

# CCD ŘÁDKOVÁ KAMERA SE SMÍŠENÝM ZPRACOVÁNÍM SIGNÁLU

PETR JEŽDÍK

2005



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA MĚŘENÍ

## **Anotace**

Tato práce se zabývá návrhem a sestavením univerzální optoelektronické CCD řádkové kamery se smíšeným zpracováním signálu. Kromě zkonstruování měrky je také úkolem navržení řídicího programu pro kameru a ovládacího programu pro PC. Dalším úkolem je použít sestavenou měrku k měření rozměrů nebo polohy objektů optickými metodami

## **Annotation**

This thesis deals with development of universal optoelectronics linear CCD camera with mixed signal processing.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

*Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Janu Fischerovi, CSc. za vedení, odborné konzultace a korekci tohoto textu. Poděkování patří rovněž mé rodině za podporu během celého studia.*

1. Úvod	1
2. Teoretický rozbor	3
2.1 Koncepce měřicího systému	3
2.1.1 Obecné požadavky návrhu	4
2.2 Stínové metody bezdotykového měření s využitím řádkového CCD snímače	4
2.2.1 Měření s projekčním objektivem	5
2.2.2 Měření bez projekčního objektivu	5
2.3 Vliv výběru řádkového CCD snímače na použitelnost měřících metod	8
2.4 Inherentní metoda filtrace	10
3. Návrh kamery s procesorem ATmega	12
3.1 Úprava kamery ing. Včeláka	12
3.2 Rozdělení návrhu kamery	12
3.3 Obvody snímače	12
3.3.1 Popis a vybrané katalogové údaje jednotlivých snímačů	13
3.3.2 Volba AD převodníku	19
3.3.3 Obvod přizpůsobení výstupu snímače	20
3.4 Volba řídicí jednotky	22
3.4.1 Požadavky na periferie procesoru	22
3.5 Fyzický návrh kamery	25
3.5.1 Snímačová deska	26
3.5.2 Řídicí deska	27
3.6 Komunikační a napájecí deska	33
3.7 Deska univerzálních vstupů a výstupů	33
3.8 Poznámky k hotové kameře z hlediska fyzické vrstvy	34
4. Možnost zvýšení paměťové kapacity a rychlosti zpracování s procesorem ARM7	35
4.1 Vlastnosti řad procesorů LPC21xx a LPC22xx	35
5. Programové vybavení	37
5.1 Programové vybavení kamery	37
5.1.1 Řízení snímače a sběr dat	37
5.1.2 Předzpracování	43
5.1.3 Měřicí výpočty a řízení procesu	47
5.2 Programové vybavení PC	49
5.3 Stručný popis HW protokolu	50
6. Výsledky měření	52
6.1 Polohy hran	52
6.1.1 Měření s jedním bodovým zdrojem světla	52
6.1.2 Měření polohy pomocí dvou bodových zdrojů metodou triangulace	63
7. Závěr	71
8. Literatura	72
9. Seznam použitých zkratk a symbolů	73
10. Seznam obrázků	74
11. Seznam příloh	76

## 1 Úvod

Potřeba stanovení rozměru nebo polohy objektu se prakticky vyskytuje ve všech současných průmyslových odvětvích. Způsoby, jak získat požadovanou informaci o poloze nebo rozměru objektu lze v zásadě rozdělit na dvě skupiny. Kontaktní a bezkontaktní metody měření. Kontaktní metody s sebou nesou vlastnosti jako ovlivnění měřeného rozměru nebo nemožnost měření pohybujících se objektů. Proto se stále více používá bezkontaktních metod, ať už na optickém, ultrazvukovém nebo magnetickém principu.

V rychle se rozšiřujícím trendu automatizace výrobních procesů je častá potřeba kontroly kvality výroby. Vzhledem k požadované rychlosti a spolehlivosti lze vyloučit lidskou pracovní sílu a nasadit spolehlivý měřicí systém. Vzhledem k možné různorodosti nasazení takového měřicího systému a vzhledem k dříve člověkem používanému systému kontroly, je dobré se zaměřit na optický princip měření (je to nejlepší přiblížení lidskému oku a podle hesla "kouknu a vidím" přiblížení lidské mysli).

Úloha měření se zúží na pořízení obrazu měřeného objektu optickou cestou a jeho následné zpracování. Podle charakteru měřeného objektu lze úlohu rozdělit ještě dále. Lze pořídit celý plošný obraz objektu, nebo se soustředit jen na tu část, která je pro dané měření zajímavá. V mnoha případech lze použít právě jen část obrazu objektu, konkrétně vytvořit pomyslný řez obrazem a ten vyhodnocovat. Tento řez vede na použití řádkového CCD snímače a zpracování jeho signálu.

Měřený objekt je promítán optickou soustavou na řádkový CCD snímač nebo je osvětlen tak, aby na CCD snímač vrhal stín. Průběh intenzity ozáření na CCD snímači přímo odpovídá videosignálu, který je obrazem měřeného objektu. Z videosignálu jsou získány hledané informace o objektu.

Měření s CCD řádkovými snímači je omezeno rozlišovací schopností použitého snímače. Na mnoho aplikací stačí získaný videosignál prostě komparovat nastavenou úrovní a z průchodů videosignálu komparační úrovní usoudit hledané informace - **binární** metoda zpracování signálu. Tím lze docílit přesnosti velikosti jednoho bodu snímače (pixelu). Pro větší přesnosti je potřeba použít metody zpřesnění. Ty používají informace o celém průběhu rozhraní světlo - stín pro výpočet přesné - subpixelové informace o poloze objektu. Tato metoda se nazývá **víceúrovňová**. Pro zrychlení celé operace výpočtu zpřesnění se použije binární metoda pro rychlé nalezení rozhraní v jehož okolí se signál zpracuje víceúrovňově - **smíšené** zpracování signálu.

V mnoha aplikacích existuje omezení pracovního prostoru použitých měřicích systémů. To platí i pro měřicí systém s řádkovým CCD snímačem. Může nastat problém při použití snímače s objektivem vzhledem k výsledným rozměrům měřicí soustavy. V takových případech je vhodné použít řádkový CCD snímač bez projekčního objektivu. Nepřítomnost optické soustavy v měřicí soustavě klade jiné nároky na osvětlení scény a na zpracování videosignálu z CCD snímače, než jak by tomu bylo u měření s objektivem.

Otázkou je, co s informací o poloze nebo rozměru měřeného objektu. V systémech kontroly jakosti je postačující výstup VYHOVUJE nebo NEVYHOVUJE. Systém by tedy měl být schopen dávat takovou jednoduchou informaci o objektu. Protože se po měřicím systému většinou požaduje právě jen jednoduchý výstup, měl by také být schopen pracovat v režimu samostatné činnosti (bez nadřazeného systému) a stát se součástí řízení výrobního procesu.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí jednoduchého a levného měřicího systému s CCD řádkovým snímačem. Navržený systém je kromě své jednoduchosti a ceny také univerzální-schopen měřit s přítomností nebo nepřítomností objektivu, kompaktní a rozšiřitelný.

Kapitola 2 se zabývá teoretickými požadavky na měřicí systém. Jaké měřicí metody lze použít, koncepcí návrhu hardware a software. Dále je zde uveden vliv výběru řádkového CCD snímače na použitelnost měřících metod neboť v současnosti jsou na trhu dostupnější snímače s obdélníkovými pixely než se čtvercovými, které již v minulosti byly pro měření používány. Kapitola 3 se zabývá vlastním návrhem kamery s procesorem ATmega64 a popisuje řádkové snímače které byly testovány pro provoz s kamerou. Kapitola 4 ukazuje možný další směr vývoje jednoduchých měřících kamer s procesory ARM7. Kapitola 5 popisuje tvorbu programového vybavení kamery a nadřazeného PC. Kapitola 6 se zabývá praktickým měřením se sestavenou kamerou.

### 2 Teoretický rozbor

Tato kapitola se zabývá teoretickými požadavky na měřicí systém. Jaké měřicí metody lze použít, koncepcí návrhu hardware a software. Popis metod bezdotykového měření bude především zaměřen na uspořádání bez projekčního objektivu. Dále je zde uveden vliv výběru řádkového CCD snímače na použitelnost měřících metod. Je zde zmíněn i princip inherentní filtrace videosignálu (filtrace realizovaná přímo ve snímači).

#### 2.1 Koncepce měřícího systému

Na trhu je v současné době velké množství různých zařízení pro optická měření pozice nebo rozměrů objektů. Každé zařízení je ale většinou specializované pouze na jednu metodu měření. Výsledkem je, že pro každou metodu je nutno použít obvykle jiný přístroj s odlišnou konstrukcí i odlišným ovládáním.

Vhodné je tedy navrhnout měřicí systém, který bude schopen vyhovět více měřícím metodám (at' už v uspořádání s projekčním objektivem nebo bez). A to včetně programového vybavení. Zároveň je vhodné navrhnout a zkonstruovat měřicí systém, jehož koncepce bude co možná nejjednodušší a cena maximálně příznivá.

Nejčastějším úkolem optického měřícího systému je zjištění polohy nebo rozměru objektu. Pro hrubé určení polohy postačuje několik fotodetektorů, které vyhodnocují polohu stínu za objektem. Pokud je žádoucí vyšší přesnost určení polohy stínu, pak je vhodné použít pole fotoelementů integrovaných v řádkovém CCD snímači. Dalším zvýšením přesnosti měření může být číslicové zpracování digitalizovaného videosignálu z CCD snímače. Většina optických měřících metod (metod pro měření pozice a rozměru) vede na určení polohy optických hran.

Základem optického měřícího systému je fotodetektor. V tomto případě CCD řádkový snímač. Dalším prvkem systému je řídicí obvod. Pro řízení CCD snímačů lze použít v podstatě tyto typy obvodů: speciální obvod pro řízení CCD snímačů (např. LM9800 viz [6]), jednočipový mikroprocesor, signálový procesor, nebo programovatelnou součástku (např. FPGA).

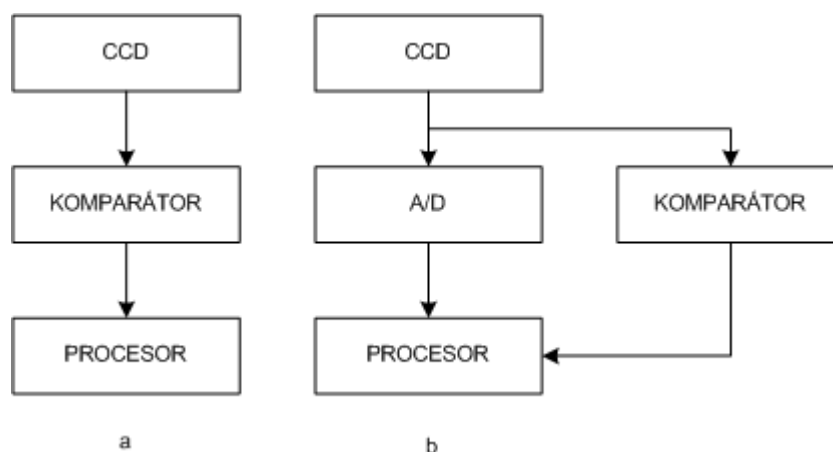
- Použití specializovaného obvodu pro řízení CCD snímačů, by také vyžadovalo přítomnost mikroprocesoru, protože tento obvod by nebyl schopen řídit samostatně celý systém.

- Signálový procesor je sice velmi rychlý na numerické výpočty, některé užitečné periferie mu ale chybí (většinou nemá integrovanou paměť programu FLASH a periferie jako analogový komparátor).

- Konstrukce měřky pouze pomocí jednočipového mikroprocesoru s komparátorem a CCD snímače by vyhovovala mnoha měřícím metodám (obr. 2.1 a). Videosignál by se zpracovával analogovým komparátorem. Problém by ale nastal tehdy, pokud by byla potřeba nastavit parametry měření (např. integrační dobu nebo komparační úroveň). Zpracování videosignálu analogovým komparátorem nedává přehled o jeho celkovém průběhu. Proto je vhodné videosignál digitalizovat A/D převodníkem. Hodnoty videosignálu pak dávají celkový přehled o průběhu osvětlení snímače. Použití komparátoru i A/D převodníku je na místě pro využití smíšeného zpracování signálu - binárního (komparátorem) i víceúrovňového (A/D převodníkem) (obr. 2.1 b).

Pokud systém obsahuje A/D převodník musí se digitalizované vzorky videosignálu ukládat. Pro uložení hodnot celého videosignálu je ideální využít paměť řídicího obvodu.





Obr. 2.1 Možné koncepce měřicího systému

### 2.1.1 Obecné požadavky návrhu

Výčet požadavků, které by měl výsledný návrh měřicího systému s CCD řádkovým snímačem splňovat.

- minimalizovaná obvodovou náročnost
- řídicí a výpočetní potenciál pro získání a zpracování videosignálu
- levný návrh
- univerzálnost, schopnost držet krok s výrobcí CCD snímačů
- dostatečná rychlost zpracování snímaného obrazu
- kvalita zpracování, opakovatelnost měření
- schopnost komunikace s nadřazeným systémem po některé ze zavedených komunikačních sběrnic
- robustnost zařízení a možnost jeho nasazení do průmyslových aplikací.

Pro funkci takového měřicího systému je nutno navrhnout programové vybavení. Část programového vybavení definující chování procesoru, který obsluhuje snímač a A/D převodník, provádí měřicí výpočty a komunikuje s okolím. A dále část, která umožní nastavování parametrů měřicí soustavy a získává data od soustavy.

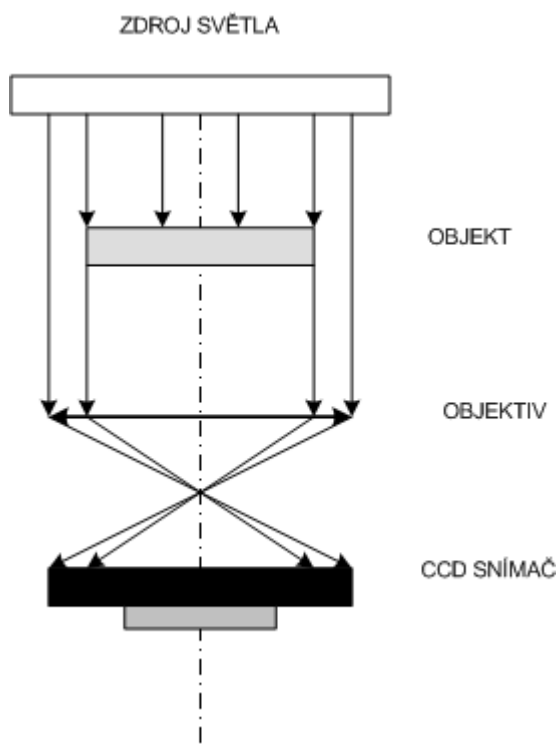
### 2.2 Stínové metody bezdotykového měření s využitím řádkového CCD snímače

Optické metody měření rozměrů a polohy objektů využívají transparentnosti nebo naopak pohltivosti materiálu měřeného objektu. Záření může být jak z viditelné části spektra, tak pro člověka neviditelné části spektra (např. RTG záření). Pokud se měří pomocí stínové metody, využívá se pohltivosti záření materiálem objektu. V jiných případech se naopak zjišťuje nehomogenita v materiálu a využívá se transparence nehomogenit (např. RTG defektoskopie).

Při měření stínovou metodou je materiál měřeného předmětu nepropustný pro použitý druh záření. Měřený předmět, jehož rozměry nebo poloha se zjišťuje, je umístěn mezi světelný zdroj a snímač optického záření. Za předmětem vzniká stín z jehož šířky a polohy vzhledem k snímači lze zjistit pozici a rozměr měřeného předmětu.

## 2.2.1 Měření s projekčním objektivem

Typické uspořádání měřicí soustavy s projekčním objektivem při měření stínovou metodou je na obr. 2.2. Obraz stínu měřeného objektu je optickou soustavou objektivu přenesen na fotocitlivou část CCD snímače.

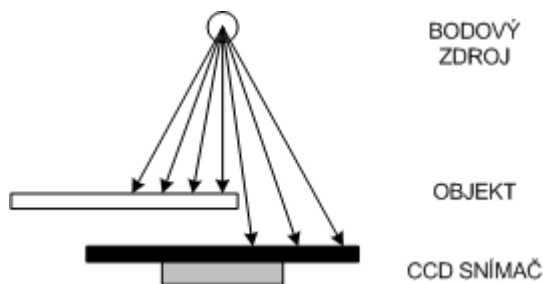


Obr. 2.2 Měření s projekčním objektivem stínovou metodou

Tvar rozhraní světla a stínu (nebo též přechodu světlo-stín) na snímači a jeho poloha vzhledem k poloze měřeného objektu je závislá na charakteru a parametrech zdroje světla, na tvaru objektu a vzájemné poloze objektu a zdroje světla.

## 2.2.2 Měření bez projekčního objektivu

Typické uspořádání měřicí soustavy bez objektivu je na obr. 2.3. Měřený objekt je osvětlen ze zdroje světla a vrhá stín na CCD snímač (odtud i název metody “stínová”). Pro funkci stínové metody je nutná podmínka zastínění pouze části fotocitlivé vrstvy CCD snímače. Část fotocitlivé vrstvy CCD snímače je tak zastíněna a část osvětlena. Poloha měřeného objektu je tak dána polohou rozhraní světla a stínu na fotocitlivé vrstvě snímače.

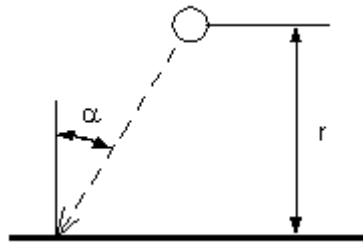


Obr. 2.3 Měření bez projekčního objektivu stínovou metodou

Tvar rozhraní světla a stínu (nebo též přechodu světlo-stín) na snímači a jeho poloha vzhledem k poloze měřeného objektu je závislá na charakteru a parametrech zdroje světla, na tvaru objektu a vzájemné poloze objektu a zdroje světla. Popis metod měření bez objektivu se dále bude zabývat pouze měřením s bodovým resp. bodovými zdroji světla. Odvození vztahů použitých pro výpočet je uvedeno v [1] a budou uvedeny v kapitole výsledků měření.

### Měření s jedním bodovým zdrojem

Stručně o definici bodového zdroje: záření bodového zdroje se šíří rovnoměrně všemy směry v podobě kulové vlny. Na obr. 2.4 je ilustrováno umístění bodového zdroje nad rovinou.



Obr. 2.4 Bodový světelný zdroj nad rovinou

Osvětlení bodového zdroje se vypočítá následovně:

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS} = \frac{I_v}{r^2} \cos^3 \alpha [\text{lx}] \quad (2.1)$$

kde  $I_v$  je svítivost zdroje [cd]

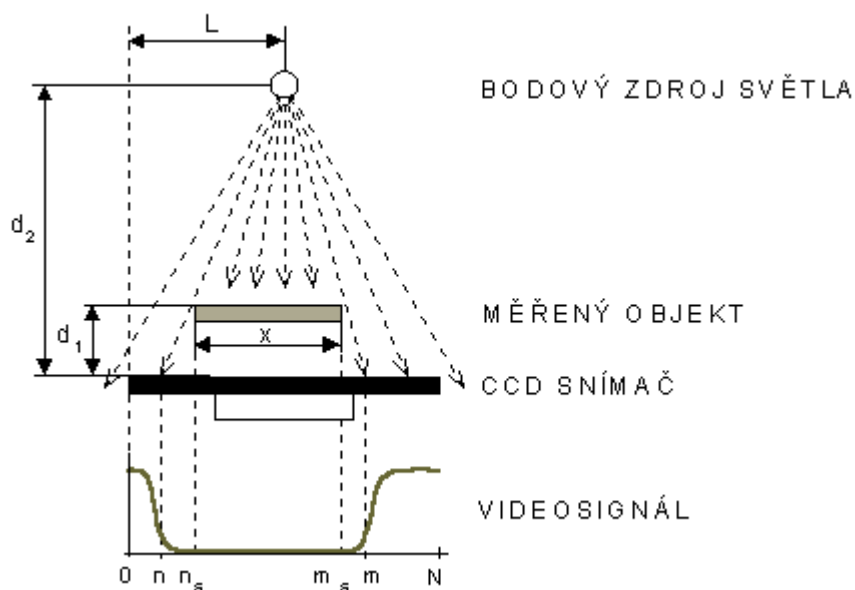
$\Phi$  je světelný tok zdroje [lm]

Pro měření rozměru nebo polohy objektu řádkovým snímačem není nutné, aby se světelný zdroj choval jako bodový ve všech směrech. Postačí, pokud se jako bodový bude chovat směrem ke snímači.

Je-li měřený objekt nasvětlen bodovým zdrojem umístěným vzhledem ke snímači nad objektem, lze zjistit polohy přechodů světlo-stín  $n$  a  $m$ . Jelikož se světelné paprsky zdroje rozbíhají bude vždy platit:

$$|m - n| > |m_s - n_s| \quad (2.2)$$

kde  $m_s$  a  $n_s$  jsou polohy přechodů světlo-stín při osvětlení objektu rovnoběžnými paprsky viz obr. 2.5. Hodnoty  $m_s$  a  $n_s$  odpovídají hledaným polohám obrysů objektu. Pro správné určení  $m_s$  a  $n_s$  je nutno změřené  $m$  a  $n$  korigovat.



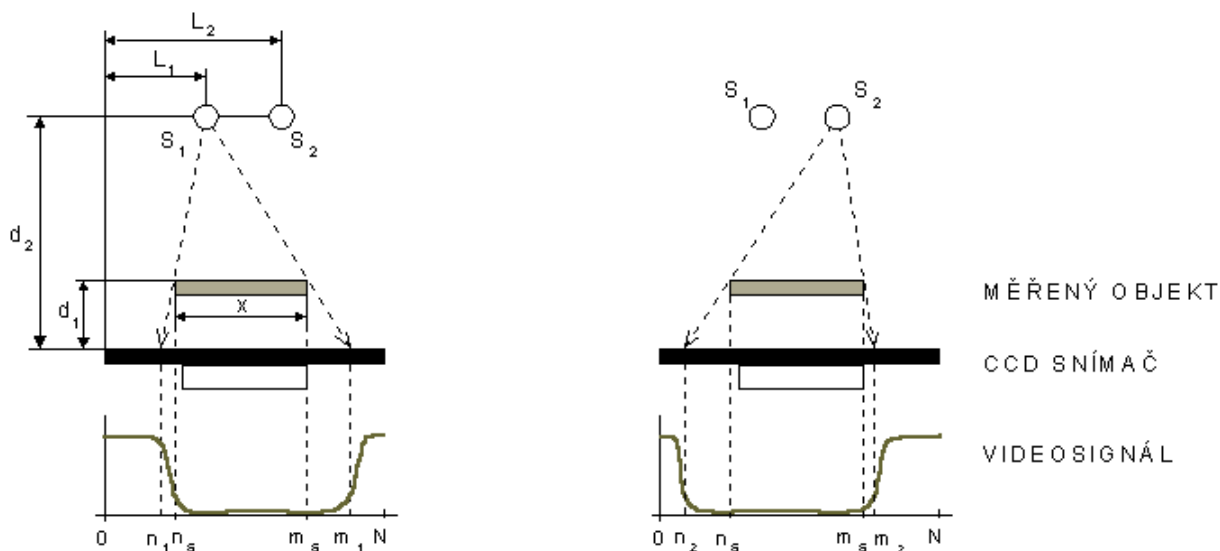
Obr. 2.5 Měření rozměru objektu s obdélníkovým průřezem pomocí bodového zdroje světla

Na měřený rozměr objektu nemá vliv poloha světelného zdroje vzhledem k snímači ( $L$ ). Je však nutno si uvědomit, že měřený údaj může být ovlivněn tloušťkou objektu.

Nevýhodou měření s jedním bodovým zdrojem světla je nutnost znalosti vzdálenosti měřeného objektu od snímače ( $d_1$ ). Tato nutnost lze odstranit triangulační metodou měření s více bodovými zdroji.

**Triangulační metoda měření**

Uspořádání soustavy ilustruje obr. 2.6



Obr. 2.6 Triangulační metoda měření objektu s obdélníkovým průřezem

Měření probíhá následovně: objekt je osvětlen nejprve jedním zdrojem světla a jsou uloženy nalezené přechody  $m1$  a  $n1$ . Poté je zdroj světla vypnut a rozsvícen druhý. Z druhého osvětlení jsou nalezeny jiné přechody  $m2$  a  $n2$ . Výpočtem lze získat přesnou polohu  $m_s$  a  $n_s$ .

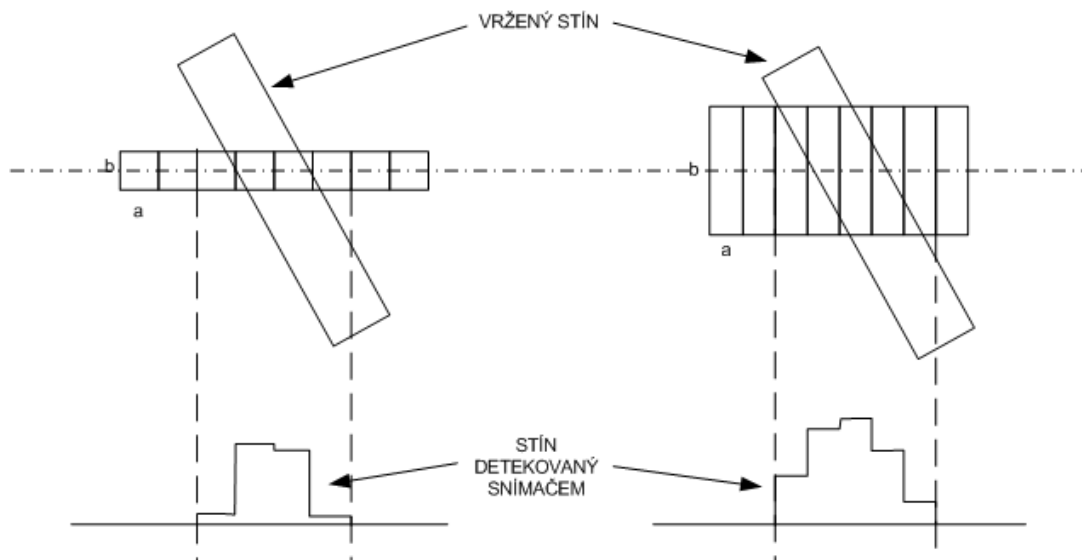
Podstatnou výhodou měření pomocí triangulace je, že není potřeba znát vzdálenost objektu od snímače  $d_1$ .

Vypsání metody měření mohou být zatíženy chybou nepřesného stanovení jednotlivých parametrů měřicí soustavy, ohybovými jevy světla na překážce, nedokonalostí světelného zdroje, nebo i lomem světla na krycím skle CCD snímače. Tyto vlivy lze s jistou úspěšností korigovat a poskytovat výsledky s menší nejistotou. Některé chyby, jakož i jejich korekce budou z důvodu kompaktnosti řešeného problému popsány v kapitole o praktickém měření.

### 2.3 Vliv výběru řádkového CCD snímače na použitelnost měřících metod

CCD snímače, které jsou v současné době na trhu se v zásadě liší parametry jako je rychlost, počet fotocitlivých elementů (pixelů) a jejich velikost a uspořádání. Na volbu snímače pro měřicí účely má zásadní vliv informace o velikosti a uspořádání pixelů. Velikost má přímo vliv na citlivost snímače na dopadající světelné záření, jejich uspořádání ovlivní použitou měřicí metodu, resp. přesnost metody.

Pro představu ovlivnění měřicí metody lze srovnat snímače s různou velikostí pixelu. Například snímače řady SONY ILX551 a ILX554. Podélná velikost pixelů obou snímačů je stejná (14 $\mu$ m), liší se příčná velikost (ILX551-14 $\mu$ m, ILX554-56 $\mu$ m). Citlivost na dopadající záření je přímo úměrná velikosti plochy pixelu (ILX554 je tedy 4x citlivější na světlo než ILX551). Přesnost měření se snímačem s většími pixely je však více závislá na kolmosti dopadu stínu na pixely. Lze tedy usoudit, že tyto dva druhy snímačů jsou vhodné pro jiné typy úloh.

