Univerzita Karlova v Praze

Pedagogická fakulta

Katedra informačních technologií a technické výchovy

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Digitální technologie záznamu obrazu

Filip Svoboda

Vedoucí práce: PhDr. Tomáš Jeřábek, Ph.D.

Studijní program: Specializace v pedagogice (B 7507)

Studijní obor: 7507R040: Informační technologie se zaměřením na vzdělávání

2023

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Digitální technologie záznamu obrazu vypracoval pod vedením vedoucího práce samostatně za použití v práci uvedených pramenů a literatury. Dále prohlašuji, že tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

V Praze 3. 7. 2023 .....

podpis

Mé poděkování patří vedoucímu práce PhDr. Tomáši Jeřábkovi, Ph.D., a doc. PhDr. Vladimíru Rambouskovi, CSc., za odborné vedení, za vstřícnost a pomoc při získání potřebných informací a podkladů a za trpělivost a rady při zpracování této práce.

.....

podpis

ANOTACE

Předmětem bakalářské práce „Digitální technologie záznamu obrazu“ jsou digitální technologie záznamu obrazu v širším obecném pohledu, a to z hlediska principů, na nichž příslušná zařízení pro záznam obrazu pracují, i z hlediska funkcí a technických řešení těchto zařízení. Základním záměrem práce je podat identifikaci a analýzu funkčních a aplikačních možnosti soudobých digitálních technologií záznamu obrazu v kontextu odborného využití, a to se zohledněním vývoje záznamu obrazu a rozvoje technologií digitálních v návaznosti na technologie analogové. Analýza funkčních a aplikačních možností stávajících technologií je východiskem pro naznačení perspektiv a směrů vývoje digitálních technologií záznamu obrazu v blízké budoucnosti. Hlavním cílem práce je rozpracovat problematiku digitálních technologií záznamu obrazu, a podat tak příspěvek k rozvoji informační báze studentů a učitelů zabývajících se digitálními technologiemi. Obsahově je práce věnována historii a vývoji záznamu statického a dynamického obrazu, resp. prezentaci statického a dynamického záznamu, charakteristikám digitálního záznamu obrazu, specifikům příslušných zařízení a predikci perspektiv a směrů blízkého vývoje a využití digitálních technologií záznamu obrazu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Snímání obrazu, snímače CMOS, CCD, Foveon, TDI, zpracování obrazu.

ANNOTATION

The topic of the bachelor's thesis „Digital technologies of image record“ are digital technologies of the image record in a broader general view, describing principles of image capturing devices, describing functions and technical solutions of these devices. The basic aim of this thesis is to identify and to analyze functional and aplicational options of contemporary digital technologies for image record, especially in the context of their use by students and teachers – according to the achieved progress in image recordig and digital technologies succeeding the analog ones. Analysis of functional and aplicational possibilities of contemporary technologies is here set as a starting-point to indicate directions of technology development and progression in the near future. Mainly, aim of this thesis is to show and to describe every aspect of digital image record technology and by this to contribute to the information basis development of students and teachers dealing with these technologies. Content orientation of the thesis lies in history and development of both static a dynamic image record, respectively in history and development of the image record presentation, digital image record characteristics, image recording devices specifics and prediction of perspectives and directions of development of the near future digital image record technologies usage.

KEYWORDS

Image capture, image sensors CMOS, CCD, Foveon, TDI, image prossessing.

Obsah

1 Úvod ... 6
2 Vymezení tématu, cílů a metod práce ... 7
3 Vývoj záznamu a prezentace obrazu ... 8
3.1 Počátky záznamu statických obrazů ... 9
3.2 Počátky záznamu dynamických obrazů ... 12
3.3 Počátky digitálního záznamu ... 14
4 Současné technologie digitálního záznamu obrazu ... 17
4.1 Princip digitálního záznamu obrazu ... 18
4.1.1 Fotoelektrický jev ... 19
4.1.2 Řešení obrazových snímačů ... 20
4.1.3 Záznam barvy ... 22
4.1.4 Funkce obrazových snímačů ... 24
4.2 Parametry obrazových snímačů ... 27
4.2.1 Velikost a rozlišení obrazových snímačů ... 28
4.2.2 Citlivost a dynamický rozsah ... 30
4.3 Technologie obrazových snímačů ... 33
4.3.1 CCD ... 33
4.3.2 CMOS ... 39
4.3.3 Foveon X3 ... 42
5 Perspektivy záznamu obrazu ... 43
5.1 Digitální zpracování obrazu ... 44
5.2 Vývoj plošných snímačů ... 45
5.3 Digitální 3D záznamy ... 47
5.4 Rozvoj nových technologií ... 49
6 Závěr ... 51
7 Použitá literatura a prameny ... 53
8 Seznam obrázků ... 56

1 Úvod

Digitální technologie záznamu obrazu a na nich založená záznamová zařízení představují významnou a mezi uživateli široce rozšířenou oblast profesionální i spotřební elektrotechniky. Digitální záznam obrazu pronikl do všech sfér života společnosti a jeho rozšíření v populaci se v poslední době stalo naprosto enormní. K tomuto rozšíření vedl jednak technologický rozvoj klíčových prvků digitálního záznamu obrazu, jednak zlepšení parametrů i dostupnosti daných zařízení. Vedle specializovaných zařízení určených pro profesionální využití, resp. zájemce o fotografování či pořizování videozáznamů, která postupně nahradila předchozí generace analogových zařízení, vedla k všeobecném rozšíření digitálního záznamu obrazu integrace příslušných zařízení do mobilních telefonů. Díky miniaturizaci, automatizaci, dostupnosti a rychlému zlepšování technických i obslužných funkcí těchto přístrojů se digitální záznam obrazu stal integrální součástí profesních, zájmových či relaxačních aktivit prakticky celé populace.

Předložená bakalářská práce usiluje o uchopení tématu digitální technologie záznamu obrazu v širším obecném pohledu, a to z hlediska principů, na nichž příslušná zařízení pro záznam obrazu pracují, i z hlediska funkcí a technických řešení těchto zařízení. Jako zařízení pro záznam obrazu pojímá veškeré přístroje určené k pořizování statických i dynamických záznamů obrazu, popř. též zvuku, tj. veškeré přístroje, jejichž režimy činnosti jsou charakterizované jako fotopřístroje nebo videokamery založené na získávání, zpracování a ukládání digitalizovaných dat obrazu.

Základním záměrem této práce je podat identifikaci a analýzu funkčních a aplikačních možnosti soudobých digitálních technologií záznamu obrazu v kontextu odborného využití, a to se zohledněním vývoje záznamu obrazu a rozvoje technologií digitálních v návaznosti na technologie analogové. Analýza funkčních a aplikačních možností stávajících technologií by měla být východiskem pro naznačení perspektiv a směrů vývoje digitálních technologií záznamu obrazu v blízké budoucnosti.

Práce je svým pojetím prací teoretickou, takže pro její zpracování byly užity pouze teoretické výzkumné metody. Práce samotná je rozčleněna do pěti základních částí. V úvodní části je pozornost věnována zejména základnímu pojmovému aparátu a stanovení cílů a metod práce. Další část práce je věnována historii a vývoji záznamu statického a dynamického obrazu, resp. prezentaci statického a dynamického záznamu. Nejširší část práce se zabývá charakteristikami digitálního záznamu obrazu a specifiky příslušných zařízení. Poslední část práce je věnována směrům vývoje a perspektivám využití zařízení pro digitální záznam obrazu. Výsledkem práce je vymezení digitálních technologií záznamu obrazu, charakteristika historie a vývoje příslušných

zařízení, analýza principů, funkcí a technických řešení zařízení pro digitální záznam obrazu a predikce perspektiv a směrů blízkého vývoje a využití digitálních technologií záznamu obrazu.

2 Vymezení tématu, cílů a metod práce

Do oblasti zájmu práce spadají principy činnosti, stejně jako technická a funkční řešení širokého spektra zařízení užívajících digitálních technologií záznamu obrazu. Jedná se o zařízení, která získávají obrazová data analogovým procesem fotoelektrické konverze probíhající typicky ve fotodiodách vytvořených v mnohamilionových počtech na ploše snímacího čipu. Vytvořené náboje jsou vedeny jako napětí následně (CCD), resp. bezprostředně (CMOS) zesíleny a podrobeny procesu digitalizace v analogově-digitálním převodníku. Získaná digitální data jsou obvykle dále zpracována v obrazovém procesoru a ukládána v paměťových médiích. [1]

Po stránce funkční se může jednat o zařízení určená primárně pro pořizování statických záznamů, pro něž se v přesahu k dřívějším generacím techniky užívá označení digitální fotografický přístroj, resp. fotoaparát. Může se jednat též o zařízení určená primárně pro pořizování dynamických záznamů, pro něž se užívá označení digitální kamera nebo videokamera. Mnohá zařízení však mohou pořizovat jak statické, tak dynamické záznamy v závislosti na režimu jejich činnosti.[2]

Formulace cílů bakalářské práce vyplývá ze stanovených záměrů jejího zpracování. Hlavní záměr práce spočívá v identifikaci a analýze funkčních a aplikačních možnosti soudobých digitálních technologií záznamu obrazu z hlediska jejich odborného využití. Tento záměr je doplněn charakteristikou vývoje „předdigitálních“ technologií záznamu obrazu na straně jedné a analýzou perspektiv a směrů vývoje digitálních technologií záznamu v blízké budoucnosti na straně druhé.

Hlavním cílem bakalářské práce je v návaznosti na stanovené záměry rozpracovat širokou problematiku digitálních technologií záznamu obrazu. Rozpracováním dané problematiky by měla práce přispět k rozšíření informační báze studentů a učitelů zabývajících se digitálními technologiemi. Hlavní cíl byl dále redefinován do tří cílů dílčích:

- popsat vývoj technologií pro záznam statického a dynamického obrazu vedoucí k soudobým digitálním technologiím záznamu obrazu;

[1] HANUS, S. *Optoelektronické měniče*. Brno: VUT, 2008, s. 12 n.
[2] VÁVRA. V., ŠTELCEL, J. *Konstrukce a základní komponenty digitálních přístrojů*. Dostupné z WWW: <https://is.muni.cz/elportal/estud/prif/ps08/digitech/web/kapitola1/3.html>.

- identifikovat a analyzovat principy a funkční a aplikační možnosti soudobých digitálních technologií záznamu obrazu z hlediska jejich odborného využití;
- predikovat a formulovat perspektivy a směry blízkého vývoje a využití digitálních technologií záznamu obrazu.

Bakalářská práce je koncipována jako teoretická studie. K jejímu zpracování a plnění cílů a úkolů práce budou užity pouze teoretické výzkumné metody. Užito bude metod analytických a syntetických založených na studiu odborné literatury, konkrétně obsahové analýzy, komparace a případně reinterpretace jak primárních pramenů, tak pramenů sekundárních.

3 Vývoj záznamu a prezentace obrazu

Vývoj záznamu, resp. prezentace obrazu s využitím technických prostředků započíná již před stovkami let a prolínají se v něm různé systémy záznamu a prezentace statického nebo dynamického obrazu.

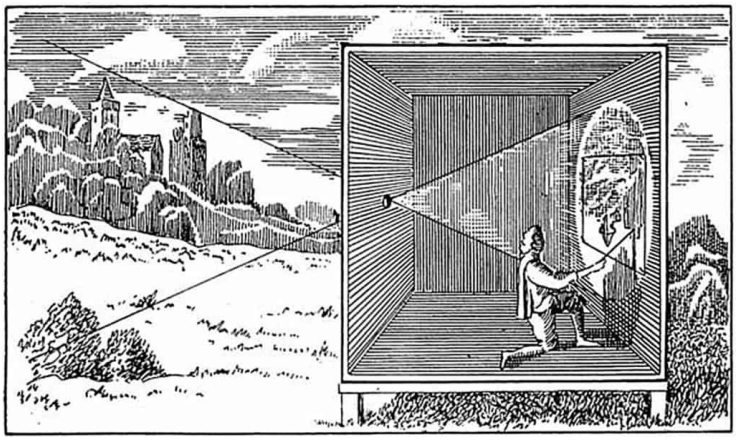
Pod pojmem statický obraz, statický záznam, resp. statická projekce se obvykle rozumí zachycení nebo prezentování v čase neměnných obrazů pro pozorování jedním či více diváky. Prezentace statických obrazů může být prováděna bez užití dalšího vybavení (fotografie) nebo s použitím přístrojů (projekce), které vybavují obraz z různých druhů předloh, přičemž se na promítací ploše vytváří jejich skutečný, převrácený a zvětšený obraz.[3]

Pojem dynamický obraz, dynamický záznam, resp. dynamická projekce se standardně užíval k označení optického zobrazení kinematografických filmů, při němž se na promítací ploše vytváří skutečný, převrácený a zvětšený obraz, který může být pozorován větším počtem diváků. Princip vnímání pohybu při záznamu a následném prezentování statických fázovaných snímků v určité snímkové frekvenci, kdy již není vnímající jedinec schopen rozeznat jednotlivé snímky, resp. fáze pohybu, je obecný a netýká se jen kinematografického snímání a promítání. Každé zařízení, které je schopno snímat a/nebo prezentovat fázované statické snímky ve snímkové frekvenci zcela minimálně 12, prakticky nejméně 16, 24, resp. 25 fps (frames per second) naplňuje požadavky dynamického záznamu a prezentace.[4] To se týká televizní techniky, počítačové grafiky i většiny soudobých digitálních systémů záznamu a prezentace obrazu.

[3] RAMBOUSEK, V. a kol. *Technické výukové prostředky*. 1. vyd. Praha: SPN, 1989, s. 81.
[4] LEVINSKÝ, O., STRÁNSKÝ, A. a kol. *Film a filmová technika*. Praha: SNTL, 1974.

3.1 Počátky záznamu statických obrazů

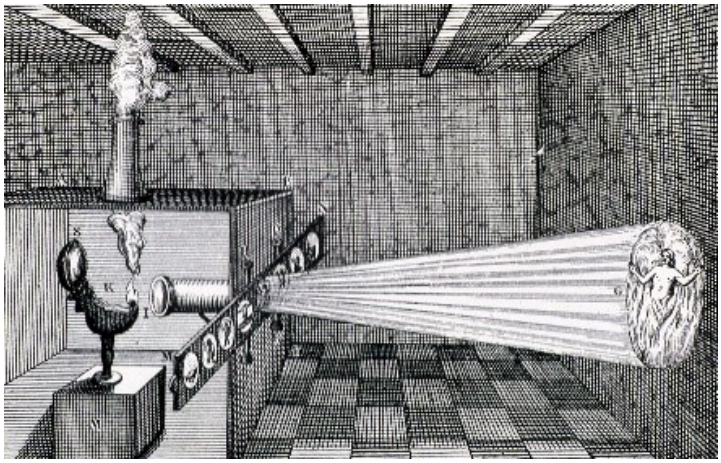
Roku 1020 vytváří arabský učenec Ibn-al-Haitham Alhazen (965-1040) dílo Opticae Thesaurus, v němž popisuje zařízení nazývané *camera obscura* (temná komora), o němž však pojednával již Aristoteles. Jednalo se o temnou komoru s otvorem, kterým dovnitř vnikají světelné paprsky vytvářející na protilehlé vnitřní stěně převrácený, obvykle zmenšený světelný obraz. Toto zařízení, nazývané též dírková komora, je považováno za společné východisko vývoje fotografické, filmové i projekční techniky. V následujících staletích, především pak v období humanismu se camera obscura stává pomůckou často využívanou učenci i umělci. Velké instalace o rozměrech místnosti sloužily k objevování principů optiky či perspektivy (např. 1485 Leonardo da Vinci), pozorování zatmění slunce (1545 Regnie Gemma Frisius) nebo kopírování či malování krajin. Roku 1550 nahrazuje Girolamo Cardano dírkový objektiv komory skleněnou čočkou. V roce 1620 vyvinul Jan Kepler přenosnou verzi camery obscury doplněnou o clonu a stínítko.[5]



Obr. 1 Malování krajiny pomocí camery obscury (Převzato z: https://magazine.artland.com/agents-of-change-camera-obscura/)

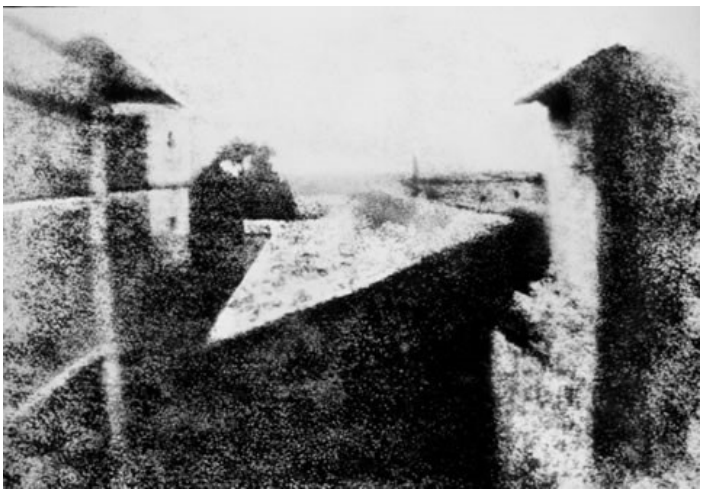
Athanasius Kircher popisuje poprvé v roce 1664 tzv. inverzi camery obscury, tj. její vybavení světelným zdrojem. Camera obscura se tímto změnila v promítací zařízení, které se začalo označovat jako *laterna magica* - kouzelná svítilna. Od roku 1685, kdy Johan Zahn rozpracoval vliv čoček o různých ohniskových vzdálenostech na velikost promítaného obrazu a vytvořil přenosnou verzi přístroje, se laterna magica užívala též jako prostředek zábavy pro projekci kreslených předloh.

[5] JÍLEK, F., KUBA, J., JÍLKOVÁ, J. *Světové vynálezy v datech*. Praha: Mladá fronta, 1980.



