



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

PRACOVNÍŠTĚ PRO OPTICKOU INTERFEROMETRII

WORKSTATION FOR OPTICAL INTERFEROMETRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN BLECHA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ILONA KALOVÁ, Ph.D.

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Pracoviště pro optickou interferometrii

Diplomová práce

Studijní obor: Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Martin Blecha

Vedoucí práce: Ing. Ilona Kalová, Ph.D.

Abstrakt :

Tato práce je zaměřena na sestavování pracoviště pro experimenty vycházející z optické interferometrie. Jsou zde popsány laboratorní úlohy sloužící pro demonstraci základních principů interferometrie a postup při sestavování měřicího pracoviště pro měření výškového profilu objektů metodou optické interferometrie v bílém světle.

V teoretické části jsou popsány základní principy interference, principy metod optické rekonstrukce 3D objektů a navržené laboratorní úlohy. Praktická část je zaměřena na sestavení pracoviště pro měření výškového profilu objektů metodou optické interferometrie v bílém světle. Na tomto pracovišti je realizována úloha pro měření tloušťky zrcadla a rekonstrukce povrchu tohoto zrcadla.

Klíčová slova:

interferometrie, optické měření, interference, rekonstrukce 3D objektů, interferometrie v bílém světle, CCD, optika.

Brno University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Control, Measurement and Instrumentation

Workstation for optical interferometry

Diploma thesis

Specialization of study: Cybernetics, Control and Measurement

Student: Bc. Martin Blecha

Supervisor: Ing. Ilona Kalová, Ph.D.

Abstract :

This thesis is specialized on composition of workplace for experiments flowing from optical interferometry. Here are described laboratory exercise servant for demonstration basic principles of interferometry and procedure at composition measuring workplace for measurement of height profile objects with white light interferometry.

In theoretic part are described fundamental principles interference, principles of methods optical reconstruction 3D objects and proposed laboratory exercise. Practical part is specialized on compilation of workplace for measurement of height profile objects with white light interferometry. On this workplace is realized exercise for measurement of thickness mirror and reconstruction surface hereof mirror.

Keywords:

interferometry, optical measurement, reconstruction 3D objects, measurement, white light interferometry, CCD, optic.

Bibliografická citace

BLECHA, M. *Pracoviště pro optickou interferometrii*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ilona Kalová, Ph.D.

P r o h l á š e n í

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma "Pracoviště pro optickou interferometrii" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne :

Podpis:

P o d ě k o v á n í

Děkuji tímto Ing. Iloně Kalové, Ph.D. za její ochotu při konzultační činnosti a Ing. Petru Honcovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

V Brně dne :

Podpis:

1. OBSAH

1. OBSAH	1
2. ÚVOD	3
3. INTERFERENCE	4
3.1 Difrakce - ohyb vln	5
3.2 Koherence	6
4. METODY OPTICKÉ REKONSTRUKCE 3D OBJEKTŮ	7
4.1 Triangulace	7
4.1.1 Aktivní triangulace	8
4.1.2 Pasivní triangulace.....	9
4.1.3 Měřicí systémy s teodolity.....	11
4.1.4 Fokusovací techniky	11
4.1.5 Podoba ze stínování.....	11
4.2 Měření doby letu modulovaného světla.....	11
4.3 Optická interferometrie	14
4.3.1 Interferometrie mnoha vlnových délek.....	14
4.3.2 Holografická interferometrie	14
4.3.3 Skvrnová interferometrie	15
4.3.4 Interferometrie bílého světla.....	16
5. CCD KAMERA MODICAM 612	19
5.1 Princip CCD snímačů	19
5.2 Charakteristiky CCD.....	20
5.2.1 Clonové číslo	20
5.2.2 Expoziční doba	20
5.2.3 Citlivost snímače	21
5.3 Konfigurovatelná CCD kamera	23
5.3.1 Řídící signály kamery	24
5.3.2 Charakteristiky snímače ICX039DNA.....	25

6. LABORATORNÍ ÚLOHY S VYUŽITÍM PRINCIPŮ OPTICKÉ INTERFEROMETRIE	28
6.1 Youngův interferenční pokus.....	28
6.2 Michelsonův interferometr – interferometrie v bílém světle	31
7. REALIZACE MĚŘICÍHO PRACOVISTĚ	34
7.1 Výběr zdroje světla	34
7.2 Motorický posuv 8MT175-100.....	36
7.3 Uspořádání pracoviště.....	39
7.4 Nalezení základní roviny objektového zrcadla	44
8. SYNCHRONIZACE KAMERY A POSUVU.....	48
8.1 Program pro ovládání posuvu	48
8.2 DLP-2232PB	50
8.2.1 Komunikace	51
8.2.2 Časové zpoždění	53
9. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ FUNKCE PRACOVISTĚ	59
9.1 Vyhodnocení měření	61
10. ZÁVĚR	67
11. POUŽITÁ LITERATURA	68
12. SEZNAM OBRÁZKŮ	69
13. SEZNAM PŘÍLOH	72

2. ÚVOD

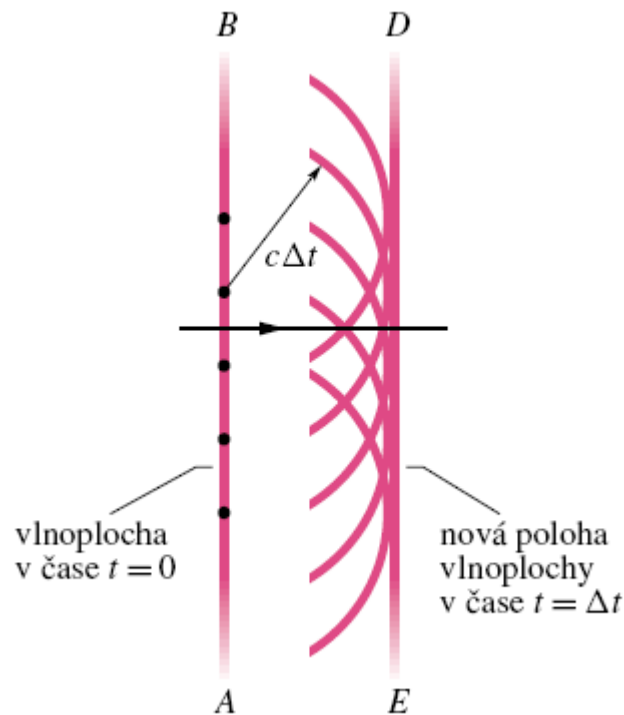
Tato práce je zaměřena na sestavování pracoviště pro experimenty vycházející z optické interferometrie. Jsou zde popsány laboratorní úlohy sloužící pro demonstraci základních principů interferometrie a postup při sestavování měřicího pracoviště pro měření výškového profilu 3D objektů metodou optické interferometrie v bílém světle.

Metody optické rekonstrukce 3D objektů se využívají například pro rozpoznávání předmětů, jejich třídění, určování vad i pro kontrolu povrchu. Mezi hlavní výhody optického měření patří přesnost, bezkontaktní a tedy nedestruktivní měření a rychlost. Metoda optické interferometrie je používána pro měření malých deformací při mechanickém anebo tepelném namáhání, pro měření výškového profilu, měření vibrací a podobně. Interferometrie v bílém světle je pak metoda vhodná především k měření výškového profilu materiálů. Na rozdíl od klasické interferometrie může být tato metoda použita i pro měření hrubých povrchů, jelikož využívá světlo s velkou spektrální šířkou. Používá se světlo s šířkou spektra od desítek po stovky nanometrů. Při měření je možné během jednoho měřicího procesu změřit výškový profil na celé ploše povrchu předmětu. Výhodou této metody je také velký rozsah měření, který dosahuje několika desítek milimetrů a je omezen v podstatě pouze vlastnostmi použitého posuvu měřeného objektu. Díky tomu, že je osvětlování i pozorování koaxiální, je možné měření také například ve vrtaných dírách či brusech.

V teoretické části práce jsou popsány základní principy interference (kapitola 3), principy metod optické rekonstrukce 3D objektů (kapitola 4), v kapitole 5 je stručně popsán princip CCD snímačů, i charakteristiky snímače použitého v praktickém měření této práce. Kapitola 6 je věnována navrženým laboratorním úlohám. Praktická část (kapitoly 7, 8, 9) je zaměřena na sestavení pracoviště pro měření výškového profilu objektů metodou optické interferometrie v bílém světle. Na tomto pracovišti je zde realizována demonstrační úloha pro měření tloušťky zrcadla a rekonstrukce povrchu tohoto zrcadla.

3. INTERFERENCE

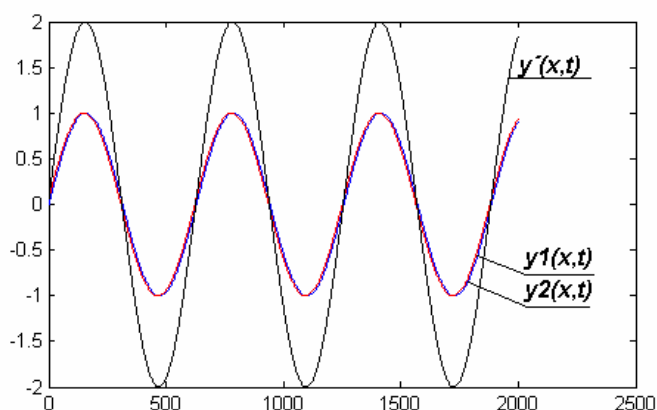
Po objasnění principu interference je nutné představit si šíření světla jako šíření postupné vlny. Vlnovou teorii jako první představil fyzik Christian Huygens v roce 1678 [3]. Jeho teorie předpokládá, že každý bod vlnoplochy šířícího se světla je možné si představit jako bodový zdroj sekundární kulové vlnoplochy. Po čase Δt bude nová vlnoplocha tečná plocha k těmto sekundárním vlnoplochám.



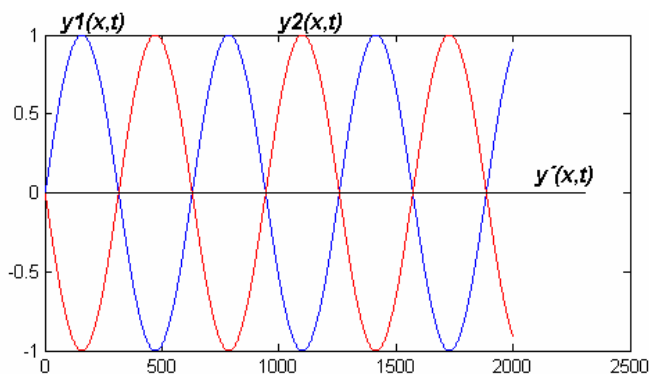
Obr. 3-1: Konstrukce šíření rovinné vlny ve vakuu na základě Huygensova principu [3].

Pokud si představíme dvě světelné vlny o stejné amplitudě a frekvenci, které se šíří po stejné ose stejnou rychlostí, platí mezi těmito signály princip superpozice (amplitudy se sčítají). Výrazným parametrem je fázový posun mezi těmito signály. Pokud je fázový posun nulový, signály se překrývají a výsledná vlna má oproti nim dvojnásobnou amplitudu. Tato amplituda je maximální a interference je pak úplně konstruktivní. V opačném případě, pro fázový posun mezi vlnami roven π , je výsledná amplituda rovna 0. Tento typ interference se nazývá úplně destruktivní.

Tyto typy popisují obrázky Obr. 3-2: Konstruktivní interference a Obr. 3-3: Destructivní interference kde y_1 a y_2 jsou identické postupné vlny a y' je výsledná vlna vzniklá interferencí.



Obr. 3-2: Konstruktivní interference

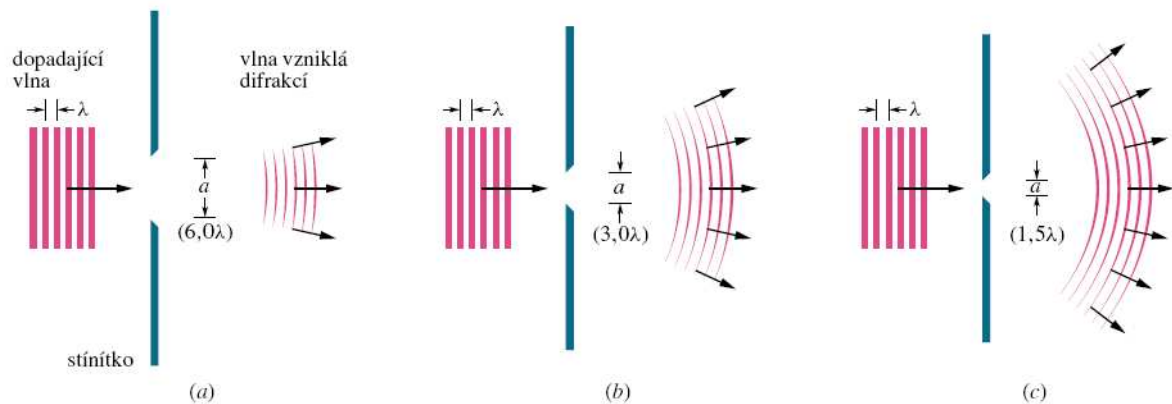


Obr. 3-3: Destructivní interference

Toto zesílení nebo zeslabení světla určitých vlnových délek má mnoho využití.

3.1 DIFRAKCE - OHYB VLN

Jestliže vlna dopadá na překážku s otvorem o velikosti srovnatelné s její vlnovou délkou, část vlny, která tímto otvorem projde, se rozšíří – ohne se. Difrakci vykazují všechny typy vln. Velikost difrakce je závislá na velikosti otvoru. Čím je otvor v překážce menší, tím více se pak vlna ohýbá.



Obr. 3-4: Schématické znázornění difrakce [3]

3.2 KOHERENCE

Hlavní podmínkou vzniku interferenčního obrazce je, aby byl fázový rozdíl dvou světelných vln, dopadajících do stejného místa, konstantní v čase. Pokud je tato podmínka splněna, je světlo **koherentní**. Takto tomu bylo například v Youngově dvouštěrbinovém pokusu, kdy oba světelné paprsky pocházely ze stejného zdroje světla. Pokud by byly tyto paprsky ze dvou nezávislých světelných zdrojů, fázový posun těchto dvou vln by se rychle a náhodně měnil. V takovém případě by se na projekční ploše rychle střídala konstruktivní a destruktivní interference světelných vln a interferenční obrazec v takovém případě nelze sledovat. Takové světlo je **nekoherentní**.

Pro zdroj světla o šířce spektra $\Delta\nu$ je maximální rozdíl optických drah mezi dvěma paprsky tohoto světla

$$\Delta p = \frac{c}{\Delta\nu}, \quad (3-1)$$

kde c je rychlost světla. Při větším rozdílu optických drah interferenční proužky vymizí. Tato vzdálenost je nazývána **koherentní délka** optického záření. Pro ideálně monochromatický zdroj je světlo koherentní. Takovému zdroji světla se může reálně přiblížit laser, jelikož jeho frekvenční spektrum je dostatečně úzké. Zdroje světla s velkou šířkou frekvenčního spektra mají kratší koherentní délku.

4. METODY OPTICKÉ REKONSTRUKCE 3D OBJEKTŮ

Při snímání objektů běžnými zařízeními jako je například CCD kamera dochází ke ztrátě jedné souřadnice (hloubka, vzdálenost) a 3D obraz se transformuje na 2D. Optická rekonstrukce je zpětná úloha, která se snaží odvodit trojrozměrné vlastnosti objektu.

Metody optické rekonstrukce 3D objektů se využívají například pro rozpoznávání předmětů, jejich třídění, určování vad i pro kontrolu povrchu. Mezi hlavní výhody optického měření patří přesnost, bezkontaktní a tedy nedestruktivní měření a rychlost.

Existují tři hlavní principy optických měření:

- 1.) triangulace,
- 2.) měření doby letu modulovaného světla,
- 3.) optická interferometrie.

Použití jednotlivých metod je závislé na konkrétní aplikaci a jejích požadavcích. V úvahu je brána například požadovaná přesnost měření, vzdálenost snímače od předmětu, jeho velikost, tvar, typ povrchu, okolní osvětlovací podmínky, požadovaná velikost zařízení, cena apod.

4.1 TRIANGULACE

Triangulace je nejpoužívanější metodou optické rekonstrukce 3D objektů. Je to způsob zjišťování souřadnic a vzdáleností, které se provádí trigonometrickým výpočtem. Sestrojí se pomyslný trojúhelník, jehož jedna strana je strana již známého jiného trojúhelníku s dvěma koncovými referenčními body. Třetím bodem je místo, jehož souřadnice se zjišťuje. Mezi nejdůležitější techniky triangulace patří:

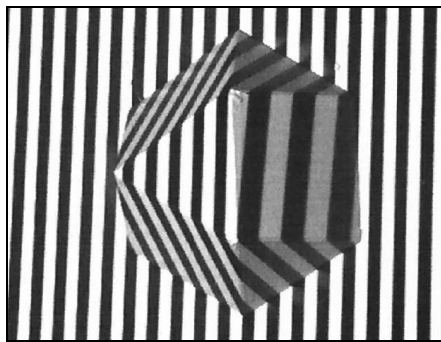
- aktivní triangulace,
- pasivní triangulace,
- měřicí systémy s teodolity,
- fokusovací techniky,
- podoba ze stínování.

4.1.1 Aktivní triangulace

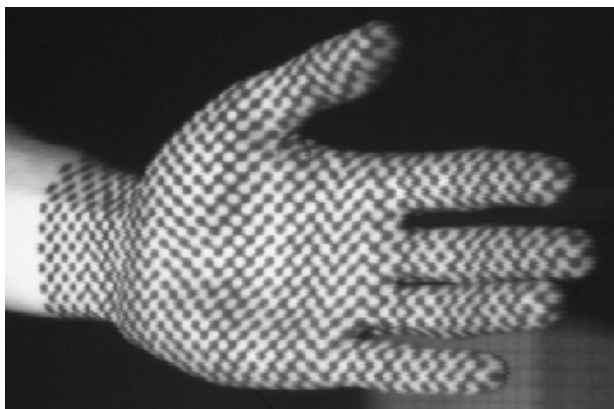
Spočívá v nasvětlení měřeného objektu světelným vzorem a v současném snímání tohoto vzoru například CCD kamerou z jiného místa. Je nutná znalost přesného uspořádání světelného zdroje, kamery a sledovaného bodu (triangulační trojúhelník). Dále je potřeba znát vzdálenost mezi zdrojem světla a snímačem (triangulační báze).

Z pozice zdroje světla je úhel paprsku svíraný s triangulační bází neměnný, ovšem z pozice snímače je tento úhel určen proměnnou pozicí vysvíceného bodu zachyceného CCD snímačem. Na základě znalosti triangulační báze a úhlu lze určit chybějící z-ovou souřadnici objektu. Pro nasvětlování objektů se používají různé světelné vzory. Při použití jediného světelného paprsku hovoříme o 1D triangulaci. Dále se používá nasvětlování pruhem světelného paprsku (2D triangulace), více pruhů nebo jiné světelné vzory (3D triangulace). Nasvětlení pomocí různých světelných vzorů ukazují obrázky č. 4-1.

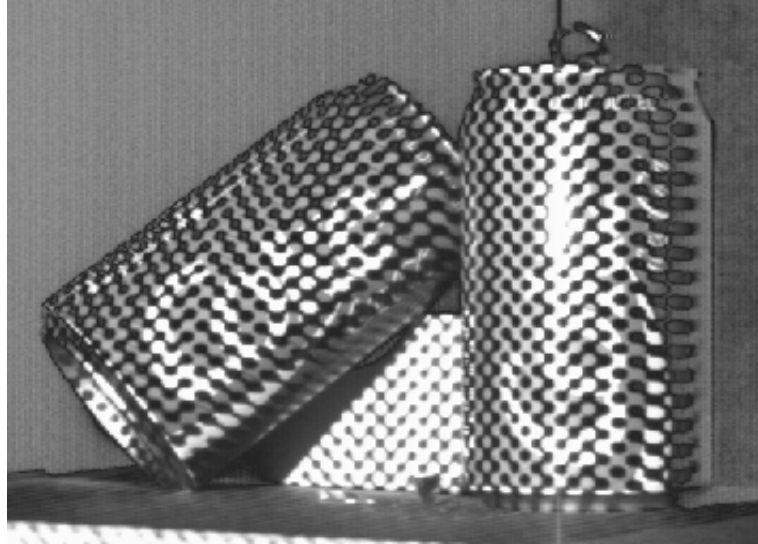
a)



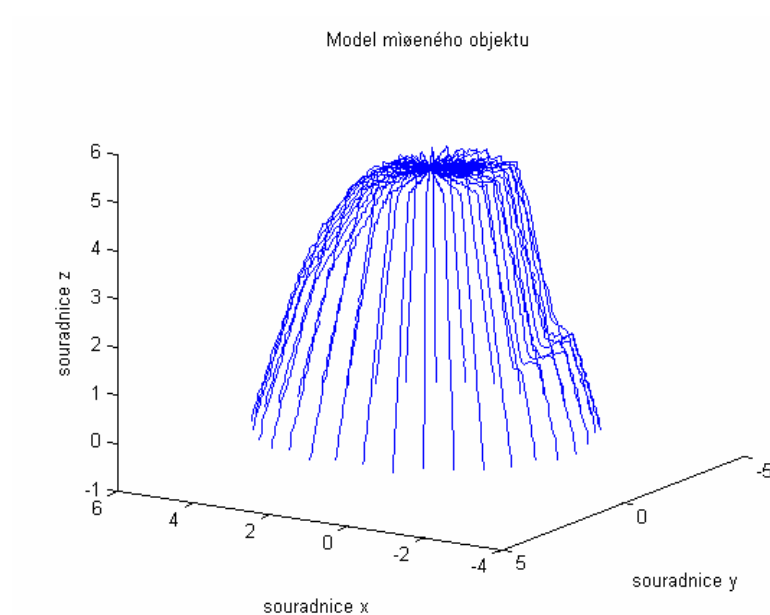
b)



c)



Obr. 4-1: Příklad nasvětlení měřených objektů různými světelnými vzory 3D triangulace



Obr. 4-2: Příklad rekonstruovaného objektu metodou aktivní 2D triangulace

4.1.2 Pasivní triangulace

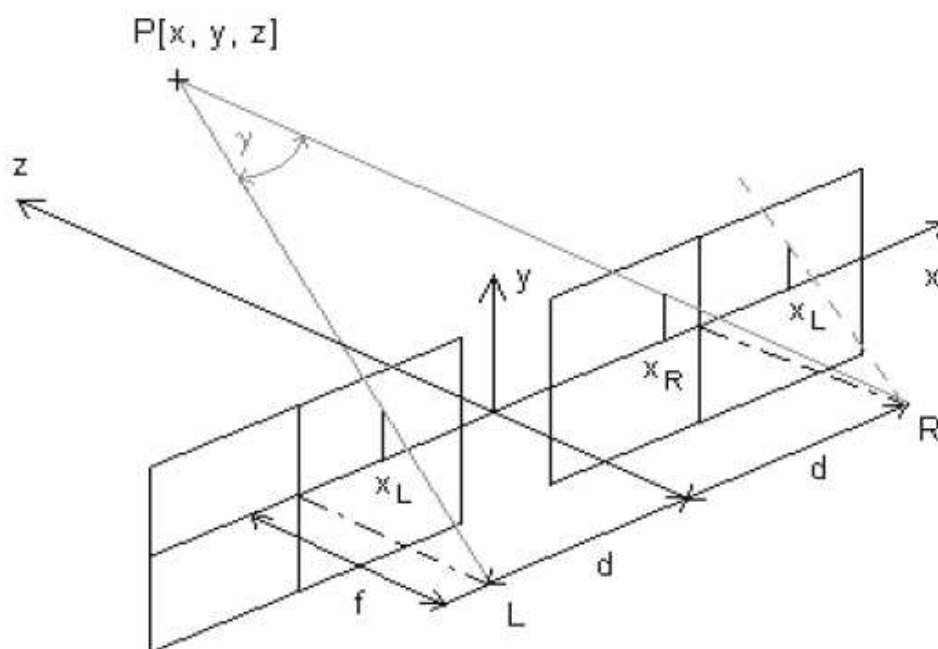
Pasivní triangulace neuvažuje uspořádání osvětlení měřeného objektu. Základem této metody je pořízení minimálně dvou snímků z různých úhlů pohledu.

