

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická**

**Czech Technical University in Prague
Faculty of Electrical Engineering**

Ing. Jan Fischer, CSc.

Bezdotykové snímače rozměrů a polohy na bázi obrazových senzorů

Image Sensor Based Contactless Measurement of Dimensions and Position

Summary

At the present time optoelectronic image sensors are produced in large quantities and implemented mostly in consumer electronic devices in the area of image acquiring, sensing, recording and monitoring (e. g. in security services). Further domain of their applications are systems of computer vision widely used in industry.

Due to their mass production the price of image sensors dropped down so substantially that appears to be economically feasible to use them even for construction of relatively very simple sensors of dimensions and position. The sensors of this type often do not require to exploit the whole acquired image, as in many cases only selected part of image carrying information about the border of silhouette of object will do.

New approach to design of sensor based on projection of object shadow (silhouette) will be presented. Novel sensor does not require projection system of lenses and this fact substantially reduces its dimensions and cost of production. Line (1D) or area (2D) image sensors are used solely for determination of the borders of shadows projected by object in question.

The method of triangulation used in these sensors allows corrections of variation of optical magnification caused by changes of object distance. At the same time this method offers information about object distance, which is not the case of standard method based on cameras with project lenses.

The presentation is devoted also to practical aspects of small dimensions sensor system design and to comparison of various method of acquiring shadow image of object by means of standard objective lenses. The methods of direct projection of shadow image by telecentric beam and diverging beam are also included.

The presentation covers also topics devoted to the choice of laser as point source of light and related problems of laser speckles, diffraction and other effects causing the errors of measurement.

The novel method of image processing “on fly” allowing to obtain information about the edges position with minimum delay forms the base for the group of sensors having dynamic properties of measurement limited only by the speed of reaction of image sensor.

Souhrn

V současné době jsou optoelektronické obrazové senzory hromadně vyráběny a nasazovány především ve spotřební elektronice v oblasti snímání a záznamu obrazu a v monitorovací bezpečnostní technice. Další oblastí je jejich využití v průmyslových systémech počítačového vidění.

Díky hromadné výrobě cena obrazových senzorů klesla tak, že je ekonomické vytvářet s nimi i jednoduché bezdotykové snímače pro určování rozměrů a polohy objektů. V takových snímačích se nemusí využívat celý získaný obraz, ale pouze vybraná část nesoucí informaci o poloze okrajů stínového obrazu měřeného objektu.

V přednášce je prezentován nový přístup k řešení snímače, který využívá projekci stínového obrazu bez potřeby projekčního objektivu, čímž se zmenšují rozměry i nákladnost konstrukce. Obrazový senzor ve formě 1D – řádkový nebo 2D – plošný slouží pouze pro zjištění polohy okrajů promítnutého stínového obrazu.

Použitá triangulační metoda umožňuje korigovat působení změn vzdálenosti objektu na zvětšení a tak i na výsledky měření. Současně oproti standardním způsobům měření s kamerami s projekčním objektivem může navíc poskytnout i informaci o vzdálenosti objektu od snímače.

V přednášce jsou prezentovány i praktické aspekty řešení snímací soustavy s malými rozměry a srovnání způsobů získání stínového obrazu objektu standardním objektivem, dále s využitím přímé projekce stínového obrazu telecentrickým svazkem a rozbíhavým svazkem paprsků.

Je uveden způsob průběžného zpracování obrazové informace, který poskytuje informaci o poloze optických hran s minimálním zpožděním, aby se zajistila vysoká rychlost měření omezená pouze rychlostí obrazového senzoru.

Klíčová slova:

Senzor CCD, optoelektronický senzor CMOS, stínový obraz, měření polohy, měření rozměru

Keywords:

Sensor CCD, Optoelectronic sensor CMOS, Shadow image, Measurement of position, Measurement of dimensions

Obsah

1. Úvod	6
2. Obrazový snímač a projekce obrazu	8
2.1 Promítání obrazu objektu otvorem a spojnou soustavou.....	9
2.2 Přímé promítání stínového obrazu na senzor	11
2.3 Snímač s bodovými zdroji záření a projekcí stínového obrazu.....	14
3. Aspekty praktické realizace snímačů.....	18
3.1 Řešení a vlastnosti projekční části snímače.....	18
3.2 Řešení obvodů snímačů s řádkovými obrazovými senzory	20
3.3 Zpracování videosignálu plošných obrazových senzorů.....	20
4. Závěr.....	23
Literatura	24
Odborný životopis.....	26

1. ÚVOD

Optoelektronické obrazové senzory CCD a CMOS se používají, jak již vyplývá z jejich názvu, především pro snímání obrazu. Z hlediska počtu nasazení mají v současnosti drtivou převahu především v oblasti tzv. spotřební elektroniky, jako je snímání obrazu ve fotoaparátech a videokamerách. Obrazové senzory jsou také v kamerách pro monitorovací a zabezpečovací techniku, v zařízeních pro snímání a přenos dokumentů, ve speciálních snímacích zařízeních používaných například v oblasti biomedicínské techniky. Důležitou oblastí uplatnění obrazových senzorů CCD a CMOS jsou také systémy počítačového vidění.

Průmyslové systémy počítačového vidění obsahují blok snímání obrazu s obrazovým senzorem CCD nebo CMOS a blok počítačového zpracování obrazu. Číslicové zpracování obrazu je vzhledem k množství dat výpočetně velmi náročné. Obecně je možné vytvářet specializované programové vybavení, které bez pomoci dalších programů přímo zpracovává obraz a poskytuje výsledky. Vzhledem k velké časové a programátorské náročnosti se však v případě jednotlivých aplikací program takto neřeší. Obvykle se užívají univerzální programové balíky a knihovny pro zpracování obrazu s jejichž pomocí se výsledný produkt vytváří.

Tyto systémy jsou primárně orientovány na zjištění druhu, tvaru, přítomnosti, rozměrů, polohy či správné orientace objektu. S rostoucími nároky na kontrolu a zabezpečení výroby počet nasazených systémů počítačového vidění v automatizovaných výrobních linkách i přes jejich komplexnost a relativní nákladnost roste.

Hnacím motorem rozvoje průmyslového nasazení systémů počítačového vidění je z velké části automobilový průmysl, kde se (podle vlastních poznatků a odhadu) může v tuzemsku jednat téměř o polovinu z počtu všech nasazených systémů počítačového vidění. Není to ani tak přímo v samotných automobilkách, ale především v subdodavatelských firmách, vyrábějících funkční bloky nebo i malé díly.

Použití systémů počítačového vidění při kontrole výroby komponent a bloků je možné i pro měření polohy a geometrických parametrů objektů, které jsou ve snímané scéně dobře definovány, takže nejsou zapotřebí složité metody zpracování obrazu, ale je třeba se věnovat především rychlosti zpracování a minimalizaci chyb měření. Hromadnému nasazení obrazových senzorů i pro jednoduchá měření však brání komplexnost a relativně vysoká cena systémů zpracování obrazu.

Snahou je nalézt způsoby řešení velmi jednoduchých systémů – bezdotykových snímačů – využívajících obrazové senzory CCD nebo CMOS, které budou

z hlediska uživatele představovat kompaktní snímač rozměrů a polohy. Využití naleznou nejen při měření a kontrole, ale bude je možno zařadit i do zpětnovazebního systému jako snímač regulační odchylky. Podobnou problematiku řeší také [1], [2].

Snímače nasazené pro mezioperační kontrolu rozměrů budou obvykle vyhodnocovat relativně malé vyráběné předměty. Budou proto muset být umístěny relativně blízko nich. Pokud by snímač měl být součástí výrobní technologické linky, měl by mít také malé vnější rozměry, aby jej bylo možno snadněji zabudovat. Z toho také vyplývá požadavek malých rozměrů soustavy tvořené bloky: objekt, projekční soustava, obrazový senzor.

Takové snímače by z hlediska nákladů mohly vyplnit volný prostor určený na jedné straně optickými závory a na druhé straně komplexními systémy zpracování obrazu.

Z toho však také vyplývá omezení jejich funkčních možností. To bude spočívat v předpokladu, že se rozměr, nebo poloha bude určovat v 1D - příčný rozměr, případně se bude rozměr, či poloha určovat pouze ve dvou na sebe kolmých osách.

