocení experimentů	35

5.5. Návrh metodiky použití laserů pro detekci tvaru objektů z transparentních materiálů.....	35
6. Možnosti využití metodiky v průmyslové praxi	35
6.1. Použití u transparentních materiálů	35
6.2. Okrajové podmínky	36
6.3. Přínosy a omezení metodiky	36
7. Závěr.....	36
Seznam použité literatury	38
Seznam příloh	39

Úvod

Pro detekci tvaru povrchu objektů se v praxi používají nejrůznější skenery a metody detekce objektu využívající snímání deformace laserového paprsku. Tyto skenery snímají deformaci laseru od tvaru přímo na daném objektu. Výhodou použití laserových skenerů je rychlost snímání a přesnost výsledného modelu. Z tohoto důvodu je vhodné zabývat se možnostmi detekce transparentních materiálů.

U transparentních materiálů, jako je například sklo, je problémové snímat paprsek laseru přímo na povrchu objektu. Paprsek laseru se neodráží jen od vrchní plochy skla, ale také proniká do materiálu, kde se následně odrazí zpět od spodní hrany materiálu. Tato skutečnost vede k chybám a odchylkám ve výsledku snímání. Z tohoto důvodu lze využít snímání projekce odrazu paprsku od objektu na snímací desku a následné určení tvaru z již zmíněného odrazu.

Cílem této práce je navrhnout funkční a nastavitelné laboratorní zařízení, které bude umožňovat snímání odrazu laserových paprsků odražených od kontrolovaného skla. Provést prvotní experimenty pro výzkum metody snímání skla pomocí laseru a stanovit jejich výsledky. Dále navrhnout metodiku pro detekci transparentních materiálů pomocí laseru, z níž se bude vycházet v dalším výzkumu této metody.

1. Triangulační metody

V trigonometrii a geometrii je triangulace způsob zjišťování souřadnic a vzdáleností. Sestrojí se pomyslný trojúhelník (Obr. 1) [4].

Triangulační metody patří mezi nejpoužívanější optické metody měření tvaru a povrchu předmětů. Tyto metody jsou využívány v mnoha odvětvích průmyslu zahrnujících kontrolu kvality povrchů, kde pomáhají detekovat vady povrchu, kontrolu kvality výrobku či vizuální systémy na montážních linkách. Dále je možné je aplikovat k rozpoznávání 3D objektů, při navigaci nebo při zabezpečování prostorů [4].

Pro úspěšné měření povrchu předmětů je důležité, aby se povrchové vlastnosti sledovaného objektu přibližovaly k tzv. Lambertovskému povrchu (také ideálně matný, ideálně difúzní povrch), který odráží světelnou energii rovnoměrně do všech směrů. Jas ze všech směrů je v tomto případě konstantní (nezávisí na směru pohledu). Opačný extrém je tzv. ideální zrcadlový povrch, který odráží ozáření na základě zákona odrazu (úhel odrazu je roven úhlu dopadu). Vlastní povrch předmětu není vidět, ale ukazuje pouze zdánlivý zrcadlově převrácený obraz zdrojů osvětlení. Tento povrch je pro měření problematický. Snímač by musel být umístěn do polohy přesně odpovídající úhlu odrazu [1].

Nevýhodou triangulačních metod je to, že kvůli konkavitám na povrchu předmětu nemusí být promítaný bod, pruh či vzor viditelný. V tomto místě tedy nelze nic říci o povrchu předmětu. Dále pak šedé plochy na obr. 2 označují plochy, které kamera nevidí a dolní část koule není osvětlena laserem. Z tohoto důvodu je třeba u 1D a 2D triangulace skenovat objekt z více pohledů [4].

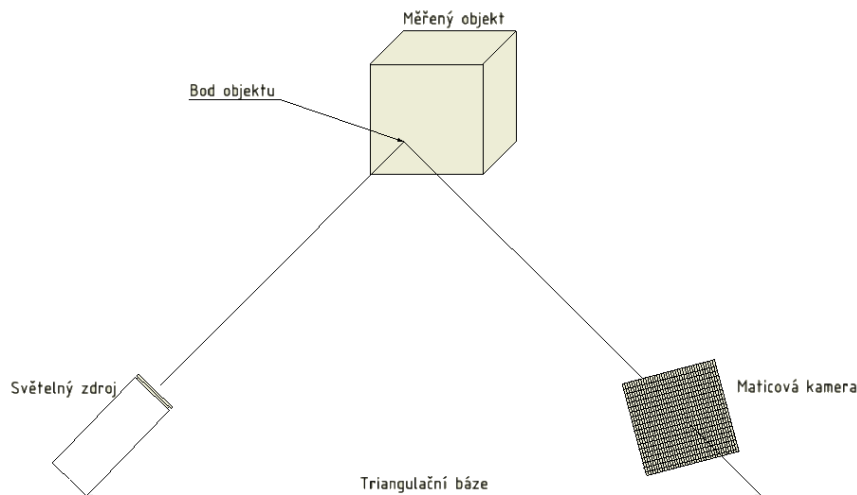
1.1. Aktivní triangulace

Technika aktivní triangulace je založena na fotogrammetrické rekonstrukci snímaného objektu nasvícením jeho povrchu světelným zdrojem a současným snímáním optickým snímačem [4].

1.1.1. Světelný paprsek (1D triangulace)

1D Triangulace je využívána k měření vzdálenosti za pomoci výpočtu úhlu. K tomu využívá světelný zdroj (např. laser), který je namířen na měřený objekt a reflektován do senzoru. Odražený světelný paprsek dopadá na přijímací prvek senzoru pod určitým úhlem

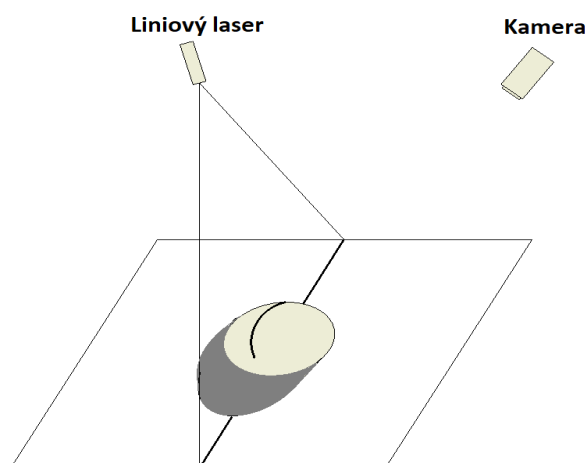
v závislosti na vzdálenosti. Z polohy světelného bodu na přijímacím prvku a vzdálenosti od odesílatele k přijímacímu prvku se v senzoru vypočítá vzdálenost od měřeného objektu. Triangulační trojúhelník je tvořen spojnicemi zdroje světla, snímače a světelným bodem na měřeném předmětu. Spojnice mezi snímačem a světelným zdrojem je nazýváme triangulační bází (základnou) [4].



Obrázek 1: Triangulační trojúhelník [4]

1.1.2. Světelný pruh (2D triangulace)

2D triangulace využívá světelného pruhu (rovinného laseru), který je namířen na zkoumaný objekt. Celá scéna je snímána kamerou. U tohoto druhu zkoumání povrchu objektu nastává zmíněný problém s viditelností (kap.1). Určité problémy mohou také činit předměty, jež jsou téměř rovnoběžné s rovinou laseru. Tyto povrchy budou na snímku méně zřetelné [4].



Obrázek 2: Problematika viditelnosti u 2D triangulace [4]

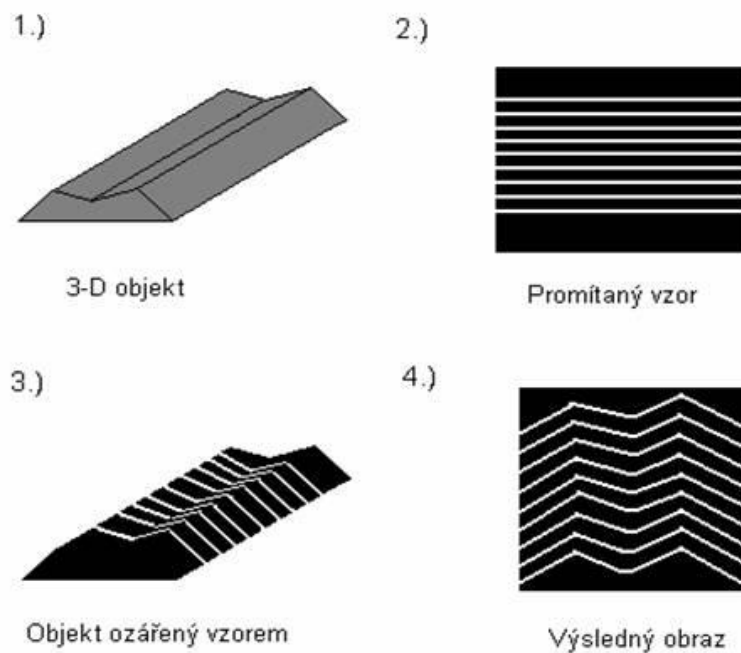
1.1.3. Strukturovaný světelný svazek (3D triangulace)

Při použití strukturovaného světelného svazku je celý objekt označen najednou, což je hlavní výhoda vůči 1D a 2D triangulaci [4].

Techniky založené na 3D triangulaci:

- Technika moiré
- Technika světelného vzoru
- Technika barevného kódu
- Technika fázového posuvu

Jednou z možností 3D triangulace je promítnutí vzoru (např. mřížka, pruhy) na trojrozměrný objekt. Kamera snímá objekt pod určitým úhlem. Následně podle deformace vzoru lze určit tvar zkoumaného objektu [4].



Obrázek 3: Technika světelného vzoru (3D triangulace) [4]

1.2. Pasivní triangulace

Při pasivní triangulaci není uvažováno geometrické uspořádání osvětlení. Základem pasivní triangulace je poříditi minimálně dva snímky (z různého pohledu nebo změněné scény) [4].

Základní metody pasivní triangulace:

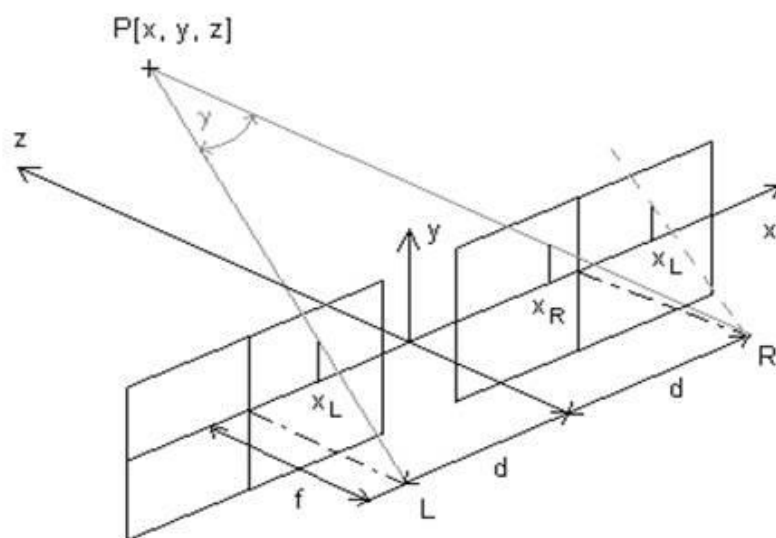
- Více kamer se známou orientací
- Více kamer se samokalibrací
- Jedna kamera v různých polohách se samokalibrací
- Technika „tvar z pohybu“ – jedna kamera a pohybující se objekt

Pro statický případ lze použít pouze jednu kameru, která snímá daný objekt ze dvou a více pohledů. U dynamických systémů je často používáno více kamer. Využívá znalosti statických metod nebo relativních poloh [10,4].

1.2.1. Stereoidění

Stereoidění je často používaná technika, která patří do speciální podskupiny metod s více kamerami [4].

Lidské oko vytváří středový obraz pozorovaného předmětu na sítnici. Pravé a levé oko vytváří na sítnici vždy samostatný obraz, které jsou odlišné. Sdružené zorné paprsky se protínají v příslušném bodě v prostoru. Tudiž při pozorování objektů oběma očima je vidíme prostorově nebo stereoskopicky. Techniky využívající stereoidění se snaží napodobit lidský zrak. Používají dva snímače s rovnoběžnými optickými osami, jejichž vzájemná vzdálenost středů je přibližně stejná jako u lidských očí (asi 65 mm). Pomocí snímačů získáme dva perspektivní obrazy neboli stereoskopické snímky [10,4].



Obrázek 4: Stereoskopické snímky [10]

γ úhlová paralaxa (úhel svíraný sdruženými paprsky)

P měřený bod

L, R ohniska kamer

2d vzdálenost mezi optickými osami kamer

f ohnisková vzdálenost

x_L, x_P souřadnice zkoumaného bodu v obrazové rovině, $z = 0$

Pro body bližší pozorovateli je paralaxa větší než pro body vzdálenější. Aby se prostorové vidění uplatnilo, nesmí její velikost klesnout pod dané minimum [4].

V případě, že se nám podaří k bodu P ve snímku z levé kamery najít odpovídající bod v pravém snímku, lze určit souřadnice x, y, z bodu P podle následujících vztahů:

$$y = y_L \frac{2d}{x_L - x_P} \quad (1)$$

$$x = x_L \frac{2d}{x_L - x_P} \quad (2)$$

$$z = \frac{2df}{x_L - x_P} - f \quad (3)$$

kde $x_L - x_P$ je horizontální paralaxa [10].