K tomuto účelu se používá dvou nebo více kamer, které objekt snímají z různých úhlů pohledu, nebo je použita jedna kamera umístěna do různých pozic (postupně přemísťována), anebo je pozice kamery neměnná a pohybuje se měřený objekt.

Mezi metody se dvěma kamerami se řadí stereovidění. Stereovidění spočívá v pořízení dvou snímků dvěma snímači s rovnoběžnými optickými osami (jednodušší varianta). V takto získaných snímcích je poté hledán odpovídající bod snímaného objektu. Pokud je nalezen, dají se souřadnice bodu získat jednoduchým výpočtem ze vztahů:

$$x = x_L \frac{2d}{x_L - x_R}, y = y_L \frac{2d}{x_L - x_R}, z = \frac{2df}{x_L - x_R} - f, \quad (4-1)$$

kde $2d$ je vzdálenost mezi optickými osami kamer, f je jejich ohnisková vzdálenost, x_L a x_R jsou souřadnice řešeného bodu v obrazové rovině $z=0$. Rozdíl $x_L - x_R$ se označuje jako *horizontální paralaxa*.



Obr. 4-3: Stereo snímání

4.1.3 Měřicí systémy s teodolity

Tato metoda je nejpřesnější triangulační systém, který je schopný měřit s relativní chybou pod 5×10^{-6} . K měření je použito nejméně dvou teodolitů, které zaostřují na měřený předmět. Souřadnice jsou pak určeny ze změřených úhlů a ze známých pozic teodolitů. Nevýhodou této metody je velká časová náročnost měření. Tento systém není vhodný pro pohybující se předměty. Je využíván především ve stavebnictví, geodézii a také měření objektů o velkých rozměrech.

4.1.4 Fokusovací techniky

U fokusovacích technik je zásadní hloubka ostrosti a průměr kroužku vzniklého difrakcí v ohniskové rovině.

Používají se tři různé metody:

- konfokální mikroskopie,
- kontrolované fokusování,
- metoda rozfoksování.

4.1.5 Podoba ze stínování

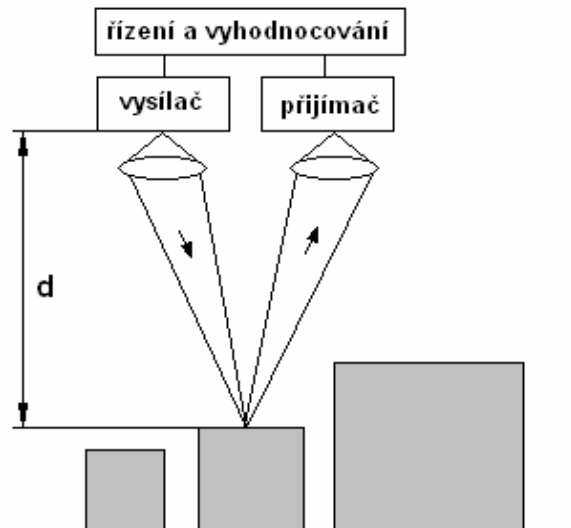
Tvar objektu je vyvozen určením normály povrchových elementů z osvětlení objektu, odlesků, stínů, také ze známých pozic kamery a světelných zdrojů. Tuto metodu lze rozšířit o použití obrazových sekvencí s pohyblivými zdroji světla nebo obrazy s různým osvětlením (fotometrické stereo).

4.2 MĚŘENÍ DOBY LETU MODULOVANÉHO SVĚTLA

Vzdálenost bodu je možné určit z doby letu t modulovaného světla vyslaného ze zdroje a odraženého od měřeného objektu podle vztahu:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (4-2)$$

Kde d je vzdálenost měřeného bodu, c rychlost světla a t doba od vyslání světelného signálu do jeho přijetí přijímačem.

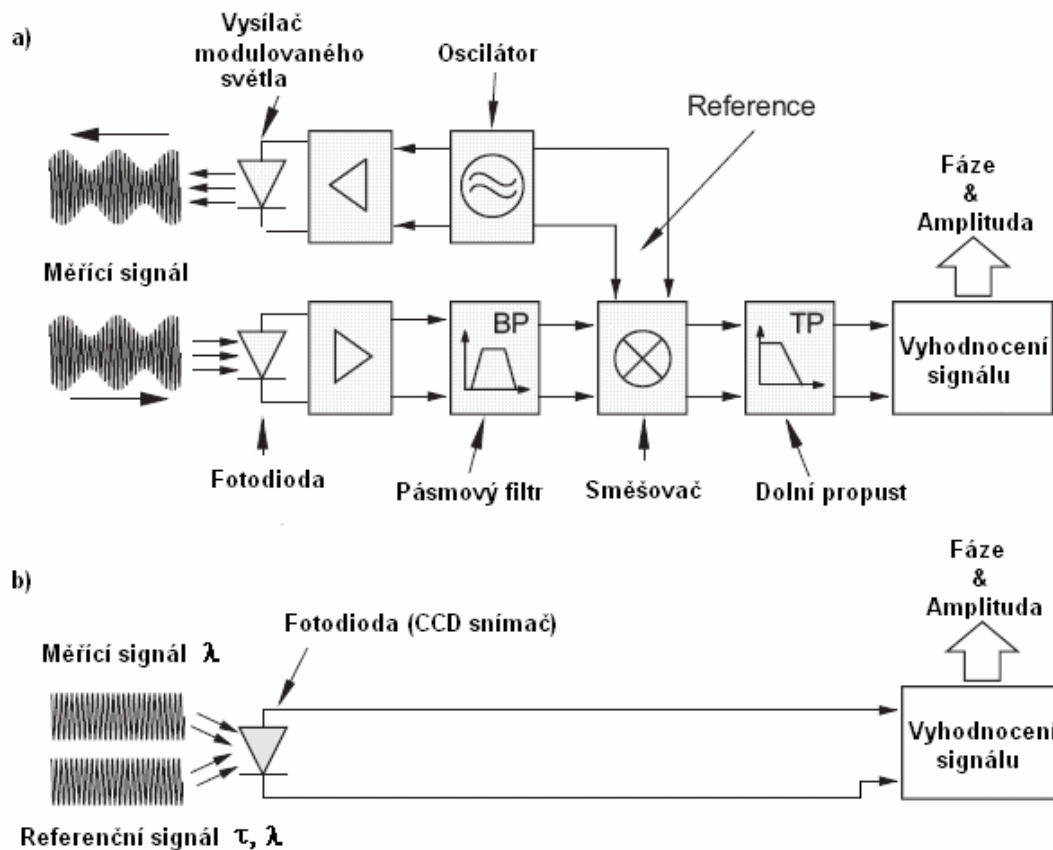


Obr. 4-4: Měření doby letu modulovaného světla

Pro světelný signál se používají tyto tři typy modulace:

- pulsní modulace,
- vlnová modulace,
- pseudo-náhodná modulace.

Hlavním problémem metody měření doby letu modulovaného světla je příliš velká rychlost světla (300×10^6 m/s), která vyžaduje rychlé snímače a má vysoké nároky na vyhodnocovací systém. Metody pracující s modulací se používají pouze u aplikací, které nemají příliš velké nároky na přesnost, která bývá řádově v centimetrech.



Obr. 4-5: Princip měření při použití a) modulovaného světla, b) koherentního světla (interference) při měření doby letu světla.

Interferometrie i měření doby letu modulovaného světla jsou založeny na stejných principech. Měření doby letu modulovaného světla zahrnuje kromě optické cesty značný čas zpoždění způsobený složitostí a množstvím elektronických součástek, kterými je měřený signál zpracováván. Obzvláště vlivem elektronického směšovače vznikají tak velké nepřesnosti. Naopak při použití interferometru vzniká výsledný interferogram přímo na CCD snímači smísením dopadajícího referenčního a měřicího svazku paprsků (koherentní světelný signál), takže měřený signál není zkreslován a tak je možné pomocí interferometrie dosáhnout přesnosti řádově až nanometrů.

4.3 OPTICKÁ INTERFEROMETRIE

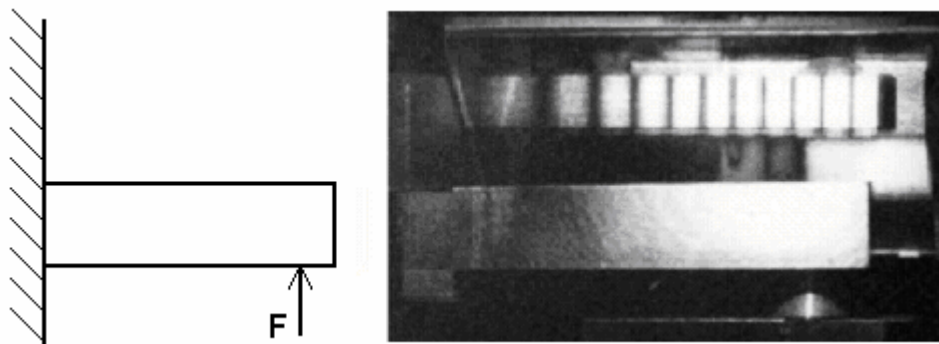
Klasická interferometrie je technika při které je koherentní svazek světelných paprsků rozdělen na měřicí a referenční svazek. Ty jsou poté oba přivedeny na snímač, kde se smísí. Pokud je použit 2D detektor (CCD senzor), je na něm přímo generován interferogram, který indikuje fázový posun mezi oběma svazky paprsků.

4.3.1 Interferometrie mnoha vlnových délek

Tato metoda nabízí výjimečné vlastnosti pro průmyslové aplikace. Je vhodná pro měření absolutní vzdálenosti, a to ze vzdálenosti několika desítek metrů s přesností řádově nanometry při ideálních podmínkách. Lze měřit také hrubé povrchy. Hlavní vlastností interferometrie mnoha vlnových délek je generování záznějového kmitočtu v rozsahu MHz až kHz při skládání blízkých vlnových délek.

4.3.2 Holografická interferometrie

Holografický interferometr je zařízení, které je určeno pro výzkum difúzních povrchů. Umožňuje zviditelnit a měřit změny polohy téhož difúzního povrchu ve dvou stavech objektu registrovaných ve dvou časových úrovních. Zařízení pracuje nejčastěji se světelnými zdroji, s lasery. Příklad interferogramu vetknutého nosníku zatíženého osamělou silou F je uveden na obrázku 4-6. V zrcadle lze prakticky pozorovat na nosníku interferenční proužky představující jeho deformace.

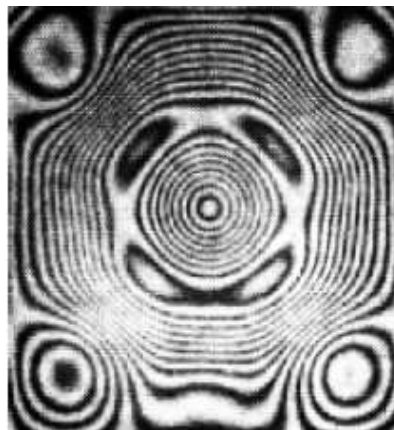


Obr. 4-6: Deformace vetknutého nosníku zatíženého osamělou silou [2]

Holografický interferometr lze použít pro měření deformací, posuvů a pro měření vibrací. Citlivost a přesnost určování změny polohy povrchu je přibližně rovna čtvrtině vlnové délky použitého světla, což odpovídá změně polohy mezi sousedním světlým a tmavým interferenčním proužkem. Holografický interferometr může pracovat se složitými difúzními povrchy a optické prvky nemusí mít vysokou kvalitu.

4.3.3 Skvrnová interferometrie

Skvrnová interferometrie využívá jiného rušivého efektu v optické metrologii pro přesné měření deformací. Skvrny jsou generovány odrazem koherentního světla od drsného povrchu. Odražené vlnoplochy interferují mezi sebou navzájem na povrchu detektoru a generují skvrnový vzor charakteristický pro hrubé elementární části povrchu. Při dalším referenčním paprsku se generuje druhý skvrnový vzor. Ten se smísí s prvním vzorem a vytvoří skvrnový interferogram. Pokud je objekt deformován, je zachycen druhý skvrnový interferogram. Poté je porovnán s původním a výsledek pak může vypadat například jako na obrázku č. 4-7. Mezera mezi jednotlivými pruhy je rovna velikosti $\lambda/2$.

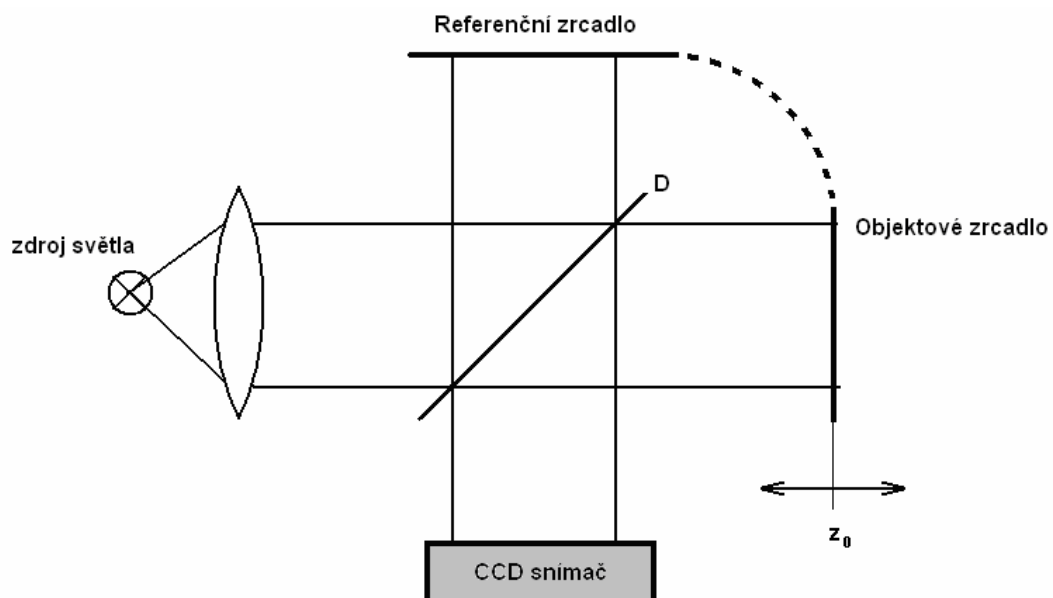


Obr. 4-7 Skvrnový interferogram [2]

4.3.4 Interferometrie bílého světla

Interferometrie bílého světla je metoda, která je vhodná pro měření výškového profilu objektů. Na rozdíl od klasické interferometrie může být tato metoda použita i pro měření hrubých povrchů, jelikož využívá světlo s velkou spektrální šířkou. Používá se světlo s šířkou spektra od desítek po stovky nanometrů. Při měření je možné během jednoho měřicího procesu změřit výškový profil na celé ploše povrchu předmětu, není tedy nutné postranní skenování. Výhodou této metody je také velký rozsah měření, který dosahuje několik desítek milimetrů a je omezen v podstatě pouze vlastnostmi použitého posuvu měřeného objektu. Díky tomu, že je osvětlování i pozorování koaxiální, je možné měření také například ve vrtaných dírách či brusech.

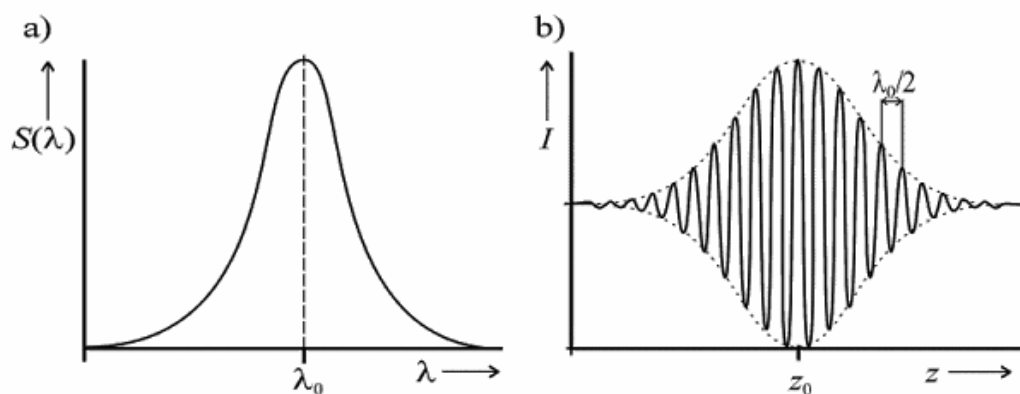
Interferometr denního světla může být realizován například jako Michelsonův interferometr se širokopásmovým světelným zdrojem a CCD kamerou jako detektorem. Měřený objekt je umístěn na místo objektového zrcadla.



Obr. 4-8 : Michelsonův interferometr použitý pro interferometrii bílého světla

Světlo ze širokopásmového zdroje světla prochází soustavou čoček, aby byl vytvořen paralelní svazek paprsků, který je rozdělen polopropustným zrcadlem (D) na referenční a objektový svazek paprsků. Objektový svazek dopadá na měřený objekt, kde se jeho vlnoplocha deformuje. Odražené svazky se opět skládají a

výsledný svazek dopadá na senzor. Pokud se měřený objekt pohybuje v ose z , mění se světelná intenzita sledovaného pixelu obrazu. Závislost světelné intenzity na poloze objektu v ose z je znázorněna na obrázku č. 4-9 b). Pozice z_0 zde definuje základní rovinu, kdy jsou optické dráhy referenčního a objektového paprsku shodné a intenzita sledovaného bodu výsledného interferogramu je v této pozici maximální.



Obr. 4-9: a) funkce spektrální hustoty světelného zdroje, b) závislost světelné intenzity na pozici objektového zrcadla [5]

Modulace intenzity jasu vzniká pouze v malém okolí roviny z_0 . Rozsah poloh objektového zrcadla, kdy je pozorovatelná interference je daná šířkou interferogramu, která je přímo úměrná koherentní délce a nepřímo úměrná šířce spektra světelného zdroje. Šířka interferogramu musí být v rozsahu přibližně 5 až 100 period modulace intenzity. Proto je možné pro tuto metodu měření použít pouze zdroje světla s velkou šířkou spektra a tím krátkou koherentní délkou. Těchto vlastností dosahují především termické zdroje a LED diody.

Závislost mezi šířkou interferogramu, koherentní délkou a šířkou spektra pro zdroj s gaussovským tvarem spektra lze popsat pomocí vztahu pro normalizovanou spektrální hustotu světla $g(\nu)$.

$$g(\nu) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\Delta\nu} \exp\left[-\left(\frac{\nu - \nu_0}{2\Delta\nu}\right)^2\right] \quad (4-3)$$

Kde ν_0 je střední frekvence a $\Delta\nu$ je efektivní šířka spektra. Pro komplexní stupeň koherence platí:

$$\gamma(\tau) = \int_0^{\infty} g(\nu) \exp(-i2\pi\nu\tau) d\nu = \exp(-4\pi^2\tau^2\Delta\nu^2) \cdot \exp(-i2\pi\nu_0\tau), \quad (4-4)$$

kde τ je časový rozdíl mezi dvěma paprsky. Tento výraz se dosadí do obecného interferenčního zákona pro stacionární optická pole:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \text{Re}\{\gamma(\tau)\}, \quad (4-5)$$

Kde I_1 a I_2 označuje intenzitu v jednotlivých ramenech interferometru a I výslednou intenzitu. Za předpokladu, že $I_1 = I_2 = I_0/2$, vychází výsledná intenzita:

$$I = I_0 \left[1 + \exp(-4\pi^2\tau^2\Delta\nu^2) \cos(2\pi\nu_0\tau) \right] \quad (4-6)$$

Koherentní délka světla s gaussovským spektrem je pak:

$$l_c = \frac{c}{4\pi\Delta\nu}, \quad (4-7)$$

kde c je rychlost světla. Střední vlnová délka $\lambda_0 = c/\nu_0$ a pro Michelsonův interferometr platí $\tau = 2(z - z_0)/c$. Výsledný vztah pro intenzitu má pak tvar:

$$I = I_0 \left\{ 1 + \exp \left[- \left(\frac{z}{l_c} \right)^2 \right] \cos \left(4\pi \frac{z - z_0}{\lambda_0} \right) \right\}. \quad (4-8)$$

Tento vztah popisuje závislost intenzity I na poloze objektového zrcadla z . Z této rovnice plyne, že perioda, s níž je intenzita modulována je $\lambda_0/2$.