Pro optimalizaci a zjednodušení uspořádání těchto snímačů je nutno řešit tři oblasti, kterými jsou:

- projekční soustava,
- optimalizace uspořádání elektronických bloků snímače,
- zjednodušení metod zpracování obrazového signálu.

Z hlediska projekční soustavy se jedná buď o minimalizaci rozměrů, minimalizaci náročnosti optické projekční soustavy s objektivem nebo případně i přímo o vyloučení její potřeby.

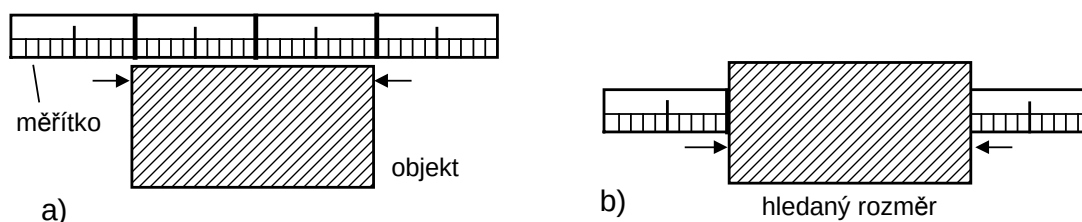
Z hlediska elektrických bloků snímače je cílem minimalizovat jejich komplexnost a snížit potřebu použití externího výpočetního bloku (ve formě PC). Na aktuálnost problému lze soudit i podle [3].

Z hlediska zjednodušení metod zpracování obrazového signálu lze vycházet z předpokladu, že se bude jednat o zpracování velmi kontrastního stínového obrazu, kde budou hrany v obrazu velmi dobře definovány a pro jejich vyhledání většinou postačí prahování. Současně bude kladen požadavek na rychlé zpracování obrazové informace s minimálním zpožděním. Bude se jednat zejména o průběžné zpracování, kdy se mezivýsledky získávají bezprostředně nebo s minimálním zpožděním po příchodu informace z dané části obrazu.

2. OBRAZOVÝ SNÍMAČ A PROJEKCE OBRAZU

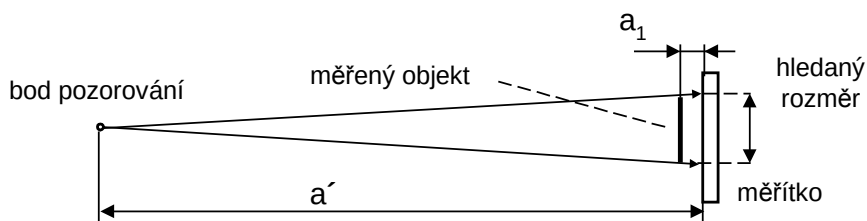
Moderní obrazové senzory CCD nebo CMOS jsou složité polovodičové obvody obsahující podle typu stovky tisíc až miliony fotocitlivých snímacích bodů, které lze považovat za struktury s velmi přesně definovanou a shodnou periodou. Lze na ně pohlížet jako na jistou obdobu rysek na měřítku nebo rysky na skleněném pravítku, které je základem optoelektronického inkrementálního lineárního senzoru. Lineární (1D) senzor CCD je tak možno například přirovnat k měřítku o délce 28 mm nebo až 60 mm, se vzdáleností středů rysek $14\text{ }\mu\text{m}$ až $5\text{ }\mu\text{m}$. Plošné obrazové snímače pak představují jistou formu dvoudimenzionálního (2D) měřítka. Současně díky použité polovodičové technologii vysoké integrace mají tyto struktury velmi vysokou přesnost periodicity.

Bezdotykové měření rozměru s využitím obrazových senzorů je možno chápat jako porovnávání rozměru měřeného objektu a fotocitlivé části senzoru. Je to analogie standardního způsobu měření rozměru měřidlem dle obr. 2.1 a), kdy se na měřidle hledá úsek, který odpovídá právě velikosti objektu. Měřítka může být dle obr. 2.1 b) také umístěno za objektem a zjišťuje se, jak velká jeho část je objektem zakryta, resp. jak dlouhý úsek měřítka je z hlediska pozorovatele objektem zastíněn.



Obr. 2.1 Určení rozměru objektu porovnáním s měřítkem

Proces určení rozměru optickým porovnáním rozměru objektu s odpovídajícím úsekem na měřítku znázorňuje obr. 2.2. Bod pozorování je ve vzdálenosti a' od měřítka a měřený rovinný objekt je ve vzdálenosti a_1 .

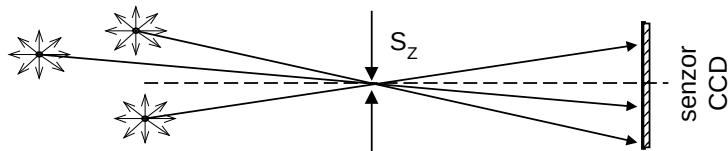


Obr. 2.2 Měření rozměru objektu optickým srovnáním s úsekem měřítka

Proces měření spočívá v porovnání velikosti průmětu objektu (z hlediska pozorovatele) do roviny měřítka.

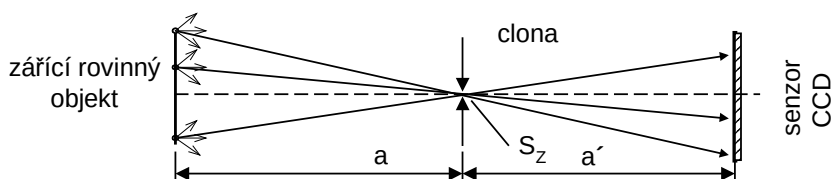
2.1 Promítání obrazu objektu otvorem a spojnou soustavou

Základní ideové uspořádání při promítání obecné 3D scény malým otvorem ve cloně na senzor je na obr. 2.3, kde bod S_z představuje střed souměrnosti zobrazení. Obrazem jednotlivých zářících bodů z 3D prostoru jsou světlé stopy na snímači (ve 2D prostoru).



Obr. 2.3 Promítání kruhovým otvorem

Promítáním rovinného zářícího objektu dle obr. 2.4 vznikne na senzoru jeho obraz ve formě světlé plochy. Je možno promítat na snímač též stínový obraz, kdy je pozadí objektu světlé a objekt se promítne ve formě tmavé plochy, která je obklopena světlým obrazem pozadí. Pro zobrazení nezátížené chybou geometrie je nutná rovnoběžnost rovin objektu a snímače.



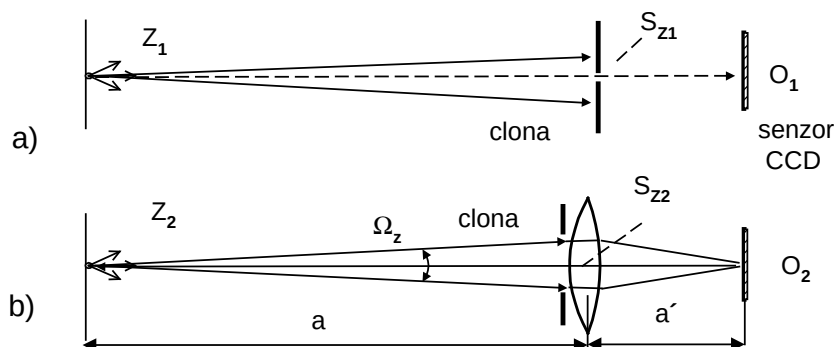
Obr. 2.4 Promítání rovinného objektu do roviny snímače

Zobrazení kruhovým otvorem má protichůdné požadavky kladené na velikost projekčního otvoru. Viděno pouze z hlediska geometrické optiky (bez ohledu na působení ohybových jevů na otvoru) při požadavku ostrého zobrazení okrajů objektu je snaha o co nejmenší rozměr otvoru. Z hlediska získání co největší intenzity ozáření snímače je naopak požadavek na velký průměr otvoru.

Řešením je uspořádání dle obr. 2.5 b) s použitím optického členu, který mění chod paprsků tak, že okrajové paprsky láme a mění jejich chod směrem ke středovému paprsku procházejícímu virtuálním středem zobrazení S_{z2} . Obrazem zářícího bodu Z_2 ve vzdálenosti a od středu soustavy je světlý bod O_2 na snímači. Snímač musí být umístěn pouze v jediné definované vzdálenosti a' , v níž se dráha jednotlivých lomených paprsků protíná.

