

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 406*

*ISSN 1213-418X*

**Pavel Zemčik**

# **ROZVOJ ALGORITMŮ A TECHNOLOGIÍ ZPRACOVÁNÍ A SYNTÉZY OBRAZU**

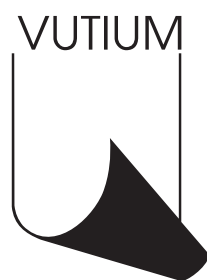
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
Ústav počítačové grafiky a multimédií

**doc. Dr. Ing. Pavel Zemčík**

**ROZVOJ ALGORITMŮ A TECHNOLOGIÍ  
ZPRACOVÁNÍ A SYNTÉZY OBRAZU**

**PROGRESS IN ALGORITHMS OF IMAGE  
PROCESSING AND SYNTHESIS**

Teze přednášky  
k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru  
Výpočetní technika a informatika



BRNO 2011

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

zpracování obrazu, syntéza obrazu, počítačová grafika, počítačové vidění, komunikace člověka se strojem, klasifikace, rozpoznávání, programovatelný hardware, grafický procesor, číslicový signálový procesor

## **KEY WORDS**

Image processing, image synthesis, computer graphics, computer vision, human machine interaction, classification, recognition, programmable hardware, graphics processor, digital signal processor

# OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD .....	5
2 TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ A SYNTÉZY OBRAZU .....	6
2.1 Vývoj grafických subsystémů osobních počítačů.....	6
2.2 Architektury pro zpracování signálu a obrazu .....	8
2.3 Programovatelný hardware .....	8
2.4 Alternativní architektury pro práci s obrazem .....	9
3 ALGORITMY ZPRACOVÁNÍ A SYNTÉZY OBRAZU.....	11
3.1 Tradiční algoritmy počítačové grafiky.....	11
3.2 Tradiční algoritmy analýzy obrazu .....	12
3.3 Moderní metody práce s obrazem.....	12
4 METODY ZKOUMANÉ NA FIT A APLIKACE .....	13
4.1 Metody akcelerace grafických algoritmů.....	13
4.2 Rychlé algoritmy zpracování obrazu a videosekvencí.....	14
4.3 Detekce objektů v obraze a videosekvencích .....	14
4.4 Metody kombinující analýzu a syntézu obrazu.....	16
4.5 Aplikace v průmyslu a dopravě .....	16
5 ZÁVĚR.....	19
POUŽITÁ LITERATURA .....	20
ABSTRAKT.....	23
ABSTRACT.....	23

Obrázky použité v této práci jsou zčásti obrázky autora a zčásti jsou převzaty z publikací, v nichž je autor tohoto textu autorem či spoluautorem a zčásti jsou též převzaty z [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA



Pavel Zemčík (narozen 30. 4. 1965 v Brně) vystudoval Střední průmyslovou školu elektrotechnickou, obor Výpočetní technika (1980-1984) a poté pokračoval ve studiu na Fakultě elektrotechnické VUT v Brně a získal titul Ing. v oboru Informatika a výpočetní technika (1984-1989). Nastoupil do zaměstnání ve Výzkumném ústavu matematických strojů v Brně (1989-1990) a krátce nato nastoupil na základní vojenskou službu ve výpočetním středisku Československé armády (1989-1990). Později byl přijat do interního doktorského studia na Fakultě elektrotechniky a informatiky VUT v Brně (1991-1995), které ukončil získáním titulu Dr. s disertační prací na téma Realistické zobrazení. Od roku 1991 pracoval tamtéž jako asistent. V roce 1998 se habilitoval prací Komunikace člověka se strojem. Absolvoval řadu odborných a výukových stáží v zahraničí. Jednalo ze zejména o čtyřměsíční stáž na University of Bristol, Velká Británie, v roce 1992, desetitýdenní stáž ve firmě ASCOM

Radiocom, Camberley, též ve Velké Británii v roce 1994, dvě stáže celkem na tři měsíce na University of Surrey, Guildford, opět ve Velké Británii v letech 1996 a 1997, výukový pobyt a dvě stáže celkem v době trvání šesti měsíců na Lappeenranta University of Technology, Finsko v letech 1996, 1998 a 1999, a konečně pracovní pobyt na jeden semestr na pozici visiting professor na Pennsylvania State University, The Behrend College, Erie, PA. USA v roce 2000.

V roce 2002, současně se založením Fakulty informačních technologií (FIT) VUT v Brně, byl jmenován vedoucím Ústavu počítačové grafiky a multimédií FIT VUT v Brně a na této pozici působil až do roku 2007. Současně byl koordinátorem mezinárodního výměnného programu SOCRATES/ERASMUS na FIT a aktivně se podílel na organizaci výměny studentů a učitelů.

Odbornými zájmy jsou počítačová grafika, zpracování obrazu, komunikace člověka se strojem, příbuzné oblasti výpočetní techniky, aplikace a akcelerace algoritmů pro práci s obrazem. Pavel Zemčík je autorem či spoluautorem více než 50 konferenčních příspěvků, více než 10 článků v časopise, několika knižních kapitol a též je spoluautorem dvou patentů a dvou užitných vzorů. Vedl řadu bakalářských a diplomových prací a byl školitelem devíti úspěšně ukončených doktorských prací. Podílel se na řešení řady projektů financovaných z národních i mezinárodních zdrojů (FRVŠ, GAČR, TAČR, GA AVČR, IST EU, ARTEMIS). Byl též spoluautorem několika průmyslových aplikací zpracování obrazu, například systému pro kontrolu kvality pouzdření kondenzátorů ve firmě AVX, Lanškroun, systému pro monitorování silniční dopravy a detekci přestupků UNICAM či systému pro kontrolu výroby netkaných textilií ve firmě Pegas, Bučovice. Byl recenzentem řady grantových projektů (FRVŠ, MPO, GAČR) a časopisů, byl též členem řady programových výborů konferencí a organizačních výborů (Eurographics, ACIVS, WSCG, NHIBE a dalších), byl zvaným přednášejícím na konferencích (SCCG a NHIBE) a pořadatelem několika konferencí na půdě VUT v Brně (Eurographics Workshop on Rendering, MLMI, GRAVISMA).

V současné době působí Pavel Zemčík jako proděkan pro vnější vztahy Fakulty informačních technologií VUT v Brně, je garantem magisterského oboru Grafika a Multimédia na FIT a přednášejícím v několika kursech, je členem vědecké rady FIT, rady magisterského a doktorského studijního programu FIT, vědecké rady VŠB-TU Ostrava a rady doktorského studijního programu FI MU v Brně a FEL ČVUT v Praze.

# 1 ÚVOD

*Počítače* jsou nedílnou součástí soudobého života lidstva. Pravděpodobně největší roli v nástupu počítačů sehrály *osobní počítače*, jejichž nástup nastal v osmdesátých letech minulého století. Osobní počítače byly zpočátku považovány za velmi drahou a specializovanou techniku pro specialisty, ale postupně se staly i předmětem práce i zábavy nadšenců a na počátku tohoto tisíciletí byly již tyto prostředky informačních technologií považovány za běžnou pomůcku pro práci v nejrůznějších oborech lidské činnosti.

Dnes se tedy na počítače a informační technologie lidé dívají jako na běžnou věc. Je ale potenciál výpočetní techniky plně využit, nebo lze očekávat další pokrok? Je zřejmé, že pokrok očekávat lze a v řadě aplikací jej lze očekávat ve spojitosti s počítačovým zpracováním obrazové informace. Lze si představit situace a možnosti, kdy počítače pozorují okolí a hlídají naši bezpečnost, kdy nám radí, kde co najdeme, kdy za nás řídí automobily nebo jiné dopravní prostředky, kdy se starají o naše sbírky fotografií a filmů, automaticky je zpracovávají a ukazují přátelům. Každý si jistě dovede představit i další možnosti a připusťme si, že budou i možnosti, které si dosud představit ani nedovedeme.

Rozvoj počítačů byl v podstatě od samého svého počátku spojen s obrazem. Zpočátku se počítače používaly pro syntézu obrazu. *Počítačová grafika*, tedy syntéza obrazu na základě informace uložené v počítači, je považována za základ komunikace člověka s počítačem. Pozdější vývoj výpočetní techniky a elektroniky umožnil rozvoj *zpracování obrazu*, což je další, dnes již tradiční oblast využití počítačů spojená s obrazem.

Postupně došlo k rozvoji dalších oborů informačních technologií, které se profilyovaly jako *kommunikace člověka se strojem*, *počítačové vidění*, *vizualizace* a další. Velmi významným faktorem pro vývoj výpočetní techniky byly počítačové hry, které představovaly, a stále představují, nejvýznamnější technický i ekonomický faktor ve vývoji výpočetní techniky.

Na výše zmíněné oblasti výpočetní techniky lze pohlížet jako na obory informačních technologií, které se soustředí na vývoj metod a algoritmů práce s obrazem, ale též jako na jednu z nejdůležitějších spotřebitelů výpočetního výkonu počítačů a katalyzátory pokroku v rozvoji výpočetní techniky. O tom svědčí překotný vývoj specializovaných grafických procesorů i procesorů pro zpracování signálu. Je také zajímavé, že postupem času dochází ke konvergenci dříve odděleně se vyvíjejících oborů do jedné, širší, oblasti výzkumu, kterou lze souhrnně označit jako *zpracování a syntéza obrazu*.

Tento text obsahuje velmi stručný přehled tradičních a soudobých technik i algoritmů pro zpracování a syntézu obrazu (v kapitole 2 a 3), přehled moderních výzkumných směrů a příklady aplikací (v kapitole 4) a též úvahu na téma smyslu a směrů výzkumu v dané oblasti informačních technologií v závěru práce (v kapitole 5).