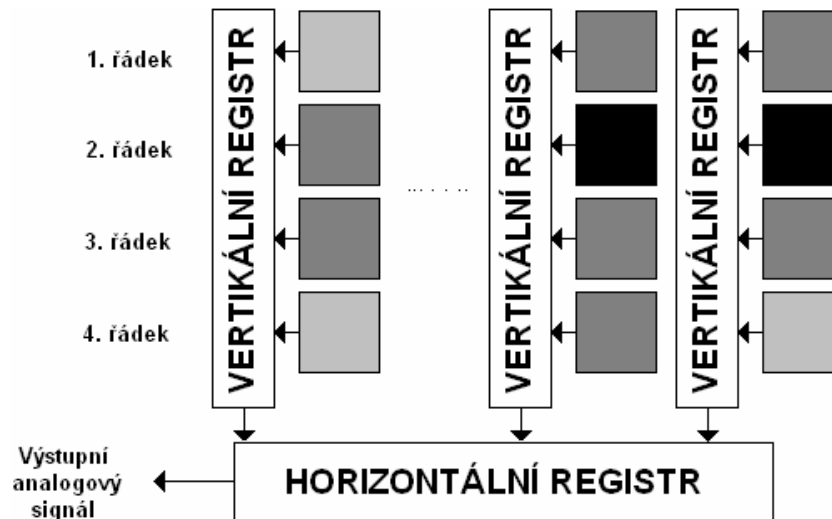
5. CCD KAMERA MODICAM 612

CCD kamera je pro tuto práci velice podstatnou součástí pracoviště. Do kamery bylo při realizaci pracoviště nutné zasahovat i z hlediska řízení. Proto je zde věnován prostor i hardware kamery a možnostem jejího řízení.

Kamera MODICAM 612 je vybavena CCD čipem ICX039DLA od firmy SONY. Experimenty a praktická část práce byly prováděny s použitím právě této kamery.

5.1 PRINCIP CCD SNÍMAČŮ

CCD (Charge Coupled Device) jsou fotocitlivé obvody, které převádějí dopadající světlo na elektrický náboj. Ten je pak měřen a převáděn do digitální podoby. Každý snímač je složen z velkého množství samostatných polovodičových miniaturních buněk zaznamenávajících světlo samostatně. Obrázky jsou tvořeny z bodů, jimiž se v praxi digitálního obrazu říká pixel. Základním zdrojem těchto pixelů jsou v digitální fotografii a v digitálním zobrazování právě tyto speciální senzory. Snímek se exponuje do izolovaných potenciálových jamek - pixelů, které jsou uspořádány do sloupců. Snímání funguje přibližně tak, že při dopadu světla na „buňku“ snímače dopadající fotony světla „vyrazí“ několik elektronů z polovodičového materiálu. Čím více je dopadajícího světla, tím větší počet elektronů se uvolní a tím větší tedy v buňce vznikne náboj. Každému sloupci buněk odpovídá jeden opticky zastíněný vertikální analogový posuvný registr, který současně slouží jako analogová paměť pro latentní obraz. Po ukončení expozice se latentní obraz přenesou z fotocitlivé oblasti do vertikálních posuvných registrů, ze kterých se řádek po řádku přesouvá do horizontálního posuvného registru, který jej převádí na sériový televizní signál (prokládané snímače). Přenos latentního obrazu do vertikálních posuvných registrů probíhá v jednom taktu ($\sim 10 \mu s$). Vzhledem k tomu, že vertikální registry jsou umístěny těsně u odpovídajících fotocitlivých prvků, nedochází během přenosu k rozmazání obrazu. To umožňuje ve spojení s elektronickou uzávěrkou dosáhnout expoziční dobu $64 \mu s$ při zachování dobré kvality obrazu.



Obr. 5-1: Příklad struktury prokládaného CCD snímače

5.2 CHARAKTERISTIKY CCD

5.2.1 Clonové číslo

Množství světla, které projde objektivem, lze řídit clonou - kruhovým otvorem ve středu objektivu. Čím větší je průměr clony, tím více světla projde objektivem a dopadne na senzor. Clonové číslo je definováno jako poměr ohniskové vzdálenosti objektivu a průměru vstupního otvoru objektivu při daném nastavení clony.

5.2.2 Expoziční doba

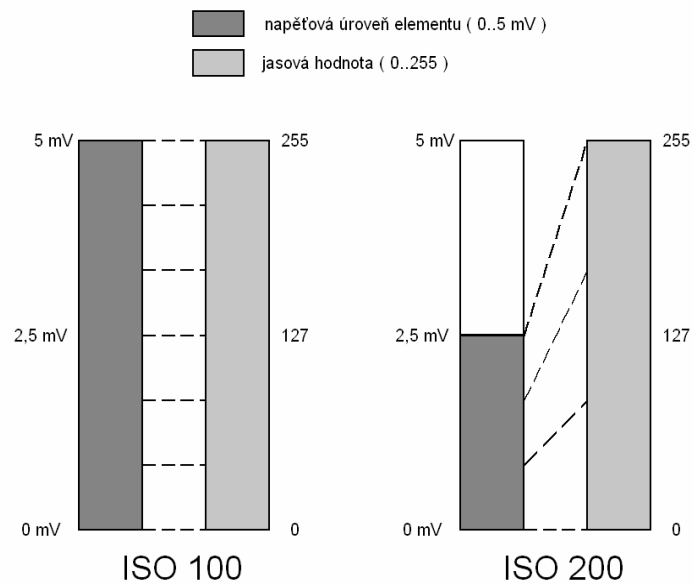
Denní nebo umělé světlo osvětluje fotografovanou scénu a ta část dopadajícího světla odráží. Část odraženého světla vnikne do objektivu, kde projde kruhovým otvorem - clonou ve středu objektivu a dopadne na senzor. Celkové množství světla, které dopadne na senzor ovlivňují tři faktory - expoziční čas a průměr clony v objektivu. Třetím faktorem, který ovlivní expozici, je elektronické řízení citlivosti senzoru na světlo. Expoziční čas je doba, jak dlouho světlo působí na senzor. Senzor v zásadě počítá dopadající fotony světla, a tak logicky expoziční doba jejich počet čili expozici ovlivňuje. Místo termínu expoziční čas se občas používá

termín rychlost závěrky. Označení vychází ze skutečnosti, že mechanické závěrky moderních zrcadlovek pracují na principu přejezdu štěrbinu vytvořené lamelami závěrky přes senzor, čímž určí expoziční dobu. U velmi krátkých časů (např. 1/2000 s) je obtížné si představit, že jakákoliv mechanická závěrka dokáže takto krátký čas realizovat. Mechanická závěrka se tak kombinuje se závěrkou elektronickou. Elektronická závěrka pracuje na jednoduchém principu, kdy elektronika sbírá náboj ze senzoru pouze po určitou dobu, která je kratší než otevření mechanické závěrky. Po zbylou dobu, kdy je stále mechanická závěrka otevřená, se náboj ze senzoru již nepoužije.

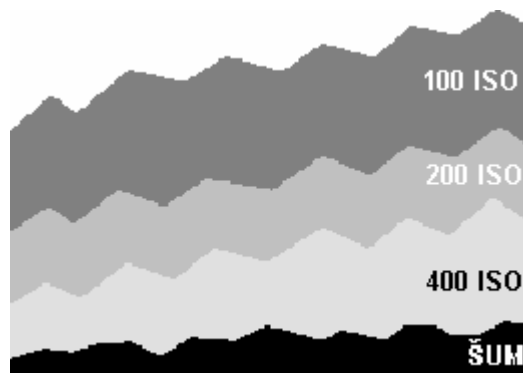
5.2.3 Citlivost snímače

Citlivost snímače je schopnost snímače zachytit správně snímaný obraz i při nedostatečném osvětlení. Je to tedy množství světla, které musí dopadnout na buňku snímače, aby bylo dosaženo požadovaného jasu.

U CCD snímačů lze měnit jejich citlivost změnou převodu napěťové úrovně reprezentující jas jednoho pixelu na jasovou hodnotu. Odpovídá-li tedy napěťová úroveň 5 mV jasové hodnotě 255 u snímače s citlivostí 100 ISO, potom tatáž jasová hodnota u snímače s citlivostí 200 ISO je způsobena již napěťovou úrovní 2.5 mV. Všechny vyšší úrovně až do maximální hodnoty výstupního napětí prvku 5 mV jsou považovány za maximální jasovou hodnotu 255. Princip ilustruje obrázek 5-2. Zvýšením citlivosti snižujeme rozsah napěťových úrovní, které vyplní škálu možných jasových hodnot. Zvyšováním citlivosti snímače, tedy i snižováním rozsahu napěťových úrovní se však zhoršuje kvalita výsledného snímku. To je způsobeno šumem. Citlivost 100 ISO má daleko větší odstup od šumu než vyšší citlivosti. Šum vzniká např. působením elektromagnetických vln, čili radiovým vysíláním, mobilními telefony nebo i teplem. Tyto a další vlivy, ať už vnější nebo vnitřní, se podílejí na celkové hodnotě šumu v obraze.

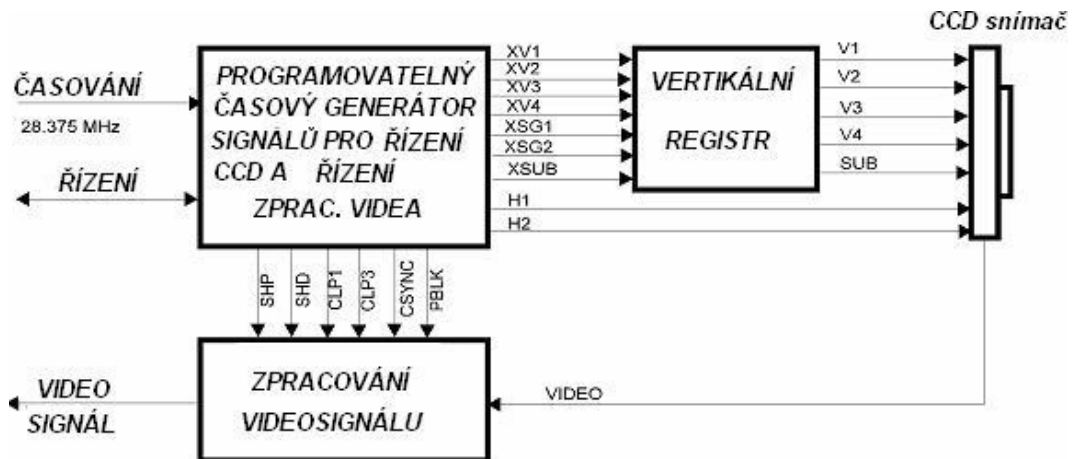


Obr. 5-2 Srovnání citlivostí CCD snímačů



Obr. 5-3 Odstup užitečného signálu od šumu při různých citlivostech CCD

5.3 KONFIGUROVATELNÁ CCD KAMERA



Obr. 5-4: Blokové zapojení kamery s CCD snímači

Na obrázku 5-4 je uvedeno Blokové schéma kamery. Kamera obsahuje generátor signálů pro řízení CCD snímače a obvodů pro řízení zpracování videosignálu, budič vertikálních a substrátových taktovacích signálů (konverze TTL na napěťové úrovně vhodné pro CCD snímač) a obvody pro zpracování videosignálu.

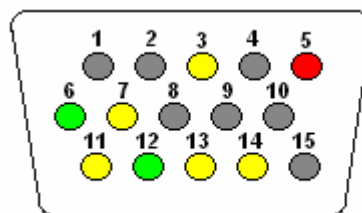
Signály, které jsou uvedeny ve schématu, mají následující význam:

- SUB - substrátové hodiny, řídí odsávání náboje z fotocitlivé oblasti čipu. Tento signál se používá jako elektronická závěrka, obraz se exponuje pouze když tento signál není aktivní. Je vhodné upozornit, že tento signál může být aktivní (úroveň L) jen při určité kombinaci napětí na elektrodách V1,..4, aby se zamezilo nežádoucímu odsátí náboje z vertikálních posuvných registrů,
- H1, H2 - dvojfázové taktovací impulsy pro řízení horizontálního posuvného registru. Přerušují se na dobu nutnou pro přenos řádku z vertikálních posuvných registrů do horizontálního,
- V1,..4 - čtyřfázové řízení vertikálních posuvných registrů. Předepsanými kombinacemi napětí na těchto elektrodách se určuje poloha potenciálových jamek při exponování obrazu (sudý - lichý pulsnímeček), po ukončení expozice se z nich přenáší

- naintegrovaný náboj do vertikálních posuvných registrů a posouvá se v každém televizním řádku o jednu pozici směrem k horizontálnímu posuvnému registru,
- XSG1,2 řídí přenos náboje (latentního obrazu) z fotocitlivé části snímače do vertikálních posuvných registrů, při přenosu se připočítají k signálům V2 a V3,
 - CLP1,3 jsou aktivní, když je na výstupu CCD snímače videesignál z opticky zastíněných sloupců na začátku a konci fotocitlivé oblasti, slouží k upínání videesignálu na úroveň černé,
 - SHP, SHD vzorkují výstupní signál z CCD snímače v okamžicích před (těsně před rozepnutím resetovacího tranzistoru) a po přenosu náboje (nový pixel) z horizontálního posuvného registru na jeho výstup. Videesignál se získává jako rozdíl těchto dvou vzorků. Tím se potlačuje geometrický šum CCD snímače a přeslechy rychlých řídicích signálů do videesignálu,
 - BLK je zatemňovací impuls, je aktivní po dobu, kdy je na výstupu CCD snímače platný videesignál,
 - CSYNC je synchronizační směs,
 - HD je řádkový synchronizační impuls.

5.3.1 Řídicí signály kamery

Zapojení řídicího konektoru kamery Modicam 612:



Obr. 5-5: CANON 15 kamery

- | | |
|-----------------|------------------|
| 3. EXPOSURING_0 | 11. N_SO_0 |
| 5. +12 V | 12. GND |
| 6. GND | 13. CAM0_REZERVA |
| 7. N_SUBST_CLK | 14. FL_REQ_0 |

- SO je spouštěcí signál. Po proběhnutí tohoto signálu následuje vybavovací doba a poté se spustí signál FL_REQ.

- FL_REQ je požadavek na grab – identický s expozicí

5.3.2 Charakteristiky snímače ICX039DNA

Čip ICX039DLA je černobílou verzí řady CCD snímačů ICX039DxA firmy SONY. Jde o prokládaný snímač. Samotné světlocitlivé prvky představují tzv. HAD snímače (Hole Accumulation Diode), které zajišťují vysokou citlivost (ve smyslu odstupu od šumu) a malý proud za temna. Čip disponuje elektronickou uzávěrkou ovládatelnou kontinuálně, dobrou anti-bloomingovou charakteristikou a možností substrátového předpětí.

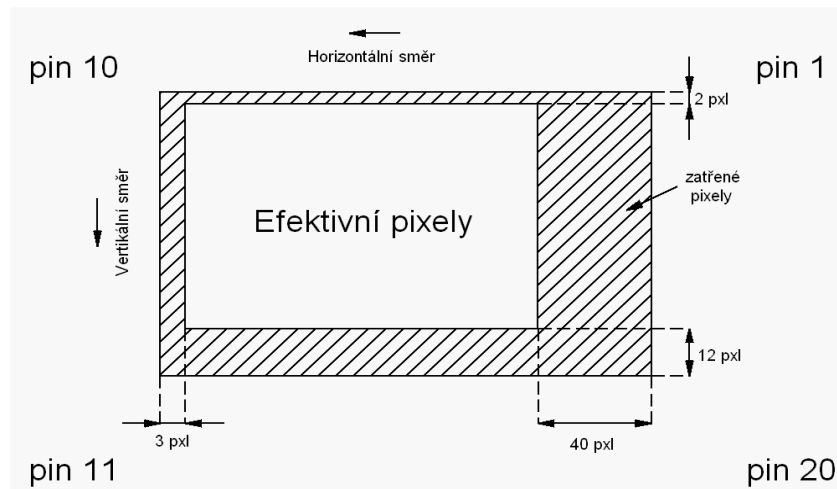
Optická velikost čipu odpovídá 1/2" formátu. Toto značení je poněkud zavádějící, protože se vztahuje ke skleněným obalům starých vakuových elektronek a tradičně přežilo až dodnes. Skutečný rozměr čipu (diagonála) je přibližně o 30% kratší. Podél obvodu čipu jsou na každé straně vymezeny oblasti opticky zatřených pixelů, které slouží pro získání referenční černé úrovně. Jde o buňky pracující stejně jako ostatní, jen s tím rozdílem, že je zaručeno, že do těchto buněk nevniká vnější světlo a že tedy vykazují nábojovou úroveň odpovídající černé barvě. Ty buňky (nezatřené), které se aktivně podílejí na reprezentaci obrazu jako takového, se nazývají efektivní. Někteří výrobci úmyslně uvádějí v dokumentačních listech kamer celkový počet pixelů na čipu, což je víceméně zavádějící číslo.

Základní vlastnosti čipu:

- velikost čipu: 7.95 mm x 6.45 mm (*horizontální x vertikální*)
- optická formální velikost: 1/2" (12.7 mm)
- optická skutečná velikost: 10.2 mm
- celkové rozlišení: 795 x 596
- efektivní rozlišení: 752 x 582
- počet všech pixelů: 473 820
- počet efektivních pixelů: 437 664
- počet pixelů pro referenční černou: 36 156

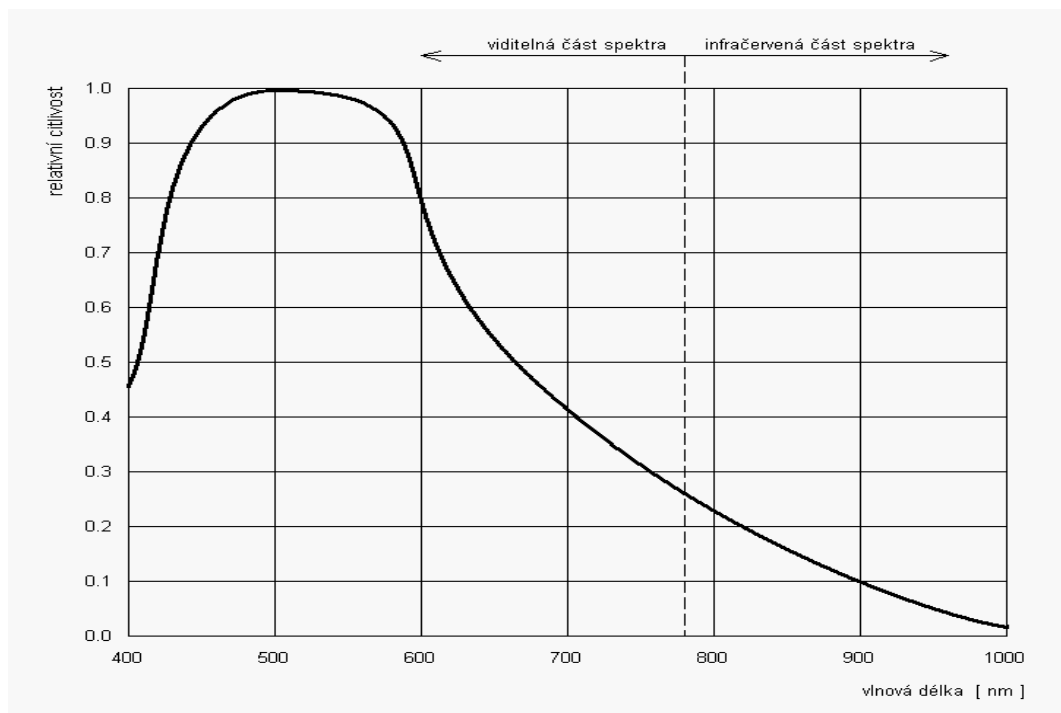
- horizontální necitlivé pásmo: vpřed 3, vzad 40
- vertikální necitlivé pásmo: vpřed 12, vzad 2
- materiál substrátu (podložky): silikon

Fyzické umístění efektivních pixelů a umístění pixelů sloužících pro upoutání snímku na úroveň černé a jejich počet popisuje následující obrázek 5-6.



Obr. 5-6 Uspořádání pixelů na čipu

CCD prvky jsou citlivé i na část infračerveného spektra. Aby nebyl výsledný obraz ovlivněný tímto zářením, je v některých případech před čipem umístěn filtr k odstranění infračervených složek. Přímou závislost citlivosti čipu na vlnové délce ukazuje obrázek 5-7.



Obr. 5-7 Spektrální citlivost snímače ICX039DLA

Jak je z obrázku patrné, tak i ve viditelné části spektra není citlivost snímače konstantní, což způsobuje prosazování určitých dominantních vlnových délek oproti ostatním. Nejcitlivější je snímač na vlnové délky kolem 510 nm, jež odpovídají modrozelené barvě. Prakticky to znamená, že předměty modrozelené barvy jsou zobrazovány s vyšší intenzitou, než jí skutečně odpovídá. Skutečné rozdíly jasových hodnot jsou ale zanedbatelné.

6. LABORATORNÍ ÚLOHY S VYUŽITÍM PRINCIPŮ OPTICKÉ INTERFEROMETRIE

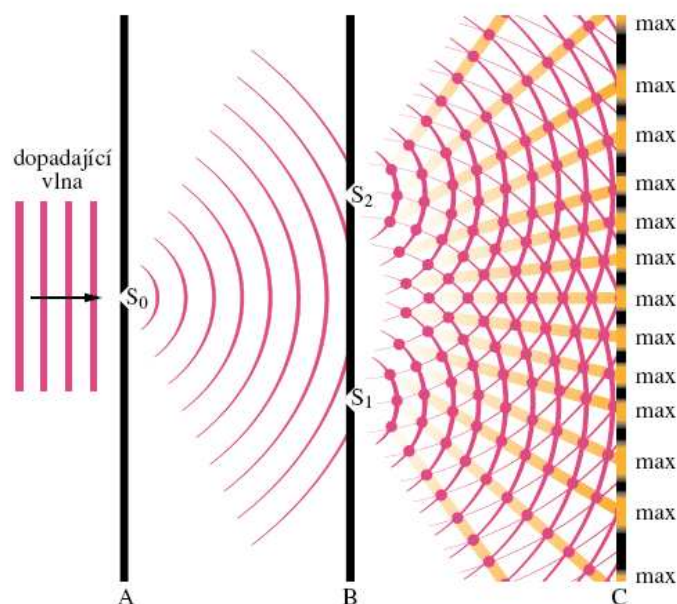
6.1 YOUNGŮV INTERFERENCEŇNÍ POKUS

Seznam přístrojů

- plošná CCD kamera + digitalizační karta
- zdroj světla + napájecí zdroj
- soustava stínidel se štěrbinami

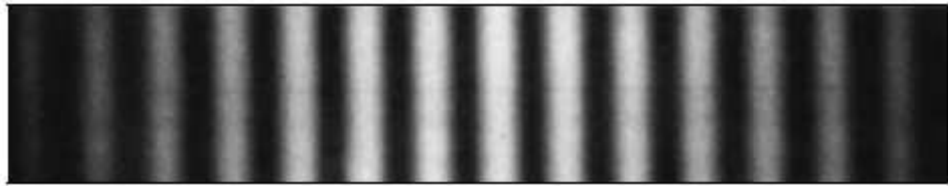
Teoretický úvod

Při Youngově dvouštěrbinovém pokusu světlo ze vzdáleného monochromatického zdroje osvětluje štěrbinu S_0 na stínítku A (viz Obr. 6-1). Difrakcí vzniklé světlo osvětluje dvě štěrbinu S_1 a S_2 na stínítku B. Ohybem na těchto dvou štěrbinách vzniknou dvě válcové vlnoplochy, které spolu na rovině C interferují, a vznikají zde tak interferenční pruhy.



