

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická

Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering

Ing. Jiří Hozman, Ph.D.

Optimalizace vzorkovací struktury obrazového senzoru

Optimization of the Sampling Structure of the Image Sensor

Summary

This contribution describes the problem of the relationship between the sampling structure of the image sensor and quality of the output image of the imaging system. It is an interdisciplinary research field including the topics from human and animal vision anatomy and physiology, through physics of an imaging systems, theory of the linear systems, particularly from the point of view of the system transfer functions, advanced signal processing, up to 2D image processing and integrated circuits layout design.

The first part of the presentation describes an introduction and the theory of the transfer functions because these functions have some relationship to the sampling structure and quality of the output image of the system. There was used also concept of the computation of the resulting MTF (Modulation Transfer Function) of the system, i.e. the sensor MTF and the MTF of the sampling process. There are several approaches how to obtain the OTF (MTF, PTF - Optical [Modulation, Phase] Transfer Function) including 2D (3D) case.

The second part of the presentation describes the following methods: image sensor OTF computation based on the definition of the pixel shape and sampling grid, computation of the MTF based on the contrast modulation evaluation, computation of the MTF based on the deconvolution and MTF measurement based on the LSF - Line Spread Function (ESF - Edge Spread Function). From the theoretical point of view we have computed the detector MTF for the set of different pixel shapes. The uniform pixel sensitivity distribution was used within the all sections. The linear spatial invariant systems were used. MTF of the linear spatial variant system has been partially solved, e.g. for the case of the log-polar arrangement of the sensor or for the retina like sensors utilizing the retina structures from animals.

The third part of the presentation describes obtained results. There were tested the different geometrical structures of an area image sensor, based on finding of optimal MTF, e.g. to have Nyquist spatial frequency as high as possible and minimum and small peaks beyond the Nyquist spatial frequency, that represent aliasing. Detecting and sampling structures like rhombus may offer an improved performance. There was tested a sensitivity distribution also. The Gauss distribution sensitivity seems to be an optimal case. There were also found alternative configuration of image sensor structure using so called log-polar arrangement which is similar to the retina. There was also described experimental verification of the selected theoretical results on the automatic system for MTF measurement in the MEOPTA-OPTIKA (stock company), in Prerov in the Czech Republic.

Finally, the overview of the main results is presented as the main conclusion and further more general conclusions achieved in this research are also summarised.

Souhrn

Tato prezentace popisuje problém vztahu mezi vzorkovací strukturou obrazového senzoru a kvalitou výstupního obrazu zobrazovacího systému. Jedná se o interdisciplinární problematiku zahrnující takové oblasti jako anatomii a fyziologii vidění člověka a živočichů, fyziku zobrazovacích systémů, přes teorii 2D lineárních systémů, zejména z hlediska přenosových funkcí, pokročilé metody zpracování signálu, až po zpracování obrazu a návrh struktur integrovaných obvodů používaných v oblasti zobrazování.

První část prezentace obsahuje úvod do problematiky a souhrn nezbytné teorie přenosových funkcí, protože tyto přenosové funkce mají bezprostřední vztah k uspořádání vzorkovací struktury obrazového senzoru a též ke kvalitě výstupního obrazu zobrazovacího systému. Je zde popsán koncept výpočtu výsledné MTF (modulační přenosové funkce) systému, tj. MTF vlastního senzoru a MTF vzorkovacího procesu. Je prezentováno několik možných přístupů, jak získat jednotlivé přenosové funkce, počínaje OTF (MTF, PTF - optická [modulační, fázová] přenosová funkce) zahrnující 2D (3D) případy.

Ve druhé části prezentace jsou popisovány použité metody: výpočet OTF senzoru na základě definice geometrického tvaru elementárního detektoru (pixelu) a vzorkovací struktury, výpočet MTF, který je založen na vyhodnocení přenosu kontrastu danou zobrazovací soustavou, výpočet MTF na základě dekonvoluce a konečně získání MTF pomocí měření profilů souvisejících přenosových funkcí, tj. LSF - čárová rozptylová funkce (ESF - hranová rozptylová funkce). Na základě uvedených metod byly vypočítány MTF elementárního detektoru pro různé geometrické tvary. Při výpočtu bylo předpokládáno rovnoměrné rozložení citlivosti po ploše elementárního detektoru (pixelu). Dále byly použity při výpočtech lineární prostorově invariantní systémy. MTF byla řešena pro speciální případ tzv. log-polar uspořádání senzoru, resp. pro senzory, které využívají podobných struktur, jako mají sítnice živočichů.

Třetí část prezentace popisuje podrobněji vybrané výsledky. Jednak je to problematika geometrického tvaru a celkové struktury obrazového senzoru z hlediska optimální MTF, což má souvislost s Nyquistovým limitem a tudíž i s aliasingem. Výsledkem je pak tvar elementárního detektoru ve tvaru kosočtverce. Z hlediska rozložení citlivosti po ploše se jeví jako optimální Gaussovo rozložení. Je zde popisováno také experimentální ověření vybraných teoretických výsledků a to v rámci vytvořeného vyhodnocovacího systému MTF optických soustav ve společnosti Meopta-optika, s.r.o. v Přerově na Moravě.

Na závěr je prezentován přehled nejdůležitějších výsledků a jsou uvedeny přínosy řešení uvedené problematiky pro další aktivity v dané oblasti výzkumu.

Klíčová slova: obrazový senzor, 2D vzorkování, kvalita obrazu, zobrazovací systémy, přenosové funkce, přenos kontrastu, OTF, MTF, PTF, PSF, LSF, ESF, aliasing, rozložení citlivosti

Keywords: image sensor, 2D sampling, image quality, imaging systems, transfer functions, contrast transfer, OTF, MTF, PTF, LSF, ESF, aliasing, sensitivity distribution

České vysoké učení technické v Praze

Název: Optimalizace vzorkovací struktury obrazového senzoru

Autor: Ing. Jiří Hozman, Ph.D.

Počet stran: 22

Náklad: 150 výtisků

© Jiří Hozman, 2008

ISBN 80-01-

Obsah

1	Úvod	6
2	Přehled použitých metod	7
	2.1 Teoretická odvození včetně návazného teoretického rozboru	7
	2.2 Vytvoření modelu a simulace prostřednictvím tohoto modelu	11
	2.3 Využití a modifikace již stávajících metod dekonvoluce obrazu	13
	2.4 Realizace experimentů ověřujících poznatky z uvedených postupů.....	14
3	Výsledky	15
4	Závěr	18
	Použitá literatura.....	20
	Ing. Jiří Hozman, Ph.D.	22

1. Úvod

Současné prostředky a metody pro snímání a zpracování obrazových dat se odlišují především v tom, jaké jsou výchozí požadavky na kvalitu výstupního obrazu. Vzhledem k tomu, že u zobrazovacích systémů v lékařství je v současné době velká pozornost věnována aplikacím v digitální radiografii, tj. i aplikacím s tzv. *Flat Panel Detectors (FPD)*, je třeba se věnovat podstatě zobrazení těchto soustav. Vzhledem k tomu, že se jedná o aplikaci nábojově vázaných struktur CCD nebo CMOS senzorů, které jsou např. opatřeny scintilační vrstvou z důvodu převodu RTG záření na viditelné, budeme se zabývat souvislostmi mezi optickými a elektrooptickými zobrazovacími systémy.

Snahou je nalezení analogií mezi optickými a elektrooptickými zobrazovacími systémy. Důvod je celkem zřejmý. Optické zobrazovací systémy, jsou již dostatečně popsány a jsou k dispozici jak matematický, tak i fyzikální aparát k řešení takovýchto soustav, ať již z hlediska analýzy, či syntézy. Z hlediska posuzování kvality optických zobrazovacích systémů jsou kritéria také známa. To vše nás vede k myšlence použít takovýchto dostupných prostředků pro analýzu, syntézu a posuzování kvality elektrooptických zobrazovacích systémů. Typickým představitelem parametrů, ze kterých lze odvodit kvalitativní ukazatele, jsou přenosové vlastnosti zobrazovacích soustav jako bodová rozptylová funkce (PSF), rozptylová funkce rozhraní (LSF), hranová rozptylová funkce (ESF) a optická přenosová funkce (OTF), ze které je možné určit modulační přenosovou (MTF) a fázovou přenosovou funkci (PTF). Vztahy mezi těmito funkcemi jsou velmi užitečné, např. z hlediska odvozování MTF obrazového senzoru apod. Proto je v prezentaci věnována této problematice dosti značná pozornost. Takovýmto aparátem je pak možné určit limit z hlediska vstupních prostorových frekvencí, míru výskytu aliasingových složek na výstupu, optimální rozložení citlivosti obrazového bodu senzoru, určovat míru rušivých efektů v důsledku překrývání spekter, definovat různá kritéria kvality zobrazovacího procesu apod.