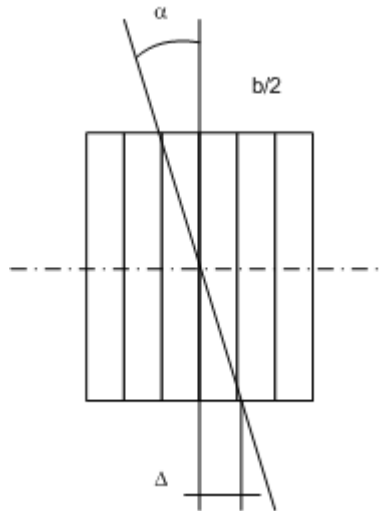


Obr. 2.7 Rozdíl detekovaného stínu snímači s různou příčnou šířkou pixelů ( $a, b$ -rozměry pixelů)

Na obr. 2.7 je ilustrace rozdílu šířky pixelů při dopadu stejného stínu na snímač. Snímač s menšími pixely při stejném odklonění stínu od kolmosti vnese do určování polohy přechodu stín-

světlo menší chybu než snímač se širšími pixely. Při měření se snímačem s širokými pixely je tedy nutno dodržet kolmost sledovaného předmětu na snímač.

Přírůstek šířky stínu detekovaného snímačem lze vyjádřit jako tangens úhlu odklonu (obr. 2.8)



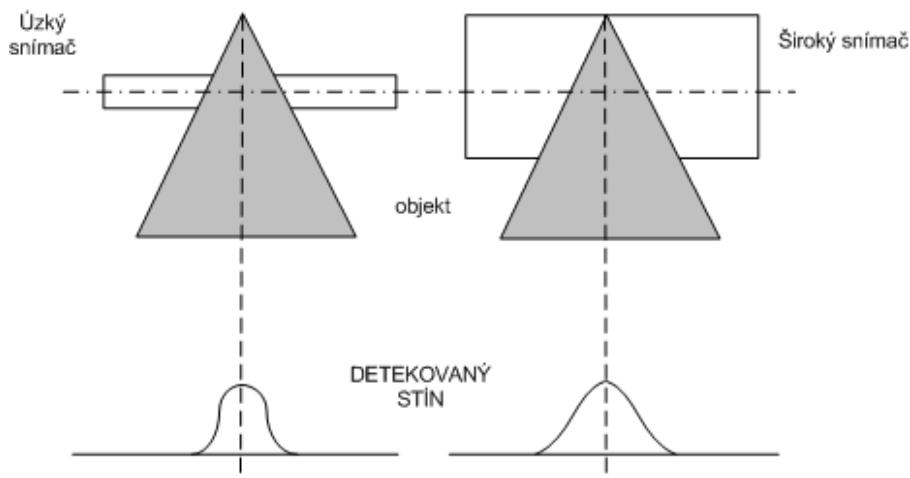
Obr. 2.8 Úhel příčného odklonění měřeného objektu

Pro hledání jedné hrany platí pro přírůstek šířky stínu:

$$\Delta = \frac{btg\alpha}{2} \quad (2.3)$$

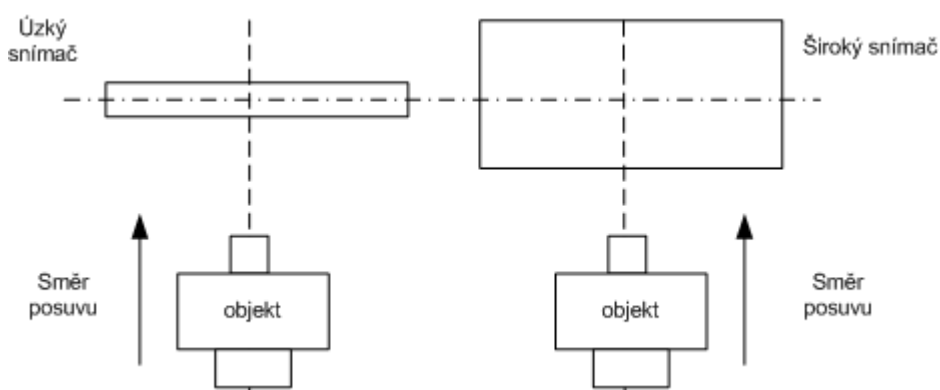
Při měření šířky objektu je přírůstek dvojnásobný.

Při použití snímače s širokými pixely lze sledovat i detekovatelnost změny rozměru měřeného objektu při posuvu objektu příčně na snímač. Široké pixely narozdíl od úzkých je třeba zakrývat větší plochou měřeného objektu. Charakteristika detekovaného přechodu světlo stín je pozvolnější než u snímače s malými pixely obr. 2.9.



Obr. 2.9 Rozdíl detekovaného stínu vzhledem k prostorové rychlosti změny rozměru měřeného objektu

Situace rozmazání hran nastane i při tzv. scanování objektu obr. 2.10. Zatímco snímač s malými pixely je schopen reagovat na členitost sledovaného u snímače s širokými pixely tomu tak není.



Obr. 2.10 Scanování objektu

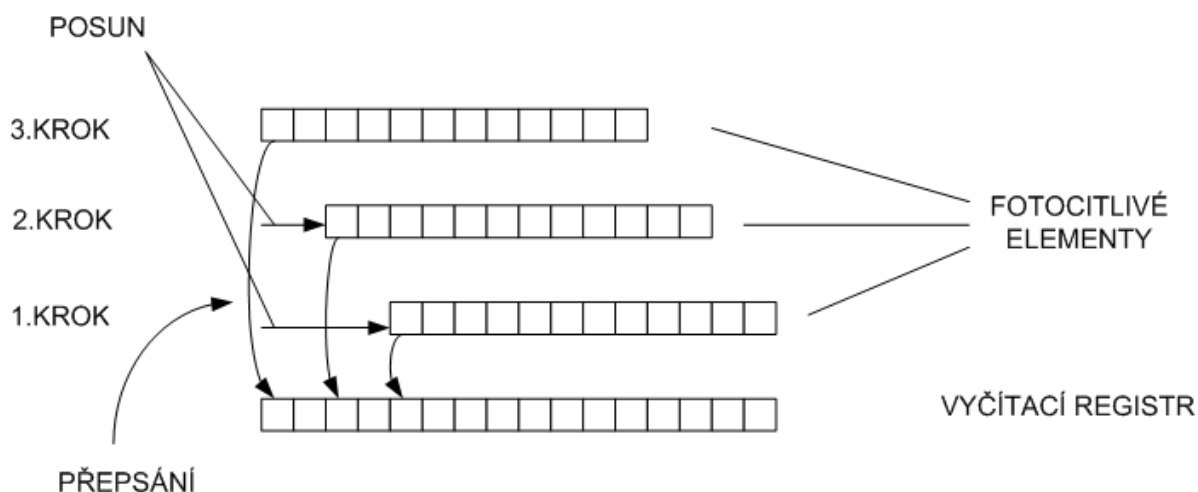
Volba CCD snímače z hlediska velikosti a uspořádání pixelů je tedy závislá na konkrétní aplikaci. Široké pixely se hodí do aplikací s nižší intenzitou osvětlení a na sledování objektů s malou členitostí povrchu. Výrobci uvádějí jako cílovou aplikaci scannery pro snímače s čtvercovými pixely a jako čtecí zařízení pro snímače s obdélníkovými pixely

### 2.4 Inherentní metoda filtrace

Inherentní metody filtrace nepatří ke klasickému zpracování videesignálu z řádkových CCD snímačů. Zpracování videesignálu probíhá již ve snímači. Využívá se k nim vlastností konstrukce a vnitřního uspořádání snímače. Jejich realizace probíhá pouze pomocí řídicích vstupů snímače. K vlastnostem těchto metod patří rychlost neboť filtrace probíhá ve stejném čase jako vyčítání videesignálu ze snímače.

Podrobný popis metod a aplikací inherentní filtrace je v [3].

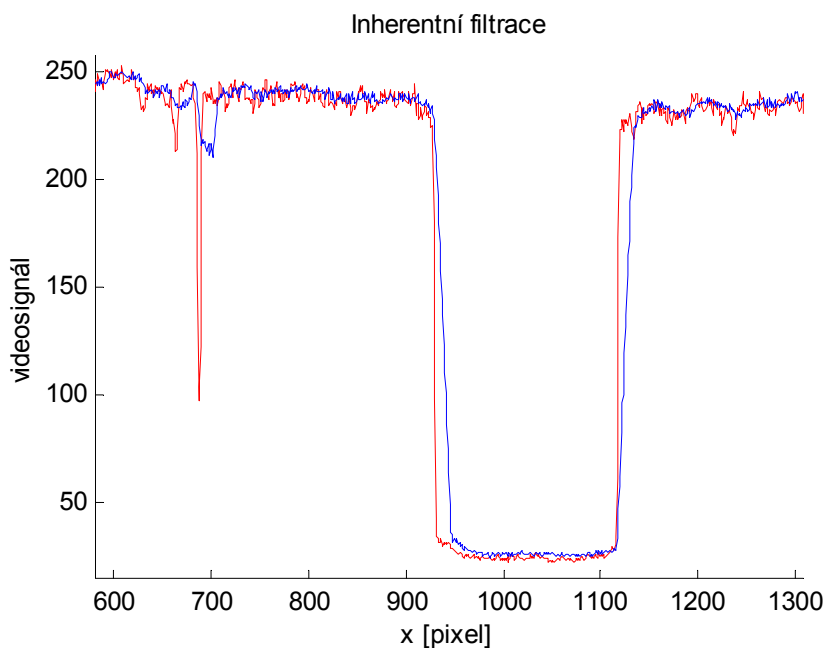
Princip metod filtrací spočívá ve vícenásobném přepsání osvětlených fotoelementů snímače do vyčítacích registrů a vzájemný posun přepsaných pixelů vysouváním videesignálu mezi přepsáním. Jednotlivým přepsáním, posunem a dobou mezi přepsáním jsou tvořeny zpožďovací a násobící bloky v diskrétním modelu snímače. Zpožďovací a násobící bloky v diskrétním modelu jsou ve vzájemném uspořádání tak, že tvoří filtr s konečnou impulzní odezvou. Tímto principem je tvořen filtr FIR typu dolní propust.



Obr. 2.11 Příklad inherentní filtrace

V příkladu inherentní filtrace je posun nastaven na 2 pixely, přepsání proběhne 3x. v prvním kroce se přepíše obsah fotocitlivých elementů do prázdného vyčítacího registru. Z vyčítacího registru se vyčtou dva body, tím dojde k posunu o dva pixely. K obsahu vyčítacího registru se přičte obsah fotocitlivých elementů a situace se opakuje.

Dolní propust tvořená metodou inherentní filtrace lze ve statické sledované scéně využít na odfiltrování úzkých rušivých impulzů za cenu snížení strmosti hran užitečného signálu.



Obr. 2.12 Inherentní filtrace, červená původní signál, modrá vyfiltrovaný signál

Metody lze použít i pro získání ostřejšího videosignálu při sledování pohybujícího se motivu

Motto: Jak se do lesa volá, tak se z lesa ozývá



### 3 Návrh kamery s procesorem ATmega

Tato kapitola se bude zabývat popisem návrhu kamery s řídicím procesorem ATmega. Návrh nové kamery navazuje na předchozí verzi měřicího systému s kamerou s řádkovým CCD snímačem pana ing. Včeláka popsaného v [2].

#### 3.1 Úprava kamery ing. Včeláka

Původní kamery ing. Včeláka byla založena na řídicím procesoru fy. ATmel AT90S8515. Ten však obsahoval pouze 512B datové paměti, což vedlo k jistým omezením funkcí kamery. Nebyla schopna uložit celý vyčtený řádek a pro výpočetní operace byly načítány pouze části potřebné k výpočtu. Omezující byla i maximální rychlost procesoru 8MHz. Ta dovolovala v použité hardwarové a softwarové koncepci vyčítání pixelů řádku do rychlostí 800kHz. Většina typů snímačů mohou pracovat s vyšší rychlostí. Procesor AT90S8515 byl nahrazen ATmega8515.

Procesor ATmega8515 je pinově kompatibilní se svým předchůdcem AT90S8515. Dokáže pracovat v plně kompatibilním režimu nebo rozšířit původní periferie AT90S8515. ATmega8515 se liší pouze v sériovém kanálu, který na rozdíl od AT90S8515 (1xUART) může pracovat v synchronním přenosu dat (UART/USART). Všechny ostatní periferie jsou shodné, souhlasí i jejich umístění v paměti procesoru, kód programu je tedy zcela přenositelný. Maximální frekvence řídicích hodin ATmega8515 je 16MHz. Jako nové funkce je využita pouze změna rychlosti řídicích hodin a tím i zdvojnásobení rychlosti vyčítání pixelů z řádku. Výměna procesoru byla provedena prostou záměnou v patici na desce plošných spojů (oba typy procesorů jsou v pouzdře PLCC).

Změnou rychlosti řídicích hodin se změnila parametry řídicích signálů snímače. Zkrátily se doby trvání aktivních úrovní signálů pro přesun náboje v CCD snímači a doby upínání videosignálu. V programovém vybavení byly provedeny změny dob trvání signálů podle katalogových údajů snímače.

#### 3.2 Rozdělení návrhu kamery

Návrh kamery lze rozdělit do tří kroků.

- návrh bloku obvodů snímače - má za úkol zajištění možnosti připojení různých typů snímačů do systému kamery
- návrh bloku řídicí jednotky - základní blok který řídí a obsluhuje chování celé kamery
- návrh bloku komunikačního rozhraní



Řídicí jednotka ovládá snímací část kamery, obstarává převod analogového signálu na digitální, signál zpracovává a podle uživatelského nastavení komunikuje s okolím.

#### 3.3 Obvody snímače

Různé snímače mají různé požadavky nejen na řízení, ale i na napájení a přizpůsobení řídicích vstupů. Zpravidla snímače od různých výrobců mají různé doporučení zapojení výstupního emitorové sledovače. Tento blok tedy v sobě obsahuje všechny potřebné podpůrné

obvody pro správnou funkci snímače. Výstupem tohoto bloku je videosignál který je následně zpracován řídicí jednotkou.

V době návrhových prací byly k dispozici CCD snímače firmy Toshiba: TCD 1304 a TCD 1205 a snímače firmy SONY: ILX 503, ILX 703, ILX 551A, ILX 551B, ILX 553B a ILX 554. Z tohoto výčtu byly prakticky testovány ILX 554, TCD 1304 a TCD 1205<sup>1</sup>. V této kapitole jsou udány vybrané katalogové údaje testovaných snímačů a jejich časové průběhy řídicích signálů.

### 3.3.1 Popis a vybrané katalogové údaje jednotlivých snímačů

Z katalogových údajů snímačů jsou vybrány údaje, které mají přímo vliv na navazující obvody.

#### TCD 1304

Řádkový CCD senzor s velmi citlivými a relativně velkými snímacími pixely.

- obsahuje elektronickou uzávěrku
- vnitřní sample&hold obvod, snímač lze připojit přímo ke klasickému A/D převodníku.

Funkce sample&hold obvodu není v tomto snímači vypínatelná.

- Snímač má pouze jedno napájecí napětí od 3V do 5,5V a byl testován pro typické hodnoty.

Tím i pro napájení 4V, bylo tedy nutné dvojí napájení a napět'ové přizpůsobení řídicích vstupů.

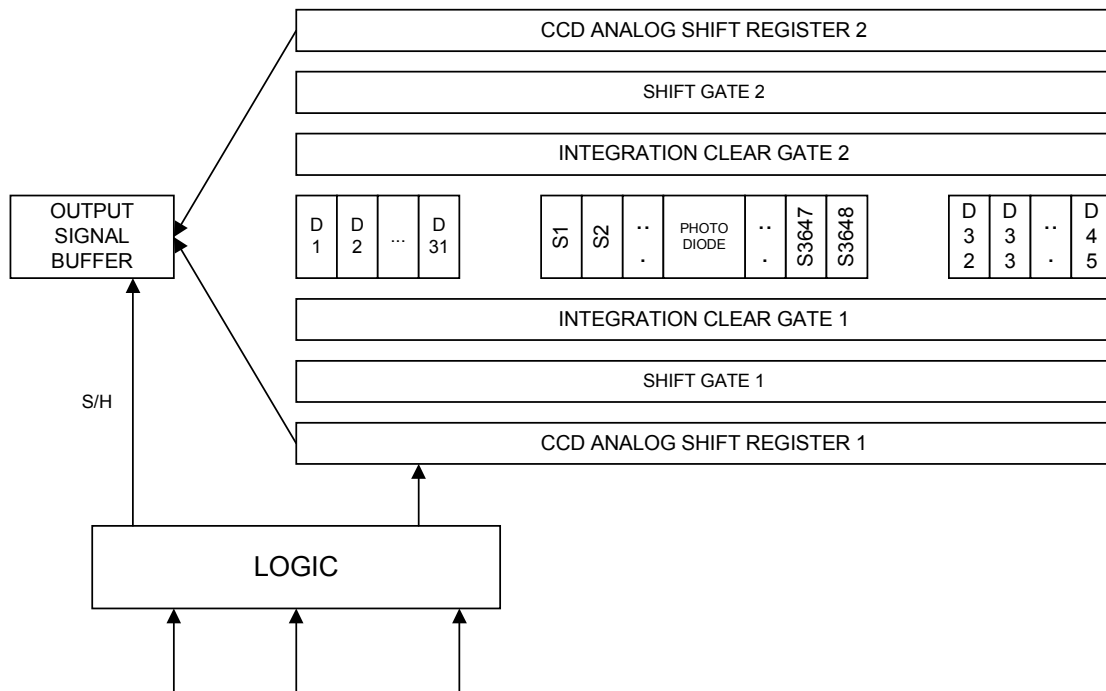
- Počet aktivních pixelů: 3648
- Velikost pixelu: 8x200 um
- Jedno napájecí napětí: od 3V do 5V, typicky 4V
- Rychlost vyčítání: 0.2 až 1Mhz typicky 0.5 Mhz při napájení větší nebo rovno

4V, při nižším napájení se rychlost zmenšuje

- Minimální integrační doba: 4us

---

1. Cílovou aplikaci těchto CCD snímačů výrobce udává jako ruční čtecí zařízení čárových kódů pro systémy pokladen



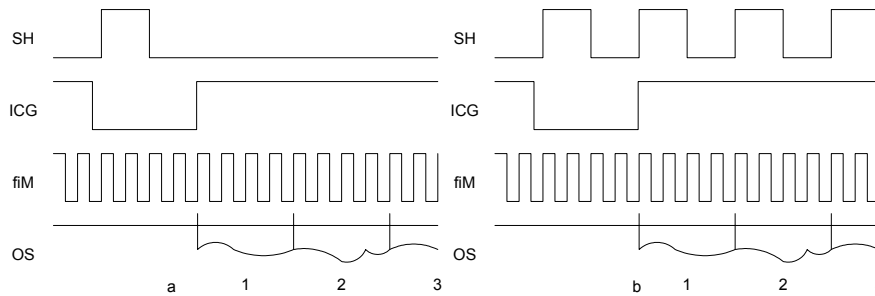
Obr. 3.1 Vnitřní uspořádání snímače

K řízení snímače je zapotřebí tří signálů:

SH -Shift gate

ICG -Integration clear gate

fiM -Master clock



Obr. 3.2 Potřebné průběhy pro řízení snímačů a) bez el.uzávěrky b) s el.uzávěrkou

Z průběhů potřebných pro řízení snímače a z vnitřního uspořádání lze předpokládat, že posun náboje v registrech je řízen dvoufázově. Vzhledem k tomu, že výstupní nábojový detektor je společný pro oba posuvné registry je nutné, aby byl řízen dvojnásobnou frekvencí než posuvné registry.

Doba integrace je úměrná vzdálenosti dvou sestupných hran signálu SH, tj. době poslední periody signálu SH před sestupnou hranou ICG.

Katalogové údaje, které mohou ovlivnit návrh kamery jsou:

- Velikost stejnosměrné složky  $V_{OS}$  - Min. 1,5V Typ. 2,5 Max 3,5V

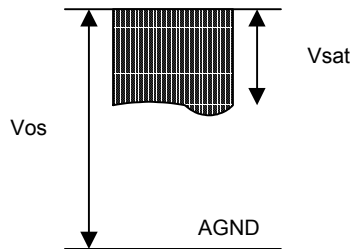
## Návrh kamery s procesorem ATmega

---

Toto poměrně velké rozpětí lze vysvětlit rozsahem povolených napájecích napětí Min. 3,0V Typ. 4,0V Max 5,5V. Snímač byl testován pro typické katalogové údaje kde, velikost  $V_{OS}$  odpovídala 2,2V

- Velikost saturačního výstupního napětí  $V_{SAT}$  dle výrobce - Min. 450mV Typ. 600mV Max neudává

Kde stejnosměrná složka je definována jako výstupní napětí opticky zakrytých pixelů vzhledem k analogové zemi a saturační výstupní napětí je definováno jako napětí aktivního pixelu vzhledem k opticky zakrytému pixelu.



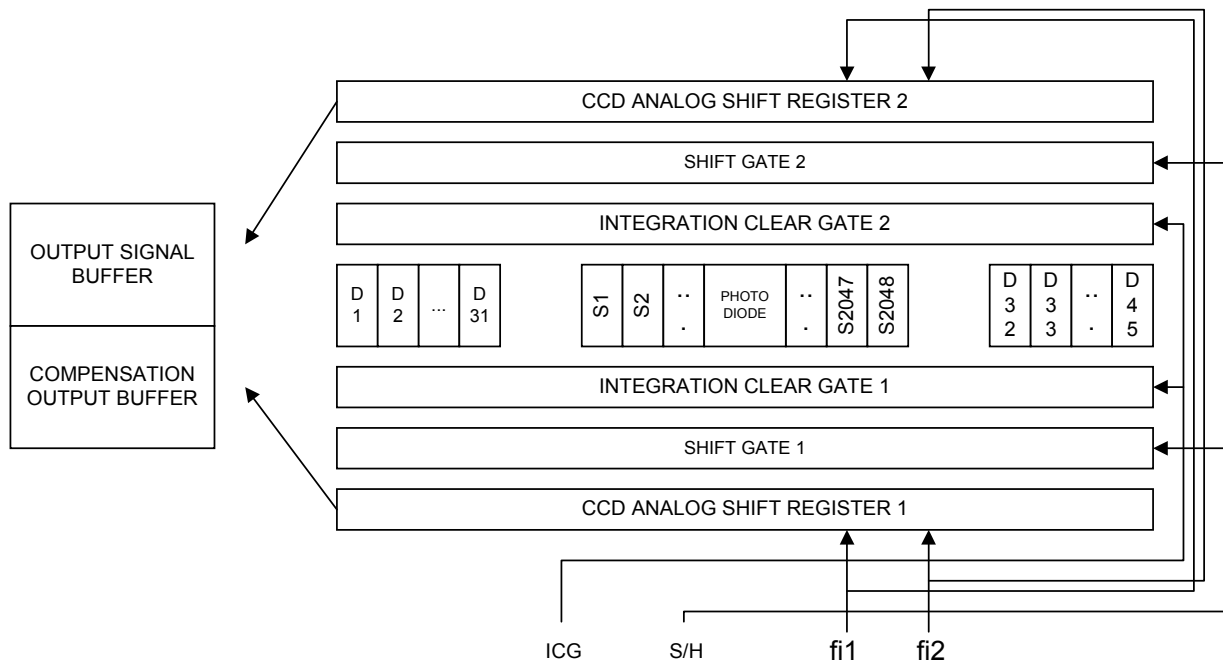
Obr. 3.3 Definice stejnosměrné složky výstupního napětí  $V_{os}$  a saturačního výstupního napětí  $V_{sat}$

### TCD 1205

Řádkový CCD senzor s relativně velkými pixely (větší než TCD1304).

- Snímač obsahuje elektronickou uzávěrku.
- Nemá vnitřní samplovací obvod, má tedy na výstupu všechny tři fáze videosignálu
- složitější řízení než u snímače TCD1304. Je zapotřebí většího počtu řídicích signálů.
- napájení jedním napětím 5V, není potřeba druhého zdroje a napět'ového přizpůsobení vstupů.

- Počet aktivních pixelů: 2048
- Velikost pixelu: 14x200 um
- Jedno napájecí napětí: od 4,5V do 5,5V, typicky 5V
- Rychlost vyčítání: 0.01MHz až 1MHz typicky 0.5 MHz
- Minimální integrační doba: 4us



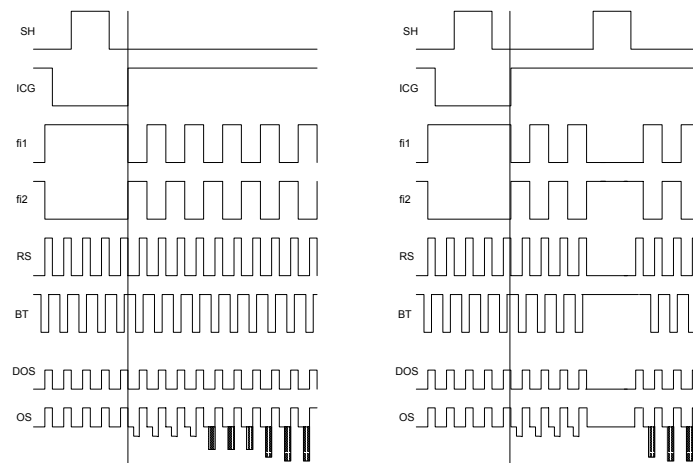
Obr. 3.4 Vnitřní uspořádání TCD1205

K řízení snímače je zapotřebí šesti signálů:

- SH -Shift gate
- ICG -Integration clear gate
- Fi1 -Master clock1
- Fi2 -Master clock2
- RS -Reset
- BT -Boost

OS - výstup videosignálu

DOS- výstup kompenzačního signálu



Obr. 3.5 Potřebné průběhy pro řízení snímačů a)bez el.uzávěrky b)s el.uzávěrkou

## Návrh kamery s procesorem ATmega

Na obr. 3.5 b) je situace použití elektronické uzávěrky. Kladný impuls signálu SH který vlastně určuje dobu integrace a nastává během vyčítání aktivních pixelů v řádku má definované stavy ostatních řídicích signálů viz obr. 3.5 b), které je nutno dodržet. Doba integrace je zde daná vzdáleností sestupné hrany tohoto impulsu signálu SH a impulsu SH v době nulové úrovně ICG.

Z obrázku jsou patrné i vzájemné přesahy řídicích signálů které je nutno dodržet, jakož i vygenerovat hodiny fi1 a fi2 co nejlépe v protifázi aby nedocházelo k "rozlévání" náboje ve vyčítacích posuvných registrech

Snímač TCD 1205 byl připojen AFE A/D převodníku AD9822. V A/D převodníku užita funkce vnitřního upínače, ta vlastně nahrazuje sample & hold obvod, který byl u TCD 1304. Signál z jednoho pixelu je ovzorkován dvakrát. Jednou v referenční fázi průběhu a jednou v signálové části. Tyto dva vzorky A/D převodník odečte a tím potlačí tzv. resetovací šum (princip dvojího korelovaného vzorkování)

Katalogové údaje, které mohou velice ovlivnit návrh kamery jsou:

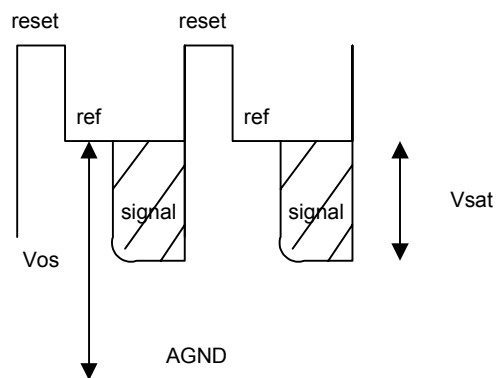
- Stejnosečná složka výstupního signálu  $V_{OS}$  - Min. 1,5V Typ. 3 Max 4,5V

Toto poměrně veliké rozpětí lze opět vysvětlit rozsahem povolených napájecích napětí Min. 4,5V Typ. 5,0 Max 5,5V. Při testování snímače pro typické katalogové údaje velikost  $V_{OS}$  odpovídala 2,7V

- Velikost saturačního výstupního napětí  $V_{SAT}$  - Min. 550mV Typ. 800mV Max výrobce neudává

Změřené  $V_{SAT}$  při plném osvětlení snímače bylo 610mV

Stejnosečná složka je zde definována jako výstupní napětí referenční fáze opticky zakrytých pixelů vzhledem k analogové zemi a saturační výstupní napětí je definováno jako napětí aktivního pixelu vzhledem k opticky zakrytému.