## 2 TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ A SYNTÉZY OBRAZU



Obrázek 1: Počítač pro zábavu Sinclair ZX 81

zajímavé, že již v tomto počítači byl k dispozici obrazový výstup, který vyžival standardní televizní přijímač ve funkci displeje. Postupem času se na trhu prosadila koncepce osobního počítače IBM PC (viz obrázek 2), tato koncepce se stala výrazně dominantní na trhu (v devadesátých letech minulého století už i pro skutečně osobní použití) a postupně se rozvíjela až k současné podobě. Další výrobci se začali připojovat s IBM PC kompatibilními systémy a postupně se vyvinuly i novější a novější specifikace osobního počítače [1]. Existovaly a dosud existují i alternativní koncepce, například firmy Apple. Vývoj osobních počítačů byl od samého počátku provázen souběžným vývojem grafických subsystémů. Cílem této kapitoly je provést stručný přehled vývoje techniky ve vztahu k práci s obrazem.

Technika, která umožnila počítačům pracovat s obrazem, je těsně spjata s vývojem *osobních počítačů*. Právě pojem osobní počítač byl pravděpodobně poprvé použit jako název výrobku firmou IBM v roce 1981 (*IBM PC personal computer*). Tehdejší *osobní počítače* firmy IBM však nebyly počítači pro širokou veřejnost, ale spíše pro velmi úzkou skupinu specialistů, protože pro veřejnost nebyly v době svého vzniku dostupné. Z tohoto pohledu je třeba považovat označení osobní počítač firmou IBM spíše za nadsázku. Skutečnými počítači pro širokou veřejnost a pro zábavu se staly počítače firmy Sinclair, zejména model ZX81 (viz obrázek 1), který se na trh dostal téměř současně s osobním počítačem firmy IBM. Je



Obrázek 2: Osobní počítač IBM 5150

### 2.1 VÝVOJ GRAFICKÝCH SUBSYSTEMŮ OSOBNÍCH POČÍTAČŮ

V první generaci osobních počítačů IBM PC kompatibilních byl obrazový subsystém redukován na *grafickou desku*, na které byla umístěna paměť pro uložení právě zobrazovaného obsahu obrazovky a nezbytně nutné periferní obvody pro zobrazování obsahu této paměti na monitoru počítače a pro možnost modifikace obsahu této paměti hlavním procesorem osobního počítače bez jakékoli přidané funkce na straně grafické desky. Tato koncepce byla vynucena možnostmi konstrukce počítačů na počátku osmdesátých let minulého století a byla v podstatě tehdy jediná možná [2].

Vzhledem k tlaku na snižování cen byla postupem času samostatná grafická deska nahrazena řešením, v němž byl právě zobrazovaný obsah obrazovky uložen v hlavní paměti počítače,

a počítače byly vybaveny zjednodušenými obvody, které umožnily zobrazování přímo z hlavní paměti. Takové řešení sice omezovalo výpočetní výkon osobního počítače, ale bylo levnější.

V dalším vývoji osobních počítačů se však ukázalo, že je výhodné, aby grafické subsystémy osobních počítačů byly schopny vykonávat některé operace samostatně, což vedlo opět k oddělení grafické desky a paměti (viz obrázek 3). Tyto operace byly zpočátku jen velmi jednoduché, například zobrazení znaku či úsečky, postupně se však začaly implementovat stále složitější grafické operace, až po současné volně programovatelné operace v grafických procesorech [3].

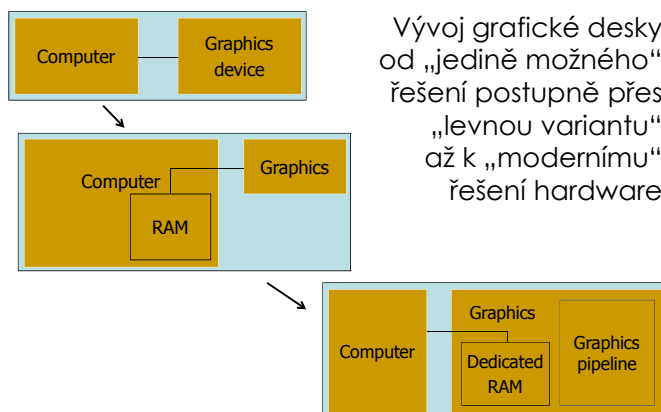
Je zajímavé si připomenout zásadní milníky, které nastaly v historii ve vývoji grafických karet osobních počítačů, z nichž je zřejmé, jak rychlý byl vývoj v minulosti a jak překvapivě neustává, ale spíše se akceleruje:

- **Grafická deska Intel iSBX 275** (1983) – první grafická karta, která kromě samotného zobrazování obsahu obrazovky obsahovala obvody pro autonomní kreslení čar i oblouků
- **Grafická deska S3 86C91** (1991) – první grafická karta, která umožnila autonomní 2D (plošné) operace, například rychlé vykreslování barevných plocha bitmap.
- **Výrobky firem ATI, Matrox, NVidia** (90. léta 20. století) – nástup grafických karet u více firem téměř současně, které implementovaly více či méně kompletní „3D Pipeline“, tedy řetězec operací umožňující rychlé zobrazení 3D grafické scény.
- **Grafický čip NVidia 2002 GeForce 3** (2002) – první grafický čip, který umožnil uživatelsky modifikovat funkce „3D pipeline“ – karta s „programovatelnými shadery“.
- **Programovací jazyk NVidia CUDA** (2007) – zlom v možnostech využití grafických desek – programovací jazyk a prostředí pro volně programování grafických čipů NVidia a de-facto začátek éry GP-GPU (General Purpose Graphics Processing Units).
- **Programovací jazyk OpenCL** (2008) – uvedení programovacího jazyka, který je široce podporován výrobci hardware a který umožňuje volně programovat grafické procesory různých výrobců a sjednotit přístup k různým architekturám procesorů.

Současně s vývojem funkcí grafických desek pro osobní počítače se vyvíjela i rozhraní monitorů počítačů, zvětšovalo se rozlišení obrazu a též se vyvíjela rozhraní mezi procesory osobních počítačů a grafickými deskami (viz tabulku 1). Dnešním standardem grafických desek v moderních počítačích je deska s akcelerací zobrazení, programovatelná v jazyce OpenCL (případně i CUDA) s interface PCIe nebo obdobným. Alternativou je obdobný subsystém v notebooku (pro ilustraci viz též obrázek 4).

Bus	Width (bits)	Clock rate (MHz)	Bandwidth (MB/s)	Style
ISA	8	4,77	8	Parallel
EISA	32	8,33	32	Parallel
VESA	32	40	160	Parallel
PCI	32 - 64	33 - 100	132 - 800	Parallel
AGP 1x	32	66	264	Parallel
AGP 8x	32	66	2000	Parallel
PCIe x1	1	2500 / 5000	250 / 500	Serial
PCIe x16	1 × 16	2500 / 5000	4000 / 8000	Serial
PCIe x16 2.0	1 × 16	5000 / 10000	8000 / 16000	Serial

Tabulka 1: Vývoj přenosových rychlostí rozhraní



Vývoj grafické desky od „jedině možného“ řešení postupně přes „levnou variantu“ až k „modernímu“ řešení hardware

Obrázek 3: Vývoj koncepcí grafických desek



Obrázek 4: Deska s čipem NVidia GeForce 3



## 2.2 ARCHITEKTURY PRO ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU A OBRAZU

Téměř současně s vývojem obrazových subsystémů osobních počítačů se vyvíjely i samotné procesory, které jsou jádrem osobních počítačů, ale i zcela jiných systémů výpočetní techniky. Samozřejmě, z pohledu práce s obrazem jsou velmi důležité multiprocesorové a paralelní systémy, ale ty sledují obecné trendy vývoje výpočetní techniky a obecný růst výpočetního výkonu. Z pohledu práce s obrazem jsou ale zvláště zajímavé architektury procesorů osobních počítačů obohacené o nové instrukce, architektury signálových procesorů a nově i procesorů pro vestavěné systémy (embedded processors). Snad nejdůležitější jsou následující aspekty architektur:

- **SIMD instrukční a registrové sady procesorů** – jedná se o rozšíření tradičních instrukčních sad procesorů osobních počítačů SIMD (Single Instruction Multiple Data). Tento princip zdaleka není novinkou a byl v minulosti využit v řadě případů, nicméně motivací pro jeho implantování do procesorů osobních počítačů byla zejména efektivní implementace operací spojených s obrazem, například s filtrací obrazu, kódováním a dekódováním videosekvencí apod. Realizací uvedeného typu instrukční sady je například Intel MMX (MultiMedia eXtension) [4] nebo novější SSE (Streaming SIMD Extension). Alternativou je například AMD 3DNow! rozšíření instrukční sady.
- **Signálové procesory** – jedná se o architekturu procesorů specializovanou na zpracování signálu a tedy vhodné i pro zpracování obrazu. V řadě případů jsou signálové procesory velmi efektivním nástrojem zpracování obrazu. Jejich praktickému rozšíření do oblastí osobních počítačů brání zejména fakt, že nejsou (dosud) běžnou součástí osobních počítačů. Do budoucna lze však v tomto směru očekávat možný posun, a to zejména v souvislosti uživatelskými rozhraními založenými na zpracování obrazu. Jako zvláště slibné se jeví koncepce kombinující vlastnosti typické pro signálový procesor, tedy zejména schopnost rychlého sčítání a násobení s architekturou VLIW (Very Long Instruction Word), například architektura Texas Instruments C6000 [5].
- **Vestavné (embedded) procesory** – donedávna sice byly na pozadí zájmu v oblasti aplikací zpracování a syntézy obrazu, ale začínají nabývat na důležitosti ve spojitosti s platformami jako tablety či mobilní telefony. Kromě toho se začínají dostávat do výroby multiprocesorové vestavné (embedded) systémy s více výpočetními jádry. Dobrým příkladem je vestavný (embedded) procesor NVidia Tegra, který kromě dvou výpočetních jader ARM 9 obsahuje i programovatelný GPU procesor [6].