Tyto vztahy platí pouze pro nejjednodušší případ, kdy jsou optické osy kamer rovnoběžné s osou z souřadnicového systému, ohnisková vzdálenost obou kamer je stejná a obrazové roviny kamer leží v rovině $z = 0$. Stereoidění lze využít i v případech, kdy se nepodaří dodržet všechny dané požadavky. Pak se pomocí korekčních vztahů převádí tyto případy na nejjednodušší [10].

2. Lasery

Laser (*Light Amplification by Stimulated emission of Radiation*, neboli zesilování světla stimulovanou emisí záření) je optický zdroj elektromagnetického záření. Světlo vyzařované z laseru v úzkém svazku paprsků je koherentní a monochromatické [14].

Lasery mají pestrou škálu využití. Používají se v průmyslu, kde se používají k řezání, sváření nebo gravírování. Dále v medicíně, elektronice, výzkumu, vojenství [14].

2.1. NUV lasery

NUV jsou lasery vyzařující záření blízké ultrafialovému, tj. záření o vlnové délce 360-380 nm. V praxi nachází využití ve spektroskopii, kde se používají helium-kadmiové lasery. Dále excimerové lasery, dusíkové lasery a polovodičové lasery (např. WSLP-375-040m-4, L375P020MLD). Tuto paletu laserů nabízí společnosti Trumpf, Omicron-laser, Wavespectrum-laser [14,15,16].

2.2. NIR lasery

NIR lasery jsou blízké k infračervenému záření, tj. záření o vlnové délce 700-1500 nm. Tyto lasery mají své využití ve strojírenství, chirurgii, spektroskopii, výzkumu. V praxi jsou používány Jodové, neodymové, polovodičové lasery (EYP-RWL-0850-00100-1500-SOT12-0000, EYP-DFB-1083-00030-1500-BFY02-0X0X) od společností Eagleyard, Trumpf [14,15,16]

3. Detekce povrchu objektů pomocí laseru

V praxi jsou hojně využívány skenery, které používají k detekci povrchu laserových paprsků. Využívají se například k měření tloušťky skla, vzdálenosti objektu od pozorovatele nebo ke snímání objektu a následnému vytvoření 3D modelu.

3.1. Měření vzdálenost/tloušťky

K měření tloušťky a vzdálenosti je laser využíván zejména z důvodu rychlosti a přesnosti měření.

3.1.1. Princip

V měřící technologii se k měření vzdálenosti využívá odrazu paprsku tak, že paprsek dopadá na snímací prvek pod určitým úhlem v závislosti na vzdálenosti. Z polohy bodu na snímacím prvku se určí vzdálenost objektu (kap. 1.1).

Pro měření tloušťky transparentních materiálů lze využít skutečnosti, že laserový paprsek se odrazí od horní hrany, ale i od spodní hrany měřeného objektu. Odražené paprsky dopadají na prvek snímače pod určitými úhly v závislosti na vzdálenosti. Senzor, ze vzdálenosti mezi body na prvku snímače, vypočítá tloušťku objektu [1,13].

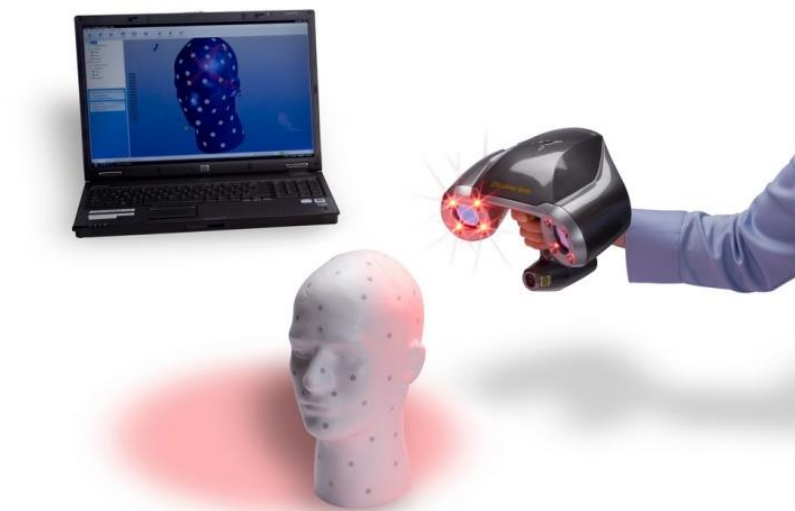
3.1.2. Zařízení na trhu

Na současném trhu je pestrá škála druhů detektorů. Např. laserový detektor pro měření vzdálenosti, detekci povrchu transparentních objektů nebo 3D skenery, které nasnímají daný objekt a vytvoří virtuální 3D model.

Výrobci na trhu je také několik. Patří sem společnost SICK vyrábějící senzory pro detekci transparentních materiálů (např. W2SG-2, W4S-3 Glass nebo W4SL-3). Dále Micro-epsilon nabízející nejrůznější senzory na 2D/3D měření povrchu objektů. Společnost Creaform nabízí širokou škálu 3D skenerů, které vytváří virtuální 3D modely snímaných objektů [5,6,7].

3.2. Vytvoření virtuálního 3D modelu

Měřený objekt je položen na otočnou základnu (lze také využít skenerů, které se okolo objektu otáčejí, např. ruční skener HandySCAN 3D od společnosti Creaform). Za pomoci laseru namířeného na skenovaný objekt a jedné nebo více kamer, které objekt snímají, lze získat data o objektu. Tyto data následně pomocí speciálního softwaru počítač převede na virtuální 3D model snímaného objektu [6].



Obrázek 5: 3D skenování skenerem HandySCAN od společnosti Creaform [6]

3D skenery se hlavně díky přesnosti a spolehlivosti hojně využívají v letectví, automobilovém průmyslu, ale i v kosmickém průmyslu nebo ve zdravotnictví. Nejčastějšími aplikacemi je např. kontrola povrchu součástí, inspekce geometrických prvků nebo uplatnění ve vývoji prototypů nových projektů [6].

4. Možnosti použití laseru pro detekci objektů z transparentních materiálů a objektů s lesklým povrchem

Při dopadu světla na povrch transparentních materiálů dochází k jeho odrazu a lomu.

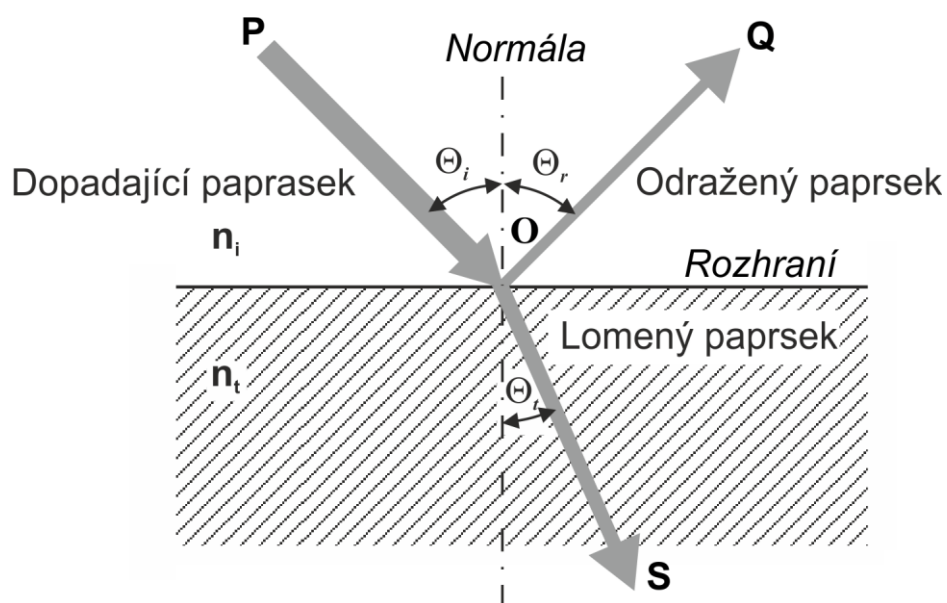
Když světlo přechází z prostředí s indexem lomu n_i (vzduch) do jiného prostředí s indexem lomu n_t (např. sklo), část paprsku se odrazí a část se lomí. Na obr. 6 dopadající paprsek PO dopadá v bodě O na rozhraní dvou prostředí. Poté se rozdělí na odraženou část OQ a část která se lomí OS. (Část záření se pohltí, což je v tomto případě zanedbáno.) Na obrázku jsou také vyznačeny tři úhly, Θ_i úhel dopadu, Θ_r úhel odrazu a Θ_t úhel lomu [3].

Vztah mezi nimi je dán zákonem odrazu:

$$\Theta_i = \Theta_r \quad (4)$$

a lom Snellovým zákonem:

$$\frac{\sin \Theta_i}{\sin \Theta_t} = \frac{n_t}{n_i} \quad (5)$$



Obrázek 6: Odraz a lom paprsku [3]

K odrazu a lomu dochází v rovině dopadu. Složka paprsku, která se odrazí je dána odrazivostí R a složka, která se láme a projde je dána propustností T . V případě, kdy světlo dopadá a odráží se ve směru normály (úhel dopadu $\Theta_i \approx \Theta_r \approx 0$), platí pro odrazivost R_n [3].

$$R_n = \left(\frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \right)^2 \quad (6)$$

Pro běžné sklo ve vzduchu platí, vzduch $n_i = 1$ a sklo $n_t = 1.5$. Pak je odraženo okolo 4 % světla. Světlo se ovšem odráží jak od přední tak i od zadní strany. Kombinaci obou odrazů R_g lze získat z rovnice:

$$R_g = \frac{2R}{(1+R)} \quad (7)$$

a pak se dle výpočtu odrazí asi 7,7 % světla. Tento odraz je pro jednoznačnou detekci skleněného objektu většinou nedostatečný. Tedy osvětlení přímo od kamery (např. prstencové osvětlení) není pro detekci výrobků ze skla většinou vhodné [3].

Jak vyplývá z fyzikálních zákonů, odrazivost se bude zvyšovat s úhlem dopadu a bude ovlivněna i polarizací záření. Po zjednodušení Fresnelových rovnic je pro polarizované světlo v rovině kolmé na rovinu obrázku (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** 6) odrazivost dána rovnicí:

$$R_{\perp} = \left(\frac{n_i \cos \Theta_i - n_t \cos \Theta_t}{n_i \cos \Theta_i + n_t \cos \Theta_t} \right)^2 \quad (8)$$

a v případě, že polarizované světlo je v rovině rovnoběžné s rovinou obrázku (Obr. 6), je odrazivost dána rovnicí:

$$R_{\parallel} = \left(\frac{n_i \cos \Theta_t - n_t \cos \Theta_i}{n_i \cos \Theta_t + n_t \cos \Theta_i} \right)^2 \quad (9)$$

S použitím Snellova zákona:

$$\Theta_t = \arcsin \left[\left(\frac{n_i}{n_t} \right) \sin \Theta_i \right] \quad (10)$$

lze odrazivost R_{\perp} a R_{\parallel} kompletně odvodit z úhlu dopadu Θ_i . V případě, že je světlo nepolarizované, platí:

$$R = \frac{R_{\perp} + R_{\parallel}}{2} \quad (11)$$

4.1. Popis problému

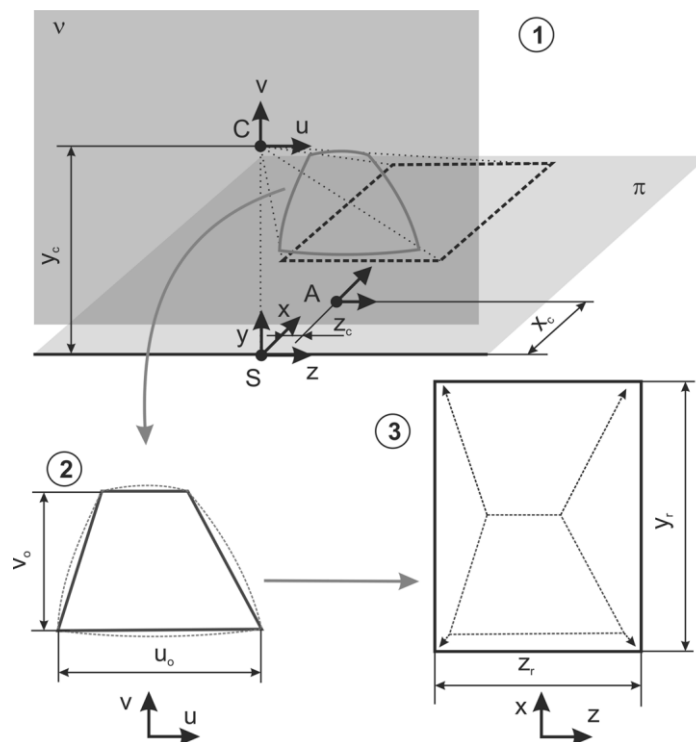
Odraz od skla je stejný jako odraz od zrcadla a nedochází tedy k rozptylu odraženého světla. Tudíž je velice náročné nastavit snímač do správné polohy tak, aby odražený paprsek dopadal přesně na prvek snímače.

U transparentních materiálů (např. u skleněných plochých desek) dochází k lomu o horní hranu objektu, následnému prostupu světla a odrazu o spodní hranu objektu. Po dopadu tohoto odraženého paprsku na prvek snímače může dojít k chybnému naměření dat. Výsledek prováděného měření bude nesprávný.

4.2. Využití odrazu

Detekce tvarů z plochého skla za použití reflexe je založena na třech krocích [3].

1. Snímání objektů pod velkým úhlem pomocí standardní průmyslové kamery s běžným objektivem a získání kontur objektu za pomoci běžných nástrojů obrazové analýzy [3].
2. Korekce - odstraňování geometrických zkreslení jako je distorze snímku a další případné optické defekty [3].
3. Vytvoření počítačového modelu objektů (geometrická transformace) se zahrnutím perspektivy [3].