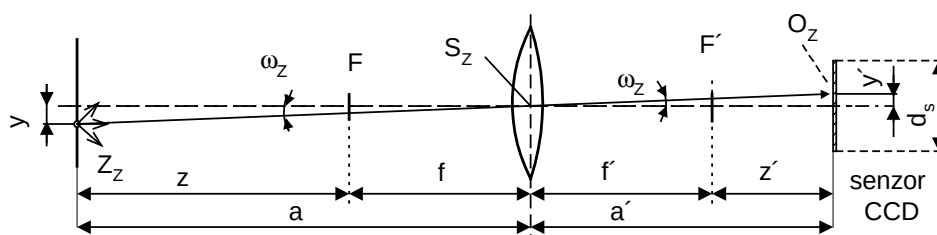
Při vytvoření obrazu zářícího bodu se nyní uplatní svazek paprsků vycházející ze zářícího bodu v prostorovém úhlu Ω_z , který tak představuje podstatně větší zářivý tok, než tomu bylo v případě obr. 2.5 a), a intenzita ozáření senzoru je tak podstatně vyšší. Velikostí otvoru v cloně se pak může měnit velikost prostorového úhlu Ω_z , a tím i intenzita ozáření senzoru.

Pokud nebude snímač umístěn v optimální vzdálenosti a' , nebude obrazem bodu Z_2 na senzoru opět bod, ale světlá ploška se středem v místě, kde rovinu snímače protíná přímka určená body Z_2 a O_2 . Zmenšením průměru otvoru ve cloně se však také zmenšuje úhel vstupujícího a tím i vystupujícího svazku paprsků, který tak vytváří na snímáči světlou kruhovou plošku s menším průměrem. Ve velmi hrubém přiblížení a při zjednodušení se tak velmi zaciněná optická projekční soustava dle obr. 2.5 b) chováním blíží soustavě dle obr. 2.1a), kde by navíc byla ve středu umístěna skleněná planparalelní deska. Z toho také vyplývá známá skutečnost, že zaciněná projekční optická soustava je z hlediska promítání detailu („ostrosti zobrazení“) méně citlivá na správné nastavení vzdálenosti a' (zaostření objektivu).



Obr. 2.5 Promítání: a) otvorem, b) optickým spojným členem

Znáмым problémem promítání optickou soustavou jsou však chyby geometrie zobrazení. Dochází ke zkreslení, které je možno zjednodušeně vysvětlit tak, že paprsky dopadající na optickou soustavu dle obr. 2.6 pod větším úhlem ω_z za středem S_z nepokračují přímo, ale lomí se poněkud jiným směrem (obvykle více k ose) a dochází tak k poduškovitému zkreslení. Toto je zásadní problém použití projekční optické soustavy při měření, protože v jednotlivých částech snímaného pole se mění zvětšení.



Obr. 2.6 Projekční spojná optická soustava a její parametry

V soustavě dle obr. 2.6 jsou f a f' předměťová a obrazová ohnisková vzdálenost ($f = f'$), body F a F' předměťové a obrazové ohnisko optické soustavy. Pro měření je důležitá velikost zvětšení β' určující poměr velikosti obrazu y' a velikosti předmětu y . U optické soustavy z obr. 2.6 platí pro příčné zvětšení vztah (2.1), stejně jako pro soustavu dle obr. 2.4.

$$-\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} \quad (2.1)$$

Při volbě objektivu pro požadované zvětšení β' a vzdálenost z platí (2.2).

$$-\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} = \frac{f'}{z} \quad (2.2)$$

Protože se výzkum orientuje na bezdotykové snímače pro měření rozměrů a polohy malých objektů s vysokým rozlišením, které by bylo možno zabudovat přímo do výrobní technologie, je zde současně požadavek malých rozměrů zařízení. Důležitým parametrem proto je celkový podélný rozměr soustavy, který je větší, než je vzdálenost objektu a jeho obrazu a_{sum} dle (2.3).

$$a_{\text{sum}} = a + a' = z + f + f' + z' = z + 2f' + z' \quad (2.3)$$

Lze odvodit, že nejmenší vzdálenost předmětu a jeho obrazu nastává v případě, když předmětová vzdálenost z je rovna ohniskové vzdálenosti f' , tedy $z = f'$ a nejmenší vzdálenost předmětu a jeho obrazu při použití standardního objektivu s ohniskovou vzdáleností f' je určena (2.4).

$$a_{\text{sum_min}} = z + 2f' + z' = 4f' \quad (2.4)$$

Platí obecný závěr, že předmět a jeho obraz při zobrazení objektivem nemohou být blíže, než je čtyřnásobek ohniskové vzdálenosti f' objektivu. Současně platí, že $z = z'$ a zvětšení $|\beta'| = 1$. (Za předpokladu, že obě ohniska F a F' jsou od sebe vzdálena $2f'$, což u reálného objektivu nemusí vždy platit.)

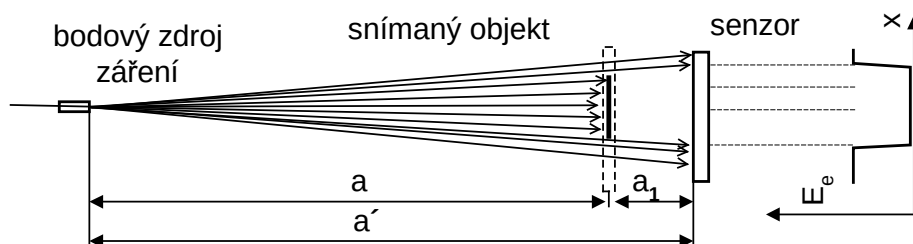
Zásadním problémem měření rozměrů standardním objektivem je citlivost relativní změny zvětšení $\delta_{\beta'}$ na změnu vzdálenosti a , resp. z . Dle (2.5) je $\delta_{\beta'}$ přibližně rovna relativní změně vzdálenosti objektu a [4], což přináší obtíže obzvláště při měření malých objektů umístěných blízko objektivu.

$$\delta_{\beta'} = \frac{\beta'_1 - \beta'}{\beta'} \cong -\frac{\Delta_a}{a} = -\frac{\Delta_a}{z + f'} \quad (2.5)$$

Řešením je použití telecentrického objektivu, který pro zobrazení využívá pouze paprsky jdoucí rovnoběžně s osou. Jedná se však o nákladné řešení.

2.2 Přímé promítání stínového obrazu na senzor

Alternativní řešení promítání stínového obrazu bez potřeby objektivu může při měření rozměru a polohy objektu využívat modifikaci uspořádání z obr. 2.2, avšak s opačným chodem paprsků. Využije se přímá projekce stínového obrazu na senzor s ideovým uspořádáním dle obr. 2.7, kde E_e znázorňuje rozložení intenzity ozáření senzoru.



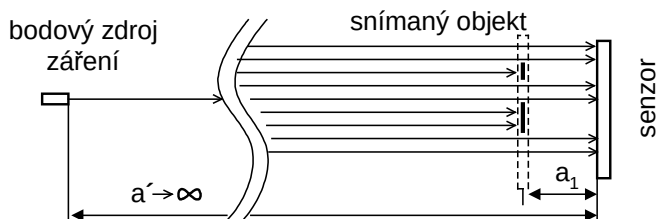
Obr. 2.7 Přímé promítání stínového obrazu

Z promítnutého stínového obrazu je možno určit rozměr objektu. Velikost zvětšení je určena vztahem (2.6).

$$\beta' = \frac{a'}{a} = \frac{a'}{a' - a_1} \geq 1 \quad (2.6)$$

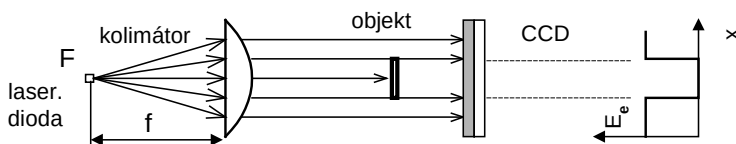
Příčné zvětšení je větší než jedna ($\beta' \geq 1$) a závisí na velikostech a , a' . Při stálém uspořádání soustavy zdroj záření – snímač ($a = \text{konst.}$) se pak zvětšení mění se změnou vzdálenosti a_1 předmětu od snímače.