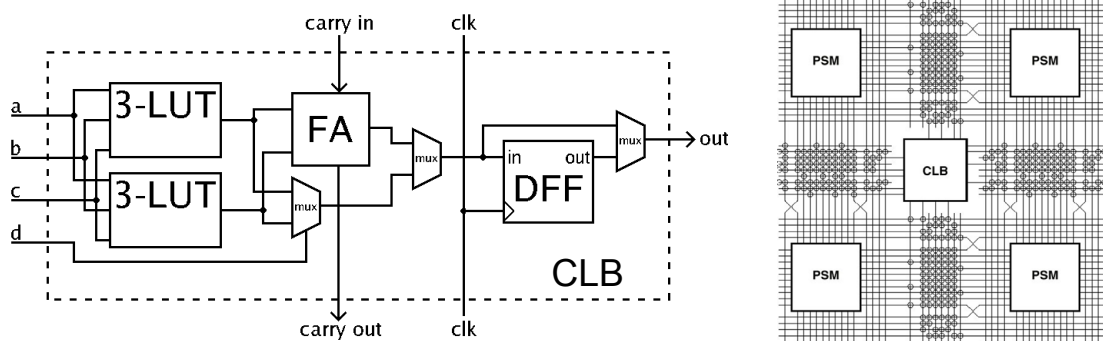
Uvedené architektury a jejich aspekty důležité pro zpracování a syntézu obrazu jistě nemohou být chápány jako úplný výčet, ale spíše jako příklady, a to příklady, které měly velký vliv na algoritmy a aplikace zpracování a syntézy obrazu.

## 2.3 PROGRAMOVATELNÝ HARDWARE

Samostatnou kapitolu ve vztahu k obrazu si jistě zaslouží programovatelný hardware. Řada algoritmů totiž není efektivně implementovatelná na sekvenčních procesorech a specializované čipy jsou vhodné (z ekonomického hlediska) jen pro takové funkce pro práci s obrazem, které se nasazují v masovém měřítku. V řadě případů tedy může být programovatelný hardware jedinou efektivní cestou realizace některých algoritmů nebo dokonce jedinou cestou vůbec.

Z pohledu použití pro práci s obrazem jsou důležitá zejména *programovatelná hradlová pole* (FPGA Field Programmable Gate Arrays), když další architektury programovatelných obvodů neposkytují dostatečný potenciál pro aplikace orientované na obraz [7]. Programovatelná hradlová pole jsou z pohledu technologického v současnosti dostatečně vyspělá pro realizaci procesorů a celých počítačových systémů, jakož i velmi složitých struktur logických obvodů. Struktura programovatelného hradlového pole má dvě základní části – konfigurovatelné logické bloky (CLB

Configurable Logic Block) a programovatelnou propojovací strukturu (PSM Programmable Switching Matrix). Logické bloky se skládají typicky z obvodů realizujících jednoduchou logickou funkci a z paměťové buňky (klopného obvodu). Propojovací struktura umožňuje budovat z logických buněk složitější zapojení (viz obrázek 5 pro ilustraci). Kapacita programovatelných hradlových polí se měří typicky počtem logických bloků a v současnosti se pohybuje v rozsahu jednotek tisíc až jednotek milionů logických bloků na jeden čip a stále stoupá.



Obrázek 5: FPGA – logická buňka (vlevo) a propojovací struktura (vpravo)

Vlastnostmi, které odlišují programovatelná hradlová pole od procesorů a umožňují realizovat kvalitativně jiné druhy algoritmů než na (sekvenčních) procesorech, jsou například:

- Možnost realizace netypických datových šířek ne násobků 8, 16 nebo 32 bitů),
- možnost masivně paralelního zpracování dat,
- možnost velmi snadné realizace „bitově orientovaných“ a logických operací,
- možnost realizace specializovaných aritmetických operací a funkcí.

V řadě případů je vhodné i kombinovat standardní procesory a programovatelná hradlová pole a zdá se, že vývoj výpočetní techniky k tomuto řešení konverguje. Příkladem mohou být některé současné čipy s programovatelnými hradlovými poli, které obsahují i klasická procesorová jádra.

## 2.4 ALTERNATIVNÍ ARCHITEKTURY PRO PRÁCI S OBRAZEM

Ne všechny postupy a řešení pro práci s obrazem využívaná během vývoje počítačů byla úspěšná a jistě existovaly i „slepé uličky“. Ve své době však i tyto „slepé uličky“ představovaly často zajímavá řešení a principy, a proto jsou alespoň některé z nich hodny vzpomnutí:

- **Architektury „Silicon graphics“** (90. léta 20 století) – firma Silicon Graphics (i řada jiných menších firem) vyvíjela v devadesátých letech specializované grafické architektury s koncepcí v zásadě shodnou nebo lepší než „standardní“ grafické desky osobních počítačů a s podstatně větším výkonem. Zatímco zpočátku se zdálo, že firma Silicon Graphics bude mít velký tržní podíl díky vysoce výkonné technice, opak se stal pravdou a řešení grafických subsystémů Silicon Graphics byla vytlačena z trhu standardními řešeními. Firma se dnes profiluje zejména v oblasti výkonných výpočetních serverů bez specializované grafiky (nebo se standardním řešením).
- **„Exotická architektura“ Pixel Planes** (1998) – jednalo se o architekturu s extrémním počtem jednoduchých procesorů (1 procesor na 1 pixel obrazu) [8]. Tato architektura byla velmi výkonná, ale neujala se pravděpodobně pro špatný poměr cena/výkon. V současnosti je překonána soudobými „standardními“ grafickými kartami.

- **Desky pro přímý „volume rendering“ Mitsubishi (1999)** – v tomto případě se jednalo o sérii desek, například VolumePro firmy Mitsubishi, určenou zejména pro zobrazování medicínských dat. Zdálo se, že přímé zobrazování 3D rastrových objemových dat ve specializovaném hardware je výhodné. Toto řešení se ale dlouhodobě neujalo, protože vývoj standardních grafických desek, zejména v oblasti 3D textur, časem předčil vlastnostmi specializované řešení a to za podstatně nižší cenu.
- **Desky pro zpracování obrazu Matrox (dosud)** – Firma Matrox se dlouhodobě specializovala v oblasti nejen grafických desek, ale zejména v oblasti desek do osobních počítačů pro zpracování signálu z kamer. Tato orientace se ukázala jako ekonomicky nepřilíš výhodná, protože objem prodeje desek pro zpracování obrazu je mnohonásobně nižší, než je tomu u grafických desek. Kromě toho běžné typy kamer lze připojit i k některým grafickým deskám a tedy pro běžného uživatele není koupě specializované desky pro zpracování obrazu příliš potřebná.
- **Specializovaný hardware pro „ray tracing“ ART VPS (2002)** – v průběhu historického vývoje algoritmů počítačové grafiky se několikrát vyskytla snaha pro některé konkrétní algoritmy vyvinout specializované architektury. V řadě případů pak takové architektury zanikly ani ne proto, že by technicky nebyly dobře zpracovány, ale proto, že nenašly vhodný trh. To byl případ i specializované architektury pro „ray tracing“ (metodu sledování paprsku, viz též kapitulu 3).

Výše uvedený seznam samozřejmě není výčtem všech „slepých uliček“ ve vývoji architektur pro práci s obrazem. Lze jej však použít jako ilustraci toho, že i dobrá a životaschopná řešení mohou být odsouzena k zániku díky trhu. Na tomto faktu je zajímavé i to, že na architektury aktuálně „živé“ se soustřeďuje výzkum, zatímco výzkum, který není aktuálně podpořen některou ze „živých“ architektur, ačkoli je do budoucna užitečný, se obtížně prosazuje jak z pohledu financování, tak i z pohledu publikačního nebo uznání odbornou komunitou.

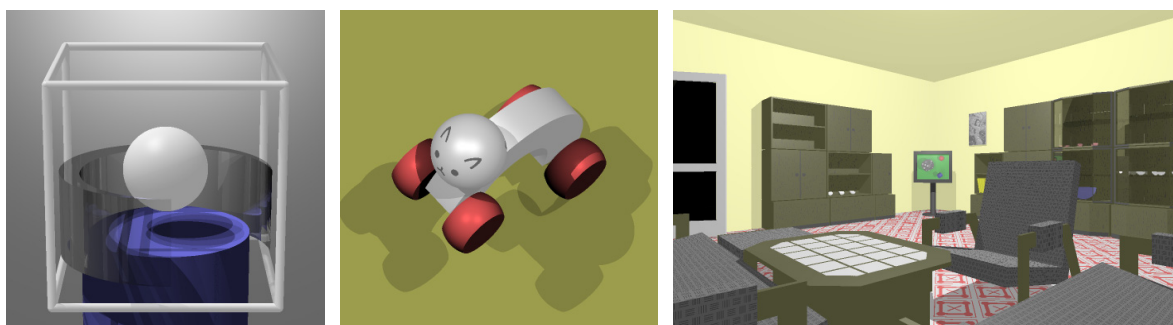
### 3 ALGORITMY ZPRACOVÁNÍ A SYNTÉZY OBRAZU

Aplikace algoritmů zpracování a syntézy obrazu jsou poměrně široké. Lze je kategorizovat podle nejrůznějších hledisek. Jednou ze zajímavých možností je i kategorizace podle toho, zda se jedná o úlohy tradičně spojované se syntézou obrazu, tedy počítačovou grafikou, nebo s analýzou obrazu. Cílem této kapitoly je uvést typické algoritmy počítačové grafiky, analýzy obrazu a příklady moderních algoritmů se vztahem k syntéze i analýze obrazu.