Obr. 3.6 Definice stejnosměrné složky výstupního napětí  $V_{OS}$  a saturačního výstupního napětí  $V_{SAT}$

### ILX 554

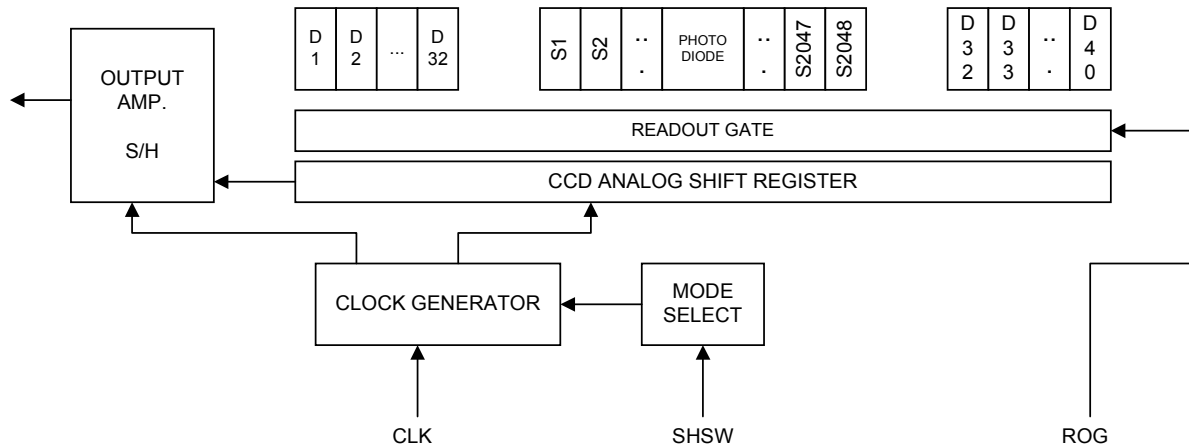
Řádkový snímač firmy SONY s obvodem vnitřního časování

- vypínatelný vnitřní S&H obvod
- jedno napájecí napětí 5V
- neobsahuje elektronickou uzávěrku. Z toho plyne i minimální integrační doba odpovídající době vyčtení jednoho celého řádku.

## Návrh kamery s procesorem ATmega

- Počet aktivních pixelů: 2048
- Velikost pixelu: 14x56 um
- Jedno napájecí napětí: od 4,5V do 5,5V, typicky 5V
- Rychlost vyčítání: typ. 1MHz max. 2MHz
- Minimální integrační doba: 1ms

Vnitřní uspořádání snímače



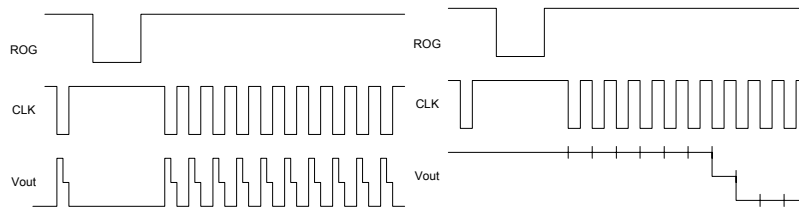
Obr. 3.7 Vnitřní uspořádání ILX554

Snímač obsahuje vnitřní obvod časování, pro řízení snímače jsou potřeba pouze dva resp. tři signály.

CLK - master clock

ROG - readout gate

SHSW - sample/hold switch



Obr. 3.8 Časové průběhy potřebné pro řízení ILX554 a) v režimu CDS b) v režimu SHA

Snímač ILX554 byl testován v obou režimech s S/H obvodem i bez něj. Definice parametrů již byly popsány u předchozích snímačů, tedy pouze stručně:

- $V_{OS}$  typ. 2,85V
- $V_{SAT}$  min.0,8Vtyp. 1,0Vmax. neuvédno

## 3.3.2 Volba AD převodníku

Tabulka 1: Souhrnné srovnání snímačů, které byly v době návrhových prací k dispozici

Snímač	Vos	Vsat
TCD1304	min1,5V typ2,5V max3,5V	min450mV typ 600mV max -
TCD1205	min 1,5V typ 3,0V max 4,5V	min550mV typ 800mV max -
ILX551	4V	1,5V 1,8V -
ILX503	4,5V	1,5V 1,8V -
ILX553	6,2V	1V 2V -
ILX554	2,58V	0,8V 1V -

Z hlediska požadavku univerzálnosti výsledné kamery je třeba počítat s použitím dvou, zásadně se odlišujících typů snímačů. Snímačů s vnitřním S/H obvodem a snímačů bez vnitřního S/H obvodu. Jinak řečeno dva druhy snímačů, které mají na výstupu videosignál již v podobě, kde úroveň napětí odpovídá velikosti osvitu jednotlivého fotocitlivého elementu po celé době trvání vyčítání pixelu. A snímačů, které mají v době trvání vyčtení jednoho pixelu všechny tři fáze vyčítání fotoelementu (fázi resetovací, referenční a signálovou), kde velikost signálu odpovídá rozdílu referenční a signálové úrovně. Je třeba zvolit univerzální způsob zpracování videosignálu od obou typů snímačů.

Některé snímače, jako např. ILX 554 mají implementované oba tyto režimy vyčítání.

Požadavek zpracování signálu z obou typů snímačů vede na volbu A/D převodníku firmy Analog devices AD9822 nebo jeho dražší variantu AD9814. Jedná se o tzv. front-end převodník, který dokáže zpracovávat signál z CCD snímačů jak v dvojitým korelovaným vzorkováním tak i klasickým způsobem.

Informace o A/D převodníku AD9822:

- A/D převodník je 14ti bitový
- Tři přepínatelné vstupy (pro zpracování signálu z barevného snímače)
- Rychlost převodníku je 12,5 MS při jednom vstupu a až 15 MS při třech vstupech
- Programovatelné zesílení, offset
- Oddělené napájení analogové a signálové části (možnost dvouúrovňového napájení 3Vlogika a 5V analog).
- Absolutní rozsah vstupního napětí 0-5V
- Rozsah převáděného vstupního napětí  $U_{diff}$  0-2V (vypínatelná vnitřní reference určující velikost  $U_{diff}$ )

Právě požadavek rychlosti převodu vedl na použití externího flash (nebo podobný princip, half flash,..) A/D převodníku, jelikož jednočipové procesory zpravidla obsahují aproximační převodníky a s nimi jdoucí nevýhody jako je proměnná a relativně dlouhá doba převodu. Nehledě na to, že by bylo obtížné zpracovávat signál z CCD snímače bez vnitřního S/H obvodu. Ve výsledném návrhu byl tedy použit AD9822.

V dalším textu se externí A/D převodník AD9822 bude označovat zkratkou AFE (analog front-end)



### 3.3.3 Obvod přizpůsobení výstupu snímače

Obvod přizpůsobení výstupu snímače slouží k přizpůsobení výstupu snímače a vstupu AFE.

V tabulce 1 v kapitole o snímačích byly popsány parametry sledovaných snímačů. Parametry  $V_{OS}$  a  $V_{SAT}$ , které jsou určující pro volbu rozsahu a reference AFE. V režimu dvojího korelovaného vzorkování (dále jen CDS) je  $U_{diff}$  rozdíl napětí referenční ( $V_{OS}$ ) a signálové fáze ( $V_{SAT}$ ) vstupního signálu (platí že potenciál referenční fáze musí být stejný nebo větší než potenciál signálové fáze). V režimu klasického A/D převodníku (dále jen SHA) je  $U_{diff}$  rozdíl napětí vstupu signálu  $V_{inR}$ ,  $V_{inG}$  nebo  $V_{inB}$  a externího vstupu OFFSET (i zde platí, že potenciál vstupu signálu  $V_{inR}, V_{inG}, V_{inB}$  musí být větší nebo roven potenciálu OFFSET).

U žádného snímače nenastává problém překročení rozsahu  $U_{diff}$  (2V) AFE při použití vnitřní reference. Při použití snímačů v CDS režimu (samozřejmě jen ty co tuto funkci podporují) není problém ani s  $V_{OS}$  kromě ILX 553. Tento snímač překračuje povolené absolutní vstupní napětí AFE. Je tedy nutno předřadit napět'ové přizpůsobení signálu, např. zesilovačem.

Pokud se však požaduje a nebo je nutný (např. při rychlém hledání optických hran pomocí komparátoru) provoz snímače a AFE v SHA režimu nastává problém se správným umístěním rozsahu AFE podle parametrů  $V_{OS}$  a  $V_{SAT}$ .

Existuje několik možností jak situaci správného umístění rozsahu AFE řešit.

- První možností je vypnout a ručně nastavovat referenci, tu nastavit na rozdílové napětí rovno  $V_{OS}$  snímače. Nebo nastavit rozdílové napětí na 5V, což je max. napětí které AFE dovoluje na svém vstupu.

Výhody - jednoduchost, univerzálnost.

Nevýhody - malá citlivost převodu ( $V_{SAT}$  snímačů se pohybuje v rozmezí 1-2V tj. 50-100 kombinací při osmibitovém zpracování signálu převodu).

- Druhou možností je nastavovat ručně, nebo obvodově jak měřené rozdílové napětí, tak napětí na vstupu OFFSET.

Výhody - lze se adaptovat na kterýkoli snímač splňující podmínku absolutního vstupního napětí AFE a to s maximální dosažitelnou citlivostí.

Nevýhody - nutnost nastavovacích prvků - D/A převodníky, trimry + podpurné obvody.

- Na předchozí způsob navazuje i z videosignálu pomocí A/D převodníku procesoru vygenerovat potřebné nastavení rozdílového napětí a vstupu OFFSET.

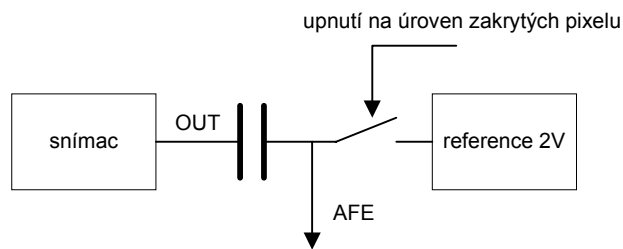
Výhodná je zde pouze automatika nastavení jednotlivých parametrů.

Nevýhody - nutný zásah obsluhy při kalibrování ( nutnost plně osvětit snímač pro získání údaje o  $V_{sat}$  snímače)

- Neposlední v řadě je použití upínače videosignálu obr. 3.9. Princip metody spočívá v analogovém odečítání aditivní složky výstupního signálu snímače takovým způsobem, že  $V_{OS}$  se rovná horní napět'ové úrovni měřeného rozdílového napětí  $U_{diff}$  AFE. Toho se dosáhne tak, že při čtení černých pixelů sepne spínač a kondenzátor se nabije rozdílovým napětím mezi  $V_{OS}$  a  $V_{ref}$ .

## Návrh kamery s procesorem ATmega

Toto napětí je pak následně odečítáno od každého vyčítaného pixelu. V zapojení je pak vstup OFFSET připojen na zem a vstupní rozdílové napětí AFE je 2V.

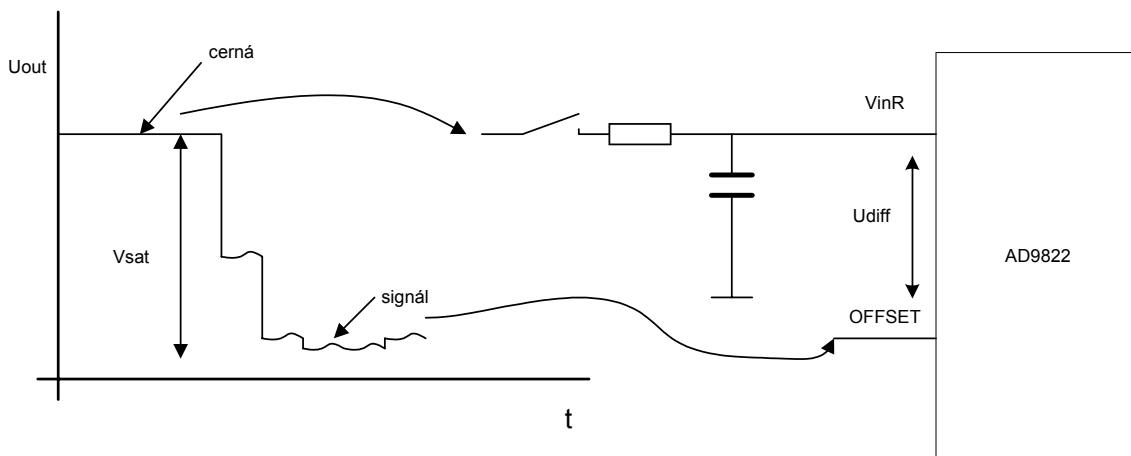


Obr. 3.9 Blokové schéma upínacího obvodu

Nevýhody - volba kondenzátoru, tak aby neovlivňoval měření svým vybíjením mezi okamžiky jednotlivých upnutí.

Dále pak riziko, že na výstupu snímače se objeví špička, která svou velikostí přesahuje přes očekávané maximální  $V_{SAT}$  (v tomto případě 2V). Tato špička způsobí, po té co kondenzátor odečte napětí, že za upínacem bude záporné napětí. Záporné napětí může vést až k destrukci AFE. Existuje možnost ochrany diodou antiparalelně zapojenou s AFE na zem. To však řeší pouze otázku ochrany snímače. Pokud by nastala situace s velkou špičkou sepla by dioda a po dobu trvání špičky by vybíjela kondenzátor. Jiná hodnota napětí na kondenzátoru by pak vnášela chybu do dalšího měření.

- Další metodou je ovzorkování paměťovým kondenzátorem hodnotu černé a přivedení měřeného signálu na vstup OFFSET AFE. Situaci lépe ilustruje obr. 3.10.



Obr. 3.10 Metoda ovzorkování černých pixelů

V okamžiku vyčítání černých pixelů je připojen kondenzátor, který se nabíjí na úroveň odpovídající černé, výstup snímače je trvale spojen s vstupem OFFSET AFE. Je tedy dodržena podmínka velikosti potenciálů  $V_{inR} > \text{OFFSET}$  a poloha  $V_{OS}$  (úroveň černé) se může pohybovat kdekoli v absolutních napět'ových mezích AFE. V případě že dojde k vytvoření špičky ve videosignálu větší než rozdílové napětí AFE 2V a nepřesáhne absolutní napět'ové meze AFE dojde k jejímu číslicovému oříznutí (převodník nastaví výstupní kódové slovo na max. hodnotu).

Jako metoda přizpůsobení výstupu snímače byla použita poslední vyčtená metoda ovzorkování černých pixelů.

### 3.4 Volba řídicí jednotky

Řídicí jednotka ovládá blok obvodů snímače, provádí zpracování videosignálu a komunikuje s okolím pomocí bloku komunikačního rozhraní. Aby řídicí jednotka měla dostatečný potenciál pro splnění všech nároků na ni kladených je nutno zvolit vhodný procesor, který takový potenciál nabídne. Jako vhodná řada procesorů se jeví výrobky firmy Atmel, zejména osmibitové procesory s architekturou RISC řady AVR.

V současné době je na trhu dostupná celá řada procesorů AVR firmy Atmel které se vyznačují velikým rozsahem možností vnitřních periférií, velikostmi programové a datové paměti, rozsahem jejich rychlosti, počtu vstupně výstupních bran a ceny.

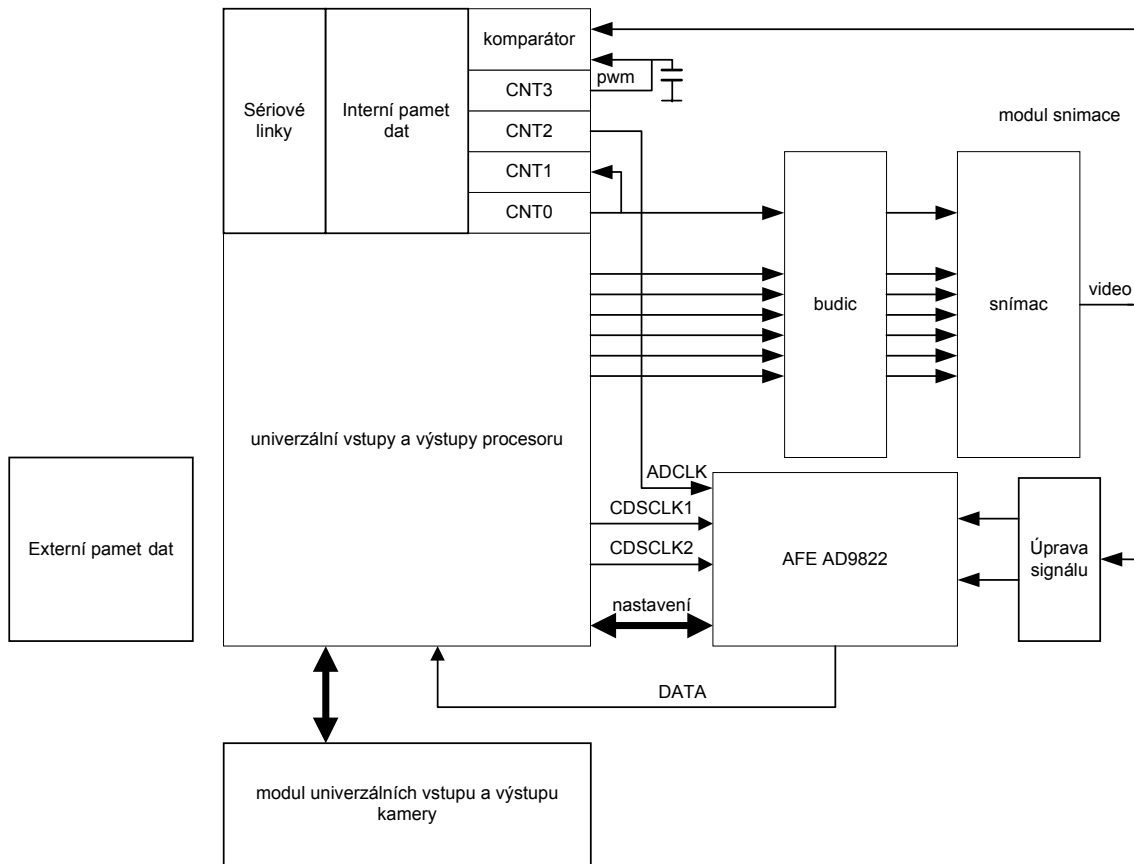
#### 3.4.1 Požadavky na periferie procesoru

- Z hlediska řízení snímače a AFE - řádkové snímače, se kterými se běžně setkáme nepotřebují více než sedm řídicích signálů. Jedná se o signály zajišťující přesuny integrovaných nábojů v registrech snímače, resetování nábojových detektorů, řízení elektronické uzávěrky nebo vyčítání signálu ven ze snímače. Některé požadují řídicí dvojice signálů v protifázi atd. AFE AD9822 pro funkci v SHA režimu potřebuje dva řídicí signály, v CDS režimu tři řídicí signály. Dále potřebuje tři signály na vnitřní inicializaci svého chování.

- Z hlediska zpracování videosignálu - v teoretickém úvodu se mluví o tzv. smíšeném zpracování signálu. Jedná se o binární a víceúrovňové zpracování videosignálu. Řídicí jednotka by tedy měla mít k dispozici alespoň jeden komparátor pro binární zpracování.

- Volbou procesoru se volí i velikost pamětí, které v sobě procesor má zabudované a to paměť datová i programová. Dají se zvolit procesory s datovou pamětí s větším počtem paměťových míst než je potřeba na uchování celého snímku snímače ale i procesory s menší velikostí paměti. Snímek se pak nenačte celý, ale pouze jeho část resp. části, která je resp. jsou pro sledovanou úlohu postačující. Některé procesory nabízejí připojení externí paměti dat. V té je podle kapacity možnost uchování více snímků nebo i místo pro náročné výpočetní operace.

## Obecné blokové schéma kamery s procesorem ATmega

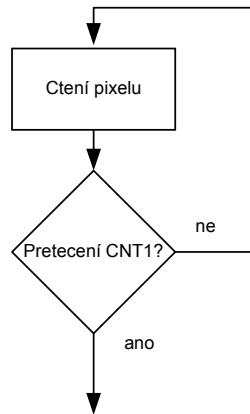


Obr. 3.11 Obecné blokové schéma kamery s procesorem ATmega

Hlavní myšlenka návrhu kamery je, že jsou použity čítače (CNT0 a CNT2) ve funkci PWM jako generátory hodinových impulsů pro snímač a AFE. To s sebou nese výhody: Generované impulsy mají definovatelnou střídu. Pro řízení snímače a AFE je nejlepší 50%, dochází k rovnoměrnému přesunu náboje v CCD registrech (u snímače) a v kondenzátorech ve vnitřní struktuře AFE. Výhodou je i nezávislost pulsů na běhu programu, generování se pouze zapne nebo vypne a dále jej není třeba obstarávat, procesor není tolik zatěžován a lze řídit snímače s pracovní frekvencí do  $f_{xtal}/4$ . Jistou nevýhodou je, že musí souhlasit rychlost vyčítací smyčky programu s rychlostí generování impulsů.

Čítače pro generování hodinových impulsů jsou použity dva z důvodu, že některé snímače (např. TCD1205 nebo TCD1304) mají jinak rychlé nebo vzájemně posunuté hodiny než AFE. Naopak u např. snímačů ILX... stačí použít společného generátoru hodin pro snímač i pro AFE.

Čítač CNT1 je použit pro zjištění aktuální pozice čteného pixelu. Tento čítač je před každým čtením řádku nastaven na hodnotu  $MAXČÍSLOČÍTAČE - POČETPIXELŮSNÍMAČE$ . Při vyčtení celého řádku je generováno přerušení přetečení CNT1, které ukončí vyčítání řádku obr. 3.12.



Obr. 3.12 Vyčítací smyčka a kontrola vyčtení celého řádku z CCD snímače

Čítač CNT3 je použit jako klasické PWM na tvorbu komparační úrovně pro binární hledání optických hran pomocí analogového komparátoru. V tomto režimu kamery je nutné aby snímač pracoval v režimu SHA.

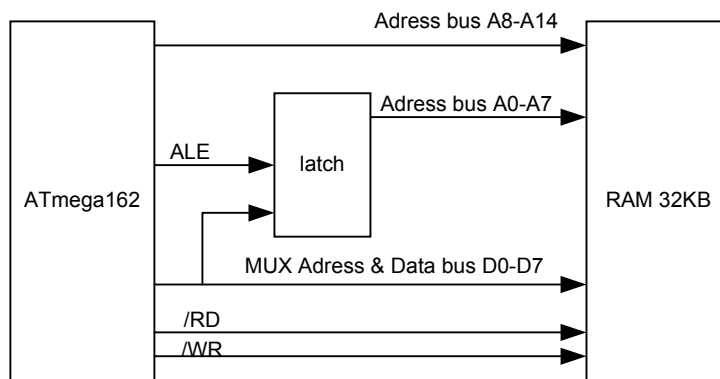
Jako kandidáti na řídicí jednotku byly testovány procesory AT90S8515, ATmega8515, ATmega162, ATmega16 a ATmega64.

Tabulka 2: Srovnání testovaných procesorů

procesor	max. rychlost	interní RAM	externí RAM	pro-gram FLASH	8-bit čítač	16-bit čítač	kompa rátor	UART USART	I/O brány
AT90S8515	8MIPS	512B	64KB	8KB	1	1	ano	1	4x8bit
ATmega8515	16MIPS	512B	64KB	8KB	1	1	ano	1	4x8bit
ATmega162	16MIPS	512B	64KB	8KB	2	2	ano	1	4x8bit
ATmega16	16MIPS	1KB	nemá bus	16KB	2	1	ano	1	4x8bit
ATmega64	16MIPS	4KB	64KB	64KB	2	2	ano	2	6x8bit 1x5bit

Vzhledem ke koncepci řídicí části kamery popsané v odstavci obecné blokové schéma kamery nelze počítat s výběrem procesorů AT90S8515 a ATmega8515. Procesor ATmega16 lze použít pouze v případě, že je možno použít jednoho čítače ve funkci generátoru hodin pro snímač i AFE. Řídicí jednotka s tímto procesorem byla sestavena a odzkoušena pouze na nepájivém kontaktním poli.

Řídicí jednotka s ATmega162 byla také postavena na kontaktním poli a byla zde odzkoušena možnost rozšíření vnitřní datové paměti o externí RAM o velikosti 32KB. Připojení bylo provedeno klasickým způsobem, viz obr. 3.13. Procesor má multiplexovanou dolní polovinu adresové a datovou sběrnici, je tedy nutno pro tvorbu adresy použití latch obvodu (např. 74HCT374) řízeného signálem platné adresy ALE.



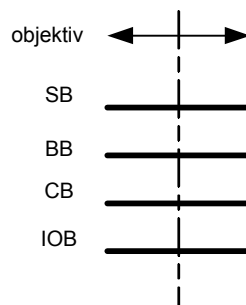
Obr. 3.13 Rozšíření datové paměti ATmega162

Pro výsledný návrh kamery byl zvolen procesor ATmega64. Ten se jevil jako nejvhodnější z důvodu velikosti vnitřní paměti dat, protože lze uložit celý řádek. Vhodná je i velikost programové paměti, jelikož lze pro programování použít vyššího programovacího jazyka (např. C) bez problému s místem. To samozřejmě šlo použít i u předchozích procesorů, však vzhledem k tomu, že výsledná velikost programového vybavení je cca 20KB, by znamenalo jistá omezení výpočetních schopností kamery. Vhodnost procesoru potvrzuje i počet IO bran, dva sériové kanály (jeden pro komunikaci s nadřazeným systémem a druhý pro komunikaci s ostatními zařízeními na stejné úrovni jako je kamera) a samozřejmě i provedení pouzdra (TQFP64) pro tvorbu malého systému.

Procesor se svou max. rychlostí -  $f_{clk}=16\text{MHz}$  dokáže řídit v dané koncepci snímače do rychlosti vyčítání 4MHz, což je pro vyjmenované snímače plně postačující.

### 3.5 Fyzický návrh kamery

Kamera byla navržena jako modulární systém s jednou řídicí deskou (dále BB-basic board), s deskou snímače (dále SB-sensor board), deskou komunikace a napájení (CB-communication board) a deskou univerzálních vstupů a výstupů (IOB - in out board). Jednotlivé desky mezi sebou komunikují pomocí sběrnice a byly navrženy tak, aby se fyzicky vešly do formátu 6x6 cm. Formát 6x6cm byl zvolen z důvodu mechanického upevnění objektivu, jelikož se v laboratoři videometrie na ČVUT FEL již používá tento rozměr pro kovové upevňovací díly. Výsledné sesazení jednotlivých desek je provedeno tzv. "sendvičově", to znamená že jsou složeny na sebe, komunikační sběrnice mezi deskami prochází skrz.



Obr. 3.14 Sestavení modulů tvořících kameru



ADCCLK	- hodiny AFE
OUT1-OUT6	- univerzální řídicí výstupy
Vdd	- napájení +5V
Ux	- napájení volitelného napětí

Snímačové rozhraní bylo odvozeno od rozhraní které je již používané v laboratoři videometrie na ČVUT FEL a bylo zavedeno ing.Radilem v kameře ULC84 [1]. Původní rozhraní používá velikost konektoru 13x2. Protože v současné době je na trhu k dispozici konektor na kabel pouze 13x2 a do desky pouze 15x2, bylo původní rozhraní rozšířeno o čtyři piny - číslo 1,2,29 a 30. Na ty byla přivedena zem.

Druhou změnou je přidání řídicího výstupu OUT6 (v původním provedení zde byla zem, je tedy nutno při použití starých desek s tím počítat a programově nastavit chování brány, na které je OUT6 připojen jako vstupní. Konkrétně brána C výstup PC7).