Teoreticky se získá jednotkové zvětšení pro případ $a = a'$, tedy pro situaci za podmínky $a_1 = 0$, což však prakticky nemůže nastat, protože objekt nemůže být umístěn přímo na snímači. Limitně je však možno se této situaci ($\beta' = 1$) přiblížit, pokud bude a_1 malé a současně $a' \gg a_1$. Při vzdálenosti a_1 konstantní a vzdálenosti a' rostoucí k nekonečnu, bude příčné zvětšení také blízké jednotkovému ($\beta' = 1$) a paprsky dle obr. 2.8 mezi snímaným objektem a snímačem bude možno považovat za rovnoběžné (telecentrické).



Obr. 2.8 Promítání stínového obrazu telecentrickým svazkem paprsků

Realizace telecentrického svazku dle obr. 2.9 používá bodový zdroj záření představovaný laserovou diodou a spojnou optickou soustavou.



Obr. 2.9 Ideové schéma snímače s telecentrickým svazkem paprsků

Na obr. 2.10 je příklad realizace telecentrického svazku paprsků (s laserovou diodou a kolimačním objektivem), který byl využíván při experimentech s měřením příčného rozměru stínovou metodou. Výsledky experimentů jsou

popsány také v [5] a [6]. V uspořádání je použita velká vzdálenost mezi kolimátorem a řádkovým snímačem CCD z důvodu zjištění stupně rozbíhavosti telecentrického svazku paprsků. Mezi kolimátorem a snímačem je umístěn vertikálně orientovaný měřený válcový objekt. Na snímači uprostřed je zřetelný stínový obraz měřeného válcového objektu obklopený po obou stranách osvětlenými oblastmi.



Obr. 2.10 Experimentální snímač s kolimátorem

Snímače s uspořádáním odpovídajícím obr. 2.9 se standardně používají. Přesnost takových snímačů závisí na stupni telecentricity (rovnoběžnosti) paprsků, proto jsou kladeny vysoké nároky na vlastnosti kolimátoru. Využívá se též kombinace s telecentrickým objektivem dle [7].

Rozměr svazku paprsků je určen velikostí měřeného pole a rozměrem snímače, což v případě řádkového snímače bývá typicky 20–30 mm. Při experimentech byla ověřena možnost náhrady specializovaného optického bloku kolimační optiky standardním objektivem, jak je též zřejmé z obr. 2.10. Z hlediska konstrukčního a požadavku opakované výroby to však není optimální. Ukázalo se však, a následně to bylo i prakticky při laboratorních experimentech ověřeno, že analogie uspořádání dle obr. 2.10 může být využita i při použití standardní plošné kamery. Takový systém by sloužil k přesnému určení polohy objektu, resp. jeho vzdálenosti od přímky určené středem kolimátoru a středem obrazového senzoru.

Maximální průměr optického svazku je určen nastavenou vstupní aperturou D_{VP} použitého objektivu dle vztahu (2.7), kde k_c je nastavené clonové číslo (geometrické) a $f' = 58$ mm je ohnisková vzdálenost objektivu.

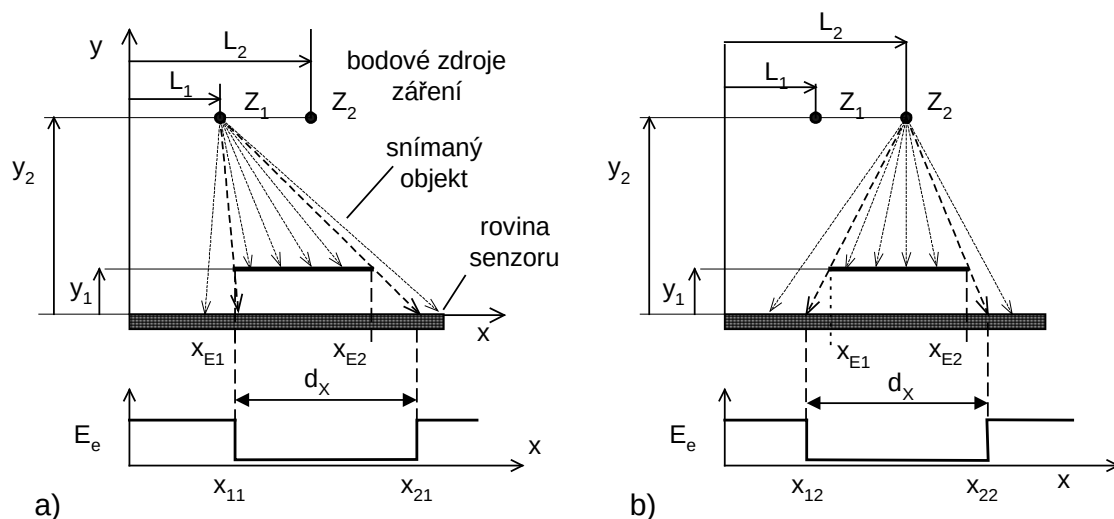
$$D_{VP} = \frac{f'}{k_c} = \frac{58}{2} = 29 \text{ mm} \quad (2.7)$$

V daném případě to bylo 29 mm, což odpovídalo velikosti používaných řádkových senzorů CCD typu ILX503, ILX551, ILX554, TCD1205 a TCD1304.

Na základě rozboru a následného potvrzení experimenty je možno velmi zjednodušeně formulovat závěr, že pokud je daný objektiv vhodný pro použití při promítání obrazu na senzor dané velikosti v kameře, je možno stejný objektiv použít pro generaci telecentrického svazku a měření s uspořádáním dle obr. 2.10, kde se stínový obraz promítá přímo na obrazový senzor.

2.3 Snímač s bodovými zdroji záření a projekcí stínového obrazu

Pro odstranění potřeby optického bloku – projekčního objektivu – v sestavě snímače je možné vyjít z uspořádání dle obr. 2.7. Při promítání stínového obrazu dle obr. 2.11 rozbíhavým svazkem paprsků vycházejícím z bodového zdroje se zvětšení mění pouze se změnou polohy ve směru y , nezávisí však na poloze ve směru x (pro názornost je použito označení vzdálenosti ve směru snímače jako x , vzdálenosti kolmo na rovinu snímače jako y).



Obr. 2.11 Princip triangulačního snímání stínového obrazu

Toho bylo využito a byl navržen zcela nový způsob řešení bezdotykového snímače rozměru a polohy objektu s využitím projekce stínového obrazu vytvořeného při osvětlení obrazového senzoru bodovými zdroji záření. Od stávajících metod se zásadně odlišuje tím, že není zapotřebí projekční objektiv a díky tomu mohou být i konstrukční rozměry snímače malé.

Bodové zdroje záření $Z_1, Z_2, \dots$ jsou umístěny v řadě a určují tak přímku, která je rovnoběžná s řadou fotoelementů ve snímači. Uspořádání je zřejmé z obr. 2.11.

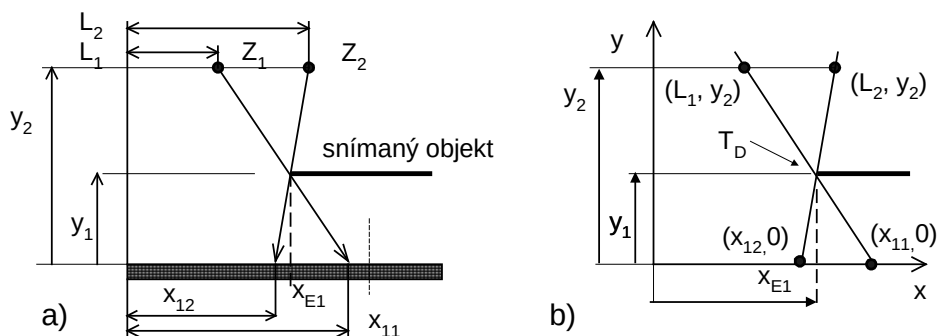
Za předpokladu shodné vzdálenosti y_2 bodových zdrojů záření Z_1, Z_2 , (případně i dalších $Z_3, \dots$) od roviny senzoru a shodné vzdálenosti y_1 celého rovinného objektu od snímače bude zvětšení β' dle (2.8) této stínové projekční soustavy konstantní.

$$\beta' = \frac{y_2}{y_2 - y_1} \geq 1 \quad (2.8)$$

Volbou zdroje $Z_1, Z_2, \dots$ se mění poloha stínového obrazu, jehož velikost d_x určená dle (2.9) však zůstává stejná.

$$d_x = x_{21} - x_{11} = x_{22} - x_{12} \quad (2.9)$$

Se změnou polohy objektu v měřicím prostoru, pokud by se změnila jeho vzdálenost y_1 od snímáče, by došlo ke změně zvětšení β' a tím k chybě měření.