Z hlediska dostupných publikovaných prací lze konstatovat, že současný stav je charakterizován následujícími oblastmi výzkumu:

- je snaha vyvinout takové senzory, které by plně nahradily funkci sítnice oka u člověka [1],
- realizace obrazových senzorů s proměnným rozlišením, nebo obrazový senzor s elektronicky rekonfigurovatelným uspořádáním elementárních detektorů [3],
- prostorové vzorkování a souvislost s aliasingem [6] a kvalitou obrazu [4], jistá optimalizace z hlediska procesu vzorkování je popisována v [5],
- aliasing, souvislost s OTF a MTF a možnosti potlačování, resp. předcházení aliasingu jsou popisovány v [7], [8] a [9],
- hlavní problematika disertační práce je obsažena v souboru publikací [10], [11], [12] velmi komplexně naznačuje východiska a provádí odvození

souvislostí mezi lineárními prostorově-invariantními a prostorově-variantními zobrazovacími systémy,

- publikace [13] je důležitá z hlediska svého zaměření na odvození a měření profilu citlivosti elementárního detektoru,
- druhou zásadní kapitolou disertační práce je tematika dekonvoluce a to zejména za účelem získání OTF, resp. následně MTF a PTF, viz [14] a [15],
- jednotlivé dosažené výsledky jsou dokumentovány v publikacích autora a to [19] až [25],
- komplexně je pak problematika zpracována v disertační práci autora [26].

Z výše uvedeného přehledu vyplývá, že v žádném dostupném pramenu nebyl k dispozici ucelený rozbor problematiky optimalizace vzorkovací struktury obrazového senzoru se zřetelem na tvar elementárního detektoru a možnosti použití metod dekonvoluce pro určení přenosových funkcí těchto systémů. Analýza tvaru elementárního detektoru nebyla uvedena v žádném dostupném pramenu vůbec.

Hlavním cílem prezentace je tudíž optimalizace snímacího rastru za účelem dosažení co nejvyšší objektivně definovatelné detailové rozlišovací schopnosti s maximálně možným potlačením vznikajících rušivých aliasingových struktur. Konkrétně to znamená provést podrobnou analýzu přenosových vlastností zobrazovacích soustav s důrazem na geometrické uspořádání obrazového senzoru, jeho charakteristiky a parametry s možností využití nových charakteristik pro nová uspořádání obrazových senzorů.

2. Přehled použitých metod

Jako základní nástroje ke zpracování uvedeného tématu byly použity následující metody a přístupy.

2.1 Teoretická odvození včetně návazného teoretického rozboru

Pro teoretická odvození a následný rozbor je zásadní použití konceptu přenosových funkcí pro optické a elektro-optické soustavy. Přenosová funkce $H(u, v)$ se v zobrazovacích soustavách označuje jako optická přenosová funkce, neboli *OTF* (*Optical Transfer Function*). Fourierovým obrazem impulsové odezvy $h(x, y)$ je vyjma speciálních případů symetrie *PSF*, obecně komplexní funkce *OTF*

$$OTF \equiv F \{h(x, y)\} = |H(u, v)| e^{j\phi(u, v)}.$$

Přenosová funkce $H(u, v)$ je komplexní, má tedy modul a fázi. Modul *OTF* se označuje jako modulační přenosová funkce, neboli *MTF* (*Modulation Transfer Function*)

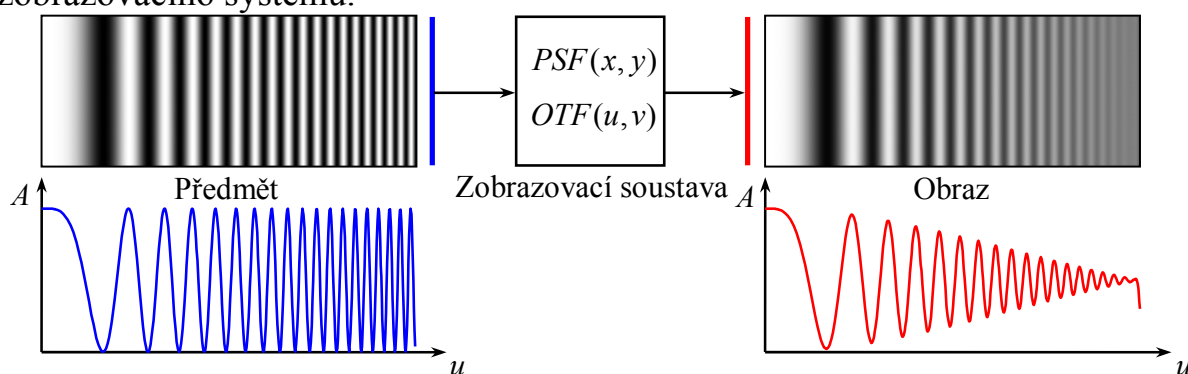
$$MTF \equiv |H(u, v)|$$

a argument OTF se nazývá fázová přenosová funkce, neboli PTF (*Phase Transfer Function*)

$$PTF \equiv \angle H(u, v) = \phi(u, v).$$

Vedle definice MTF jako modulu OTF uvedené ve vztahu výše, se běžně používá ekvivalentní definice MTF vycházející z názorné představy sledování kontrastu sinusového testovacího obrazce s proměnným prostorovým kmitočtem na výstupu zobrazovacího systému (viz Obr 1.).

Modulační přenosová funkce MTF se pro lineární prostorově invariantní zobrazovací soustavy definuje jako podíl kontrastu výstupního obrazu v obrazové rovině ku kontrastu vstupního předmětu v předmětové rovině zobrazovacího systému.



Obr. 1: Znáznornění přenosu kontrastu zobrazovací soustavou

Kontrast M , označovaný v případě sinusového obrazce též jako modulační, je definován podílem amplitudy střídavé sinusové složky ac ku složce stejnosměrné dc

$$M = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} = \frac{ac}{dc}$$

kde $A_{\max}$ je maximální hodnota a $A_{\min}$ minimální hodnota jasu.

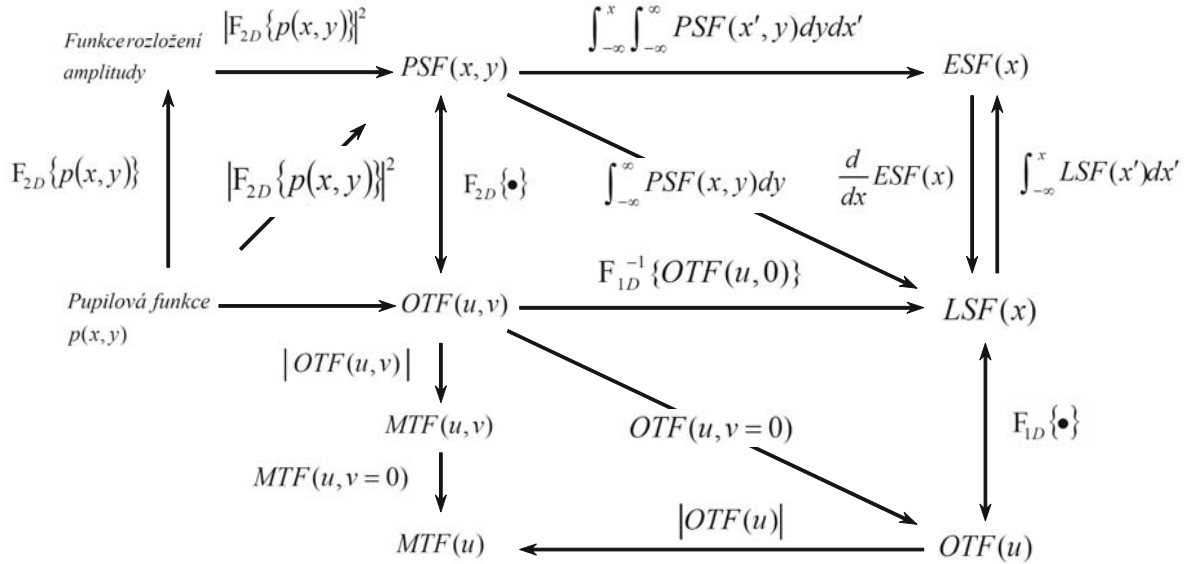
Výstupem LSI zobrazovací soustavy je v případě sinusového obrazce na vstupu opět sinusový obrazec. Omezená prostorová rozlišovací schopnost systému způsobí snížení kontrastu obrazu na výstupu M_o oproti kontrastu předmětu na jeho vstupu M_i , což vyjadřuje veličina nazývaná jako přenos modulační MT (*Modulation Transfer*)