#### 3.1 TRADIČNÍ ALGORITMY POČÍTAČOVÉ GRAFIKY

Algoritmy počítačové grafiky, které lze již dnes považovat za tradiční [9, 10, 11, 12, 13], se vyvíjely v čase souběžně s vývojem výpočetní techniky, zejména osobních počítačů, a zahrnují zejména:

- **Elementární algoritmy počítačové grafiky** (80. léta 20. století) – jedná se o algoritmy, které zahrnují rastrování úseček, oblouků, polygonů, znaků, základní barevné modely, geometrické transformace, ořezávání objektů a další.
- **Metody realistického zobrazování scény** (od 80. let 20. století dosud) – algoritmy zaměřené na fotorealistické zobrazování scén reprezentovaných v počítači a modelování takových scén. Typickými představiteli jsou metody ray tracing (metody sledování paprsku) a radiální metody (viz též obrázek 6).
- **Algoritmy pracující v reálném čase** (od 90. let 20. století dosud) – motivací byly aplikační možnosti zejména v počítačových hrách a rozvoj těchto metod byl umožněn rychlým rozvojem grafických desek osobních počítačů (viz též kapitolu 2).
- **Animace a herní algoritmy** (od 90. let 20. století dosud) – spolu s rozvojem algoritmů pracujících v reálném čase se rozvíjely i postupy počítačové animace a her, jako jsou detekce kolizí a podobné. Nejedná se, striktně řečeno, o algoritmy počítačové grafiky, ale o algoritmy realizované v těsné návaznosti na ně a typicky i na stejné technice.
- **Zobrazování rozsáhlých scén, klient-server a mobilní technologie** (od roku 2000) – vývoj moderních technických prostředků a komunikačních technologií umožnil aplikace počítačové grafiky pracující s velmi rozsáhlými scénami a též komunikující s využitím počítačových sítí. Jedná se o postupy podmíněné velmi výkonnými počítači a umožňující novou kvalitu aplikací „distribuovaných v síti“.
- **Další rozvoj realistického zobrazování, syntetické fotografie, filmový průmysl** (od roku 2000) – realistické zobrazování se začalo uplatňovat ve filmovém průmyslu a reklamě a tento trend vyvolal určitou renesanci výzkumu v této oblasti, tentokrát s orientací na generování videosekvencí (na rozdíl od dřívějších jednotlivých obrázků). Důraz se též klade na kombinaci metod pracujících v reálném čase a realistického zobrazování.



Obrázek 6: Ilustrace metod realistického zobrazení – výstupy metody ray tracing

## 3.2 TRADIČNÍ ALGORITMY ANALÝZY OBRAZU

V analýze obrazu se za tradiční považují algoritmy spojené se zpracováním obrazu jako signálu a metody rozpoznávání vzorů (pattern recognition) [14, 15, 16]. Mezi typické příklady patří:

- **Elementární algoritmy zpracování obrazu, komprese** (80. léta 20. století) – mezi zástupce elementárních metod zpracování obrazu patří operace zpracování signálu, jako jsou frekvenční filtrace, dále zvýrazňování a detekce hran a rohových bodů, transformace obrazu a korekce jasu, kontrastu a barev i metody komprese obrazu.
- **Morfologické operace, nelineární filtry** (80. léta 20. století) – jedná se o algoritmy specializované na 2D signál (obraz), které nevycházejí přímo z tradičních postupů zpracování obrazu, ale které jsou obvykle aplikačně motivovány.
- **Základní metody rozpoznávání tvaru, textur, souřadnic** (od 90. let 20. století) – tyto algoritmy byly a stále jsou zkoumány s motivací detekovat a rozpoznat v obraze objekty a vzory a ty použít jako základ počítačového vidění včetně porozumění scéně.
- **Metody detekce objektů podle tvaru a podle podobnosti** (od konce 90. let 20. století) – jedná se o pokročilé metody rozpoznávání objektů podle popisu jejich tvaru, typicky reprezentované metodami Houghovy transformace a později metodami RANSAC a metody rozpoznání objektů podle podobnosti s využitím metod strojového učení, kde typickými zástupci jsou metody založené na SVM a/nebo AdaBoost/WaldBoost.
- **Metody měření a rekonstrukce 3D souřadnic** (od konce 90. let 20. století) – tyto metody vznikly a stále vznikají s motivací vytvořit model/zjistit rozměry a/nebo polohu bodů či objektů ve 3D prostoru pomocí zpracování série snímků nebo videosekvence.
- **Metody založené na příznacích** (cca od roku 2000) – jedná se o metody, které typicky shromažďují popisy lokálních vlastností některých bodů obrazu (příznaky) a zpracovávají je například za účelem kategorizace a indexace obrazů, ale často i k vyhledávání objektů. Tyto metody velmi často zcela zanedbávají geometrii scény.

## 3.3 MODERNÍ METODY PRÁCE S OBRAZEM

Moderní algoritmy práce s obrazem jsou z pohledu přijaté kategorizace ty, které v sobě obsahují syntézu i analýzu obrazu. Takové algoritmy mají často veliký aplikační potenciál a též jsou často z pohledu výzkumu „v plenkách“ a představují vděčný cíl výzkumu jak v současnosti, tak pravděpodobně přinejmenším v blízké budoucnosti [17, 18]. Mezi typické příklady patří:

- **Interakce založená na pohybu uživatele a/nebo kamery** – jedná se o moderní metody interakce člověka s počítačem, kdy člověk nemusí vyžít tradiční periferní zařízení počítače, ale namísto toho ovládá počítač pohybem (očí, rukou, hlavy nebo celého těla), typicky se zpětnou vazbou prostřednictvím grafického výstupu počítače, například ve formě rozšířené reality (augmented reality).
- **Algoritmy automatické rekonstrukce scény z obrazu, videa a sensorové fúze** – jedná se o metody „rozšiřující“ tradiční měřicí metody tak, aby jejich výstupem byl více či méně kompletní model scény vhodný jako vstup například pro grafické metody.
- **Algoritmy „Image based rendering“ a holografie** – jedná se o algoritmy pro zobrazování scény na základě jiné reprezentace scény než klasickým 3D modelem s tím, že často taková reprezentace vzniká na základě metod zpracování obrazu či signálu.
- **Algoritmy budování modelu znalostí o scéně z jejího obrazu a obsahu** – tyto algoritmy jsou zaměřeny na získávání znalostí o scénách na základě znalosti obrazu i modelu 3D scény.

Je zřejmé, že jak moderní, tak i tradiční metody tvoří velmi rozsáhlou třídu a poskytují velký prostor pro výzkum. Není tedy možné zkoumat vše, ale je třeba se ve výzkumu specializovat.



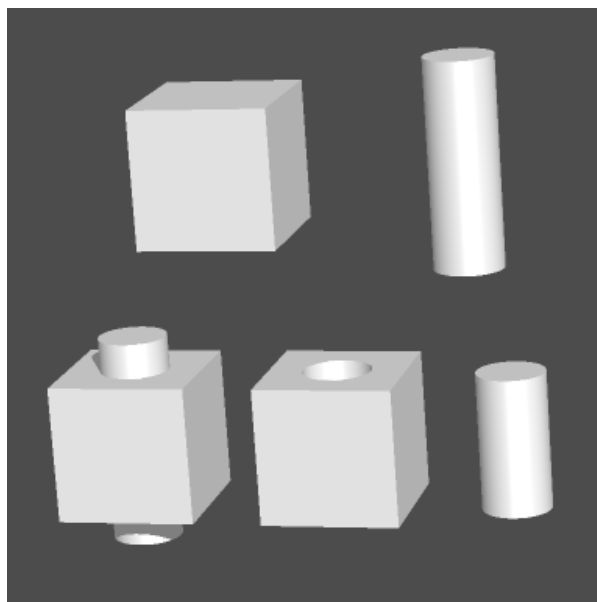
## 4 METODY ZKOUMANÉ NA FIT A APLIKACE

Na FIT VUT v Brně se za účasti autora tohoto textu provádí výzkum v řadě oblastí zpracování a syntézy obrazu, jejichž sjednocujícím faktorem je často *akcelerace metod algoritmů pro práci s obrazem*. Jedná se o akceleraci metod jak z pohledu algoritmického (povětšinou nezávislého na hardware), tak i z pohledu implementačně závislého, tedy přizpůsobení algoritmů pro určitou třídu architektur procesorů a výpočetních prostředků pro práci s obrazem. V této kapitole jsou uvedeny příklady výzkumu, které jsou v některých případech podrobněji rozvedeny, v některých odkazují čtenáře na vybrané publikace, zejména v odborných časopisech.