Obr. 2 Kircherova laterna magica (Převzato z: https://www.laterna.net/blogi/mista-tulee-nimi-laterna-magica)

Počátkem 19. století se objevují pokusy o využití camery obscury nejen k pozorování či obkreslování obrazů, ale k jejich zachycení, resp. záznamu. První pokusy o zachycení a uchování zrakem vnímané reality prováděl Joseph Niépce od roku 1816. Nejprve se pokoušel o otisky předloh na litografickou nebo skleněnou desku potaženou vrstvou roztoku asfaltu v petroleji, ale až 1826 se mu podařilo po osmihodinové expozici zachytit pomocí camery obscury snímek, a to na desku cínovou o rozměrech 163×203 mm. Místa v asfaltové vrstvě působením slunce nevytvrzená Niépce smyl olejem, a tak snímek vyvolal. Svoji metodu nazval heliografie.[6]

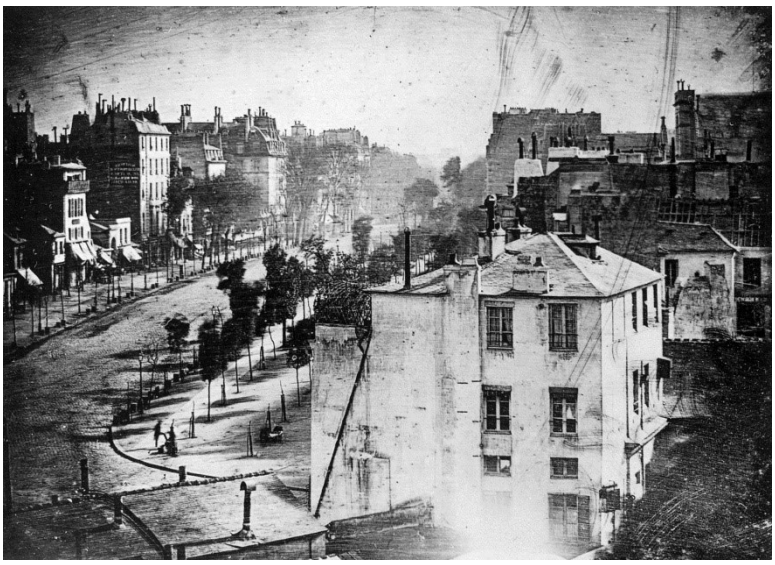


Obr. 3 Nejstarší dochovaný snímek „Pohled z okna v Le Gras" provedený metodou heliografie (Převzato z: https://www.alamy.it/fotos-immagini/niepce.html?sortBy=relevant)

Na práci Josepha Niépceho navázal Louis Jacques Daguerre, který rozpracoval zdokonalený postup zachycení obrazu z camery obscury na postříbřenou měděnou desku. Deska se nejprve musela aktivovat krystaly jódu, jehož páry vytvořily na povrchu desky na světlo citlivou vrstvu jodidu stříbrného (AgI). Obraz exponovaný minuty až hodiny se vyvolal parami rtuti a ustaloval

[6] CÍSAŘ, K. *Co je to fotografie?* Praha: Herrmann & synové, 2004. 365 s. ISBN 978-80-251-1579-4.

roztokem chloridu sodného (NaCl), později thiosíranu sodného ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$, ve starší literatuře nepřesně sirnatanu sodného). Osušená destička se nakonec zasklila, neb nebylo možno se jí dotýkat (aniž by byl obraz zničen). Objev tohoto postupu záznamu obrazu nazvaný *daguerrotypie* byl publikován po 23 letech vývoje roku 1839.[7]



Obr. 4 Snímek „Pohled na Boulevad du Temple, Paříž" z roku 1839 provedený metodou daguerrotypie (Převzato z: https://kouzlo-fotografie.webnode.cz/historie-fotografie/heliografie-daguerrotypie/)

Současně s daguerrotypií se rodí *kalotypie* využívající citlivosti dusičnanu stříbrného ($AgNO_3$) na světlo (William Fox Talbot 1839), která výrazně zkracuje expoziční časy, ale především poprvé pracuje s principem negativ-pozitiv umožňujícím vytvoření velkého počtu pozitivů. V dalších letech vede kalotypie k tzv. *mokrému kolodiovému procesu* (Frederick Scott Archer 1848, publikováno 1851), kde se na skleněné desce vytváří film nalitím kolodia (což je roztok nitrocelulózy v diethyletheru a ethanolu) s jodidem draselným a fotografická deska je následně aktivovaná dusičnanem stříbrným a za mokra exponována ve fotoaparátu. Expoziční časy se u mokrého procesu opět výrazně zkrátily a zlepšila se ostrost snímků i jejich reprodukovatelnost. Tyto přednosti vedly k tomu, že mokrý proces zatlačil daguerrotypii do pozadí.[8]

Od roku 1871 se začal prosazovat, tzv. *suchý želatinový proces*, který vynalezl Richard Leach Maddox. Tento proces byl založen na využívání skleněných desek pokrytých želatinou s bromidem kademnatým ($CdBr_2$) a dusičnanem stříbrným, tzv. *želatinovou emulzí bromostříbrného negativu*. I když byly bromostříbrné Maddoxovy desky zpočátku méně citlivé než kolodiové, pohodlně se s nimi pracovalo a po expozici se mohly vyvolávat dle potřeby později, což

[7] LEVINSKÝ, O., STRÁNSKÝ, A. a kol. *Film a filmová technika*. Praha: SNTL, 1974.
[8] TAUSK, P. Dějiny fotografie I. : Přehled vývoje fotografie do roku 1918. Praha: SPN, 1987, s. 212.

opět usnadnilo rozvoj fotografování. V roce 1879 vyvinul George Eastman stroj na potahování desek emulzí a ve své firmě Eastman Film and Dry Plate Company (Kodak) zavedl jejich výrobu. Jistou nepraktičnost práce s deskami vyřešil Hannibal Goodwin, který roku 1887 vynalezl fotografický film jako nový podkladový materiál pro fotografickou emulzi. Od roku 1889 již firma Kodak vyrábí svitkové filmy o 100 políčcích, které jsou určeny pro jejich levný přenosný fotoaparát.[9]

3.2 Počátky záznamu dynamických obrazů

Pokusy o demonstrování pohybu lze registrovat již ve spojení s Kircherovou laternou magicou (obr. 2), cestou promítání kreslených obrazů s fázovaným pohybem. Od třicátých let se začíná k demonstrování pohybu využívat *stroboskopický jev*, k němuž dochází, je-li spojitý periodický pohyb reprezentován diskrétními vzorky. Příkladem je osvětlení rotujících předmětů míhavým světlem, při kterém má pozorovatel dojem, že je pozorovaný předmět v klidu nebo se pohybuje menší rychlostí či opačným směrem, resp. při prezentování vhodných fázovaných obrazů má divák dojem pohybu. Poprvé tento jev popsali v roce 1836 Joseph Plateau a Simon Stampfer.[10]

Již v roce 1832 sestrojil Plateau zařízení, v němž se disk s radiálními štěrbinami otáčel před dalším souose připevněným otáčejícím se diskem, na kterém byly radiálně umístěny kresby fázovaného pohybu. Zařízení nazval *phenakistiskop*. Obdobné zařízení sestrojil ve stejné době Stampfer a nazval je *stroboskop*. Problematikou znázornění pohybu se zabýval i J. E. Purkyně. V roce 1841 zdokonalil Stampferův stroboskop a vytvořil *kinesiskop* (*phorolyt*). Ve své vědecké a pedagogické činnosti jej užíval jako studijní i demonstrační prostředek pro znázorňování dynamiky jevů a dějů především ve fyziologii.[11]

[9] EASTMAN, G. *Dějiny fotografie*. Praha: Collection, House, Slovart, 2010. 768 s. 978-80-7391-426-4.
[10] CIE TN 006:2016. *Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models.*
[11] RAMBOUSEK, V. Východiska a koncepty technologické podpory edukace. In *Vzdělávání pro život v informační společnosti I*. Praha: Vydavatelství ČVUT, Praha, 2005, s. 25-84. ISBN 80-7290-198-2.

Obr. 5 Purkyňův kinesiskop (Převzato z: https://blog.dorotheum.com/de/gut-gesehen-gut-gesammelt-josephinum/kinesiskop-nach-purkyne/)

Záznam a prezentace reálných dynamických obrazů vedl k propojení vedle sebe existujících principů stroboskopie, promítání a fotografie. Roku 1844 sestrojuje F. Uchatius přístroj, kterým bylo možno stroboskopické kreslené obrazy umístěné v kruhu na pevné průsvitné desce promítat. Jako první využil k promítání promítací plátno. V roce 1860 použil C. Sellers pro promítání fotografickým procesem připravené předlohy. Jeho přístroj *kinematoskop* tak poprvé propojil princip stroboskopie a fotografie. Propojení stroboskopie, fotografie a projekce přináší přístroj *fasmatotrop*, který vytvořil H. R. Heyl roku 1870.

V letech 1872-1878 se věnoval Eadweard Muybridge fotografickému studiu pohybů prostřednictvím tzv. sériové, resp. sekvenční fotografie nebo sekvenčního snímání prováděné více fotografickými přístroji (24 přístrojů) zachycujícími rychle za sebou fáze probíhajícího pohybu lidí a zvířat. V roce 1879 sestrojil Muydbridge *zoopraxiskop* jako první promítací přístroj pohyblivých obrazů. Do přístroje se vkládal kotouč s nalepenými fázemi pohybu nejprve kreslené, později vytvořené pomocí sériové fotografie. Kotouč se roztáčel klikou a přes objektiv se na plátno promítal pohybující se obraz.[12]

V roce 1880 sestrojil E. J. Marey *fotografickou ručnici*, v níž se za objektivem přerušovaně otáčela citlivá fotografická deska. S pomocí tohoto aparátu pořizoval chronografie pohybů – fotografie po sobě následujících okamžiků. Od roku 1888 začal místo citlivé desky používat proužek fotografického papíru. Kvalitu rychle po sobě prováděných snímků zlepšil vynález štěrbinové závěrky o rychlosti 1/1000 sekundy, který učinil O. Anschütz roku 1887. S ní pořizoval ostré fotografie rychlých dějů, které předváděl v pohybu prostřednictvím přístroje nazývaného *tachyskop*.

[12] JÍLEK, F., KUBA, J., JÍLKOVÁ, J. *Světové vynálezy v datech*. Praha: Mladá fronta, 1980.

Již v roce 1888 sestrojil W. Friese-Greene snímací přístroj pracující s děrovanými filmy, avšak roku 1891 patentoval T. A. Edison vlastní řešení snímací komory, kinematografické kamery, nazvané *kinetograf*. Pro kinematografickou kameru navrhl 35mm filmový pás s nitrocelulózovým podkladem a formátem obrazu 1,37:1 ve velikosti 24×36 mm. Patentován byl též nový způsob děrování filmů s otvory po obou stranách filmu, jmenovitou roztečí otvorů 4,75 mm a velikostí 2,80 mm×1,98 mm.

Edison ve stejném roce patentoval též *kinetoskop*, což byl přístroj pro pozorování filmu jedním divákem, a otevřel roku 1892 první filmové studio (Black Mary), kde natáčel kinetoskopické filmy. Edisonovy přístroje inspirovaly Augusta a Louise Lumièry k sestavení vlastního snímacího a promítacího zařízení, které nazvali *kinematograf*. S ním 28. prosince 1895 uspořádali první veřejné kinematografické představení, při němž promítli jedenáct krátkých filmů.[13]

I když byly první snímací a projekční přístroje ovládané ručně a obrazová frekvence nemohla být naprosto stálá a přesná, bylo vždy snahou pořizovat a promítat filmy s frekvencí vyšší než 12 snímků za sekundu, kdy vzhledem k tzv. setrvačnosti vnímání zrakem (cca 1/10 sekundy) počíná iluze propojeného pohybu. Zpočátku se v praxi užívala obrazová frekvence 16 fps, později se normou stala frekvence 24 fps a v rámci synchronizace s frekvencí střídavého napětí v elektrorozvodné síti 50 Hz frekvence 25 fps. Ve frekvenci 25 fps, ale i mnohem vyšších hodnotách obrazové frekvence (50 fps, 100 fps) pracují soudobá digitální záznamová zařízení.

3.3 Počátky digitálního záznamu

Počátky cesty k digitálnímu záznamu obrazu spadají do počátku 50. let 20. století. Dosavadní široce využívaný optochemický způsob zachycování světelných paprsků ke konzervaci statických i dynamických obrazů byl v této době obohacen o možnost zaznamenávat elektronické signály produkované televizní kamerou, a tak zaznamenávat televizní obraz. V návaznosti na již rozpracovanou technologii záznamu zvuku magnetofonem vyvinula v roce 1951 firma Bing Crosby Laboratories ve spolupráci se společností Ampex první videomagnetofon, resp. videorekordér, který byl ve zdokonalené verzi VR1000 od roku 1956 běžně používán v televizním průmyslu. Zařízení VR 1000 přineslo technické řešení užívané po mnoho desetiletí, tzv. šikmý záznam. Analogový videosignál byl zaznamenáván systémem *Quadruplex* na dvoupalcový magnetický pásek (51 mm) délky 1463 m na cívce. Technicky nerealizovatelnou potřebu enormní rychlosti pohybu pásku

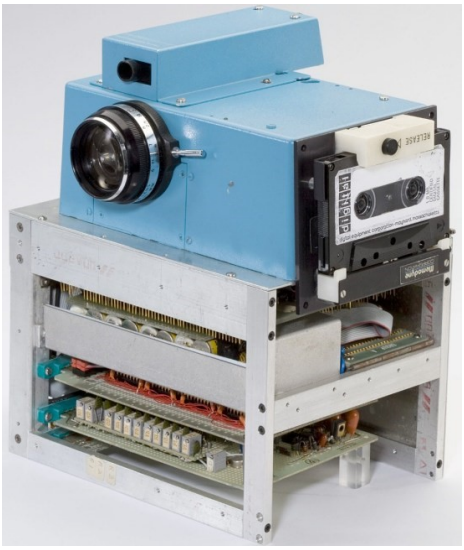
[13] KRESTA, D. *Dějiny světového filmu 1. Němý film*. Olomouc, UJEP, 2013. ROBINSON, D. (1997). *From Peepshow to Palace: The Birth of American Film*. New York and Chichester, West Sussex: Columbia University Press, 1997. ISBN 0-231-10338-7.

(vzhledem k množství zaznamenávaných signálů) překonali vývojáři systémem rotujících hlav. Čtyři záznamové (čtecí) hlavy se otáčejí na hlavovém bubnu rychlostí 14 400 otáček za minutu. Hlavový buben je mírně nakloněný vzhledem k pohybu pásku, takže hlavy vyvářejí na jeho povrchu husté šikmé stopy pokrývající prakticky celou plochu pásku. Díky tomu postačovalo, že se pásek mohl kolem hlavového bubnu pohybovat pouze rychlostí 15 palců (38 cm) za sekundu.[14]

V šedesátých letech se rozvíjejí aplikace ukládání analogových i digitálních signálů nesoucích obraz. Tyto aplikace jsou akcelerovány především vojenským a kosmickým výzkumem. V roce 1972 např. Texas Instruments patentoval bezfilmovou elektronickou kameru. V témže desetiletí též došlo k objevu dvou, pro budoucí vývoj digitálního záznamu obrazu významných, druhů integrovaných obvodů citlivých na světlo, a to *CMOS* - Complementary Metal Oxide Semiconductor (1963) a *CCD* - Charge Coupled Devices (1969). I když oba obvody nebyly vytvořeny pro potřeby snímání světla a jeho převod na elektrický náboj (fotoelektrickou konverzi), daly postupem času vzniknout digitálnímu záznamu obrazu.

V roce 1975 vytvořil Steven Sasson ve firmě Kodak digitální fotoaparát, jímž pořídil první digitální fotografii. Při zkoumání vlastností integrovaného obvodu CCD vyřešil rychlý zánik elektrických nábojů, vzniklých v důsledku fotoelektrické konverze, cestou jejich digitalizace a následného uložení digitálních dat do paměti RAM a poté na magnetofonovou pásku. Zaznamenaný obraz o rozlišení 100×100 pixelů bylo možno zobrazit na televizoru. Objev digitální fotografie nenalezl žádnou podporu ani v samotné firmě Kodak orientované na klasickou fotografii. Přesto získal v roce 1978 digitální fotoaparát patent.[15]

[14] KADLEC, O. *Historie digitální fotografie*. Brno: FI MU. Dostupné z WWW: <http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2004/xkadlec2.htm>.
[15] ANDOR TECHNOLOGY. *Digital Camera Fundamentals.* Dostupné z WWW: <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/digital-camera-fundamentals>.



Obr. 6 První digitální fotoaparát Stevena Sassona vytvořený ve firmě Kodak (Převzato z: https://digineff.cz/prvni-byl-kodak/)

První komerční elektronický fotoaparát, resp. videokameru uvedla na trh firma Sony v srpnu 1981. Přístroj byl vybaven CCD snímačem, který produkoval analogový video signál v rozlišení 570×490 pixelů. Získané obrazy byly zaznamenány na mini disk *Mavipak 2.0"* (s úložnou kapacitou pro 50 snímků) a poté vloženy do videočtečky připojené k televiznímu monitoru. Nejednalo se tedy o skutečný digitální fotoaparát, ale spíše o televizní kameru zaznamenávající statické snímky.

V roce 1983 byl sestrojen první astronomický dalekohled se snímačem CCD a v roce 1986 vyvinula firma Kodak první CCD snímač, který byl schopen zaznamenat 1,4 milionu pixelů. Tím bylo dosaženo kvality, jež mohla konkurovat fotografické kvalitě při rozměrech 5×7 palců.[16]

Impulsem k širšímu využití digitální fotografie pro neprofesionální využívání se stal v roce 1994 fotoaparát *Apple QuickTake 100*, který pracoval s domácím počítačem připojeným přes sériový kabel a poskytoval digitální snímky o rozlišení 640×480 pixelů ve 24bitové barevné hloubce. V roce 1995 následovaly fotoaparáty *Kodak DC40* a *Casio QV-11*, z nichž druhý jmenovaný byl již osazen LCD monitorem. Tyto první široce využívané digitální fotoaparáty doplnil v roce 1996 fotoaparát *Cyber-Shot* společnosti Sony.[17]

[16] LUCENT TECHNOLOGIES. CCD - *The History of CCDs or Charge Coupled Devices*. 2008. Dostupné z WWW: <https://www.thoughtco.com/history-of-the-digital-camera-4070938>.
[17] HYAN, Jaroslav Tomáš. *Digitální fotografie*. Praha: JTH-Soft, 1998. 158 s. ISBN 80-238-3176-3.

Obr. 7 Apple QuickTake 100 z roku 1994 (Převzato z: https://www.cnet.com/culture/the-icamera-a-look-back-at-apples-first-digital-camera/)

Vzhledem ke skutečnosti, že CCD a především CMOS snímače vykazují značené výhody oproti fotografickému filmu, zejména vyšší odolnost proti šumu a mnohem vyšší citlivost, staly se pro vědecké zobrazovací aplikace (astronomie, mikroskopie) nepostradatelné již v 80. letech. Po nástupu digitálních fotoaparátů v 90. letech pak dochází k vytlačování klasické fotografie i v oblasti neprofesionální a digitální záznam obrazu se cca od roku 2000 stal zcela dominantním způsobem záznamu statického i dynamického obrazu.