Testovací obrazec na vstupu má obvykle nulovou hodnotu minimálního jasu $A_{\min} = 0$, pak je kontrast předmětu na vstupu zobrazovací soustavy jednotkový $M_i = 1$ a pro MTF platí

$$MTF \equiv M_o(u) = \frac{|H(u)|}{H(0)},$$

což odpovídá vyjádření MTF jako poměrné charakteristiky normované pro nulový prostorový kmitočet k jedné.

Mimo základní popisné charakteristiky zobrazovacích soustav v prostorové doméně, bodové rozptylové funkce PSF , se zejména pro potřeby snadnějšího měření zavádí charakteristiky další: čárová rozptylová funkce LSF (*Line Spread Function*) a rozptylová funkce rozhraní ESF (*Edge Spread Function*). Na následujícím Obr. 2 jsou uvedeny matematické vztahy mezi PSF , LSF a ESF .



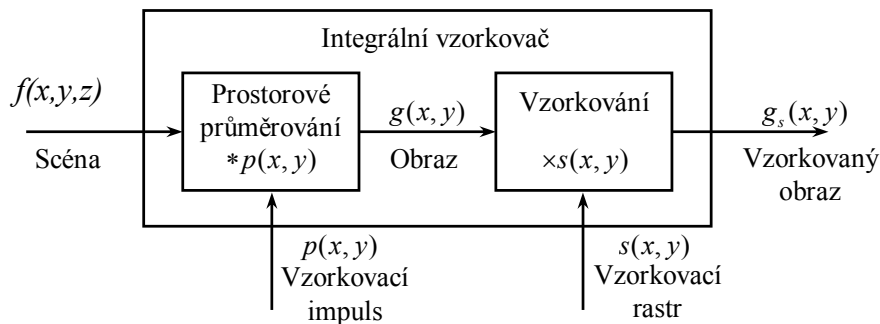
Obr. 2: Matematické vztahy mezi charakteristikami zobrazovacích soustav

Z hlediska procesu vzorkování je třeba zavést koncept obrazového senzoru jako integrálního vzorkovače. Představa obrazového snímače jako tzv. integrálního vzorkovače prakticky odpovídá skutečnosti, kdy je prostorové rozložení intenzity osvětlení obrazového snímače nejprve podrobena průměrování jednotlivými detektory následované prostorově omezeným vzorkovacím procesem.

Vzorkovanou podobu obrazu $g_s(x, y)$ na výstupu, odpovídající předmětu na vstupu $f(x, y)$ obrazového snímače, lze popsat zmiňovaným integrálním vzorkovacím procesem (procesem reálného vzorkování)

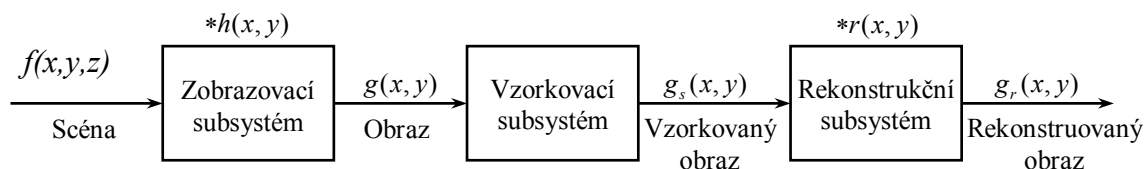
$$g_s(x, y) = [f(x, y) * p(x, y)] \cdot s(x, y),$$

kde $p(x, y)$ udává tvar vzorkovacích impulsů (detektorů), $s(x, y)$ popisuje použitý vzorkovací rastr (složený z Diracových impulsů), viz Obr. 3.



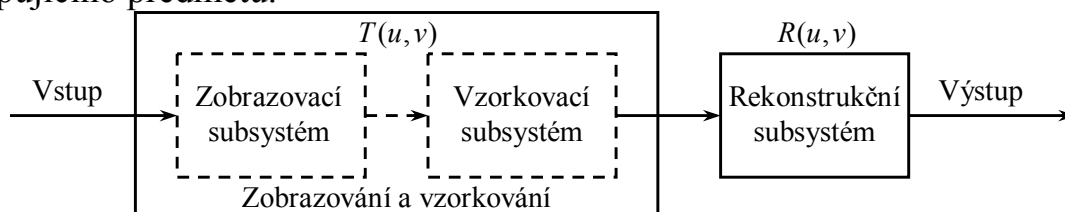
Obr. 3: Obrazový snímač jako integrální vzorkovač

Při analýze přenosových vlastností vzorkovaných obrazových systémů nelze přímo použít *OTF*, protože vzorkování vnáší do těchto soustav zvláštní druh místní prostorové variantnosti. Tato prostorová variantnost se projevuje v případě tvorby (vzorkovaného) obrazu bodového zdroje v proměnlivosti tohoto obrazu v závislosti na pozici bodového zdroje vzhledem k vzorkovacímu rastru.



Obr. 4: Obecný vzorkovaný obrazový systém

Na Obr. 4 je znázorněn obecný vzorkovaný obrazový systém. Předmět na vstupu soustavy (scéna) je označen $f(x,y,z)$ a $h(x,y)$ značí *PSF* zobrazovacího subsystému. Tento subsystém je lineární a prostorově invariantní a tak je obraz na jeho výstupu $g(x,y)$ dán prostorovou konvolucí vstupní scény a *PSF* subsystému. *PSF* zobrazovacího subsystému musí popisovat veškeré zpracování obrazu předcházející vzorkování, zejména optickou zobrazovací soustavu a průměrování osvětlení na aperturu detektoru použitého snímáče. Obecně se vliv zobrazovacího subsystému projevuje jako dolnoproustný filtr, který potlačuje vyšší prostorové kmitočty vstupní scény a vytváří vyhlazený (rozmazaný) obraz vstupujícího předmětu.



Obr. 5: Přenosové charakteristiky vzorkovaného obrazového systému

Následující rovnice ukazuje, že celková průměrná *OTF* systému z Obr. 4 je dána součinem přenosové funkce $T(u,v)$, která popisuje proces zobrazení a vzorkování a funkce $R(u,v)$, což je přenosová funkce rekonstrukčního filtru. Exponenciála v následující rovnici není příliš významná. Popisuje fázový posuv související s použitým souřadným systémem, který uvažuje *ASPSF* centrovanou vůči bodu $(x = 0,5, y = 0,5)$.

V praxi je pro popis přenosových vlastností systému důležitý modul *ASOTF*, který se označuje jako *ASMTF* (*Average System MTF*). Pro tuto charakteristiku platí

$$ASMTF(u,v) = |T(u,v)| \cdot |R(u,v)|,$$

přičemž význam jednotlivých členů je zřejmý z Obr. 5.

Při teoretickém odvozování *MTF* detektoru (obrazového elementu - pixelu) bylo třeba uvažovat následující okolnosti. Existují dvě základní varianty uspořádání obrazových snímačů. Je to jednorozměrný nebo také řádkový snímač

a dvourozměrný – plošný snímač *FPA* (*Focal Plane Array*). V obou případech má každý z jednotlivých detektorů, na které dopadá světelný tok, pouze jeden elektrický výstup. Protože jsou rozměry detektorů konečné, dochází k prostorovému průměrování osvětlení na světlocitlivé ploše těchto detektorů.