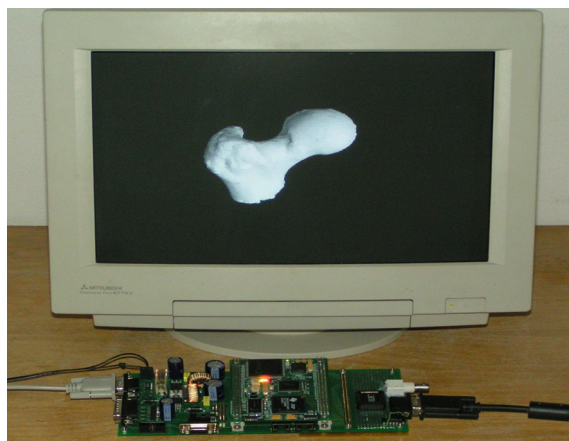
### 4.1 METODY AKCELERACE GRAFICKÝCH ALGORITMŮ

V oblasti tradičních grafických algoritmů počítačové grafiky se výzkum s účastí autora soustřeďuje, nebo se v minulosti soustředil, zejména na rychlé algoritmy v následujících oblastech:

- **Elementární algoritmy počítačové grafiky** – mezi tyto algoritmy patří například algoritmus rychlého vyplňování uzavřených oblastí obrazu vzorem [19]. Dalším příkladem je algoritmus výpočtu „průchodu“ úsečky 3D rastrem [20]. V obou případech bylo cílem výzkumu, který se podařilo naplnit, vytvoření nového algoritmu, rychlejšího než algoritmy dosud známé, v tomto případě bez návaznosti na konkrétní prostředky výpočetní techniky.
- **Algoritmy realistického zobrazení** – v tomto případě se jednalo o algoritmy akcelerace metody ray tacing (sledování paprsku) na CSG modelu scény (Constructive Solid Geometry) [21], jejichž výsledkem bylo zrychlení sledování paprsku a zobrazování nezávislé na platformě (viz též ilustrační obrázek 7).
- **Algoritmy zobrazování částic v programovatelném hardware** – výzkum v tomto směru probíhal na specializované platformě založené na signálovém procesoru a FPGA. Výsledkem výzkumu je funkční vzorek zařízení pro rychlé zobrazování „point cloud“/částicového modelu v reálném čase realizovaný v programovatelném na experimentální desce se signálovým procesorem a FPGA. Hardware má přímý výstup na počítačový monitor a je schopen zobrazovat například „point cloud“ model lidských kostí získaný analýzou tomografického snímku osoby [22, 23, 24] (viz též ilustrační obrázek 8).



Obrázek 7: Metody CSG v realistickém zobrazení



Obrázek 8: Zobrazování částic v FPGA

## 4.2 RYCHLÉ ALGORITMY ZPRACOVÁNÍ OBRAZU A VIDEOSEKVENČÍ

V oblasti algoritmů zpracování obrazu a videosekvencí se výzkum soustřeďuje, nebo se v minulosti soustředil, zejména na rychlé algoritmy v následujících oblastech:

- **Algoritmy zpracování multispektrálního obrazu** – jednalo se o dvě poněkud odlišné úlohy, jedna z nich byla řešena během stáže ve Finsku, druhá úloha potom během stáže finského kolegy na FIT. V prvním případě se jednalo o algoritmus komprese multispektrálního obrazu [25], ve druhém případě o algoritmus konverze barevného prostoru multispektrálního obrazu v reálném čase [26].
- **Korekce geometrického zkreslení obrazu v reálném čase** – je algoritmus určený ke korigování geometrických vad v obraze způsobených typicky nepřesnostmi v konstrukci či výrobě objektivů [27]. Algoritmus je implementován v FPGA a pracuje v reálném čase, výsledkem výzkumu je kromě publikace též užitečný vzor.
- **Zobrazování fotografií prostřednictvím faxu** – jedná se o výzkum provedený v rámci stáže autora ve Velké Británii, kde bylo cílem „odesílání“ obrazu na fax s tím, že se minimalizoval objem přenesených dat při nejvyšší možné kvalitě zobrazení [28].
- **Výzkum v oblasti zpracování obrazu pro zjišťování interakce osob v místnosti** – výzkum byl veden v souvislosti se sérií projektů M4/AMI/AMIDA řešených na FIT, jejichž cílem bylo extrahovat z obrazu informace potřebné pro zjištění formy a obsahu komunikace mezi osobami v místnosti, například při schůzích. Výzkum obsahoval řadu dílčích úloh z oblasti zpracování obrazu a vedl k řadě publikací, například [29, 30]. V rámci projektu byla též sepsána knižní publikace nedávno přijatá k publikaci.
- **Zpracování videosekvencí** – byla zkoumána řada aspektů zpracování videosekvencí, zejména vyhledávání videosekvence ve videosekvenci, porovnávání videosekvencí a obdobné aplikace. Výzkum se soustředil na extrakci příznaků z videosekvencí a jejich zpracování postupy „bag of words“ [31].

## 4.3 DETEKCE OBJEKTŮ V OBRAZE A VIDEOSEKVENČÍCH

Samostatnou a významnou kapitolu ve výzkumu na FIT tvoří **detekce objektů v obraze a videosekvencích** – výzkum v této oblasti na FIT byl poměrně intenzivní a zaměřil se zejména na detekci objektů metodami AdaBoost a WaldBoost, jejich akceleraci prostřednictvím vývoje nových algoritmů i prostřednictvím implementace v prostředí SIMD instrukčních sad, FPGA i GP-GPU. Výzkum vedl k publikacím, funkčnímu vzorku a přihlášce užitečného vzoru [32, 33, 34, 35, 36, 37, 38], proto zde bude krátce popsán s tím, že rozsah textu si vynucuje jistá zjednodušení.

Metody využívané pro detekci objektů jsou založeny na metodách AdaBoost [39] a pozdější modifikaci WaldBoost [40]. Jedná se o metody původně určené pro fúzování několika binárních klasifikátorů (tzv. slabých klasifikátorů) do jednoho binárního klasifikátoru s lepšími vlastnostmi (tzv. silného klasifikátoru) s předpokladem, že vstupem klasifikátoru je malý výřez obrazu (v textu dále označený jako  $x \in X$ , s tím, že  $X$  je množina všech možných výřezů obrazu) a obor hodnot je  $\{-1,1\}$ . To platí pro slabé klasifikátory  $h_i$  i pro silný klasifikátor  $H$  s tím, že hodnota 1 odpovídá případu „pozitivního ohodnocení“ (objekt obsažený v  $x$  patří do dané třídy), zatímco hodnota -1 odpovídá případu „negativního ohodnocení“ (objekt obsažený v  $x$  do dané třídy nepatří). Tedy:

$$(1) \begin{aligned} h_i(x) &: X \rightarrow \{-1,1\} \\ H(x) &: X \rightarrow \{-1,1\} \end{aligned}$$

Přitom silný klasifikátor je zkonstruován na základě lineární kombinace výsledků vybraných slabých klasifikátorů. Výběr slabých klasifikátorů a stanovení jejich vah probíhá na základě algoritmu strojového učení s učitelem, kde kritériem „učení“ je minimalizace chyby na anotované množině vzorků (příkladů a protipříkladů), kde anotace množiny vzorků též „definuje třídu objektů“. Proces učení je popsán v [38, 39] a jeho důležitou vlastností je to, že výsledný silný klasifikátor má stejné nebo lepší vlastnosti než nejlepší ze slabých klasifikátorů [39] (existuje řada modifikací algoritmu). Jeden z možných popisů výsledného silného klasifikátoru je:

$$(2) H(x) = \text{sign}\left(\sum_{t \in T} \alpha_t h_t(x)\right),$$

kde  $T$  je množina označení všech vybraných slabých klasifikátorů a  $\alpha_t$  je váha slabého klasifikátoru  $h_t$ .

Ukázalo se, že výše stručně popsaný postup lze úspěšně uplatnit nejen na malou množinu (relativně přesných) slabých klasifikátorů, ale i na velkou množinu náhodně vygenerovaných slabých klasifikátorů (typicky o 100 000 a více prvcích) a tedy jako slabé klasifikátory lze úspěšně využít i některé vhodné funkce extrakce příznaků z obrazu. Proces strojového učení přitom vybere jen malou podmnožinu možných slabých klasifikátorů (typicky o 100-1000 prvcích).

Algoritmus WaldBoost pak využívá modifikovaného postupu trénování s možností (zjednodušeně řečeno) „předčasného ukončení“ výpočtu popsaného v rovnici (2) na základě predikce znaménka výsledku při znalosti vah  $\alpha_t$  [40]. Tento algoritmus je jedním z nejrychlejších a současně nejpresnějších známých klasifikačních algoritmů (viz též obrázek 9).

Výzkum na FIT se soustředil zejména na:

- **Využití algoritmu pro detekci objektů** – detekce se realizuje postupným „průchodem“ obrazu s tím, že za  $x$  je postupně dosazován obsah všech výřezů obrazu zpracovávaného obrazu (o velikosti například 32x32 pixelů), které mohou obsahovat hledaný objekt, nebo dokonce obsah všech možných výřezů dané velikosti s cílem vytvořit výkonný detektor objektů v obraze s různými druhy příznaků (slabých klasifikátorů) [32].
- **Efektivní implementaci daného algoritmu na SIMD instrukčních sadách** – s cílem dosáhnout vysokého výkonu při detekci objektů na osobních počítačích [33, 34].
- **Implementace daného algoritmu na GP-GPU architektuře** – s cílem dosáhnout vysokého výkonu detekce objektů na osobních počítačích vybavených programovatelnou grafickou deskou [35].
- **Realizace zapojení realizujícího detektor objektů v FPGA** – s cílem umožnit realizaci detekce objektů například ve vestavných (embedded) systémech [36].
- **Predikce výsledků klasifikace v dosud nezpracovaných „polohách“ klasifikátoru** – s cílem nezávisle na platformě dále zefektivnit detekci objektů [37, 38].