Obr. 2.12 Triangulace při určení vzdálenosti y_1 : a) uspořádání, b) významné body

Tuto změnu je však možno vyloučit tak, že se výška y_1 okraje hrany objektu zjistí triangulační metodou. Ze dvou následujících snímků, kdy se nejdříve aktivuje Z_1 a určí x_{11} , následně se při druhém snímání aktivuje Z_2 a určí poloha optické hrany na snímáči x_{12} . Za předpokladu zanedbatelné tloušťky objektu jsou dotykové body svazků paprsků ze zdroje Z_1 a ze zdroje Z_2 s okrajem objektu totožné a nacházejí se v místě T_D se souřadnicemi (x_{E1}, y_1) .

Na obr. 2.12 a) je uspořádání a na obr. 2.12 b) je znázorněna poloha významných bodů. Jsou to body o souřadnicích $(x_{11}, 0)$ a (L_1, y_2) , které určují první přímku s rovnicí (2.10),

$$x = x_{11} + y \cdot \frac{L_1 - x_{11}}{y_2} \quad (2.10)$$

totožnou s dráhou paprsku při aktivaci bodového zdroje světla Z_1 , a body o souřadnicích $(x_{12}, 0)$ a (L_2, y_2) získané při aktivaci zdroje Z_2 , které určují druhou přímku o rovnici (2.11).

$$x = x_{12} + y \cdot \frac{L_2 - x_{12}}{y_2} \quad (2.11)$$

Triangulační určení polohy spočívá v hledání průsečíku obou přímek. Z rovnic (2.10) a (2.11) je možno vyloučit polohu x a získat souřadnici y_1 levého okraje dle (2.12).

$$y_{1L} = y_2 \cdot \frac{x_{11} - x_{12}}{L_2 - L_1 + x_{11} - x_{12}} \quad (2.12)$$

Analogicky bude pro pravý okraj platit vztah (2.13).

$$y_{1R} = y_2 \cdot \frac{x_{21} - x_{22}}{L_2 - L_1 + x_{21} - x_{22}} \quad (2.13)$$

Řešením soustavy rovnic (2.10) a (2.11) lze určit korigované polohy x_{E1} a x_{E2} . Pomocí vztahu (2.14) je možno z x_{21} a x_{22} určit správnou polohu x_{E1} – vzdálenost hrany objektu ve směru x od levého okraje měřicího pole.

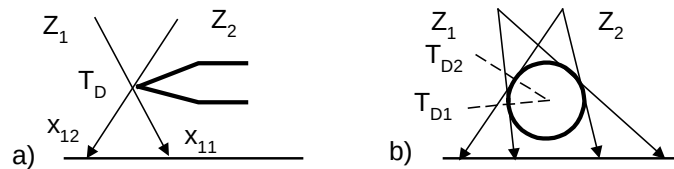
$$x_{E1} = \frac{L_2 \cdot x_{11} - L_1 x_{12}}{L_2 - L_1 + x_{11} - x_{12}} \quad (2.14)$$

Podobně se s využitím x_{21} a x_{22} získá pomocí (2.15) hodnota x_{E2} .

$$x_{E2} = \frac{L_2 \cdot x_{21} - L_1 x_{22}}{L_2 - L_1 + x_{21} - x_{22}} \quad (2.15)$$

Pokud by se při měření jednalo pouze o rychlé určení rozměru objektu, který je standardně v konstantní vzdálenosti y_1 od senzoru, je možno pro danou vzdálenost určit zvětšení dle (2.8) a následně pak velikost objektu. Současně může probíhat při každém měření pouze jednoduchá kontrola, zda nedošlo ke změně vzdálenosti y_2 , což se projeví jako změna velikosti rozdílu $x_{11} - x_{12}$.

Jako vedlejší efekt použití triangulační metody může být přínosem možnost určení vzdálenosti y_2 objektu od senzoru, což při standardním snímání projekčním objektivem nebo promítání stínového obrazu telecentrickým svazkem není možné. Popisovaná metoda byla rozvíjena v řadě prací [8], [9], [10], [11] řešených v laboratoři videometrie, kdy se řešily také otázky mezi použitelnosti metody a její spolehlivost při různých nezávislých implementacích.



Obr. 2.13 Dotykové body s objektem a) hrana ve formě břitu, b) válcový objekt

Požadavek triangulační metody, aby byl jediný společný dotykový bod T_D , v němž se také protínají přímky použité při triangulaci, obecně nemusí být vždy splněn. Okraj objektu ve formě břitu dle obr. 2.13a) vyhovuje.

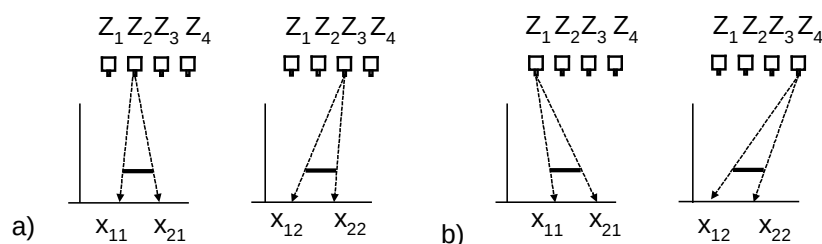
V případě válcového objektu dle obr. 2.13 b) nejsou dotykové body T_{D1} a T_{D2} shodné, avšak je možno provést výpočetní korekci a určit nejen průměr d objektu, ale i polohu jeho středu (osy) o souřadnicích x_c , y_c , jak je uvedeno v [12]. Polohu středu ve směru x určuje vztah (2.16).

$$x_c = \frac{L_2 \cdot x_{11} - L_1 x_{12}}{L_2 - L_1 + x_{11} - x_{12}} + \frac{d}{2} \cdot \frac{(L_2 - x_{12})\sqrt{(L_1 - x_{11})^2 + y_2^2} - (L_1 - x_{11})\sqrt{(L_2 - x_{12})^2 + y_2^2}}{(L_2 - L_1 + x_{11} - x_{12})y_2} \quad (2.16)$$

Polohu ve směru y udává vztah (2.7).

$$y_c = y_2 \frac{x_{11} - x_{12}}{L_2 - L_1 + x_{11} - x_{12}} + \frac{d}{2} \cdot \frac{\sqrt{(L_1 - x_{11})^2 + y_2^2} - \sqrt{(L_2 - x_{12})^2 + y_2^2}}{(L_2 - L_1 + x_{11} - x_{12})} \quad (2.17)$$

Za předpokladu symetrie tohoto válcového objektu je možno také určit měřením stínovou metodou jeho průměr d podle vztahů uvedených [13].



Obr. 2.14 Snímání s využitím více bodových zdrojů

Triangulační metoda určení polohy vyžaduje minimálně dva bodové zdroje záření. Použitím více bodových zdrojů záření $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$, dle obr. 2.14 je možno podle polohy objektu nad snímačem optimalizovat proces měření pro zjištění polohy ve směru x dle obr. 2.14 a) nebo měření vzdálenosti y_1 od snímače aktivací Z_1 a Z_4 dle obr. 2.14 b).



Obr. 2.15 Příklad uspořádání pokusné hlavice snímače

Dalším důvodem využití více zdrojů je omezený vyzařovací úhel použitých laserových diod. Na obr. 2.15 je snímek pokusné snímací hlavice (realizované v rámci práce [9]) s řádkovým senzorem CCD a 6 laserovými diodami, jejichž postupnou aktivací lze zjistit optimální konfiguraci optických hran pro měření.

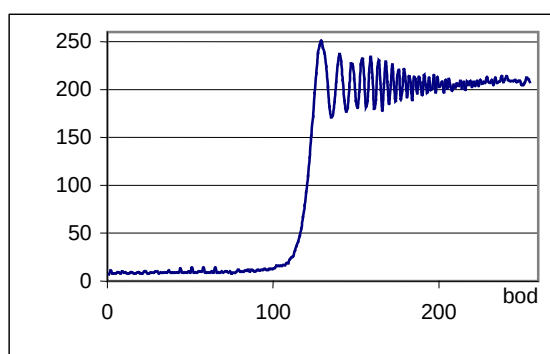
3. ASPEKTY PRAKTICKÉ REALIZACE SNÍMAČŮ

Výhodou popsaného triangulačního snímače s promítáním stínového obrazu je, že oproti uspořádání snímače s klasickým projekčním objektivem, kde je minimální vzdálenost objektu od snímače dána vztahem (2.4), může být při použitém stejném snímači CCD rozměr celé sestavy menší. Aby toho bylo dosaženo, je nutné odpovídajícím způsobem optimalizovat nejen projekční soustavu, ale i blok elektroniky snímače včetně vyhodnocovací elektroniky.