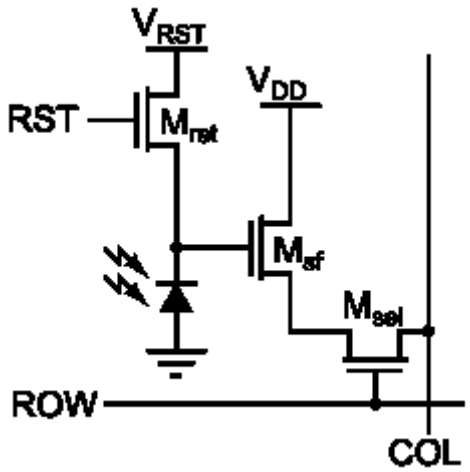
4 Současné technologie digitálního záznamu obrazu

Prakticky všechna zařízení pro záznam obrazu používají nyní plošné nebo lineární snímače tvořené nejčastěji integrovanými obvody typu CCD nebo CMOS, které jsou osazeny fotodiodami citlivými na světlo. Těchto fotodiod může být na ploše snímače od desítek tisíc po mnoho milionů. Standardní proces záznamu obrazu senzorem probíhá v těchto krocích:

- *Příprava snímače* – Ze snímače jsou bez přístupu světla odebrány volné elektrony (otevření transistoru M_{rst}, viz Obr. 8). Tímto jsou odstraněna případná rezidua předchozího snímání nebo jakkoli jinak vzniknuvší náboj za PN přechodem fotodiody - snímač je připraven k expozici.
- *Expozice* – Po předem stanovenou dobu (vymezenou expozicí) začnou dovnitř objektivem vnikat světelné paprsky – fotony dopadají na PN přechod fotodiody a vyrážejí elektrony vně přechodu. Na jedné jeho straně se tedy kumulují elektrony, na opačné díry, které nemohou vzájemně rekombinovat, neboť je odděluje

nepropustný PN přechod, který tak funguje analogicky k dielektriku kondenzátoru. Tím je dovršena fotoelektrická konverze – přeměna fotonů světla na náboj na bázi (*gate*) transistoru M_{sf}. Takto vytvořený náboj je úměrný energii dopadajících fotonů.

- *Přenos nábojů* – Vytvořený náboj se při tzv. skenování (skenu) přenáší různými způsoby k zesilovači, který jej zesílí na napěťové úrovně vhodné pro další zpracování obrazu. V případě Obr. 8 jde o transistor M_{sf} (zesílení) a M_{sel} – odečítání zesíleného náboje do sběrnice (skenování).
- *Digitalizace* – Zesílené náboje, resp. napěťové úrovně jsou vedeny do analogově-digitálního (A/D) převodníku, kde je analogový signál digitalizován a následně zpracován v obrazovém procesoru.



Obr. 8 aktivní třítranzistorový (3T) pixel CMOS. Převzato z https://en.wikipedia.org/wiki/Active-pixel_sensor

Jednotlivé fotodiody snímače jsou citlivé pouze na intenzitu dopadajícího světla, resp. úroveň jasu a vlnovou délku dopadajícího světla. Pro možnost záznamu barvy se užívá sekvenční systém tří po sobě jdoucích expozic přes filtry RGB nebo pod osvětlením RGB světly (barevné separace), či zdaleka nejrozšířenější systém, kdy je před každou fotodiodou umístěn barevný filtr a tato buňka mění na náboj pouze světlo vlnových délek prošedších filtrem.

4.1 Princip digitálního záznamu obrazu

Digitální technika, resp. výpočetní technika obecně, typicky s fotony nepracuje, proto je pro digitalizaci obrazu zapotřebí nejdříve obraz tzn. světlo převést na elektrické impulzy, resp. úrovně napětí, k tomu je užíváno fotoelektrického jevu.

4.1.1 Fotoelektrický jev

Základním principem zachycení světelných paprsků ve světlocitlivých snímačích je fotoelektrický jev či fotoefekt. Jedná se o obecný fyzikální jev, při němž jsou v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou uvolňovány elektrony z obalu atomu. Fotoelektrický jev poprvé popsal 1887 Heinrich Hertz a pomocí kvantové teorie objasnil 1905 Albert Einstein.[18]

Při působení elektromagnetického záření nemusí vždy docházet k fotoelektrickém jevu. Posuzovat lze tzv. kvantovou účinnost zařízení (*EQ - Quantum Efficiency*), která je definována jako poměr počtu uvolněných elektronů k počtu dopadnuvších fotonů a udává se v procentech, tzn. kolik fotonů z dopadajícího záření je využito (detekováno) snímačem. Jestliže k fotoelektrickému jevu dojde, předá každý foton svou veškerou energii jen jednomu elektronu a zanikne. Vzhledem k tomu lze fotoelektrický jev využít též jako fotoelektrickou konverzi[19], jak je popsáno výše.

Uvolněné elektrony mohou vystupovat z povrchu látky (především kovu), nebo zůstávají uvnitř látky (především polovodiče). V prvém případě se jedná o tzv. vnější fotoelektrický jev, ve druhém případě o tzv. vnitřní fotoelektrický jev, který se uplatňuje u polovodičů citlivých na světlo, tudíž u všech na světlo citlivých polovodičových snímacích prvků.[20]

Absorbovaný foton dokáže při nárazu do atomu polovodiče snímacího elementu vyrazit některý z jeho valenčních elektronů z elektronového obalu atomu a dát mu kinetickou energii. Fotony tak emitují určité množství elektronů, takže ve světlocitlivém elementu vznikne zjistitelný elektrický náboj, který je úměrný intenzitě světla, které do buňky dopadlo, přičemž však kinetická energie emitovaných elektronů je závislá na frekvenci, a nikoliv na intenzitě dopadajícího záření. Každá buňka snímače tak pracuje jako analogové zařízení a jejím výstupem je analogové napětí úměrné intenzitě záření a jeho vlnové délce.[21]

Polovodičové snímací prvky mohou absorbovat fotony záření různých vlnových délek. Standardní snímače jsou konstruovány pro konverzi viditelného světla v oboru vlnových délek cca 380 – 760 nm. V tomto oboru mají snímače velmi dobrou kvantovou účinnost - vyšší než 50 % při standardním osvětlení. Speciální konstrukce tzv. řádkových TDI snímačů umožňují zvýšit

[18] JÍLEK, F., KUBA, J., JÍLKOVÁ, J. *Světové vynálezy v datech*. Praha: Mladá fronta, 1980.
[19] VOJÁČEK, A. *Principy a málo známé vlastnosti CCD snímačů obrazu.* Dostupné z WWW: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006041001>.
[20] *Concepts in Digital Imaging Technology*. Dostupné z WWW: <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/concepts.html>
[21] HANUS, S. *Optoelektronické měniče*. Brno: VUT, 2008.

kvantovou účinnost i při velmi slabém osvětlení, a to v širokém spektrálním rozsahu od ultrafialové oblasti až po blízkou infračervenou oblast, tj. od 200 do 1100 nm.[22]

4.1.2 Řešení obrazových snímačů

Obrazové snímače jsou elektronické polovodičové součástky sloužící k přeměně optického obrazu na elektrický signál. Jsou to tudíž zařízení citlivá na světlo, obsahující elementy schopné registrovat světlo a jeho intenzitu. Světlocitlivé elementy jsou u moderních obrazových snímačů řešeny jako křemíkové fotodiody tvořené stykem dvou polovodičů různých elektrických vlastností (přechod PN). Je-li fotodioda elektricky aktivní a do prostoru polovodičového přechodu dopadnou fotony, může dojít k fotoelektrickému jevu a fotony se přemění na kinetickou enegii elektronů, které se díky ní mohou ocitnout vně PN přechodu fotodiody, kde se díky nepropustnosti PN přechodu v závěrném směru hromadí jako elektrický náboj úměrný počtu dopadnuvších fotonů. Velikost tohoto elektrického náboje určuje napětí na bázi CMOS tranzistoru, tedy MOS-FET – nábojem tzn. elektrickým polem řízeného tranzistoru, na výstupu tohoto tranzistoru se tedy objevuje zesílené napětí náboje původně vzniklého fotoelektrickou konverzí.

Obrazové snímače se vytvářejí na ploše monokrystalu křemíku opakovaným procesem fotolitografie a leptání. Tato metoda dovoluje prostřednictvím světla různých vlnových délek včetně UV záření přenášet z tzv. fotomasky na plochu krystalu křemíku pokrytou vrstvou oxidu křemičitého velmi malé struktury budoucích obvodů ve velikosti až několika nanometrů. Exponované motivy jsou následně v tenké vrstvě odstraněny leptáním, nebo naopak dotovány novým materiálem, např. kovem (hliník) nebo polykrystalickým křemíkem při vytváření elektrod a hradel. Obrazový snímač prochází fotolitografickým procesem při své výrobě opakovaně, i více než padesátkrát.[23]

Každá fotodioda vytvořená na ploše snímače je doplněna pomocnými obvody sloužícími u posuvných registrů k přemístění vytvořených nábojů do snímacího zesilovače nebo k řízení diody a zpracování vytvořeného náboje. Jedna fotodioda je tak doplněna nejméně třemi či čtyřmi hradly tvořenými dvojicí tranzistorů a hradlovými elektrodami. Fotodiod, z nichž každá je schopna snímat jeden obrazový prvek (pixel nebo subpixel), je na ploše snímače vytvořeno velké množství. Podle účelu a provedení se počet fotodiod vytvořených na ploše snímače udává v desetitisících, milionech i stovkách milionů. Velikost těchto fotodiod se pohybuje standardně kolem jednoho nebo dvou μm,

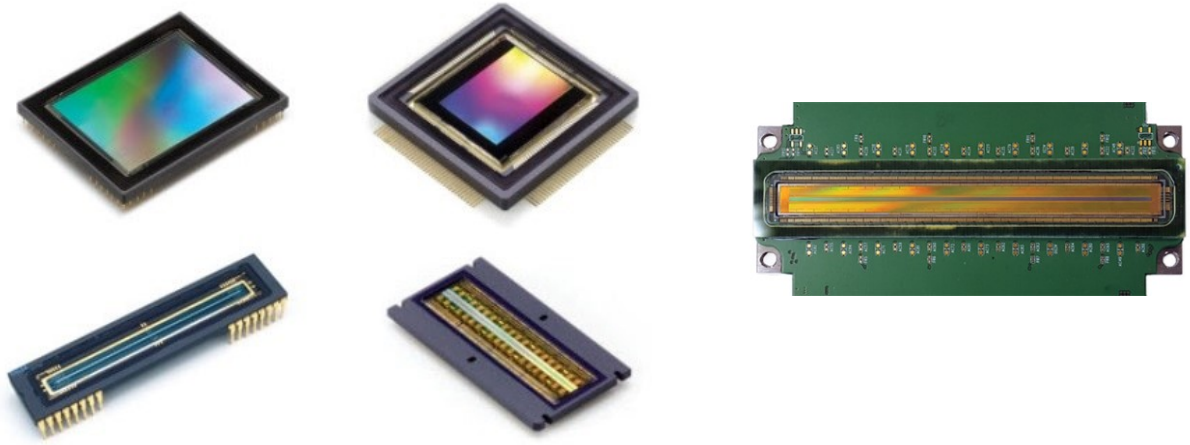
[22] ŘÍČNÝ, V. *Vlastnosti a využití řádkových světlocitlivých snímačů CCD*. Knižnice odborných a vědeckých spisů VUT v Brně. Brno: VUT, 1990. 116 s. ISBN 80-214-0222-9

[23] LORAL FAIRCHILD CCD IMAGING DATABOOK. *CCD Sensors, Systems &Developmental Technology*. Milpitas: Loral Fairchild Imaging Sensors, 1995.

ale ve speciálních snímačích může dosáhnout až 24 μm. Počet fotodiod přímo souvisí s rozlišením daného senzoru udávaného obvykle v megapixelech (např. 1, 4, 32 nebo 201 či 450 megapixelů).

Obrazové snímače se produkují ve třech základních provedeních. Prvním typem jsou snímače plošné určené především pro digitální fotoaparáty a kamery. Tyto snímače mohou mít různou velikost i poměr stran, např. 24×36 mm s poměrem stran 4:3 (*Full-frame FX*) nebo 18,6×28,9 mm s poměrem stran 3:2 (*APS-H*). Jednotlivé fotodiody jsou na ploše snímače rozloženy v pravidelné pravoúhlé síti se stejnými odstupy, nebo jsou organizovány do hexagonální mřížky inspirované včelí pláství (např. *Super CCD HR*), popř. jsou organizovány diagonálně (např. *CCD HXR*). Plošné snímače jsou vytvářeny technologií CCD nebo CMOS. Za plošné snímače třeba považovat též RGB pláty systému *Foveon* realizované technologií CMOS.

Druhým typem obrazových snímačů jsou snímače řádkové určené především pro 2D skenery, kde snímač snímá postupně jednotlivé dílčí řádky předlohy. Základem snímače je jedna řádka světlocitlivých elementů technologie CCD nebo CMOS. Na snímač jsou postupně exponovány světelné odrazy od dílčích řádků předlohy, nebo celý snímač projíždí nad předlohou (popř. projíždí předloha před snímačem) a při krátkých zastávkách snímá dílčí řádky předlohy. Lineární snímače mohou mít někdy dva řádky světlocitlivých elementů, kde druhý řádek plní funkci korekční nebo náhledovou.



Obr. 9 Obrazové snímače. Zleva: Plošný a lineární snímač CCD, plošný a lineární snímač CMOS a víceřádkový snímač TDI (Převzato z: https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=1007; https://www.vision-systems.com/cameras-accessories/image-sensors/article/1)

Třetím typem jsou snímače časového zpoždění a integrace (Time Delay Integration - TDI), které fungují podobně jako řádkové snímače, avšak tvoří je desítky až stovky řádků, které snímají dílčí řádky opakovaně. Tyto snímače zvyšují citlivost převzorkováním předlohy přes množství řádkových senzorů, které jsou časově zpožděně synchronizovány s relativním pohybem mezi

předlohou a řádkovými senzory. Tyto velmi citlivé snímače zvyšují rozlišení obrazu, snižují šum a vytvářejí obraz s dostatečným kontrastem i při kratších expozicích, uplatňují se ve strojovém vidění, mikroskopii a kosmickém průzkumu.[24]

4.1.3 Záznam barvy

Pro zachycení barvy (informace o frekvenčních charakteristikách zachycených fotonů) v užitém barevném modelu (nejčastěji RGB) nemusí být obrazový snímač speciálně upravený. Při systému sekvenčního barevného snímání, je monochromatický snímač postupně osvětlen přes výměnné barevné RGB filtry nebo odrazem barevných RGB světel. Toto tzv. tříprůchodové snímání využívané především u profesionální techniky zachycuje tři po sobě jdoucí expozice k získání barevných charakteristik RGB digitálního obrazu. Předností této techniky je možnost plně využít celé pole fotodiod obrazového snímače použitím jednoho průchodu pro každou barvu. Oddělené charakteristiky barevných expozic, avšak nikoli následně nýbrž současně, získává též systém pracující se třemi plošnými monochromatickými obrazovými snímači, které osvětluje barvodělící RGB systém barevnými separacemi obrazu. Takovýto systém je implementován např. do kvalitních kamer.[25]

Druhou možností zachycení barvy je v praxi mnohem šířeji užívaný způsob, kdy jsou přímo před jednotlivé fotodiody snímače instalovány barevné filtry propouštějící světlo pouze určitých vlnových délek (typicky opět RGB). Každá jedna fotodioda se tak stává snímačem jen určité barvy (spektralního rozsahu) světla.

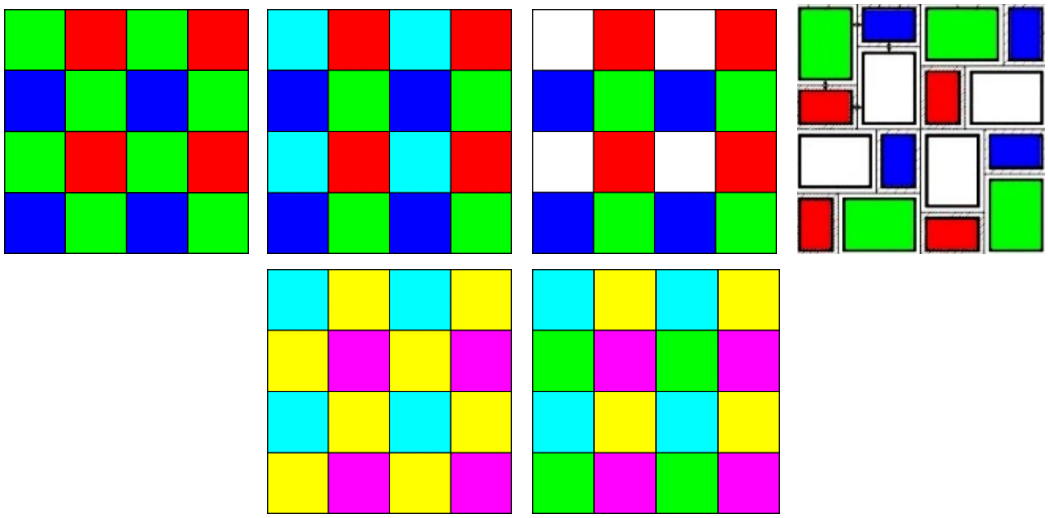
U plošných snímačů jsou barevné filtry rozloženy podle barevných masek pracujících vždy se čtveřicí fotodiod, jejichž signály jsou určeny pro výpočet barvy jednoho pixelu obrazu. Tento systém mozaikových filtrů se užívá masově u digitálních fotoaparátů a levnějších kamer.

První barevnou masku, tzv. *Bayerovu masku* patentoval 1976 Bryce E. Bayer z firmy Kodak. V bayerově uspořádání je čtveřice fotodiod, resp. subpixelů vybavena filtry RGBG (červená-zelená-modrá-zelená). Pro jeden pixel musí být vzhledem k pravidelnému rozložení fotodiod na ploše snímače brána jako jednotka čtveřice subpixelů. V tom případě musí být jedna barva filtru užita dvakrát. Vzhledem tomu, že oko je nejcitlivější na žlutozelenou barvu, je informace o této barvě velmi významná, a byla tak dvakráte užita právě barva zelená (žlutozelená). Z hodnot dvou zelených subpixelů postupuje do obrazového procesoru jejich průměr. Výhodou masek modelu RGB je jejich

[24] *CCD vs. CMOS*. Dostupné z WWW: <http://www.teledynedalsa.com/en/learn/knowledge-center/ccd-vs-cmos/>.
[25] VOJÁČEK, A. *Principy a málo známé vlastnosti CCD snímačů obrazu.* Dostupné z WWW: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006041001>.

přímý vztah k rekonstrukci barvy ze složek RGB a nevýhodou skutečnost, že v této barevné kombinaci prochází filtry vždy jen třetina energie dopadajícího světla. Pro zlepšení funkce snímačů byl jeden zelený filtr změněn na jinou barvu, např. v kombinaci RGBE (červená-zelená-modrá-smaragdová), nebo byl jeden filtr zcela odstraněn pro zvýšení jasu pixelu v kombinaci RGBW (červená-zelená-modrá-bílá). Tento model je kombinován i se změnou geometrie čtveřice subpixelů.

Vedle barevné masky v modelu RGB a jejích variant se u levnějších zařízení užívá též model CMY, např. kombinaci CYYM (azurová-žlutá-žlutá-purpurová) nebo pro korekci barev v kombinaci se zelenou CYGM (azurová-žlutá-zelená-purpurová).[26]



Obr. 10 Běžně užívané barevné masky obrazových snímačů. Horní řada zleva: RGBG, RGBE, RGBW, RGBW se změnou geometrie. Dolní řada zleva: CYYM, CYGM, (Převzato z http://www.quadibloc.com/other/cfaint.htm)

Obr. 10 ukazuje barevné masky, které jsou výrobci snímačů využívány nejčastěji. Existuje však velké množství různých variant barevných masek, které kombinují filtry RGB, W, CMY a zařazují i další barevné filtry. Též tvar jednotlivých filtrů nebývá vždy čtvercový nebo obdélníkový. U některých snímačů se v závislosti na tvaru fotodiod uplatňují filtry hexagonální, např. v případě Super CCD HR.