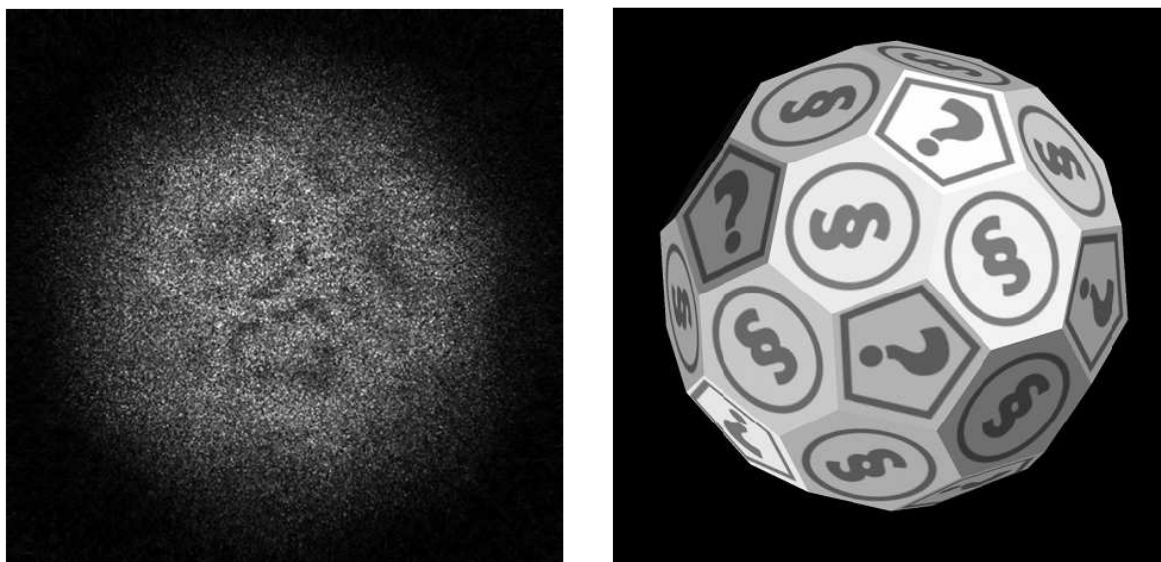


Obrázek 9: Ilustrace detekce (obraz a výsledky detekce)

#### 4.4 METODY KOMBINUJÍCÍ ANALÝZU A SYNTÉZU OBRAZU

V oblasti algoritmů zpracování obrazu a videosekvencí se výzkum soustřeďuje, nebo se v minulosti soustředil, zejména na rychlé algoritmy v následujících oblastech:

- **„Image based rendering“** – jednalo se o výzkum v oblasti modifikace vlastností povrchů objektů ve fotografiích bez nutnosti kompletní rekonstrukce 3D vlastností scény, konkrétně vkládání kožešinového povrchu namísto hladkého povrchu oděvů. Tento výzkum byl prováděn v rámci spolupráce s University of Bristol [41].
- **Algoritmy syntetické holografie** – tento výzkum je prováděn v rámci centra excelence „Centrum počítačové grafiky“ MŠMT ve spolupráci ze ZČU Plzeň. Na FIT se výzkum v této oblasti soustřeďuje na metody rychlého výpočtu optického pole, a to i s akcelerací v FPGA. Výsledkem výzkumu jsou publikace a realizovaný funkční vzorek zařízení pro rychlý výpočet v FPGA, jakož i optický systém pro snímání i rekonstrukci hologramů [42, 43] (viz též ilustrační snímek na obrázku 10).



Obrázek 10: Numerická rekonstrukce hologramu (vlevo) a vzor objektu (vpravo)

- **Automatická kalibrace scény** – jedná se o algoritmy zaměřené na možnost odhadu kalibrace scény (parametrů projekce) z jediného snímku nebo malého počtu snímků s využitím znalosti velikosti a vzájemného umístění objektů v obraze [44].
- **Algoritmy analýzy a zobrazování HDR obrazů** – jsou zaměřeny na zpracování HDR (High Dynamic Range) obrazu s vysokým dynamickým rozsahem tak, aby byl zobrazitelný na standardním displeji (s normálním dynamickým rozsahem) metodami „tone mapping“ založenými na bilaterální filtraci obrazu [45].

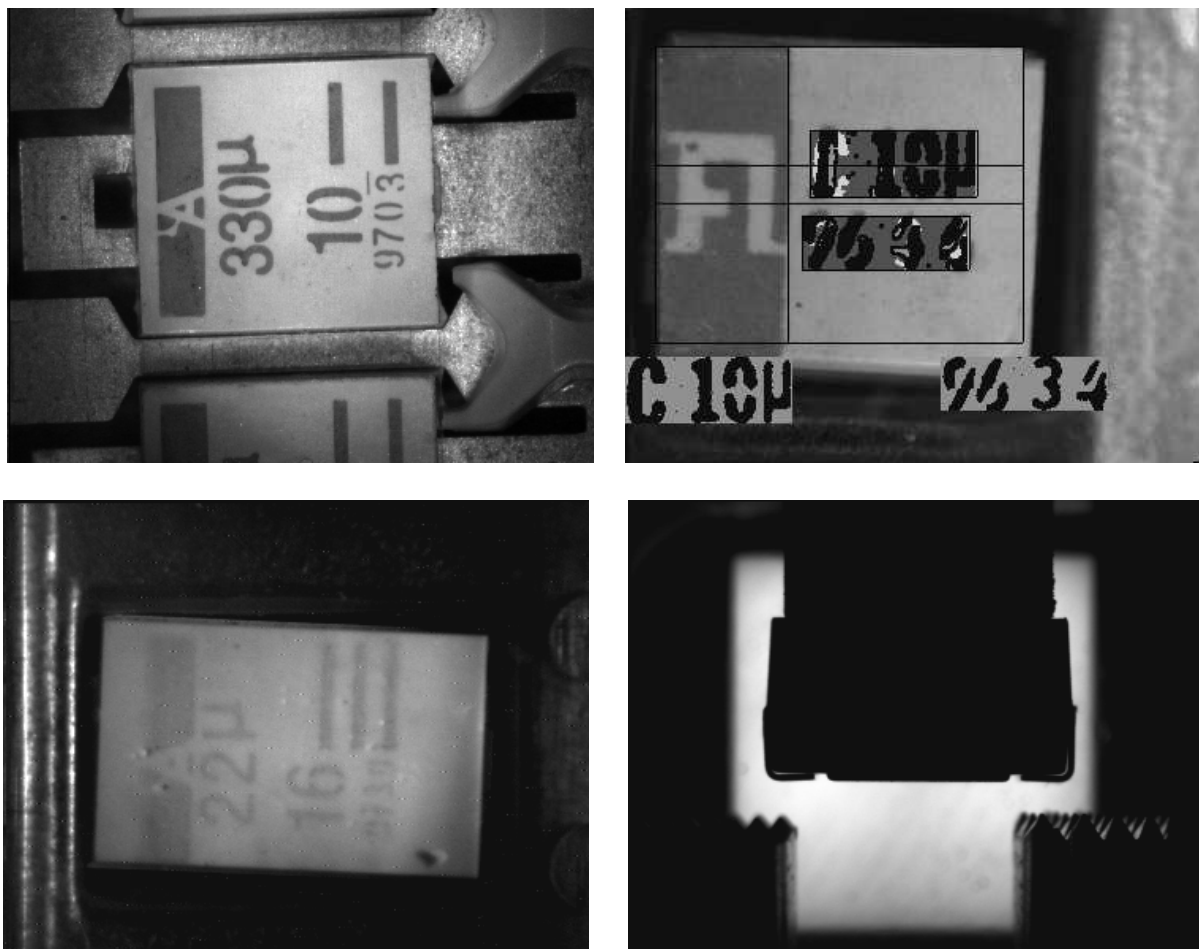
#### 4.5 APLIKACE V PRŮMYSLU A DOPRAVĚ

Autor tohoto textu se podílel kromě výzkumných prací též na několika projektech zaměřených do průmyslu a dopravy v rámci spolupráce s firmou CAMEA, spol. s r.o. Níže jsou uvedeny příklady aplikací metod zpracování obrazu ilustrující možnosti zpracování obrazu v průmyslu:

- **Kontrola kvality pouzdření kondenzátorů ve firmě AVX, Lanškroun** – předmětem aplikace byla komplexní kontrola kvality pouzdření tantalových kondenzátorů

vyráběných v AVX Lanškroun. Smyslem kontroly je zjištění, zda jsou pouzdra kondenzátorů (o rozměrech cca 2x3x4mm) v pořádku a tedy:

- jsou celistvá bez prasklin a „bublin“,
- jsou správně a kvalitně potištěna,
- a zda mají pouzdra a vývody správné rozměry.



Obrázek 11: Kontrola pouzdrění kondenzátorů ve firmě AVX, Lanškroun (zleva shora kondenzátor před zpracováním, po zpracování potisku, v infračerveném osvětlení a snímek pro měření rozměrů)

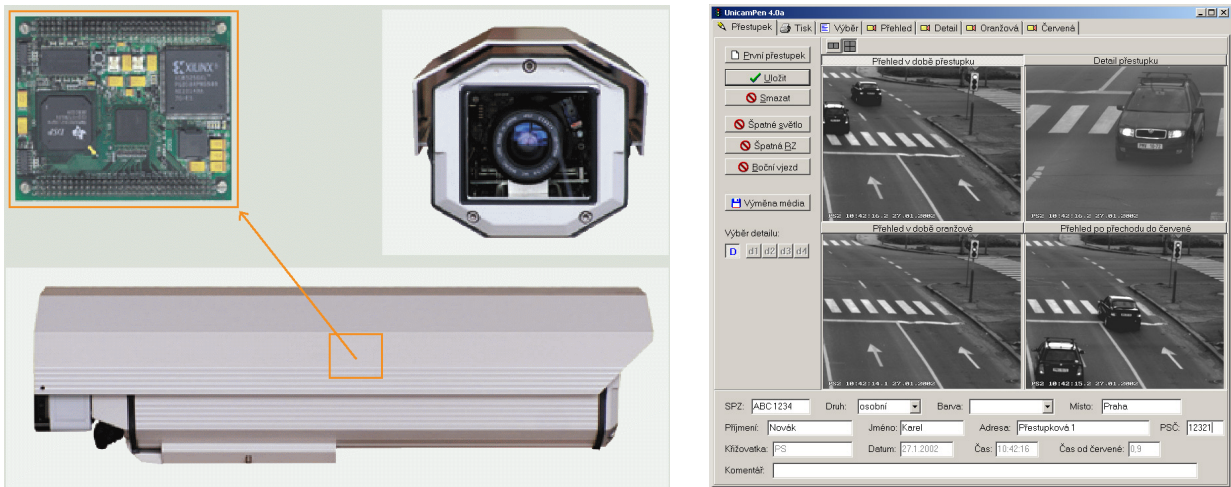
Provádí se tedy tři dílčí kontroly, první z nich je kontrola potisku, při které je pouzdro fotografováno v běžném světle a potisk pouzdra je detekován a zkontrolován oproti požadovanému vzoru. Další kontrolou je kontrola celistvosti pouzdra, které se provádí v infračerveném osvětlení, při němž je potisk méně kontrastní a je tedy „vidět“ povrch pouzdra. Poslední kontrolou je měření velikosti pouzdra a polohy vývodů, které se provádí na kontrastním snímku „proti světlu“. Všechny dílčí kroky se provádí cca 3x za sekundu a používají se k ní metody zpracování obrazu a počítačového vidění, jako jsou detekce hran, filtrace, Houghova transformace geometrické transformace obrazu a řada dalších dílčích metod. V praxi je nasazeno v současnosti několik set takových systémů kontroly pouzdrění s cca tisíci kamerami (viz též ilustrační obrázek 11).