Obrázek 7: Detekce tvarů z plochého skla za použití reflexe [3]

První dva kroky jsou běžně řešeny a používány ve strojovém vidění. Ve třetím kroku se jedná o návrh přepočtu získaných objektů v souřadnicích snímku (u, v) do reálných souřadnic (x, z). Pro zmíněné tvary z plochého skla je použito zákonitostí jednobodové perspektivy. Před samotným měřením je třeba snímanou scénu řádně kalibrovat, zjistit měřítka a zjistit parametry pro přepočet z pixelů (v ose u, v) na milimetry (v ose x, z). Musí být také zajištěna poloha kamery (ohnisko objektivu, x_c, y_c) a musí být definován začátek souřadného systému (A: x_c, y_c) [3].

U detekce skla složitějšího tvaru je náročnější naskenování objektu. Skenování objektu pod určitým úhlem tak, aby se laserový paprsek vždy odrážel do prvku snímače, je náročné z důvodu složitosti tvaru daného objektu. Skleněný objekt by musel být skenován ze všech stran a pod určitými úhly tak, aby každá strana a nerovnost tvaru byla správně snímačem zachycena. Následně pomocí speciálního softwaru převést data k výslednému virtuálnímu modelu objektu.

5. Experimenty

V dřívějším výzkumu již byl proveden experiment detekce povrchu skla pomocí přímého snímání vzorku. Pro obtížnost zpracování obrazu nebyla tato metoda uvažována pro tento výzkum [17].

Pro experimenty bylo použito ploché sklo. Pro kalibraci byla použita šachovnice s velikostí čtverce 10 mm a zmíněné ploché sklo, které bylo volně položeno na desku pojezdu. Dále byly použity 3 bodové lasery sklopené pod daným úhlem (obr. 8). Odraz těchto laserů od skla byl snímán kamerou umístěnou v horizontální poloze pod úrovní laserů (obr. 8).

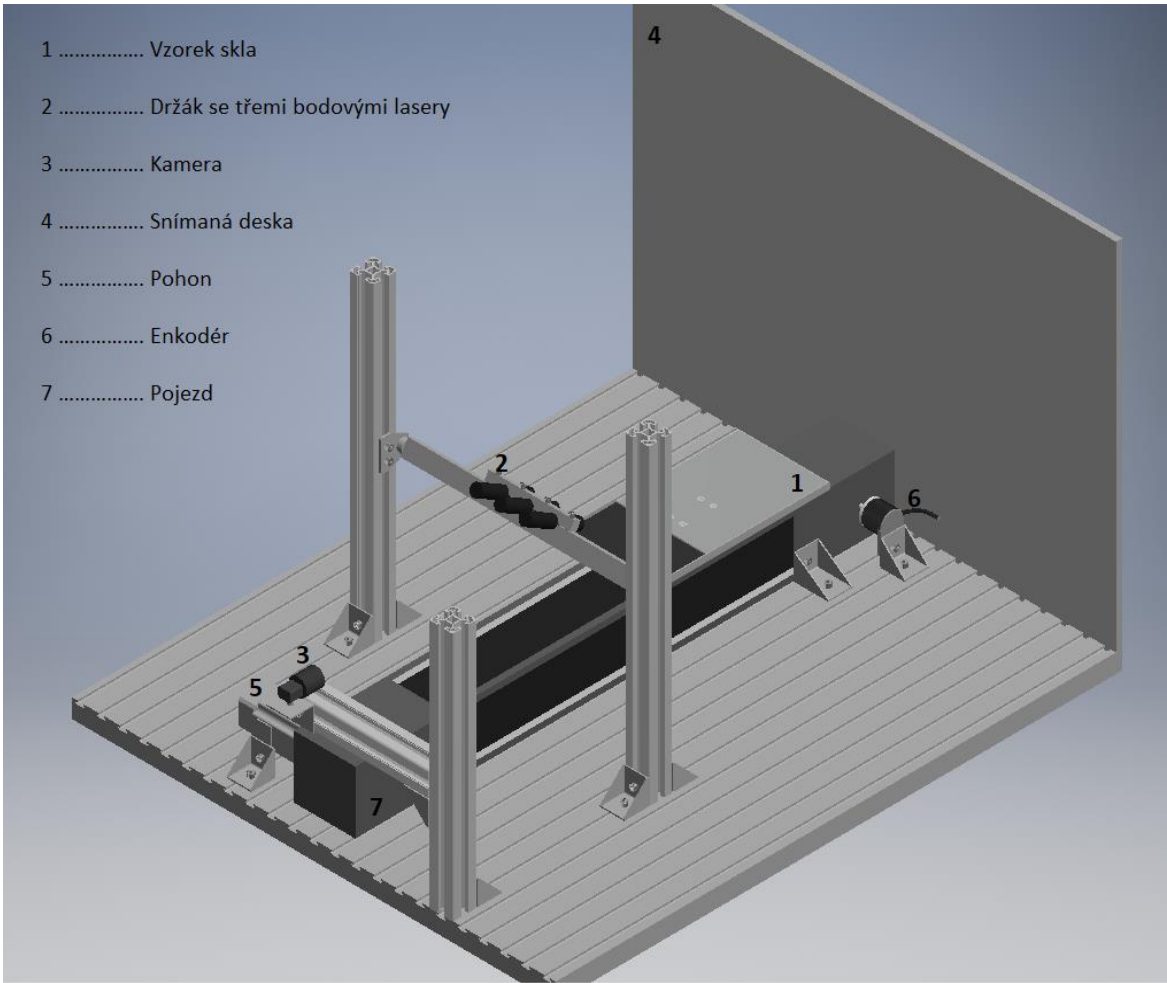
Výše zmíněná šachovnice byla použita pro přepočítání pixelů snímku na milimetry. U snímání kamerou nastal tak zvaný „efekt rybiho oka“, který zkresluje kraje snímku. Vzhledem k umístění odražených bodů do středu snímku byl tento efekt zanedbatelný a tudíž nebylo třeba upravovat přepočítání. Z rozlišení snímku tedy vyplývá, že 1 mm odpovídá 6 pixelům.

5.1. Návrh laboratorního zařízení

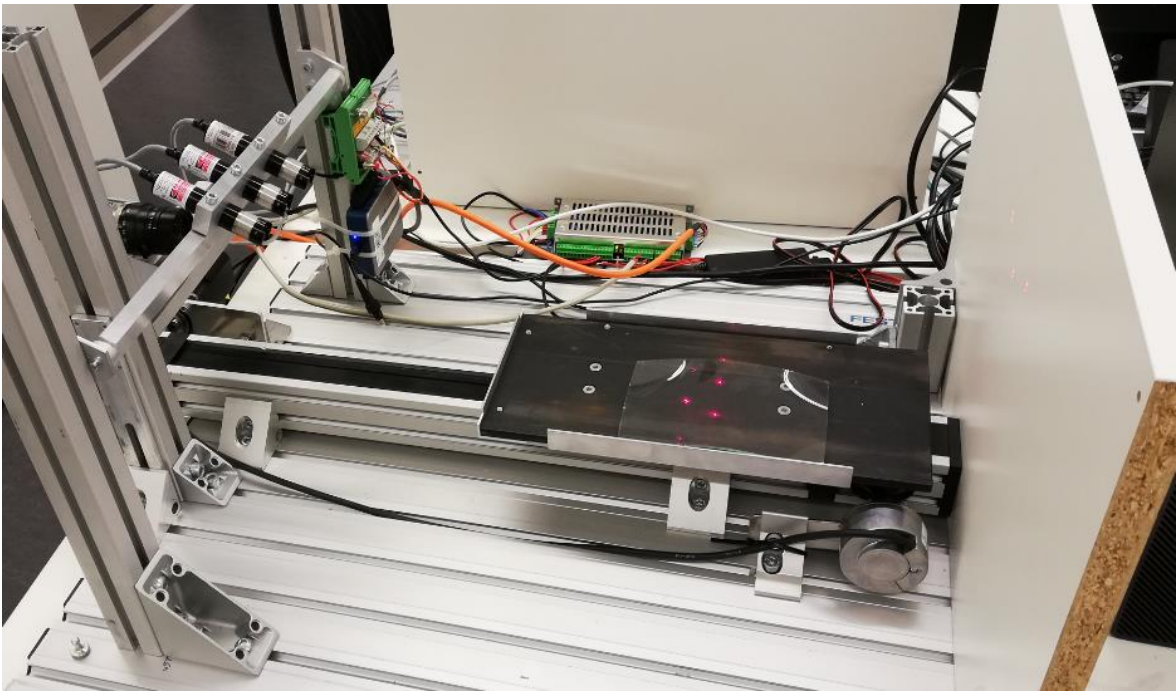
Laboratorní zařízení bylo navrženo pro potřeby tohoto experimentu jako prototyp pro určení metodiky detekce povrchu skla pomocí laseru. Konstrukce tohoto zařízení byla navržena tak, aby co nejlépe a nejjednodušeji splňovala funkčnost pro tento daný experiment.

Navržené zařízení bylo zhotoveno tak, aby umožňovalo horizontálně upevněnou kamerou snímání desky. Tato deska byla upevněna ve vertikální poloze, aby nejlépe zachycovala odrazy červených bodových laserů. Zmíněné lasery byly uchyceny ve speciálně navrženém držáku. Zmíněný držák byl sestaven tak, aby umožňoval naklápění všech tří laserů pod stejným úhlem a ve stejné výšce.

Na pojezdu byla upevněna základní deska, na které byl zkušební vzorek skla. Vzorek byl umístěn tak, aby na něj dopadaly paprsky všech tří laserů. Dané paprsky se tak od sledovaného objektu odrážely na snímanou desku, kde byly následně zaznamenány kamerou. Zmíněný pojezd byl poháněn servomotorem a jeho poloha zachycena pomocí enkodéru.



Obrázek 8: Model laboratorního zařízení



Obrázek 9: Laboratorní zařízení

Toto zařízení bylo sestaveno ze součástí dostupných prvků a dílů v laboratoři. Pouze držák na lasery se nechal zhotovit tak, aby splňoval danou funkčnost. Dále bylo potřeba vyrobit úhelník, na který se připevnila kamera.

5.2. Návrh experimentů

Celkem byly provedeny čtyři experimenty s plochým sklem (100x150 mm) a jeden experiment se sklem prohnutým.

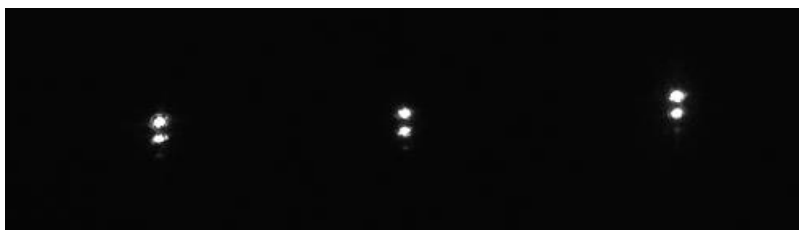
U experimentů s plochým sklem bylo simulováno naklonění vzorku. Toto naklonění bylo uskutečněno pomocí normalizovaných per o výšce 6 mm. Vzorek skla byl vypodložen jedním popřípadě dvěma pery, které byly umístěny vždy na jednom z okrajů vzorku. Náklon byl proveden do čtyř směrů:

- Sklon proti směru laseru
- Sklon ve směru laseru
- Sklon vlevo ve směru laseru
- Sklon vpravo ve směru laseru

U těchto čtyř pokusů byl zhotoven přepočít souřadnic reflektovaných bodů laseru na reálné umístění a reálnou výšku bodů na nakloněném skle. Následně z těchto hodnot byla provedena kontrola tvaru a velikost naklonění daného vzorku.

U experimentu s prohnutým sklem bylo provedeno pouze snímání odrazu tří bodových laserů a zjištění souřadnic těchto bodů. Následný přepočít a kontrola tvaru tohoto vzorku bude předmětem dalšího výzkumu.

Experimenty byly provedeny tak, že vzorek byl položen na základní desku pojezdu. Následně byl spuštěn pojezd a současně byl snímán odraz laserů na desce. Pomocí programu byly snímky uloženy do složky. Z těchto snímků se vzal každý patnáctý a za pomoci přepočtu vytvořeného ze souřadnic daných bodů byly stanoveny reálné hodnoty. Tyto hodnoty byly zaznamenány do tabulek, z nichž byly vytvořeny grafy.



Obrázek 10: Odraz paprsků laseru u plochého skla

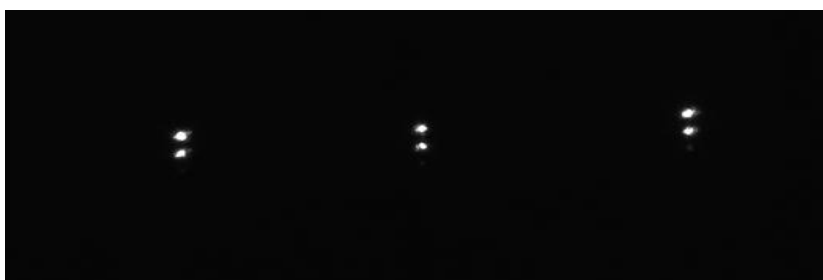
U jednotlivých bodů byl proveden přepočít na milimetry tak, že se každý bod posunul do základní výšky vzorku (do „0“). Hodnoty posunutí bodů byly zjištěny na základě snímání vzorku volně položeného na základní desce. Tedy pro levý bod o $y_0 = 467$ pixelů, pro prostřední bod $y_0 = 471$ pixelů a pro pravý bod o $y_0 = 488$ pixelů. Tyto nepřesnosti byly pravděpodobně způsobeny odchylkou v uchycení laserů v jedné rovině, nepřesným upevněním držáku v rámu, popřípadě nerovností zařízení.