U lineárních snímačů je jedním barevným filtrem pokryta celá řádka světlocitlivých elementů (barevný proužek). Pro záznam barvy musí snímač sestávat nejméně ze tří řádků snímačů, z nichž každý je překryt jiným filtrem, nejčastěji v systému RGB. Toto řešení se nazývá trilineární uspořádání snímače a jeden pixel obrazu je zde vytvářen ze signálů trojice fotodiod ležících vedle sebe ve třech různých lineárních snímačích.

[26] *Color Filter Array Designs.* Dostupné z WWW: <http://www.quadibloc.com/other/cfaint.htm>.

4.1.4 Funkce obrazových snímačů

V důsledku fotoelektrického jevu vzniká působením energie fotonů světla v jednotlivých fotodiodách snímače elektrický náboj. Jeho velikost závisí na intenzitě dopadajícího světla, jeho frekvenci a době, po níž je snímač při expozici vystavený světlu. Vytvořený náboj je udržován v prostoru fotodiody v její sběrné bráně potenciálovou jámou. Každý vytvořený náboj tak představuje jeden pixel monochromatického snímače nebo jeden barevný subpixel snímače s mozaikovou barevnou maskou.

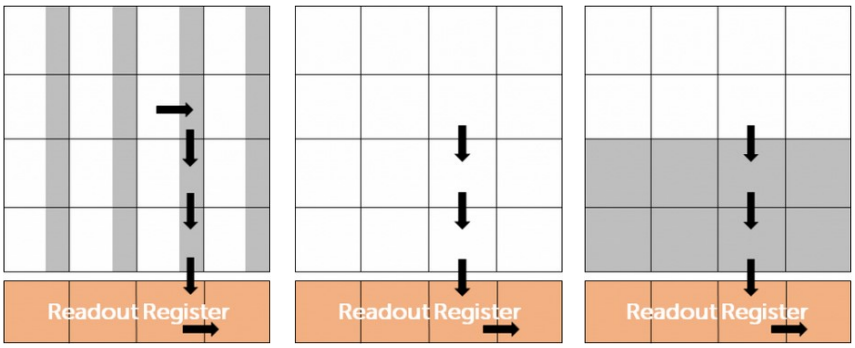
Zachycené náboje je třeba po době dané expozicí obrazu odebrat a převést na elektrický signál. Kdyby nedošlo včas k odběru náboje, resp. byla z jiného důvodu kapacita sběrné brány fotodiody zcela saturována, může dojít k přetečení a rozlivu přebytečných elektronů do sousedních struktur zařízení. Tato situace se označuje jako *blooming* a vede k výraznému poškození (bílé skvrny, pruhy) obrazu.

U snímačů CMOS dochází k převodu náboje na elektrický signál a dále na digitální hodnotu přímo v pomocných a digitalizačních obvodech, jimiž je fotodioda obklopena. U snímačů CCD pracujících s nábojovou vazbou se náboje posouvají z jedné sběrné brány do vedlejší pomocí vytváření potenciálových jam. Nakonec jsou náboje svedeny do sériového registru, jímž jsou jako napěťové signály vedeny ke snímacímu zesilovači. K přenosu nábojů ze sběrných bran do výstupního uzlu se používá několik schémat, resp. metod skenování (skenu) nábojů[27]:

- **Prokládaný sken** (IT – *Interline Transfer*) je metoda, při které náboje přecházejí z buněk nejdříve do pomocných paralelních registrů a jimi postupují do hlavního sériového registru a poté do zesilovače. Pomocné registry jsou sloupce proti světlu chráněných buněk, do nichž jsou převedeny náboje ze sloupců buněk citlivých na světlo. Při tomto uspořádání má snímač přibližně poloviční rozlišení, neb polovina buněk je zakryta a slouží jako paralelní registry.
- **Progresivní sken** (FF – *Full Frame*) je metoda, kdy náboje opakovaně přecházejí po řadách do buněk sousední řady a nakonec vstoupí do sériového registru, po němž postupují k zesilovači. Protože je u tohoto skenu vystavena světlu celá plocha snímače, musí být po dobu přesouvání nábojů snímač zakryt mechanickou clonou (*mechanical shutter*).

[27] VOJÁČEK, A. *Principy a málo známé vlastnosti CCD snímačů obrazu.* Dostupné z WWW: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006041001>.

- **Plošný sken** (FT – *Frame Transfer*) je metoda, kde náboje z plochy vystavené světlu (*imaging area*) rychle přejdou do paralelní plochy sloužící jako odkládací a přenosový registr, resp. pole (*storage area*). Aktivní plocha snímače tak může okamžitě přijímat další obraz, zatímco jsou náboje v přenosovém poli zpracovávány. Metoda tak umožňuje rychlé expozice.[28]



Obr. 11 Pohyb náboje jedné buňky při různých metodách skenu. Zleva: prokládaný sken, progresivní sken, plošný sken (Převzato z https://www.photometrics.com/learn/camera-basics/types-of-camera-sensor)

Elektrické náboje jednotlivých fotodiod jsou u snímačů CCD jako elektrické napěťové signály vedeny sériovým registrem do snímacího zesilovače, který je zesílí na vhodné napětí dle standardní nebo požadované vyšší citlivosti snímače. Zesílené signály vstupují dále do analogově-digitálního převodníku (A/D převodník), který převádí napětí jako spojitý (analogový) signál z dané fotodiody na signál diskrétní (digitální), na číslo.

Při digitalizaci spojitých signálů je vzorkovací frekvence dána dobou expozice fotodiody, rychlostí skenu a obrazovou frekvencí snímače. Kvantizace nevzorkovaného spojitého signálu závisí na skutečnosti, jakým A/D převodníkem zařízení disponuje. Standardně se používají 8bitové převodníky, jimiž lze rozlišit 256 úrovní. Užívají se též 10bitové, jež mají 1024 různých úrovní, 11bitové disponujícími 2048 úrovněmi a 12bitové, které mají 4096 úrovní. U profesionálních či speciálních přístrojů mohou být 14bitové převodníky se 16 384 úrovněmi a 16bitové, které disponují 65 536 úrovněmi. Uvedené počty úrovní představují, počty různých stupňů jasu, které lze vyjádřit různými čísly u monochromatického snímání. V případě barevného snímání lze těmito stupni vyjádřit každý z barevných kanálů, tzn. počty různých úrovní jasu jednotlivých subpixelů.

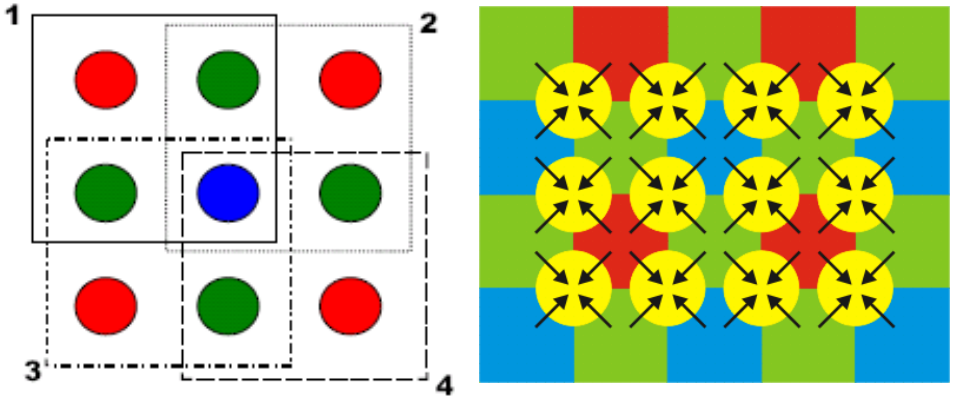
Kromě 8b převodníků (256 úrovní pro každý ze tří RGB kanálů), kde bitová, resp. barevná hloubka výsledného obrazu činí 24 bitů, což představuje 16,77 milionů barev, mohou dosahovat bitové hloubky vypočteného obrazu u vícebitových převodníků extrémních hodnot. V těchto tzv.

[28] *Types Of Camera Sensor.* Dostupné z WWW: <https://www.photometrics.com/learn/camera-basics/types-of-camera-sensor>.

interních barevných hloubkách je prováděn výpočet obrazu, avšak prostřednictvím interpolace jsou hodnoty nakonec přepočteny na výstupní externí barevnou hloubku, obvykle 24 bitů.[29]

Čísla reprezentující hodnoty jasu identifikované jednotlivými fotodiodami vstupují do obrazového procesoru, kde jsou interpolovány barvy jednotlivých pixelů, a výsledný obraz je uložen v požadovaném formátu do výstupní paměti. Obvykle je výstupním grafickým formátem JFIF (*JPEG File Interchange Format*), popř. TIFF (*Tag Image File Format*)

V případě monochromatického snímání zpracuje obrazový procesor pro výpočet jednoho pixelu obrazu digitalizovanou informaci poskytnutou jednou fotodiodou. Využívá tak plně snímací kapacitu senzoru. V případě snímání barevného obrazu prostřednictvím snímače s Bayerovou maskou, nebo její variantou, vypočítává obrazový procesor plnobarevný pixel obrazu z informací čtveřice vzájemně sousedících fotodiod. Jsou-li ve čtveřici zastoupeny dva stejné filtry (např. RGBG), jsou signály z těchto buněk průměrovány. Při interpolaci obrazu se čtveřice posouvají o jeden řádek/sloupec, takže pro výpočet dvou pixelů jsou použity informace z celkem šesti fotodiod. Tímto opatřením se zvyšuje počet pixelů získaných ze snímače vzhledem k faktickému/fyzickému počtu fotodiod snímače.[30]

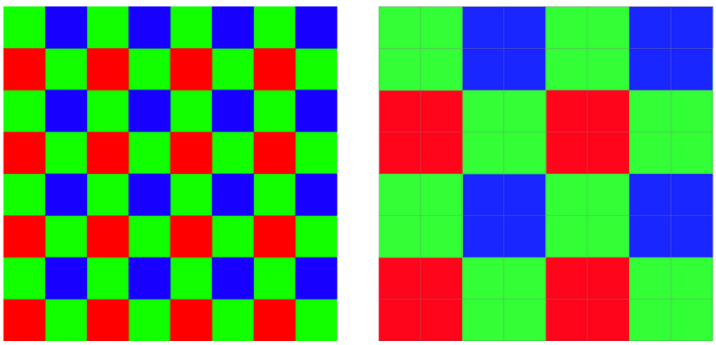


Obr. 12 Interpolace plnobarevných pixelů obrazu z hodnot jednotlivých buněk snímače s mozaikovým filtrem. (Převzato z https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Bayer_interpolace.png)

Z řady důvodů se v poslední době prosazuje tzv. slučování či slévání signálů sousedících fotodiod (*pixel binning*). Ke zpracování obrazu tak nevstupují signály z jedné fotodiody (monochromatické snímání), resp. čtyř fotodiod (mozaikový filtr), ale z několika sousedních fotodiod, jejich signály jsou průměrovány. Např. binning 2×2 slévá signály ze čtyř fotodiod a každý pixel obrazu tak obsahuje informace získané zprůměrováním výstupů čtyř pixelů. Používají se i binningy 3×3 či 4×4 ale kupř. též 16×16. Pixel binning snižuje rozlišení snímače, ale zvyšuje jeho

[29] *Úvod do techniky CCD čipů.* Dostupné z WWW: <https://www.gxccd.com/art?id=303&lang=405>.
[30] ŘÍČNÝ, V. *Videotechnika.* Brno: VUT, 2006, s. 135. ISBN 80-214-3225-X.

citlivost (součet, resp. průměr jasu pixelů), zrychluje digitalizaci, zmenšuje objem dat a snižuje šum, což je významné u snímačů se zvláště značným počtem velmi malých fotodiod.[31]



Obr. 13 Pixel binning 2×2 (Převzato z https://deepinout.com/camera-terms/camera-4-cell-remosaic-intro.html)

Digitalizované hodnoty z A/D převodníku nemusí být vždy poskytovány obrazovému procesoru, ale mohou být pro zpracování mimo obrazový procesor uloženy v souboru, resp. protoformátu RAW (z angl. *raw* - surový, nezpracovaný). Tento datový soubor obsahuje digitalizované hodnoty načtené přímo z A/D převodníku, takže jsou v něm uložena minimálně zpracovaná data. Soubor RAW si tak zachová maximum informace získané ze snímacího prvku a výkonnější počítač může provést náročnější výpočty než obrazový procesor v digitálním přístroji, tyto výpočty mohou být provedeny později, opakovaně, s různými nastaveními parametrů etc. Lze tak dosáhnout vyšší kvality pořízených obrazů a širšího spektra jejich úprav (např. korekce expozice či vyvážení bílé). Zpracování dat souboru RAW na počítači se provádí v odpovídajícím RAW konvertoru (např. Camera RAW, Photoshop Lightroom, Capture One aj.). Označení RAW řada firem nerespektuje a zavádí vlastní koncovku, např.: Panasonic .raw, Adobe .dng, Canon .crw, Nikon .nef, Sony .arw, Olympus .orf, Epson .erf, Minolta .mrw, Kodak .dcr.[32]

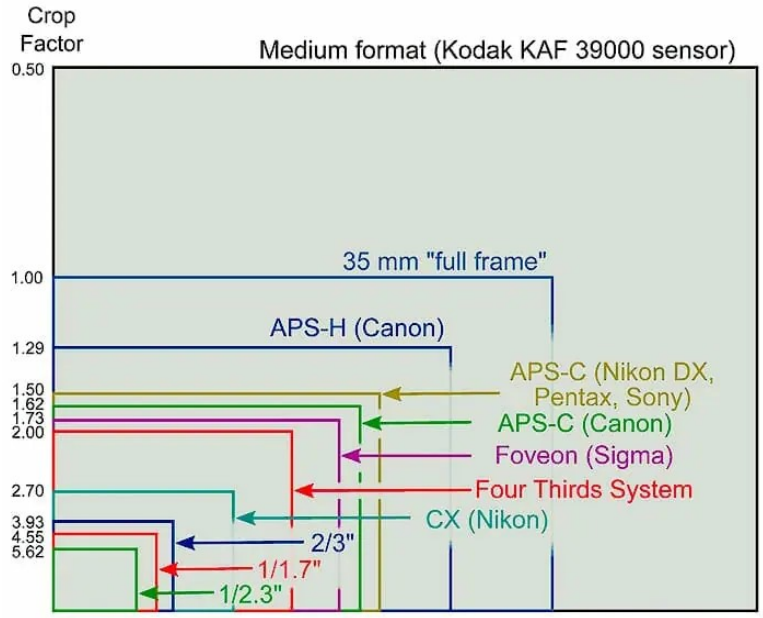
4.2 Parametry obrazových snímačů

Obrazové snímače lze posuzovat z hlediska řady parametrů. Význam jednotlivých parametrů souvisí s účelem využívání snímače. Nejčastěji jsou za významné parametry považovány rozlišení, dané počtem pixelů obrazu, a co největší rychlost zpracování snímku. U profesionálních přístrojů, od kterých je vyžadována maximální citlivost na světlo, jsou nejdůležitější šumové parametry a kvantová účinnost snímače.

[31] *What is pixel binning?* Dostupné z WWW: <https://www.digitalcameraworld.com/features/what-is-pixel-binning-everything-you-need-to-know-about-this-camera-tech>.
[32] ATKINS, B. *RAW, JPEG and TIFF*. Dostupné z WWW: <https://archive.ph/2013.01.12-013139/http://www.photo.net/learn/raw/#selection-1681.1-1691.1>.

4.2.1 Velikost a rozlišení obrazových snímačů

Obrazové snímače se v závislosti na účelu jejich využití, preferencích velkých producentů příslušných zařízení, ale samozřejmě též na rozvoji technologických možností jejich výroby, vyráběly, resp. vyrábějí v řadě různých velikostí. Toto konstatování platí především pro, z hlediska rozšíření a účelu snímání obrazů, dominantní druh snímačů, kterými jsou snímače plošné. V různých velikostech se ale vyrábějí též snímače ostatních druhů. Lineární snímače do skenerů mohou být různě velké, pokud se jedná o skener, kde je od předlohy odražené světlo vedeno přes optické prvky a objektiv ke snímači. V případě konstrukce *CIS skenerů* s kontaktem snímače s předlohou musí velikost snímače odpovídat snímané předloze, obvykle 210 mm (A4), 215,9 (Letter) nebo 297 mm (A3).



Obr. 14 Poměr velikostí vybraných běžných plošných obrazových snímačů (Převzato z https://www.davemorrowphotography.com/camera-sensor-size-guide).

Mezi nejmenší plošné snímače patří např. senzor 1/10″ v optických snímačích, senzor 1/3.6″ užívaný v telefonech *Nokia Lumia 720* nebo senzor 1/3,2″ o šířce 4,54 mm a výšce 3,42 mm (tzn. diagonále 5,68 mm) užívaný v telefonech *Apple iPhone 5*. V posledních letech užívají výrobci telefonů obrazové snímače podstatně větší, např. senzory velikosti 2/3″ o šířce 8,80 mm, výšce 6,60 mm a diagonále 11,00 mm nebo snímače velikosti 1″ (Sony) o šířce 12,8 mm, výšce 9,60 mm a diagonále 16,00 mm.

Vedle řady velikostí a formátů obrazových snímačů pro digitální kamery se užívají u digitálních fotoaparátů především snímače uvedené na Obr. 14. U kvalitnějších fotopřístrojů to jsou především snímače velikosti *APS-C* (Canon) o šířce 22,30 mm, výšce 14,90 mm a diagonále

26,82 mm, *APS-C* (Nikon) o šířce 23,7 mm, výšce 15,6 mm a diagonále 28,4 mm, *APS-H* o šířce 27,90 mm, výšce 18,60 mm a diagonále 33,50 mm, a především pak senzor 35 mm *Full-Frame* o šířce 36,00 mm, výšce 24,00 mm a diagonále 43,30 mm. Tato velikost byla inspirována klasickou velikostí políčka 35mm filmu (kinofilmu). Pro velmi kvalitní a profesionální přístroje se vyrábí též snímač *Kodak KAF 645* o šířce 49,00 mm, výšce 36,80 mm a diagonále 61,30 mm nebo snímače *Medium-format* o velikostech 6×6, 6×7, 6×8 či 6×9 cm. Existuje též řada *Large-format film* o velikostech 4×5, 5×7, 8×10 palců, což jsou snímače rozměrů až 254mm šířky, 203mm výšky a 300mm diagonály (tzv. digitální stěny).[33]

Označování některých velikostí obrazových snímačů v palcích, resp. zlomcích palců neoznačuje přímo fyzickou velikost snímače, ale průměr kruhového montážního otvoru, do něhož se snímač instaluje. Jedná se zde o konvenci přenesenou z období, kdy se v televizních kamerách užívaly snímací elektronky, tzv. *vidikony*. Uváděné průměry odpovídají průměrům hrdla těchto vidikonů. Proto náleží např. označení 1″ snímači o diagonále 16,00 mm, který se umisťuje do kruhového otvoru o průměru 1″ (25,4 mm) a zabírá tak cca 2/3 průměru montážního otvoru.