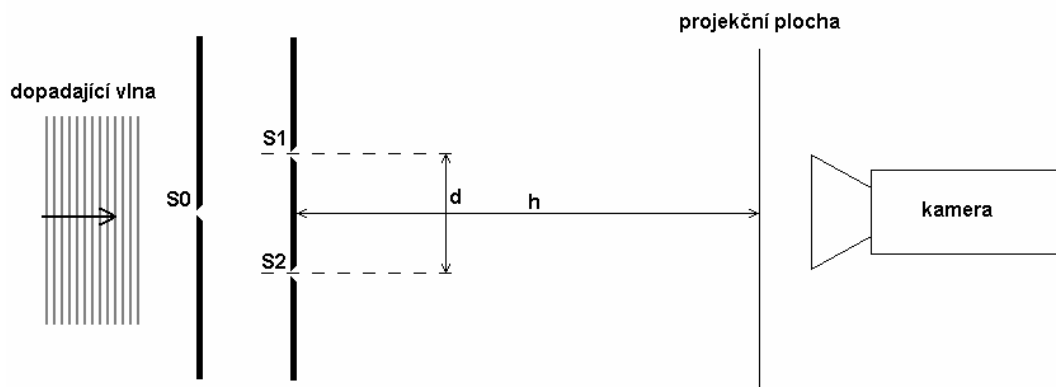
Obr. 6-1: Youngův interferenční dvouštěrbinový pokus[3]

Výsledek takto získaného interferenčního obrazce je na obrázku Obr. 6-2.



Obr. 6-2: Interferenční obrazec při Youngově interferenčním pokusu.

Praktické upořádání pracoviště:



Obr. 6-3: Rozmístění měřicího pracoviště 1

Vzdálenost středu světlého proužku, neboli maxima, od středu interferenčního obrazce se pak dá vypočítat jako:

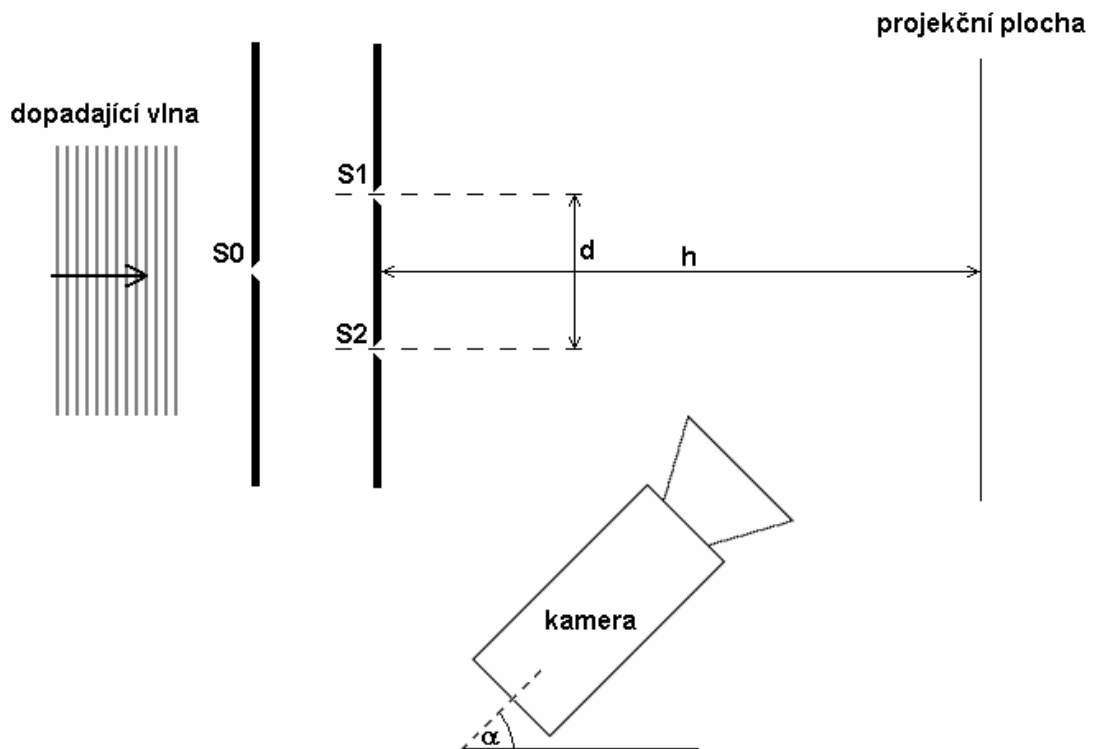
$$y_m = \frac{m\lambda h}{d} \quad (6-1)$$

Vzdálenost středu tmavého pruhu je:

$$y_m = \frac{(m + \frac{1}{2})\lambda h}{d} \quad (6-2)$$

Kde m je celé číslo udávající pořadí pruhu od středu obrazce, λ je vlnová délka světla, h je vzdálenost stínítka od štěrbin a d je vzdálenost mezi štěrbinami.

Interferenční obrazec, promítaný na projekční plochu je možné snímat CCD kamerou buď s umístěním kamery v ose soustavy prosvětlením tenké projekční plochy, nebo snímáním obrazce z jiného místa



Obr. 6-4: Rozmístění měřicího pracoviště 2

Úkoly:

1. zkalibrovat snímací soustavu tak, aby z nasnímaných obrazů bylo možné určit reálné rozměry na projekční ploše,
2. nasnímat interferenční obrazec,
3. nalézt v obraze interferenční pruhy a určit vzdálenost jejich středů od osy obrazce,
4. naměřené hodnoty porovnat s teoretickými předpoklady ze známých rozměrů soustavy.

6.2 MICHELSONŮV INTERFEROMETR – INTERFEROMETRIE V BÍLÉM SVĚTLE

Základní princip této metody je uveden v kapitole 4.3.4.

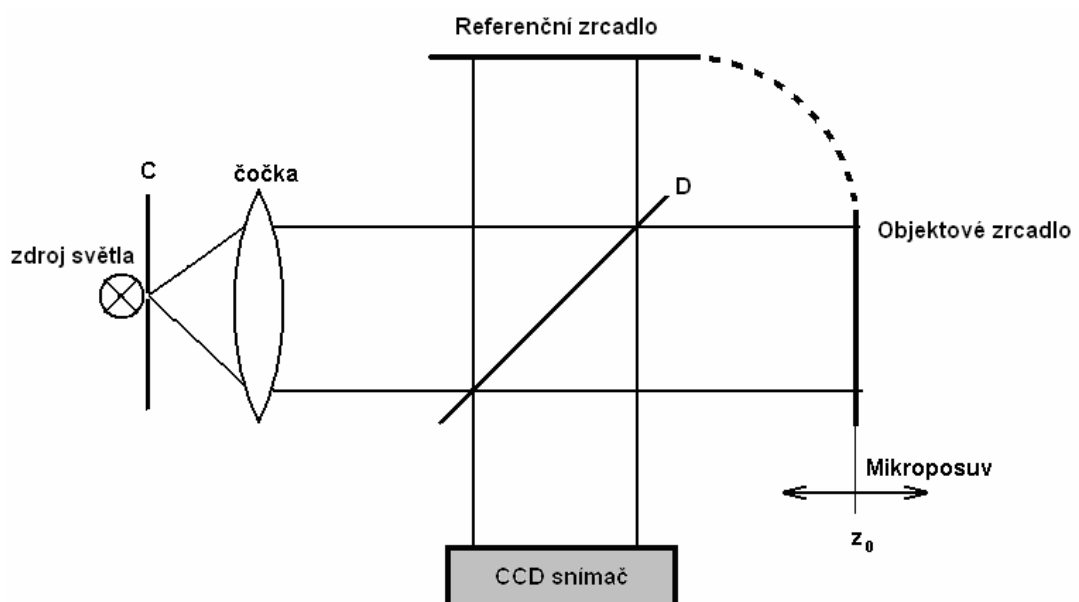
Seznam přístrojů

- plošná CCD kamera + digitalizační karta
- mikroposuv 8MT175-100 s řídicí jednotkou 8SMC1-USBh + manuál
- zdroj světla + napájecí zdroj
- soustava Michelsonova interferometru

Teoretický úvod

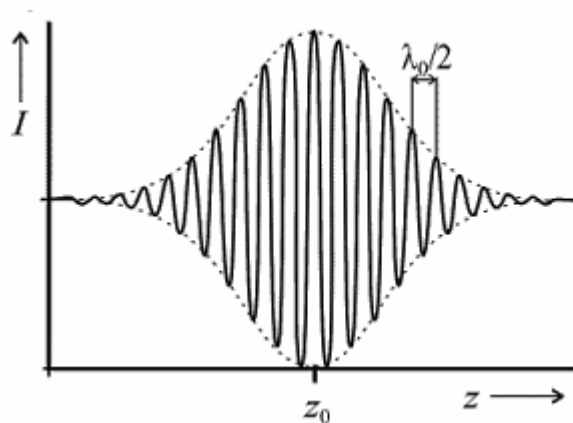
Interferometrie v bílém světle využívá světla s širokým frekvenčním spektrem a tedy i krátkou koherentní délkou. Pro demonstraci principu byl realizován Michelsonův interferometr.

Schéma uspořádání pracoviště:



Obr. 6-5: Michelsonův interferometr použitý pro interferometrii bílého světla

Světlo ze širokopásmového zdroje prochází přes otvor v cloně C a přes čočku. Tím se vytvoří paralelní svazek paprsků, který je rozdělen polopropustným zrcadlem (D) na referenční a objektový svazek paprsků, ty jsou pak odraženy zrcadly a přes dělič jsou přivedeny na senzor, kde se smísí a vzniká interference. Jelikož je použito světlo s krátkou koherentní délkou, vzniká interference pouze pokud je objektové i referenční zrcadlo ve stejné vzdálenosti od děliče (rovina z_0) nebo v těsném okolí této roviny. Pokud se měřený objekt pohybuje v ose z , mění se světelná intenzita sledovaného pixelu obrazu tak jak je naznačeno na následujícím obrázku.



Obr. 6-6: závislost světelné intenzity na pozici objektového zrcadla

Pokud je nastavena přesně pozice z_0 , je intenzita interferenčního obrazce maximální.

Úkoly:

1. Zaostřete objektiv kamery do oblasti před polopropustné zrcadlo, Spusťte program pro snímání kamery WinApiGrab, nastavte hodnoty *gain* a *offset* tak, aby byl obraz co nejvíce kontrastní.
2. Pomocí programu SMCView pro ovládání mikroposuvu dojeďte na místo předpokládané roviny z_0 (rozměřte si podle polohy referenčního zrcadla). Proměřte okolí ± 10 mm od této roviny

- pomalou rychlostí posuvu (0.05 step/s, krok 1/8) při snímání a ukládání obrázků kamerou s nastavenou periodou snímání 20 ms.
- uložené obrázky zpracujte. zobrazte průběh jasu vybraného pixelu obrazu. během měření. Porovnejte s teorií.

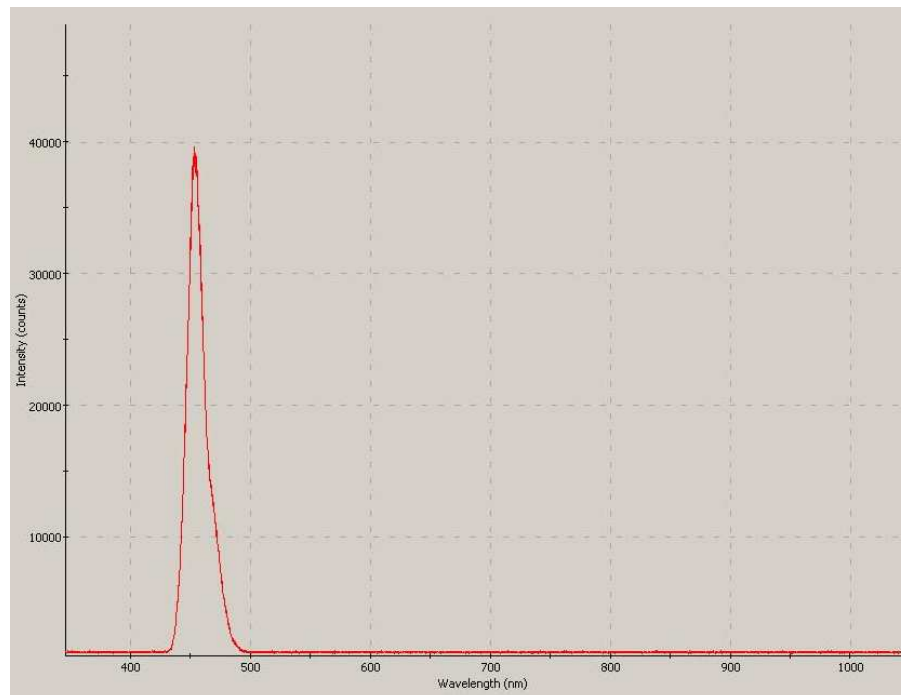
7. REALIZACE MĚŘICÍHO PRACOVISTĚ

Bylo realizováno měřicí pracoviště pro rekonstrukci povrchu 3D objektů metodou optické interferometrie. Pro realizaci byla zvolena metoda interferometrie s bílým světlem s Michelsonovým uspořádáním. Princip této metody je popsán v kapitole 4.3.4.

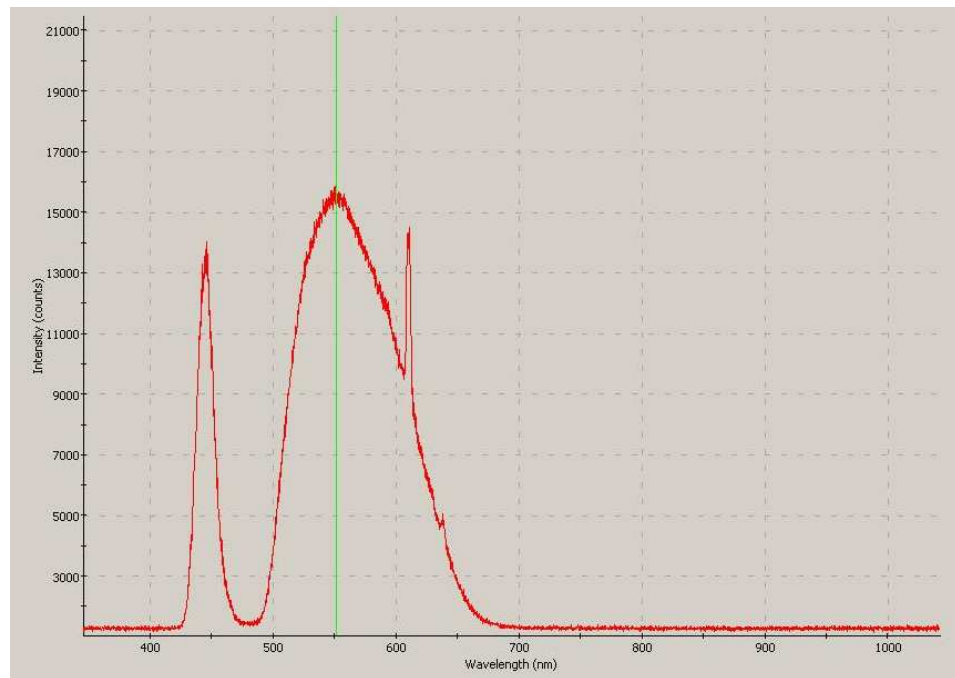
7.1 VÝBĚR ZDROJE SVĚTLA

Pro měření výškového profilu metodou interferometrie v bílém světle je nutné použít zdroj světla s dostatečnou šířkou spektra a tedy krátkou koherentní délkou. Těchto vlastností dosahují především termické zdroje a LED diody.

Pomocí spektrometru byla změřena spektra světla několika zdrojů světla. Zde jsou uvedené dvě z nich.



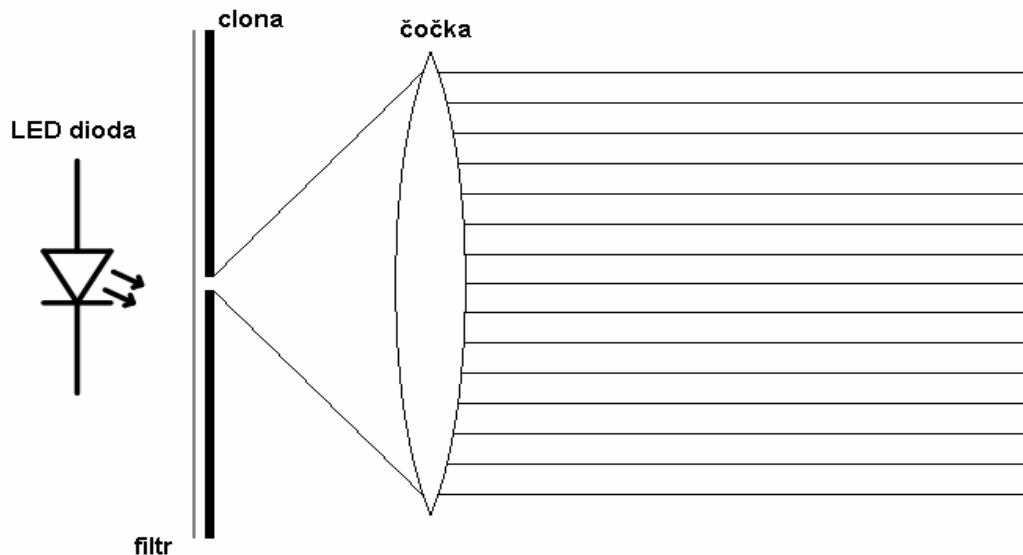
Obr. 7-1: Frekvenční spektrum světla modré LED diody



Obr. 7-2: Frekvenční spektrum světla bílé LED diody

Pro naše měření je z těchto dvou zdrojů světla teoreticky vhodnější bílá LED dioda, protože má větší šířku spektra a tedy i menší koherentní délku a lze s ním tedy dosáhnout i teoreticky vyšší přesnosti. Při praktické realizaci pracoviště však bylo použito světlo modré diody, jelikož viditelnost interferenčního obrazce podstatně vyšší. Bližší porovnání experimentálních měření s těmito zdroji světla jsou uvedeny v kapitole 7.4.

Světlo ze zvoleného zdroje světla bylo nutné upravit na svazek rovnoběžných paprsků. Dioda byla zakryta clonou s malým otvorem. Světlo vycházející z takto vytvořeného bodového zdroje světla bylo čočkou převedeno na rovnoběžný svazek paprsků. Čočka byla od clony s otvorem vzdálena o ohniskovou vzdálenost. Mezi LED diodu a clonu byl umístěn filtr s hrubou strukturou, aby bylo dosaženo vyšší homogenity světla. Toto uspořádání je znázorněno na obrázku 7-3.

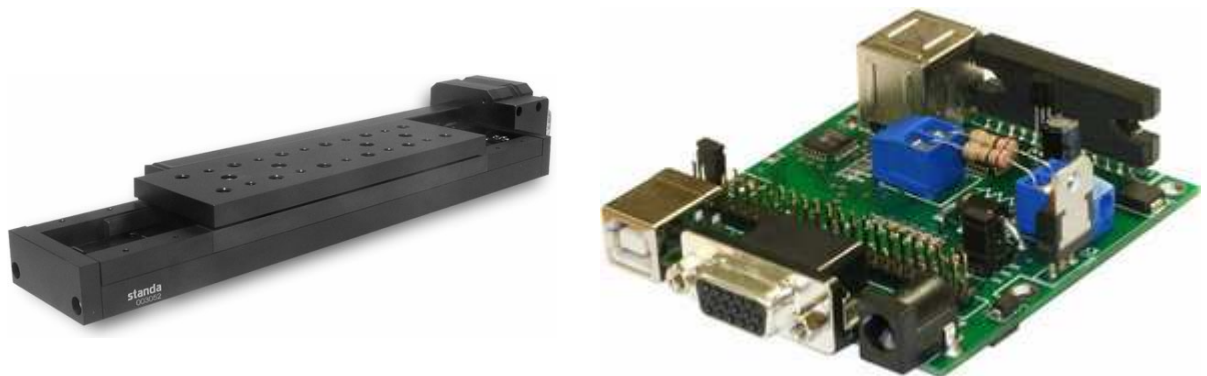


Obr. 7-3: Uspořádání světelného zdroje

Objektové zrcadlo v soustavě bylo nejdříve při měření posouváno ručním mikroposuvem. To bylo pro měření několika stovek snímků nevhodné kvůli časové náročnosti takového měření a také z hlediska přesnosti. Rozlišení ručního posuvu bylo 10 μm . Z těchto důvodů byl do soustavy umístěn motorický mikroposuv 8MT175-100, který je ovladatelný přes počítač.

7.2 MOTORICKÝ POSUV 8MT175-100

Do měřicí soustavy byl umístěn motorický mikroposuv s krokovým motorem 8MT175-100 s řídicí jednotkou 8SMC1-USBh od firmy Standa Opto-Mechanical products.