- **Systém pro monitorování silniční dopravy a detekci dopravních přestupků** – jedná se o systém, který na základě zpracování obrazu projíždějících vozidel na jednom nebo více měřicích místech zjistí registrační značku, polohu a rychlost vozidel a na základě těchto informací je schopen určit například:



- zda vozidlo projelo křižovatkou na červenou nebo na zelenou,
- zda vozidlo nepřekročilo v nějakém úseku maximální povolenou rychlost,
- jakou trajektorii mělo vozidlo a jak rychle ji projíždělo.

Tyto informace jsou využívány pro detekci a dokumentaci dopravních přestupků a též pro dopravně inženýrské účely. Obraz vozidel je pořizován autonomním (embedded) kamerovým subsystémem osazeným kromě kamery i signálovým procesorem, FPGA a komunikačním modulem pro komunikaci po bezdrátové síti (WiFi, CDMA nebo 3G). Použité metody analýzy obrazu jsou zpracovány i ve spolupráci s ČVUT v Praze a zahrnují detekci registračních značek s využitím AdaBoost, frekvenční analýzu, kalibraci scény a měření rozměrů. V praxi je uživatelem systému Policie ČR a městské policie a v ČR je v provozu několik systémů s cca pěti sty kamerami (viz též ilustrační obrázek 12).



Obrázek 12: Dopravní systém UNICAM (kamera a výstup kontroly průjezdu na červenou)

- **Kontrola výroby netkaných textilií ve firmě Pegas, Bučovice** – je zajímavá zejména z pohledu použitého snímacího zařízení, kterým je „řádková“ CCD kamera, která snímá pohybující se pás netkané textilie (o šířce cca 6 metrů a rychlosti posunu do cca 10 m/s). Smyslem kontroly je zajistit, aby v textilií byly zjištěny případné „žmolky“ a/nebo hmyz a příslušná část textilie nebyla použita pro další zpracování. K tomu se používají relativně jednoduché algoritmy zpracování obrazu, ale ty musí zpracovat objemy obrazových dat až kolem 100 MB/s. K tomu je použit osobní počítač v průmyslovém provedení. Ve firmě Pegas Bučovice je úspěšně nasazeno několik desítek takových systémů kontroly kvality výroby.

## 5 ZÁVĚR

*Zpracování a syntéza obrazu* je velmi rychle se rozvíjející se oblastí informačních technologií. Ačkoli se jedná o oblast tradiční, která se rozvíjí v podstatě od počátku rozvoje osobních počítačů, jedná se stále o oblast velmi dynamickou a živou a je zřejmé, že rozvoj této oblasti je velmi úzce spjat s rozvojem aplikací výpočetní techniky. Výzkum v této oblasti je dokonce natolik významný, že zpětně výrazně ovlivňuje vývoj techniky.

Lze najít řadu praktických aplikací jak zpracování obrazu, tak i syntézy obrazu v průmyslu, dopravě a dalších ekonomicky významných oblastech lidské činnosti, kde již dnes lze metody zpracování a syntézy obrazu nasadit. Lze předpokládat, že aplikační oblasti se budou časem ještě rozšiřovat. Takové rozšíření je podmíněno úspěchem výzkumu a vypracováním nových metod i jejich efektivní implementací na soudobé technice. K tomu snad přispíváme a i do budoucna chceme přispět výzkumem na FIT VUT v Brně.

V této souvislosti snad ani není možné vynechat myšlenku o smyslu výzkumu a možnosti uplatnění výzkumu v oblasti informačních technologií i úžeji v oblasti zpracování a syntézy obrazu, a to z pohledu společenského i ekonomického. Obecně řečeno, výzkum je pravděpodobně užitečný společensky vždy, a to kvůli obecnému rozvoji kultury a vzdělanosti. Otázkou je, zda se ekonomicky „vyplatí“ do výzkumu investovat a zda se do něj vyplatí investovat v prostředí České republiky.

Odpovědí na tuto otázku je, že se investice do výzkumu pravděpodobně vyplatí i ekonomicky, jak ukazují příklady zemí, které výzkum podporují ve větší míře než Česká republika. Existují sice oblasti výzkumu, které nemohou nikdy najít přímé uplatnění díky tomu, že některé klíčové směry vývoje výpočetní techniky bezprostředně z území České republiky nelze ovlivnit, ale nezbývá než doufat, že budou spíše rozvíjeny takové směry výzkumu, které dříve či později podpoří rozvoj českého i evropského průmyslu a tím i jeho konkurenceschopnost.

### **Poděkování**

Tato práce vznikala za podpory projektu MŠMT 21630528 *Výzkum informačních technologií z hlediska bezpečnosti*.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] NORTON, P.: *Inside the IBM PC*. Revised and enlarged. Brady, New York, USA, 1986, ISBN 0-89303-583-1
- [2] MUELLER, S.: *Upgrading and Repairing PCs*. 16th edition. Que Publishing, New York, USA, 2006, ISBN 0-7897-3173-8
- [3] ENGEL, W.: *GPU Pro: Advanced Rendering Techniques*, CRC Press, NY, USA, 2010, ISBN 1568814720
- [4] BISTRY, D., DULONG, C., GUTMAN, M., JULIER, M., KIETH, M., MENNEMEIER, L., M., MITTAL, M., PELEG, A. D., WEISER, U.: *The Complete Guide to MMX Technology*, Mc Graw Hill, Columbus, OH, USA, 1997, ISBN 0-07-006192-0
- [5] *TMS320C6000 Programmer's Guide*, Texas Instruments, Literature no. SPRU198D, Austin TX USA, 2000
- [6] Whitepaper: *The Benefits of Multiple CPU Cores in Mobile Devices*, NVidia, Santa Clara, CA, USA 2010
- [7] ZEIDMAN, B.: *Designing with FPGAs and CPLDs*, CMP Media LLC, Lawrence, KA, USA, 2002, ISBN 1-57820-112-8
- [8] FUCHS, H., POULTON, J., EYLES, J., GREER, T., GOLDFEATHER, J., ELLSWORTH, D., MOLNAR, S., TURK, G., TEBBS, B., ISRAEL, L.: *A Heterogeneous Multiprocessor Graphics System Using Processor-Enhanced Memories*, In: *Proceedings of SIGGRAPH '89*, 16th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM New York, NY, USA, 1989, ISBN:0-89791-312-4
- [9] FOLEY, J. D., VAN DAMM, A., FEINER, S., K., HUGHES, J. F.: *Computer Graphics: Principles and Practice*, 2 edition, Addison-Wesley Professional, Harlow, United Kingdom, 1995, ISBN-10: 0201848406
- [10] MOELLER, T., HAINES, E.: *Real-time Rendering*, AK Peters, Natick, MA, USA, 1999, ISBN 1569911012
- [11] SILLION, F., PUECH, C.: *Radiosity and Global Illumination*, Morgan Kaufmann, London, Great Britain, 1994, ISBN:1558602771
- [12] CHALMERS, A., DAVIS, T., REINHARD, E.: *Practical Parallel Rendering*, A. K. Peters, Natick, MA, USA, 2002, ISBN 156881-179-9
- [13] THALMANN, N., M., THALMANN, D.: *Interactive Computer Animation*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 1996, ISBN 0-13-518309-X
- [14] ŠONKA, M., HLAVÁČ, V., BOYLE, R.: *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*, Thomson, Toronto, Ontario, Canada, 2008, ISBN 0-495-08252-X
- [15] IFEACHOR, E., C., JERVIS, B., W.: *Digital Signal Processing, A Practical Approach*, Addison-Wesley, Harlow, United Kingdom, 1993, ISBN 0-201-54413-X
- [16] WU, J., K., KANKANHALLI, M., S., LIM, J., H., HONG, D.: *Perspectives on Content-Based Multimedia Systems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2000, ISBN 0-7923-7944-6
- [17] WOOD, L., E.: *User Interface Design*, CRC Press LLC, Boca Raton, FL, USA, 1998, ISBN 0-8493-3125-0
- [18] FETZER, J., H.: *Computers And Cognition: Why Minds Are Not Machines*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2001, ISBN 0-7923-6615-8
- [19] ZEMČÍK, P.: *Scan-Line Algorithm for Filling with Pattern*, In: *Machine Graphics and Vision*, roč. 2, č. 2, 1993, PL, s. 143-147, ISSN 1230-0535
- [20] ZEMČÍK, P.: *An efficient algorithm for 3D line generation*, In: *Machine Graphics and Vision*, roč. 2, č. 3, 1993, PL, s. 231-235, ISSN 1230-0535
- [21] ZEMČÍK, P., CHALMERS, A.: *Optimised CSG Tree Evaluation for Space Subdivision*, In: *Computer Graphics Forum*, 1995, s. 139-146, ISSN 0167-7055