Pro návrh snímačů pro bezdotykové měření využívajících obrazové senzory je důležité, aby blok elektronických obvodů pro řízení senzoru a zpracování jeho výstupního signálu byl relativně jednoduchý. Současně by ale měl být tak výkonný, aby neovlivňoval rychlost snímání, která by měla být omezena pouze vlastnostmi samotného obrazového senzoru. Důležitou součástí návrhu snímače s obrazovým senzorem je proto vyřešení způsobu rychlého zpracování videosignálu v reálném čase, které by však nekladlo enormní nároky na výpočetní výkon použitého procesoru..

3.1 Řešení a vlastnosti projekční části snímače

Jako snímač byl při experimentech využíván řádkový obrazový senzor CCD, který je pro uvedenou aplikaci díky své délce 28 mm výhodný. Metodu je však možno využít i ve spolupráci s plošným obrazovým senzorem. Prakticky byly ověřeny plošné obrazové senzory CCD v kamerách s výstupním signálem dle standardu CCIR i plošné obrazové senzory CMOS. Použití plošného obrazového senzoru umožňuje aplikovat triangulační stínovou metodu ve snímači polohy a rozměru ve 2D.



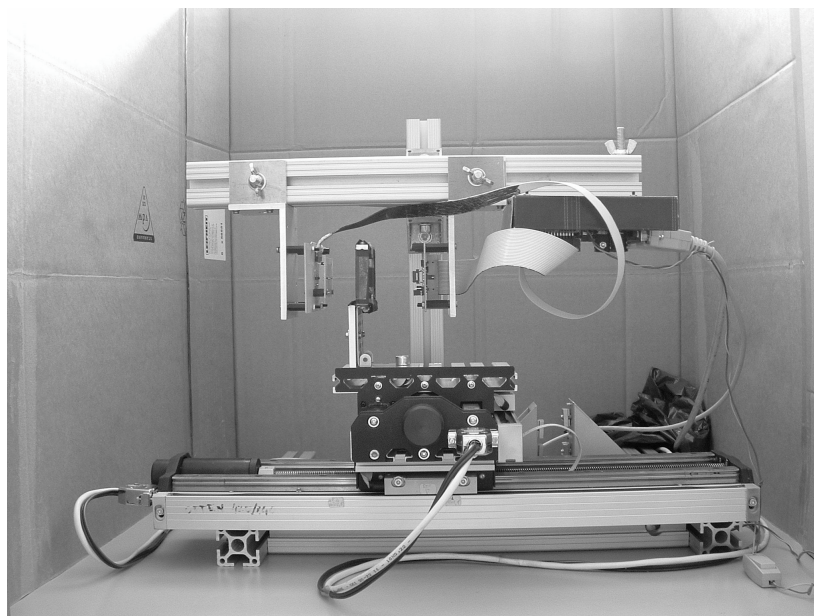
Obr. 3.1 Videosignál v oblasti hrany s působením ohybových jevů

Zásadní je otázka volby bodového zdroje záření. Byla ověřena možnost použití miniaturních čelně emitujících LED. Nakonec však byly využity laserové diody z důvodu velmi malého rozměru zářící plochy (řádově mikrometrů). Jejich nevýhodou je, že v oblasti stimulované emise roste koherenční délka záření

a roste působení s tím spojených efektů (vznik „speklů“ a zvlnění průběhu působením ohybových jevů).

To je zřejmé z obr. 3.1, který zachycuje videosignál v oblasti hrany. Aby bylo působení ohybových jevů zřetelnější, byla zvolena větší vzdálenost senzoru od zdroje záření, než se ve snímači obvykle využívá. Pro snížení popsanych jevů se proto v práci začaly využívat laserové diody provozované v pracovním bodě pod tzv. kolenem, kde ještě nedochází ke generaci záření stimulovanou emisí (typickou u laserových diod), ale pouze spontánní emisí, kdy generované záření má malou koherenční délku.

Pro určení vlastností snímače, opakovatelnosti měření a citlivosti jeho konstrukce na reálné uspořádání byla využita sestava dle obr. 3.2 s křížovým posuvným stolem, který umožnil automatizované měření a programově řízený pohyb objektu ve směru x i ve směru y . V rámci prací [9], [14], [15] byla provedena četná měření. Při experimentech se ukázalo, že opakovatelnost měření polohy je až v řádu jednotek mikrometrů ve směru x a až setin milimetru ve směru y v závislosti na použité konfiguraci. Velmi podrobné a systematické zpracování nejistot popisované metody obsahuje práce [15].



Obr. 3.2 Experimentální pracoviště pro ověření chyb metody měření polohy

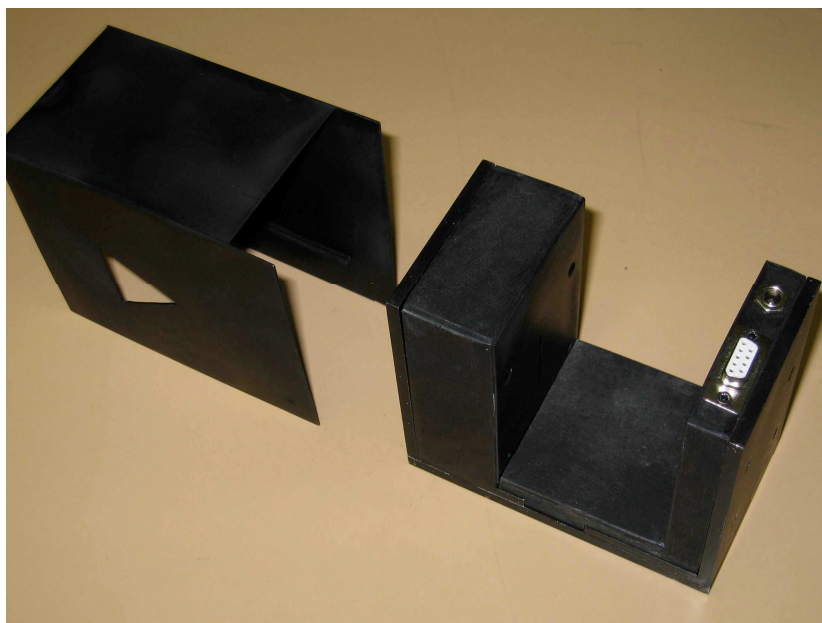
Popisovaného rozlišení polohy až na úrovni zlomku mikrometru je dosaženo subpixelovou lineární interpolací, při níž je nutno zohlednit fyzikální aspekty tvorby videosignálu v oblasti hrany a ohybové jevy popisované v [16] a [17] a ovlivňující výsledek subpixelové interpolace. Při přímé projekci stínového obrazu lze pro interpolaci v prvním přiblížení nastavit rozhodovací úroveň 25 procent přechodu mezi úrovní černé a bílé.

Popsaná triangulační stínová metoda je velmi netradiční, na což ukazuje i to, že na její popis z [18] se odkazuje spis [19]. Při sledování různých informačních

zdrojů nebyla nalezena informace o tom, že by podobný způsob měření polohy a rozměru byl někde prezentován.

3.2 Řešení obvodů snímačů s řádkovými obrazovými senzory

Při vývoji snímačů bylo řešeno několik variant řídicího bloku řádkového senzoru CCD. Jednou z variant bylo např. přímé řízení senzoru signálovým procesorem ADSP2184, který nejen generoval všechny řídicí signály, ale současně zajišťoval čtení a programové zpracování digitalizovaného videosignálu. Takový modul se využíval v sestavě dle obr. 2.15 a dle obr. 3.2. Pro další zjednodušení byly navrženy kompaktní moduly s jednočipovými mikropočítači typů ATmega8515 a ATmega64, u kterých se pro zrychlení zpracování videosignálu při vyhledávání polohy optických hran využívaly vnitřní obvodové prostředky podobně, jako je uvedeno na obr. 3.4.