Proces prostorového průměrování snímané scény $f(x, y)$ na ploše detektoru $p(x, y)$ lze popsat (s ohledem na konvoluční teorém) pomocí optické přenosové funkce detektoru

$$OTF_{det}(u, v) = F \{p(x, y)\} = P(u, v),$$

a modulační přenosová funkce detektoru $MTF_{det}(u, v)$ se získá jako modul $OTF_{det}(u, v)$

$$MTF_{det}(u, v) = |OTF_{det}(u, v)|.$$

V práci [26] je provedeno původní odvození přenosové funkce $OTF_{det}(u, v)$ pro základní geometrické tvary detektoru.

V dalším postupu bylo třeba zpřesnit koncept tzv. vzorkovací MTF. Rozbor vlastností vzorkovaných obrazových systémů v práci [26] ukázal, že tyto obrazové systémy nejsou obecně prostorově invariantní a to zejména v případě nedodržení Nyquistovy vzorkovací podmínky, nebo v blízkosti mezního kmitočtu.

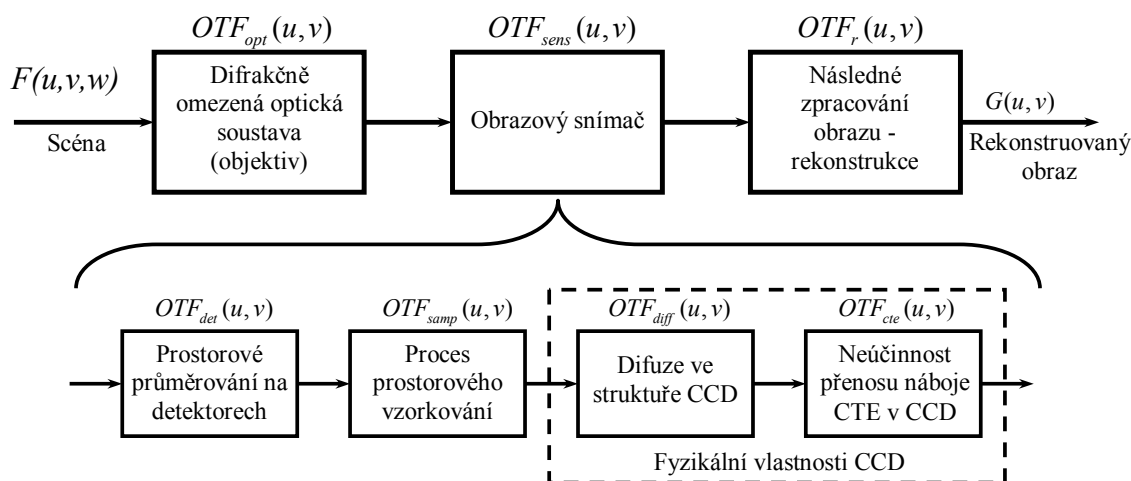
U vzorkovaných systémů existuje pro určitý prostorový kmitočet (v závislosti na vzájemném fázovém vztahu vzorkovacího rastru a snímané scény) řada různých průběhů MTF . Jednou z možností jak z MTF obrazového snímače vyloučit vliv vzájemné polohy scény a senzoru je zavedení průměrné impulsové odezvy $APSF$ a průměrné modulační přenosové funkce MTF .

Zejména při měření přenosových vlastností reálných obrazových soustav pomocí klasických metod (např. *LSF* a *ESF*) je kolísání MTF pro různé polohy testovací scény vůči obrazovému snímači výrazné.

2.2 Vytvoření modelu a simulace prostřednictvím tohoto modelu

Z hlediska celkového komplexního modelu obrazového senzoru byla uvažována následující struktura na Obr. 6. Vlastní uživatelské rozhraní obsahuje: optický subsystém, nastavení prostorových frekvencí, geometrické vlastnosti senzoru (vzorkovací subsystém), fyzikální parametry senzoru (CCD), znázornění modelovaných subsystémů, výpočet celkové MTF a nastavení grafického zobrazení.

Pomocí uvedeného modelu byly realizovány následující simulace: simulace výstupu obrazového snímače s šestiúhelníkovými a čtvercovými detektory a simulace obrazového snímače s nerovnoměrným vzorkovacím rastrem. Výsledky pro druhou simulaci jsou uvedeny na Obr. 9 a Obr. 10 v kapitole 3. Výsledky.



Obr. 6: Model obrazového systému s obrazovým snímačem pro výpočet celkové MTF

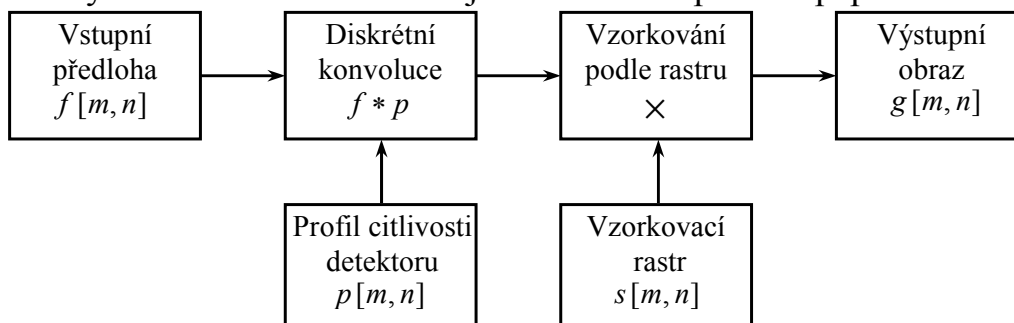
Vlastní simulace obrazového snímače v obou případech využívá k získání výstupu konvoluci vstupního obrázku s předem definovaným profilem citlivosti detektoru uloženým v matici. Výstupní hodnoty pro jednotlivé obrazové body byly získány pomocí vzorkování výsledku konvoluce maticí jednotkových impulsů s prostorovým rozložením daným vzorkovacím rastrem analyzovaného snímače. Tento proces lze popsat následujícím vztahem

$$g[m, n] = (f[m, n] * p[m, n]) \cdot s[m, n]$$

kde $g[m, n]$ je výstup obrazového snímače, $f[m, n]$ je jeho vstup, $p[m, n]$ definuje profil citlivosti použitého detektoru a $s[m, n]$ je vzorkovací rastr odpovídající struktuře prostorového vzorkování použitého snímače. Grafické vyjádření tohoto vztahu je uvedeno na Obr. 7.

V případě simulace snímače s nerovnoměrným vzorkovacím rastrem je třeba zmínit, že tyto snímače jsou charakteristické tím, že jak vzorkovací perioda, tak i rozměry detektoru nejsou konstantní. Struktura je podobná uspořádání světlocitlivých buněk na sítnici oka (*retina like sensor*).

Radiální velikost jednotlivých detektorů této struktury se zvětšuje logaritmičticky a soustředná mezikruží jsou rozdělena pomocí paprsků



Obr. 7: Struktura simulace obrazového snímače v Matlabu s konstantním úhlovým posuvem, proto se takové snímače někdy označují jako *log-polar*.

Objekty na Obr. 9., které se na *log-polar* obrázku jeví největší, byly

obrazovým snímačem zachyceny nejpřesněji (střed zorného pole) a naopak. To, že tento přístup je v současné době aktuální svědčí to, že Obr. 9, který byl publikován poprvé v září 2003 autorem práce [21], byl v zápětí, tj. v lednu 2004 publikován v [2] také.

MTF není možné použít přímo, protože analýza přenosových vlastností ve smyslu *MTF* je aplikovatelná pouze na prostorově invariantní systémy.

Určitou představu o přenosových vlastnostech simulovaného obrazového snímače poskytuje na Obr. 10 uvedená aproximace *MTF* v radiálním směru (snímač je rotačně symetrický) v závislosti na poloze (vyjádřené vzdáleností od středu snímače). Výpočet této *MTF* byl proveden za předpokladu rozdělení obrazového snímače na malé oblasti, ve kterých lze považovat velikost detektoru (impulsovou odezvu *PSF*) snímače za konstantní (prostorově invariantní).

Prostorově závislá *MTF* Obr. 10 využívá výše uvedeného značného zjednodušení problému, avšak poměrně dobře koresponduje s výsledky simulace uvedenými na Obr. 9. Čím blíže je snímáný objekt ke středu obrazového snímače, tím jemnější detaily se podaří zachytit.