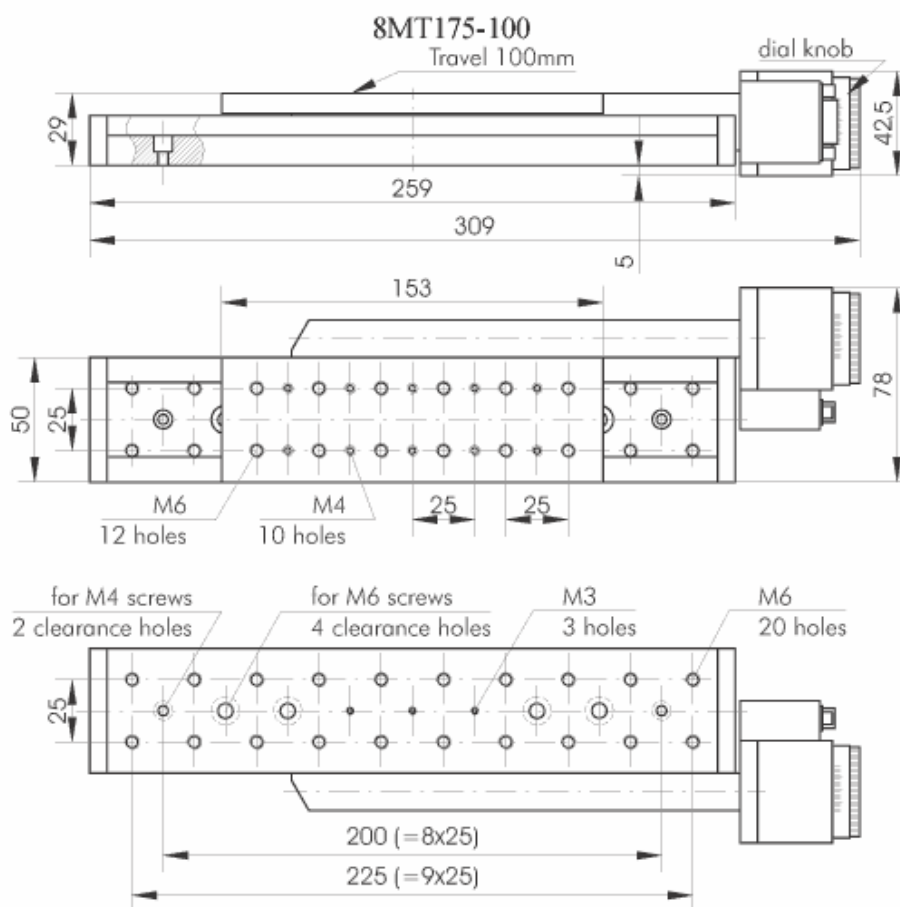


Obr. 7-4: Elektronický mikroposuv a jeho řídicí jednotka

Výhodou použití tohoto mikroposuvu je snadná ovladatelnost, nastavitelnost, přesnost, široké možnosti nastavení rychlosti i kroku motoru.

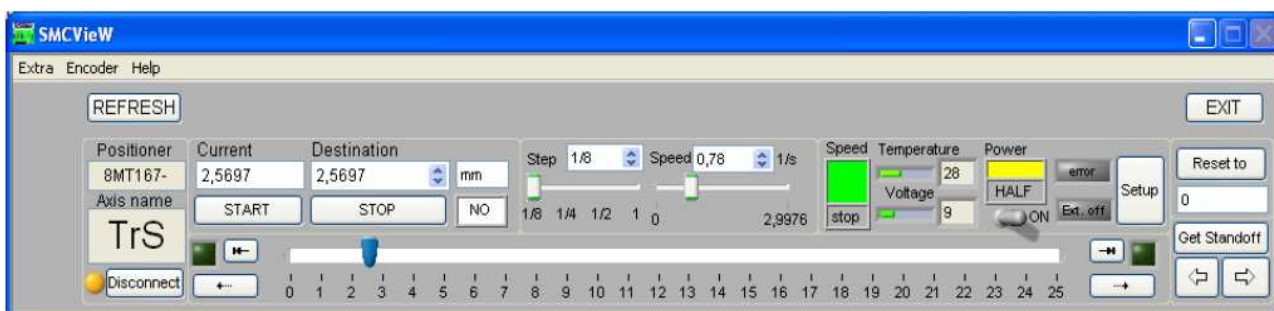
Výběr některých katalogových údajů:

Rozsah posunutí	100 mm
Rozlišení jednoho kroku motoru	2.5 μ m
Maximální rychlost	4 mm/s



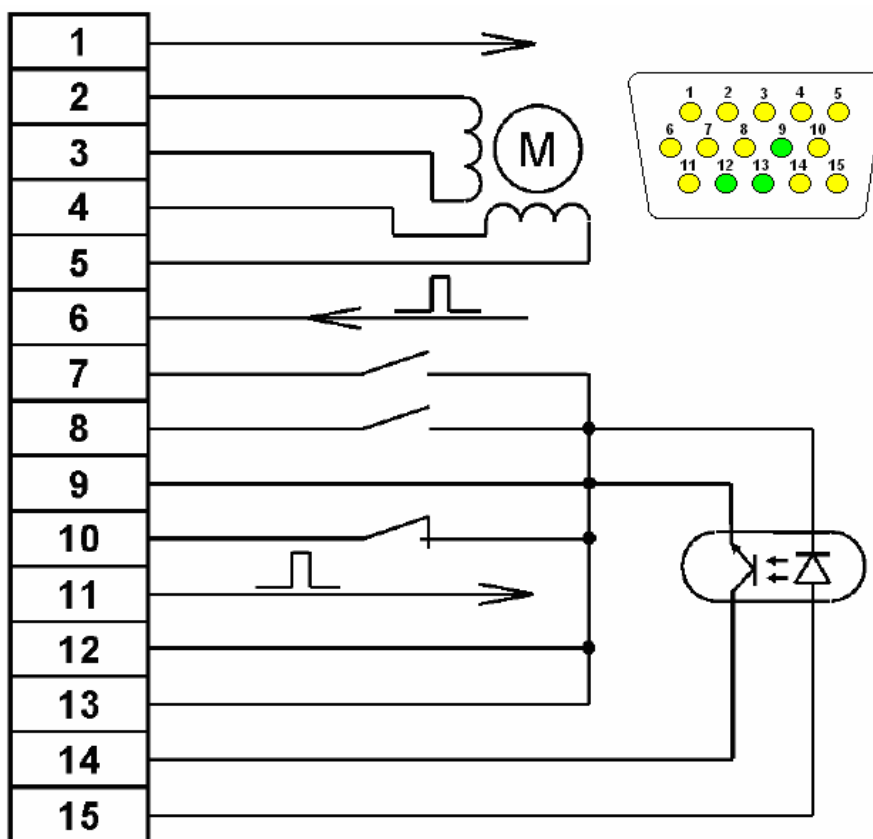
Obr. 7-5: Technický výkres motorického mikroposuvu 8MT175-100 [4]

Díky dodávanému software SMCView ver. 1.31 od MicroSMC je tento mikroposuv snadno ovladatelný přes počítač přímo z prostředí Windows. Je zde možné nastavit rychlost, krok posuvu, směr, cílovou hodnotu, tak je možné využít i synchronizační pulsy, jejichž parametry jsou také nastavitelné.



Obr. 7-6: Ukázka programu SMCView

Na obrázku 7-7 je uvedeno schéma zapojení vývodů konektoru řídicí jednotky mikroposuvu.



Obr. 7-7: Schéma zapojení vývodů konektoru na 8SMC1-USBh

Popis vývodů:

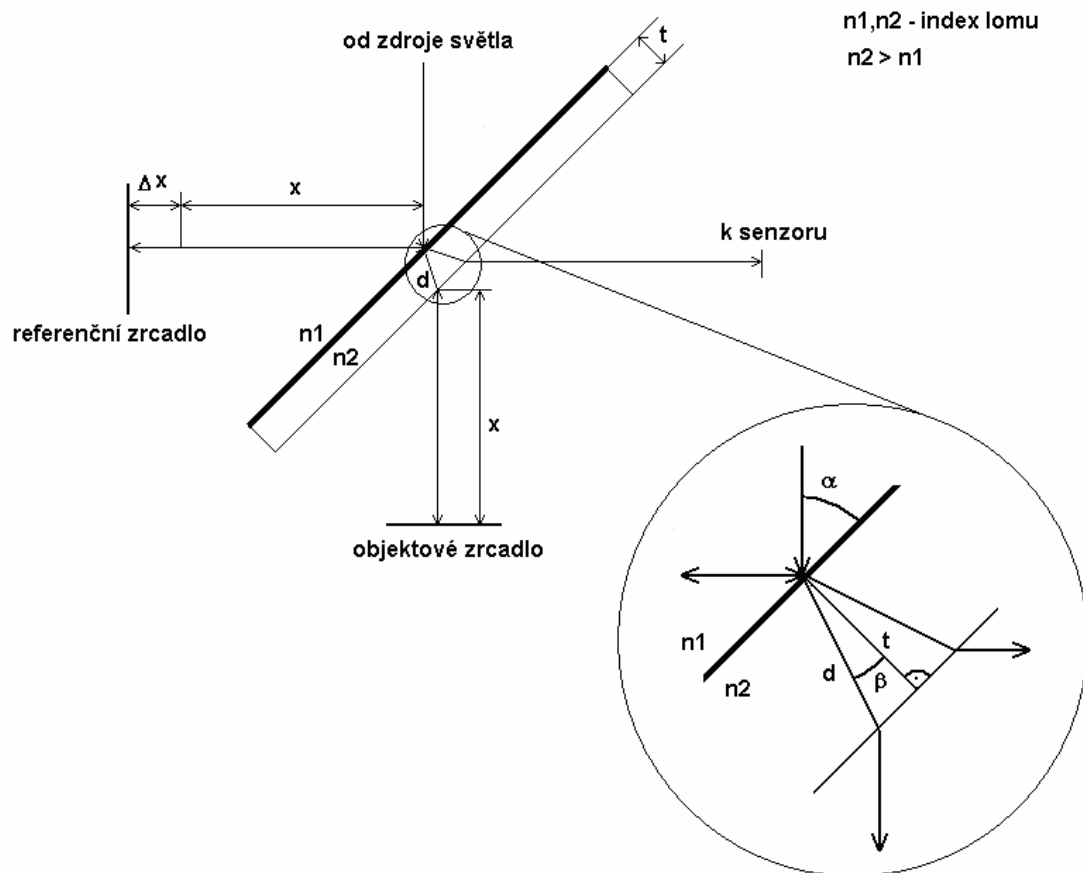
- 1 - napájecí napětí 5V, 20mA
- 2 - fáze A krokového motoru
- 3 - fáze /A krokového motoru

- 4 - fáze B krokového motoru
- 5 - fáze /B krokového motoru
- 6 - synchronizační vstup
- 7 - limitní spínač 1
- 8 - limitní spínač 2
- 9,12,13 - GND
- 10 - nouzový vypínač
- 11 - synchronizační výstup
- 14 - senzor otáček
- 15 - 5 V, 10 mA pro napájení diody optronu inkrementálního čidla.

Praktické využití zapojení kontaktů řídicí jednotky je v kapitole č.8

7.3 USPOŘÁDÁNÍ PRACOVIŠTĚ

Při sestavování pracoviště bylo nutné nejprve co nejpřesněji rozměřit polohu objektového a referenčního zrcadla. V soustavě je zařazen dělič paprsků, který je tvořen sklem o tloušťce 3,3 mm. Na jedné straně tohoto skla je nanesena odrazivá vrstva. Jedna část vstupního paprsku se odrazí od této vrstvy a jedna projde skrz sklo děliče. Je tedy nutné určit dráhový rozdíl mezi rameny interferometru, který způsobí průchod světla v jedné větvi interferometru přes vrstvu skla. Vlivy, které působí na tento paprsek, jsou jednak lom světla a také rozdílná rychlost světla při průchodu sklem a vzduchem. Geometrické znázornění je na obrázku 7-8.



Obr. 7-8: Znázornění optické trasy světla

Postup výpočtu hodnoty Δx , o kterou je nutné posunout referenční zrcadlo, aby byly kompenzované vlivy děliče na objektový paprsek světla:

Nejprve musíme určit úhel β (viz obrázek 7-8) ze vztahu:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (7-1)$$

kde v_1 a v_2 jsou rychlosti světla ve vzduchu a ve skle a n_1 , n_2 jsou indexy lomu těchto prostředí. Index lomu vzduchu $n_1 = 1$, index lomu skla předpokládáme $n_2 = 1,5$. Úhel $\alpha = 45^\circ$. Pak platí:

$$\sin \beta = \sin \alpha \cdot \frac{n_1}{n_2} = \sin 45^\circ \cdot \frac{1}{1,5} = 0,47 \quad (7-2)$$

$$\beta = 28,13^\circ$$

Pak dráha světla sklem při průchodu jedním směrem d se dá určit jako:

$$d = \frac{t}{\cos \beta} = \frac{3,3}{\cos 28,13^\circ} = 3,74 \text{ mm}. \quad (7-3)$$

Dráha referenčního paprsku se dá popsat jako:

$$s_r = 2x + 2\Delta x + d, \quad (7-4)$$

dráha objektového paprsku:

$$s_o = 2x + 3d. \quad (7-5)$$

Doba za kterou světlo urazí tyto vzdálenosti musí být stejná. Ve skle je rychlost průchodu světla nižší. Pak platí:

$$s = v \cdot t; t = \frac{s}{v}$$

$$v = \frac{c}{n}$$

$$t_r = t_o \quad (7-6)$$

$$\frac{2x}{v_v} + \frac{2\Delta x}{v_v} + \frac{d}{v_s} = \frac{2x}{v_v} + \frac{3d}{v_s}$$

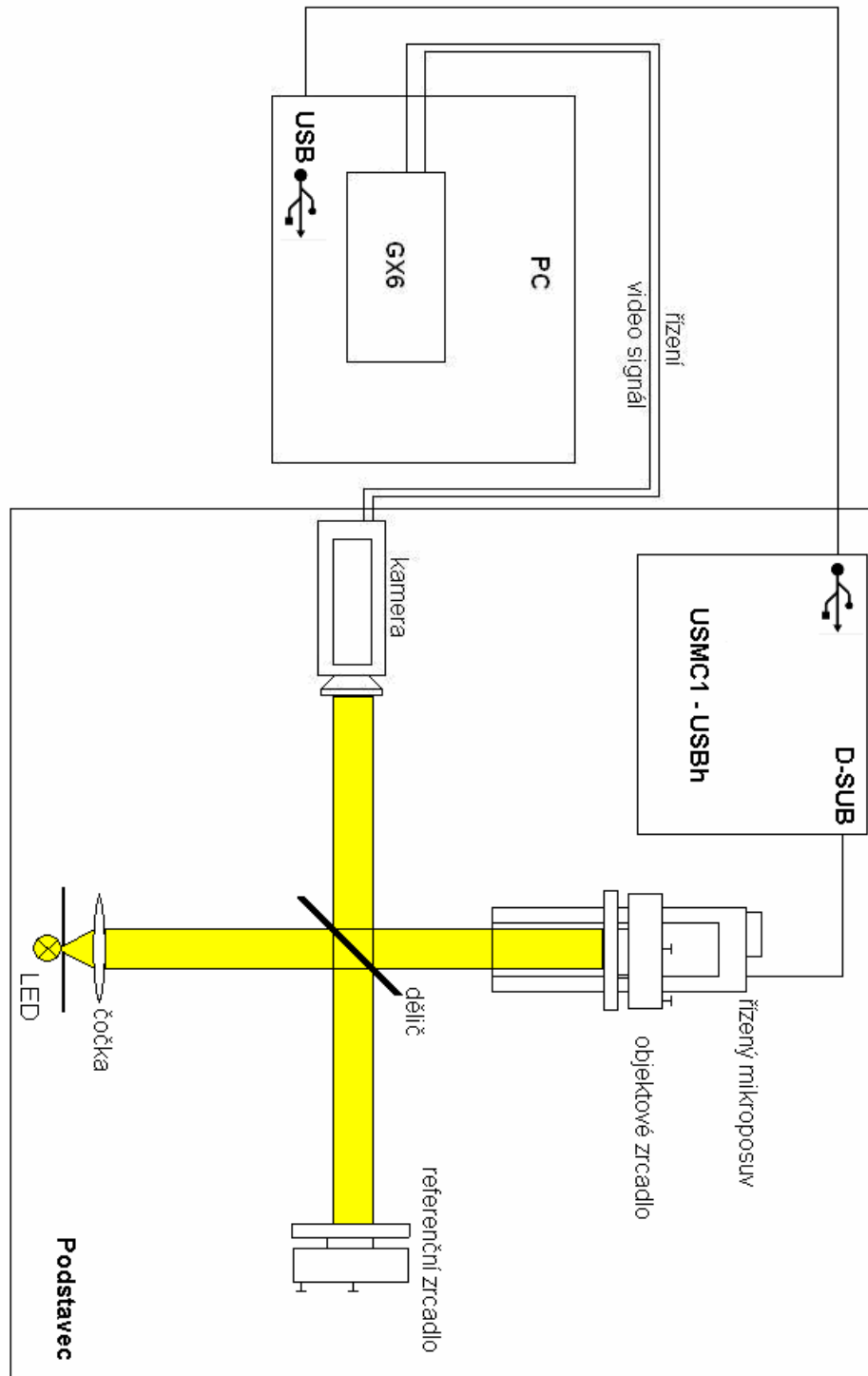
$$\frac{2\Delta x}{v_v} = \frac{2d}{v_s}$$

$$\Delta x = d \cdot n_s = 3,74 \cdot 1,5 = 5,61 \text{ mm}$$

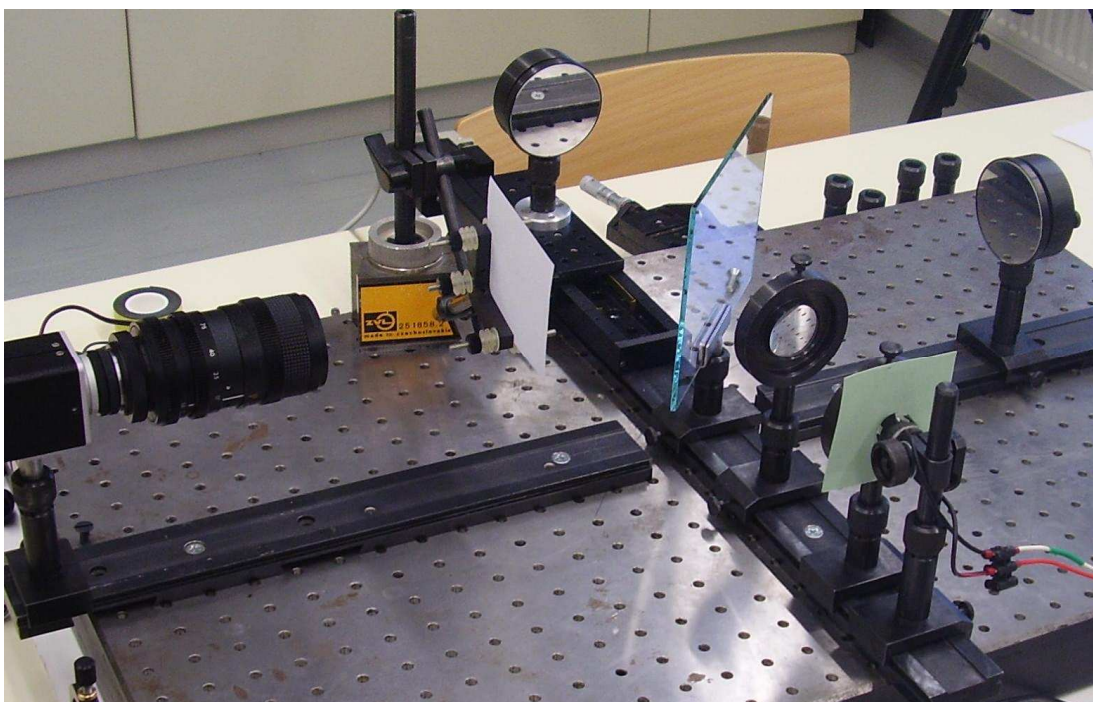
Referenční zrcadlo tedy musí být umístěno o **5,6 mm** dál od děliče než objektové zrcadlo, aby byla splněna podmínka stejných optických drah v obou ramenech interferometru.

Po nastavení polohy zrcadel v soustavě bylo nutné co nejpřesněji nastavit náklon zrcadel. Byla použita zrcadla s nastavitelným náklonem ve dvou osách. Při nastavování byly na kameře sledovány obrazce, vytvořené odrazem světla od zrcadel. Cílem bylo náklonem zrcadel zajistit, aby se obrazce snímané kamerou co nejvíce překrývaly. Kamera byla zaostřena do oblasti před polopropustným zrcadlem. Hledání správného nastavení náklonu zrcadel bylo poměrně obtížné, jelikož překrytí odražených obrazců nelze kamerou zjistit dostatečně přesně. Přitom stačí jen velice malé vychýlení jednoho ze zrcadel a interference se při měření vůbec neprojeví. Postupným nastavováním bylo zjištěno správné nastavení náklonu. Tyto

pozice byly na nastavovacích šroubech zrcadel označeny nálepkami, aby bylo při případném rozladění soustavy nastavování snadnější a rychlejší. Blokové schéma na obrázku 7-9 znázorňuje uspořádání pracoviště.