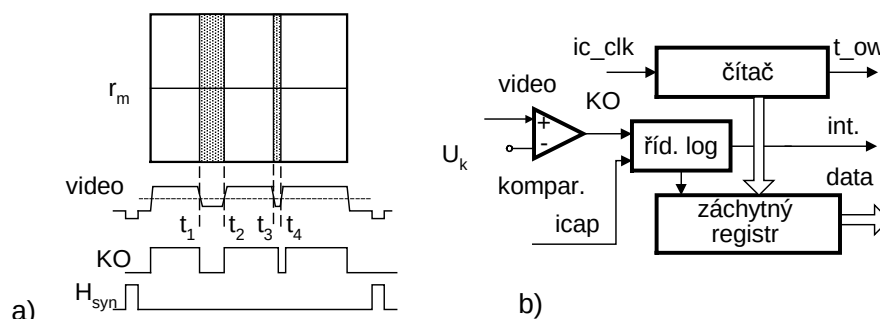
Obr. 3.3 Funkční vzorek triangulačního snímače rozměru a polohy

Další alternativou bylo použití 32-bitového řadiče s jádrem ARM7, LPC2114, který také zajišťoval řízení senzoru, digitalizaci videosignálu i jeho zpracování [11]. To je také využito ve vzorku snímače zachyceném na snímku v obr. 3.3.

3.3 Zpracování videosignálu plošných obrazových senzorů

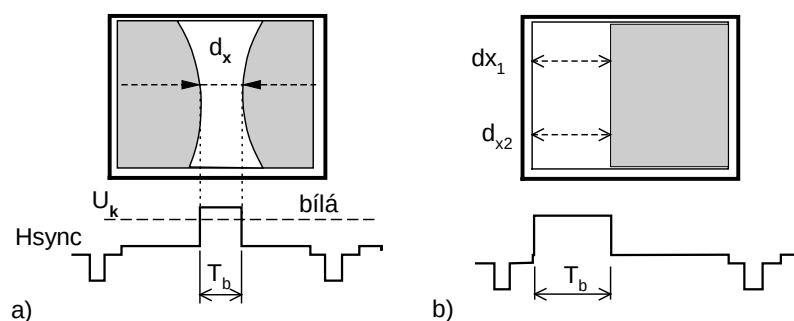
Při zpracování videosignálu z plošných obrazových senzorů se řešení z důvodu rychlosti a jednoduchosti omezilo pouze na hledání optických hran ve směru řádku. Tomu je také nutné podřídít uspořádání a nasazení bezdotykového snímače rozměru a polohy.

Při snímání v procházejícím světle se objekt výrazně odlišuje od okolí a stínový obraz na snímáči má vysoký kontrast jako např. v obr. 2.7 nebo obr. 2.9 a obvykle postačuje zpracování signálu prahováním.



Obr. 3.4 Princip hledání hran s využitím záchytných jednotek

Situaci v případě průběžného zpracování videosignálu dle standardu CCIR prahováním znázorňuje obr. 3.4. Komparátorem se vyhledají hrany, jejichž poloha v řádku t_1 , t_2 , t_3 , t_4 určená zpožděním doby jejich příchodu po začátku televizního řádku se určí pomocí bloku záchytné jednotky (blok „Input Capture“), kterým jsou mikropočítače často vybaveny. Mikropočítač pak do paměti ukládá v reálném čase pouze polohu jednotlivých hran. Princip byl ověřen a využíván v aplikaci s vestavěnými mikropočítači řady ATmega32 a mikropočítači s jádrem ARM7, řady LPC2148.



Obr. 3.5 Určení rozměru objektu a polohy v příčném směru

Na obr. 3.5 a) je znázorněn případ bezdotykového měření příčného rozměru štěrby, na obr. 3.5 b) je zachycen případ měření polohy okraje objektu ve více řádcích. Zde bylo pro vysvětlení jako příklad použito zpracování videosignálu z kamery dle standardu CCIR, což je poněkud zastaralé. Tyto systémy byly v laboratoři navrženy a realizovány. Stále se ukazuje, že miniaturní černobílá kamera CCD s výstupem signálu dle standardu CCIR je díky svým rozměrům a bezproblémovému přenosu signálu a napájení jediným kabelem dobrým řešením v situaci, kdy tato kamera má být součástí mechanického systému,

který se polohuje. Dostupnost černobílých kamery se signálem dle standardu CCIR se však postupem času snižuje.

Z hlediska metodiky měření to však není problém. Popsaný způsob měření byl implementován zcela stejně do kamery vlastní konstrukce s obrazovým senzorem CMOS firmy Micron o organizaci 1280 x 1024 fotoelementů. Pro ověření správnosti přístupu byl řešen modul pro zpracování signálu dle standardu CCIR a modul zpracování digitalizovaného videosignálu u obrazového senzoru CMOS. Ukázalo se, že existují v podstatě tři ekvivalentní formy vstupního bloku, které je možno použít a které byly prakticky ověřeny.

- a) Analogová kamera (CCIR), separátor synchr. impulsů a analog. komparátor
- b) Analogová kamera (CCIR nebo PAL), videokodek, číslicový komparátor
- c) Senzor CMOS, generátor hodinových impulsů a číslicový komparátor

Protože číslicový komparátor byl realizován ve formě CPLD, umožnilo to (mimo prosté komparace) vyhledávat hrany také podle přírůstku. To se osvědčuje pro vyloučení působení vinětace objektivu, což je zásadní omezení metody prosté komparace při snímání objektu v odraženém světle. Při snímání v procházejícím světle je stínový obraz dostatečně kontrastní a působení vinětace objektivu na výsledek měření je velmi malé.

Pro ověření možností zpracování obrazu v reálném čase byly navrženy a realizovány snímáče s obrazovým senzorem CMOS 1280x1024, hradlovým polem FPGA Xilinx a řídicím procesorem ve variantách s mikrořadičem LPC2148 s jádrem ARM7 a signálovým procesorem Analog Devices ADSP2185. Prokázalo se, že popsané metody přímého zpracování videosignálu v reálném čase je možno dobře realizovat využitím FPGA za pomoci programování ve VHDL. Lze realizovat nejen funkce určení polohy hran, měření rozměru a polohy objektů, ale též průběžným zpracováním nalézat objekty v zorném poli, určovat jejich plochu a polohu středů.

Současně se však prokázalo, že programování takových aplikací pro zpracování obrazu na nízké programové úrovni (využitím jazyka VHDL) je velice náročné a pro standardní situace je nezdůvodnitelné. Jako schůdné řešení se jeví navrhnout a do FPGA implementovat pouze tzv. *měřicí videoprocesor*, který by zajišťoval pouze několik vybraných funkcí, jako je nalezení hran v obrazu a určení jejich přesné polohy s interpolací (jako se řeší v [21]), dále měření plochy a středu objektů, případně několika málo dalších vybraných měřících funkcí. Zpracování těchto prvotních informací získaných v reálném čase by měl zajistit navazující mikroprocesor nebo signálový procesor. Tento přístup byl již také v minulosti v laboratoři využit při návrhu modulu rychlého zpracování videosignálu v reálném čase, který určuje polohu těžiště světelné stopy, jehož popis je v [22].

4. ZÁVĚR

Obvykle se obrazové senzory využívají ve formě, kterou by bylo možno označit jako vestavné aplikace, čímž se míní, že uživatel má k obrazovému senzoru přístup jen do té míry, jakou výrobce kamery nebo kompaktního snímače dovolil. Tím je uživatel omezen ve způsobu použití takových obrazových senzorů, ať již pouze z opticko-mechanického hlediska nebo i elektrického či programového hlediska.

V dobách, kdy se jako obrazové senzory vyskytovaly pouze plošné senzory CCD, byl výskyt specializovaných kamer vlastní konstrukce vzácnou výjimkou. Důvodem je relativně náročný a komplexní návrh, který se pro malé počty kusů nevyplatí. Komplikace byla dána tím, že plošný obrazový senzor požaduje složité vícefázové impulsní řízení, které se standardními prostředky realizuje jen velmi obtížně. Podle vlastních zkušeností motivací vývoje snímačů s obrazovými senzory CCD byly obvykle speciální požadavky, ať již z hlediska odolností a zástavby, což bylo obvykle spojeno se speciální technikou (což je historicky používané synonymum pro vojenskou techniku), nebo specializovanými laboratorními přístroji, kde nepostačovaly parametry standardních kamer a kde vývoj probíhal díky tomu, že jiné řešení nebylo možné. Ohledně plošných obrazových senzorů CCD to v podstatě platí dodnes.