Ve vztahu k velikostem obrazových snímačů, resp. fotopřístrojům osazeným příslušnými snímači se posuzuje též parametr nazývaný *crop faktor* (viz Obr. 14). Jedná se o koeficient, kterým se přepočítává ohnisková vzdálenost, jakou by musel objektiv se stejným zorným úhlem na přístroji pracujícím s klasickým kinofilmem. Crop faktor udává, kolikrát je plocha snímače fotoaparátu menší, než plocha snímače 35 mm Full-Frame, který má tedy samozřejmě crop faktor rovný jedné.

Z hlediska poměru stran je většina plošných obrazových snímačů konstruována ve formátu 4:3, což vycházelo z poměru stran klasického počítačového monitoru/televizní obrazovky. Většina soudobých digitálních fotoaparátů užívá snímače o poměru stran 3:2, který vychází z klasického formátu kinofilmu 36×24 mm. To se týká např. snímačů APS-C, APS-H nebo Full-Frame. S nástupem širokoúhlých formátů v televizní a počítačové technice se začaly vyrábět též formáty 16:9 a 16:10, resp. 17:9 a 19:9. U snímačů Medium a Large format se používá též formát 5:4. Některá zařízení dovolují poměr stran při snímání přepínat, a to příslušným ořezem většího obrazového snímače.

Rozlišení obrazových snímačů lze uvádět relativně nebo absolutně. Relativní rozlišení, tj. počet obrazových bodů na délkovou míru (standardně palec) se užívá pouze u lineárních snímačů. U plošných snímačů lze užít absolutní rozlišení v násobku počtu bodů na šířku a počtu bodů na výšku. Nejběžněji se však uvádí výsledný násobek v megapixelech (Mpx). Od roku 1991, kdy se začal

[33] *Image Sensor Formats.* Dostupné z WWW: <https://machinevisiondirect.com/pages/image-sensor-formats>.

užívat snímač 1Mpx (1,31 = 1280×1024) se rozlišení stále zvyšuje. Např. roku 2000 snímač 4Mpx (3,99 = 2304×1734), roku 2003 snímač 8Mpx (7,99 = 3264×2448), roku 2010 snímač 21Mpx (21,06 = 5616×3744), roku 2013 snímač 41Mpx (41,48 = 7728×5368), roku 2020 snímač 108Mpx (108,58 = 12 032×9 024) a roku 2022 snímač 200Mpx (201,33 = 16 384×12 288). Uvedené hodnoty se týkají běžně vyráběných obrazových snímačů. Speciální snímače např. pro snímání kódů mohou mít výrazně nižší rozlišení, zatímco snímače pro vědecké a astronomické přístroje rozlišení výrazně vyšší.

Zvětšování plochy snímačů a zmenšování osazených fotodiod vedoucí k enormnímu zvyšování počtu světlocitlivých prvků neznamená přímou souvislost s kvalitou snímání obrazu. Snímače s vysokým počtem fotodiod nemusí mít vyšší kvantovou efektivitu, resp. citlivost, neb jsou konstruovány s fotodiodami o velikosti pouze 0,8 μm či menšími. Mají také vyšší tendenci k šumu, takže se často provozují v režimu pixel binningu, snižujícím rozlišení.

Počet fotodiod, které se účastní na tvorbě obrazu, je u plošných snímačů vždy nižší, než činí jejich fyzický počet. Na okrajích snímače může být neužívané ochranné pásmo. Navíc nelze na okrajích využívat některé buňky v mozaikovém filtru kvůli korektní interpolaci barev. Udávat tedy lze:

a) celkový počet citlivých bodů senzoru (např. 13,93 milionu),
b) efektivní počet citlivých bodů senzoru bez bodů u okrajů (např. 13,50 milionu),
c) počet pixelů obrazu při maximálním rozlišení, a to v Mpx (např. 13,38 milionu).[34]

4.2.2 Citlivost a dynamický rozsah

Jednou ze základních vlastností obrazového snímače je vedle jeho rozlišení též jeho základní citlivost. Citlivost snímače je úzce provázána s hladinou jeho šumu. Šum jsou náhodné fluktuace výsledku ve světlocitlivé buňce, což vede i k fluktuacím v sousedních buňkách v jednom snímku a celkovému zhoršení kvality obrazu.

Šum vzniká z různých zdrojů, je vlastní všem elektronickým obrazovým snímačům. Základním zdrojem šumu je tepelný pohyb krystalové mřížky polovodiče, při němž se uvolní elektron bez působení fotonu, tedy bez fotoefektu. Takový elektron se přičítá k hodnotě světelné expozice dané buňky. Šum je tedy vyhodnocován jako dopadající světlo, neboť procesor nerozezná, jak velká část náboje v buňce připadá na šum a jaká je vytvořená skutečným světlem.

[34] DOVE, J. *Demystifying digital camera sensors once and for all.* Dostupné z WWW: <https://www.techhive.com/article/602116/demystifying-digital-camera-sensors-once-and-for-all.html>.

Snahou všech výrobců obrazových snímačů je minimalizovat všechny složky šumu a zabezpečit, aby úroveň signálu vzhledem k šumu byla přiměřená. Vedle konfigurace plochy snímače, velikosti a druhu fotodiod, řešení pomocných obvodů nebo zařazení nízkofrekvenčních filtrů se za účelem snižování šumu u vědeckých přístrojů snímače chladí, např. tekutým dusíkem. Existuje též cesta užití nových druhů snímačů. Jedná se např. o snímače technologie *TDI* (Time Delay Integration), které dosahují vyšší citlivosti při nižší úrovni šumu díky opakovanému snímání a sčítání získaných nábojů. Jinou cestou je násobení elektronů v elektronových multiplikačních snímačích (*EMCCD*), které násobí signálové náboje způsobem, který omezuje šum. V situacích, kdy je signál tak slabý, že je sotva nad úrovní šumu snímače, mohou EMCCD detekovat jinou technologií nerozeznatelné signály.[35]

U jakéhokoli obrazového snímače charakterizuje poměr signálu k šumu (*SNR - Signal to Noise Ratio*) jeho kvalitu a určuje výkon celého systému. Je-li např. v buňce vygenerováno deset elektronů šumem a tisíc elektronů světlem, činí SNR 1 %. Když dopadající světlo vygeneruje pouze deset elektronů, má SNR již hodnotu 50 %.[36]

Obecně platí, že šum se projevuje tím více, čím je intenzita dopadajícího světla nižší (tzv. efekt barevné tmy). Dále platí, že čím větší je obrazový bod (pixel) snímače, tím větší je jeho citlivost na světlo a zároveň i nižší úroveň šumu. Stejně tak platí, že šum se též projevuje tím více, čím je snímací čip menší nebo má vyšší rozlišovací schopnost při zachované velikosti, tj. má menší buňky.

Z těchto konstatování plyne řada závěrů pro současné snímače. Zvětšování rozměrů snímačů je samozřejmě žádoucí z hlediska snižování šumu a zlepšování citlivosti snímače, je-li vybaven dostatečně velkými fotodiodami. Enormní zvyšování rozlišení při přibližně stejných rozměrech snímače však vede k zmenšování světlocitlivých prvků i pod 1 μm. Zvláště nepříznivě působí vysoká rozlišení u relativně malých snímačů mobilních telefonů, kde výsledné snímky mohou být zatíženy šumem, bloomingem, malou dynamikou jasů, menším prokreslením detailů a celkovým poklesem brilance obrazu.[37]

Fotodiody obrazových snímačů pracují v určitém rozsahu generovaných nábojů, resp. napětí. Vzhledem k vždy přítomnému šumu nelze za spodní hranici pracovní oblasti považovat absenci napětí, ale jeho velmi malé hodnoty. Horní hranice pracovní oblasti je dána technickými

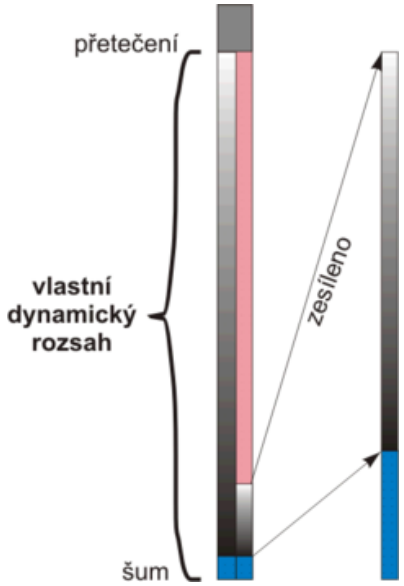
[35] *CCD vs. CMOS.* Dostupné z WWW: <http://www.teledynedalsa.com/en/learn/knowledge-center/ccd-vs-cmos/>.
[36] *Concepts in Digital Imaging Technology*. Dostupné z WWW: <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/concepts.html>.
[37] *Digitální snímače: parametry a vlastnosti*. Dostupné z WWW: <https://fotofokus.cz/2018/01/digitalni-snimace-parametry-a-vlastnosti/>.

vlastnostmi snímacího prvku a bývá 1 mV nebo 4 mV. Dosáhne-li fotodioda horní hranice napětí, dosahuje hranice své základní citlivosti.

Pracovní oblast snímače, v níž je schopen detekovat odstíny od zcela černé k jasně bílé (od nejvíce tmavé k nejvíce světlé), se nazývá *dynamický rozsah*. Obvykle je specifikován jako maximální dosažitelný signál dělený šumem přístroje. Dynamický rozsah je na horní hranici limitován kapacitou světlocitlivé buňky, kolik elektronů vzniklých při fotoelektrickém jevu je schopna pojmout v napěťové jámě (aniž by elektrony přetekly do okolí – blooming). Na spodní hranici je dynamický rozsah limitován hladinou vlastního šumu buňky. Při základní citlivosti snímače je tedy horní hranice dynamického rozsahu dosaženo při napětí 1 mV nebo 4 mV. Je-li přístroj vybaven např. 14bit A/D převodníkem, který pracuje v rozsahu hodnot 0 až 4096, odpovídá nejvyššímu napětí, a tím nejjasnější bílé, hodnota 4096.

Citlivost obrazových snímačů se obvykle udává v jednotkách ISO (*International Organization for Standardization*). U běžných obrazových snímačů odpovídá jejich základní citlivost hodnotě 100 ISO. V klasické fotografii lze hodnotu 100 ISO interpretovat jako 21 DIN (*Deutsches Institut für Normung*).

S rostoucím dynamickým rozsahem se zlepšuje schopnost kvantitativně měřit slabší intenzity v obraze, zvýšit citlivost zařízení. Zařízení s obrazovými snímači jsou proto většinou vybavena přepínačem citlivosti, který funguje jako zesilovač obrazového signálu s přepínatelným zesílením. Pouze zesílením získaného signálu lze dosáhnout změny dynamického rozsahu snímače pro jeho zvýšenou citlivost. Např. při dvojnásobném zvýšení citlivosti na 200 ISO bude horní hranicí dynamického rozsahu hodnota 0,5 mV nebo 2 mV.



Obr. 15 Dynamický rozsah snímače při základní a zvýšené citlivosti. (Převzato z https://cs.wikipedia.org/wiki/Dynamick%C3%BD_rozsah)

Vzhledem k tomu, že hladina šumu je u obrazových snímačů v podstatě konstantní, zvýšením citlivosti zesílením se zvyšuje nejen vlastní obrazový signál, ale i šum. Některé přístroje dovolují enormní zesílení obrazových signálů na hodnotu citlivosti 400 ISO (27 DIN), 800 ISO (30 DIN), 1600 ISO (33 DIN), 3200 ISO, 6400 ISO, 12 800 ISO, 25 600 ISO nebo i 409 600 ISO. Je zřejmé, že problém současně enormně zesíleného šumu musí tato zařízení korigovat různými způsoby, včetně nových konfigurací snímačů. Tato snaha se promítá též do konstrukce stále větších snímačů s většími fotodiodami, neboť tyto snímače generují obecně nižší obrazový šum a lze na nich používat podstatně vyšší ISO hodnoty při přijatelném výsledném šumu. Na minimalizaci šumu se podílejí též *aktivní CMOS*, v nichž je každá světlocitlivá buňka doplněna analytickým obvodem, který vyhodnocuje šum a aktivně jej odstraňuje.[38]

4.3 Technologie obrazových snímačů

Obrazové snímače jsou konstruovány dvěma hlavními technologiemi nebo jejich kombinací. Jedná se o snímače CCD a snímače CMOS. Obě tyto technologie byly využity pro řadu inovovaných verzí snímačů (např. *Super CCD*) nebo pro zcela nové druhy snímačů (např. TDI - *Time Delay Integration*).

4.3.1 CCD

Integrovaný obvod CCD (*Charge Coupled Devices*) vynalezli v roce 1969 W. Boyle a G. Smith. Jejich vynález se však netýkal snímače obrazu, ale obecně paměťového posuvného

[38] VÁVRA. V., ŠTELCEL, J. *Konstrukce a základní komponenty digitálních přístrojů.* Dostupné z WWW: <https://is.muni.cz/elportal/estud/prif/ps08/digitech/web/kapitola1/3.html>.

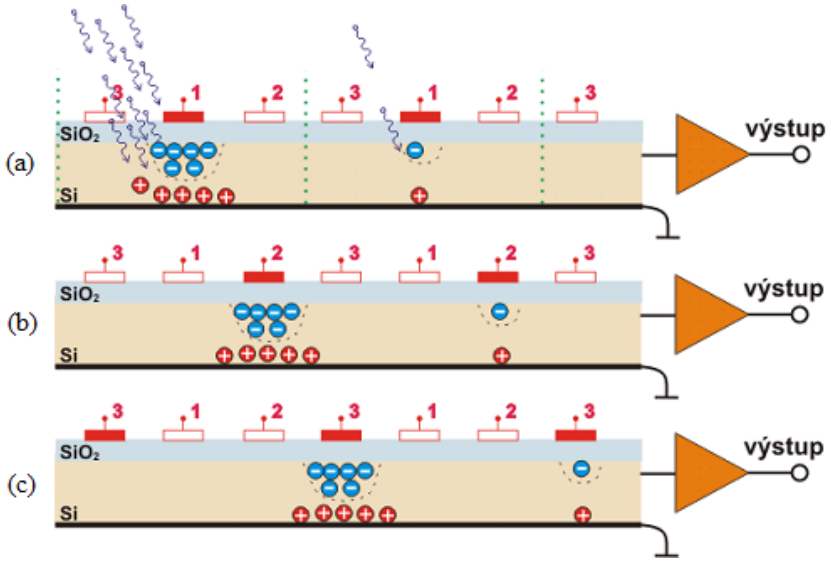
registru. Tento registr pracuje s propojeným nábojem, resp. s vázaným nábojem. Z hlediska dnešního pojetí je CCD paměťový posuvný registr vystavený působení světla. Je chápán jako integrovaný obvod, ve kterém je elektrický náboj generovaný fotoelektrickým jevem ve fotodiodách obrazových elementů přenášen soustavou potenciálových jam pomocí změn napětí na soustavě elektrod. Je tudíž pojímán jako obrazový snímač.

Snímač CCD je polovodičové zařízení s nábojovou vazbou, které je vyrobeno podobným způsobem, jaký se používá při výrobě integrovaných obvodů, mikroprocesorů a pamětí. Na ploše krystalu křemíku je opakovanými procesy fotolitografie, leptání a dotování vytvořeno velké množství mikroelementů tvořících fotodiody snímače. Základní strukturou je zde polovodičový (MOS - *Metal Oxide Semiconductor*) kondenzátor citlivý na světlo, který sestává z elektrody (kov nebo polykrystalický křemík), izolačního filmu oxidu křemičitého a dotovaného křemíkového substrátu.[39]

Po otevření závěrky dopadne na fotodiodu světlo a energie fotonů se fotoelektrickým jevem konvertuje do excitace některých, které se přesunou do vyšších energetických hladin. Shluky excitovaných elektronů jsou v prostoru fotodiody udržovány po dobu expozice potenciálovou jámou vytvořenou kladně nabitou elektrodou (15 V). Po uzavření závěrky a ukončení expozice je náboj příslušnou metodou snímání, resp. skenu (prokládaný, progresivní, plošný) přetahován po ploše CCD k dalším kladně nabitým elektrodám.

V každé fotodiodě (buňce snímače) jsou vedle elektrody, která udržuje náboj při expozici, další dvě elektrody. Na elektrodách je přesným časováním pravidelně zvyšováno a snižováno napětí, čímž jsou zde postupně (v řadě) vytvářeny potenciálové jámy, do kterých se náboje přelévají, a tak jsou přesouvány od jednoho elementu snímacího obvodu k dalšímu.[40]

[39] LORAL FAIRCHILD CCD IMAGING DATABOOK. CCD Sensors, Systems & Developmental Technology. Milpitas: Loral Fairchild Imaging Sensors, 1995.
[40] Digitalizace obrazu. Dostupné z WWW: <http://grafikpromedia.spspzlin.cz/technologie/digitalizace-obrazu>.



Obr. 16 Expozice a snímání obrazu jedné buňky CCD.
(a) Fáze expozice. Excitované elektrony jsou přitaženy kladně nabitou elektrodou č. 1.
(b) První fáze snímání. Na elektrodě č. 2 se začne zvyšovat napětí, zatímco na elektrodě č. 1 se souběžně snižuje.
(c) Druhá fáze snímání. Napětí na elektrodě č. 3 roste a souběžně na elektrodě č. 2 klesá.
(Převzato z https://de.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCckw%C3%A4rtige_Belichtung)

K prvnímu využití paměťového posuvného registru CCD ke snímání obrazu došlo v roce 1975 (Steven Sasson) a polovodičové prvky CCD se následně staly na mnoho let dominantním druhem obrazových snímačů. Tato dominance plynula především z toho, že CCD poskytovaly mnohem lepší snímky (s větším rozlišením) s dostupnou výrobní technologií.

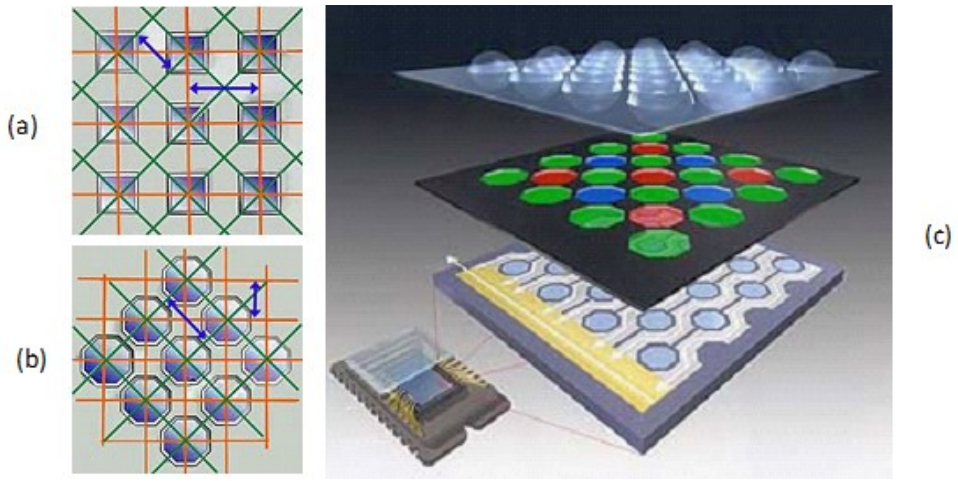
Pro digitální fotoaparáty, kamery a další zařízení snímající obraz se začaly užívat CCD snímače plošné, obvykle osazené Bayerovou maskou ve čtveřicích RGBG (Bryce E. Bayer 1976). Pro skenery a různá další čtecí zařízení se začaly užívat CCD snímače lineární, řešené pro záznam barvy jako trilineární se třemi proužky filtrů RGB.