Obr. 7-9: Blokové schéma měřicího pracoviště 1



Obr. 7-10: Praktické uspořádání měřícího pracoviště 1



Obr. 7-11: Praktické uspořádání měřícího pracoviště 2

Součásti použité při sestavení soustavy:

- Podložka s otvory se závity pro upevnění součástí
- Lišty pro upevnění součástí
- Posuvné, výškově nastavitelné stojany 6x
- Dvě zrcadla s nastavitelným náklonem
- Polopropustné zrcadlo tloušťky 3mm
- CCD kamera modicam 612
- Motorický mikroposuv 8MT175-100 s řídicí jednotkou 8MC1-USBh
- Čočka o průměru 34 mm, ohnisková vzdálenost $f = 95$ mm
- Bílá LED dioda
- Zdroj AT pro napájení diody
- Stínidlo tvrdého papíru s otvorem

7.4 NALEZENÍ ZÁKLADNÍ ROVINY OBJEKTOVÉHO ZRCADLA

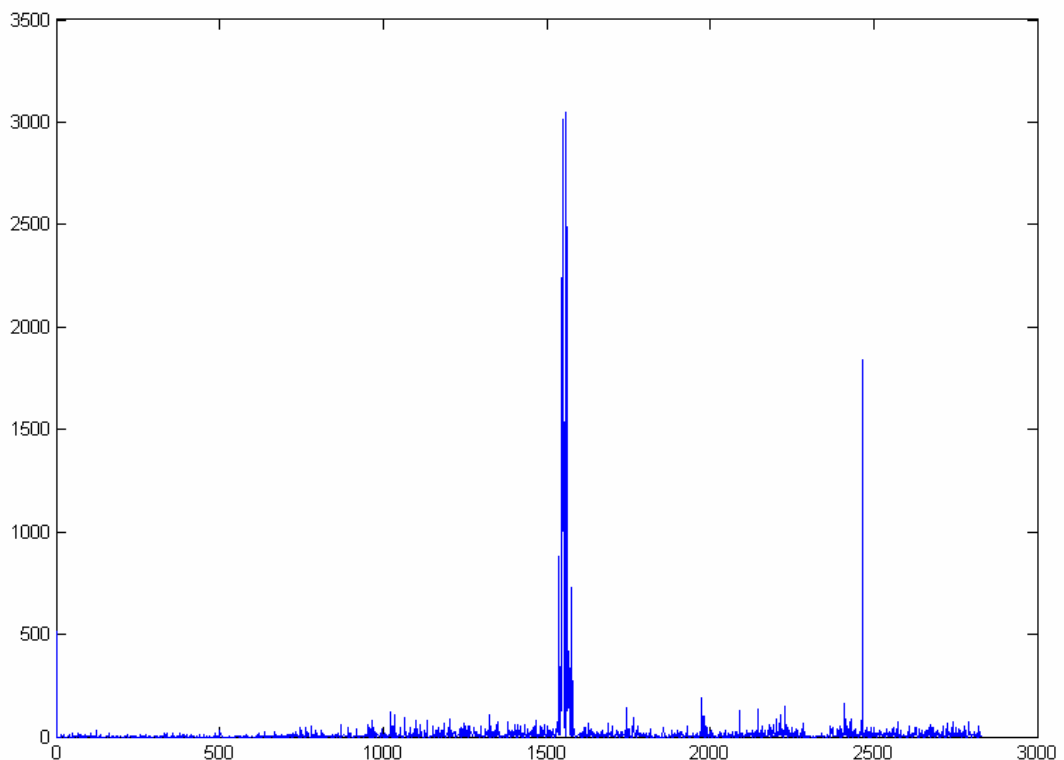
Navržená soustava byla sestavena podle předchozích výpočtů a teoretických poznatků. Zrcadla s nastavitelným náklonem byla nastavena tak, aby se paprsky dopadající na senzor co nejlépe překrývaly. Byla použita CCD kamera Modicam 612. Objektiv kamery byl zaostřen do oblasti před dělič paprsků. Poté se prohledávalo okolí nastavené roviny objektového zrcadla v rozmezí ± 5 mm. CCD kamera při tomto pohybu snímala a ukládala snímky v nastavené periodě. Tímto postupem byla získána sekvence snímků.

Parametry měření:

Proměřovaná oblast:	10mm
Rychlost posuvu:	0,03 kroku/s
Krok posuvu:	1/8 kroku
Perioda snímání kamery:	60 ms
Zdroj světla:	bílá LED dioda

Vzdálenost, kterou urazil posuv mezi pořízením jednotlivých snímků, pak byla 1,5 μ m. Počet snímků zachycených během tohoto měření byl 6677.

V programu Matlab byl vytvořen program, který vyhodnocoval intenzitu jasu každého pixelu pro všechny kroky měření. Hodnoty jasu byly pro každý pixel ukládány do vektoru, ve kterém bylo hledáno maximum. Pro každý obraz byl pak určen počet těchto maxim. Při vykreslení těchto četností jsou patrná maxima, která vznikají v pozicích, kde dochází k interferenci. Tyto četnosti jsou vyneseny do grafu na obrázku 7-12 (zde pro menší oblast vyhodnocování – pouze 2800 snímků)



Obr. 7-12: Graf četností bodů z nejvyšším jasem pro každý obrázek

Na obrázku je patrné, že největší četnosti nejjasnějších bodů byly zjištěny na snímcích pořízených v krocích 1540 až 1570, kde jsou tyto četnosti výrazně vyšší než na jiných snímcích.

Snímek s největším počtem nejjasnějších bodů byl vyhodnocen jako snímek, který byl pořízen při rovnosti optických drah ramen interferometru. Na takto získaném snímku, i v jeho těsném okolí, jsou pozorovatelné interferenční proužky. Takto byla nalezena základní rovina objektového zrcadla z_0 . V této rovině dochází k maximu modulace jasu při interferenci. Výsledný snímek tohoto vyhodnocování je snímek uvedený na obrázku č.7-13.



Obr. 7-13: Snímek s největším počtem bodů s nejvyšší intenzitou jasu – bílá LED dioda

Na tomto výsledném obrazu jsou sice interferenční pruhy patrné, ale jejich viditelnost není velká.

Viditelnost neboli kontrast můžeme určit ze vztahu:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (7-7)$$

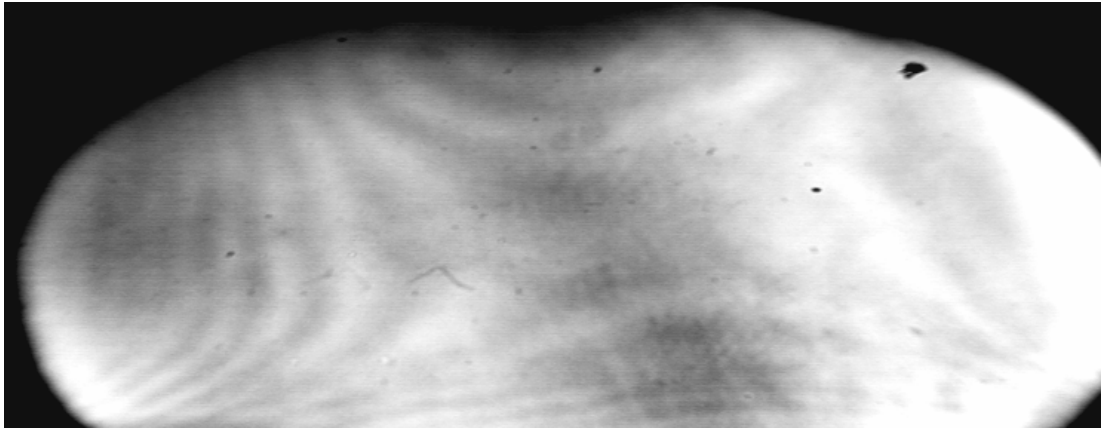
Kde $0 \leq C \leq 1$, I_{\max} je maximální intenzita světlého pruhu a I_{\min} je intenzita tmavého pruhu. Pro obraz na obrázku 7-13 je viditelnost proužků rovna:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{227 - 216}{227 + 216} = 0,025.$$

Toto je přibližná hodnota z odečtených hodnot, která se však ještě na ploše snímku mění. Z tohoto důvodu byla do soustavy umístěna místo bílé diody dioda s modrým světlem, jejíž spektrum je uvedeno na obrázku 7-1. Snímek při maximální modulaci jasu je pro tento případ na obrázku 7-14. Kontrast pruhů v obraze je pak:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{229 - 182}{229 + 182} = 0,11.$$

Tato hodnota je již více než 4x vyšší, ovšem jasová modulace v obraze není stále homogenní a viditelnost v některých částech snímků je pro vyhodnocování nedostatečná.



Obr. 7-14: Snímek s největším počtem bodů s nejvyšší intenzitou jasu – modrá LED dioda

Při předchozích měřeních se projevilo vliv pohybu krokového motoru na viditelnost interferenčního obrazce. Když je motor v pohybu, vznikají v soustavě vibrace. Řešením tohoto problému se zabývá následující kapitola.

8. SYNCHRONIZACE KAMERY A POSUVU

Při praktickém měření popsaném v předchozí kapitole byl mikroposuv ovládán nezávisle na snímání kamery. Byl nastaven vždy krok a rychlost posuvu a kamera snímala s zadanou periodou (například 50 ms). Navíc se významně projevil vliv pohybu krokového motoru, kterým je vybaven mikroposuv, na viditelnost interferenčního obrazce. Při otáčení motoru vzniká chvění, které se přes ukotvení ke společnému podstavci sestavy přenášelo i na jiné členy soustavy. Viditelnost interferenčních pruhů byla pak výrazně nižší. Z tohoto důvodu bylo nutné zajistit, aby při každém kroku měření a snímání obrazu nebyl motor v pohybu. Pro tento účel již nemohl být pro ovládání řídicí jednotky motoru použit dodávaný software SMCVieW ver. 1.31, protože tento program nepodporuje nastavení sekvence pohybů, ale pouze přejetí z místa na místo zadanou rychlostí a krokem. Z tohoto důvodu byla vytvořena konzolová aplikace v prostředí C++ s využitím knihovny funkcí USMCDLL.dll poskytnuté výrobcem a vzorového zdrojového kódu pro ovládání mikroposuvu, který byl upraven a doplněn pro tuto aplikaci. Toto bylo realizováno ze dvou důvodů – synchronizovat snímání a posuv (stejný takt pro jednoznačné určení vzdálenosti od roviny z_0 pro každý snímek) a umožnit čekání pro stabilizaci.

8.1 PROGRAM PRO OVLÁDÁNÍ POSUVU

Byl využit konfigurovatelný synchronizační výstup řídicí jednotky mikroposuvu. Cílem této aplikace bylo dosažení toho, aby motor po definovaném kroku zastavil na určitou dobu, během které vygeneruje impuls pro zaznamenání snímku. Synchronizační puls je nastavitelný do té míry, že se dá měnit tvar výstupního signálu a počet kroků motoru po kterých se puls generuje. Pro použití tohoto postupu bylo nutné na PC nainstalovat ovladač mikroposuvu MicroSMC.

V následujícím textu bude popsáno několik důležitých funkcí pro ovládání a nastavení posuvu využitých při sestavování programu v jazyku C++.

Všechny funkce kromě funkce **USMC_GetLastErr** vracejí chybový kód který je roven nulové hodnotě, pokud se nevyskytla žádná chyba, jindy je hodnota nenulová. Funkce **USMC_GetLastErr** vrací řetězec, popisující poslední chybu.

Většina funkcí přijímá některý z argumentů ve formě odkazu typu proměnné. Tyto funkce mohou upravovat své vstupní proměnné.

Základní funkce použité při tvorbě programu:

Návratová hodnota	Jméno funkce / struktura	USB operace
Error code	USMC_Init USMC_Devices	IN
Error code	USMC_GetState USMC_State	IN
Error code	USMC_SaveParametersToFlash	SETUP/OUT
Error code	USMC_SetCurrentPosition	SETUP/OUT
Error code	USMC_GetMode USMC_Mode	-
Error code	USMC_SetMode USMC_Mode	OUT
Error code	USMC_GetParameters USMC_Parameters	-
Error code	USMC_GetStartParameters USMC_StartParameters	-
Error code	USMC_Start USMC_StartParameters	OUT
Error code	USMC_Stop	SETUP/OUT
Error code	USMC_GetEncoderState USMC_EncoderState	IN
Error code	USMC_Close	-
Error code	USMC_GetParameters USMC_Parameters	-
void	USMC_GetLastErr	-

Popis těchto funkcí je uveden v manuálu posuvu – viz elektronické přílohy.

Příklad: nastavení synchronizačního pulsu posuvu

```
USMC_GetMode(Dev, Mode) ; /*tato funkce vrací strukturu USMC_Mode, která  
byla poslána do zařízení, nebo její defaultní hodnoty*/  
Mode.SyncOUTEn =TRUE; //sync OUT enable  
Mode.SyncOUTR =TRUE; //reset čítače kroků  
Mode.SyncInvert =TRUE; //invertuje logiku výstupního pulsu  
Mode.SyncCount =krok; //nastavení počtu kroků motoru mezi synchronizačními  
//pulsy  
USMC_SetMode(Dev, Mode); // funkce pro odeslání parametrů nastavených ve  
//struktuře USMC_Mode do 8SMC1-USBh kontroléru.
```

Po inicializaci posuvu a nastavení jeho parametrů do požadovaných hodnot byla vytvořena smyčka, kdy při každém jejím cyklu bylo po vykonání nastaveného pohybu čekání po nastavenou dobu, zajišťované pomocí funkce `clock()`. Synchronizační puls byl generován vždy při posledním kroku každého posuvu a poté vynulován čítač kroků.

Synchronizační puls je možné získat pouze za chodu motoru. V tomto případě je však nutné zajistit prodlevu mezi posledním krokem motoru před zastavením a zaznamenáním snímku, aby se soustava stačila ustálit a aby viditelnost interferenčního obrazce nebyla ovlivněna vibracemi posuvu. Proto byl do soustavy zapojen mezi kameru a řídicí jednotku mikroposuvu modul DLP-2232PB.

8.2 DLP-2232PB

DLP-2232PB je programovatelný modul obsahující mikrokontroler PIC. Dá se jednoduše připojit k PC přes USB rozhraní, přes které je možné jej programovat i ovládat i napájet. Cílem bylo nastavit tento modul takovým způsobem, že při přivedení synchronizačního TTL pulsu z mikroposuvu na vstup bude na výstupu, který bude připojen do kamery, zpožděný impuls o délce požadované expoziční doby kamery.

8.2.1 Komunikace

K tomuto obvodu bylo dodáno obslužné jádro, které bylo doplněno o funkci pro tuto aplikaci.

Modul má dva komunikační kanály, kdy je jeden využíván pro programování a druhý pro komunikaci. Druhý komunikační kanál je řešen tak, že emuluje připojení přes komunikační sběrnici RS 232.



Obr. 8-1: Modul DLP-2232PB

Komunikace v tomto kanálu probíhá v obou směrech stejně. Každý příkaz je zabalen do start znaku, ID zařízení a stop znaku, následuje kontrolní součet

$\langle START \rangle \langle ID \rangle \langle COMMAND \rangle \langle STOP \rangle \langle CRC \rangle$

<i>START</i>	Start znak, 0x02
<i>ID</i>	0x01 - ID zařízení
<i>COMMAND</i>	String (c1,c2... cn), nerozlišuje malá/velká písmena
<i>STOP</i>	Stop znak, 0x03
<i>CRC</i>	Kontrolní součet, $CRC = 0x7f \wedge START \wedge ID \wedge c1 \wedge c2 \wedge \dots \wedge cn \wedge STOP$

Pozn. : \wedge znamená bitový XOR

ID – zařízení má 0x01, ale přijímá příkazy s jakýmkoliv ID. V této aplikaci se nepředpokládá provoz více zařízení paralelně na jednom komunikačním kanálu.

Všechny hodnoty v příkazech jsou hexadecimálně. Nerozlišují se malá/velká písmena.

Odpovědi zařízení

formát : „ERRxx“; xx =

- 01 – (ERR_CRC) chyba CRC
- 02 – (ERR_COMMAND_LONG) příliš dlouhý příkaz
- 03 – (ERR_COMMAND_TIMEOUT) command timeout – více jak 100ms mezi znaky v rozpracovaném příkazu
- 04 – (ERR_UNKNOWN_COMMAND) neznámý příkaz/hodnota (např. chyba v interpretaci hex hodnoty)

Pokud není žádná chyba, odpověď závisí na typu příkazu

Příkazy:

Reset (RST)	
Syntaxe	RST
Odpověď	OK
Možné chyby	
Příklad	RST
Provede reset procesoru	

Set CRC Mode (SCM)	
Syntaxe	SCMxx
Odpověď	OK
Možné chyby	
Příklad	SCM00
Nastaví kontrolu CRC. 00 – vypnuto, 01-ff zapnuto. Tato hodnota je zachována i po restartu.	

No Operation (NOP)	
Syntaxe	NOP
Odpověď	OK
Možné chyby	
Příklad	NOP
Nic.	

Set Timer Value (STV)	
Syntaxe	STVxxxx
Odpověď	OK
Možné chyby	

Příklad	STV01f3	OK
Provede reset procesoru		

Get Timer Value (GTV)		
Syntaxe	GTV	
Odpověď	TVxxxx	
Možné chyby		
Příklad	GTV	TV1234
Vrátí fixní zpoždění		

Set Timer Difference (STD)		
Syntaxe	STDxxxx	
Odpověď	OK	
Možné chyby		
Příklad	STD01f3	OK
Nastaví diferenci proměnného zpoždění o XXXX každým pulsem		

Get Timer Difference (GTD)		
Syntaxe	GTD	
Odpověď	TVxxxx	
Možné chyby		
Příklad	GTD	TD1234
Vrátí proměnné zpoždění		

Reset Timer Diference (RTD)		
Syntaxe	RTD	
Odpověď	OK	
Možné chyby		
Příklad	RTD	TD1234
Vynuluje proměnné zpoždění		

8.2.2 Časové zpoždění

Systém reaguje na sestupnou hranu signálu INPUT (PORTB.0, pull-up, pin 49). S časovým zpožděním vystaví sestupnou hranu signálu OUTPUT (PORTB.5, pin 2).

Zpoždění bylo nastavováno pomocí následující převodní tabulky.

$$\text{DELAY} = 13400 + 20000 * \text{xxxx}$$

DELAY [us]	xxxx	hexa
2000	33	0021
3000	83	0053
5000	183	00B7
7000	283	011B
10000	433	01B1
12000	533	0215
15000	683	02AB
20000	933	03A5
30000	1433	0599
50000	2433	0981
70000	3433	0D69
100000	4933	1345
120000	5933	172D
150000	7433	1D09
200000	9933	26CD
300000	14933	3A55
500000	24933	6165
700000	34933	8875
1000000	49933	C30D

Pro hodnoty 0x0000 až 0x0004 je zpoždění

$$\text{DELAY} = 7800 + 20000 * \text{xxxx} \text{ [ns]}$$

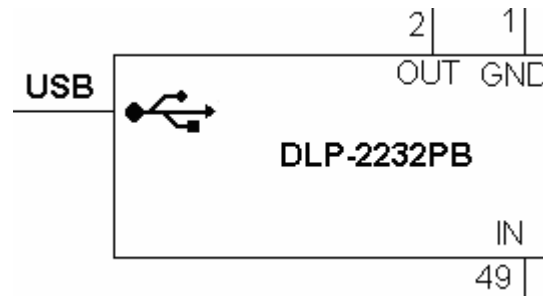
Je to z důvodu příliš krátkého intervalu před opuštěním přerušení

Příklad: pro nastavení zpoždění 200ms

Po sériové lince pomocí programu TestCom zašle do zařízení příkaz **STV26CD** zabalený do start znaku, ID zařízení, stop znaku a CRC.

Doba mezi sestupnou a vzestupnou hranou výstupního signálu byla nastavována ve zdrojovém kódu jádra core.c, který byl po zkompilování v programu MPLAB IDE vs. 6.61.00.0 (Microchip) a vytvořený HEX file byl nahrán do PIC programem dlpflash13.exe.

Na obrázku 8-2 je uvedeno zapojení vývodů obvodu DLP-2232PB.



Obr. 8-2: Zapojení vývodů DLP-2232PB

1 – GND

2 – PORT B5 (I/O) - OUT

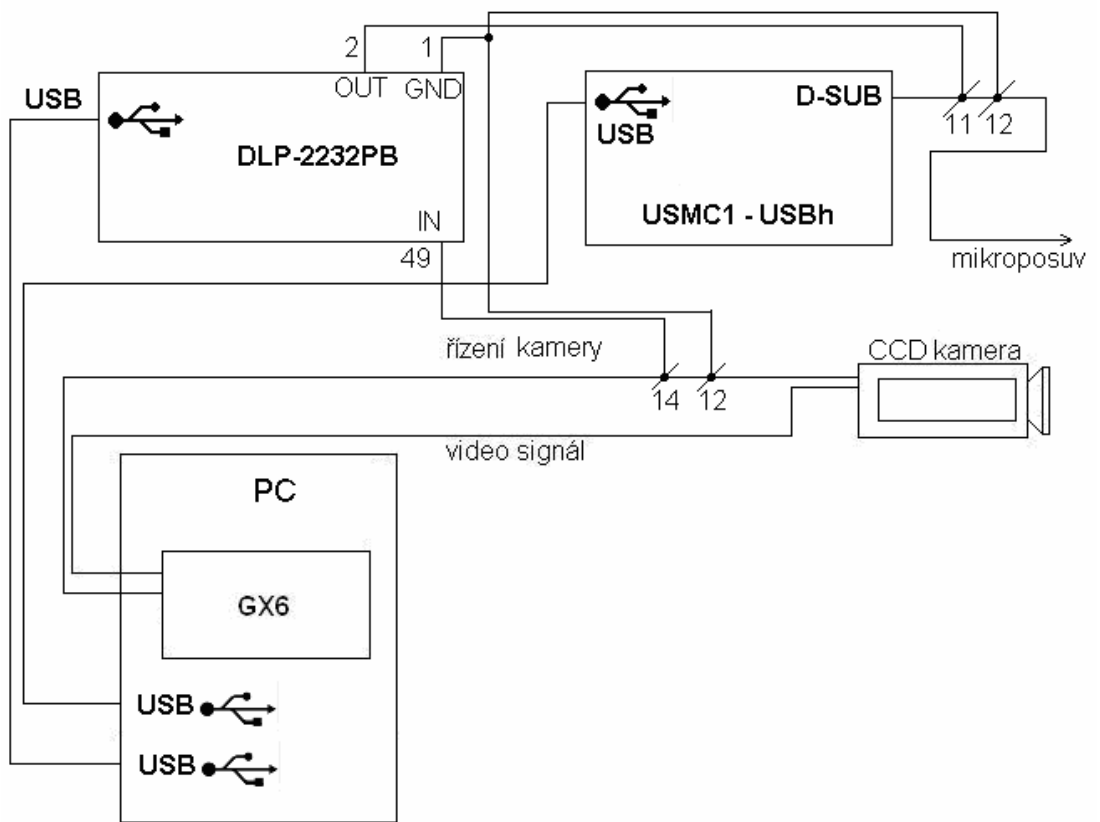
49 – PORT B.0 - IN

23 - EXTVCC (In) připojení napájecího napětí (4.4 - 5.25 V)

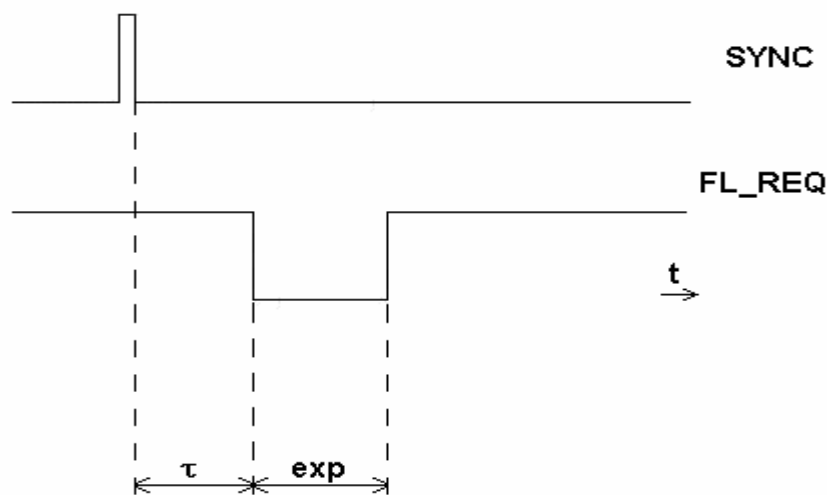
24 - PORTVCC (Out) Vyvedené napětí z USB portu.