Tyto odchylky lze eliminovat úpravou přepočtu, tj. zhotovit přepočít pro každý bod odděleně. Druhou možností je přesné odladění laboratorního zařízení tak, aby lasery byly v dokonalé rovině.

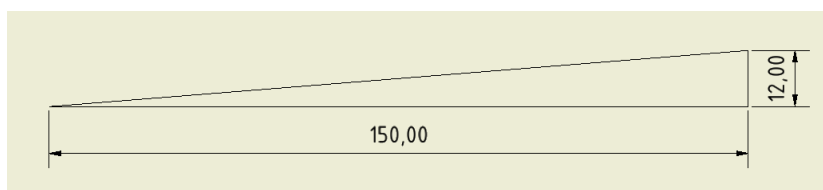
5.3. Zhotovení a výsledky experimentů

5.3.1. Sklon proti směru laseru

Vzorkem bylo ploché sklo (100x150 mm), jenž bylo vypořádáno pod vzdáleným okrajem skla v pozici 150 mm. Náklon byl proveden za pomoci dvou per, které přesně odpovídají 12 mm, tomu odpovídá úhel sklonu skla $4,6^\circ$.



Obrázek 11: Snímek odrazu laseru pro Sklon proti směru laseru



Obrázek 12: Pohled na nakloněný vzorek z boku

Přepočet výšky pro bod 1:

Vycházelo se z předpokladu, že výsledná funkce je lineární. Tudiž se musely stanovit jednotlivé koeficienty (a, b) z rovnice pro lineární funkci:

$$v_1 = ay_1 + b \quad (12)$$

y_1 je v pixelech, tuto hodnotu musíme převést na milimetry a následně posunout do základní výšky skla:

$$y [mm] = \frac{y_{px} - y_0}{6} \quad (13)$$

Kde y_{px} je souřadnice bodu na snímku (v pixelech), $y_0 = 467$ je počet pixelů, o který se bod posune do základní výšky a 6 je hodnota přepočtu pixelů na milimetry.

Koeficienty stanovíme z okrajových podmínek pro počáteční a konečnou hodnotu:

$$v_1 = 0 \text{ mm}; \quad v_{21} = 12 \text{ mm}$$

kde $v_{21} = 12$ mm je výška per vedoucí k náklonu.

Dosadíme do rovnice pro lineární funkci a dostaneme soustavu rovnic (souřadnice na počátku měření přířezu skla $y_{px} = 732$, souřadnice na konci měření přířezu skla $y_{px} = 899$):

$$0 = a * \left(\frac{723 - 467}{6} \right) + b \quad (14)$$

$$12 = a * \left(\frac{899 - 467}{6} \right) + b \quad (15)$$

Vyřešením této soustavy rovnic získáme koeficienty a, b:

$$a = 0,409$$

$$b = -17,454$$

Získáme tedy rovnici:

$$v_{bod\ 1} = 0,409 * y_1 - 17,454 \quad (16)$$

Souřadnice x byla určena z šířky vzorku (100 mm) a z rozteče laserů (40 mm). Dále byl vzorek skla umístěn na základní desku tak, aby paprsek prostředního laseru dopadal do středu vzorku.

Obdobně jako pro bod 1 byly vytvořeny rovnice pro výpočet reálné výšky pro body 2 a 3:

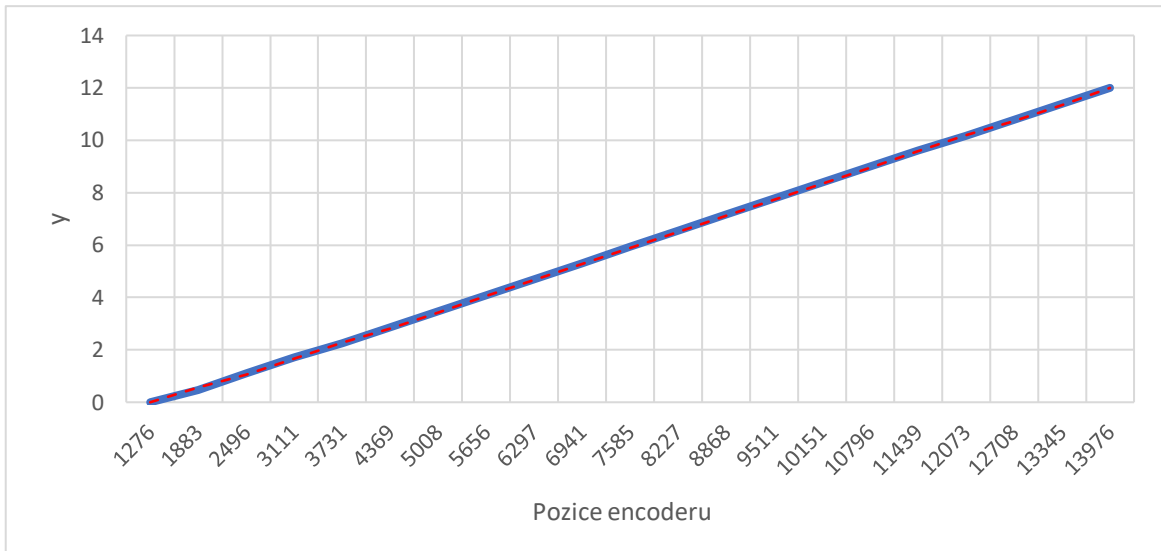
$$v_{bod\ 2} = 0,402 * y_2 - 17,363 \quad (17)$$

$$v_{bod\ 3} = 0,402 * y_3 - 17,43 \quad (18)$$

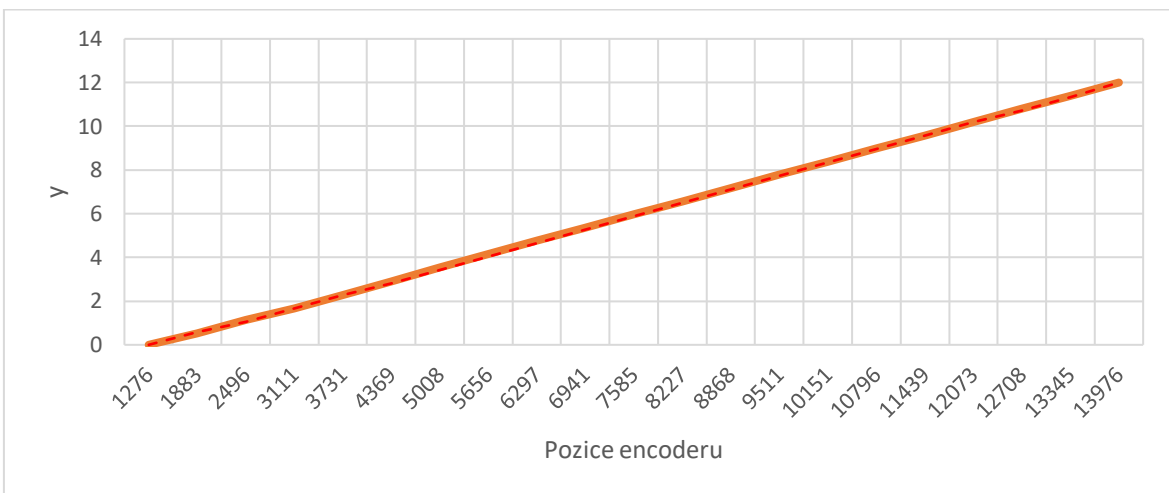
Vypočtené výsledky byly zaznamenány do tabulek (ostatní tabulky jsou uvedeny v příloze). Z těchto hodnot se posléze vytvořily grafy (Graf1. Graf 2 a Graf 3). Z výsledků je zřejmá dobrá shoda mezi naměřenou hodnotou a teoretickou.

Tab1: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro bod 1, sklon proti směru laseru

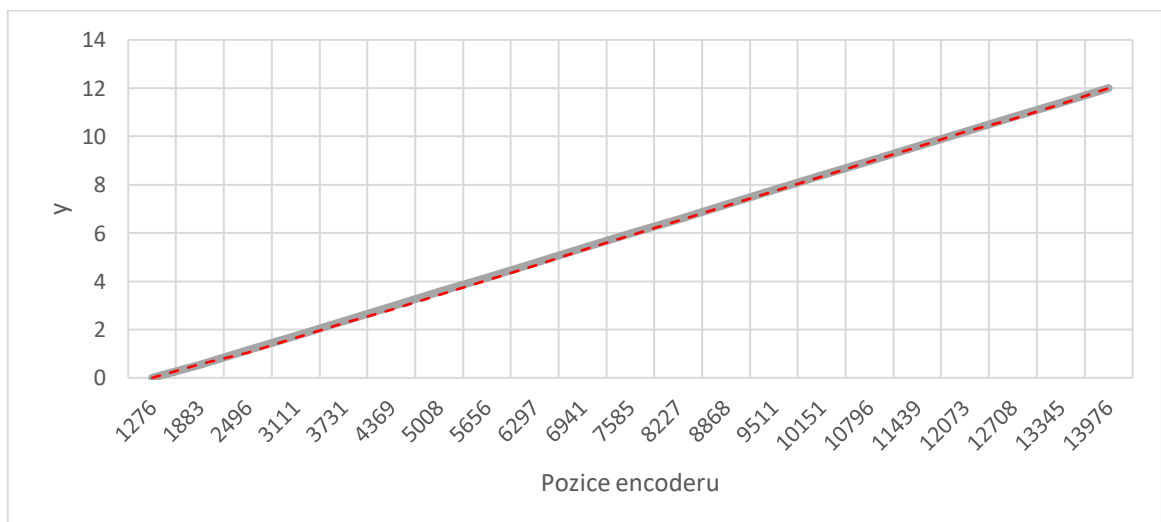
Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 1				Skutečný náklon skla	Odchylka
		x [px]	y[px]	x_reálné[mm]	y_reálné[mm]		
1	1276	598	723	10	0	0	0
2	1883	598	730	10	0,477272727	0,571428571	-0,09416
3	2496	598	739	10	1,090909091	1,048701299	0,042208
4	3111	598	748	10	1,704545455	1,662337662	0,042208
5	3731	598	756	10	2,25	2,275974026	-0,02597
6	4369	598	765	10	2,863636364	2,821428571	0,042208
7	5008	598	774	10	3,477272727	3,435064935	0,042208
8	5656	598	783	10	4,090909091	4,048701299	0,042208
9	6297	598	792	10	4,704545455	4,662337662	0,042208
10	6941	598	801	10	5,318181818	5,275974026	0,042208
11	7585	598	810	10	5,931818182	5,88961039	0,042208
12	8227	598	819	10	6,545454545	6,503246753	0,042208
13	8868	598	828	10	7,159090909	7,116883117	0,042208
14	9511	598	837	10	7,772727273	7,730519481	0,042208
15	10151	598	846	10	8,386363636	8,344155844	0,042208
16	10796	598	855	10	9	8,957792208	0,042208
17	11439	598	864	10	9,613636364	9,571428571	0,042208
18	12073	598	872	10	10,15909091	10,18506494	-0,02597
19	12708	598	881	10	10,77272727	10,73051948	0,042208
20	13345	598	890	10	11,38636364	11,34415584	0,042208
21	13976	598	899	10	12	12	0



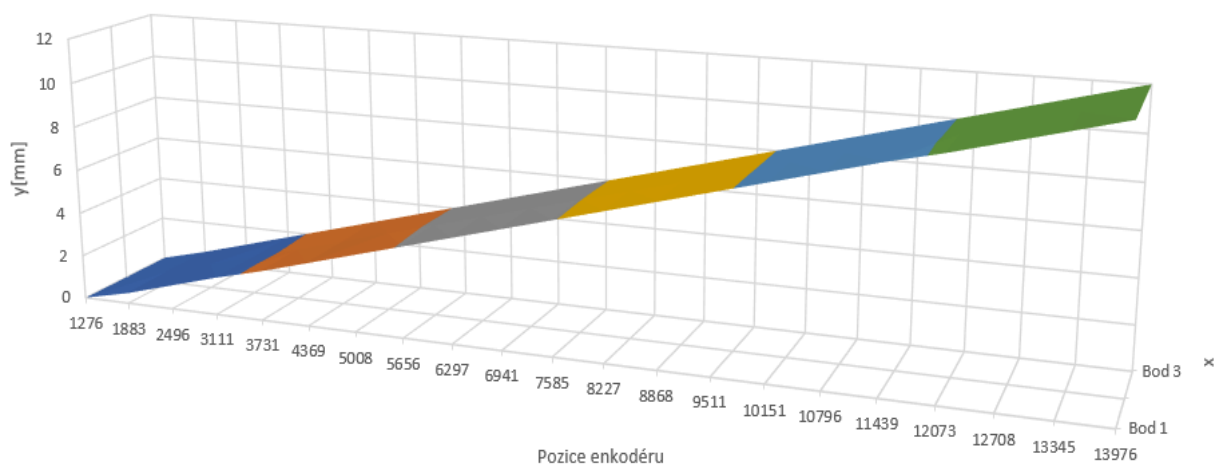
Graf 1: Závislost výšky bodu 1 na pozici enkodéru (modrá), Skutečný náklon skla (červená)



Graf 2: Závislost výšky bodu 2 na pozici enkodéru (oranžová), Skutečný náklon skla (červená)



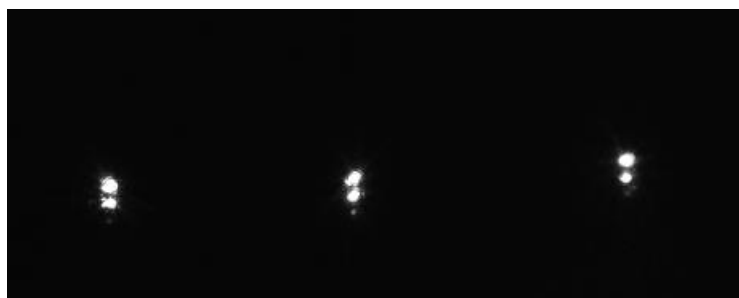
Graf 3: Závislost výšky bodu 3 na pozici enkodéru (šedá), Skutečný náklon skla (červená)



Graf 4: Prostorové zobrazení spojení všech tří bodů, sklon proti směru laseru

5.3.2. Sklon ve směru laseru

Vzorek byl vypořádán jedním perem o výšce 6 mm pod předním krajem skla.