Ve středu zorného pole je možné rozlišit jemné detaily, na periferní části snímače pak sledovat změny v okolním prostředí, určovat polohu objektů zájmu a na tyto objekty při potřebě snímání podrobností zaměřit střed zorného pole snímače. Tímto způsobem, lze i při poměrně malém množství obrazové informace (*log-polar* obrázek) zajistit stejnou funkčnost jako při použití běžných snímačů s mnohem větším počtem detektorů.

2.3 Využití a modifikace již stávajících metod dekonvoluce obrazu

V prezentaci je zmíněna i problematika dekonvoluce. Dekonvoluce byla použita s cílem určit právě odhad přenosových vlastností soustavy (*PSF* a následně *OTF* a z té *MTF*) a to zejména z důvodu, kdy je obtížné používat výše uvedené metody pro určení modulační přenosové funkce (*MTF*) a fázové přenosové funkce (*PTF*) pro různé geometrické tvary elementárních detektorů obrazových senzorů.

Pro daný účel byly nejvhodnější metody slepé dekonvoluce, ze kterých byly implementovány následující algoritmy: iterační slepá dekonvoluce (*IBD*), simulované žíhání (*SA*) a slepá dekonvoluce pomocí genetického algoritmu (*BDGA*). Veškeré simulace proběhly v prostředí Matlab.

Tab. 1 shrnuje všechny dosažené výsledky simulací pro jednotlivé algoritmy slepé dekonvoluce. Z těchto výsledků však nelze jednoznačně určit, která metoda je nejlepší, neboť každý z algoritmů má své výhody i nevýhody. Sloupec Čas je zde uveden pouze jako ilustrativní údaj, nelze jej považovat za objektivní měřítko kvality algoritmu, neboť byly při testování jednotlivých algoritmů použity obrázky a *PSF* různých rozměrů. Důležitým výsledkem je, že všemi postupy bylo možné získat průběhy *OTF* a následně *MTF* a *PTF*. Tyto

průběhy odpovídaly charakteru použitého elementu v podobě PSF. Podařilo se tedy ověřit původní předpoklad o další možnosti získání průběhu OTF, aniž bychom museli používat analytickou metodu.

2.4 Realizace experimentů ověřujících poznatky z uvedených postupů

V rámci experimentů s reálnými obrazovými systémy byla realizována následující měření:

Měření na systému se CCD snímačem s využitím v astronomii

Jednalo se o experiment, který byl realizován s astronomickou CCD kamerou SBIG ST-8E s rozlišením 1530x1020 pixelů o velikosti 9x9 μ m. Hlavním cílem bylo změřit MTF pomocí metody, která využívá obraz břitu (viz Obr. 2).

Měření na systému pro určení MTF zobrazovacích soustav

Tento experiment probíhal v laboratořích MEOPTA-OPTIKA, a.s. v Přerově za účelem vývoje a realizace automatizovaného systému pro měření MTF. Toto měření se týkalo mnoha druhů optických soustav a základní požadavek byl, aby bylo možné vyhodnocovat MTF pomocí obrazu dvouramenného kříže a též pomocí obrazu bodu. V prvním případě je použit obraz štěrbiny ve dvou na sebe kolmých směrech a ve druhém případě je použit laserový koherentní svazek, který je upraven dalšími optickými prvky, jehož profil svazku je téměř shodný s Gaussovou křivkou a odpovídá situaci, jako kdybychom použili membránu, do které bude vytvořen otvor velmi malých rozměrů.

V obou případech se jedná opět aplikaci teoretických vztahů na Obr. 2. Dále je možné konstatovat, že naměřené průběhy MTF korespondují s těmi, které byly získány pomocí modelu a simulací.

Měření na systému se senzorem typu SHWS

Shack-Hartmannův vlnový senzor se skládá z matice mikročoček LA (Lenslet Array) a CCD senzoru. Matice mikročoček se vyrábí litograficky a je možné vyrobit jakýkoli tvar elementární mikročocky. Na matici mikročoček dopadá vlnoplocha obecného tvaru a její normály mají v různých místech různý směr. Normály procházející středy jednotlivých mikročoček se nazývají hlavními normály. Mikročocky soustředí paprsek do své ohniskové roviny, ve které je umístěn CCD senzor. Tento senzor je virtuálně rozdělen na obrazové segmenty, jejichž velikost je shodná s velikostí příslušné mikročocky. Senzor tedy bude detekovat gradient vlnoplochy, který je charakterizován směrem hlavní normály. Aby bylo možné rozhodnout, od které části vlnoplochy stopa na detektoru pochází, je nutné omezit jeho měřicí rozsah. Důsledkem toho dochází k podstatnému snížení maximální hodnoty gradientu vlnoplochy, který je senzor schopen určit. Deformace vlnoplochy se vyhodnotí pomocí jejího gradientu. K jeho určení je nutné znát odchylku stopy elementárního světelného svazku vymezeného velikostí mikročocky a směrem hlavní normály, od polohy tohoto

svazku v případě ideální (rovinné) vlnoplochy v obou směrech x a y . Při znalosti těchto odchylek jsme pak schopni získat tvar vlnoplochy, PSF a následně i MTF.

3. Výsledky

Přehled dosažených výsledků v uvedené problematice je nejlépe viditelný na publikacích. Konkrétně se jedná o publikace [19] až [26].

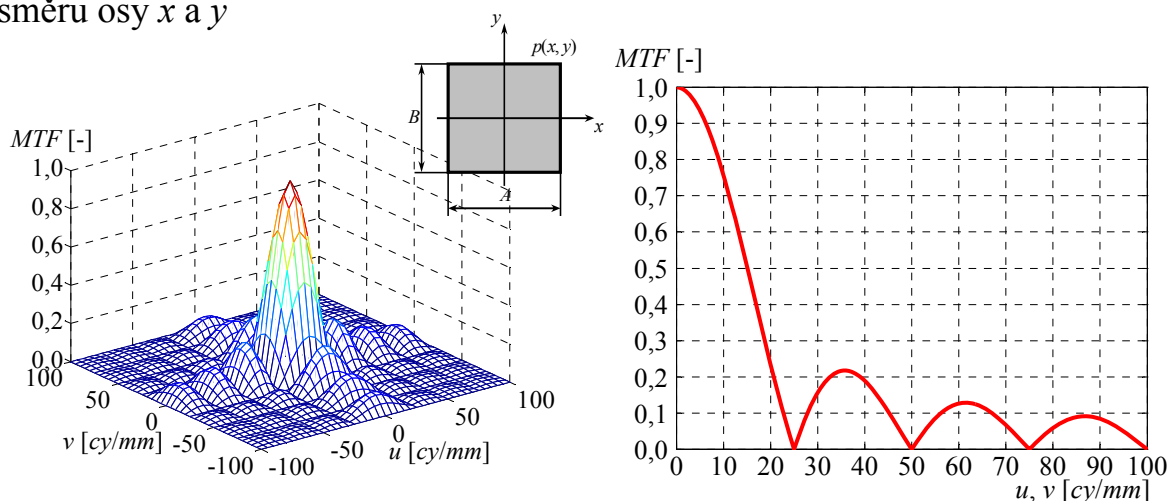
Byla provedena optimalizace snímacího rastru za účelem dosažení co nejvyšší objektivně definovatelné detailové rozlišovací schopnosti s maximálně možným potlačením vznikajících rušivých aliasingových struktur. Z tohoto hlediska byla provedena podrobná analýza přenosových vlastností zobrazovacích soustav s důrazem na geometrické uspořádání obrazového senzoru, jeho charakteristiky a parametry. Byla též analyzována alternativní konfigurace senzoru, která je částečně odvozena od struktury sítnice oka. Zde je důležitým přínosem komplexní popis obrazových vzorkovacích struktur z hlediska přenosových vlastností a tím i z hlediska kvality.