Piny 23 a 24 byly propojeny, aby bylo zajištěno napájení z USB.

Výsledné schéma zapojení jednotlivých součástí je na následujícím obrázku.

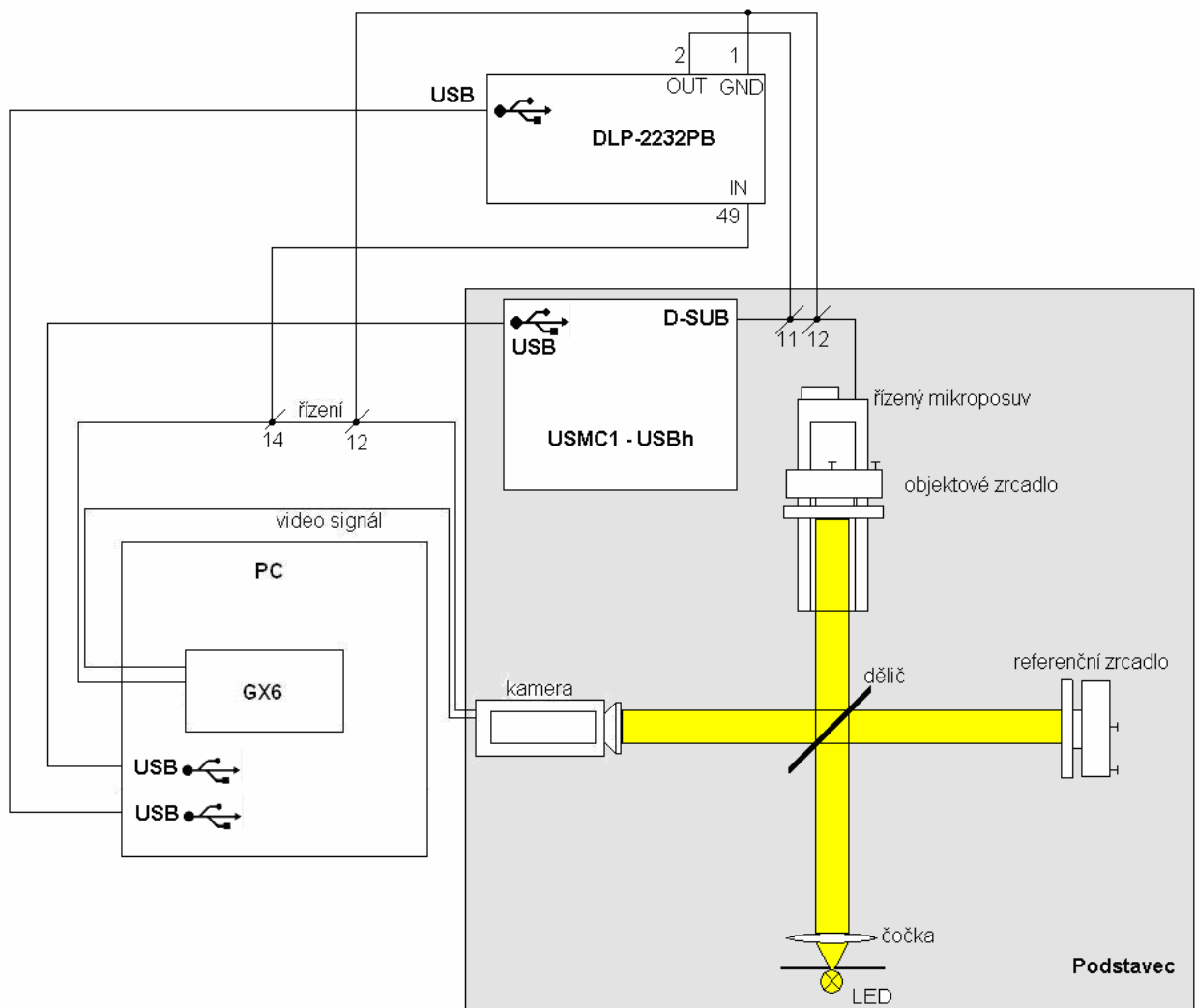


Obr. 8-3: Výsledné schéma zapojení pro synchronizaci kamery s mikroposuvem



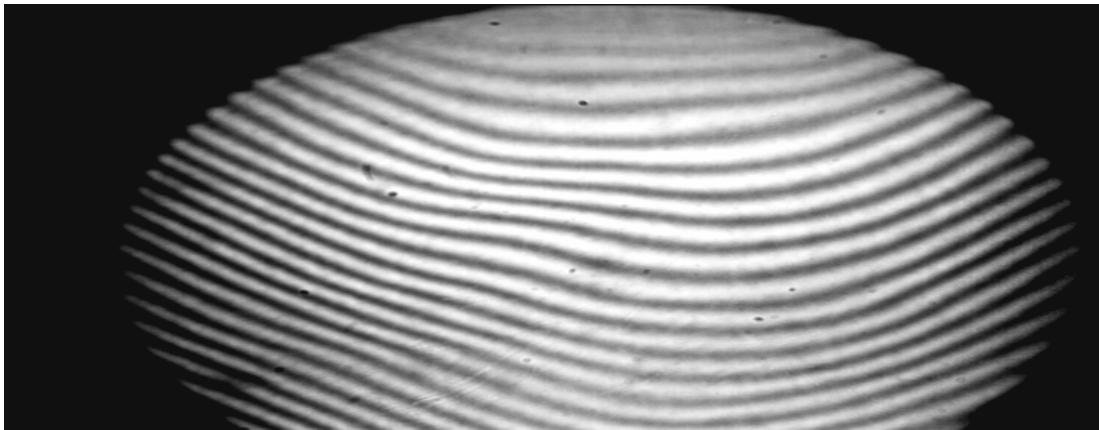
Obr. 8-4: časový průběh signálů FL_REQ a synchronizačního výstupu mikroposuvu

Na obrázku 8-5 je znázorněn časový průběh synchronizačního signálu *SYNC* mikroposuvu a signál kamery *FL_REQ*, který je zpožděn o dobu τ , a doba jeho trvání *exp* je totožná s dobou expozice kamery. Doba trvání každého pulsu *SYNC* je přibližně $120 \mu\text{s}$.



Obr. 8-5: Blokové schéma měřícího pracoviště 2

Na takto realizovaném pracovišti byl pořízen následující snímek.



Obr. 8-6: Snímek s největším počtem bodů s nejvyšší intenzitou jasu – modrá LED dioda se synchronizací posuvu

Je patrné, že viditelnost interferenčního obrazce je se synchronizací posuvu s kamerou daleko větší. Pro obrázek 8-6 je viditelnost:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{233 - 89}{233 + 89} = 0,45$$

Takovýto kontrast je již dostatečný pro vyhodnocení praktických měření.

9. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ FUNKCE PRACoviŠTĚ

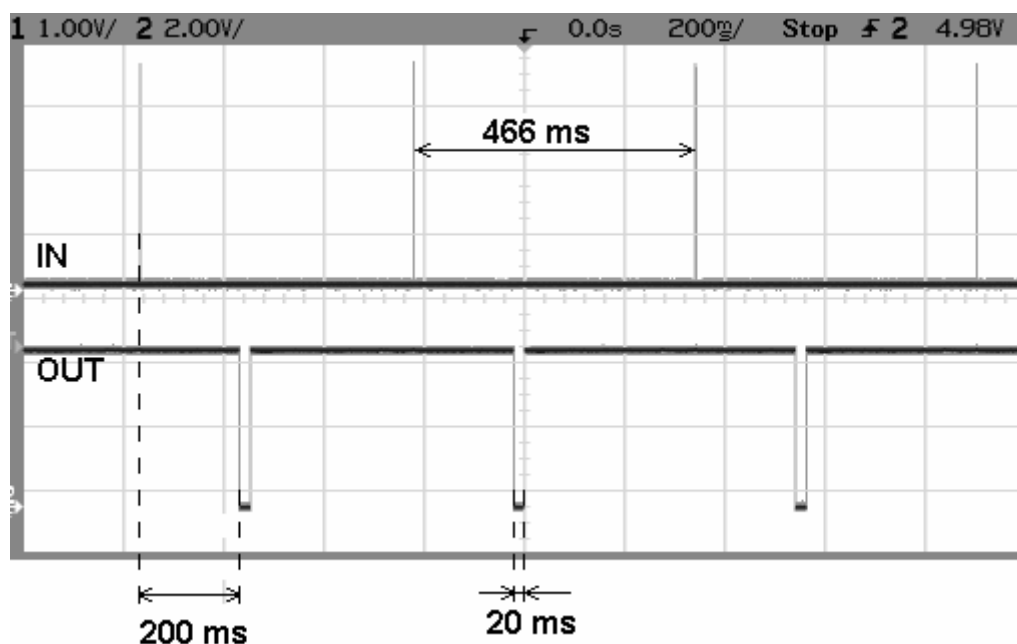
Pro demonstraci funkce pracoviště byla vybrána úloha měření tloušťky zrcadla. Na objektové zrcadlo v soustavě (viz obrázek 8-5) bylo připevněno měřené zrcadlo tak, aby na kameře bylo vidět jak měřené tak podkladové zrcadlo. Jeho tloušťka byla změřena posuvným měřidlem na 2,1 mm. Mikroposuv je ovládán absolutně, pomocí kroků posuvu. Posunutí posuvu o jeden celý krok odpovídá ve skutečnosti posunutí o 2,5 μm . V celém měření byl použit nejmenší možný nastavitelný krok pohybu, což je 1/8 kroku, tedy 0,3125 μm . Mikroposuv byl nastaven do pozice základní roviny (viz kapitola 7.4) a v této pozici byl čítač kroků vynulován. Základní rovina tedy přibližně odpovídá kroku 0. Při měření je nutné objektové zrcadlo oddalovat od děliče paprsků, tomuto směru odpovídá směr počítání kroků do záporných hodnot. Jelikož tloušťka změřená posuvným měřítkem byla 2,1 mm, měla by na měřeném zrcadle interference vznikat v okolí pozice posuvu -7040 kroků ($2,1\text{mm} / 0,3125 \mu\text{m} = 7040$ kroků).

Z důvodu časové i výpočetní náročnosti bylo měření rozděleno do dvou úseků, kdy v jednom se proměřuje okolí roviny 0 a ve druhém okolí předpokládané roviny měřeného zrcadla. V případě, že bychom neznali přibližné rozměry měřeného objektu, je možné měřit v celém měřicím rozsahu pracoviště. Pro první měření byl zvolen interval $-7500 \div -6500$ kroků. Pohyb přitom byl nastaven po jednom kroku (0,3125 μm). To znamená, že po každém posunutí o jeden krok byl posuv zastaven, byl vygenerován synchronizační puls a po čase potřebném pro ustálení soustavy byl pořízen a uložen snímek kamery. Celkem bylo během tohoto měřicího intervalu pořízeno 1000 snímků, které byly následně vyhodnocovány. Stejně měření bylo provedeno i pro interval měření $-250 \div 250$ kroků pro ověření správnosti nastavení základní polohy posuvu (jelikož posuv nelze přesně a opakovatelně nastavit na 1/8 kroku ale pouze na celý krok, proto při odpojení a opětovném připojení napájení může vzniknout odchylka od nastavené hodnoty). Takto byly získány hodnoty výšky pro každý pixel obrazu, při prvním intervalu pro povrch měřeného zrcadla, při druhém intervalu pro povrch zrcadla, na kterém bylo měřené zrcadlo připevněno.

Parametry měření:

- Zpoždění mezi synchronizačním pulsem a expozicí kamery - 200ms,
- prodleva mezi dvěma kroky - 400 ms,
- expoziční doba kamery

Vstup a výstup obvodu DLP-2232PB byl měřen osciloskopem.



Obr. 9-1: Průběh signálů IN a OUT na DLP-2232PB

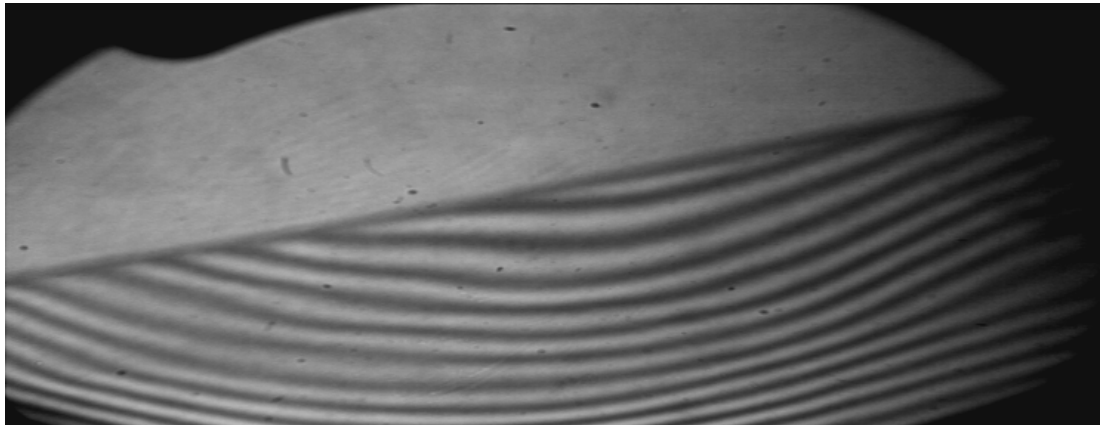
Z těchto průběhů je patrné, že i když byla prodleva mezi jednotlivými pohyby posuvu nastavena programově na 400ms, tak skutečná prodleva je 466ms. Tato prodleva je způsobena časem potřebným na zpracování instrukcí programu k obslužení funkcí pro ovládání mikroposuvu.

Použité měřicí přístroje:

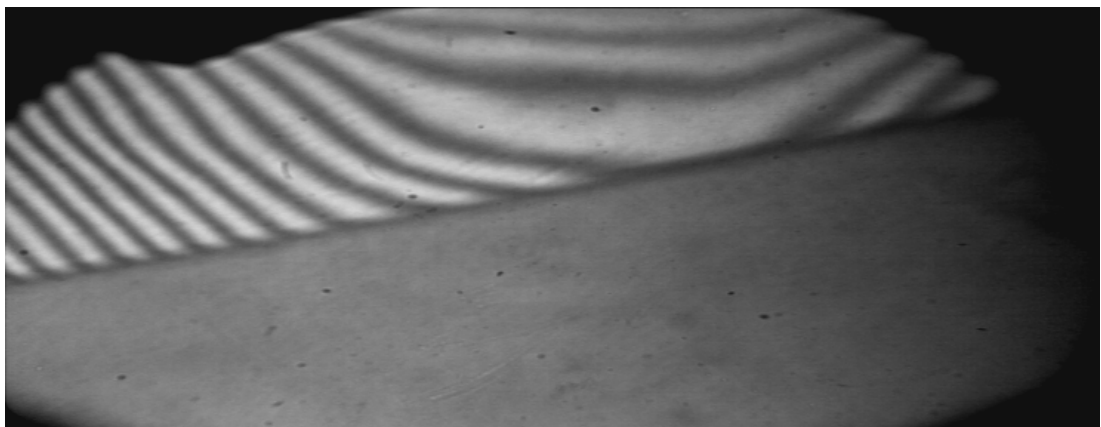
- osciloskop Agilent 54622A, inv.č. VUT E-617 P1-3, v.č. MY40007225

9.1 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Pro každý měřený interval byla pomocí programu Matlab vytvořena sekvence naměřených obrazů. Z těchto obrazů byla vybrána část, která má pro měření vypovídající hodnotu.

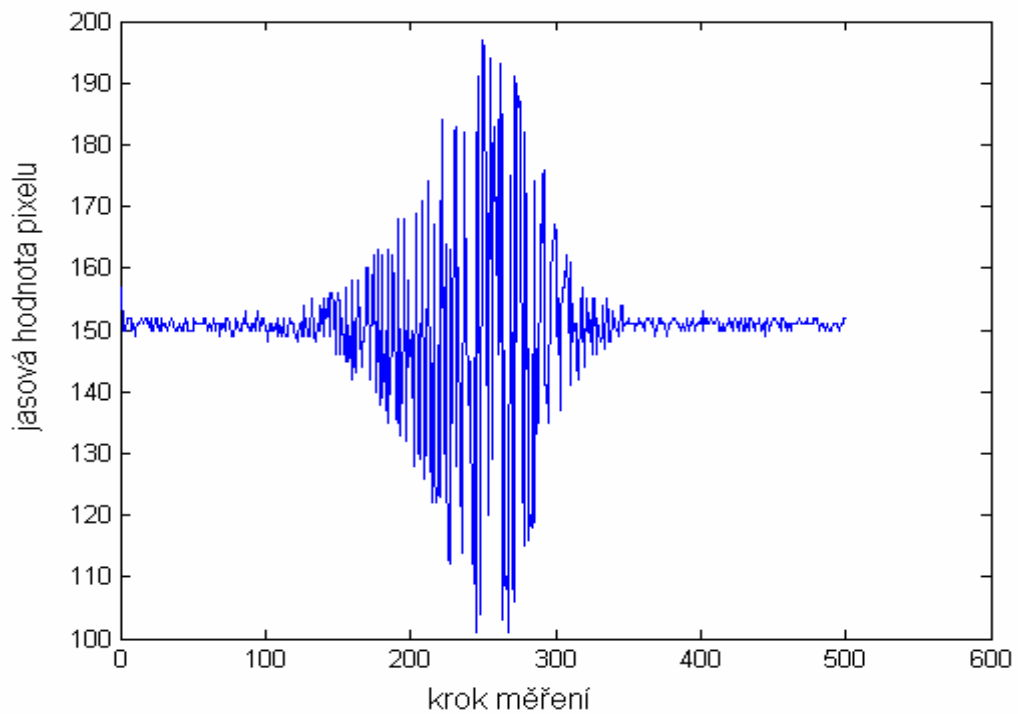


Obr. 9-2: Obraz kamery při měření roviny měřeného zrcadla

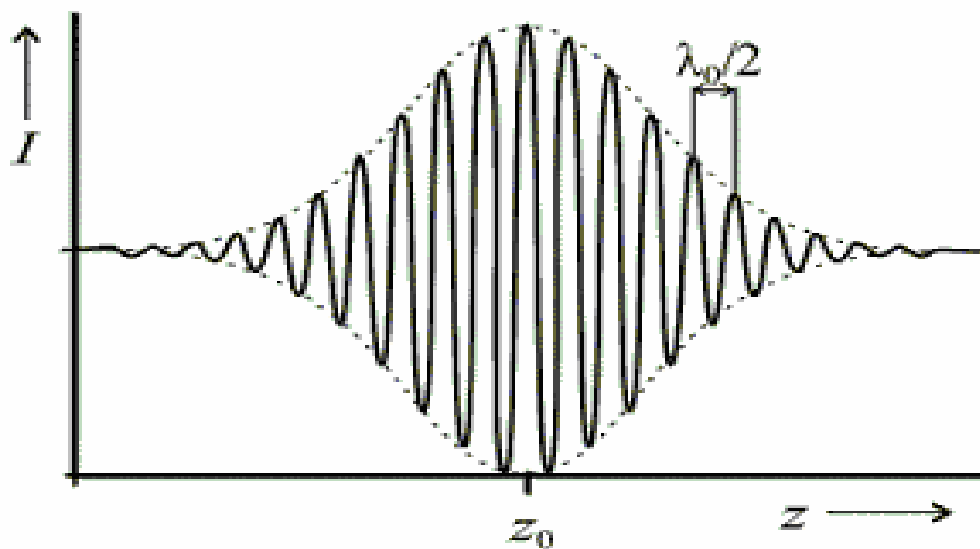


Obr. 9-3: Obraz kamery při měření roviny podkladového zrcadla

Pro každý pixel vyhodnocované části obrazu byly zapsány hodnoty jasů do vektoru $W(i,j,k)$, kde i je číslo obrázku a j,k jsou souřadnice pixelu v obraze. Příklad průběhu jasové hodnoty pro jeden pixel je na následujícím obrázku.



Obr. 9-4: Průběh jasu jednoho pixelu obrazu během snímání

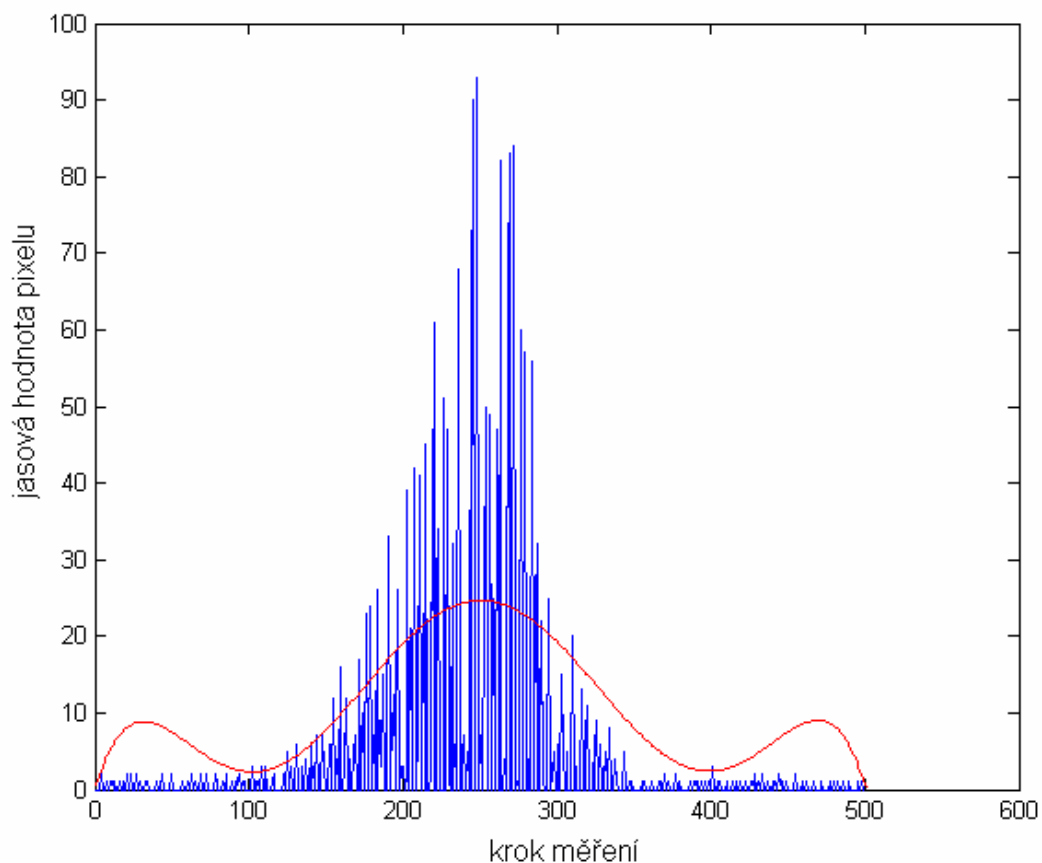


Obr. 9-5: Modulace jasu při interferenci v bílém světle [5]

Z průběhu na obrázku 9-4 je patrná korespondence s teoretickými předpoklady průběhu jasu při interferenci v bílém světle, který je na obrázku 9-5.