Obrázek 13: Snímek odrazu laseru pro sklon ve směru laseru

Přepočítání bylo provedeno stejným způsobem jako u předchozího experimentu (kap. 5.3.1.) z okrajových podmínek:

$$v_1 = 0; \quad v_{25} = 6 \text{ mm}$$

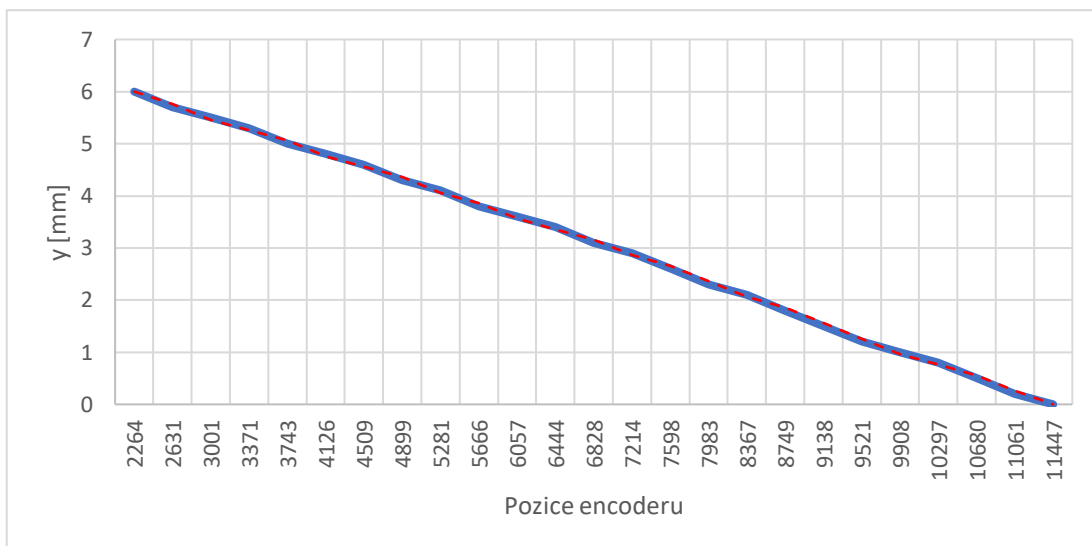
Výsledné rovnice tedy jsou:

$$v_{bod\ 1} = -0,6 * y_1 + 10,7 \quad (19)$$

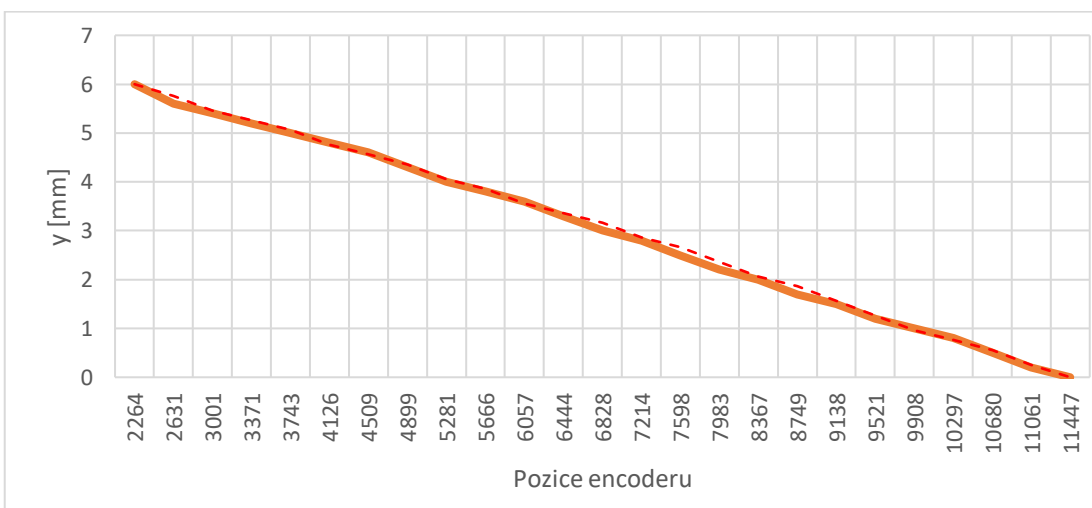
$$v_{bod\ 2} = -0,6 * y_1 + 10,4 \quad (20)$$

$$v_{bod\ 3} = -0,62 * y_1 + 10,86 \quad (21)$$

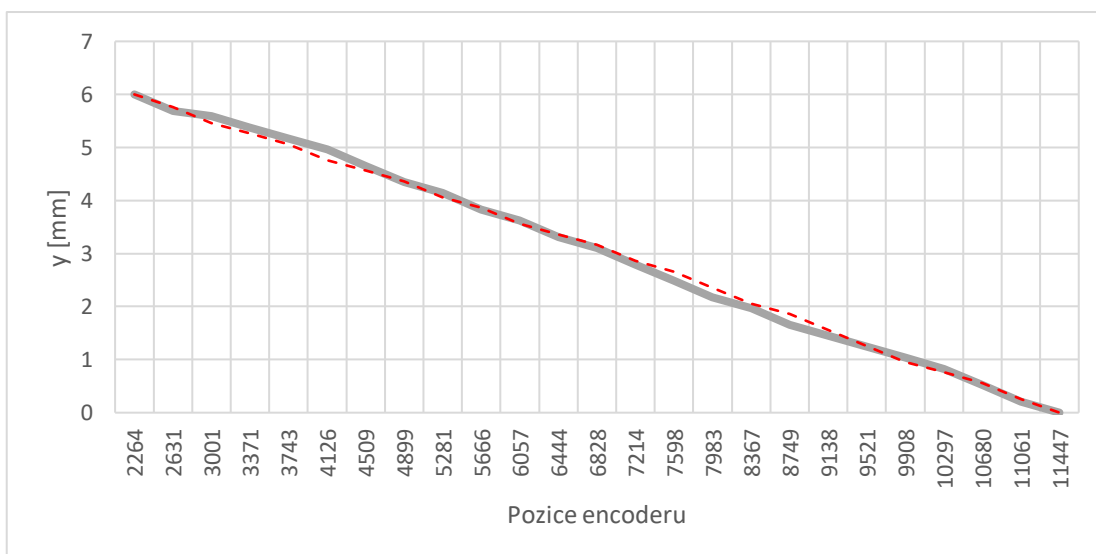
Vypočtené výsledky byly zaneseny do tabulek (příloha) a z těchto hodnot byly vytvořeny grafy (Graf 5, Graf 6 a Graf 7). Shoda již není na takové úrovni jako u předchozího experimentu.



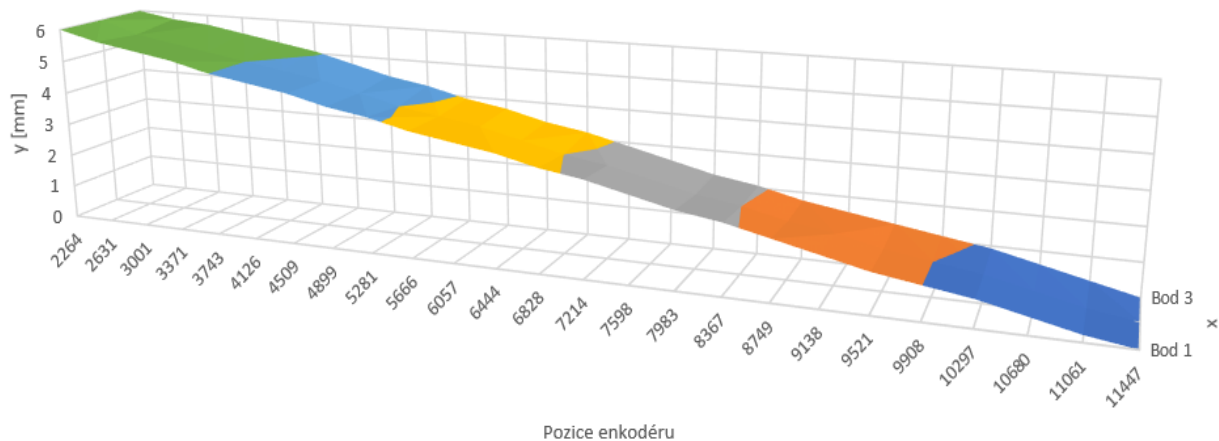
Graf 5: Závislost výšky bodu 1 na pozici enkodéru (modrá), Skutečný náklon skla (červená)



Graf 6: Závislost výšky bodu 2 na pozici enkodéru (oranžová), Skutečný náklon skla (červená)



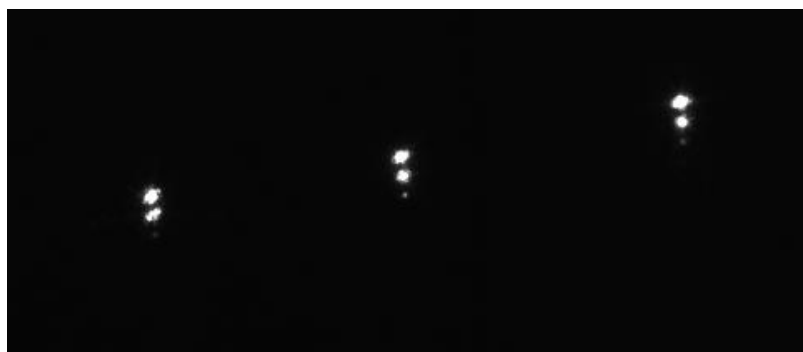
Graf 7: Závislost výšky bodu 3 na pozici enkodéru (šedá), Skutečný náklon skla (červená)



Graf 8: Prostorové zobrazení spojení všech tří bodů, sklon ve směru laseru

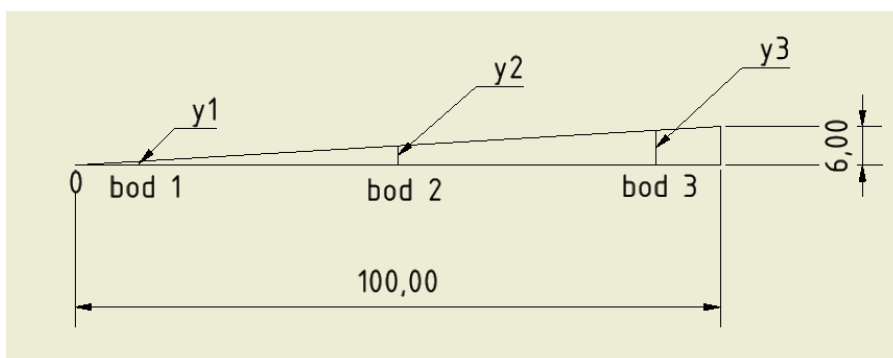
5.3.3. Sklon vlevo ve směru laseru

Náklon skla byl dosažen pomocí jednoho pera o výšce 6 mm. Pero bylo umístěno pod levým okrajem skla.



Obrázek 14: Snímek odrazu laseru pro sklon vlevo ve směru laseru

Přepočítání hodnot bylo provedeno za pomoci podobnosti trojúhelníků, kde levý okraj skla se nachází v nulové výšce a pravý okraj je ve výšce 6 mm.



Obrázek 15: Trojúhelník pro přepočítání výšky bodů

Rovnice pro přepočítání souřadnic v jednotkách pixelů na reálnou výšku bodu na vzorku skla:

$$y = \frac{6}{100} * \frac{x - x_0}{6} \quad (22)$$

kde x je vzdálenost jednotlivých bodů od počátku souřadnicového systému a x_0 odpovídá vzdálenosti počátku skla od začátku souřadnicového systému.