Výčet významných okruhů uvedeného problému:

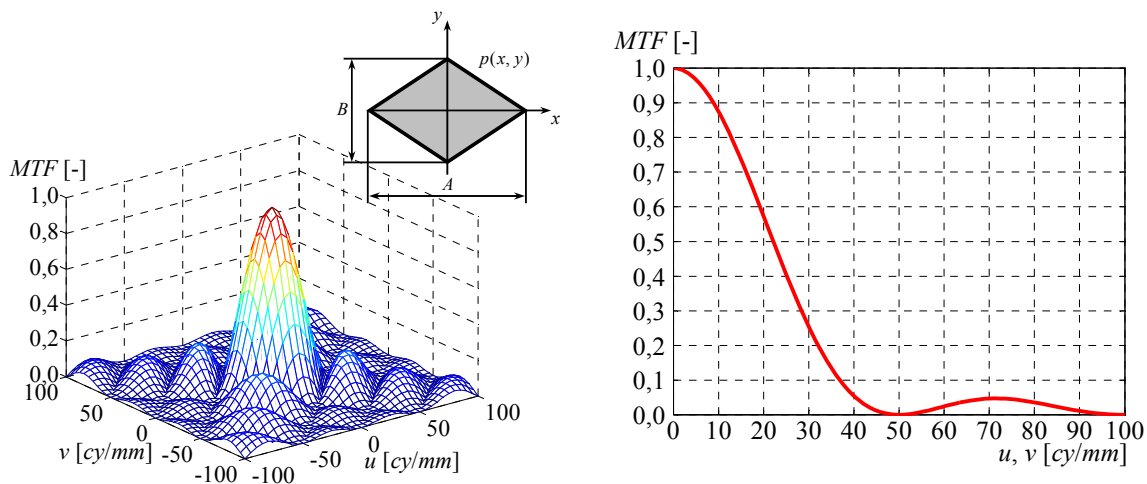
- nalezení optimálního tvaru elementárního detektoru obrazového senzoru z hlediska přenosových vlastností – to spočívalo v původním teoretickém odvození (kosočtverečný profil – viz Obr. 8c),
- nalezení optimálního rozložení citlivosti detektoru z hlediska přenosových vlastností, a to prostřednictvím simulací různých průběhů LSF a následným výpočtem OTF (Gaussovský profil),
- nalezení alternativní zjednodušené 2D statické vzorkovací struktury obrazu, analogické se strukturami sítnic různých živočichů (viz Obr. 9 a Obr. 10),
- vytvoření nástroje pro modelování a simulaci přenosových vlastností obrazových senzorů, přičemž byly zahrnuty výše uvedené výsledky,
- popsání nové interpretace přenosových vlastností, zejména z hlediska MTF, a to vícerozměrnost a MTF procesů zpracování obrazu [19], [26],
- provedení detailního rozboru a částečné modifikace stávajících metod dekonvoluce za účelem získání MTF (viz Tab. 1),
- experimentální ověření vybraných teoretických poznatků na systému pro automatické vyhodnocení MTF, který je realizován pro MEOPTA - OPTIKA, s.r.o. v Přerově.

Dále lze uvést aktivity v oblasti návrhu a konstrukce nových měřicích systémů v oblasti výroby a kontroly optických prvků a systémů ve společnosti MEOPTA-OPTIKA, s.r.o. Přerov. V rámci těchto aktivit byl dokončen návrh, vývoj a realizace a nasazení do provozu systému pro automatické měření vícerozměrné MTF optických prvků a soustav. Úlohy s využitím SHWS (Shack-Hartmann Wavefront Sensor) jsou zaměřeny zejména na nové metody zjišťování kvality optických prvků a systémů. Na výše uvedených systémech byly ověřeny některé poznatky a výsledky z teoretických partií problematiky.

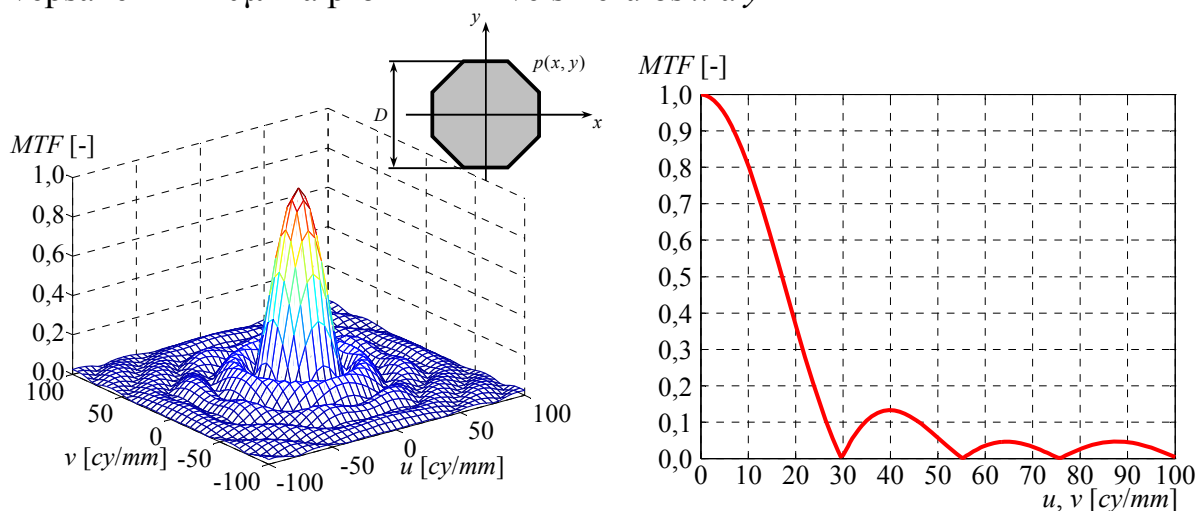
a) 2D MTF čtvercového detektoru o rozměrech $A, B = 40\mu\text{m}$ a profil MTF ve směru osy x a y



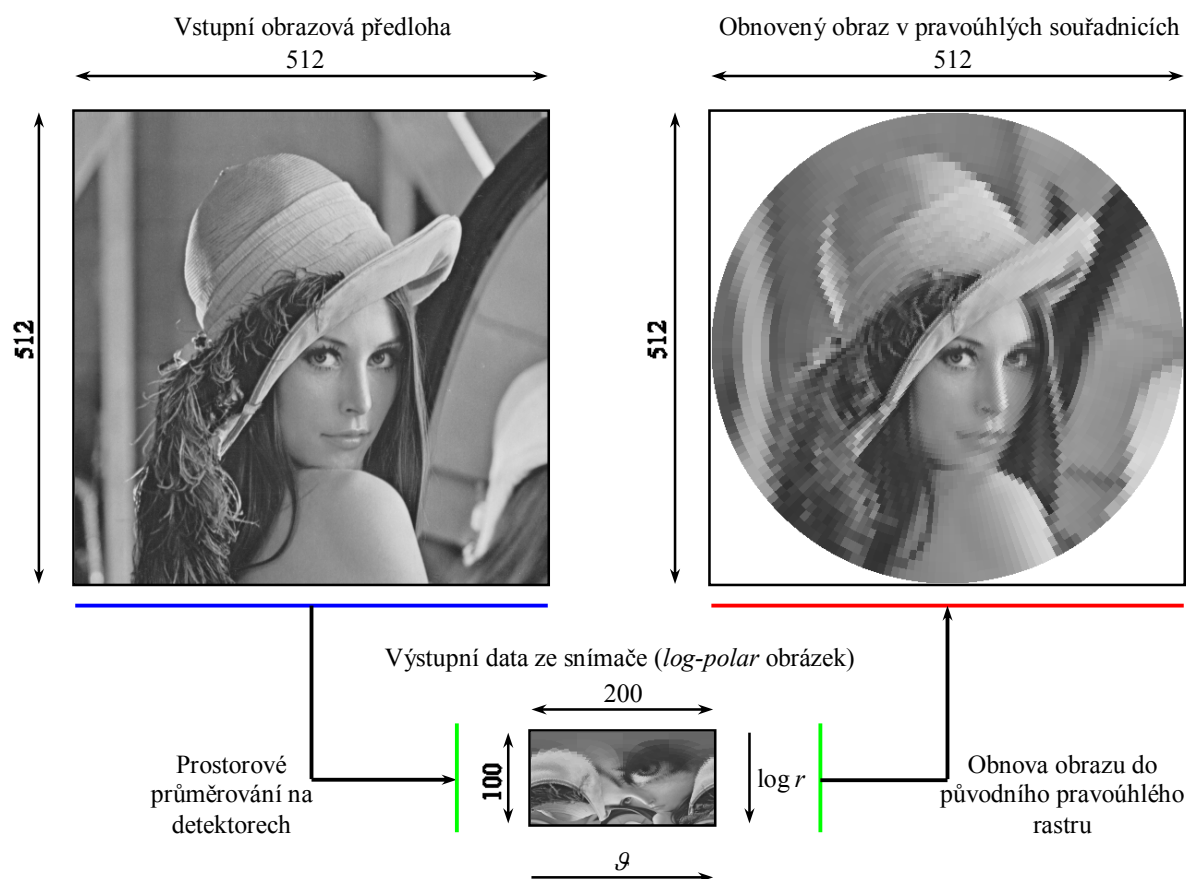
b) 2D MTF detektoru s kosočtvercovou aktivní oblastí o rozměrech $A, B = 40\mu\text{m}$ a profil MTF ve směru osy x a y