Zcela jiná je současná situace v případě obrazových senzorů CMOS, které na čipu obsahují spolu s fotocitlivými elementy celou složitou řídicí elektroniku. Z hlediska uživatele se navenek jeví jako blok, který požaduje hodinový signál a poskytuje obrazovou informaci v takové digitální formě, kterou je možno zpracovat standardně dostupnými obvodovými prostředky. Díky tomu je možno konstruovat specializované bezdotykové snímače rozměrů a polohy objektů s vnitřním zpracováním signálu, které nebudou založeny na sestavě tvořené kamerou napojenou na PC, nebo na jiné uzavřené platformě, jako jsou např. tzv. smart kamery.

Je možno realizovat bezdotykové snímače s obrazovými senzory CMOS, které nebudou primárně poskytovat obraz, ale budou mít měřicí funkce vycházející ze specializovaného zpracování digitálního videosignálu. Lze využít např. přímou projekci stínového obrazu a triangulační metodu pro bezdotykové určení průměru vodiče, kdy se před zakrmpováním kontroluje, že je vodič ve správné délce odizolován. Nové obrazové senzory vyžadují nový přístup nejen k řešení elektronických obvodů, ale i ke způsobu zpracování informace. Díky poklesu cen těchto snímačů nemusí být na závalu, že se z celého senzoru využívá např. i jen několik málo řádkových obrazů.

LITERATURA

- [1] Nara, S., Miyamoto, D., Takahashi, S., Kaneko, S.: Visual Feedback Tracking of Crane Hook. in: *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 9 - 15, 2006, Beijing, China
- [2] Thuilot, B., Martinet, B., Cordesses L., Gallice J.: Position based visual servoing : keeping the object in the field of vision. In *Proceedings of the 2002 IEEE Intemational Conference on Robotics & Automation*, Washington, DC, May 2002
- [3] Lu, M.C., Wang, W.Y., Chu Ch. Y. .: Image-Based Distance and Area Measuring Systems, *IEEE Sensors Journal*, vol. 6, No. 2, April 2006
- [4] Fischer, J.: *Optoelektronické senzory a videometrie*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2002
- [5] Včelák, J.: *Optoelektronická měrka s CCD snímačem*. Dipl. práce, ČVUT-FEL, Praha, 2003
- [6] Včelák, J., Fischer, J.: Position Measurement Using CCD Based Opto-electronic Gate. In *Euroensors XVII*. Guimaraes: University of Minho, 2003, p. 602-603. ISBN 972-98603-1-9.
- [7] Xinwen G., Wei D., Tongyue G, Zhenbang G.: High Precision Contactless Object-diameter measurement using IR light source, *Proceedings of the IEEE Int. conference on Automation and Logistics*, Shenyang, China, August 2009
- [8] Vacek, R.: *Demonstrační lineární kamera a její aplikace* Dipl. práce, ČVUT-FEL Praha, 1999
- [9] Radil, T.: *Měření rozměru a polohy lineárním CCD snímačem bez projekčního objektivu*. Diplomová práce, ČVUT-FEL Praha, 2002
- [10] Ježdík, P.: *CCD řádková kamera se smíšeným zpracováním signálu*. Dipl. práce, ČVUT-FEL, 2005
- [11] Douša, I.: *Triangulační snímač se stínovou projekcí*. Dipl. práce, ČVUT-FEL, 2006
- [12] Radil, T., Fischer J.: Two-Dimensional Position Measurement of Objects with Circular Cross-Section Using Single Linear CCD Sensor. In *IMEKO - XVIII World Congress and IV Brazilian Congress of Metrology*. Rio de Janeiro: IMEKO, 2006,
- [13] Radil, T., Fischer, J., Kučera, J.: Dimension Measurement of Objects with Circular Cross Section Using Point Light Sources and an Image Sensor without Lens. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2007, vol. 56, no. 4, p. 1403-1411. ISSN 0018-9456.
- [14] Kučera, J.: *Systém pro automatické ověřování videometrických metod měření rozměru a polohy*. Diplomová práce, ČVUT-FEL Praha, 2005

- [15] Radil, T.: *Analysis and optimisation of the projection methods of dimension and position measurement*. Doctoral thesis, ČVUT-FEL Praha, 2005
- [16] Komrska, J.: *Difrakce světla*. VUT Brno, 2001, ISBN 80- 214-1976-8
- [17] Gasvik, K. J.: *Optical metrology*, 3-rd. edition, Wiley, Chichester, ISBN 0-470-84300-4
- [18] Fischer, J., Haasz, V., Radil, T.: Simple Device for Small Dimension Measurement Using CCD Sensor. In 12th IMEKO TC4, Zagreb, 2002, p. 433-437. ISBN 953-96093-6-4.
- [19] Philips, J., Lindner, B., Beaujean R.: *Object measuing device and associated methods*. United States Patent, US Patent 7,245,386, 2007
- [20] Hermosilla, T., Bermejo, E., Balaguer, A., Ruiz, L.A. Non-linear fourth-order image interpolation for subpixel edge detection and localization. *Image and Vision Computing* 26 (2008) s. 1240–1248, Elsevier 2008
- [21] Hussmann, S., Ho, T.H. A high-speed subpixel edge detector implementation inside a FPGA. *Real-Time Imaging* 9 s.361–368, Elsevier 2003
- [22] Fischer, J. a Odložil, P.“ FPGA Based System for the Measurement of a Laser Spot Position. In *EUROSENSORS XVI*. Proceedings. Praha: 2002, p. 372-374.

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS

Ing. Jan Fischer, CSc..

Vzdělání:

1977 - absolvoval ČVUT – FEL, elektrotechnický inženýr

1989 - obhajoba kandidátské disertační práce, titul kandidát věd – CSc.

Praxe:

1978 - doposud ČVUT – FEL, katedra měření – odborný asistent

1983 -1992 - vedlejší prac. úvazek v ZPA Košíře (později Křižík. s. p.), vývoj optoelektronických snímačů pro průmyslovou i speciální oblast

1992 - 1997 - vedlejší prac. úvazek, firma Optel - vývoj speciálních kamer

Pedagogika:

Zavedení řady nových předmětů (a jejich přednášení a cvičení) v oblasti optoelektronických senzorů, číslicové, mikroprocesorové a přístrojové techniky. („*Návrh řídicí části přístrojů a modulů*“, „*Bezdotykové měření*“, „*Praktika z mikroprocesorové techniky*“, „*Programování mikroprocesorů a mikrořadičů*“. „*Prvky avionických systémů*“, „*Mikroprocesory v přístrojové technice*“). V současnosti přednáší „*Optoelektronické senzory a bezdotykové měření*“, „*Mikroprocesory v přístrojové technice*“, „*Obrazové senzory*“, „*Návrh vestavných systémů*“.

Odborné aktivity:

Vedoucí laboratoře videometrie na katedře měření ČVUT – FEL, vedoucí cca 100 úspěšných realizačně orientovaných diplomových a bakalářských prací, pravidelná ocenění vedených studentských prací (ceny děkana za nejlepší dipl. práci, ceny konference Poster), min. 8 z jeho diplomantů získalo titul PhD, další chystají odevzdání prací. Výchova schopných elektroinženýrů, individuální přístup a závěrečné formování profilu diplomantů jako budoucích absolventů ČVUT-FEL.

Vědecká výchova:

Školitel - specialista celkem čtyř úspěšných (po obhajobě) PhD studentů, dva z nich přímo v laboratoři videometrie.

Výzkumné aktivity:

Výzkum v oblasti použití obrazových senzorů CCD a CMOS pro bezdotykového měření, použití mikroprocesorů a signálových procesorů.

Spolupráce v rámci grantů:

MSM 210000012 - Transdisciplinární výzkum v oblasti biomedicínského inženýrství (1999-2004, MSM),

MSM 210000015 - Výzkum nových metod pro měření fyzikálních veličin a jejich aplikace v přístrojové technice,

MSM6840770015 - Výzkum metod a systémů pro měření fyzikálních veličin a zpracování naměřených dat.