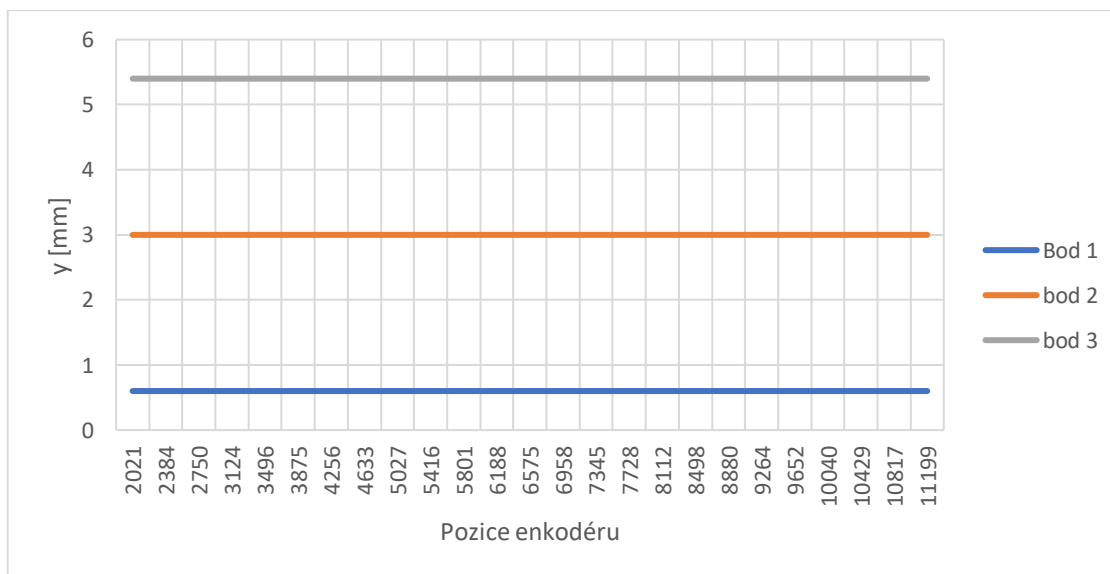
Z umístění vzorku uprostřed základní desky odpovídá bod 1 vzdálenosti 10 mm na zkušební skle (obr. 13). Tudíž z rozteče jednotlivých laserů odpovídají body 2 a 3 vzdálenosti 50 respektive 90 mm na zkušební skle. Dále z podobnosti trojúhelníků dostaneme rovnice pro neznámé výšky y_1, y_2, y_3 :

$$y_1 = \frac{6}{100} * 10 = 0,6 \text{ mm} \quad (23)$$

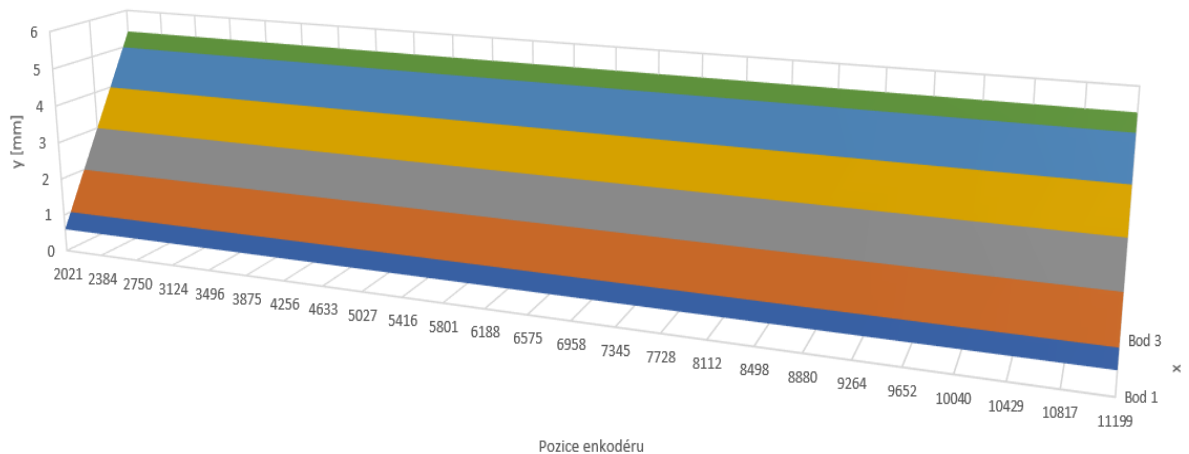
$$y_2 = \frac{6}{100} * 50 = 3 \text{ mm} \quad (24)$$

$$y_3 = \frac{6}{100} * 90 = 5,4 \text{ mm} \quad (25)$$

Z vypočtených výsledků byly vytvořeny tabulky (příloha), z nichž se zhotovily grafy (Graf 9). Z důvodů totožnosti vypočtených hodnot s reálným nakloněním nebylo provedeno grafické porovnání těchto hodnot.



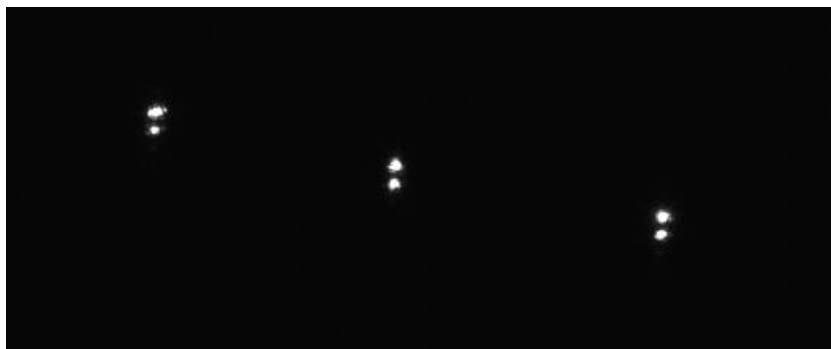
Graf 9: Závislost výšky bodů na pozici enkodéru, sklon vlevo ve směru laseru



Graf 10: Prostorové zobrazení spojení všech tří bodů, sklon vlevo ve směru laseru

5.3.4. Sklon vpravo ve směru laseru

Dvě pera o celkové výšce 12 mm byla uložena pod pravým okrajem vzorku tak, aby bylo dosaženo konečného náklonu.



Obrázek 16: Snímek odrazu laseru pro sklon vpravo ve směru laseru

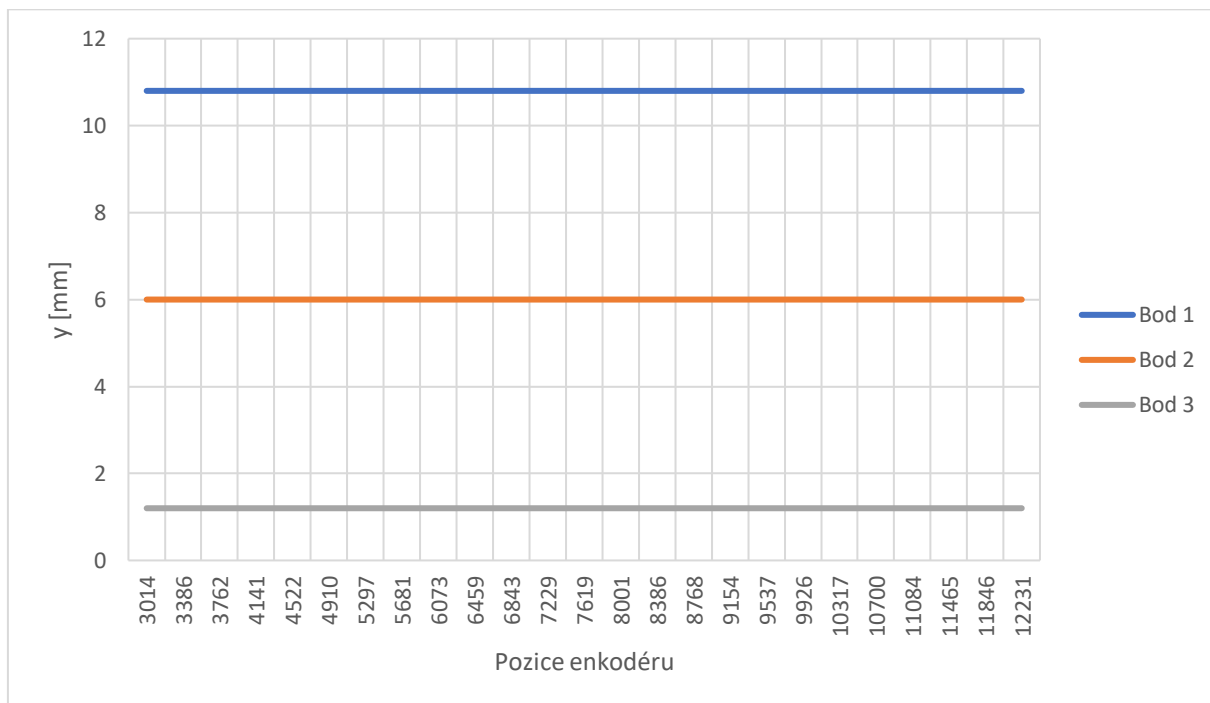
Přepočítání na reálnou výšku bylo provedeno obdobně jako u předchozího případu (kap. 5.3.3.) pomocí podobnosti trojúhelníků. Vzorek byl umístěn stejným způsobem jako u náklonu vlevo ve směru laseru. Z této skutečnosti vyplývají rovnice:

$$y_1 = \frac{12}{100} * 90 = 10,8 \text{ mm} \quad (26)$$

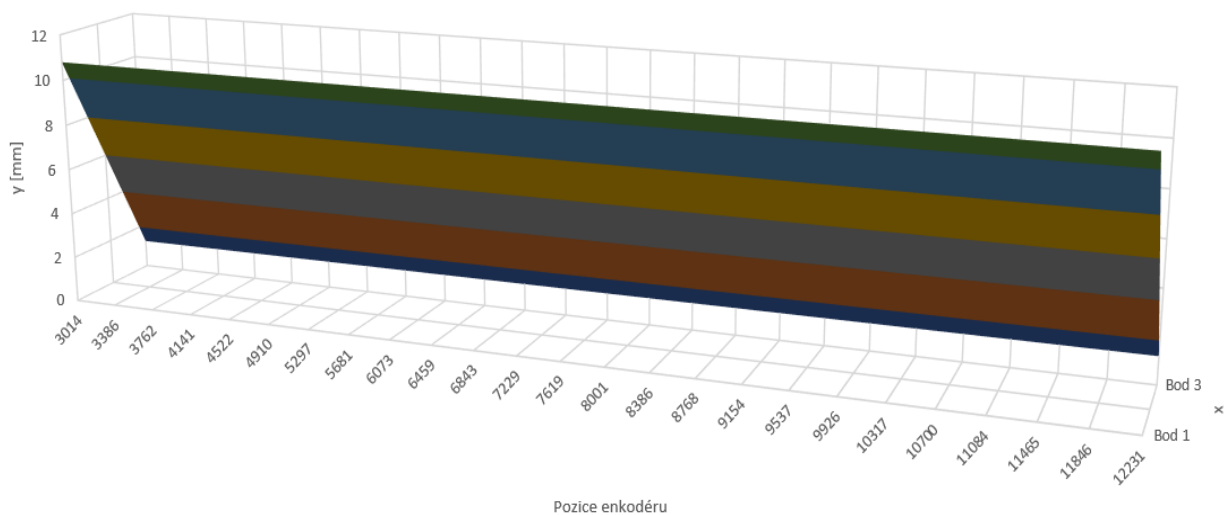
$$y_2 = \frac{12}{100} * 50 = 6 \text{ mm} \quad (27)$$

$$y_3 = \frac{12}{100} * 10 = 1,2 \text{ mm} \quad (28)$$

Z výsledků vyplívajících z těchto rovnic se zhotovily tabulky a posléze z nich grafy (Z důvodů totožnosti vypočtených hodnot s reálným nakloněním nebylo provedeno grafické porovnání těchto hodnot).



Graf 11: Závislost výšky bodů na pozici enkodéru, sklon vpravo ve směru laseru



Graf 12: Prostorové zobrazení spojení všech tří bodů, sklon vpravo ve směru laseru

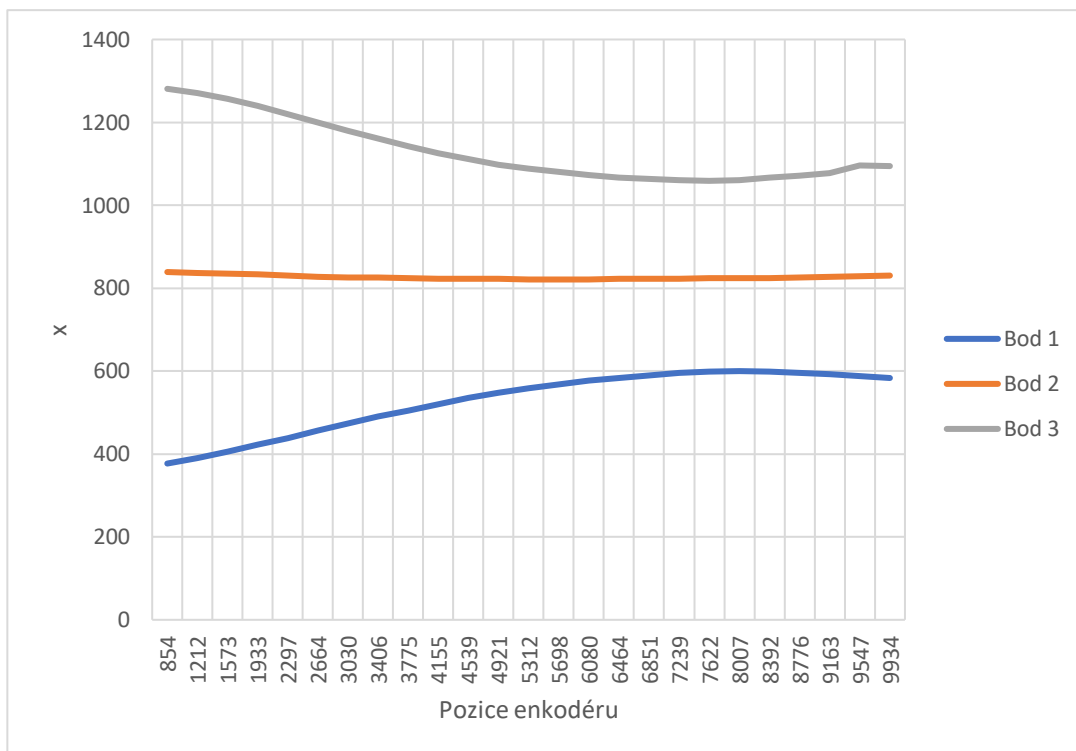
5.3.5. Prohnuté sklo

U tohoto experimentu bylo určeno pouze souřadnice bodů, které byly zaneseny do tabulky.