Do nového konektoru byl přiveden i vstup AFE OFFSET. Tento je zde pro případ, že v dalším vývoji by mohl být potřeba. Je odpojitelný jumperem SW3 (jumpery budou popsány v dalším textu).

Poslední odlišností je volitelné napětí Ux. V původním konektoru zde bylo pevné napětí 9V, to bylo zaměněno za volitelné z důvodu, rozličných napájecích napětí různých snímačů (TCD1304 je napájeno 4V, ILX551 potřebuje 5 a 9V). Toto volitelné napětí je přivedeno z komunikační a napájecí desky (CB).

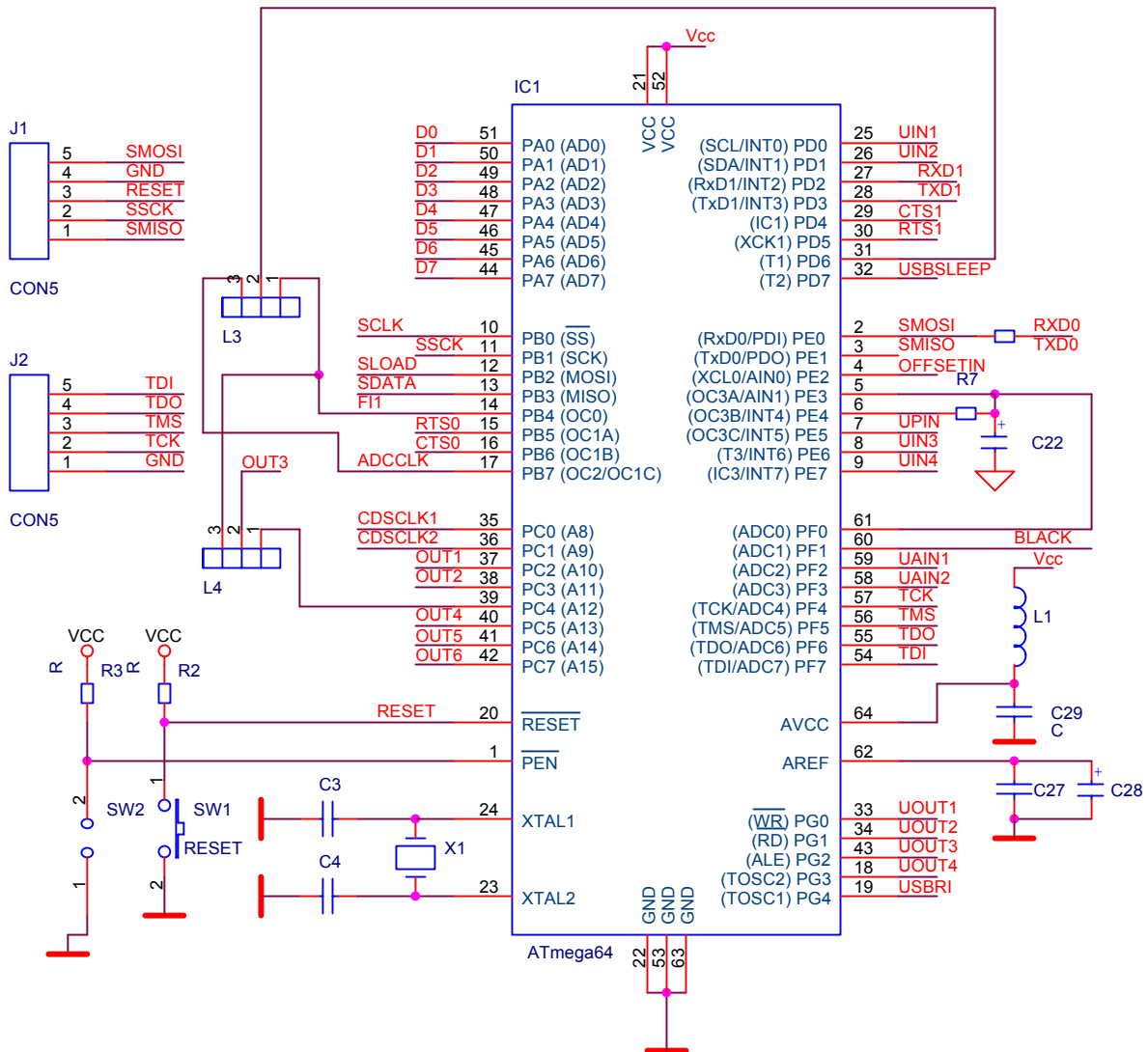
Ke konektoru snímače je tedy možno připojit jak nově navržené snímačové desky, tak již dříve vyrobené a používané snímačové desky kamery ing. Radila

### 3.5.2 Řídicí deska

Řídicí deska obsahuje řídicí procesor, AFE a obvod ovzorkování černé.



## Blok procesoru



Obr. 3.17 Schéma zapojení bloku procesoru na základní desce kamery

Blok procesoru obsahuje vlastní procesor a jeho podpůrné obvody, jako je krystal, blokovací kondenzátory, resetovací tlačítka a nastavovací jumper, programovací a diagnostické konektory (SPI, JTAG) a obvody napájení AD převodníku procesoru (dále jen interní AD).

Přepínač L3 je použit pro volbu čítače CNT0 nebo CNT2, který bude použit pro čítání aktuální pozice vyčítaného pixelu pomocí CNT1.

Přepínač L4 slouží k nastavení funkce univerzálního řídicího výstupu pro snímač OUT3, zda se použije PC4 z brány C procesoru a nebo generované hodiny pomocí CNT0.

Za zmínku stojí odpor který je zapojen do série s RXD0. Je to z důvodu, že tento vstupní pin procesoru je použit jak pro vstup RXD0 sériového kanálu, tak pro vstup sériového ISP programování. Při tvorbě kamery a jejím častém programování by se musela odpojovat deska komunikace, aby nedocházelo ke stavu, že jsou spojeny jak výstup obvodu MAX232, tak výstup programovacího zařízení proti sobě. Odpor byl zvolen cca 10k.

### Popis jednotlivých signálů

D0-D7 - brána PA je použita pro čtení převodu AFE

SCLK,SDATA,SLOAD- jako sériové nastavovací výstupy AFE

FI, ADCLK- generované hodiny pomocí CNT0 a CNT2

CDSCLK1 a 2 - signály potřebné pro funkci AFE

OUT1 až 6- univerzální řídicí výstupy pro snímačovou desku

UIN1-4 a UOUT1-4-univerzální vstupy a výstupy, které jsou vyvedeny na desku univerzálních vstupů a výstupů kamery (IOB)

UAIN1a2- univerzální analogové vstupy, opět jsou vyvedeny na IOB

RXD, TXD, RTS, CTS - signály pro sériovou komunikaci a hardwarový handshaking

USBSLEEP,USBRI - signály pro kontrolu stavu USB nadřazeného systému, stav sleep (zařízení je v režimu spánku), signál RI je použit pro probuzení nadřazeného systému

UPIN- řídicí signál pro obvod pamatování černé

### Analogový komparátor, komparační úroveň a vnitřní AD převodník procesoru

O funkci kamery s analogovým komparátorem se hovoří pouze tehdy, je-li použit snímač v SHA režimu. Jedině tehdy lze komparátor použít.

Nalézá se na vstupech AIN0 a AIN1 procesoru, na AIN0 je přiveden videosignál ze snímače a na AIN1 je přivedeno generované komparační napětí pomocí CNT3. Výrobce procesoru udává maximální vstupní proud komparátoru 50nA a maximální offset 40mV. Se vstupním proudem je třeba počítat při návrhu RC článku PWM generátoru komparační úrovně. Napět'ový offset může vnášet chybu do opakovatelnosti měření polohy optické hrany při různých provozních teplotách. Předpokládá se totiž, že se napět'ový offset analogového komparátoru procesoru bude s měnící se teplotou měnit.

Vzhledem k tomu, že různé snímače mají různé úrovně napětí černých pixelů ale pokaždé se používá AFE v rozsahu  $U_{diff}=2V$ , je nutno získat nějakou informaci o tom, v kterém rozsahu se má komparační úroveň nastavovat. K tomu se využije interní AD procesoru, na který je přivedeno (na vstup ADC1, signál BLACK) napětí odpovídající černé. V části programu obsluhující správné nastavení komparační úrovně je této informace využito.

Stručně o interním AD převodníku procesoru

- převodník s postupnou aproximací
- rozlišení 10 bitů
- doba převodu 65-260 us což odpovídá maximální rychlosti 15ksamplů
- programovatelné zesílení 1,10,1000
- vstupní rozsah 0-Vcc procesoru.

### Obvod vzorkování černé

Jak již bylo uvedeno slouží k ovzorkování a zapamatování napět'ové úrovně odpovídající zakrytým pixelům, jeho blokové schéma bylo uvedeno v kapitole o blokovém schématu kamery. Jeho fyzická realizace se skládá z analogového multiplexeru 74HCT4052, který je použit jako spínač a jako pamět'ového článku je zde použito tantalového kondenzátoru.

Do série se spínačem je zařazen ochranný odpor, ten plní funkci ochrany spínače před velkým proudem, který by mohl při zapnutí napájení a prvotním nabíjení kondenzátoru obvodem

## Návrh kamery s procesorem ATmega

---

protékat. Maximální proudová zatížitelnost multiplexeru 74HCT4052 je 25mA. Hodnota odporu R2 musí být minimálně 200ohmů.

Kondenzátor se vybíjí v době vyčítání vstupním proudem AFE(20uA při plném rozsahu), vstupním proudem interního AD procesoru(50nA při plném rozsahu) a proudem tekoucím do multiplexeru při rozpojení (max 2uA).

$$\Delta U_{C21} = \frac{1}{C_{21}} \int_0^t i_v(t) dt \quad (3.1)$$

Kde  $i_v$  je součet vybíjecích proudů

T doba vyčtení celého videosignálu

$\Delta U_{C21}$  pokles napětí na kondenzátoru

$C_{21}$  velikost kapacity paměťového kondenzátoru.

Při rychlosti vyčítání 0,5 MHz a počtu pixelů 3648 (nejhorší možná konfigurace typických hodnot TCD1304, ostatní snímače se vyčítají rychleji a mají menší počet pixelů) trvá vyčtení snímku  $T=3648*1/f=7,3ms$ . Za tuto dobu nesmí napětí na kondenzátoru klesnout o hodnotu 1LSB AFE (používá se pouze horních 8 bitů). To je  $U_{diff}/256=2/256=7,8mV$ .

Ve výpočtu se pro jednoduchost předpokládá konstantní vybíjecí proud:

$$C_{21} = \frac{I_v T}{\Delta U_{C21}} = 20,5\mu F \quad (3.2)$$

$C_{21}$  je zvolen pro rezervu 47uF.

Doba připojení  $C_{21}$  k napětí černých pixelů by měla být minimálně tak dlouhá aby se kondenzátor mohl dobýt o úbytek způsobený vybíjecími proudy v době mezi připojeními na úroveň černých pixelů. Výchozí vztah:

$$\Delta U_{C21} = V_{os} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3.3)$$

kde

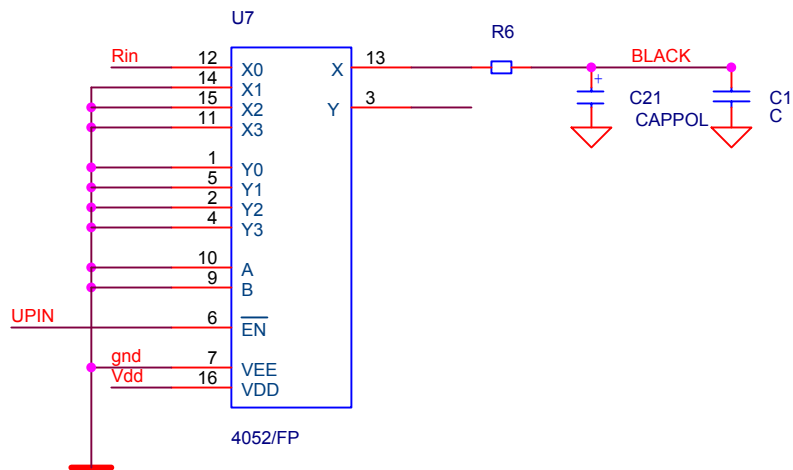
$V_{OS}$  je úroveň napětí černých pixelů. Zde je potřeba vzhledem k univerzálnosti návrhu počítat s maximální možnou  $V_{OS}$ , tedy 5V.

$\tau$  je časová konstanta nabíjení  $\tau=(R6+Rm)C_{21}$

$Rm$  je odpor multiplexeru v otevřeném stavu (50Ω)

Po výpočtu je  $t \geq 8\mu s$

Tuto nerovnost je potřeba dodržet.

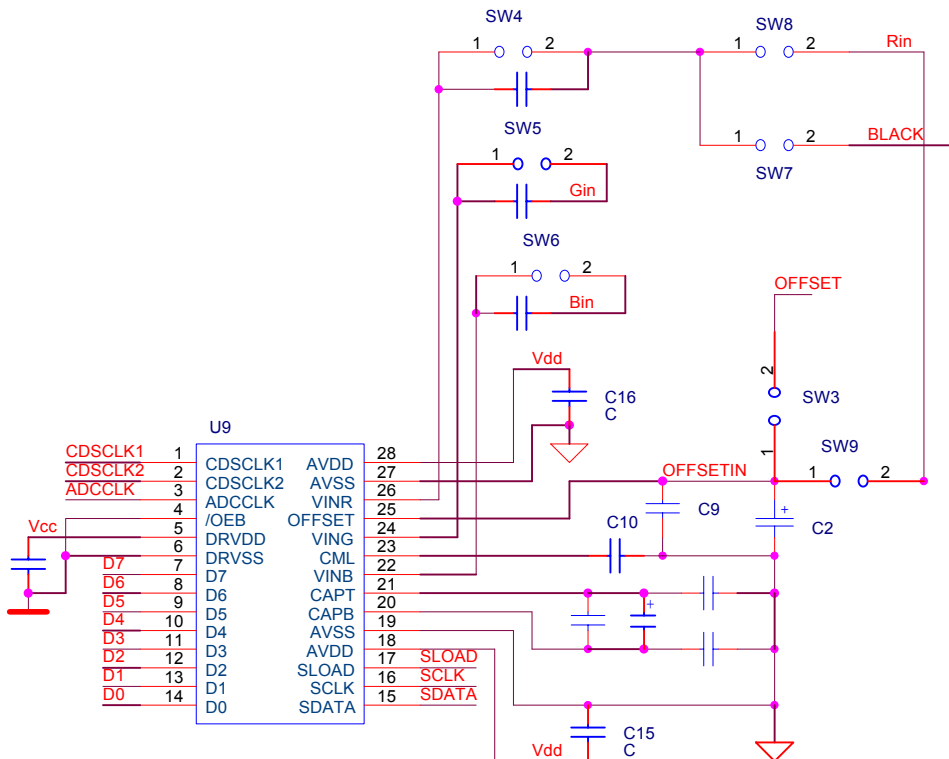


Obr. 3.18 Schéma zapojení obvodu ovzorkování černé

Signál procesoru UPIN je přiveden na povolovací vstup multiplexeru /EN, vstupy výběru A a B jsou trvale uzemněny. Tím je v době aktivní úrovně signálu UPIN spojen vstup X0 s výstupem X. Multiplexer je konstruován pro symetrické napájení, v tomto zapojení je VEE spojeno se zemí.

### Blok AD převodníku zpracovávající videosignál

Blok AFE byl navržen tak, aby šlo plynule přecházet mezi oběma režimy převodníku SHA a CDS. A to pomocí jumperů, které odpojují nebo připojují jednotlivé součásti potřebné pro funkci AFE ve zvoleném režimu.



Obr. 3.19 Schéma zapojení bloku AFE na základní desce kamery

## Návrh kamery s procesorem ATmega

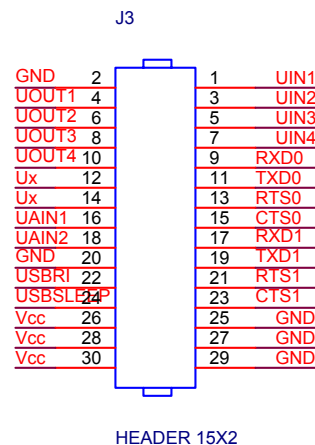
Bohužel v návrhu bylo opomenuto zavedení jednoho jumperu na odstavení kondenzátorů C9 a C2 pro režim SHA. Tato situace lze vyřešit osazením nebo neosazením těchto kondenzátorů na výsledné desce. Jinou možností by bylo osadit pájecí plošky kondenzátorů (jedná se o povrchovou montáž) dvěma dutinkami, do kterých se kondenzátory vloží a nebo nevloží.

Tabulka 3: Funkce propojek na řídicí desce

propojka	SHA	CDS
sw3	nezáleží	rozpojeno
sw4	spojeno	rozpojeno
sw5	nezáleží	rozpojeno
sw6	nezáleží	rozpojeno
sw7	spojeno	rozpojeno
sw8	rozpojeno	spojeno
sw9	spojeno	rozpojeno

V režimu SHA je u některých propojek napsáno, že nezáleží na tom, zda jsou nebo nejsou propojeny. To, je závislé na individualitě aplikace. V tomto režimu nelze provozovat snímač s více než jedním výstupem.

Z řídicí desky je vyvedena komunikační sběrnice obsahující veškeré signály potřebné pro zbylé CB a IOB desky. Jsou to signály sériových kanálů, univerzálních vstupů a výstupů a napájení.



Obr. 3.20 Zapojení konektoru mezi základní a komunikační deskou a deskou univerzálních vstupů a výstupů

K řídicí desce se hodí ještě poznámka o fyzickém rozložení a rozdělení analogové číslicové části. Na výsledné desce jsou odděleny izolačním příkopem a je ponechána možnost volby třech míst, kde je možno země propojit.

## 3.6 Komunikační a napájecí deska

Tato deska obsahuje obvody pro převod sériových linek na úroveň RS232 a převod na USB. Dále jsou zde robustní konektory pro přivedení napájení z externích zdrojů a je zde i počítáno s možností použití DC/DC firmy měniče pro galvanické oddělení napájení a možnost práce kamery při stejnosměrném napájení 20-50V.

Pro převod úrovní sériového kanálu UART/USART0 na RS232 je použit známý obvod MAX232. Z něj je použito všech čtyř linek pro možnost HW handshakingu. HW handshaking je generovaný programově pomocí signálů RTS a CTS. Aktivitu linky signalizují LED diody. Deska CB je osazena konektorem CAN9F. Rychlost kanálu byla testována do 115kbps

Jako převodník sériového kanálu UART/USART1 na USB byl použit obvod firmy FTDI Microchip FT232BM v režimu převodníku serial<->USB. K tomuto integrovanému obvodu firma FTDI dodává ovladače virtuální COMM linky, pomocí nichž se obvod pro programátora chová zcela transparentně. I když vzhledem k prostoru na desce bylo vhodnější zvolit USB mini konektor, byl nakonec zvolen robustnější a větší USB B. Rychlost kanálu byla testována do 1Mbps, což je i maximální dosažitelná rychlost procesoru ATmega64 při krystalu 16MHz. I zde aktivitu linky signalizují LED diody.

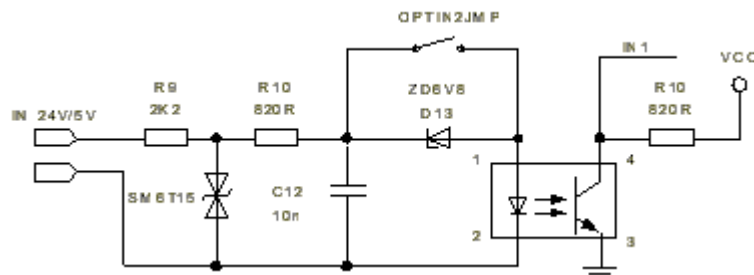
Jako napájecí část kamery bylo potřeba zvolit stabilizátor napětí. Ten musí být schopen pracovat s širokým rozsahem vstupního napětí a musí dodávat dostatečný proud do obvodů kamery. Lineární stabilizátor není vhodný svými rozměry a nutnosti chlazení. Jako řešení se nabízí některý ze standardně dodávaných monobloků DC/DC měničů

DC/DC měnič byl použit třívatomý monoblok od firmy TRACO. Použití takového monobloku je konstruktérsky příjemné a důvodů je několik. Poměrně široký rozsah vstupního napájecího napětí, není nutnost dodání dalších součástek, blok se pouze zapojí a přivede se k němu napájecí napětí. Na výstupu je již požadované vyhlazené napětí vhodné pro napájení celé kamery. Na desce CB je možnost pomocí jumperů DC/DC měnič v případě nutnosti odpojit.

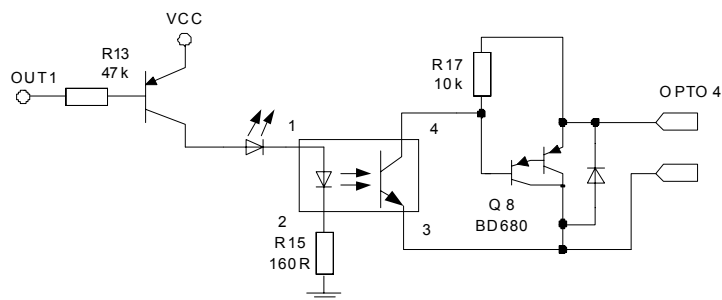
## 3.7 Deska univerzálních vstupů a výstupů

Pro tuto desku jsou navrženy opticky oddělené vstupy a výstupy pro řízení kamery a/nebo procesu, ve kterém může být kamera nasazena.

Na desce je prostor pro osazení čtyř vstupů a čtyř výstupů. Vstupy jsou přivedeny na piny procesoru, které nabízejí vyvolání externího přerušení běhu programu.



Obr. 3.21 Opticky oddělený univerzální číslicový vstup



Obr. 3.22 Opticky oddělený univerzální číslicový výstup

### 3.8 Poznámky k hotové kameře z hlediska fyzické vrstvy

Byl vytvořen modulární univerzální systém schopný spolupráce s řádkovými snímači firem Toshiba a Sony a pravděpodobně i dalších, které však nebyly testovány. Právě svou modulárností se dá vytvořit k jedné řídicí a komunikační desce systém přímo dělaný ke konkrétní aplikaci. A to jak specifickou snímačovou deskou tak deskou univerzálních vstupů a výstupů.

Systém řídicí deska + komunikační deska má jistý vedlejší efekt. Jelikož obsahuje paměť, AD převodník, řídicí výstupy a možnost komunikace lze jej využít jako systém pro sběr dat.

Motto: Bez práce nejsou koláče

## 4 Možnost zvýšení paměťové kapacity a rychlosti zpracování s procesorem ARM7

Procesory s jádrem ARM7 nabízí relativně vysoký výpočetní výkon 32-bitového jádra procesoru pro zpracování signálu z CCD snímače. Vyrábí se v mnoha variantách s různými přidruženými periferiemi na čipu. Jako použitelné se pro zpracování videosignálu z CCD snímačů zdají být zvláště procesory s vestavěným A/D převodníkem

V září 2003 začla firma Philips nabízet typ 32-bitového mikropočítače, založeného na jádře ARM7TDMI-S pracujícího vnitřně až na 60 Mhz s označením LPC21xx a LPC22xx. Záměrem bylo zjistit možnost použití LPC21xx nebo LPC22xx jako řídicí jednotky kamer s CCD řádkovými snímači.

Na základě toho plynou následující požadavky:

- rychlost načítání AD převodníkem řádově jednotky optimálně desítky MS/s
- možnost řízení snímačů
- jednoduchá úprava firmware; snadná realizace algoritmů
- velikost paměti pro zpracování dat
- minimalizovat počet podpůrných obvodů
- cena

### 4.1 Vlastnosti řad procesorů LPC21xx a LPC22xx

Vlastnosti LPC21xx

- ARM7TDMI-S processor (32-bitový) pracují až na 60 Mhz
- 128kB flash paměti programu
- 64/32/16 kB paměti RAM (LPC2106/LPC2105/LPC2104)
- dvě napájení: CPU (1,8V) a I/O (3,3V)
- Oscilátor pracující v rozsahu 10 - 25 Mhz (+ interní PLL)
- watchdog
- hodiny reálného času
- 2 časovače - každý obsahuje 4 capture/comapre kanály.
- SPI rozhraní
- I2C rozhraní
- LQFP48 pouzdro
- některé typy (LPC2114) obsahují vnitřní AD převodník

Vlastnosti LPC22xx

- ARM7TDMI-S processor (32-bitový) pracují až na 60 Mhz
- 128kB flash paměti programu
- 64/32/16 kB paměti RAM (LPC2106/LPC2105/LPC2104)
- dvě napájení: CPU (1,8V) a I/O (3,3V)
- Oscilátor pracující v rozsahu 10 - 25 Mhz (+ interní PLL)
- watchdog
- hodiny reálného času
- 2 časovače - každý obsahuje 4 capture/comapre kanály.
- SPI rozhraní



- I2C rozhraní
- LQFP144 pouzdro
- vnitřní AD převodník

V procesorech LPC2114 nebo řady LPC22xx je implementován A/D převodník. Ten pro svou práci vyžaduje hodinový signál s frekvencí maximálně 4,5MHz. Je 10-bitový a k převodu celého 10-bitového čísla potřebuje 11 hodinových impulsů. Minimální doba převodu je tedy cca 2,44ms. Pokud snížíme rozlišení převodníku o jeden bit doba potřebná pro převod analogové vstupní hodnoty se sníží o jeden hodinový cyklus. Pro rozlišení 8 bitů tedy dostáváme 9 potřebných hodinových taktů. Ta odpovídá době převodu 2ms. Záleží, zda použít rozlišení všech 10 bitů za cenu delší doby potřebné pro převod. Pro korektní zpracování signálu z CCD snímače s rozlišením 10 bitů je tedy potřeba doba cca 2,5ms na jeden pixel.

Při CCD snímači s 2048 aktivními pixely je frekvence hodinového signálu pro vyčítání dat z CCD snímače limitující na 400kHz. Většina CCD řádkových snímačů by tak pracovala pod své možnosti.

Pro rychlejší zpracování videosignálu je možné použít externí rychlejšího A/D převodník. Ten lze připojit k mikroprocesoru pomocí sběrnic nebo vstupně výstupních bran.

Připojení pomocí vstupně výstupních bran není příliš vhodné protože periferní bloky procesorů pracují na podstatně nižších frekvencích než samotné jádro procesoru.

Pro tento případ se jako vhodná varianta procesoru jeví typová řada LPC22xx, která má vyvedou interní datovou a adresovou sběrnici na jednotlivé piny. V procesoru LPC22xx je také implementována Chipselectová jednotka pro snazší připojení a adresaci různých vnějších periferních obvodů. Datová a adresová sběrnice je taktována na podstatně vyšších frekvencích než univerzální vstupně/výstupní brány. Použití procesorů LPC22xx umožňuje výrazně rychlejší přenos dat z vnějšího AD převodníku.

Hlubšímu testování použitelnosti procesorů řady LPC11xx a LPC22xx se věnovali a ve svých diplomových pracích kolegové z laboratoře videometrie ČVUT FEL Praha. Možností připojení externího AD převodníku se zabýval ing. Petr Česák [4]. Testováním vnitřního AD převodníku procesorů se zabýval ing. Petr Suchánek [5].

Návrh a realizace kamery s procesory s jádrem ARM7 je možný, tato práce se jím však nezabývá. V době kdy tato diplomová práce vznikala, se návrhem a realizací kamery s ARM7 ve své diplomové práci zabýval student ČVUT FEL laboratoř videometrie Libor Chudoba.

### 5 Programové vybavení

Tato kapitola se bude zabývat implementací programového vybavení do kamery a popisem zobrazovacího software pro nadřazené PC včetně standardního komunikačního protokolu.

Větší důraz byl kladen na programování vlastní kamery, protože v době, kdy byl tento měřicí systém navrhován, pracoval na univerzálním zobrazovacím software a standardním komunikačním protokolu na katedře Měření ČVUT FEL v Praze student Petr Fulka. Nemělo tedy smysl vytvářet nový, vlastní. Vhodnější bylo do návrhu pana Fulky konstruktivně doplňovat požadované vlastnosti jak protokolu, tak zobrazovacího software.