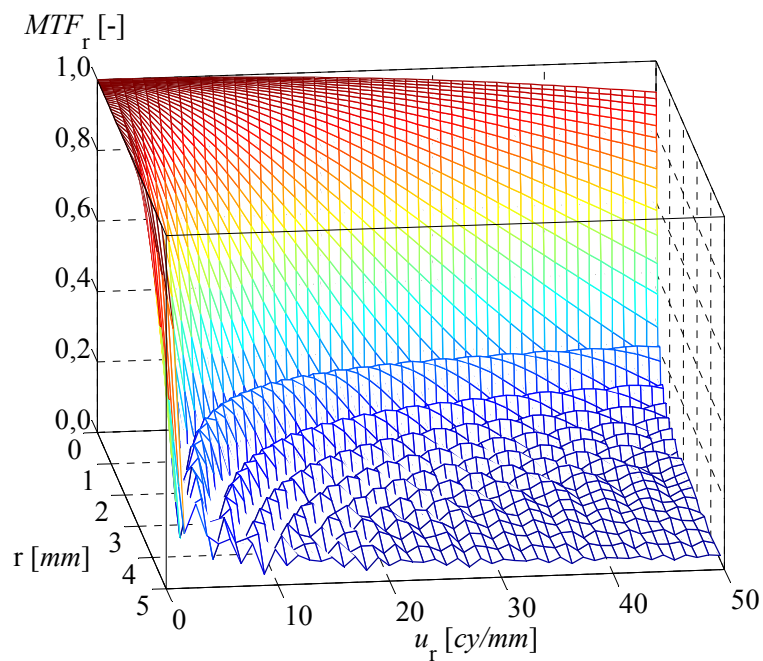
c) 2D MTF detektoru s osmiúhelníkovou aktivní oblastí o průměru kružnice vepsané $D = 40\mu\text{m}$ a profil MTF ve směru os x a y



Obr. 8: MTF pro vybrané tvary elementárního detektoru



Obr. 9: Výstup obrazového snímače s nepravidelným vzorkovacím rastrem



Obr. 10: MTF obrazového snímače s nerovnoměrným vzorkovacím rastrem

Metoda	Rozměry obrázku	Rozměry PSF	Iterace	PSNR _{obr} [dB]	PSNR _{PSF} [dB]	Čas ³ [s]
IBD	86x86	11x11	150	33,4	72,6	51
	128x128	11x11	150	14,8	71,9	81
SA	36x36	5x5	500	21,7	64,8	687
BDGA	10x10	3x3	300	∞	51,1	254
	32x32	5x5	700	20,1	57,1	1357

Tab. 1: Přehled výsledků slepé dekonvoluce

4. Závěr

Současná situace v oblasti obrazových senzorů podporuje důležitost a aktuálnost uvedené problematiky. Podrobnou rešerší mnoha relevantních zdrojů bylo zjištěno, že uvedenou problematikou se komplexně nikdo nezabývá. Je zřejmé, že odvození a výsledky v prezentaci uvedené nejsou doplněny o technologické možnosti. Nicméně výsledky společnosti FUJI naznačují, že technologické možnosti jsou.

Pokud bychom uvažovali oblast hodnocení kvality výstupů jednotlivých typů zobrazovacích systémů, je na prvním místě oblast zobrazovacích systémů v lékařství. Tak např. vývoj nových obrazových snímačů s názvem MEDIPIX v laboratořích v Cernu je opět dokladem toho, že i v této oblasti může dojít k výrazné změně. I v tomto ohledu je myšlenka úpravy tvaru elementárního detektoru reálná.

V oblasti hodnocení kvality zobrazovacích systémů v lékařství je významnou i oblast komprese těchto dat, která nesmí být pro účely diagnostiky ztrátová. V prezentaci byl zmíněn i koncept a realizace využití přenosových vlastností i pro systémy, které jsou realizovány jako posloupnost programových operací, čili nikoli pouze prvky zobrazovacích systémů [19], [26]. To má význam i pro zobrazovací systémy jako takové, protože součástí těchto systémů jsou též bloky programového (SW) zpracování. Jediným omezením tohoto přístupu je aplikace na lineární systémy a procesy. Takže např. pro některé typy kompresí obrazu to není možné aplikovat, protože obsahují nelineární operace. Při použití, např. u diskrétní kosinové transformace (DCT) to však možné je.

Velmi důležitou oblastí z hlediska hodnocení kvality výstupů zobrazovacích systémů je hodnocení přítomnosti aliasingu, který způsobuje snížení kvality daného výstupu. I z tohoto hlediska je možná návaznost na výsledky této práce, kdy jednotlivé průběhy modulačních přenosových funkcí, přímo, ilustrují možnosti systému z hlediska postižení aliasingem a to zejména mezním přenášeným prostorovým kmitočtem a též mírou výskytu tzv. zvlnění modulační přenosové funkce za mezním kmitočtem. Myšlenka využití posunu obrazového senzoru, např. o polovinu rozměru elementárního detektoru a porovnání průběhů v daném řádku matice detektoru pomocí korelace může být jednoduchým nástrojem, jak vyhodnocovat přítomnost aliasingu přímo při

snímání. Vyžadovalo by to sice dvojí snímání, ale je to spíše otázka kompromisu mezi počtem elementů a systémem vyčítání.

Velmi důležitým závěrem je zjištění, že výsledky jsou v souladu s teoretickými výsledky uvedenými v publikaci [18] zaměřené na teorii difrakce. Zejména se jedná o Dodatek D, věnovaný lineárním prostorově invariantním systémům. Je zde uvedeno, že Fresnelovu difrakci lze považovat za přenos lineárním prostorově invariantním systémem. To však znamená, že mezi teorií difrakce a teorií lineárních systémů existuje definovaný vztah, který byl v této prezentaci naznačen a to zejména souhlasem průběhů teoreticky odvozených v Kap. 3 [26] s difrakčními obrazci na otvorech obdobných tvarů, jako ty, které byly použity v Kap. 3 [26].

O aktuálnosti problematiky v oblasti kompresí obrazových dat, ale i robotiky svědčí téměř současná publikace [2] a publikace autora práce [23], viz Obr. 9. Obě publikace obsahovaly v jedné z částí obdobné výsledky, ačkoli vznikly zcela nezávisle na sobě.

Aktivity a výsledky popisované v prezentaci byly podpořeny vědecko-výzkumným záměrem MŠM 6840770012 Transdisciplinární výzkum v oblasti biomedicínského inženýrství II. na Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT v Kladně (2005-2011).