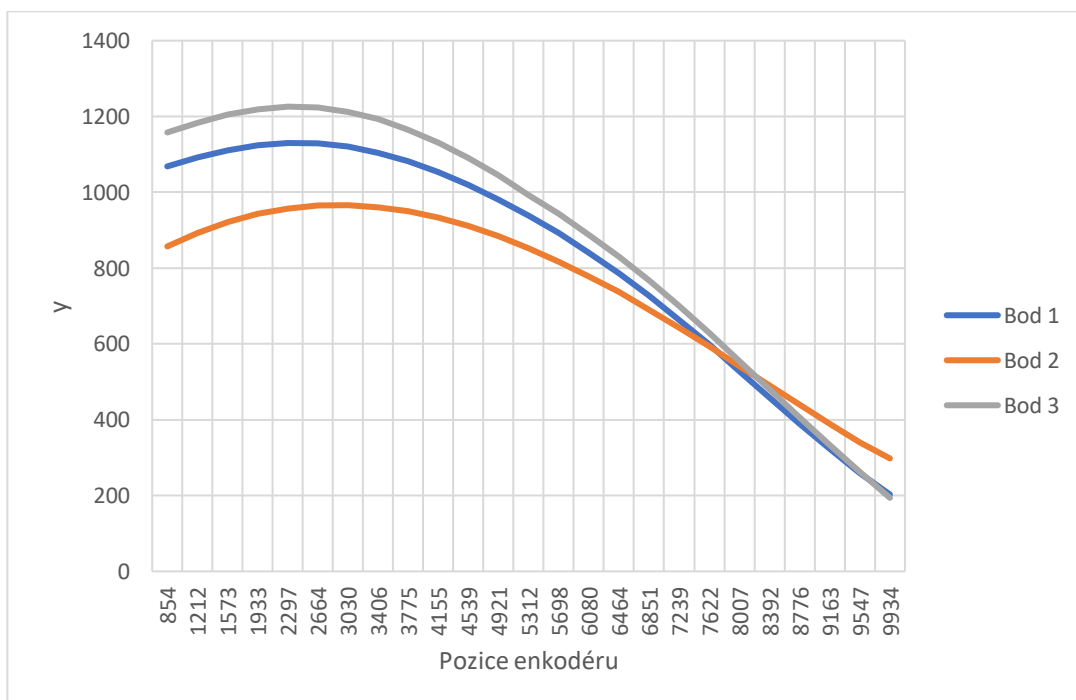
Tab2: Tabulka souřadnic bodů pro prohnuté sklo

Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 1		Bod 2		Bod 3	
		x [px]	y[px]	x [px]	y[px]	x [px]	y[px]
1	854	377	1069	839	858	1281	1158
2	1212	391	1092	837	893	1270	1184
3	1573	406	1110	835	922	1256	1206
4	1933	423	1124	833	943	1239	1219
5	2297	438	1130	830	957	1220	1226
6	2664	456	1129	828	965	1200	1223
7	3030	473	1120	826	966	1179	1212
8	3406	490	1104	826	961	1161	1193
9	3775	505	1082	824	950	1143	1165
10	4155	520	1053	823	934	1125	1131
11	4539	535	1020	822	912	1111	1090
12	4921	548	981	822	885	1098	1044
13	5312	558	938	821	853	1088	993
14	5698	568	892	821	817	1080	944
15	6080	577	841	821	778	1073	888
16	6464	584	786	822	737	1067	830
17	6851	590	727	822	690	1063	768
18	7239	596	663	823	643	1061	701
19	7622	599	599	824	594	1059	629
20	8007	600	528	824	542	1061	555
21	8392	599	459	825	491	1066	480
22	8776	595	390	826	440	1071	406
23	9163	592	324	827	390	1078	333
24	9547	588	260	829	341	1096	263
25	9934	583	203	830	298	1094	194

Přepočítání pro prohnuté sklo již není lineární. Z tohoto důvodu není určení rovnic pro přepočítání prohnutého skla předmětem této práce.



Graf 13: Závislost souřadnice x na pozici enkodéru



Graf 14: Závislost souřadnice y na pozici enkodéru

5.4. Vyhodnocení experimentů

U provedených experimentů byly výsledky měření zaznamenány do tabulek. Z těchto naměřených a vypočtených hodnot byly vyhotoveny grafy pro jednotlivé body laseru. Následně se z těchto křivek zhotovily prostorové grafy, které simulují reálný tvar vzorku skla. Tvary těchto ploch odpovídají reálnému tvaru nakloněného skla. Z této skutečnosti vyplývá, že stanovené přepočty pro ploché sklo byly správné.

U prohnutého skla byly stanoveny pouze souřadnice, ze kterých by se následným přepočtem určil tvar vzorku. Tento přepočet bude součástí dalšího výzkumu.

5.5. Návrh metodiky použití laserů pro detekci tvaru objektů z transparentních materiálů

Pro detekci objektů z transparentních materiálů se využijí bodové (v případě jednoduchých a rovných tvarů) popřípadě liniové lasery. Tyto lasery jsou nastaveny tak, aby pod určitým (nejlépe malým) úhlem dopadal jejich paprsek na daný objekt. Následně se snímá odraz tohoto laseru ze zadní desky.

Pomocí známého kalibračního vzorku se určí přepočet na reálné hodnoty. Např. v této práci se výsledné přepočtové rovnice stanovily z rovnic pro lineární funkci. Pro složitější tvary vzorku by musely být stanoveny rovnice ze složitějších vztahů. Pro jejich následný výpočet by musel být vytvořen program, jehož výstupem by byl graf, popřípadě model reálného tvaru daného vzorku. Tento model se porovná s přesným modelem.

6. Možnosti využití metodiky v průmyslové praxi

V praxi lze využít i metody, která nevyužívá snímání odrazu laseru, ale snímá přímo daný objekt. Tato metoda se využívá zejména u netransparentních materiálů. U transparentních materiálů nastává problém odrazu laseru od více hran (kap. 4.1.).

Metodu řešenou v této práci lze použít u materiálů s povrchem, od kterého se paprsek laseru dobře odrazí. Také lze metodu použít u transparentních materiálů.

6.1. Použití u transparentních materiálů

V praxi se tato metoda může využít pro kontrolu tvaru nejrůznějších skleněných, plastových nebo jiných výrobků s vhodným povrchem. Nejčastěji však pro kontrolu rovnosti skleněných nebo plastových desek a tabulí. Také pro ověření tvaru výrobků složených

z rovných ploch. Dále ji lze využít při kontrole prohnutých skel, které mají v praxi nejrůznější využití (např. okna aut).

6.2. Okrajové podmínky

Okrajové podmínky jsou:

- Složitost snímaného objektu
- Ostrost a intenzita laseru
- Rozlišení kamery
- Velikost snímané oblasti v závislosti na zkreslení okrajových částí snímku

6.3. Přínosy a omezení metodiky

Hlavním přínosem této metodiky je možnost kontroly každého kusu v sériové výrobě. Dále pak rychlost snímání a porovnání daného kusu s přesným modelem.

Mezi omezení této metody patří počáteční náklady na zhotovení, kalibraci zařízení a vytvoření programu pro přepočítání a následnou tvorbu modelu. Dále složitost tvaru součástí.

7. Závěr

Cílem práce bylo zjistit možnosti využití detekce povrchu skla za pomoci odrazu laserových paprsků a jeho následného snímání. Bylo navrženo pracoviště pro vykonání experimentů. Toto zařízení bylo navrženo pro co nejjednodušší provedení experimentů. Další odladění a zlepšení laboratorního zařízení bude předmětem dalšího výzkumu. Zmíněné experimenty byly provedeny s plochým vzorkem skla. U těchto čtyř pokusů se kontroloval tvar povrchu vzorku, který byl simulován různým náklonem skla. Dále byl proveden experiment s prohnutým sklem jako ověření možnosti použití metody u složitějších tvarů. U tohoto experimentu nebyl stanoven přepočítání. Tento přepočítání bude předmětem další části výzkumu. Stejně tak vytvoření modelu tvaru zkoumaných vzorku se složitějším tvarem.

Pro experimenty s plochým vzorkem skla byly stanoveny rovnice pro přepočítání naměřených hodnot na reálné hodnoty, z nichž následně byly stanoveny tvary vzorku. Takto získané plochy odpovídají reálnému tvaru vzorky. Z toho vyplývá, že tuto metodu lze použít pro ověření tvaru skleněného výrobku složeného z rovných ploch.

Následně byla navržena metodika pro použití laseru při detekci tvaru objektů z transparentních materiálů. Tato metodika poslouží jako počátek pro další výzkum, jehož cílem bude vylepšení dané metodiky pro složitější tvary výrobků a uvedení metody do průmyslové praxe.

Seznam použité literatury

- [1] HOTAŘ, V. Úvod do strojového vidění: Část 1: Základní principy a hardware. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. 132 s. ISBN 987-80-7494-156-6.
- [2] HOTAŘ, V. Úvod do strojového vidění: Část 2: Základy zpracování obrazu. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. 114 s. ISBN 978-80-7494-202-0.
- [3] HOTAŘ, V. a O. MATÚŠEK. Využití reflexe plochého skla pro jeho detekci. *Sklář a keramik*. 2012, roč. 62, č. 7–8, s. 170–173.
- [4] Optické metody. In: *Ústav automatizace a měřicí techniky* [online], Brno: Vysoké učení technické v Brně, [cit. 2019-06-18] Dostupné na: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap2.1.4>
- [5] Laser scanner. In: *micro-epsilon* [online], Germany: 2019, [cit. 2019-06-18] Dostupné na: http://www.micro-epsilon.com/2D_3D/laser-scanner
- [6] Scanner. In: *Creaform3D* [online], Canada: 2019, [cit. 2019-06-18] Dostupné na: <https://www.creaform3d.com/en>
- [7] Detekce transparentních objektů. In: *Sick AG* [online], Waldkirch, Germany: 2019 [cit. 2019-06-18] Dostupné na: <https://www.sick.com/cz/cs/search?text=detekce-transparentnich-objektu>
- [8] 3D scanner. In: *Wikipedia. The free encyclopedia* [online], USA: 25.4.2019 [cit. 2019-06-18] Dostupné na: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner
- [9] Active triangulation. In: *Department of electrotechnics* [online], Belgium, Leuven: The Katholieke Universiteit Leuven [cit. 2019-06-18] Dostupné na: <http://homes.esat.kuleuven.be/~konijn/active.html>
- [10] 3D měření. In: *Ústav automatizace a měřicí techniky* [online], Brno: Vysoké učení technické v Brně, [cit. 2019-06-18] Dostupné na: <http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/vyuka/MAPV/3Dmereni.pdf>
- [11] UV radiation. In: *excelitas* [online], United States, Waltham: 2019 [cit. 2019-06-18] Dostupné na: <http://www.excelitas.com/Pages/Product/Ultraviolet-UV-200-nm-400-nm.aspx>
- [12] Laser triangulation. In: *micro-epsilon* [online], Germany: 2019, [cit. 2019-06-18] Dostupné na: <http://www.micro-epsilon.com/service/glossar/Laser-Triangulation.html>
- [13] MATÚŠEK, O. a V. HOTAŘ. Možnosti detekce bortů plaveného skla na výrobní lince. *Sklář a keramik*. 2017, roč. 67, č. 7–8, s. 143–147.
- [14] Laser. In: *Wikipedia. The free encyclopedia* [online], USA: 13.6.2019 [cit. 2019-06-18] Dostupné na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [15] Laser diode. In: *Laser diode selection* [online], Japan, Kyoto: 2019 [cit. 2019-06-18] Dostupné na: <http://ldselection.com/>
- [16] Laser diode. In: *Trumpf* [online], Praha: 2019 [cit. 2019-06-18] Dostupné na: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/diodovy-laser/
- [17] Svoboda J. Zařízení pro detekci přesnosti tvaru ohýbaných přířezů plochého skla. Liberec 2012. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.