Super CCD

Se záměrem zlepšit parametry plošných snímačů CCD, zvláště pak jejich kvantovou účinnost a rozlišení při stejné ploše čipu, zavedla firma Fujifilm v roce 1999 zpočátku proprietární technologii Super CCD.

Hlavní konstrukční změnou oproti klasickému CCD byla změna tvaru světločivných buněk ze čtverce na osmiúhelník a jejich organizace dle diagonály (viz Obr. 17). Vývojáři vycházeli z předpokladu, že lidské oko citlivěji vnímá vertikály a horizontály než diagonály, takže bude struktura obrazu působit plynuleji. Toto nové uspořádání umožnilo umístit obrazové prvky více k sobě. Tím bylo dosaženo rovnoměrnějšího pokrytí plochy senzoru a ve výsledném efektu minimálně 1,6× větší rozlišení na stejné ploše.

Pro zvýšení kvantové účinnosti fotodiod byl snímač Super CCD posléze vybaven mikročočkovým polem (mikrolentikulární pole). Malá čočka nad každou fotodiodou slouží k zaostření a koncentraci světla na povrch fotodiody a brání tomu, aby světlo dopadalo na nefotosenzitivní oblasti zařízení. Pro zvýšení rychlosti vyčištění aktivní plochy snímače (zkrácení doby expozice) přešly další generace Super CCD k metodě plošného skenu.[41]



Obr. 17 Řešení snímače Super CCD. (a) Uspořádání fotodiod u klasického CCD. (b) Uspořádání fotodiod u Super CCD. (c) Konstrukce Super CCD. (Převzato z https://www.fotoaparat.cz/clanek/76/technologie-super-ccd-sr-2183/)

Super CCD HR, Super CCD SR, Super CCD SR II

Na počátku roku 2003 ohlásila společnost Fujifilm další generaci snímačů SuperCCD, a to ve dvou variantách: *Super CCD HR* a *Super CCD SR*. Označení varianty HR znamená „High Resolution" (vysoké rozlišení) a označení SR „Super Dynamic Range" (velký dynamický rozsah).

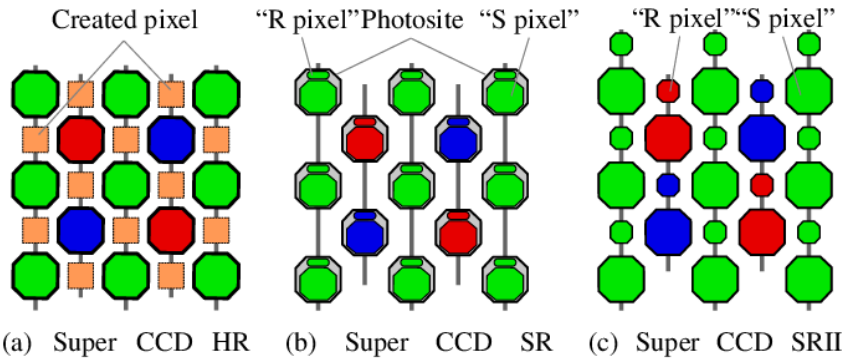
Inovace *Super CCD HR* nepřinesla zásadní změnu. Zaměřila se na zvýšení rozlišení snímače jiným způsobem interpolace pixelů ze subpixelů. Každý pixel je dán interpolací čtyř okolo něj stojících subpixelů (*created pixel*, viz Obr. 18 vlevo), resp. každý subpixel se podílí na vytvoření nikoli jednoho pixelu, ale čtyř created pixelů, se kterými sousedí, což vede ke dvojnásobnému zvýšení rozlišení, avšak nikoli hardwarově, nýbrž výpočtem.

Inovace *Super CCD SR* byla naopak velmi významná. Tento snímač je pro jeden obrazový bod vybaven dvěma fotodiodami. Primární fotodioda (*S pixel*) má mnohem větší plochu než sekundární fotodioda. Je nastavena na užší dynamický rozsah intenzit světla. Je tudíž citlivější a přesnější, zvláště při nižších úrovních osvětlení. Sekundární fotodioda (*R pixel*) má menší plochu a je nastavena na širší dynamický rozsah intenzit světla. Je tudíž méně citlivá a méně přesná než primární fotodioda. Je však schopna změřit hodnoty, které leží mimo rozsah primární fotodiody.

[41] DOVE, J. *Demystifying digital camera sensors once and for all.* Dostupné z WWW: <https://www.techhive.com/article/602116/demystifying-digital-camera-sensors-once-and-for-all.html>.

Vhodným zpracováním informací z obou fotodiod lze získat výsledný složený obraz, který bude mít větší dynamický rozsah při současné redukci šumu.[42]

V roce 2004 byla provedena další inovace obrazového snímače pod označením *Super CCD SR II*. Sekundární fotodioda je zde umístěna ve větší vzdálenosti od fotodiody primární do prostotu mezi sousední buňky. Výhodou tohoto řešení je možnost zvětšení primárních i sekundárních fotodiod s dalším zvýšením kvantové účinnosti a redukcí šumu. Snímač tak umožňuje přijatelnou kvalitu obrazu i při citlivosti ISO 800.[43]



Obr. 18 Další generace Super CCD. (a) Interpolované pixely (Created pixel) u Super CCD HR. (b) Primární a sekundární fotodiody (S pixel, R pixel) u Super CCD SR. (c) Primární a sekundární fotodiody (S pixel, R pixel) u Super CCD SR II. Převzato z https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/super-ccd)

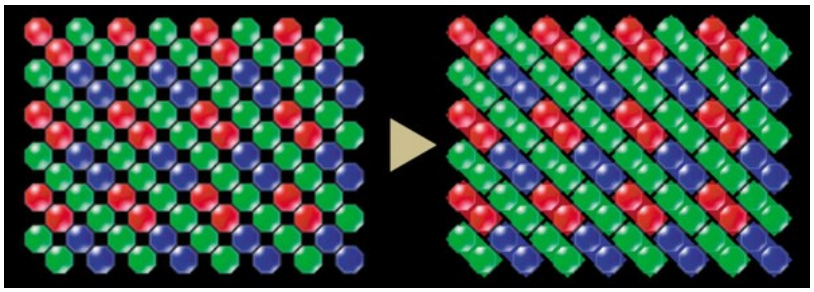
Super CCD EXR

V roce 2008 vyvinula firma Fujifilm nový typ snímače pod označením *Super CCD EXR*. Záměrem jeho vývoje byla snaha spojit výhody typů *Super CCD HR* a *Super CCD SR* v jediném snímači. Jedná se přitom o protichůdné požadavky, neboť zvýšení počtu pixelů na snímači a jejich nutné zmenšení znesnadňuje dosažení vysoké citlivosti a velkého dynamického rozsahu při nárůstu problémů způsobených zvýšeným šumem. Dosáhnout vysokého rozlišení, vysoké citlivosti a velkého dynamického rozsahu si vyžádalo zcela novou organizaci snímače, který se stal přepínatelným. V závislosti na světelných podmínkách může měnit principy svého fungování.

První zásadní změnou oproti předchozím senzorům je nové rozložení pole barevných filtrů, které umožňuje binning pixelů stejné barvy (*Pixel Fusion Technology*). Dva pixely stejné barvy vedle sebe se mohou spojit jako jeden pixel. Protože plocha pro snímání jedné barvy je tak dvakrát větší, zvyšuje se cca dvojnásobně citlivost a klesá šum. Sloučení dvou světlocitlivých buněk

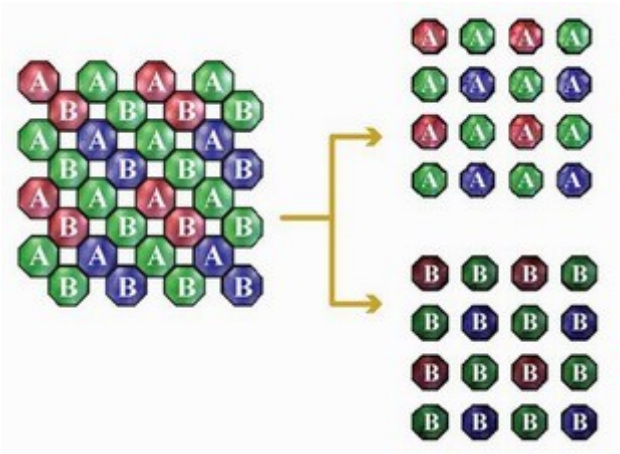
[42] LORAL FAIRCHILD CCD IMAGING DATABOOK. *CCD Sensors, Systems & Developmental Technology*. Milpitas: Loral Fairchild Imaging Sensors, 1995.
[43] *Types Of Camera Sensor.* Dostupné z WWW: <https://www.photometrics.com/learn/camera-basics/types-of-camera-sensor>.

detekující stejnou barvu do jedné snižuje rozlišení na polovinu. Zvýšení citlivosti přímo na čipu a potlačení šumu na úkor rozlišení je v případě horších světelných podmínek žádoucí.[44]



Obr. 19 Super CCD EXR - Spojování pixelů stejné barvy v rámci Pixel Fusion Technology (Převzato z https://ascii.jp/elem/000/000/211/211425/img.html)

Druhou změnou je technologie duálního snímání (*Dual Exposure Control*), jejímž cílem je zvýšení dynamického rozsahu i v případě vysokého kontrastu. Předchozí generace snímačů dosahovaly téhož využitím větších a menších fotodiod pro jeden pixel (větších "S" pixelů a menších "R" pixelů). *Super CCD EXR* má všechny fotodiody stejně velké, ale využívá přesné ovládání expozice k současnému zachycení dvou snímků stejné scény. Jeden snímek pořizují fotodiody typu A (viz Obr. 20) pro vysokou citlivost a druhý fotodiody typu B pro nízkou citlivost s kratším časem expozice. Snímky se následně zkombinují, takže mají větší dynamický rozsah i menší míru šumu.



Obr. 20 Super CCD EXR - Rozdělení snímače na fotodiody typu A a fotodiody typu B v rámci Dual Exposure Control (Převzato z https://www.digimanie.cz/fujifilm-uvedl-novy-super-ccd-exr-cip/2454)

Přestože byl *Super CCD EXR* navržen pro možnost zvýšení citlivosti a dynamického rozsahu cestou spojování fotodiod nebo virtuálního rozdělení na dva snímací čipy, umožňuje též snímání s vysokým rozlišením (*Fine Capture Technology*). V případě, kdy je světlo plné a rovnoměrné a jsou

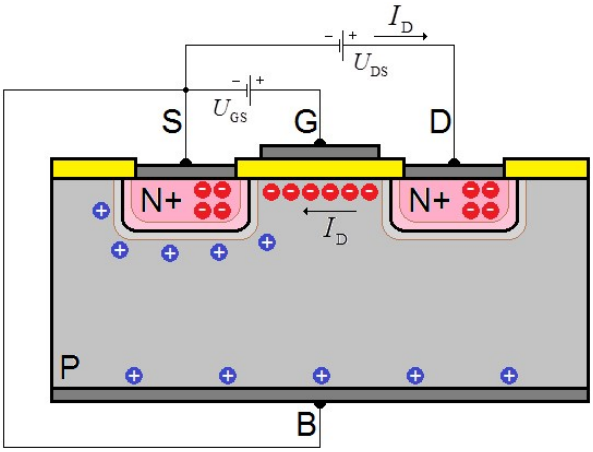
[44] *Fujifilm uvedl nový Super CCD EXR čip. Dostupné z WWW:* <https://www.digimanie.cz/fujifilm-uvedl-novy-super-ccd-exr-cip/2454>.

vyžadovány jemné detaily, jsou pro snímání obrazu využity všechny fotodiody. Tím může snímač dosáhnout, vzhledem k absolutnímu počtu fotodiod, nejvyššího možného rozlišení obrazu.[45]

4.3.2 CMOS

Označení CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) není rezervováno pouze pro oblast obrazových snímačů. Jedná se o způsob vytváření dvojic komplementárních polem řízených tranzistorů (MOSFET) jakožto základu logických členů (typicky hradel), který byl vynalezen roku 1963 a patentován roku 1967 (Frank Wanlass ze společnosti Fairchild Semiconductor). První integrované obvody CMOS byly vyrobeny roku 1968 a v dalších letech se technologie CMOS stala dominantní technologií produkce většiny logických integrovaných obvodů.

Základním konstrukčním prvkem obvodů jsou tranzistory MOS vystavěné z řídící elektrody (kov nebo polykrystalický křemík), mezivrstvy oxidu křemíku a polovodičové křemíkové báze (viz Obr. 21). Významnou vlastností integrovaných obvodů CMOS je jejich nízká spotřeba energie, vysoká odolnost proti šumu a nižší produkce odpadního tepla. Je to dáno zapojením komplementárních tranzistorů MOSFET, jejichž dvojice tvoří hradlo, přičemž je vždy jeden v nevodivém stavu. Výkon je odebírán pouze tehdy, když tranzistory přepínají mezi stavy zapnuto a vypnuto. CMOS také umožňuje vysokou hustotu logických obvodů/funkcí na čipu.[46]



Obr. 21 Schéma obecné konstrukce tranzistorů MOSFET.
Převzato z WWW: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1669-princip-cinnosti-tranzistoru-s-indukovanym-kanalem >

Technologie CMOS se od osmdesátých let začala postupně využívat i v oblasti obrazových snímačů. Již v roce 1968 navrhl Peter Noble snímač aktivních pixelů, z nichž každý obsahuje jeden

[45] *Fujifilm introduces F200EXR with Super CCD EXR*. Dostupné z WWW: <https://www.dpreview.com/articles/4923997750/fujifilmfinepixf200exr>.
[46] *CMOS.* Dostupné z WWW: <https://en.wikipedia.org/wiki/CMOS?oldid=132910144>.

nebo více zesilovačů MOSFET, které převádějí fotogenerovaný náboj na napětí, zesilují napětí signálu a snižují šum. Vytvořil tak pole senzorů s aktivními čtecími zesilovači MOS pro každý pixel v konfiguraci tří tranzistorů: struktura fotodiody, selekční tranzistor a zesilovač MOS. Koncept aktivních pixelů byl implementován společností Olympus a první *MOS APS* (aktivní pixelový senzor) byl vyroben v roce 1985. Počátkem devadesátých let se již vyráběly aktivní pixelové snímače v různých společnostech jako protiváha v té době dominantních snímačů CCD.[47]

Snímač CMOS se však od CCD podstatně lišil, a to nejen nižší spotřebou a nižším šumem. Jedná se o snímač, kde je každá fotodioda vybavena vlastním převodem náboje na napětí a snímač obsahuje také digitalizační obvody, zesilovače a korekci šumu. Digitalizace obrazu se tak provádí pro všechny pixely zvlášť a výstup dat z každé buňky je již v digitální podobě. Elektrický náboj generovaný ve fotodiodách obrazových elementů je tak po digitalizaci odečítán pomocí adresovatelné sběrnice. Všechny tyto funkční přednosti CMOS však byly zatíženy zásadní nevýhodou. Vzhledem k tomu, že fotodioda má kolem sebe i své podpůrné a digitalizační obvody, zaujímají oblasti citlivé na světlo pouze menší část celé plochy čipu. Plocha dostupná pro zachycení světla činila u prvních generací CMOS snímačů pouhých 25 % plochy čipu, na rozdíl od některých snímačů CCD, které zachycovaly světlo celou plochou čipu. Přestože byly později nad fotodiody snímače CMOS osazovány mikročočky s cílem soustředit do fotodiody co nejvíce světla, byly prakticky všechny výkonové parametry prvních CMOS, především citlivost a dynamický rozsah, horší než u snímačů CCD.

Od roku 1997 do roku 2003 proběhlo několik vylepšení funkcí snímačů CMOS (R. M. Guidash, K. Yonemoto, H. Sumi), které vedly k tomu, že se výkony CMOS začaly přibližovat snímačům CCD. Snímače CMOS se začaly po roce 2000 široce používat v různých aplikacích, především levných digitálních kamerách, webových kamerách, zabezpečovacích zařízeních a dalších aplikacích obrazových senzorů. Do roku 2007 již prodej snímačů CMOS překonal snímače CCD svým podílem 54 % celosvětového trhu obrazových snímačů.[48]

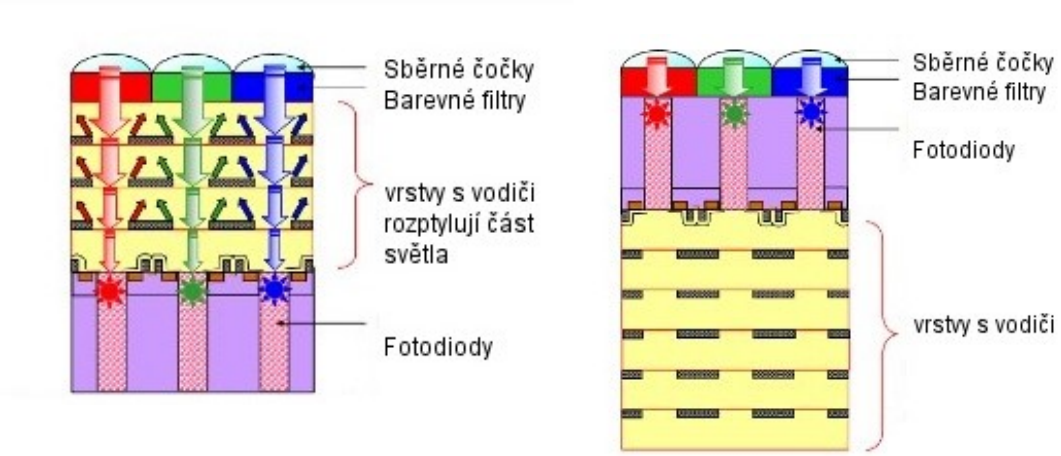
Vedle plošných snímačů se prvky CMOS začaly osazovat též do lineárních snímačů určených pro čtečky a do snímačů systému CIS pro levné skenery. V systému CIS (*Contact Image Senzor*) se snímací hlava pohybuje krokovým posunem pod předlohou, přičemž předlohu postupně

[47] *Active-pixel sensor*. Dostupné z WWW: <https://en.wikipedia.org/wiki/Active-pixel_sensor>.
[48] VEENDRICK, H. *Deep-Submicron CMOS ICs: From Basics to ASICs.* Kluwer Academic Publishers, 2000. ISBN 9044001116.

osvětluje řádka tříbarevných RGB LED diod a odrazy snímá jeden řádek světlocitlivých elementů CMOS.[49]

BSI CMOS

Snímače CMOS nemohly z principu své konstrukce zvýšit množství zachyceného světla, neboť fotocitlivá vrstva snímače byla překryta vrstvou tranzistorů a kovových obvodů. V roce 2007 se však podařilo firmě OmniVision Technologies vytvořit snímač CMOS, v němž byla vrstva tranzistorů a kovových obvodů podsunuta pod fotocitlivou vrstvu. Citlivost snímače se u tohoto řešení násobně zvýšila. Vznikl tak první CMOS snímač se zpětným osvětlením, BSI CMOS (*BackSide-Illumination*).