#### 5.1 Programové vybavení kamery

Tvorba programu byla rozdělena do tří vrstev.

- Řízení snímače a sběr dat
- Předzpracování
- Měřicí výpočty a řízení procesu

Rozdělení je vhodné z důvodu rozvrstvení kódu tak, aby bylo možné snadněji změnit jednotlivé vrstvy a také proto, aby byl výsledný kód dobře čitelný pro případné budoucí rozšiřování vlastností kamery.

V průběhu programování kamery se plynule přešlo z programování v assembleru na kombinaci assembleru (pro časově kritické části - především v řízení snímače) s vyšším programovacím jazykem C. Konkrétně GCC pro AVR procesory. Tento kompilátor je součástí volně šiřitelného programového balíku WinAVR. K dispozici je na <http://winavr.sourceforge.net>

##### 5.1.1 Řízení snímače a sběr dat

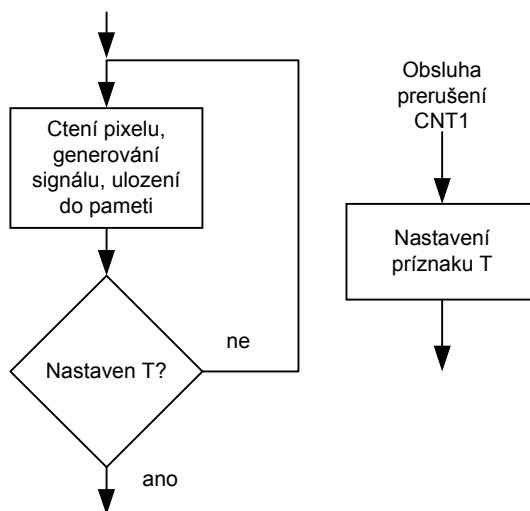
Jak již bylo v kapitole o návrhu hardware naznačeno, k řízení snímače se hojně využívá periférií procesoru, kterých ATmega64 má dost. Jedná se hlavně o využití osmi a šestnáctibitových čítačů CNT0, CNT1, CNT2 a CNT3. Čítače CNT0 a CNT2 mají stejnou funkci, v dalším textu se o nich bude hovořit jako o jednom čítači CNT0.

Po počáteční inicializaci periférií běh programu vstoupí do vyčítací smyčky. Ta je z důvodu potřeby přesného časování psána v assembleru. Podle rychlosti vyčítání jednotlivých pixelů ze snímače plyne i možný počet cyklů instrukcí vyčítací smyčky obsluhující snímač, AFE a ukládání vzorku do paměti. Je to z důvodu souběhu programové obsluhy snímače s hardwarovou (pomocí CNT0 ve funkci generátoru PWM). Pro lepší představu viz tabulka. Jedná se o vyčítací rutinu snímače ILX554 při rychlosti  $f_{xtal}/8$ . Přesněji při použití krystalu 16MHz je to maximální vyčítací frekvence snímače ILX554 2MHz. V této smyčce je obslužen snímač, AFE a uložení vzorku do paměti.

Tabulka 4: Vyčítání pixelů ze snímače

instrukce	počet taktů procesoru	pozn.
loop01:		
out portc,r22	1	obsluha AFE
out portc,r20	1	obsluha AFE
nop	1	
in r16,pina	1	načtení výsledku z AFE
st Z+,r16	2	uložení do paměti
brtc loop01	2	kontrola vyčtení celého řádku
celkem taktů	8	

Za dobu, co proběhne jednou tato smyčka, CNT0 jako PWM projde jednou periodou generovaného obdélníkového signálu, resp. počtem period potřebným pro vyčtení jednoho pixelu (např. TCD1304 má frekvenci řídicích hodin čtyřnásobnou frekvence čtení pixelu).



Obr. 5.1 K ilustraci běhu programu při vyčítání řádku.

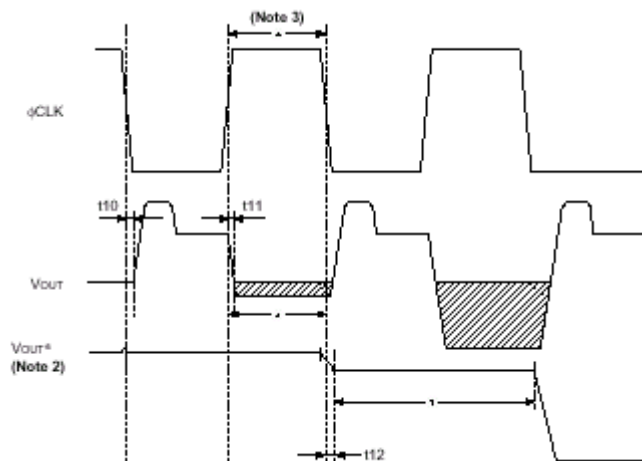
V tabulce je i vidět způsob ukončení vyčtení řádku. Děje se tak testováním příznaku T z flag registru procesoru, zda byl nastaven. Jeho nastavení je provedeno v obsluze přerušení od 16ti bitového čítače CNT1, který je fyzicky spojen s CNT0 (CNT1 čítá impulzy CNT0) a před vyčítáním nastaven na hodnotu 0xffff-počet pixelů snímače (počtem pixelů snímače se rozumí celkový počet, tedy i včetně opticky zakrytých).

Dále stojí za povšimnutí také způsob generování řídicích signálů pro AFE. Tento příklad se týká případu, kdy procesor nemá mnoho času na nastavování jednotlivých řídicích výstupů pomocí bitových instrukcí, které jsou dvoutaktové. Je tedy použit způsob přímého přepsání

některého pracovního (a v běhu programu dříve připraveného) registru na výstupní bránu (konkrétně dvou registrů r22 a r20).

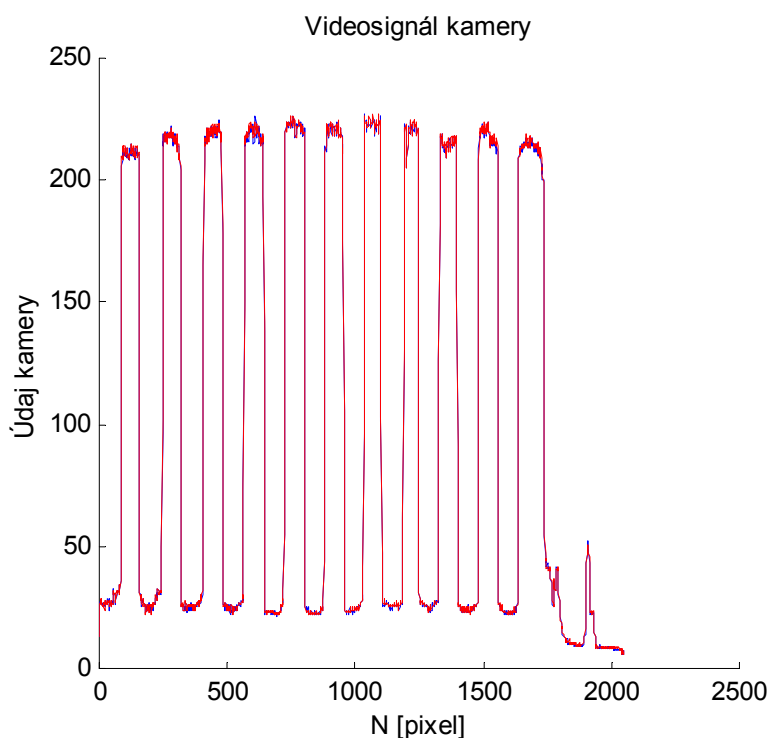
Může však nastat situace, kdy již nestačí množství taktů procesoru, které jsou k dispozici během čtení jednoho pixelu. Například při hledání hran pomocí komparátoru a uložení jejich pozice do paměti. Je tedy nutno zastavit CNT0 a to v předepsané úrovni a po obsluze hrany jej spustit a to ve stejné fázi jako byl před zastavením.

Předepsanou úroveň řídicích hodin snímače pro zastavení vyčítání lze usoudit z katalogových průběhů řízení. Konkrétně pro ILX554 (obr. 5.2): Úvaha vychází z průběhu pro CDS režim, signálová část vyčítaného pixelu je na výstupu po vzestupné hraně řídicích hodin. Lze tedy předpokládat, že S/H obvod snímače v SHA režimu zpracovává signál který je na výstupu snímače v CDS režimu. Platná úroveň signálu tedy bude po vzestupné hraně řídicích hodin. V úrovni H řídicích hodin lze očekávat neměnnost výstupního signálu po čas zastavení hodin.



Obr. 5.2 Katalogový průběh výstupu ILX554

Otázkou je, jak dlouho je možno řídicí hodiny nechat stát. Ve výsledném signálu se mohou při dlouhém stání hodin projevit proudy za tmy. V případě snímače ILX554 byly hodiny zastavovány na dobu max 160 $\mu$ s (při zpracování hran). Ve výsledném průběhu nebyly pozorovány žádné změny signálu oproti režimu bez vypínání řídicích hodin snímače.



*Obr. 5.3 Porovnání signálu ze snímače při zastavovaných (červeně) a nezastavovaných (modře) řídicích hodinách*

Po proběhnutí vyčítací smyčky programu jsou v paměti uloženy vzorky dat odpovídající úrovni osvětlení pixelů snímače.

Ve vrstvě programu řízení snímače a sběr dat se rozlišuje několik možných režimů:

- Rychlé vyčtení řádku bez ukládání vzorků ani pozic hran. Zpravidla na maximální frekvenci snímače, používá se z důvodu vyčištění nežádoucího náboje ve fotoelementech, který se nashromáždil při osvětlení např. během přenosu dat posériových kanálech nebo při náročnějším výpočtu. Minimální doba integrace je pak rovna době vyčtení tohoto řádku. Tento režim není nutný ve snímačích s elektronickou uzávěrkou.

- Rychlé vyčtení řádku bez ukládání vzorků avšak s ukládáním pozic hran. Procesor se nemusí zabývat řízením AFE ani ukládáním vzorků do paměti. Ukládají se pouze pozice hran. Pokud je postačující přesnost velikosti jednoho pixelu je režim vhodný pro rychlé měření pozic hran, rozměrů objektu a nebo polohy.

- Vyčtení řádku s ukládáním pixelů, bez ukládání pozic hran. Režim pro výpočty hran pouze softwarovou metodou nebo na prosté čtení řádku a posílání do PC.

- Režim, při kterém se ukládají jak pixely, tak pozice hran nalezené komparátorem. O tento režim se opírají všechny metody zpřesnění pozice hledané hrany implementované v kameře, jelikož je dána hrubá pozice pomocí komparátoru a k dispozici jsou i vzorky pro výpočetní zpřesnění.

Do vrstvy řízení snímače a sběru dat patří i kontrola integrační doby a to hlavně v režimech s proměnnou dobou trvání výpočetních, nebo komunikačních operací. Použije-li se snímač s elektronickou uzávěrkou, je doba integrace snadno ovladatelná prostým generováním řídicího signálu elektronické uzávěrky. Jistý problém může nastat u snímače bez elektronické uzávěrky

(např. ILX554). Existuje několik způsobů jak kontrolovat dobu integrace a jak zajistit aby mohla být (pokud prostředí požaduje) co nejmenší.

- Jedním způsobem je, že před každým vyčítáním se snímač vyčistí režimem rychlého vyčtení řádku, pak se počká onu stanovenou dobu integrace a vyčte se již správný řádek.

Výhody jsou v jednoduchosti této metody.

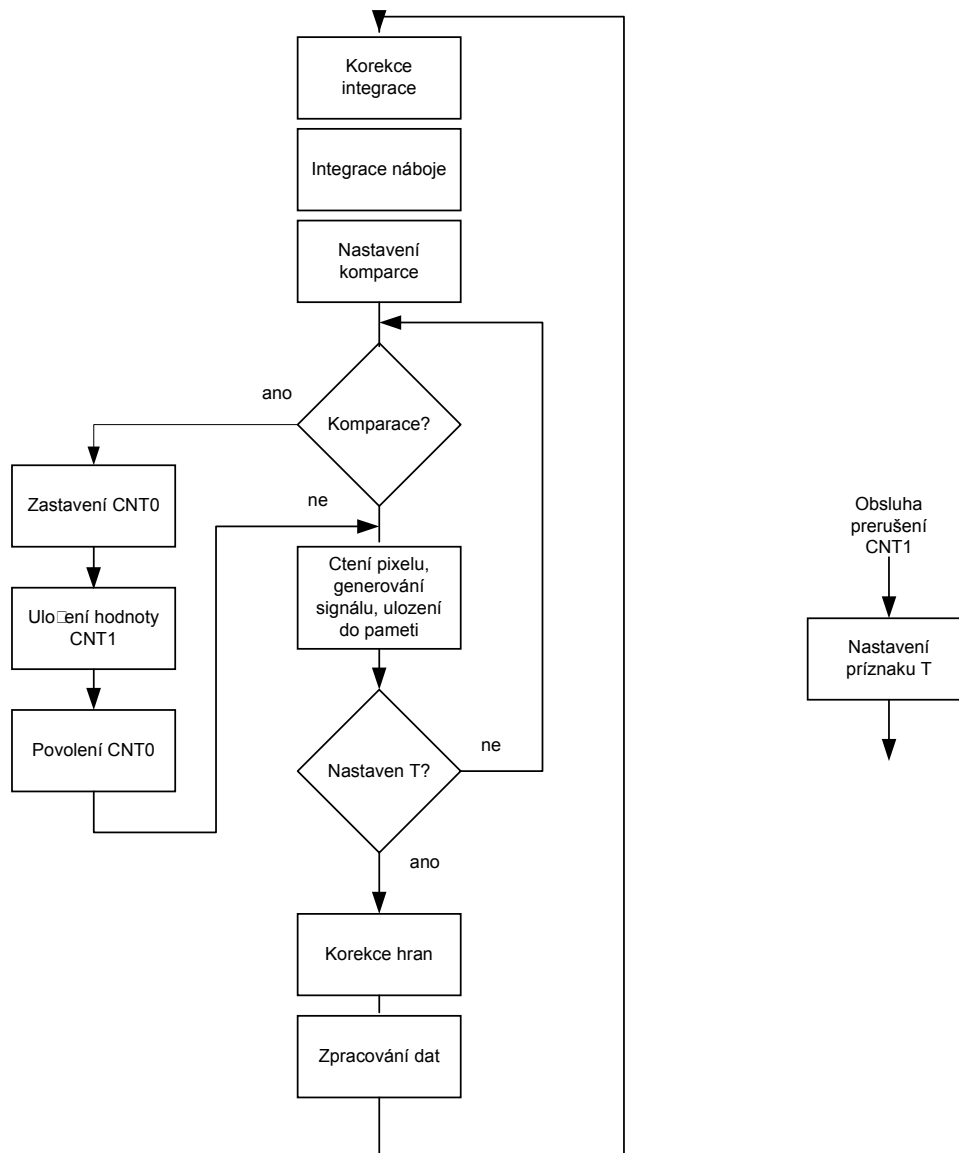
Nevýhody v minimální době integrace je vždy tak dlouhá jak dlouho trvá čištění. Další nevýhodou, která však má své řešení, je v případě silného osvětlení a dlouhé rezií dalších vrstev implementovaných v kameře. Může totiž dojít k takzvanému bloomingu (rozlití náboje) ve snímači. Je to jev který si lze představit jako přetečení nábojové kapacity pixelu snímače do okolních pixelů. Vinou tohoto jevu nemusí stačit jedno čištění před nastaveným integrováním, ale je jich potřeba více. Může se tedy toto detekovat a vkládat další čištění nebo čistit při běhu vyšších vrstev programu kamery.

- Druhou možností jak kontrolovat dobu integrace, je počítat s předchozím čtením řádku jako s čistícím. Kamera je tak schopna zpracovávat větší množství snímků za stejný čas jako předchozí metoda.

Nevýhodou však je u rychlejšího vyčítání snímačů, kdy je potřeba pro ukládání pozic hran nalezených komparátorem zastavit řídicí hodiny snímače. Doba integrace je pak závislá na počtu nalezených hran. Toto se dá vyřešit omezením maximálního počtu nalezených hran (což vzhledem k paměti procesoru je stejně nutné) a korekční čekací smyčkou, která vždy upraví svoji dobu na dobu, kterou by trvala obsluha všech hran.

- Obdobou předchozího způsobu kontroly doby integrace by bylo použití čítače v režimu čítání strojových taktů. Časová smyčka určující dobu integrace by se startovala až v případě, že by čítač strojových taktů dospěl k určité hodnotě. Však potíží je, že takový čítač již není k dispozici. Tedy aspoň ne pro všechny typy snímačů. Pro typy snímačů, kde lze použít ze dvou generátorů CNT0 a CNT2 pouze jeden. Druhý by se mohl na toto hardwarové řízení integrační doby použít. Tímto způsobem je řešena korekce integrační doby v kameře se snímačem ILX554.

Vývojový diagram vrstvy řízení a sběru dat vypadá následovně:



Obr. 5.4 Vývojový diagram vrstvy řízení snímače a sběru dat

Po nalezení optických hran metodou komparace je v paměti uložen doplněk pozice jednotlivých hran na číslo 0x10000 hex (obsah čítače CNT1 při události komparace). Pro další zpracování je vhodné tento údaj zkorigovat na přesnou pozici komparované hrany vzhledem k prvnímu bodu vyčítaného řádku. Je tedy volána funkce která zajistí správnou korekci údaje. Jedná se o prosté odečtení 0x10000 - (pozice uložená v paměti) - (počet černých pixelů za aktivním řádkem). Funkce zároveň zajistí označení nalezené hrany jako vzestupné nebo sestupné a to uložením do části paměti, která je vyhrazena pro vzestupné resp. sestupné hrany

Vrstva řízení snímače a sběru dat tedy dává k dispozici informace o jasovém profilu vyčítaného řádku a pozice nalezených optických hran metodou komparace.

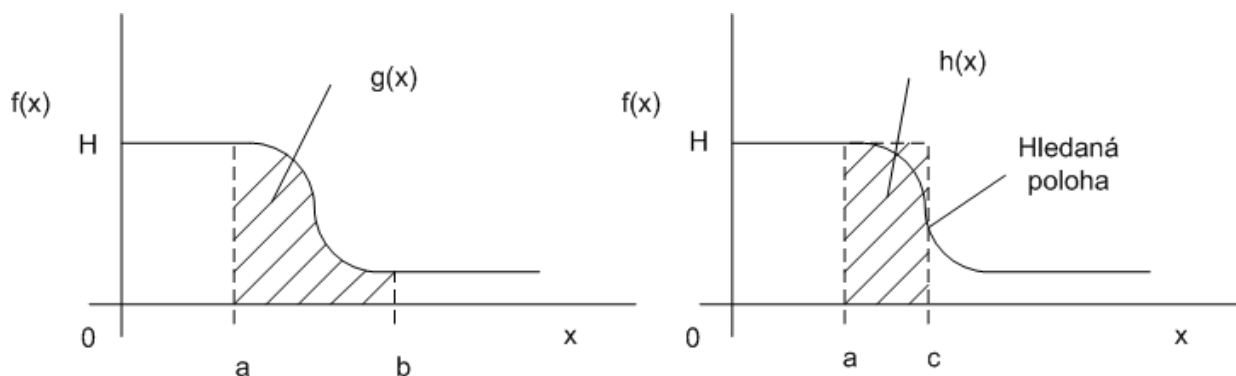
### 5.1.2 Předzpracování

Tato vrstva se zabývá výpočetním zpřesněním zjištěných poloh optických hran. Je zde implementován výpočet fotometrické interpolace, lineární interpolace a výpočet těžiště světelné stopy videosignálu.

Jako zdroj dat a informací pro výpočet slouží předchozí nižší vrstva sběru dat. K jednotlivým výpočtům je zapotřebí jasový profil řádku a pro zrychlení operací je nutná informace o polohách hran získaných komparační metodou. O zrychlení se zde mluví proto, že je již známa oblast optické hrany v řádku. Jednotlivé metody zpřesnění pozice hran pracují pouze s daty v okolí pozice dané komparační úrovní.

#### Fotometrická interpolace

Metoda fotometrické interpolace vychází z rovnosti ploch pod křivkou představující videosignál a obdélníku jehož strany tvoří horní úroveň hrany videosignálu a přesná poloha hledané hrany od počátku fotometrické interpolace. Situaci naznačuje obr. 5.5.



Obr. 5.5 Fotometrická interpolace hrany

Přesnou pozici optické hrany lze nalézt tam, kde platí rovnost:

$$g(x) = h(x) \quad (5.1)$$

kde  $g(x)$  a  $h(x)$  vyjadřují plochy. Rovnost ploch lze vyjádřit vztahem:

$$\int_a^b f(x) dx = H(c - a) \quad (5.2)$$

kde  $f(x)$  je obecná funkce, v tomto případě videosignál

a,b oblast hrany

c hledaná pozice optické hrany

H úroveň videosignálu odpovídající osvětlené části fotocitlivé vrstvy snímače

Pro hledanou pozici hrany lze tedy vyjádřit výsledný vztah pro výpočet fotometrické interpolace:

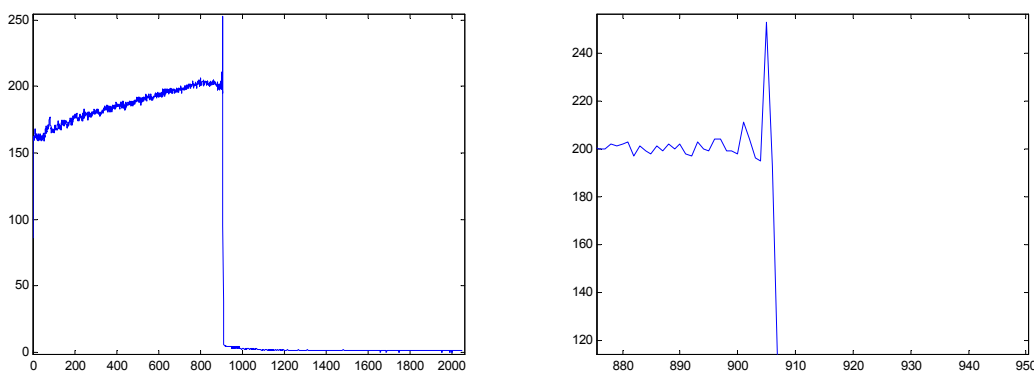
$$c = \frac{\int_a^b f(x) dx}{H} + a \quad (5.3)$$



Jelikož kamera vzorkuje videosignál, je třeba přejít na diskrétní verzi vztahu záměnou integrálu za sumu.

$$c = \frac{\sum_{x=a}^v f(x)}{H} + a \quad (5.4)$$

Výpočet však předpokládá průběh signálu bez lokálních překmitů (obr. 5.5) ze kterého je snadné zjistit začátek a konec optické hrany. To je bohužel jen teoretický případ, v praxi je nutno počítat s šumem, nehomogeností osvětlení a ohybovými jevy. Pro představu reálný snímek pořízený na navržené kamere a



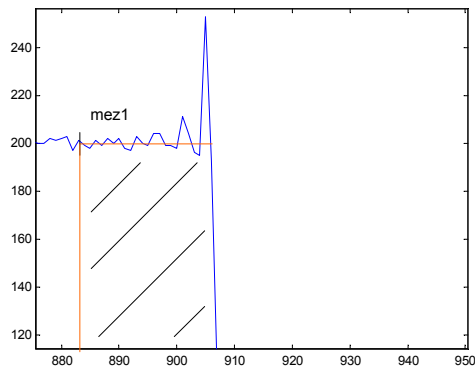
*Obr. 5.6 Reálný snímek optické hrany*

zvětšení ohybových jevů za objektem stínící snímač na obr. 5.6. Pro fotometrickou interpolaci je nutno zvolit začátek a konec optické hrany.

Existuje několik možností jak adaptivně zjistit polohu začátku a konce interpolace. Výčtem některé metody:

- pokles gradientu videosignálu - pro spolehlivost a opakovatelnost nesmí být signál příliš zatížen šumem.
- Klouzavý průměr  $n$  vzorků od hrany získané komparací a definovaná vzdálenost videosignálu od něj. Určení maxima resp. minima.
- Nebo počítání interpolace od počátku videosignálu v obr. 5.5 od  $x=0$ .
- V praxi se nejlépe osvědčilo uživatelem pevně definovat vzdálenost počátku a konce výpočtu interpolace od pozice pixelu nalezeného komparací. Uživatel tyto meze nastaví podle tvaru videosignálu a to nejlépe na stabilní místo mimo ohybové jevy nebo vady osvětlení.

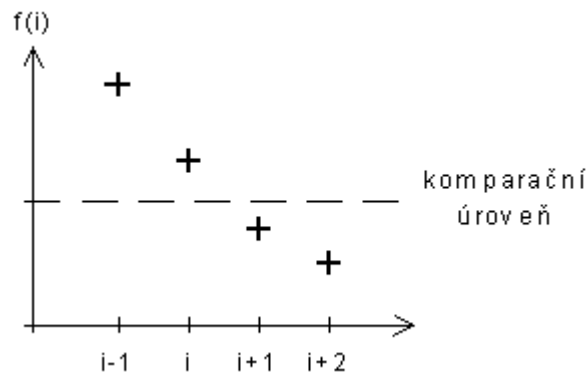
Úpravou výpočetního vztahu je, že signál, který odpovídá větší intenzitě osvětlení než signál v místě počátku interpolace je při výpočtu interpolace programově oříznut na hodnotu odpovídající počátku interpolace  $H$ .



Obr. 5.7 Ořznutí ohybových jevů ve videosignálu

### Lineární interpolace

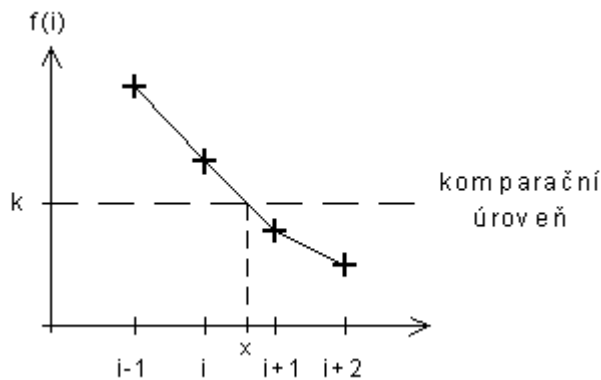
Lineární interpolace spočívá ve spřesnění průchodu videosignálu komparační úrovní



Obr. 5.8 Komparace signálu

Průchod signálu komparační úrovní leží mezi  $i$ -tým a  $i+1$ . vzorkem. Pro přesné určení průchodu komparační úrovní však ani jeden z těchto vzorků nevyhovuje. Řešením je použití interpolace.

Při lineární interpolaci jsou sousední vzorky spojeny přímkou.



Obr. 5.9 Komparace videosignálu při lineární interpolaci

Hledaná poloha průchodu signálu komparační úrovní je dána vztahem:

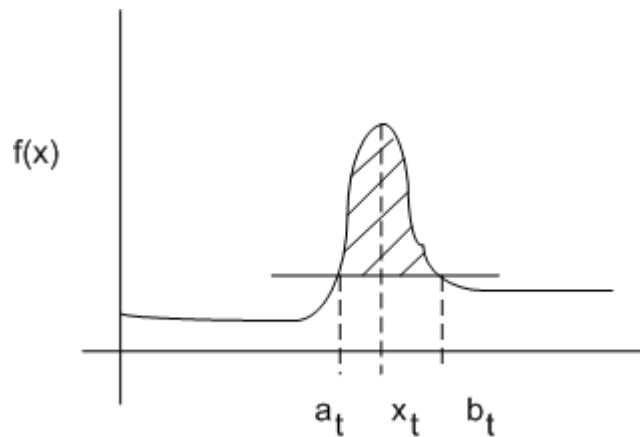
$$x = \frac{k - (i + 1)f(i) + if(i + 1)}{f(i + 1) - f(i)} \quad (5.5)$$

kde  $k$  je komparační úroveň

$f(i), f(i + 1)$  jsou hodnoty  $i$ -tého a  $i+1$  pixelu

### Těžiště videosignálu

V praxi může být nezajímavá pozice jednotlivých hran ve videosignálu, ale pouze přesná pozice měřeného předmětu. Příkladem může být osvětlení snímáče difusním zdrojem přes úzkou štěrbinu. Objekt může být hledán jednotlivými hranami videosignálu komparační metodou a pak pozici zpřesnit metodou fotometrické interpolace, ale v případě úzké špičky ve videosignálu je efektivnější využít metody nalezení přímo těžiště špičky ve videosignálu. K výpočtu se použije vztah pro výpočet těžiště homogenního rovinného obrazce ohraničeného grafem funkce  $y=f(x)$  a příslušnými úsečkami  $x=at, x=bt$ .