- [22] HEROUT, A., ZEMČÍK, P.: *Animated Particle Rendering in DSP and FPGA*, In: *SCCG 2004 Proceedings*, Bratislava, SK, STUBA, 2004, s. 237-242, ISBN 80-223-1918-X
- [23] ZEMČÍK, P., HEROUT, A., BRYAN, L., TUPEC, P., FUČÍK, O.: *Particle rendering pipeline in DSP and FPGA*, In: *Proceedings of Engineering of Computer-Based Systems*, Los Alamitos, US, IEEE CS, 2004, s. 361-368, ISBN 0-7695-2125-8
- [24] TIŠNOVSKÝ, P., HEROUT, A., ZEMČÍK, P.: *Cache-Based Parallel Particle Rendering Engine*, In: *ElectronicsLetters.com*, roč. 2003, č. 1, Brno, CZ, s. 8, ISSN 1213-161X
- [25] KAARNA, A., ZEMČÍK, P., KÄLVIÄINEN, H., PARKKINEN, J.: *Compression of Multispectral Remote Sensing Images Using Clustering and Spectral Reduction*, In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, roč. 38, č. 2, 2000, Piscataway, NJ, USA, s. 1073, ISSN 0196-2892
- [26] JOŠTH, R., ANTIKAINEN, J., HAVEL, J., HEROUT, A., ZEMČÍK, P., HAUTA-KASARI, M.: *Real-Time PCA Calculation for Spectral Imaging (using SIMD and GP-GPU)*, In: *Journal of Real-Time Image Processing*, roč. 2011, č. 1111, DE, s. 8, ISSN 1861-8200
- [27] ZEMČÍK, P., PŘIBYL, B., HEROUT, A., SEEMAN, M.: *Accelerated Image Resampling for Geometry Correction*, In: *Journal of Real-Time Image Processing*, roč. 6, č. 3, 2011, DE, s. 9, ISSN 1861-8200
- [28] ZEMČÍK, P., DAGLESS, E.: *Printing gray scale images on a fax machine*, In: *Microprocessors and Microsystems*, roč. 18, č. 6, 1994, Amsterdam, NL, s. 271-279, ISSN 0141-9331
- [29] AL-HAMES, M., HAIN, T., ČERNOCKÝ, J., SCHREIBER, S., POEL, M., MÜLLER, R., MARCEL, S., VAN, L., D., ODOBEZ, J., BA, S., BOURLARD, H., CARDINAUX, F., GATICA-PEREZ, D., JANIN, A., MOTLÍČEK, P., REITER, S., RENALS, S., VAN, R., J., RIENKS, R., RIGOLL, G., SMITH, K., THEAN, A., ZEMČÍK, P.: *Audio-Visual Processing in Meetings: Seven Questions and Current AMI Answers*, In: *Proc. 3rd Joint Workshop on Multimodal Interaction and Related Machine Learning Algorithms (MLMI 2006)*, Washington D.C., US, 2006, s. 12
- [30] SUMEC, S., POTÚČEK, I., ZEMČÍK, P.: *Automatic Mobile Meeting Room*, In: *Proceedings of 31A'2005 International Conference in Computer Graphics and Artificial Intelligence*, Limoges, FR, 2005, s. 171-177, ISBN 2-914256-07-8
- [31] BERAN, V., ZEMČÍK, P., HEROUT, A.: *On-line Video Synchronization Based on Visual Vocabularies*, In: *International Journal of Signal and Image Processing*, roč. 2010, č. 2, TN, s. 7, ISSN 1737-9253
- [32] HEROUT, A., ZEMČÍK, P., HRADIŠ, M., JURÁNEK, R., HAVEL, J., JOŠTH, R., ŽÁDNÍK, M.: *Low-Level Image Features for Real-Time Object Detection, Pattern Recognition, Recent Advances*, Vienna, AT, IN-TECH, 2010, s. 111-136, ISBN 978-953-7619-90-9
- [33] HEROUT, A., JURÁNEK, R., ZEMČÍK, P.: *Implementing the Local Binary Patterns with SIMD Instructions of CPU*, In: *Proceedings of WSCG 2010*, Plzeň, CZ, ZČU v Plzni, 2010, s. 39-42, ISBN 978-80-86943-86-2
- [34] HEROUT, A., ZEMČÍK, P., JURÁNEK, R., HRADIŠ, M.: *Implementation of the "Local Rank Differences" Image Feature Using SIMD Instructions of CPU*, In: *Proceedings of Sixth Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Bhubaneswar, IN, IEEE CS, 2008, s. 9, ISBN 978-0-7695-3476-3
- [35] HEROUT, A., JOŠTH, R., JURÁNEK, R., HAVEL, J., HRADIŠ, M., ZEMČÍK, P.: *Real-time object detection on CUDA*, In: *Journal of Real-Time Image Processing*, roč. 2010, č. 1111, DE, s. 12, ISSN 1861-8200
- [36] ZEMČÍK, P., ŽÁDNÍK, M.: *Adaboost Engine*, In: *Proceedings of FPL 2007*, Amsterdam, NL, IEEE CS, 2007, s. 5, ISBN 1-4244-1060-6
- [37] ZEMČÍK, P., HRADIŠ, M., HEROUT, A.: *Exploiting neighbors for faster scanning window detection in images*, In: *ACIVS 2010*, Sydney, AU, Springer, 2010, s. 12, ISBN 978-3-642-17690-6
- [38] HEROUT, A., HRADIŠ, M., ZEMČÍK, P.: *EnMS: Early non-Maxima Suppression*, In: *Pattern Analysis and Applications*, roč. 2011, č. 1111, DE, s. 10, ISSN 1433-7541

- [39] VIOLA, P., JONES, M.: *Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features*, In: *Proceedings of CVPR 01*, vol. 1, pp.511, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'01), USA, 2001
- [40] SOCHMAN, J., MATAS, J.: *WaldBoost - learning for time constrained sequential detection*, In: *Proceedings of CVPR 2005*. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, USA, 2005 ISSN: 1063-6919, ISBN: 0-7695-2372-2
- [41] POULI, T., PRAŽÁK, M., ZEMČÍK, P., GUTIERREZ, D., REINHARD, E.: *Rendering fur directly into images*, In: *Computers and Graphics*, roč. 34, č. 5, 2010, Elmsford, NY, US, S. 612-620, ISSN 0097-8493
- [42] HANÁK, I., HEROUT, A., ZEMČÍK, P.: *Acceleration of the Detail Driven Method for Hologram Generation*, In: *Optical Engineering*, roč. 2010, č. 12345, US, s. 21, ISSN 0091-3286
- [43] HANÁK, I., ZEMČÍK, P., ŽÁDNÍK, M., HEROUT, A.: *Hologram synthesis accelerated in field programmable gate array by partial quadratic interpolation*, In: *Optical Engineering*, roč. 8, č. 48, 2009, US, s. 1-7, ISSN 0091-3286
- [44] PŘIBYL, B., ZEMČÍK, P.: *Simple Single View Scene Calibration*, In: *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*, Ghent, BE, Springer, 2011, s. 748-759, ISSN 0302-9743
- [45] SEEMAN, M., ZEMČÍK, P., JURÁNEK, R., HEROUT, A.: *Fast Bilateral Filter for HDR Imaging*, In: *Journal of Visual Communication and Image Representation*, roč. 2012, č. 1, 2011, Amsterdam, NL, s. 6, ISSN 1047-3203



## **ABSTRAKT**

Algoritmy zpracování a syntézy obrazu jsou zajímavým předmětem intenzivního výzkumu, jsou významným zdrojem aplikací informačních technologií v praxi a též velmi důležitým faktorem v rozvoji samotné výpočetní techniky díky velkým nárokům, které právě algoritmy zpracování a syntézy obrazu na výpočetní techniku kladou. V současnosti existuje řada tradičních oblastí, v nichž se zpracování a syntéza obrazu dlouhodobě uplatňuje, existuje ale i řada aplikací, kde se zpracování a syntéza obrazu uplatňují nově díky pokroku ve výpočetní technice. Ukazuje se, že tradičně oddělené výzkumné směry ve zpracování a syntéze obrazu postupně konvergují k jedné širší výzkumné oblasti. Navíc je zřejmé, že je i řada oblastí, v nichž se zpracování a syntéza obrazu dosud prakticky neaplikuje, ale v nichž do budoucna existuje velký aplikační potenciál, který je velkou motivací pro výzkum a vývoj. Tento text obsahuje stručný přehled tradičních a soudobých algoritmů i techniky pro zpracování a syntézu obrazu, přehled moderních výzkumných směrů, příklady aplikací a možných budoucích aplikací a též úvahu na téma smyslu a směrů výzkumu v dané oblasti informačních technologií.

## **ABSTRACT**

Algorithms of image processing and synthesis present an interesting subject of intensive research, source of applications of information technology, and an important factor for development of computer technology itself due to the demand for computational power presented by the algorithms of image processing and synthesis. Several traditional application areas of image processing and synthesis algorithms exist in which the algorithms are already exploited for a long time; however, some applications, in which the algorithms and technology of image processing and synthesis are used, are emerging contemporarily thanks to the continuous improvement in computer technology and apparently, the traditionally separated areas of image processing and synthesis are converging into one broader research area. Moreover, application areas exist, in which image processing and analysis are not yet possible to use but where exploitation of image processing and synthesis is possible and desirable and which present significant strong research and development potential. This text presents a brief overview of the traditional algorithms and methods in image processing and synthesis and also examples of modern research directions as well as examples of existing applications and possible future applications. Also, some thoughts on the purpose and directions of research in the given information technology field are presented.