Obr. 22 Struktura snímačů CMOS. Vlevo klasický snímač CMOS, vpravo snímač BSI CMOS. (Upraveno podle https://www.digitalkamera.de/Meldung/Toshiba_bringt_BSI-CMOS-Bildsensor_auf_den_Markt/6123.aspx)

V roce 2009 začala firma Sony ve svých produktech užívat čip *Exmor R*, inovovaný BSI CMOS od OmniVision Technologies. Tento čip začala používat i firma Apple ve fotoaparátu telefonu *iPhone 4*. Později přešli ke snímačům BSI CMOS prakticky všichni výrobci fotoaparátů a do roku 2012 zvýšily snímače CMOS svůj podíl na 74 % trhu a od roku 2017 tvoří snímače CMOS 89 % celosvětového prodeje obrazových snímačů.[50]

Soudobé obrazové snímače CMOS (Exmor R) konkurují obecnými přednostmi technologie CMOS, kterou je nízká spotřeba ve statickém stavu a vysoká odolnost proti šumu. Vedle toho jsou charakterizovány velmi vysokou citlivostí a dynamickým rozsahem. Způsob snímání náboje se skenem přímou adresací vede k tomu, že snímače CMOS jsou velmi rychlé. Výhodami technologie

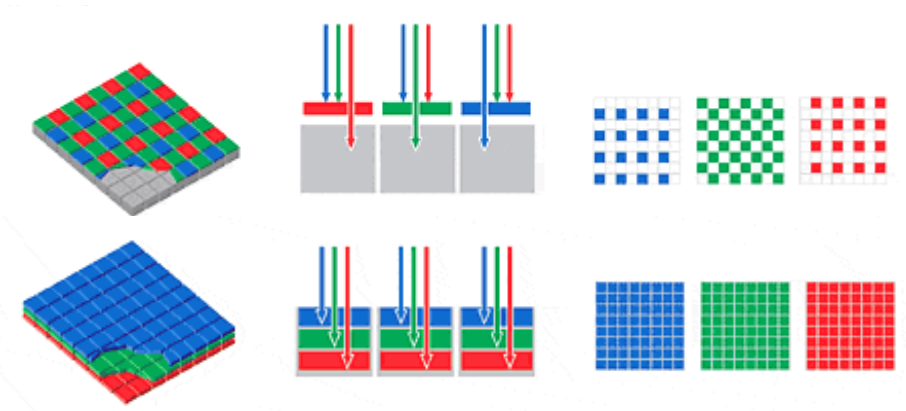
[49] *CMOS camera as a sensor*. Dostupné z WWW: <https://web.archive.org/web/20161012163818/https://www.ikalogic.com/image-processing-as-a-sensor/>.
[50] *Active-pixel sensor*. Dostupné z WWW: <https://en.wikipedia.org/wiki/Active-pixel_sensor>.

CMOS jsou též skutečnosti, že jejich výroba je levnější a jednodušší než-li výroba CCD a že mohou být produkovány již existujícími výrobními linkami ostatních CMOS logických obvodů.

Přestože snímače CMOS nyní na základě téměř všech výkonnostních parametrů překonávají CCD, nalézají své uplatnění oba systémy. Každý z nich má jedinečné silné a slabé stránky, které poskytují výhody v různých aplikacích. Snímače CCD mohou být např. mnohem citlivější než snímače CMOS v blízké infračervené oblasti (700 až 1000 nm), neboť disponují silnější fotony pohlcující vrstvou - infračervené fotony prostupují hlouběji a mohou tak být i absorbovány hlouběji než fotony světla viditelné části spektra. Též v oblasti nových druhů snímačů s vysokou rychlostí či vysokou citlivostí se uplatňují oba druhy snímačů a mohou se i doplňovat v hybridních konstrukcích. To se týká např. snímačů časového zpoždění a integrace (TDI), které se používají ve strojovém vidění a dálkovém průzkumu v provedení CCD TDI, CMOS TDI nebo v provedení hybridním.[51]

4.3.3 Foveon X3

Obrazový snímač *Foveon X3* je vystavěn na technologii CMOS, ale svým řešením a funkcí představuje samostatný druh snímače. Snímač představila společnost Foveon v roce 2002 jako převratný typ snímače, který změní vývoj digitální fotografie. Foveon X3 umožňuje získat na stejné ploše čipu teoreticky až 4× vyšší rozlišení, neboť zaznamenává úplnou barevnou informaci pro každý bod obrazu. Barevné pixely se neinterpolují ze čtyř vedle sebe ležících subpixelů pokrytých barevnou Bayerovou maskou, ale informace o barvě se odebírají z jednoho místa.



Obr. 23 Porovnání klasického plošného snímače a snímače Foveon X3. Horní řada: klasický plošný snímač. Dolní řada: Foveon X3 (Upraveno podle https://www.dpreview.com/articles/7559294753/foveonx3)

Foveon X3 nepracuje s mozaikovým uspořádáním, ale s uspořádáním vrstveným. Využívá skutečnosti, že různé vlnové délky světla pronikají do různé hloubky křemíkových vrstev. Fotony

[51] *CCD vs. CMOS.* Dostupné z WWW: <http://www.teledynedalsa.com/en/learn/knowledge-center/ccd-vs-cmos/>.

vlnových délek modrého světla pronikají do nejmenších hloubek a jsou absorbovány nejblíže povrchu. Fotony vlnových délek zeleného světla pronikají hlouběji a v nejhlubší vrstvě jsou zachytávány fotony vlnových délek červeného světla. Foveon X3 se skládá ze tří vrstev fotodiod umístěných v křemíku pod sebou, přičemž každá vrstva absorbuje fotony příslušné barevné složky světla. Tloušťka jednotlivých vrstev není stejná (nejtenčí je modrá a nejtlustší červená) a dohromady činí jejich tloušťka pět mikrometrů.[52]

Jednotlivé vrstvy snímače Foveon X3 jsou v podstatě samostatným plošným snímačem. Tento každý snímač zpracuje svoji barevnou separaci obrazu a následně je z těchto tří dílčích kanálů složena výsledná barva daného pixelu. Podobně pracují zařízení využívající tři samostatné snímače pro jednotlivé složky RGB, např. tzv. kamery 3×CCD nebo jiná tříčipová zařízení. Foveon X3 se mohl inspirovat též klasickým barevným filmem, který má tři vrstvy fotografické emulze, z nichž každá je citlivá na jinou barvu světla. Žlutá vrstva propouští červené a zelené světlo a absorbuje světlo modré, fialová vrstva primárně propouští červené světlo a absorbuje světlo zelené a modrozelená vrstva primárně absorbuje červené světlo.[53]

Foveon X3 byl převratným snímačem, ale vývoj digitální fotografie nezměnil. Ostatní výrobci zlepšovali parametry standardních plošných CCD a CMOS snímačů a technologie Foveon X3 se tak prosadila pouze u omezeného počtu producentů fotoaparátů, zvláště u výrobce Sigma Corporation, který dokonce firmu Foveon, která tyto čipy vyvinula, v roce 2008 koupil.

5 Perspektivy záznamu obrazu

Formulovat perspektivy záznamu obrazu je velmi obtížné. Mají-li perspektivní technologie či postupy odpovídat očekávaným či již existujícím řešením a vycházet z dosavadních trendů vývoje, lze naznačit pouze perspektivy bližší. Přitom lze uvažovat o několika oblastech budoucího vývoje. První oblastí perspektiv je rozvoj algoritmů digitálního vylepšení obrazu. Duhou oblastí je vývoj záznamu obrazu, který je masově rozšířen a využíván, tj. především záznam statických či dynamických obrazů plošnými obrazovými snímači. Třetí oblastí perspektiv je širší využívání technologických řešení umožňujících nestandardní záznamy včetně přechodu k 3D záznamům. Čtvrtou oblastí je enormní zvýšení citlivosti, dynamického rozsahu, přesného časování expozice či rychlosti spojené s proměnami vlastních technologií a materiálů výroby obrazových snímačů.

[52] MACENAUER, A. *Foveon X3 - inovace čipu CMOS*. Dostupné z WWW: <https://www.fotoaparat.cz/clanek/124/foveon-x3-inovace-cipu-cmos-3041/>.
[53] *Foveon's revolutionary X3 sensor.* Dostupné z WWW: <https://www.dpreview.com/articles/7559294753/foveonx3>.

5.1 Digitální zpracování obrazu

V oblasti digitálního záznamu statických či dynamických obrazů prostřednictvím digitálních fotoaparátů či kamer lze za zcela zřejmý trend rozvoje považovat zkvalitňování a vývoj nových algoritmů, které zabezpečují nebo usnadňují pořizování záznamů s co nejlepším výsledkem. Digitální zařízení pro záznam obrazu jsou vybavena množstvím algoritmů, které jsou pro funkci daného zařízení nezbytné, ať zařízení využívá laik či profesionál. Jsou však vybaveny též algoritmy, které jsou oceňovány naprostou většinou laických uživatelů těchto zařízení požadujících co nejsnadnější pořízení co nejkvalitnějších záznamů/snímků.

Digitální zařízení jsou proto vybavena algoritmy zabezpečujícími automaticky nebo formou asistence naplnění řady základních parametrů digitálních záznamů a požadavků na jejich pořízení. Vedle zaostření či doostření obrazu užívajícího různé digitální filtry se jedná o úpravu jasu, ať již jde o optimalizaci jasové stupnice včetně korekce kontrastu, o optimalizaci bodového jasu včetně ekvalizace histogramu nebo o úpravu míry jasového zkreslení obrazu. Algoritmy mohou automaticky řešit vyvážení bílé, teplotu barev nebo tónové křivky.[54]

Uvedené algoritmy spadají do oblasti digitálního zpracování obrazu (*Digital Image Processing*), resp. digitálního vylepšení obrazu (*Digital Image Enhancement*). Záběr těchto oblastí je velmi široký a zasahuje především profesionální, vědecké či umělecké zpracování obrazu získaného různými způsoby. Dané algoritmy či postupy se však implementují či budou intenzivněji implementovat v oblasti digitálních fotoaparátů a kamer. Zde se jedná o tzv. progresivní algoritmy pro zpracování obrazu, mezi něž náleží např. geometrické úpravy snímaných záznamů, zvláště pak rovnoběžnost hran, korekce perspektivy či ořezy a výřezy. Prostřednictvím algoritmů detekce hran nebo segmentace obrazu může být realizována automatická detekce vybraných druhů objektů, a to nejen vlastní rozpoznání objektu, ale i jeho následné sledování.[55] To se týká jak již dnes standardní detekce obličeje, tak i dalších objektů pro možnost úpravy jejich parametrů, ale i získání informací z těchto objektů. Pokročilé algoritmy mohou zjišťovat obsah fotografií a jejich označování pro možnost přesného automatického upravování, třídění a vyhledávání. V rámci pokročilé analýzy digitálního obrazu se používá a bude se jistě šířeji využívat *konvoluční neuronová síť*. Jedná se o architekturu neuronové sítě *Deep Learning*, již běžně používané v počítačovém vidění, která umožňuje počítači porozumět a interpretovat obraz nebo vizuální data.[56]

---

[54] SVOBODA, R. *Metody pro vylepšení kvality digitálního obrazu*. Brno: VUT, 2010. Dostupné z WWW: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/15129/final-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.
[55] *Segmentace obrazu*. Dostupné z WWW: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Segmentace_obrazu>.
[56] *Digital Image Processing.* Dostupné z WWW: <https://www.tutorialspoint.com/dip/index.htm>.

Vedle algoritmů pracujících s výstupy z A/D převodníku nebo obrazového procesoru usilujících obecně o to, aby zařízení vytvářelo přirozeněji vypadající obrázky, se budou jistě zdokonalovat způsoby ovládání procesu expozice a snímání dat z obrazového snímače. Příkladem zde může být očekávané širší využívání automatické stabilizace obrazu řešené na úrovni snímacího čipu nebo identifikace druhu šumu v obraze a jeho minimalizace.[57]

5.2 Vývoj plošných snímačů

Vývoj se bude nepochybně dotýkat též samotných obrazových snímačů, a to jak z hlediska jejich provedení, tak i funkce. Očekávat se dá další zvyšování rozlišení snímačů, resp. zvyšování počtu jednotlivých fotodiod na ploše snímače. Toto zvyšování počtu a současně hustoty světlocitlivých prvků v závislosti na pokroku v oblasti výroby provází celou historii plošných obrazových snímačů pro kamery a fotoaparáty. Jestliže v roce 1993 činilo největší rozlišení 1,31 Mpx, do roku 2003 se zvýšilo na 8 Mpx, potom v roce 2013 činilo již 41 Mpx a v roce 2023 ohlášených 450 Mpx. Pouhé zvyšování počtu a hustoty fotodiod však samo o sobě nepředstavuje cestu k vyšší kvalitě záznamu. Souběžně se zvyšováním rozlišení se zvětšovaly i rozměry obrazových snímačů, aby si fotodiody mohly udržet velikost zabezpečující přijatelnou kvantovou účinnost a úroveň šumu.

V současnosti se plošné snímače vyrábějí ve velikostech blížících se, respektujících nebo i převyšujících standard Full-Frame o šířce 36,00 mm, výšce 24,00 mm. Jedná se např. o APS-C či APS-H, resp. snímače Medium-format. Nelze očekávat, že se velikost snímačů pro běžné kamery a digitální fotoaparáty bude vzhledem ke konstrukci přístrojů nadále zvětšovat.[58] Rozlišení a hustota prvků se však nadále zvyšuje, což vede nutně ke zmenšování fotodiod pod 1 μm a vyvolává potřebu změn v ovládání snímače. Jedná se především využívání pixel binningu a pokročilých způsobů časování expozice.

V současnosti i blízké budoucnosti by měly plošné obrazové snímače nadále zabezpečovat tři hlavní módy své činnosti, a to mód s vysokou citlivostí (*High Sensitivity Mode*), mód s velkým dynamickým rozsahem (*High Dynamic Range Mode*) a mód s vysokým poměrem signál/šum (*High Signal to Noise Ratio Mode*).[59]

---

[57] KUMAR, N. Digital *Image Processing Basics*. Dostupné z WWW: <https://www.geeksforgeeks.org/digital-image-processing-basics/>.
[58] *Image Sensor Formats.* Dostupné z WWW: <https://machinevisiondirect.com/pages/image-sensor-formats>.
[59] ZMEŠKAL, O., BUCHNÍČEK, M., SEDLÁK, O. *Principy digitálního záznamu obrazu*. Dostupné z WWW: <http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/harfa.htm>.

Požadavek vysoké citlivosti čipu s vysokým rozlišením, resp. vysokým počtem velmi malých fotodiod je nemožné zajistit, neboť velmi malé fotodiody postrádají potřebnou kvantovou účinnost a vykazují vysokou úroveň šumu. Řešením nemůže být pouhé zesílení signálu. Možná cesta však spočívá právě ve vysokém počtu fotodiod, který dovoluje snižovat rozlišení snímače a cestou binningu spojovat sousední pixely do větších celků, a sčítat tak jejich náboje nebo je využívat jako superpixel. Lze očekávat, že snímače s extrémním nominálním rozlišením budou využívány s vyššími formáty/řády pixel binningu, tj. více než stávajících 2×2 nebo 3×3. Vyšší citlivost by mohla přinést též vícenásobná expozice snímaného bodu a sčítání získaného náboje. Toto řešení je u plošných snímačů s mozaikovým filtrem dobře uplatnitelné. Zásadní je však pro ostatní typy snímačů, především pro snímače časového zpoždění a integrace TDI.[60]

Požadavek velkého dynamického rozsahu lze naplňovat způsobem vycházejícím z modelu řešení *Dual Exposure Control* u snímače Super CCD EXR. Lze předpokládat, že přesným časováním expozice a snímáním nábojů z jednotlivých subpixelů, propojených pixelů nebo superpixelů by bylo možno rozdělit fotodiody snímače do různých skupin nastavených na snímání s vyšší či nižší citlivostí. Při extrémně vysokých nominálních rozlišeních a přesných postupech řízení času expozice a snímání přináší toto řešení velkou variabilitu nastavení snímače pro různé světelné podmínky.[61]

Požadavek co nejnižšího poměru signálu k šumu (SNR) je též důvodem, proč lze předpokládat u snímačů s extrémním nominálním rozlišením široké využívání pixel binningu. Obecně platí, že čím větší je obrazový bod (pixel) snímače, tím větší je jeho citlivost na světlo a zároveň i menší šum. Slučování nábojů ze sousedních pixelů zvyšuje plnící kapacitu senzoru (počet elektronů generovaných fotoelektrickým jevem) a zlepšuje též poměr signál šum.

Uvažovat lze též o změně mozaikových filtrů snímačů a širším příklonu ke snímacím zařízením se třemi snímači separací RGB nebo s velmi rychlým multiplexovaným systémem umožňujícím snímat bez zkreslení, daného aproximací subpixelů, tři barevné separace snímaného obrazu. Obdobný efekt by mohl přinést též inovovaný třívrstevný systém, který představil již v roce 2002 Foveon 3X.[62]

---

[60] *What is pixel binning?* Dostupné z WWW: <https://www.digitalcameraworld.com/features/what-is-pixel-binning-everything-you-need-to-know-about-this-camera-tech>.

[61] *Digitální snímače: parametry a vlastnosti*. Dostupné z WWW: <https://fotofokus.cz/2018/01/digitalni-snimace-parametry-a-vlastnosti/>.

[62] MACENAUER, A. *Foveon X3 - inovace čipu CMOS*. Dostupné z WWW: <https://www.fotoaparat.cz/clanek/124/foveon-x3-inovace-cipu-cmos-3041/>.