Obr. 5.10 Nalezení těžiště videosignálu

Platí:

$$x_t = \frac{\int_a^{b_t} xf(x) dx}{\int_a^{b_t} f(x) dx} \quad (5.6)$$

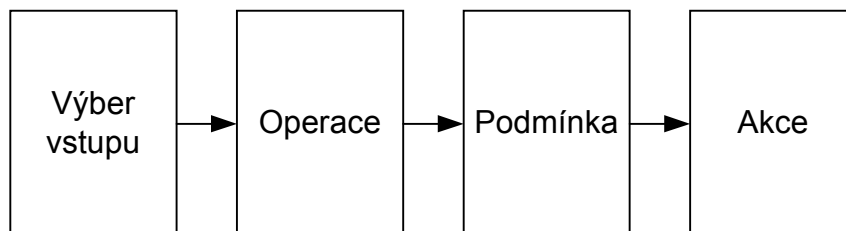
symbol integrálu lze pro diskrétní množinu dat nahradit sumou

$$x_t = \frac{\sum_a^i xf(x)}{\sum_a^i f(x)} \quad (5.7)$$

### 5.1.3 Měřicí výpočty a řízení procesu

Tato vrstva se zabývá uživatelem nastaveným způsobem zpracování získaných dat. Je zde implementováno rozhraní pomocí něhož uživatel nastaví chování kamery v procesu pro který je určena.

Způsob nastavení lze rozdělit následovně: uživatel vybere operand (pozice hrany, těžiště,..), operaci jaká se má s operandem provést (součet, rozdíl, žádná, průměr, ...), podmínku která je aplikována na výsledek operace a akci která se má provést (nastavení výstupu, komunikace po sériové lince, ...)



Obr. 5.11 Chování kamery

Nastavení jednotlivých bloků je uloženo v paměti EEPROM kamery a zůstává zachováno po odpojení napájení kamery. V programovém vybavení kamery se nastavování provádí pomocí těchto parametrů:

- kolik - parametr, který určuje kolik vstupů bude použito - 1-8
- pozice - 8 pozic

Tabulka 5: Pozice operandu

možný operand	parametr	Pozn.
Vzestupná hrana určená komparací	0x00-0x07	nižší půlbyte parametru odpovídá číslu nalezené hrany
Sestupná hrana určená komparací	0x10-0x17	nižší půlbyte parametru odpovídá číslu nalezené hrany
Vzestupná hrana určená interpolací dle režimu kamery	0x20-0x27	nižší půlbyte parametru odpovídá číslu nalezené hrany
Vzestupná hrana určená interpolací dle režimu kamery	0x30-0x37	nižší půlbyte parametru odpovídá číslu nalezené hrany

- operace

Tabulka 6: Operace

operace	parametr	Pozn.
součet operandů	0x0	
rozdíl operandů	0x1	odčítá se od operandu s nejnižším číslem

**Tabulka 6: Operace**

operace	parametr	Pozn.
průměr	0x3	aritmetický průměr operandů

- podmínka

**Tabulka 7: Podmínka**

podmínka	parametr	Pozn.
výsledek oprace je v intervalu <cislo1,cislo2>	0x0	
výsledek operace není v intervalu <cislo1,cislo2>	0x1	
výsledek operace je menší než číslo1	0x3	
výsledek operace je větší než číslo1	0x4	
výsledek operace je menší nebo rovno než číslo2	0x5	
výsledek operace je menší nebo rovno než číslo2	0x6	

- akcesplneno - akce která se provede je-li podmínka splněna
- akcenesplneno - akce která se provede není-li podmínka splněna

**Tabulka 8: Akce**

akce	parametr	Pozn.
nastav výstupy	0x00-0x03	dolní půlbyte se přepíše na univerzální výstupy
pošli znak na uart0	0x20	
pošli znak na uart1	0x30	
pošli výsledek operace na uart0	0x40	
pošli výsledek operace na uart1	0x50	

- cislo 1
- cislo 2
- znak

Uživatel je schopen pomocí této vrstvy definovat chování kamery v řídicím procesu.

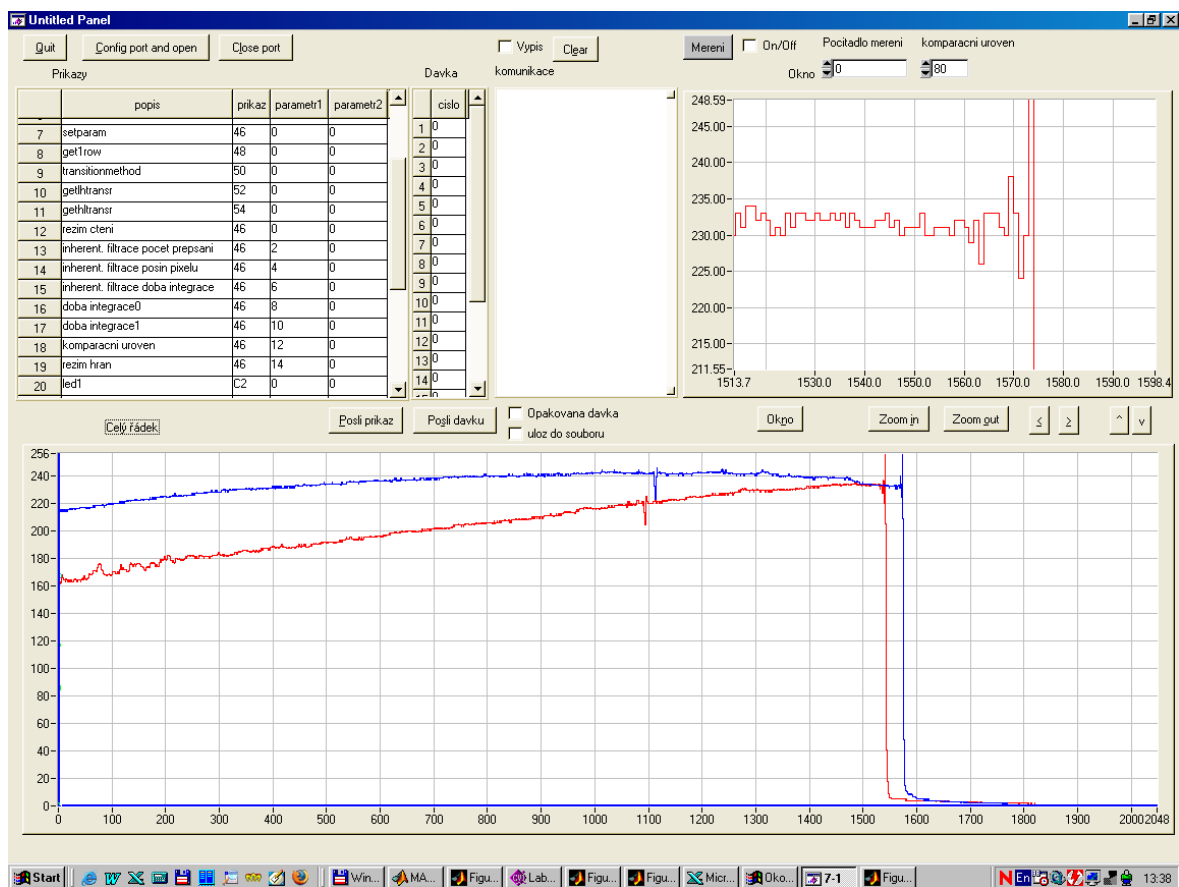
## 5.2 Programové vybavení PC

Ve vývojovém prostředí LabWindows CVI byl vytvořen zobrazovací a měřicí software pro komunikaci s navrženou kamerou. Zobrazovací software (dále zobrazovač) z části (omezení bude popsáno dále) podporuje hardwarovou vrstvu standardního protokolu navrženého panem Fulkou a je tedy schopen komunikovat i s ostatními kamerami které tento protokol podporují. Zobrazovat však dokáže pouze jednotlivé řádky (protokol podporuje plošné i řádkové kamery). Sériovou linkou se rozumí standard RS232 resp i jeho virtuální podoba, včetně hardwarového nebo softwarového řízení toku dat. Zobrazovač umožňuje posílání všech příkazů na hardwarové úrovni protokolu nebo definici vlastních příkazů.

Panel zobrazovače je rozdělen na tři části. Část příkazovou, komunikační a zobrazovací. V příkazové části jsou předdefinovány jednotlivé instrukce hardwarové vrstvy protokolu.

- Příkazová část - uživatel má možnost tvorby vlastních příkazů nebo jejich dávek, včetně jejich popisu.
- Komunikační část - výsledky a případný úspěch nebo neúspěch provedení příkazu je zobrazován v textovém okně komunikace.
- Zobrazovací - data načtená z kamery se zobrazí v zobrazovacích oknech, které dovolují zvětšení na detail.

Zobrazovač může pracovat v jednorázovém nebo kontinuálním režimu. Kontinuálním režimem se rozumí opakované posílání uživatelem definované dávky.



Obr. 5.12 Zobrazovací software

Na obrázku je zachycena situace měření polohy hrany triangulační metodou (červený a modrý půběh videosignálu od dvojího osvětlení). V pravé horní části je zvětšení ohybových jevů za clonou stínící část snímáče.

Jelikož nebylo prioritou psát univerzální zobrazovač pro všechny kamery používané v laboratoři videometrie, má výsledný zobrazovač některá omezení oproti standardu.

- Zobrazovač je schopen přijímat data pouze v podobě řádku.
- Délku řádku má pevně stanovenou na 2048 a jednotlivými body v grafu mohou být pouze velikosti BYTE (8bitů).
- Při žádosti o polohu hran je schopen přijmout data ve formátu integer (16 bitů) a float (32 bitů).
- Nepodporuje ošetření Timeoutů ani zabezpečení dat kontrolním součtem.

Zdrojové okomentované texty jsou však k dispozici a v případném zájmu použití zobrazovače na zásadně odlišný typ (např jiný počet pixelů nebo velikost slova reprezentující jeden pixel) kamery není zásadní problém kód upravit.

### 5.3 Stručný popis HW protokolu

- použitelný pro kamery na COM portu (RS-232, USB adaptéry, apod.)
- implementace tohoto protokolu není povinná, nicméně umožňuje použití obecné API knihovny, jednotné pro všechna zařízení, která jej dodržují.

- Komunikace je typu Master (PC) - Slave (kamera). Přenos iniciuje výhradně Master zasláním příkazu, Slave pouze odpovídá. Odpověď od Slave musí přijít do vypršení časového limitu, zadaného parametrem příkazu na SW úrovni. Poté může Master vysílat další příkazy. Pokud je třeba přenos příkazu nebo odpovědi dočasně přerušit, pak maximálně na dobu 200ms. Pokud přijímač zjistí přerušování příjmu na déle než 500ms, pak může příjem považovat za nedokončený a pokud je přijímačem Slave, pak může tento poslat odpověď s příslušným chybovým kódem (TimeoutError).

- Slave může přerušit vysílání PC tak, že vyšle odpověď Busy. PC by pak měl vysílání přerušit. Pokud přerušování z jakéhokoli důvodu není možné, pak není proti "pravidlům" pokud PC vysílání dokončí. Odpověď na dokončený příkaz se od Slave v tomto případě již nevyžaduje.

Standard dále definuje podobu příkazového rámce PC->kamera, rámec odpovědi, datové formáty, chybové instrukce a hardwarové instrukce. Pro bližší informaci viz příloha.

Výčet a stručný popis příkazů na HW úrovni

ReadyToReceive() - PC se dotazuje kamery, zda-li je nyní schopna přijímat povely o větší délce než 1 bajt.

Reset() - PC žádá kameru o uvedení do výchozího stavu

Identify(IDn) - Žádost o zaslání identifikačních údajů. Parametr IDn, určuje jaké údaje jsou požadovány

Get1Row(Row) - Žádost o zaslání řádku Row. Pokud je parametr Row=0, pošle se aktuální řádek

GetImage(FirstRow, BufferSize) - Žádost o zaslání (části) obrázku. Předpokládá se, že kamera interně vyčítá data po řádcích. Příkaz může být implementován i u řádkových snímačů, nicméně pro tento účel je zbytečně složitý.

## Programové vybavení

---

Get1Column(Column) - Žádost o zaslání sloupce Column. Chování je obdobné jako v případě příkazu Get1Row. Implementována pro snímače, které umožňují vertikální odečet dat.

SetWindow(FirstRow, FirstColumn, Rows, Columns) - Nastavení oblasti pro snímání dat.

UnsetWindow() - "odnastavení" oblasti pro vyčítání dat neboli nastavení oblasti na celou plochu snímače.

SetParam(ParamID, ParamData) - Nastavení parametru mapovaného na adrese ParamID na hodnotu ParamData.

GetParam(ParamID) - Načtení parametru mapovaného na adrese ParamID.

GetLHTransR(Row, TransitionNb)

GetHLTransR(Row, TransitionNb) - Dotaz na pozici TransitionNb-té hrany v řádku Row (LH - náběžná, HL - sestupná).

GetLRTransC(Column, TransitionNb)

GetRLTransC(Column, TransitionNb) - Podobně jako GetXXTransR. Zde se jedná o pozici hrany ve sloupci (LR = zleva doprava, RL = zprava doleva).

TransitionMethod(Method, CompLevel, Averaging) - Nastavení používané metody pro zjištění polohy hrany v obraze.

InstructionEx(InstrExCode, InstrExParams) - Odeslání speciální instrukce, která není součástí standardu.

TextExchange(OutText) - Odeslání textového řetězce. Implementace této instrukce je zcela individuální (podle daného zařízení)

Poznámka: Délka datové hlavičky pro příkazové rámce směrem PC -> kamera je přímo určena kódem instrukce. Konkrétně nejvyššími dvěma bity tj. 00 - žádná datová hlavička, 01 a 10 - 1 bajt datové hlavičky a 11 - 2 bajty datové hlavičky. Tím vzniká prostor pro 32 příkazů, ke kterým nejsou připojena žádná data (např. Reset, ReadyToReceive, ..), dále 64 příkazů, které mohou obsahovat až 255 datových bajtů a 32 příkazů, které mohou obsahovat až 65535 datových bajtů (pro náročné korekční nastavení, klíčování v obraze, speciální instrukce kamery apod.).

Motto: Kdo se bojí nesmí do lesa



### 6 Výsledky měření

Tato kapitola se zabývá praktickým měřením dat pomocí sestavené kamery s procesorem ATmega64. Popisuje jakým způsobem byla data měřena. Jak byly uspořádány měřicí soustavy a kde a jakým způsobem byla data zpracována. Budou naznačeny možné způsoby korekcí chyb, které použitými metodami měření a vlastním měřením mohou vzniknout. Měření probíhalo na snímači ILX554 (fy. SONY).

#### 6.1 Polohy hran

V programovém vybavení kamery je k dispozici měření pozice optické hrany pomocí komprace videosignálu s nastavenou hodnotou napětí. Tímto způsobem lze měřit pozici optické hrany s přesností jednoho pixelu snímače (šířka pixelu 14 $\mu$ m).

Pro zpřesnění výsledků kamera nabízí výpočet fotometrické a lineární interpolace. Pomocí těchto interpolací dostáváme přesnější (subpixelovou) informaci o poloze hledané optické hrany.

Kamera nenabízí (vinou nedostatečné velikosti datové paměti) průměrování videosignálu pro částečné potlačení šumů. Proto byl vyčítán jasový profil řádky do PC, kde byly snímky průměrovány a dále zpracovány. Při hledání optických hran v PC byla data zpracovávána stejnou výpočetní metodou jako v kameře. Pro porovnání účinnosti průměrování byly informace o polohách hran získaných pomocí kamery a PC vzájemně srovnány.

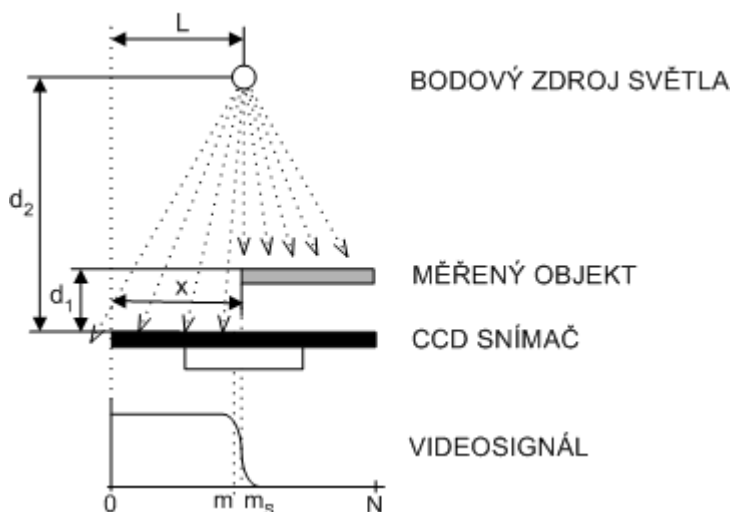
##### 6.1.1 Měření s jedním bodovým zdrojem světla

###### Uspořádání měřicí soustvy.

Celá měřicí soustava byla připevněna na konstrukci z duralových dílců šroubově spojených dohromady a to tak, aby se jednalo o kompaktní celek. Právě kompaktnost do jisté míry zaručí opakovatelnost měření a jistou nezávislost na rušivých vlivech z okolního prostředí (vibrace, jednorázové mechanické děje,...).

Pro posun clony byla použita pojezdová lavice s krokem 1 $\mu$ m. Ta byla také spojena s celou konstrukcí kamery a světelného zdroje. Při jednotlivých měřeních bylo nastavení polohy posuvné lavice zpětně kontrolováno optickým inkrementálním čidlem, které je součástí lavice.

**Měření převodní charakteristiky posunu clony**



Obr. 6.1 Uspořádání soustavy při měření převodní charakteristiky posunu clony

V obr. 6.1 jsou definovány míry a ty jsou vypsaný do. N je počet pixelů snímače, pro ILX554 je to 2048.

Pro výpočet polohy clony při osvětlení bodovým zdrojem platí (dle[1]):

$$m_s = \frac{d_1}{d_2}(L - m) + m \tag{6.1}$$

Výsledek je v pixelech, pokud se požaduje poloha v mm je nutno vztah vynásobit roztečí pixelů snímače  $p$ :

$$m_s = \left(\frac{d_1}{d_2}(L - m) + m\right)p \tag{6.2}$$

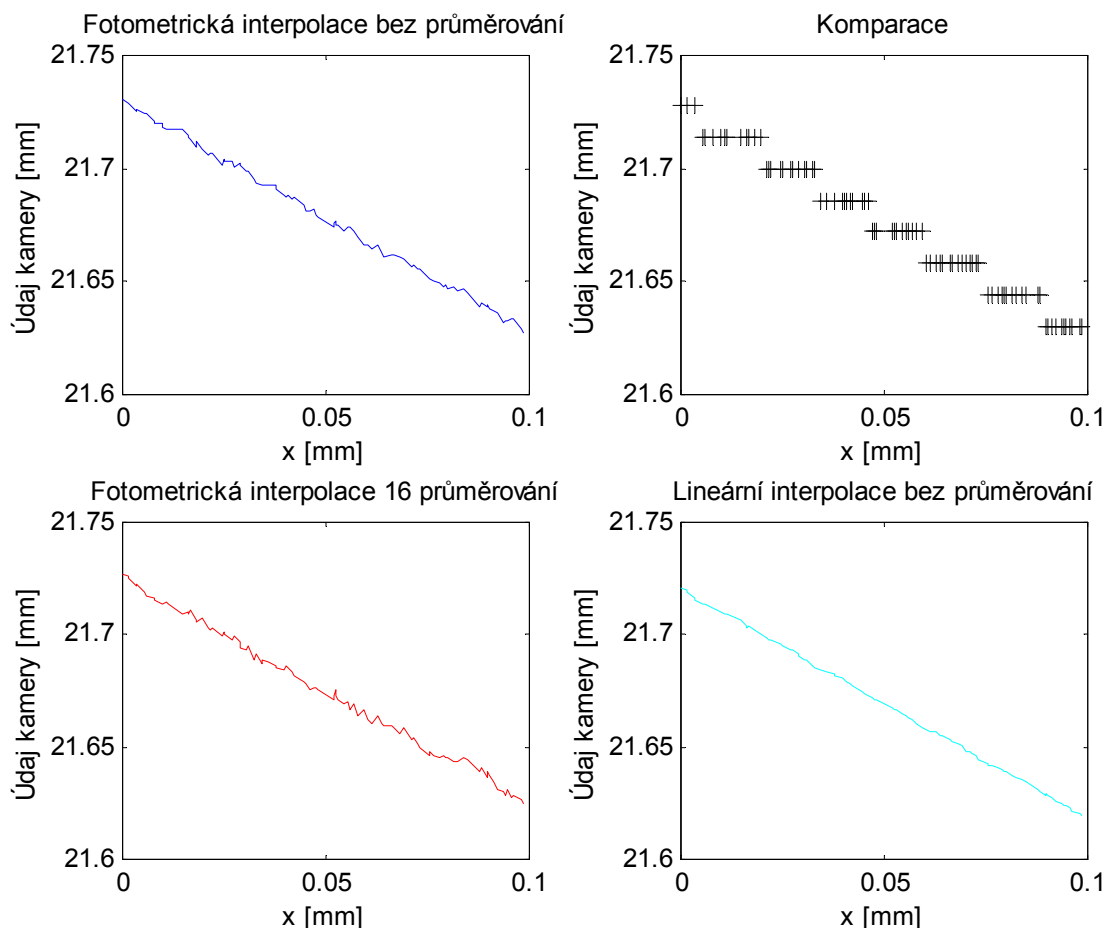
Rozložení a umístění jednotlivých částí soustavy je popsáno v tabulce 9. Byly změřeny převodní charakteristiky pro posuvy clony s krokem 1um na rozsahu 0,1mm a dále pak rozsah celého snímače tj. 26mm s krokem 0,1mm. Jednotlivé získané závislosti jsou vyneseny do grafů.

**Tabulka 9: Konfigurace měřicí soustavy měření převodní charakteristiky 1**

Údaj	symbol	Hodnota	Poznámka
Vzdálenost bodového zdroje od snímače	$d_2$	98 mm	Vzdálenost od citlivé vrstvy senzoru
Vzdálenost clony od snímače	$d_1$	6 mm	Vzdálenost od citlivé vrstvy senzoru
Pozice zdroje vzhledem k fotocitlivým pixelům snímače	L	2048 pixelů (26 mm)	Zdroj se nachází nad koncem fotocitlivé vrstvy senzoru
Krok posunu clony		1 um	
Rozsah posunu clony		0,1 mm	

**Tabulka 9: Konfigurace měřicí soustavy měření převodní charakteristiky 1**

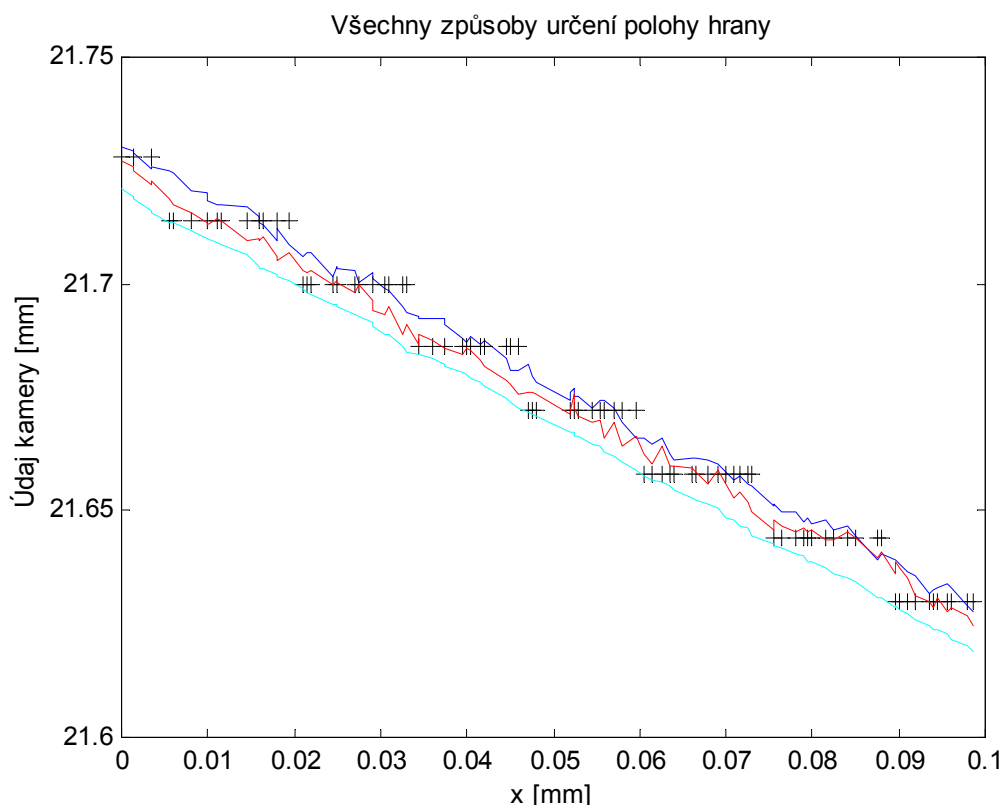
Údaj	symbol	Hodnota	Poznámka
Absolutní rozsah posunu clony		20,4-20,3mm	Absolutní vzdálenost okraje clony vzhledem k počátku snímáče



*Obr. 6.2 Převodní charakteristiky kamery pro posuv 0,1mm*

V obrázku jsou vyneseny převodní charakteristiky kamery. Jednotlivé způsoby hledání pozice hrany jsou od sebe odděleny do samostatných grafů.

Dále jsou vyneseny převodní charakteristiky kamery do společného grafu (obr. 6.3). Jsou zde barevně odlišeny jednotlivé způsoby hledání a zpřesnění pozice optických hran. Jako nejvhodnější metoda pro zpřesnění výsledku se jeví lineární interpolace.