Seznam příloh

Příloha 1: Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

Příloha 2: Výkresová dokumentace:

Laboratorní pracoviště	3-BP S15000047-1-0 00
Laboratorní pracoviště – kusovník	
Držák na lasery	3-BP S15000047-1-4 00
Držák_1	3-BP S15000047-1-4 01
Držák_2	4-BP S15000047-1-4 02
Držák_3	4-BP S15000047-1-4 03
Držák_4	4-BP S15000047-1-4 04
Držák na kameru	4-BP S15000047-1-0 09
Podložka pod kameru	4-BP S15000047-1-0 10

Příloha 1

Tab1: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro bod 2, sklon proti směru laseru

Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 2				Skutečný náklon skla	Odchylka
		x [px]	y [px]	x_reálné[mm]	y_reálné[mm]		
1	1276	820	0	50	0	0	0
2	1883	820	0,571428571	50	0,5363128	0,571428571	-0,03512
3	2496	820	1,048701299	50	1,1396647	1,048701299	0,090963
4	3111	820	1,662337662	50	1,6759775	1,662337662	0,01364
5	3731	820	2,275974026	50	2,2793294	2,275974026	0,003355
6	4369	820	2,821428571	50	2,8826813	2,821428571	0,061253
7	5008	820	3,435064935	50	3,5530723	3,435064935	0,118007
8	5656	820	4,048701299	50	4,1564242	4,048701299	0,107723
9	6297	820	4,662337662	50	4,7597761	4,662337662	0,097438
10	6941	820	5,275974026	50	5,363128	5,275974026	0,087154
11	7585	820	5,88961039	50	5,9664799	5,88961039	0,07687
12	8227	820	6,503246753	50	6,5698318	6,503246753	0,066585
13	8868	820	7,116883117	50	7,1731837	7,116883117	0,056301
14	9511	820	7,730519481	50	7,7765356	7,730519481	0,046016
15	10151	820	8,344155844	50	8,3798875	8,344155844	0,035732
16	10796	820	8,957792208	50	8,9832394	8,957792208	0,025447
17	11439	820	9,571428571	50	9,5865913	9,571428571	0,015163
18	12073	820	10,18506494	50	10,1899432	10,18506494	0,004878
19	12708	820	10,73051948	50	10,7932951	10,73051948	0,062776
20	13345	820	11,34415584	50	11,396647	11,34415584	0,052491
21	13976	820	12	50	12	12	0

Tab2: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro bod 3, sklon proti směru laseru

Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 3				Skutečný náklon skla	Odchylka
		x [px]	y [px]	x_reálné[mm]	y_reálné[mm]		
1	1276	1066	748	90	0	0	0
2	1883	1066	756	90	0,5363128	0,571428571	-0,03512
3	2496	1066	765	90	1,1396647	1,048701299	0,090963
4	3111	1066	774	90	1,7430166	1,662337662	0,080679
5	3731	1066	783	90	2,3463685	2,275974026	0,070394
6	4369	1066	792	90	2,9497204	2,821428571	0,128292
7	5008	1066	801	90	3,5530723	3,435064935	0,118007
8	5656	1066	810	90	4,1564242	4,048701299	0,107723
9	6297	1066	819	90	4,7597761	4,662337662	0,097438
10	6941	1066	828	90	5,363128	5,275974026	0,087154
11	7585	1066	837	90	5,9664799	5,88961039	0,07687
12	8227	1066	846	90	6,5698318	6,503246753	0,066585
13	8868	1066	855	90	7,1731837	7,116883117	0,056301
14	9511	1066	864	90	7,7765356	7,730519481	0,046016
15	10151	1066	873	90	8,3798875	8,344155844	0,035732
16	10796	1066	882	90	8,9832394	8,957792208	0,025447
17	11439	1066	891	90	9,5865913	9,571428571	0,015163
18	12073	1066	900	90	10,1899432	10,18506494	0,004878
19	12708	1066	909	90	10,7932951	10,73051948	0,062776
20	13345	1066	918	90	11,396647	11,34415584	0,052491
21	13976	1066	927	90	12	12	0

Tab3: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro bod 1, sklon ve směru laseru

Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 1				Skutečný náklon skla	Odchylka
		x [px]	y [px]	x_reálné[mm]	y_reálné[mm]		
1	2264	598	420	10	6	6	0
2	2631	598	417	10	5,7	5,76	0,010345
3	3001	598	415	10	5,5	5,46	-0,08621
4	3371	598	413	10	5,3	5,26	-0,07931
5	3743	598	410	10	5	5,06	-0,17241
6	4126	598	408	10	4,8	4,76	-0,16552
7	4509	598	406	10	4,6	4,56	-0,05517
8	4899	598	403	10	4,3	4,36	-0,04483
9	5281	598	401	10	4,1	4,06	-0,03793
10	5666	598	398	10	3,8	3,86	-0,02759
11	6057	598	396	10	3,6	3,56	-0,02069
12	6444	598	394	10	3,4	3,36	0,089655
13	6828	598	391	10	3,1	3,16	-0,00345
14	7214	598	389	10	2,9	2,86	0,106897
15	7598	598	386	10	2,6	2,66	0,117241
16	7983	598	383	10	2,3	2,36	0,127586
17	8367	598	381	10	2,1	2,06	0,134483
18	8749	598	378	10	1,8	1,86	0,144828
19	9138	598	375	10	1,5	1,56	0,051724
20	9521	598	372	10	1,2	1,26	-0,04138
21	9908	598	370	10	1	0,96	-0,03448
22	10297	598	368	10	0,8	0,76	-0,02759
23	10680	598	365	10	0,5	0,56	-0,01724
24	11061	598	362	10	0,2	0,26	-0,0069
25	11447	598	360	10	0	0	0

Tab4: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro bod 2, sklon ve směru laseru

Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 2				Skutečný náklon skla	Odchylka
		x [px]	y[px]	x_reálné[mm]	y_reálné[mm]		
1	2264	820	427	50	6	6	0
2	2631	820	423	50	5,6	5,76	-0,16
3	3001	820	421	50	5,4	5,46	-0,06
4	3371	820	419	50	5,2	5,26	-0,06
5	3743	820	417	50	5	5,06	-0,06
6	4126	820	415	50	4,8	4,76	0,04
7	4509	820	413	50	4,6	4,56	0,04
8	4899	820	410	50	4,3	4,36	-0,06
9	5281	820	407	50	4	4,06	-0,06
10	5666	820	405	50	3,8	3,86	-0,06
11	6057	820	403	50	3,6	3,56	0,04
12	6444	820	400	50	3,3	3,36	-0,06
13	6828	820	397	50	3	3,16	-0,16
14	7214	820	395	50	2,8	2,86	-0,06
15	7598	820	392	50	2,5	2,66	-0,16
16	7983	820	389	50	2,2	2,36	-0,16
17	8367	820	387	50	2	2,06	-0,06
18	8749	820	384	50	1,7	1,86	-0,16
19	9138	820	382	50	1,5	1,56	-0,06
20	9521	820	379	50	1,2	1,26	-0,06
21	9908	820	377	50	1	0,96	0,04
22	10297	820	375	50	0,8	0,76	0,04
23	10680	820	372	50	0,5	0,56	-0,06
24	11061	820	369	50	0,2	0,26	-0,06
25	11447	820	367	50	0	0	0

Tab5: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro bod 3, sklo ve směru laseru

Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 3				Skutečný náklon skla	Odchylka
		x [px]	y[px]	x_reálné[mm]	y_reálné[mm]		
1	2264	1066	441	90	6	6	0
2	2631	1066	439	90	5,793103453	5,76	-0,07034
3	3001	1066	438	90	5,689655177	5,46	0,126207
4	3371	1066	436	90	5,482758625	5,26	0,11931
5	3743	1066	434	90	5,275862073	5,06	0,112414
6	4126	1066	432	90	5,068965521	4,76	0,205517
7	4509	1066	429	90	4,758620694	4,56	0,095172
8	4899	1066	426	90	4,448275866	4,36	-0,01517
9	5281	1066	424	90	4,241379315	4,06	0,077931
10	5666	1066	421	90	3,931034487	3,86	-0,03241
11	6057	1066	419	90	3,724137935	3,56	0,06069
12	6444	1066	416	90	3,413793108	3,36	-0,04966
13	6828	1066	414	90	3,206896556	3,16	-0,05655
14	7214	1066	411	90	2,896551728	2,86	-0,0669
15	7598	1066	408	90	2,586206901	2,66	-0,17724
16	7983	1066	405	90	2,275862073	2,36	-0,18759
17	8367	1066	403	90	2,068965521	2,06	-0,09448
18	8749	1066	400	90	1,758620694	1,86	-0,20483
19	9138	1066	398	90	1,551724142	1,56	-0,11172
20	9521	1066	396	90	1,34482759	1,26	-0,01862
21	9908	1066	394	90	1,137931039	0,96	0,074483
22	10297	1066	392	90	0,931034487	0,76	0,067586
23	10680	1066	389	90	0,620689659	0,56	-0,04276
24	11061	1066	386	90	0,310344832	0,26	-0,0531
25	11447	1066	383	90	0	0	0

Tab6: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro bod 1, sklon vlevo ve směru laseru

Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 1			
		x [px]	y [px]	x_reálné[mm]	y_reálné[mm]
1	2021	532	476	10	0,6
2	2384	532	476	10	0,6
3	2750	532	476	10	0,6
4	3124	532	476	10	0,6
5	3496	532	476	10	0,6
6	3875	532	476	10	0,6
7	4256	532	476	10	0,6
8	4633	532	476	10	0,6
9	5027	532	476	10	0,6
10	5416	532	476	10	0,6
11	5801	532	476	10	0,6
12	6188	532	476	10	0,6
13	6575	532	476	10	0,6
14	6958	532	476	10	0,6
15	7345	532	476	10	0,6
16	7728	532	476	10	0,6
17	8112	532	476	10	0,6
18	8498	532	476	10	0,6
19	8880	532	476	10	0,6
20	9264	532	476	10	0,6
21	9652	532	476	10	0,6
22	10040	532	476	10	0,6
23	10429	532	476	10	0,6
24	10817	532	476	10	0,6
25	11199	532	476	10	0,6

Tab7: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro bod 2, sklon vlevo ve směru laseru

Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 2			
		x [px]	y[px]	x_reálné[mm]	y_reálné[mm]
1	2021	750	510	50	3
2	2384	750	510	50	3
3	2750	750	510	50	3
4	3124	750	510	50	3
5	3496	750	510	50	3
6	3875	750	510	50	3
7	4256	750	510	50	3
8	4633	750	510	50	3
9	5027	750	510	50	3
10	5416	750	510	50	3
11	5801	750	510	50	3
12	6188	750	510	50	3
13	6575	750	510	50	3
14	6958	750	510	50	3
15	7345	750	510	50	3
16	7728	750	510	50	3
17	8112	750	510	50	3
18	8498	750	510	50	3
19	8880	750	510	50	3
20	9264	750	510	50	3
21	9652	750	510	50	3
22	10040	750	510	50	3
23	10429	750	510	50	3
24	10817	750	510	50	3
25	11199	750	510	50	3

Tab8: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro bod 3, sklon vlevo ve směru laseru

Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 3			
		x [px]	y[px]	x_reálné[mm]	y_reálné[mm]
1	2021	992	558	90	5,4
2	2384	992	558	90	5,4
3	2750	992	558	90	5,4
4	3124	992	558	90	5,4
5	3496	992	558	90	5,4
6	3875	992	558	90	5,4
7	4256	992	558	90	5,4
8	4633	992	558	90	5,4
9	5027	992	558	90	5,4
10	5416	992	558	90	5,4
11	5801	992	558	90	5,4
12	6188	992	558	90	5,4
13	6575	992	558	90	5,4
14	6958	992	558	90	5,4
15	7345	992	558	90	5,4
16	7728	992	558	90	5,4
17	8112	992	558	90	5,4
18	8498	992	558	90	5,4
19	8880	992	558	90	5,4
20	9264	992	558	90	5,4
21	9652	992	558	90	5,4
22	10040	992	558	90	5,4
23	10429	992	558	90	5,4
24	10817	992	558	90	5,4
25	11199	992	558	90	5,4

Tab9: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro bod 1, sklon vpravo ve směru laseru

Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 1			
		x [px]	y[px]	x_reálné[mm]	y_reálné[mm]
1	3014	744	572	10	10,8
2	3386	744	572	10	10,8
3	3762	744	572	10	10,8
4	4141	744	572	10	10,8
5	4522	744	572	10	10,8
6	4910	744	572	10	10,8
7	5297	744	572	10	10,8
8	5681	744	572	10	10,8
9	6073	744	572	10	10,8
10	6459	744	572	10	10,8
11	6843	744	572	10	10,8
12	7229	744	572	10	10,8
13	7619	744	572	10	10,8
14	8001	744	572	10	10,8
15	8386	744	572	10	10,8
16	8768	744	572	10	10,8
17	9154	744	572	10	10,8
18	9537	744	572	10	10,8
19	9926	744	572	10	10,8
20	10317	744	572	10	10,8
21	10700	744	572	10	10,8
22	11084	744	572	10	10,8
23	11465	744	572	10	10,8
24	11846	744	572	10	10,8
25	12231	744	572	10	10,8

Tab10: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro bod 2, sklon vpravo ve směru laseru

Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 2			
		x [px]	y[px]	x_reálné[mm]	y_reálné[mm]
1	3014	962	525	50	6
2	3386	962	525	50	6
3	3762	962	525	50	6
4	4141	962	525	50	6
5	4522	962	525	50	6
6	4910	962	525	50	6
7	5297	962	525	50	6
8	5681	962	525	50	6
9	6073	962	525	50	6
10	6459	962	525	50	6
11	6843	962	525	50	6
12	7229	962	525	50	6
13	7619	962	525	50	6
14	8001	962	525	50	6
15	8386	962	525	50	6
16	8768	962	525	50	6
17	9154	962	525	50	6
18	9537	962	525	50	6
19	9926	962	525	50	6
20	10317	962	525	50	6
21	10700	962	525	50	6
22	11084	962	525	50	6
23	11465	962	525	50	6
24	11846	962	525	50	6
25	12231	962	525	50	6

Tab11: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro bod 3, sklon vpravo ve směru laseru

Číslo měření	Pozice enkodéru	Bod 3			
		x [px]	y[px]	x_reálné[mm]	y_reálné[mm]
1	3014	1203	478	90	1,2
2	3386	1203	478	90	1,2
3	3762	1203	478	90	1,2
4	4141	1203	478	90	1,2
5	4522	1203	478	90	1,2
6	4910	1203	478	90	1,2
7	5297	1203	478	90	1,2
8	5681	1203	478	90	1,2
9	6073	1203	478	90	1,2
10	6459	1203	478	90	1,2
11	6843	1203	478	90	1,2
12	7229	1203	478	90	1,2
13	7619	1203	478	90	1,2
14	8001	1203	478	90	1,2
15	8386	1203	478	90	1,2
16	8768	1203	478	90	1,2
17	9154	1203	478	90	1,2
18	9537	1203	478	90	1,2
19	9926	1203	478	90	1,2
20	10317	1203	478	90	1,2
21	10700	1203	478	90	1,2
22	11084	1203	478	90	1,2
23	11465	1203	478	90	1,2
24	11846	1203	478	90	1,2
25	12231	1203	478	90	1,2