Použitá literatura

- [1] PARDO, F. - DIERICKX, B. - SCHEFFER, D. Space-variant non-orthogonal structure CMOS image sensor design. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, June 1998, Vol. 33, No. 6, s. 842-849.
- [2] BOLUDA, Jose A. - PARDO, F. Space-variant image processing: taking advantage of data reduction and polar coordinates. *Electronic Imaging*, January 2004, Vol. 14, No. 1, SPIE International Technical Group Newsletter, s. 12, 10.
- [3] ROCA, E. - SORIANO, G. - ESPEJO, S. - DOMINGUEZ-CASTRO, R. - LINAN, G. - RODRIGUEZ-VAZQUEZ, A. Programmable resolution imager for imaging applications. In: *Proceedings of SPIE*, Vol. 3965. San Jose: 2000, s. 136-145.
- [4] HOLST, Gerald C. *Sampling, aliasing, and data fidelity for electronic imaging systems, communications, and data acquisition*. Winter Park (Florida): JCD Publishing; Bellingham (Washington): SPIE PRESS, 1998, 342 s. ISBN 0-9640000-3-2; ISBN 0-8194-2763-2.
- [5] PTÁČEK, M. Časoprostorová diskretizace televizní obrazové informace a průběhy prostorové filtrace v základním pásmu. *Slaboproudý obzor*, 47, 1986, č. 10, s. 480-491.
- [6] VOLLMERHAUSEN, R. H. - DRIGGERS, R. G. Analysis of sampled imaging systems. Tutorial texts in optical engineering, Vol. TT39. Bellingham (Washington): SPIE, 2000. 176 s. ISBN 0-8194-3489-2.
- [7] WITTENSTEIN, W. - FONTANELLA, J. - NEWBERRY, A. - BAARS, J. The definition of the OTF and the measurement of aliasing for sampled-imaging systems, *Optical Acta*, 1982, Vol. 29, s. 41–50.
- [8] HADAR, O., BOREMAN, G. D. Oversampling requirements for pixelated – imager systems. *Optical Engineering*, 1999, Vol. 38, No. 5, s. 782 – 785.
- [9] HADAR, O., DOGARIU, A., BOREMAN, G. D. Angular dependence of sampling modulation transfer function. *Applied Optics*, October 1997, Vol. 36, No.28, s. 7210 – 7216.
- [10] BOREMAN, Glenn D. *Modulation transfer function in optical and electro – optical systems*. Tutorial texts in optical engineering Volume TT52. Bellingham (Washington): SPIE PRESS, 2001, 110 s. ISBN 0-8194-4141-0
- [11] FELTZ, J. C. Development of the modulation transfer function and contrast transfer function for discrete systems, particularly charge-coupled devices, *Optical Engineering*, August 1990, vol. 29, No. 8, s. 893-904.
- [12] PARK, S. K., SCHOWENGERDT, R., KACZYNSKI, M. Modulation – transfer – function analysis for sampled image systems. *Applied Optics*, 1 August 1984, Vol. 23, No. 15, s. 2572 – 2582.
- [13] YADID-PECHT, O. Geometrical modulation transfer function for different pixel area shapes. *Optical Engineering*, 2000, Vol. 39, No. 4, s. 589 – 785.

- [14] KUNDUR, D., HATZINAKOS, D. Blind image deconvolution. *IEEE Signal Processing Magazine*, May 1996, Vol. 13, No. 3, s. 43 – 64.
- [15] BANHAM, M. R., KATSAGGELOS, A. K. Digital image restoration. *IEEE Signal Processing Magazine*, March 1997, Vol. 14, No. 2, s. 24 – 41.
- [16] BLUMOVÁ, V., POLÁŠEK, J. Kvalita obrazu a její hodnocení. Knižní příloha časopisu *Jemná mechanika a Optika*, 1978-1980.
- [17] PAZDERÁK, J. Prostorová, časová a diferenciální rozlišovací schopnost zraku a základní parametry nové televizní soustavy. *Slaboproudý obzor*, 1988, roč. 49, č. 11, s. 538-544.
- [18] Prof. RNDr. Jiří Komrská, CSc., [Česká republika], 2005. Dostupné z <http://fyzika.fme.vutbr.cz/~komrs/>. [citováno 10. února 2005].
- [19] KLÍMA, M. - PAZDERÁK, J. - BERNAS, M. - PÁTA, P. - HOZMAN, J. - et al.: Objective and Subjective Image Quality Elevation for Security Technology. In *Proceedings of 35th Annual 2001 International Carnahan Conference on Security Technology*. Piscataway: IEEE, 2001, s. 108-114. ISBN 0-7803-6636-0.
- [20] VÍTEK, S. - HOZMAN, J. Image Quality Influenced by Selected Image Sensor Parameters. In: *SPIE Proceedings*, Vol. 5036. Washington: SPIE, 2002, s. 14-19. ISBN 0-8194-4837-0.
- [21] HOZMAN, J. - FLIEGEL, K. - VÍTEK, S. - PÁTA, P. The Effect of Image Sensor Configurations on Image Quality. In: *Recent Trends in Multimedia Information Processing (Proceedings of the 10th International Workshop on Signals, Systems, and Image Processings – IWSSIP'03*. Praha, Česká republika, 10-11.9.2003). Praha: Sdělovací technika, 2003, s. 272-275. ISBN 80-86645-05-3.
- [22] VÍTEK, S. - HOZMAN, J. Modeling of Imaging Systems in MATLAB. *Radioengineering*, 2003, vol. 12, no. 4, s. 55-57. ISSN 1210-2512.
- [23] Hozman, J. - Fliegel, K.: Optimal Sampling Structure of Image Sensors from the Point of View of Image Quality. In *Proceedings of 11th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing ambient multimedia*. Poznaň: PTETiS, 2004, s. 371-374. ISBN 83-906074-8-4.
- [24] Vítek, S. - Páta, P. - Hozman, J.: Analyse of Transfer Function of Image Sensors. In *The 5th INTEGRAL Workshop on The INTEGRAL Universe*. Noordwijk: European Space Agency, 2004, s. 801-804. ISBN 92-9092-863-8.
- [25] Hozman, J.: Possibilities of Deconvolution of Image Sampling Structure In: *Proceedings of SPIE Vol. 6180 Photonics, Devices, and Systems III*. Bellingham: SPIE, 2006, s. 61801X-1-61801X-6. ISBN 0-8194-6236-5.
- [26] Hozman, J.: *Optimalizace vzorkovací struktury obrazového senzoru*. [Doktorská práce (Ph.D.)]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2006. 144 s.

Ing. Jiří Hozman, Ph.D.

Datum a místo narození: 27. března 1964, Praha, Česká republika

Národnost: česká

Stav: ženatý, 2 děti

Adresa: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství, Katedra biomedicínské techniky (K17110), Nám. Sítná 3105, 272 01, Kladno

E-mail: hozman@fbmi.cvut.cz

Aktivní znalost jazyků: angličtina, ruština, čeština

Průběh dosaženého vzdělání:

1988 (Ing.) - státní závěrečná zkouška, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, obor Radiotechnika, zaměření audio-video technika,
2006 (Ph.D.) - obhajoba disertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, obor Radioelektronika

Průběh dosavadní praxe a zaměstnání:

1990 - 2004	asistent/odborný asistent kat. radioelektroniky FEL ČVUT
1998 - 2003	tajemník katedry radioelektroniky FEL ČVUT
2002 - 2006	kombinovaná forma doktorského studia na FEL ČVUT
2004 - dosud	odborný asistent a zástupce vedoucího katedry biomedicínské techniky FBMI ČVUT (od 1.3.2007 vedoucí katedry)

Zahraniční pobyty:

03-05/1993 University of Aalborg, Dánsko, 3 měsíční studijní pobyt

Pedagogická praxe:

FEL ČVUT 1991-2004 - přednášky a cvičení ze 7 odborných předmětů z oblasti biomedicínského inženýrství včetně výuky v angličtině

FBMI ČVUT 2004-dosud - přednášky a cvičení ze 7 odborných předmětů z oblasti biomedicínského inženýrství

1. LF UK 1994-dosud - přednášky a cvičení z 5 předmětů z oblasti biomedicínského inženýrství.

1997-2007 vedení cca 50 úspěšně obhájených studentských kvalifikačních prací. Školitel specialista 2 doktorandů.

Účast na vybraných vědeckých projektech:

1999-2004 Výzkumný záměr ČVUT: MSM 210000012

2002-2004 GA ČR - Kvalitativní aspekty obrazových kompresních metod v multimediálních systémech, 102/02/0133

2005-2011 Výzkumný záměr ČVUT: MSM 6840770012

Zaměření ve výzkumu:

Analýza a syntéza zobrazovacích systémů v lékařství a zpracování obrazových dat. Dále vyhodnocování kvality zobrazovacích systémů na základě modulační přenosové funkce, analýza rentgenových a ultrazvukových mamogramů, video-okulografických videozáznamů a dalších obrazových dat zejména z oblasti neurologie se zaměřením na vyhodnocování okamžité polohy očí, hlavy a těla.