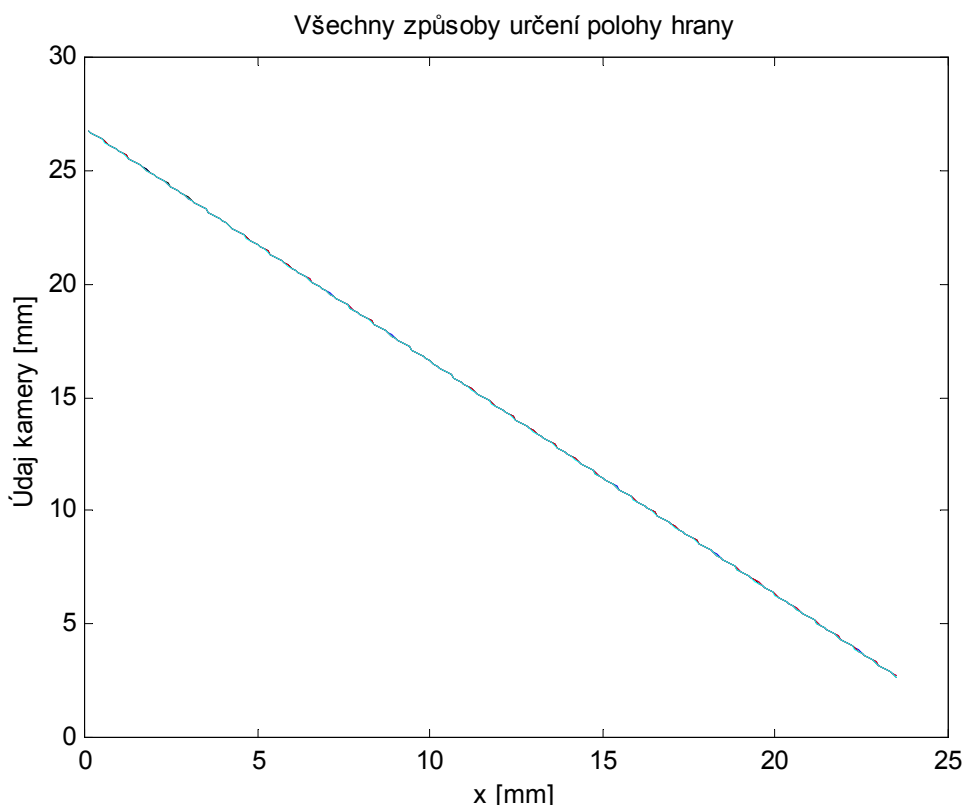


Obr. 6.3 Převodní charakteristika kamery pro posuv 0,1mm - společně všechny implementované metody

Dále byla změřena převodní charakteristika celého rozsahu snímače. Clona stínící snímač byla posouvána podél celého snímače (25mm) s krokem 0,1 mm. Charakteristika je vynesena do obr. 6.4

**Tabulka 10: Konfigurace měřicí soustavy měření převodní charakteristiky 2**

Údaj	symbol	Hodnota	Poznámka
Vzdálenost bodového zdroje od snímače	$d_2$	98 mm	Vzdálenost od citlivé vrstvy senzoru
Vzdálenost clony od snímače	$d_1$	6 mm	Vzdálenost od citlivé vrstvy senzoru
Pozice zdroje vzhledem k fotocitlivým pixelům snímače	L	2048 pixel (26 mm)	Zdroj se nachází nad koncem fotocitlivé vrstvy senzoru
Krok posunu clony		100 um	
Rozsah posunu clony		25 mm	
Absolutní rozsah posunu clony		0-25 mm	Absolutní vzdálenost okraje clony vzhledem k počátku snímače



Obr. 6.4 Převodní charakteristika celého rozsahu snímače

Do měření převodních charakteristik lze vnést chyby, které pak ovlivní výsledky měření. Některé jsou v dalším textu uvedeny a pokud to lze, je naznačeno možné řešení jejich korekcí.

### Chyby vzniklé nepřesným uspořádáním měřicí soustavy

Těmito chybami se rozumí nepřesné zjištění rozměrů pro vyjádření výstupní hodnoty kamery. Lze je vyjádřit nejistotou typu B určení těchto rozměrů.

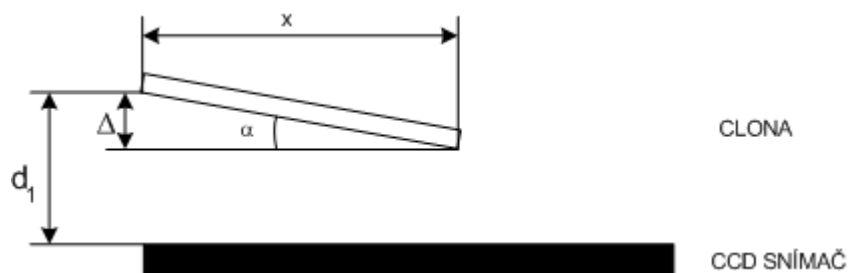
Údaj polohy hrany se vypočítá dle 6.2

Nejistotu typu B měření lze vypočítat:

$$u_{Bms} = \left| \frac{\partial m_s}{\partial d_1} \Delta d_1 \right| + \left| \frac{\partial m_s}{\partial d_2} \Delta d_2 \right| + \left| \frac{\partial m_s}{\partial m} \Delta m \right| + \left| \frac{\partial m_s}{\partial L} \Delta L \right| = \left| p \left( \frac{1}{d_2} (L - m) \Delta d_1 \right) \right| + \left| p \left( \frac{d_1}{d_2^2} (L - m) \Delta d_2 \right) \right| + \left| p \left( \frac{d_1}{d_2} \right) \Delta L \right| + \left| p \left( \frac{d_1}{d_2} \right) \Delta m \right| \quad (6.3)$$

### Chyba vzniklá změnou vzdáleností clony od snímače

Ze vztahu pro výpočet polohy hrany lze usoudit, že změřený údaj je závislý na stálosti parametrů soustavy. Změny  $d_2$ ,  $L$  nebo  $p$  lze během měření téměř vyloučit. Jejich změny mohou být způsobeny teplotní roztažností nebo mechanickými vlastnostmi měřicí soustavy. Tyto jevy nemusí být zanedbatelné, závisí však pouze na kvalitě konstrukce měřicí soustavy. Podstatnější je vyjádřit možnou závislost výsledku měření na odklonu clony vzhledem ke snímači při vzájemném posuvu.



Obr. 6.5 Změna vzdálenosti  $d_1$  odklonem clony od snímače

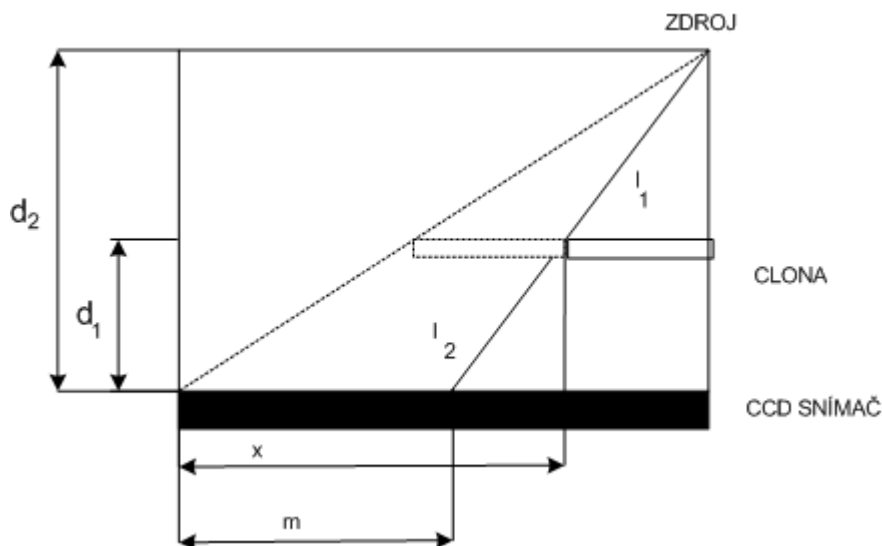
Platí:

$$\Delta = \frac{\tan \alpha}{x} \quad (6.4)$$

Pokud se úhel odklonu během posuvu clony nemění, má chyba způsobená odklonem ve vztahu 6.2 lineární charakter. Při znalosti odklonu lze takto vzniklá chyba korigovat.

### Chyba vzniklá nesprávným nastavením komparační úrovně

Při požití bodového zdroje osvětlení dochází při různých polohách clony vzhledem ke snímači ke změně vzdálenosti kterou musí paprsek světla urazit mezi snímačem a zdrojem. Respektive vzdálenost mezi fyzickou hranou clony a snímače. Tato vzdálenost je určující pro charakter ohybových jevů na překážce. Je-li nevhodně zvolena komparační úroveň dochází k nelineárnímu zkreslení převodní charakteristiky.



Obr. 6.6 Změna délky paprsku světla od hrany clony ke snímači

Platí dle pythágorovy věty:

$$(l_1 + l_2)^2 = d_1^2 + m^2 \quad (6.5)$$

## Výsledky měření

---

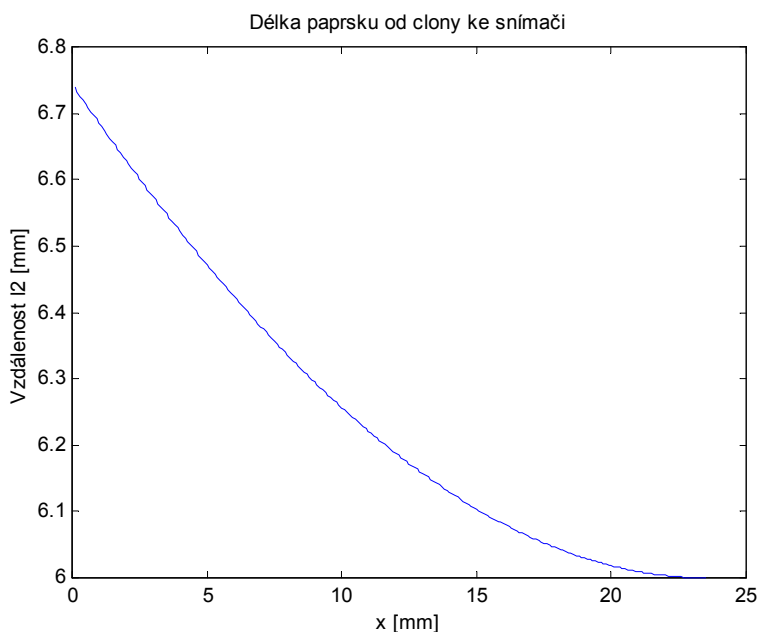
dle podobnosti trojúhelníků:

$$\frac{m-x}{d_2} = \frac{x}{d_1-d_2} \quad (6.6)$$

Po dosazení a úpravách:

$$l_2 = \sqrt{d_1^2 + \left(\frac{xd_2}{d_1-d_2} + x\right)^2} - \sqrt{x^2 + (d_1-d_2)^2} \quad (6.7)$$

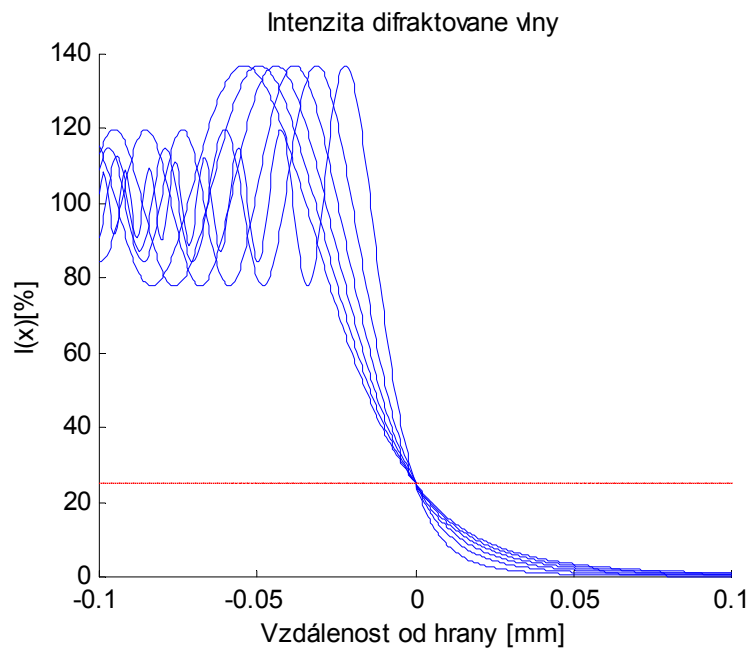
Závislost délky paprsku mezi fyzickou hranou clony a snímače na posunu clony podél snímače je vynesena na obr. 6.7.



Obr. 6.7 Závislost délky paprsku od clony ke snímači na poloze clony

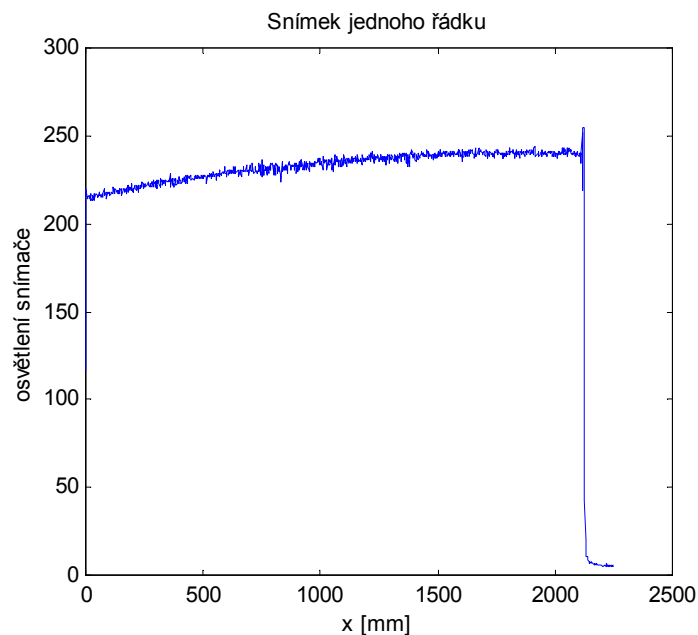
Ohybové jevy světla na překážce popisuje Fresnelovo přiblížení a lze vyjádřit Fresnelovými integrály [1]. Ty vyjadřují závislost intenzity osvětlení plochy za překážkou na vzdálenosti od skutečné polohy hrany. V obr. 6.8 jsou vyneseny rozložení intenzit osvětlení při různých vzdálenostech překážky od roviny na kterou světlo dopadá.

Z obr. 6.8 je zřejmé, že komparační úroveň je nejlépe zvolit do 25% intenzity dopadajícího světla na snímač. Při nedodržení této podmínky se projeví nelineární chyba v převodní charakteristice. Ta je způsobená již zmíněným prodloužením délky paprsku od fyzické polohy hrany ke snímači.



Obr. 6.8 Rozložení intenzity osvětlení na ploše za překážkou při ohybu světla na překážce (pro různé vzdálenosti překážky od plochy dopadu)

Chyba způsobená určením komparační úrovně mimo 25% intenzity dopadajícího světla na snímač souvisí s vyzařovací charakteristikou bodového zdroje. Protože na snímač nedopadá po celé délce stejné množství světla, je nutno komparační úroveň korigovat tak, aby pro každou polohu posunu clony souhlasila 25% úroveň komparace. Tato adaptivita v kameře však implementována nebyla. Výsledná převodní charakteristika je tedy zatížena nelineární chybou určením komparační úrovně.



Obr. 6.9 Snímek jednoho řádku při osvětlení bodovým zdrojem umístěným nad pixelem 2048



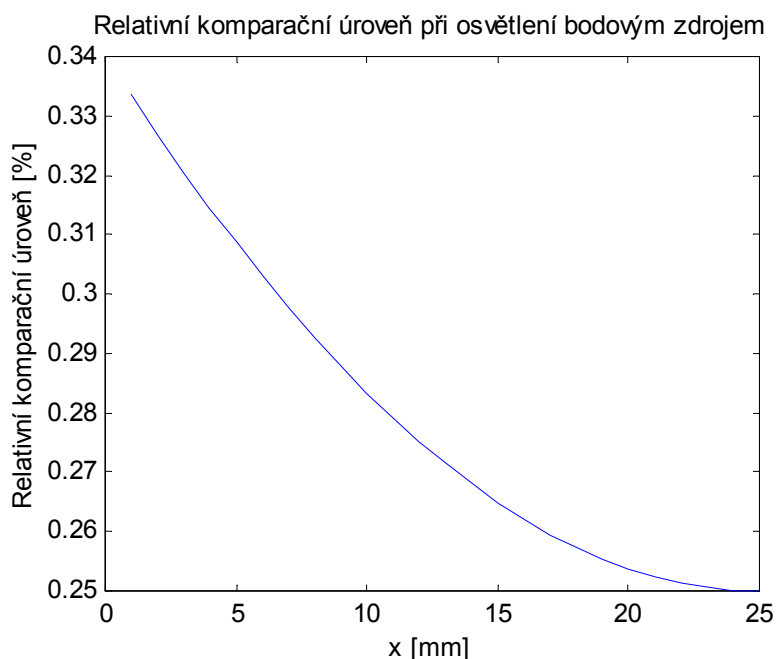
## Výsledky měření

---

V kameře je nastavena po celou dobu stejná komparační úroveň jako při odběru prvního snímku (hrana clony je pod zdrojem světla, dále se posouvá směrem od zdroje). Přiblížením vyzařovací charakteristiky reálného zdroje k ideálnímu bodovému zdroji lze vyjádřit závislost poklesu intenzity dopadajícího záření:

$$E_V = \frac{d}{dS} \Phi_V = \frac{I_V}{r^2} \cos^3 \alpha [\text{lx}] \quad (6.8)$$

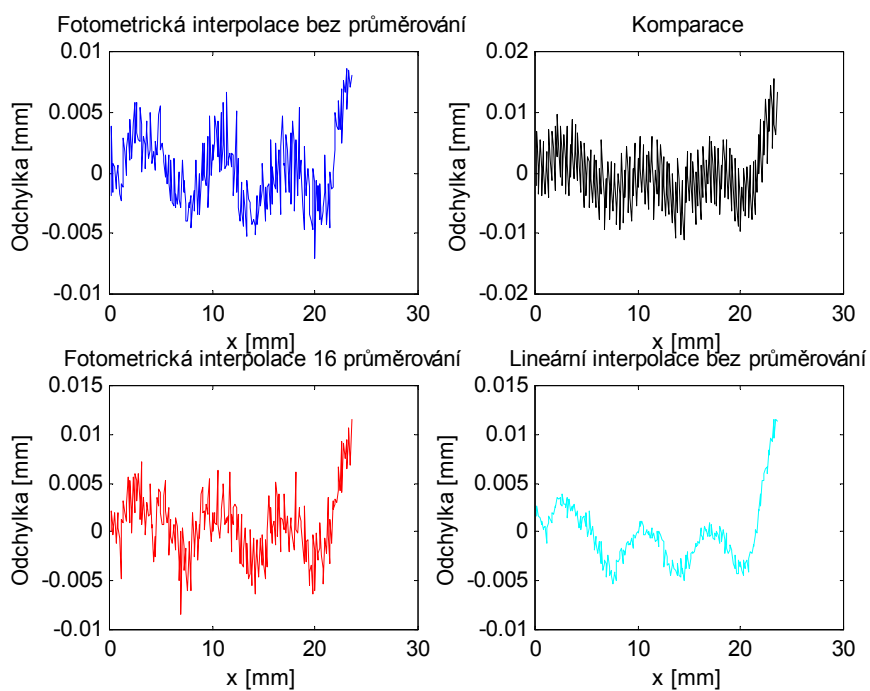
kde  $\alpha$  se při stávající konfiguraci měřicí soustavy pohybuje od 0st do 14st. Komparační úroveň se vzhledem k maximální intenzitě hledané hrany mění právě s závislostí třetí mocninou cosinu obr. 6.10.



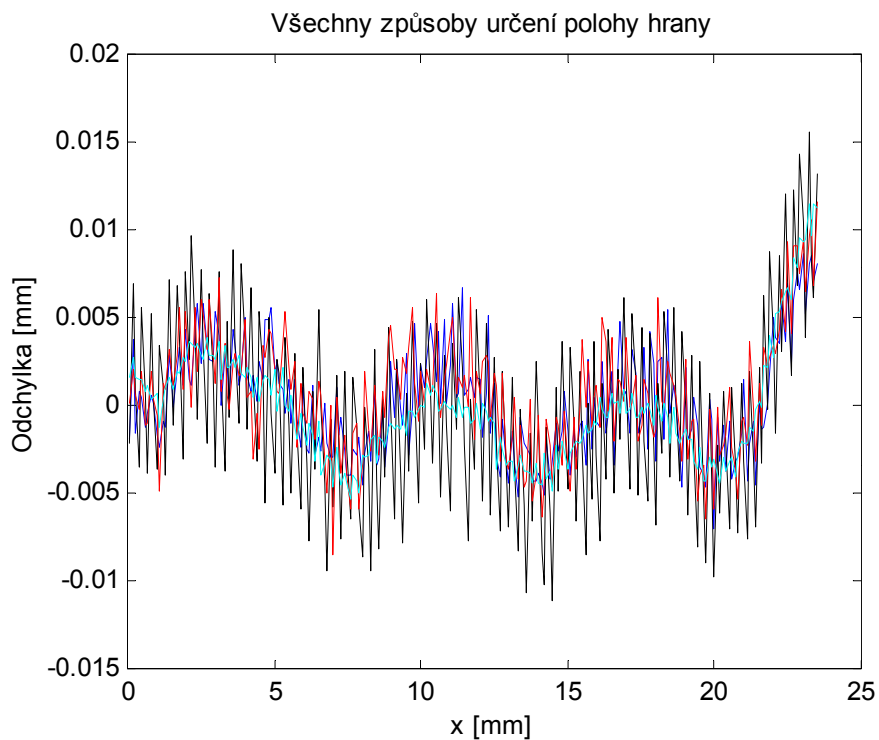
Obr. 6.10 Závislost změny relativní komparační úrovně na osvětlení bodovým zdrojem

### Odchytky od linearity pro reálná data

Převodní charakteristika změřená dle tabulky 10 byla proložena přímkou a do obr. 6.11 vyneseny absolutní odchytky od lineárního prokladu.



Obr. 6.11 Odchylky od linearity jednotlivými metodami hledání hran



Obr. 6.12 Odchylky od linearity ve společném grafu

V zobrazených závislostech odchylek od linearity je vidět jistá pravidelnost s periodou 7mm. Ta je způsobena mechanickým uspořádáním pojezdové lavice. Pravděpodobně se jedné o

## Výsledky měření

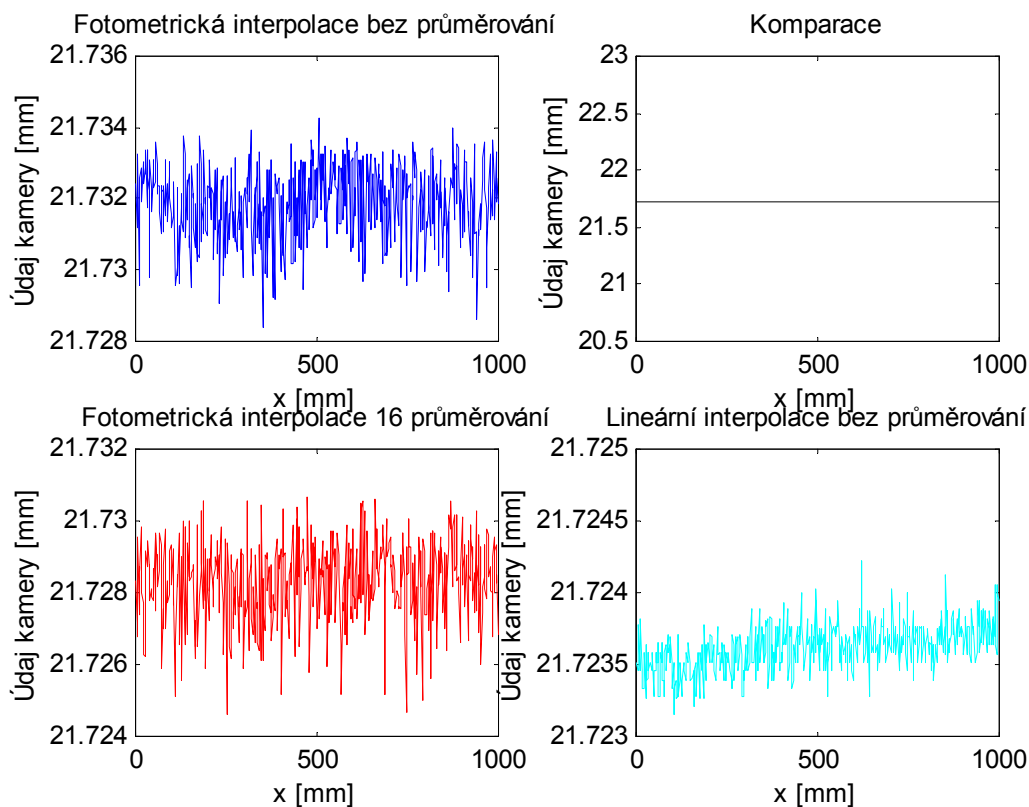
nepřesné uložení šroubu pohybujícího vozíkem. Vozík, který drží clonu stínící snímač se naklání, pohybuje clonou a tím vnáší chybu do měření.

### Opakovatelnost výsledku při stejné poloze hrany

Dále byla změřena opakovatelnost výsledku při stejné poloze clony. Odtud je určena i nejistota měření s kamerou typu A.

Tabulka 11: Konfigurace měřící soustavy měření opakovatelnosti

Údaj	symbol	Hodnota	Poznámka
Vzdálenost bodového zdroje od snímače	$d_2$	98 mm	Vzdálenost od citlivé vrstvy senzoru
Vzdálenost clony od snímače	$d_1$	6 mm	Vzdálenost od citlivé vrstvy senzoru
Pozice zdroje vzhledem k fotocitlivým pixelům snímače	L	0 mm	Zdroj se nachází nad začátkem fotocitlivé vrstvy senzoru
Počet měření		1000	



Obr. 6.13 Opakovatelnost měření pro stálou polohu clony

Opakovatelnost měření pro jednotlivé způsoby hledání optických hran je zanesena v obr. 6.13

**Tabulka 12: Směrodatné odchylky opakovaných měření**

Směrodatná odchylka	Hodnota[mm]	pozn.
fotometrická interpolace kamera	0,00109	
fotometrická interpolace PC	0,001174	
lineární interpolace kamera	0,000454	
lineární interpolace PC	0,000336	

Směrodatné odchylky přímo vypovídají o nejistotě měření typu A, nejistotu typu B dle 6.3 lze číselně vyjádřit 2.3836e-004 mm. Kombinovaná rozšířená nejistota měření při koeficientu rozšíření 2 je rovna:

$$U(ms) = 2u_c = 2\sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (6.9)$$

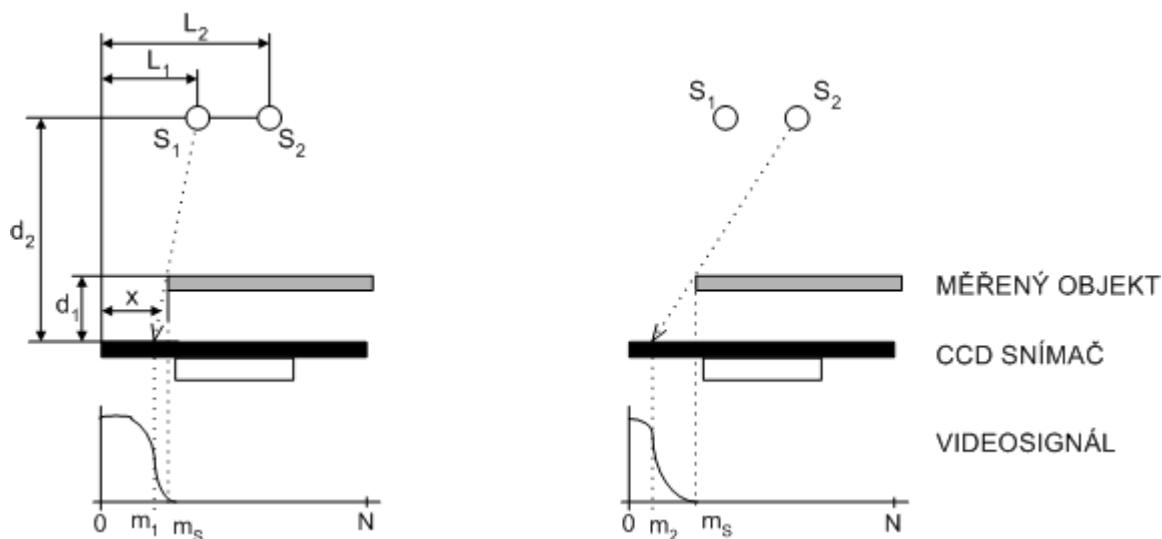
**Tabulka 13: Rozšířené nejistoty měření**

nejistota	Hodnota[mm]	pozn.
fotometrická interpolace kamera	0,002231	
fotometrická interpolace PC	0,002238	
lineární interpolace kamera	0,001018	
lineární interpolace PC	0,000814	

### 6.1.2 Měření polohy pomocí dvou bodových zdrojů metodou triangulace

Při měření polohy hrany s jedním bodovým zdrojem je nutné znát vzdálenost objektu od snímače. Měření je na změnu tohoto rozměru citlivé. Použitím dvou bodových zdrojů a měřením triangulační metodou odpadá nutnost znalosti této vzdálenosti.