Odchylka neměřeného průběhu od teoretického je způsobena nízkou vzorkovací frekvencí. V tomto průběhu bylo pak hledáno maximum jasové intenzity. Abychom částečně eliminovali chybu vzorkování a aby bylo snazší proložení hodnot křivkou, byla modulační charakteristika rozdělena na hodnoty menší než průměrná hodnota jasu a větší než průměrná hodnota jasu. K hodnotám, které byly pod hranicí průměrného jasu, byla přičtena absolutní hodnota rozdílu této hodnoty a průměru. byly zvětšeny o dvojnásobek rozdílu mezi průměrem a jejich hodnotou. Výsledné hodnoty byly proloženy splajnem šestého řádu. Rovnice této křivky tedy je ve tvaru:

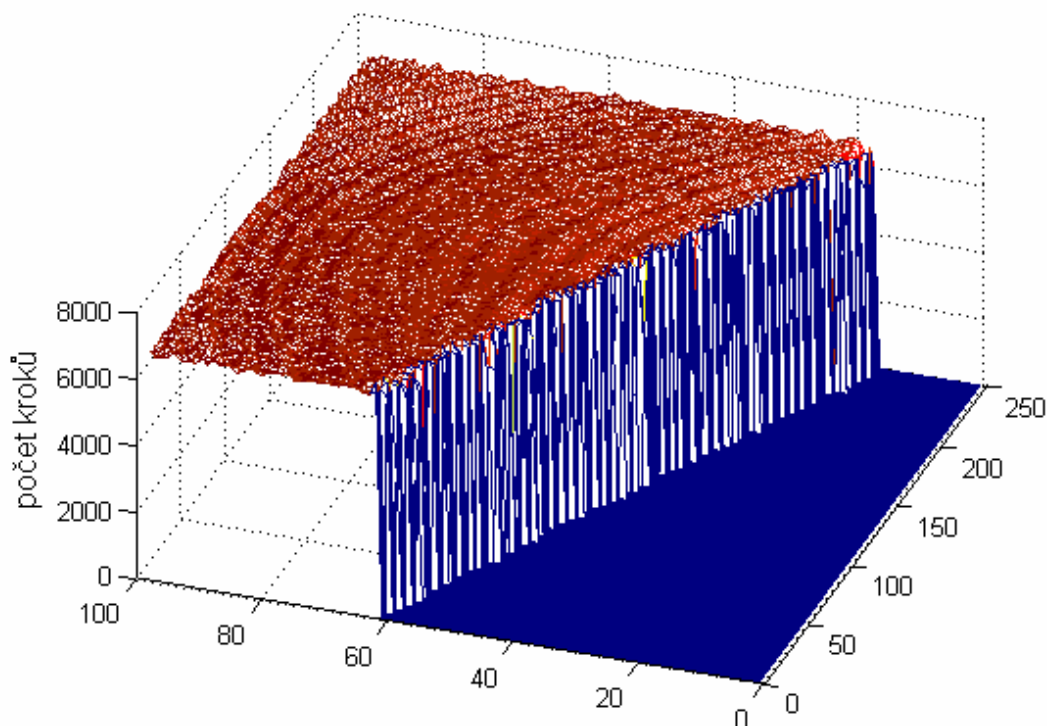
$$p = p_1x^n + p_2x^{n-1} + \dots + p_nx + p_{n+1} \quad (9-1)$$



Obr. 9-6: Proložení jasové hodnoty křivkou (červeně)

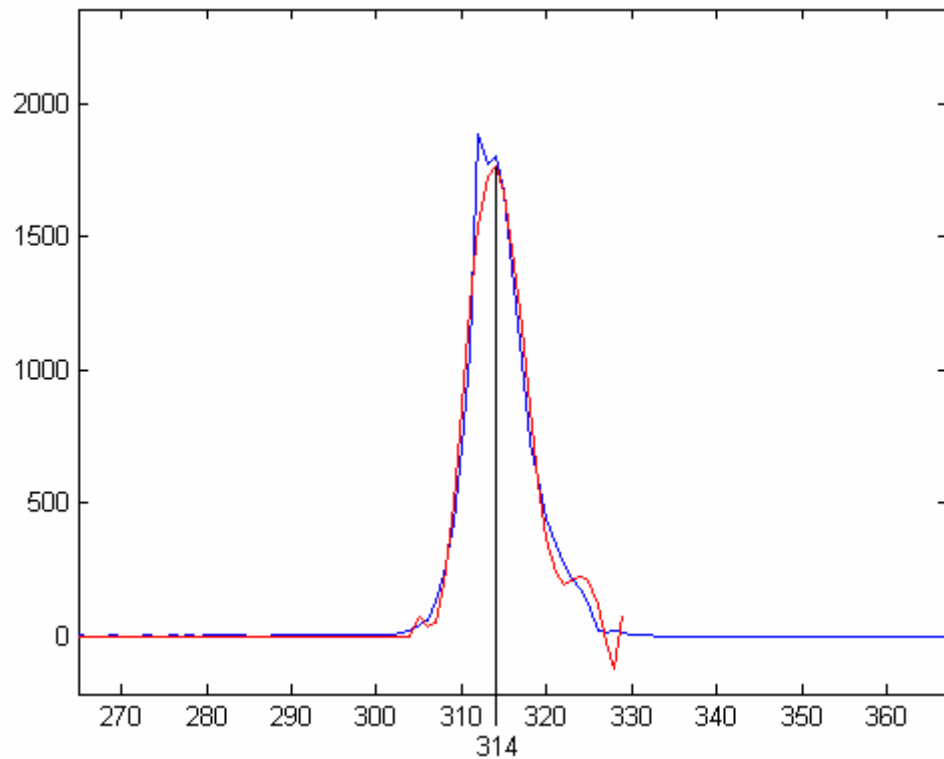
Nakonec bylo vyhodnocováno pro každý pixel maximum křivky, prokládající hodnoty. Číslo snímku, v němž bylo takto určeno maximum, bylo uloženo do vektoru. Ze známé hodnoty kroku, při kterém byl snímek pořízen, lze pak určit výšku

měřeného objektu v místě daného pixelu. Pro první sekvenci obrazů byl zrekonstruován povrch měřeného zrcadla. Všechny pixely obrazu, kde nebyla nalezena modulace jasu, byly automaticky nastaveny na hodnotu 0.



Obr. 9-7: Vykreslení naměřené plochy měřeného zrcadla ve 3D. Plocha měřeného zrcadla je zde červeně

Jak je patrné z obrázku 9-7, změřený rekonstruovaný povrch není oproti skutečnosti úplně rovný, ale jednotlivé hodnoty kroku, kde bylo určeno maximum, se pohybuje v rozmezí ± 10 kroků. Proto byl pro obraz sestaven histogram počtu bodů v určité výškové hladině v obraze a oblast odpovídající výškám měřeného objektu byla proložena křivkou. Bylo určeno její maximum, které je bráno jako relativní naměřená výška zrcadla od roviny z_0 .



Obr. 9-8: histogram výšek v obraze proložený křivkou – maximum v kroku 314

Krok 314 v prvním měření odpovídá výšce:

$$v_1 = (7000 - 314) \cdot 0.3125 = 2089,37 \mu\text{m}$$

jelikož se výška plochy naměřeného povrchu měnila zhruba ± 10 kroků, je přesnost každého měření $\pm 3,13 \mu\text{m}$.

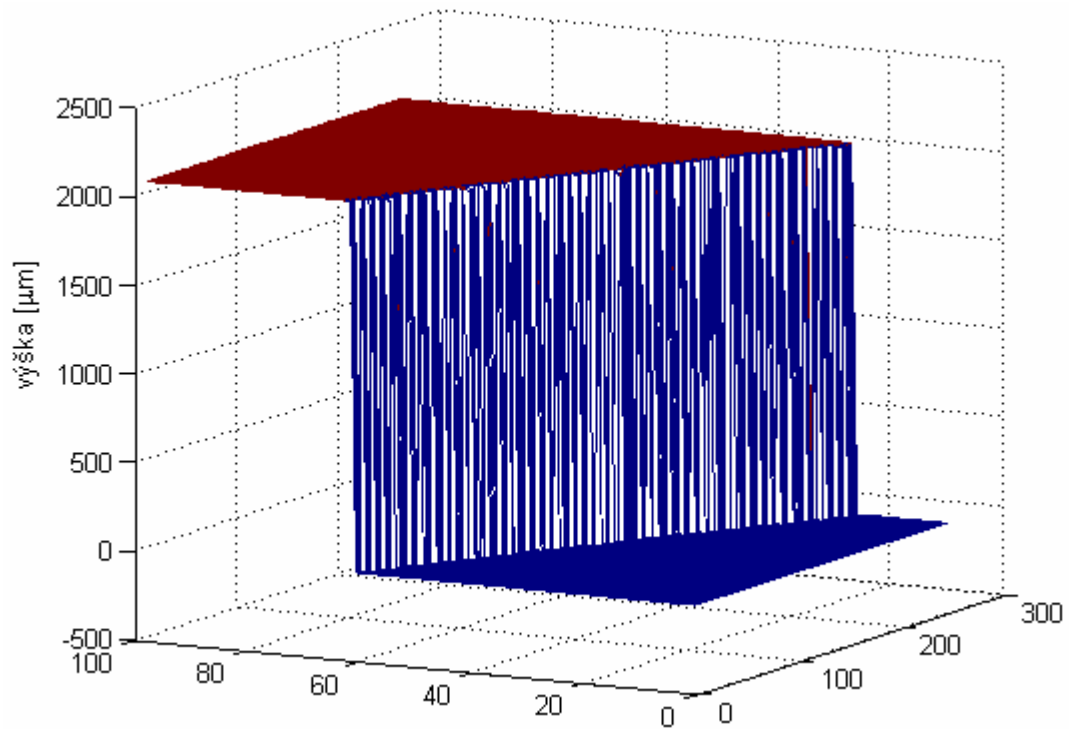
Stejným postupem byly vyhodnoceny snímky z druhého intervalu měření. Bylo zjištěno, že podklad byl o jeden krok posunut od roviny nula, nastavené na mikroposuvu.

$$v_2 = 0,31 \mu\text{m}$$

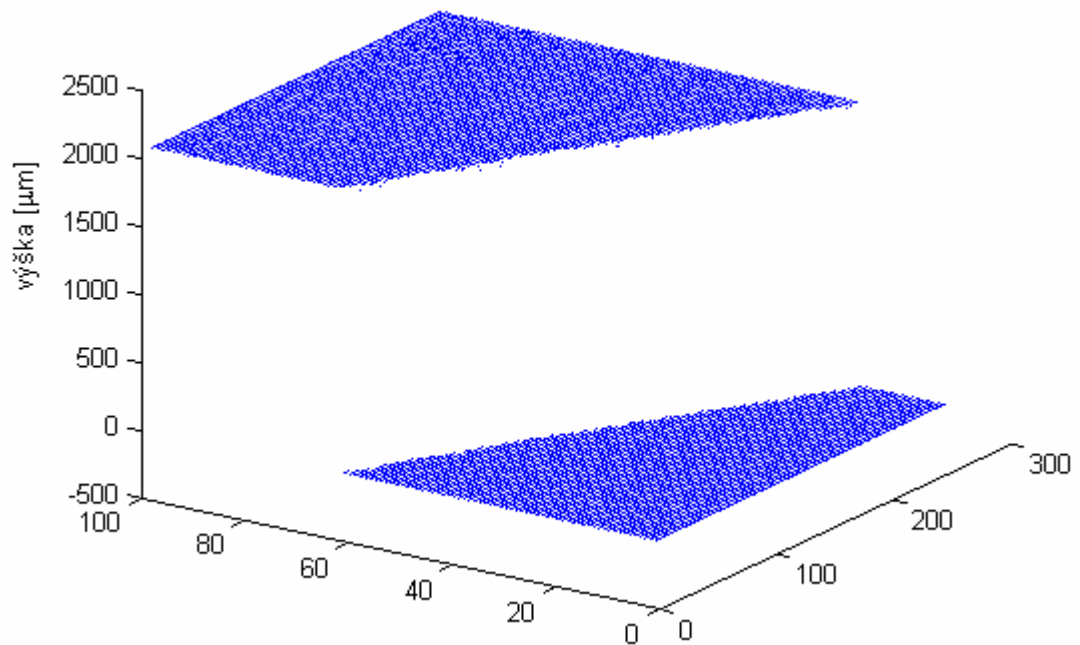
Změřená výška zrcadla je pak:

$$v = v_1 - v_2 = (2089 \pm 6.3) \mu\text{m}$$

Výsledný naměřený výškový profil měřeného zrcadla je na obrázku č. 9-9.



Obr. 9-9: Výsledný naměřený profil zrcadla (vykreslené plochy)



Obr. 9-10: Výsledný naměřený profil zrcadla (vykreslené body)

10. ZÁVĚR

V této práci byly popsány základní principy interference a principy metod optické rekonstrukce 3D objektů. Byly navrženy dvě laboratorní úlohy sloužící pro demonstraci základních principů interferometrie. První laboratorní úloha byla „Youngův dvouštěrbinový interferenční pokus“. Tato úloha slouží k pochopení základních principů interferometrie a difrakce světla. Ve druhé úloze bylo využito pracoviště sestavené v praktické části dokumentu. Na tomto pracovišti byla navržena laboratorní úloha „Nastavení základní roviny objektového zrcadla Michelsonova interferometru při interferometrii v bílém světle“. V této úloze jde o základní nastavení měřicí soustavy a naměření modulační charakteristiky jasu.

V praktické části byla navrženo a sestaveno pracoviště pro měření výškového profilu objektů. Blokové schéma viz obrázek 8-5. Je zde podrobně popsán postup při sestavování a realizaci pracoviště, včetně nastavování jednotlivých komponent soustavy. Pro elektronicky řízené hardwarové prostředky byly navrženy a popsány programy, jejichž zdrojové kódy jsou uvedeny v elektronických přílohách.

Funkce navrženého pracoviště byla experimentálně ověřena úlohou měření výškového profilu a tloušťky zrcadla. Výsledky tohoto měření jsou zobrazeny na obrázcích 9-7, 9-8, 9-9 a 9-10. Tloušťka zrcadla byla změřena s absolutní chybou přesnosti 6,3 μm . Tato hodnota potvrzuje poměrně vysokou přesnost měřicí metody vycházející z jejího principu.

11. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Hlaváč V., Šonka M.: *Počítačové vidění*, Grada, 1992, 272 s. ISBN 80-85424-67-3.
- [2] Haußecker H., Geißler P.: *Handbook of Computer Vision and Applications*. San Diego: Academic press, 1999, ISBN 0-12-379771-3.
- [3] Halliday D., Resnick R., Walker J.: *Fyzika – Elektromagnetické vlny – Optika – Relativita*. Brno: VUTIUM, 2000, ISBN 80-214-1868-0.
- [4] Pavelek M., Janotková E., Štětina J.: *Vizualizační a optické měřicí metody* [online]. [cit.2007-05-20]. <URL <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/optika/> >
- [5] Pavlíček P.: *White light interferometry - A method for height profile measurement of technical surface*. [online]. [cit.2007-05-20]. <URL: <http://jointlab.upol.cz/jointlab/research/witelite/witelite.htm> >
- [6] Standa Opto-Mechanical products, Motorized Positioners & Controllers, 8MT175 [online] [cit 2008-01-03]. <URL: <http://www.standa.lt> >
- [7] DLP design, DLP-2232PB-G USB Adapter, [online] [cit 2008-05-19]. <URL: <http://www.dlpdesign.com/usb/dlp-2232pbv16.pdf> >

12. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3-1: Konstrukce šíření rovinné vlny ve vakuu na základě Huygensova principu [3].....	4
Obr. 3-2: Konstruktivní interference.....	5
Obr. 3-3: Destruktivní interference	5
Obr. 3-4: Schématické znázornění difrakce [3]	6
Obr. 4-1: Příklad nasvětlení měřených objektů různými světelnými vzory 3D triangulace	9
Obr. 4-2: Příklad rekonstruovaného objektu metodou aktivní 2D triangulace	9
Obr. 4-3: Stereo snímání	10
Obr. 4-4: Měření doby letu modulovaného světla	12
Obr. 4-5: Princip měření při použití a) modulovaného světla, b) koherentního světla (interference) při měření doby letu světla.	13
Obr. 4-6: Deformace vetknutého nosníku zatíženého osamělou silou [2].....	14
Obr. 4-7 Skvrnový interferogram [2]	15
Obr. 4-8 : Michelsonův interferometr použitý pro interferometrii bílého světla	16
Obr. 4-9: a) funkce spektrální hustoty světelného zdroje, b) závislost světelné intenzity na pozici objektového zrcadla [5]	17
Obr. 5-1: Příklad struktury prokládaného CCD snímače	20
Obr. 5-2 Srovnání citlivostí CCD snímačů	22
Obr. 5-3 Odstup užitečného signálu od šumu při různých citlivostech CCD	22
Obr. 5-4: Blokové zapojení kamery s CCD snímači	23
Obr. 5-5: CANON 15 kamery	24
Obr. 5-6 Uspořádání pixelů na čipu	26
Obr. 5-7 Spektrální citlivost snímače ICX039DLA.....	27
Obr. 6-1: Youngův interferenční dvouštěrbinový pokus	28
Obr. 6-2: Interferenční obrazec při Youngově interferenčním pokusu.....	29
Obr. 6-3: Rozmístění měřicího pracoviště 1.....	29
Obr. 6-4: Rozmístění měřicího pracoviště 2	30

Obr. 6-5: Michelsonův interferometr použitý pro interferometrii bílého světla	31
Obr. 6-6: závislost světelné intenzity na pozici objektového zrcadla	32
Obr. 7-1: Frekvenční spektrum světla modré LED diody.....	34
Obr. 7-2: Frekvenční spektrum světla bílé LED diody	35
Obr. 7-3: Uspořádání světelného zdroje.....	36
Obr. 7-4: Elektronický mikroposuv a jeho řídicí jednotka	36
Obr. 7-5: Technický výkres motorického mikroposuvu 8MT175-100 [4]	37
Obr. 7-6: Ukázka programu SMCVieW	38
Obr. 7-7: Schéma zapojení vývodů konektoru na 8SMC1-USBh	38
Obr. 7-8: Znázornění optické trasy světla	40
Obr. 7-9: Blokové schéma měřicího pracoviště 1	42
Obr. 7-10: Praktické uspořádání měřicího pracoviště 1	43
Obr. 7-11: Praktické uspořádání měřicího pracoviště 2.....	43
Obr. 7-13: Graf četností bodů z nejvyšším jasem pro každý obrázek	45
Obr. 7-14: Snímek s největším počtem bodů s nejvyšší intenzitou jasu – bílá LED dioda.....	46
Obr. 7-15: Snímek s největším počtem bodů s nejvyšší intenzitou jasu – modrá LED dioda.....	47
Obr. 8-1: Modul DLP-2232PB.....	51
Obr. 8-2: Zapojení vývodů DLP-2232PB	55
Obr. 8-3: Výsledné schéma zapojení pro synchronizaci kamery s mikroposuvem ...	56
Obr. 8-4: časový průběh signálů FL_REQ a synchronizačního výstupu mikroposuvu	56
Obr. 8-5: Blokové schéma měřicího pracoviště 2.....	57
Obr. 8-6: Snímek s největším počtem bodů s nejvyšší intenzitou jasu – modrá LED dioda se synchronizací posuvu.....	58
Obr. 9-1: Průběh signálů IN a OUT na DLP-2232PB	60
Obr. 9-2: Obraz kamery při měření roviny měřeného zrcadla	61
Obr. 9-3: Obraz kamery při měření roviny podkladového zrcadla	61
Obr. 9-4: Průběh jasu jednoho pixelu obrazu během snímání	62

Obr. 9-5: Modulace jasu při interferenci v bílém světle [5].....	62
Obr. 9-6: Proložení jasové hodnoty křivkou (červeně).....	63
Obr. 9-7: Vykreslení naměřené plochy měřeného zrcadla ve 3D. Plocha měřeného zrcadla je zde červeně	64
Obr. 9-8: histogram výšek v obraze proložený křivkou – maximum v kroku 314	65
Obr. 9-9: Výsledný naměřený profil zrcadla (vykreslené plochy).....	66
Obr. 9-10: Výsledný naměřený profil zrcadla (vykreslené body).....	66

13. SEZNAM PŘÍLOH

Veškeré přílohy k této práci jsou uvedeny v elektronické podobě na přiloženém CD. Jednotlivé adresáře CD obsahují:

- Matlab** - ‚autoorez.m‘ - program k ořezání skupiny obrázků na zadanou velikost
- ‚matice.m‘ - je určen k nalezení základní roviny objektového zrcadla interferometru (viz. Kapitola 7.4).
 - vzorové naměřené obrázky určené k otestování funkce přiložených programů
 - **orezane** - složka s uloženými ořezanými obrázky -> výstup programu ‚autoorez.m‘
 - ‚rovinymax1.m‘ – program k vyhodnocení modulace jasů pro každý pixel a pro výpočet výsledného naměřeného profilu měřeného objektu.
- Mikroposuv** - ‚usmc_control.sln‘ projekt vytvořený ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2005 vs. 8.0.5 včetně všech potřebných knihoven a zdrojového kódu ‚motioncontrol.cpp‘
Tento projekt je byl vytvořen při tvorbě programu pro ovládání mikroposuvu.
- ‚8SMC1-USBh User Manual.pdf‘ - Uživatelský manuál pro řídicí jednotku posuvu 8MC1-USBh
- PIC** - projekt vytvořený v programu MPLAB IDE vs. 6.61.00.0 obsahující programy obsluhující DLP-2232PB
- ‚dlp-2232pbv15.pdf‘ – dokumentace výrobce k obvodu DLP-2232PB
- ‚Pracoviště_pro_optickou_interferometrii.pdf‘ – elektronická verze tohoto dokumentu.