Měření převodní charakteristiky posunu clony



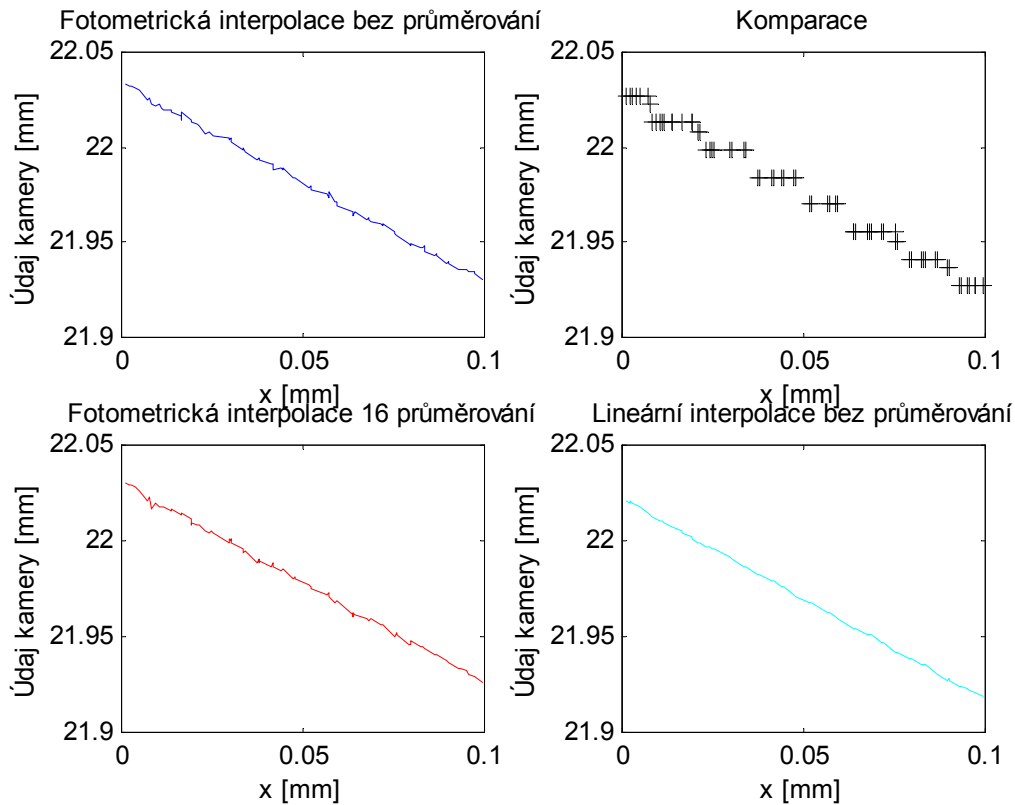
Obr. 6.14 Uspořádání soustavy při měření převodní charakteristiky triangulační metodou  
Pro výpočet polohy clony metodou triangulace platí (dle[1]):

$$m_S = \frac{L_1 m_2 - L_2 m_1}{L_1 - L_2 + m_2 - m_1} \quad (6.10)$$

Rozložení a umístění jednotlivých částí soustavy je popsáno v tabulce 14. Byly změřeny převodní charakteristiky pro posuvy clony s krokem 1um na rozsahu 0,1mm a dále pak rozsah celého snímače tj. 26mm s krokem 0,1mm. Jednotlivé získané závislosti jsou vyneseny do grafů.

Tabulka 14: Konfigurace měřicí soustavy měření převodní charakteristiky triangulace

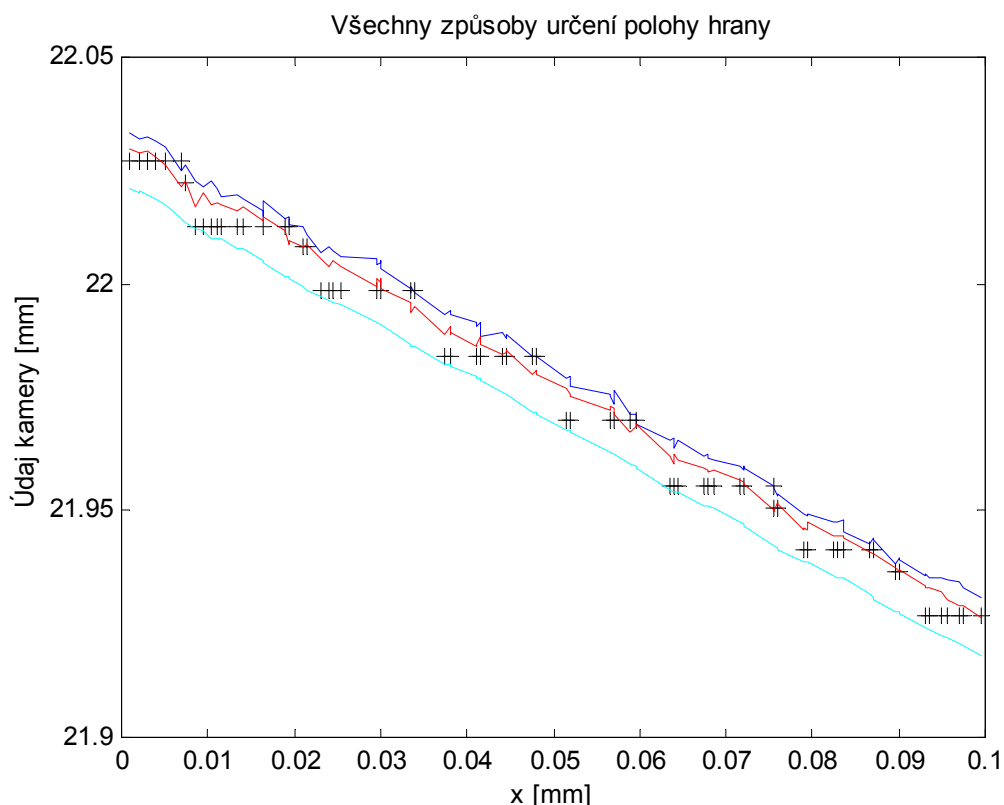
Údaj	symbol	Hodnota	Poznámka
Vzdálenost bodového zdroje od snímače	$d_2$	98 mm	Vzdálenost od citlivé vrstvy senzoru
Vzdálenost clony od snímače	$d_1$	1 mm	Vzdálenost od citlivé vrstvy senzoru
Pozice zdroje 1 vzhledem k fotocitlivým pixelům snímače	$L_1$	2048 pixel (26 mm)	Zdroj se nachází nad koncem fotocitlivé vrstvy senzoru
Pozice zdroje 2 vzhledem k fotocitlivým pixelům snímače	$L_2$	620 pixel (20 mm)	
Krok posunu clony		1 um	
Rozsah posunu clony		0,1 mm	
Absolutní rozsah posunu clony		0-25 mm	Absolutní vzdálenost okraje clony vzhledem k počátku snímače



Obr. 6.15 Převodní charakteristiky kamery pro posuv 0,1mm metodou triangulace

V obr. 6.15 jsou vyneseny převodní charakteristiky kamery. Jednotlivé způsoby hledání pozice hrany jsou od sebe odděleny do samostatných grafů.

Dále jsou vyneseny převodní charakteristiky kamery do společného grafu (obr. 6.16). Jsou zde barevně odlišeny jednotlivé způsoby hledání a zpřesnění pozice optických hran. Jako nejvhodnější metoda pro zpřesnění výsledku se jeví lineární interpolace. V obrázku je vidět zjemnění i při použití prosté komparace.

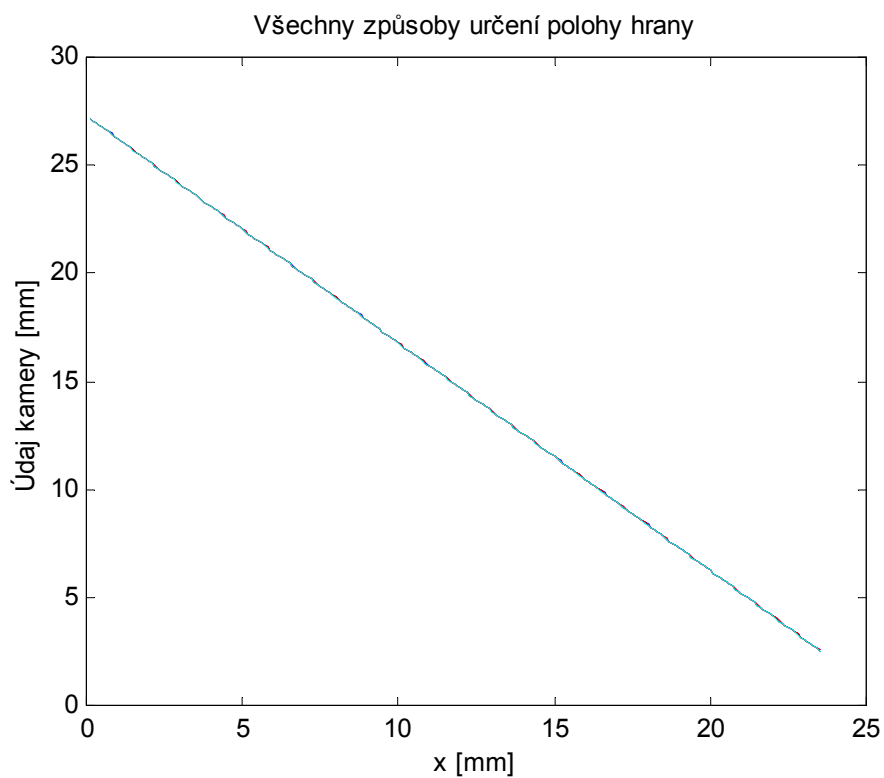


Obr. 6.16 Převodní charakteristika kamery pro posuv 0,1mm metodou triangulace - společně všechny implementované metody

Dále byla změřena převodní charakteristika celého rozsahu snímače. Clona stínící snímač byla posouvána podél celého snímače (25mm) s krokem 0,1 mm. Charakteristika je vynesena do grafu obr. 6.17.

**Tabulka 15: Konfigurace měřicí soustavy měření převodní charakteristiky triangulace**

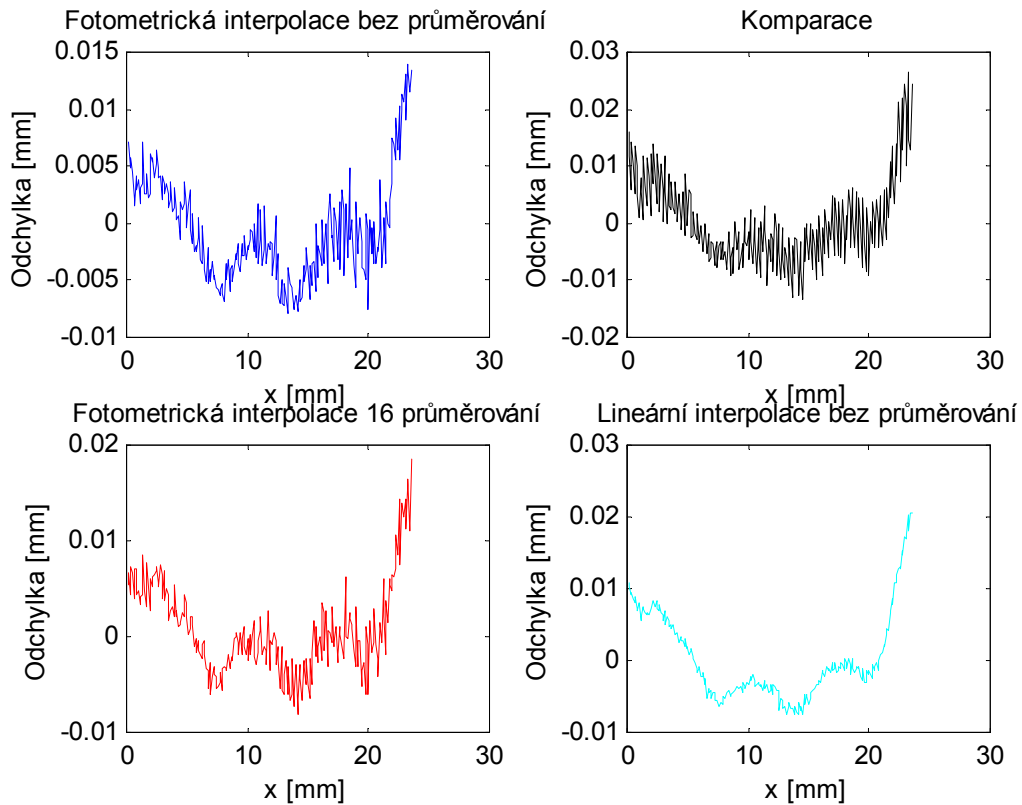
Údaj	symbol	Hodnota	Poznámka
Vzdálenost bodového zdroje od snímače	$d_2$	98 mm	Vzdálenost od citlivé vrstvy senzoru
Vzdálenost clony od snímače	$d_1$	1 mm	Vzdálenost od citlivé vrstvy senzoru
Pozice zdroje 1 vzhledem k fotocitlivým pixelům snímače	$L_1$	0 mm	Zdroj se nachází nad začátkem fotocitlivé vrstvy senzoru
Pozice zdroje 2 vzhledem k fotocitlivým pixelům snímače	$L_2$	20 mm	
Krok posunu clony		100 um	
Rozsah posunu clony		25 mm	
Absolutní rozsah posunu clony		0-25 mm	Absolutní vzdálenost okraje clony vzhledem k počátku snímače



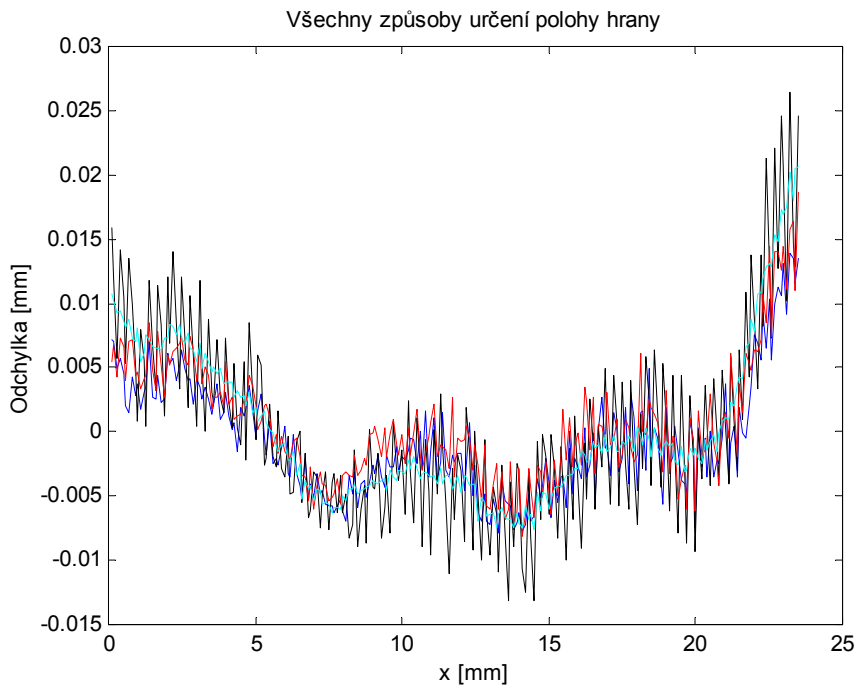
*Obr. 6.17 Převodní charakteristika celého rozsahu snímače metodou triangulace*  
**Odchyłky od linearity pro reálná data**

Převodní charakteristika změřená dle tabulky 15 byla proložena přímkou a do grafu (obr. 6.18 a obr. 6.19) vyneseny absolutní odchyłky od lineárního prokladu.





Obr. 6.18 odchytky od linearity jednotlivými metodami hledání hran metodou triangulace



Obr. 6.19 Odchytky od linearity ve společném grafu metodou triangulace

## Výsledky měření

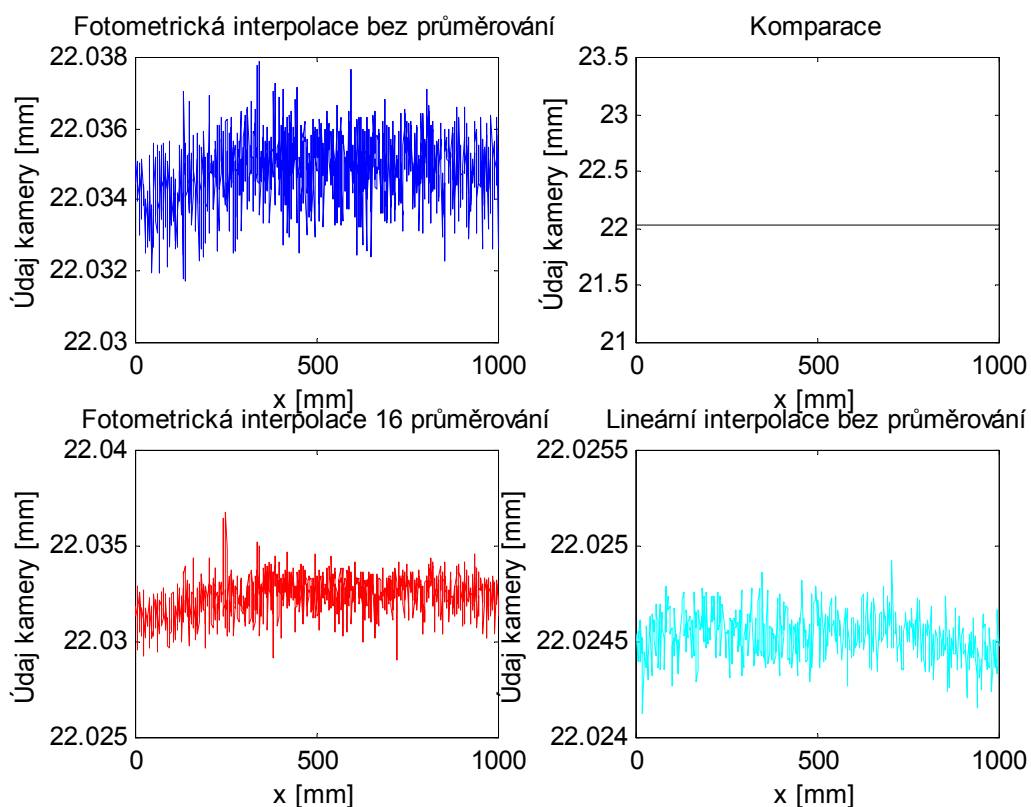
V zobrazených závislostech odchylek linearity je opět vidět pravidelnost s periodou 7mm způsobenou posuvem pojezdové lavice. Jistá podobnost parabolickému průběhu naznačuje možnost chyby způsobené nesprávně nastavenou komparační úrovní (popsáno u jednoho bodového zdroje).

### Opakovatelnost výsledku při stejné poloze hrany

Dále byla změřena opakovatelnost výsledku při stejné poloze clony.

Tabulka 16: Konfigurace měřící soustavy měření opakovatelnosti

Údaj	symbol	Hodnota	Poznámka
Vzdálenost bodového zdroje od snímače	$d_2$	98 mm	Vzdálenost od citlivé vrstvy senzoru
Vzdálenost clony od snímače	$d_1$	6 mm	Vzdálenost od citlivé vrstvy senzoru
Pozice zdroje vzhledem k fotocitlivým pixelům snímače	L	2048 pixel (26 mm)	Zdroj se nachází nad koncem fotocitlivé vrstvy senzoru
Počet měření		1000	



Obr. 6.20 Opakovatelnost měření pro stálou polohu clony metodou triangulace

**Tabulka 17: Opakování měření triangulace při jedné poloze clony**

Směrodatná odchylka	Hodnota[mm]	pozn.
fotometrická interpolace kamera	0,0008188	
fotometrická interpolace PC	0,00087145	
lineární interpolace kamera	0,0001823	
lineární interpolace PC	0,00012174	

Rozšířené nejistoty měření triangulační metodou v tabulce 18.

**Tabulka 18: Rozšířené nejistoty měření 2**

nejistota	Hodnota[mm]	pozn.
fotometrická interpolace kamera	0,002231	
fotometrická interpolace PC	0,002238	
lineární interpolace kamera	0,001018	
lineární interpolace PC	0,000814	

Motto: Komu se nelení tomu se zelení

### 7 Závěr

Při návrhu měřicí řádkové kamery jsem vycházel z diplomové práce ing. Včeláka [2]. Jím navržený jednoduchý měřicí systém jsem postavil na výkonějším procesoru ATmega64 a obohatil o nový způsob řízení snímačů pomocí generátorů PWM.

Mnou navržená řádková kamera splňuje požadované vlastnosti. Je schopna smíšeně (binárně i víceúrovňově) zpracovávat videosignál, má implementovanou inherentní filtraci. V jejím programovém vybavení jsem vytvořil funkce, které zpracovávají videosignál a zpřesňují výsledné polohy hledaných hran metodou fotometrické a lineární interpolace a pomocí výpočtu těžiště plochy ohraničené funkcí vypočítávají polohu středu světelné stopy. Do kamery jsem implementoval část hardwarové vrstvy standardního komunikačního protokolu navrženého Petrem Fulkou, na jehož návrhu jsem se aktivně podílel. Dále jsem navrhl a sestavil zobrazovací software pro nadřazené PC, které svou univerzálností je schopno komunikovat s obdobnými typy řádkových kamer, které podporují std. hardwarový protokol.

Návrh kamery je modulární a univerzální. Podporuje všechny typy řádkových snímačů, které byly v době návrhu (jaro 2005) v laboratoři videometrie k dispozici. Jako vedlejší efekt modulárního systému je skutečnost, že pokud se nepoužije jako zdroj signálu CCD řádkový snímač, lze jej využít jako systému pro sběr dat do rychlostí jednotek MHz s kapacitou dat cca 4KB.

Pro modulární systém jsem navrhl rozměry jednotlivých modulů 6x6cm, a to z důvodu již používaných mechanických dílů na upevnění objektivu. Systém podporuje již dříve navržené rozhraní k modulům snímače (ing. Radil [1]), a je tedy schopen s takovými moduly pracovat. Dále jsem navrhl a nechal vyrobit mechanické díly na upevnění snímače a objektivu.

Pro měření jsem vyjádřil rozšířené nejistoty měření.

Součástí zadání diplomové práce bylo ověřit zvýšení paměťové kapacity kamery procesorem ARM7 a v kladném případě takovou kameru sestavit. Možnost zvýšení kapacity tu je, však po dohodě s vedoucím diplomové práce a z časových důvodů jsem se konstrukcí takové kamery nezabýval. V současné době se tímto v laboratoři videometrie zabývá pan Chudoba.

## 8 Literatura

- [1] Radil T.: Měření rozměru a polohy lineárním CCD snímačem bez projekčního objektivu – Diplomová práce;ČVUT FEL – K338, 2002
- [2] Včelák J.: Optoelektronická měrka s CCD snímačem - Diplomová práce;ČVUT FEL – K338, 2003
- [3] Kejzlar L. - Fischer J.: Inherent Signal Preprocessing in the Line CCD Sensor IDAACS'2003
- [4] Česák P.: Autonomní videoprocessor pro zpracování videosignálu a řízení osvětlovačů ČVUT FEL – K338, 2005
- [5] Suchánek P.: Jednotka sběru dat s procesorem ARM7-TDMI - Diplomová práce;ČVUT FEL – K338, 2003
- [6] Vacek R.: Demonstrační lineární CCD kamera a její aplikace – Diplomová práce;ČVUT FEL – K338, 1999
- [7] Katalogové listy výrobců použitých součástek

## **9 Seznam použitých zkratek a symbolů**

### 10 Seznam obrázků

2.1 Možné koncepce měřicího systému	4
Měření s projekčním objektivem stínovou metodou	5
Měření bez projekčního objektivu stínovou metodou	6
Bodový světelný zdroj nad rovinou	6
Měření rozměru objektu s obdélníkovým průřezem pomocí bodového zdroje světla	7
Triangulační metoda měření objektu s obdélníkovým průřezem	7
Rozdíl detekovaného stínu snímáči s různou příčnou šířkou pixelů ( <i>a, b</i> -rozměry pixelů)	8
Úhel příčného odklonění měřeného objektu	9
Rozdíl detekovaného stínu vzhledem k prostorové rychlosti změny rozměru měřeného objektu	10
Scanování objektu	10
Příklad inherentní filtrace	11
Inherentní filtrace, červená původní signál, modrá vyfiltrovaný signál	12
Vnitřní uspořádání snímáče	15
Potřebné průběhy pro řízení snímáčů a) bez el. uzávěrky b) s el. uzávěrkou	15
Definice stejnosměrné složky výstupního napětí <i>V<sub>os</sub></i> a saturačního výstupního napětí <i>V<sub>sat</sub></i>	16
Vnitřní uspořádání TCD1205	17
Potřebné průběhy pro řízení snímáčů a) bez el. uzávěrky b) s el. uzávěrkou	17
Definice stejnosměrné složky výstupního napětí <i>V<sub>os</sub></i> a saturačního výstupního napětí <i>V<sub>sat</sub></i>	18
Vnitřní uspořádání ILX554	19
Časové průběhy potřebné pro řízení ILX554 a) v režimu CDS b) v režimu SHA	19
Blokové schéma upínacího obvodu	22
Metoda ovzorkování černých pixelů	22
Obecné blokové schéma kamery s procesorem ATmega	24
Vyčítací smyčka a kontrola vyčtení celého řádku z CCD snímáče	25
Rozšíření datové paměti ATmega162	26
Sestavení modulů tvořících kameru	27
Zapojení snímáčové desky s ILX554	27
Zapojení konektoru mezi snímáčovou a základní deskou kamery	28
Schéma zapojení bloku procesoru na základní desce kamery	29
Schéma zapojení obvodu ovzorkování černé	32
Schéma zapojení bloku AFE na základní desce kamery	32
Zapojení konektoru mezi základní a komunikační deskou a deskou univerzálních vstupů	33
Opticky oddělený univerzální číslicový vstup	34
Opticky oddělený univerzální číslicový výstup	35
K ilustraci běhu programu při vyčítání řádku.	39
Katalogový průběh výstupu ILX554	40
Porovnání signálu ze snímáče při zastavovaných (červeně) a nezastavovaných (modře) řídicích hodinách	41
Vývojový diagram vrstvy řízení snímáče a sběru dat	43
Fotometrická interpolace hrany	44
Reálný snímek optické hrany	45
Oříznutí ohybových jevů ve videosignálu	46
Komparace signálu	46
Komparace videosignálu při lineární interpolaci	47
Nalezení těžiště videosignálu	47

## Seznam obrázků

---

<i>Chování kamery</i>	48
<i>Zobrazovací software</i>	51
<i>Uspořádání soustavy při měření převodní charakteristiky posunu clony</i>	55
<i>Převodní charakteristiky kamery pro posuv 0,1mm</i>	56
<i>Převodní charakteristika kamery pro posuv 0,1mm - všechny implementované metody</i>	57
<i>Převodní charakteristika celého rozsahu snímače</i>	58
<i>Změna vzdálenosti odklonem clony od snímače</i>	59
<i>Změna délky paprsku světla od hrany clony ke snímači</i>	59
<i>Závislost délky paprsku od clony ke snímači na poloze clony</i>	60
<i>Rozložení intenzity osvětlení na ploše za překážkou při ohybu světla na překážce</i>	61
<i>Snímek jednoho řádku při osvětlení bodovým zdrojem umístěným nad pixelem 2048</i>	61
<i>Závislost změny relativní komparační úrovně na osvětlení bodovým zdrojem</i>	62
<i>Odchylky od linearity jednotlivými metodami hledání hran</i>	63
<i>Odchylky od linearity ve společném grafu</i>	63
<i>Opakovatelnost měření pro stálou polohu clony</i>	64
<i>Uspořádání soustavy při měření převodní charakteristiky triangulační metodou</i>	66
<i>Převodní charakteristiky kamery pro posuv 0,1mm metodou triangulace</i>	67
<i>Převodní charakteristika kamery pro posuv 0,1mm metodou triangulace - všechny</i>	68
<i>Převodní charakteristika celého rozsahu snímače metodou triangulace</i>	69
<i>odchylky od linearity jednotlivými metodami hledání hran metodou triangulace</i>	70
<i>Odchylky od linearity ve společném grafu metodou triangulace</i>	70
<i>Opakovatelnost měření pro stálou polohu clony metodou triangulace</i>	71



## **11 Seznam příloh**