5.3 Digitální 3D záznamy

Stejně jako klasické fotoaparáty byly i některé digitální fotoaparáty a kamery různými metodami uzpůsobeny pro možnost vytváření tzv. 3D fotografií, resp. stereofotografií, 3D videa nebo sférického videa. Pro pořízení sterofotografie by měl být fotoaparát vybaven dvěma objektivy v určité vzdálenosti od sebe, obvykle ve vzdálenosti cca 6,5 cm, což je vzdálenost respektující binokulární paralaxu lidského zraku. Snímky mohou vytvářet též dva synchronizované fotoaparáty nebo i jeden přístroj vhodně při expozicích posunutý. Vytvořené dva snímky se poté různými způsoby prohlížení předkládají každému oku zvlášť a mozek z nich složí různě věrný prostorový vjem. Tento způsob získávání tzv. 3D fotografií má dlouhou historii a uplatňoval se již od poloviny 19. století zejména v oblasti zábavy, cestování či vzdělávání. Pro prohlížení stereofotografií sloužily různé stereoskopické prohlížečky (např. *Stereo Meoskop*) pro jednoho uživatele.[63]

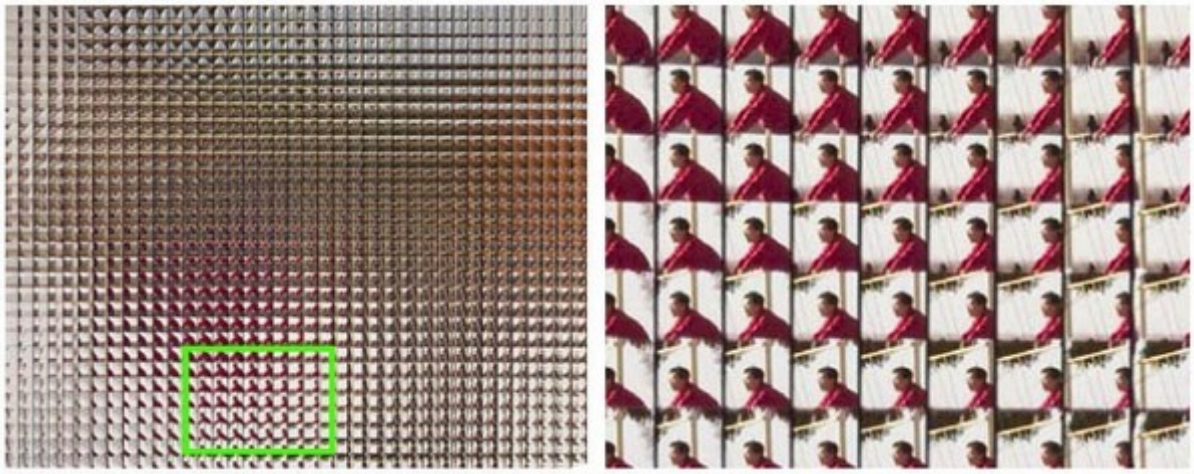
Digitální 3D fotoaparáty se dvěma objektivy se vyrábějí často v propojení s 3D kamerou. Pro prohlížení pořízených stereofotografií vyžadují VR brýle, speciální lentikulární displej (*auto-stereoskopický monitor*) nebo 3D televizor či projektor s aktivními brýlemi.[64] Statická stereofotografie však není šířeji využívaná (snad s výjimkou sférických fotografií), ale více se tento způsob prosazuje v oblasti dynamických záznamů, které se prezentují jako 3D videa nebo 3D filmy. Též pro jejich prezentaci jest třeba zabezpečit oddělení vizuální informace pro levé a pravé oko. Nejpohodlnějším způsobem individuálního sledování 3D videí je shora uvedený lentikulární auto-stereoskopický displej s *prizmovou maskou* (lentikulární vrstva s proužky čoček, které vychylují jednotlivé sloupce obrazu směrem k levému a pravému oku). Pro větší počet diváků náleží mezi nejběžnější způsoby prezentace 3D videa a filmů *aktivní stereoskopie*, která prezentuje vizuální informace odděleně pro obě oči ve vyšší obrazové frekvenci (min. 120 Hz) a aktivní brýle synchronizovaně a střídavě zatemňují skla před levým a pravým okem (např. technologie IMAX). Uplatnit lze též *pasivní stereoskopii* s polarizační maskou, využívající k rozdělení signálu pro levé a pravé oko pasivní polarizační brýle.[65] Využívá se i filtrační technologie barevné separace, která je soudobou obdobou klasického anaglyfu. Obrazy pro levé a pravé oko jsou prezentovány na rozdílných vlnových délkách s posunem o cca 20 nm a divák je vnímá za pomoci pasivních brýlí.[66]

[63] *Stereoskopie*. Dostupné z WWW: <https://www.wikiwand.com/cs/Stereoskopie>.
[64] *Nejlepší 3D kamery pro rok 2022.* Dostupné z WWW: <https://recenzes.cz/nejlepsi-3d-kamery-pro-rok-2022>.
[65] *Co je 3D stereoskopie?* Dostupné z WWW: <https://cs.gali-3d.com/stereoskopie-princip-3d/>.
[66] *Infitec*. Dostupné z WWW: <https://infitec.net/projekte/>.

Širší uplatnění než u klasické stereofotografie lze očekávat v případě digitálních fotografií s prostorovým efektem, vytvářených mnoha různými způsoby. Jedná se např. o způsob využívající více objektivů instalovaných v mobilním telefonu nebo mnoha rychle po sobě pořizovaných snímků v pohybu. V obou případech náročné algoritmy zpracují záznamy, identifikují figuru, ze stereoobrazů vypočtou hloubkovou mapu a vytvoří obraz s prostorovým efektem, který lze sledovat na běžném displeji. Fotografii s 3D efektem lze vytvořit z více 2D fotografií daného objektu z různých úhlů nebo i z jedné 2D fotografie, kdy je do odhadu hloubkové mapy zapojena neuronová síť.[67] Uvedené výpočty dosud realizují poskytovatelé těchto metod zobrazení. Lze očekávat, že se méně náročné výpočty 3D fotografií přesunou zcela do vlastního záznamového zařízení a stanou se standardní funkcí digitálních fotoaparátů. Prostorové efekty vytvořené prostřednictvím matematického zpracování obrazů jsou různě věrné, různě rozsáhlé a různě přesvědčivé. Nejedná se však stejně jako v případě stereofotografie o skutečný 3D obraz. Ten lze získávat pouze technologií 3D skenování z mračna bodů objektu aktivní či pasivní triangulací nebo prostřednictvím holografie. Tyto funkce však nelze v blízké době u digitálních fotoaparátů očekávat.

Zvláštní, dosud nepříliš rozšířenou skupinou digitálních fotoaparátů jsou fotoaparáty *plenoptické*, které jsou schopny zachytit trojrozměrné světelné pole scény. Jedná se o přístroje vybavené klasickým snímačem CMOS, nad nímž je umístěna soustava mnoha mikročoček, z nichž každá má vyhrazené vlastní snímací pole (např. 200 pixelů).[68] Výsledkem snímání je mnoho mikroplošných snímků, na nichž je vedle polohy a intenzity světelných paprsků zachycen také směr, ze kterého paprsky přicházejí. Tento systém podporuje velmi vysokou maximální hloubku ostrosti a ze získaných dat může následně uživatel v počítači vytvořit ostrý snímek v různých zvolených rovinách ostrosti. Protože není třeba před snímáním zaostřovat, mohou plenoptické fotoaparáty pořizovat snímky rychleji, avšak s nižším rozlišením než standardní digitální fotoaparát se stejným snímačem CMOS. Plenoptický fotoaparát však zaznamenává údaje o hloubce, takže může být jeho snímek zdrojem stereofotografie, resp. plenoptický fotoaparát být využit jako 3D kamera.[69]

[67] BERAN, L. *Odhad hloubkové mapy za využití neuronových sítí*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2022.
[68] *Plenoptický fotoaparát*. Dostupné z WWW: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Plenoptick%C3%BD_fotoapar%C3%A1t>.
[69] *Technologie*. Dostupné z WWW: <https://www.fotografovani.cz/vybirame/technologie1/lytro-plenopticky-fotoaparat-1g-v-testu-166613cz>.



Obr. 24 Výřezy ze snímku pořízeného plenoptickým fotoaparátem. (Převzato z https://tonyee.wordpress.com/tag/plenoptic-camera/)

5.4 Rozvoj nových technologií

Z hlediska požadavků na enormní zvýšení citlivosti či dynamického rozsahu, hloubky ostrosti či přesného časování expozice se může v blízké budoucnosti prosadit řada nových technologických řešení. V oblasti digitálních záznamů pro profesionální aplikace, především strojové vidění, mikroskopie a dálkový průzkum se prosazují nové typy snímačů umožňujících dramaticky zvýšit citlivost příslušných zařízení. Jedná se především o snímače časového zpoždění a integrace TDI, které jsou postaveny na prvcích CCD, CMOS nebo s využitím výhod obou technologií. Tyto senzory pracují jako snímače lineární, avšak obsahují až stovky řádků senzorů, přičemž každý řádek zachycuje snímek objektu. Snímače CCD TDI či CMOS TDI tak kombinují vícenásobné expozice, kdy se více snímků objektu sčítá a vytváří tak silnější signály. Uplatnění těchto snímačů spadá především do aplikací, kde je velmi malý zisk fotonů a jiné technologie by vedly k vysokému šumu.[70]

Pro světelnou detekci velmi slabých signálů jsou určeny fotonásobiče, které zesilují elektrony emitované v důsledku fotoelektrického jevu. Klasické fotonásobiče (*Photo Multiplier Tube*) v řadě kroků urychlují, zesilují a sekundární emisí znásobují počet elektronů generovaných fotokatodou vystavenou toku fotonů. Toto zesílení může dosáhnout až 10^8násobku, což umožňuje detekovat i jednotlivé fotony. Stejný princip je aplikován u soudobých elektronových multiplikačních CCD (EMCCD). Jedná se o inovativní metodu zesilování signálů s nízkou úrovní světla nad čtecím šumem bez zhoršování poměru signál/šum. Současně je tato metoda levnější než klasické fotonásobiče a disponuje vyšší kvantovou účinností. Uplatnění snímače EMCCD nacházejí

[70] *Concepts in Digital Imaging Technology*. <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/concepts.html>.

především v aplikacích, kde je signál tak slabý, že je sotva nad úrovní šumu snímače. Zde mohou EMCCD detekovat dříve nerozeznatelné signály.[71]

Z hlediska proměny vlastních technologií, materiálů a výroby obrazových snímačů se pozornost zaměřuje na využití uhlíku a germania v podobě dvourozměrné vrstvy atomů. V případě uhlíku nazývanou *graphen*, v případě germania *germanen*. Oba materiály vykazují mnohem lepší vlastnosti než křemík z hlediska rychlosti průchodu elektronů i kvantové účinnosti. Jejich plné využití však není blízkou perspektivou, ale vstup graphenu do technologií snímačů již započal v souvislosti s modernizací CMOS. Vzhledem k tomu, že vývoj požadavků na výkony záznamových zařízení vedl ke zhušťování a zmenšování mikrokomponentů obvodů, musely se zmenšovat též průřezy propojovacích vodičů, což vedlo ke zvýšení jejich měrného odporu, zahřívání a problémům s elektromigrací projevující se závadami vodičů v důsledku posunu atomů ve vodiči vyvolaného tokem elektronů.[72] Náhrada kovových vodičů vysoce vodivými vícevrstvými graphenovými propojeními o šířce 20 nm a méně uvedené problémy řeší. Technologie je však na počátku využití, teprve koncem roku 2018 byla publikována nová technologie, tehdy ale jen v laboratorních podmínkách i měřítku, nanášení graphenu na čip během jeho výroby při teplotách, které čip nezničí (kolem 300 °C).[73]

Obrazové snímače CMOS jsou zatíženy stejně jako všechny oblasti využití technologie CMOS prudkým zvyšováním limitů výkonů a hustoty obvodů, které se tak v dalším rozvoji dostávají do kontaktu s fyzikálními hranicemi z hlediska rozměrů, frekvencí, teploty, napětí, rychlosti či akumulační kapacity. Snahou překonat uvedené hranice zcela novými přístupy je quasitechnologie označovaná jako *Beyond-CMOS*.[74] Jedná se zde o velmi široký komplex směrů inovací zahrnující využití graphenových tranzistorů s efektem pole v masivně paralelní architektuře, radiofrekvenční systémy založené na graphenu, aplikace nízkoteplotní elektroniky (*Cryogenic Electronics*) nebo zavedení nové magnetické logiky (MLogika) využívající logická hradla jako energeticky nezávislé úložné prvky.[75] Tyto systémy budou moci být napájeny relativně velmi nízkým napětím do 100 mV a v segmentu senzorů by mohly dramaticky zlepšit jejich přesnost, rozlišení a rychlost. Široké

[71] *CCD vs. CMOS.* Dostupné z WWW: <http://www.teledynedalsa.com/en/learn/knowledge-center/ccd-vs-cmos/>.
[72] *Elektromigrace.* Dostupné z WWW: <https://cs.frwiki.wiki/wiki/%C3%89lectromigration>.
[73] THOMAS, S. *CMOS-compatible graphene*. Nature Electronics, volume 1, 2018. Dostupné z WWW: <https://www.nature.com/articles/s41928-018-0178-x>.
[74] *Beyond-Cmos: The near future of information.* Dostupné z WWW: <https://www.ripublication.com/ijaer19/ijaerv14n16_02.pdf>.
[75] *Optoelectronic mixing with high-frequency graphene transistors.* Dostupné z WWW: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-22943-1>.

využití technologie Beyond-CMOS však není předmětem bližších perspektiv digitálního záznamu obrazu.[76]

6 Závěr

Tato práce předkládá ucelený pohled na digitální technologie záznamu obrazu, které se díky rozšíření digitálních fotoaparátů, ale zejména následně díky integraci digitálních fotoaparátů do mobilních telefonů, kterými disponuje drtivá většina populace, stala nedílnou součástí volnočasových aktivit i profesního života. Žáci, studenti i jejich pedagogové užívají technologií digitálního záznamu obrazu téměř na denní bázi, a to i v případech, kdy se předmět jejich studia těchto technologií vůbec netýká. Za pomoci těchto technologií si pořizují poznámky, dokumentaci, zachycují jevy pro lidské senzorické snímání příliš rychlé, či naopak příliš pomalé, rekonstruují texty (OCR), provádí měření času, vzdálenosti, velikosti a mnoho a mnoho dalších činností, jejichž pouhý výčet by byl nad rámec této práce. Ve většině použití těchto digitálních technologií a jejich aplikací je výsledek, zaznamenaný obraz, a jeho použitelnost či výpovědní hodnota, přímo a zásadně ovlivněn volbou použitých technologií, nastavením režimů a parametrů fungování těchto technologií, vyloučením nebo naopak použitím vhodného následného softwarového zpracování obrazu. V mnoha nejen krajních nebo exaktně uchopovaných použitích je erudice uživatele v možnostech a principech zařízení pro digitální záznam obrazu naprosto zásadní. Uživatel zařízení pro digitální záznam by měl být schopen fundovaně zvolit technologii, přístroj a jeho nastavení, parametry scény a snímání a metody postprodukce obrazu. Práce se usiluje napomoci tomuto záměru a podává analýzu funkčních a aplikačních možnosti soudobých digitálních technologií záznamu obrazu v kontextu odborného využití se snahou o příspěvek k rozšíření informační báze studentů a učitelů zabývajících se digitálními technologiemi. Vedle charakteristik soudobých digitálních technologií záznamu obrazu se práce snažila predikovat a formulovat perspektivy a směry jejich blízkého vývoje a využití. Přitom se práce snaží akcentovat směry vývoje, které se v praxi již částečně uplatňují. Kupříkladu miniaturizace jak obrazových senzorů tak jejich fotodiod a podpůrných obvodů je trend setrvalý a lze tedy předpokládat jeho pokračování, a tedy i brzké uplatňování přístupů a technologií přispívajících ke zlepšení parametrů a funkcí zmenšujících se obvodů. Stejně tak bude jistě postupovat záznam 3D obrazu, přestože zde značně za záznamem zaostává jeho prezentace. Zvyšující se podíl softwarových úprav zaznamenaného obrazu je naprosto

[76] *Beyond CMOS: the Future of Semiconductors*. Dostupné z WWW: <https://irds.ieee.org/home/what-is-beyond-cmos>.

zřejmý od jeho počátků v astronomii (např. skládání snímků, které dnes začíná sehrávat významnější úlohu díky vícečetným objektivům mobilních telefonů). Za v tomto oboru nejmladší lze považovat použití AI, u kterého lze jen těžko odhadovat budoucí konkrétní aplikace, ale již dosahované schopnosti soudobých AI naznačují, že její použití bude masivní.

7 Použitá literatura a prameny

1. *Active-pixel sensor*. Dostupné z WWW: <https://en.wikipedia.org/wiki/Active-pixel_sensor>.
2. ANDOR TECHNOLOGY. *Digital Camera Fundamentals.* Dostupné z WWW: <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/digital-camera-fundamentals
3. ATKINS, B. *RAW, JPEG and TIFF*. Dostupné z WWW: <https://archive.ph/2013.01.12-013139/http://www.photo.net/learn/raw/#selection-1681.1-1691.1>.
4. BERAN, L. *Odhad hloubkové mapy za využití neuronových sítí*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2022.
5. *Beyond CMOS: the Future of Semiconductors*. Dostupné z WWW: <https://irds.ieee.org/home/what-is-beyond-cmos>.
6. *Beyond-Cmos: The near future of information*. Dostupné z WWW: <https://www.ripublication.com/ijaer19/ijaerv14n16_02.pdf>.
7. *CCD vs CMOS – Which is Better?* Dostupné z WWW: <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=1007>.
8. *CCD vs. CMOS.* Dostupné z WWW: <http://www.teledynedalsa.com/en/learn/knowledge-center/ccd-vs-cmos/>.
9. CÍSAŘ, K. *Co je to fotografie?* Praha: Herrmann & synové, 2004. 365 s. ISBN 978-80-251-1579-4.
10. *CMOS camera as a sensor*. Dostupné z WWW: <https://web.archive.org/web/20161012163818/https://www.ikalogic.com/image-processing-as-a-sensor/>.
11. *CMOS*. Dostupné z WWW: <https://en.wikipedia.org/wiki/CMOS?oldid=132910144>.
12. *Co je 3d stereoskopie?* Dostupné z WWW: <https://cs.gali-3d.com/stereoskopie-princip-3d/>.
13. *Color Filter Array Designs.* Dostupné z WWW: <http://www.quadibloc.com/other/cfaint.htm>.
14. *Concepts in Digital Imaging Technology*. Dostupné z WWW: <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/concepts/concepts.html>.
15. *Dave Morrow Photography.* Dostupné z WWW: <https://www.davemorrowphotography.com/camera-sensor-size-guide>.
16. SVOBODA, R. *Metody pro vylepšení kvality digitálního obrazu*. Brno: VUT, 2010. Dostupné z WWW: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/15129/final-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.
17. *Digital Image Processing.* Dostupné z WWW: <https://www.tutorialspoint.com/dip/index.htm>.
18. *Digitalizace obrazu*. Dostupné z WWW: <http://grafikpromedia.spspzlin.cz/technologie/digitalizace-obrazu>.
19. *Digitální snímače: parametry a vlastnosti*. Dostupné z WWW: <https://fotofokus.cz/2018/01/digitalni-snimace-parametry-a-vlastnosti/>.
20. DOVE, J. *Demystifying digital camera sensors once and for all.* Dostupné z WWW: <https://www.techhive.com/article/602116/demystifying-digital-camera-sensors-once-and-for-all.html>.

21. EASTMAN, G. *Dějiny fotografie*. Praha: Collection, House, Slovart, 2010, s 768, 978-80-7391-426-4.
22. *Elektromigrace*. Dostupné z WWW: <https://cs.frwiki.wiki/wiki/%C3%89lectromigration>.
23. *Foveon X3*. Dostupné z WWW: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Foveon_X3>.
24. *Foveon's revolutionary X3 sensor.* Dostupné z WWW: <https://www.dpreview.com/articles/7559294753/foveonx3>.
25. *Fujifilm introduces F200EXR with Super CCD EXR*. Dostupné z WWW: <https://www.dpreview.com/articles/4923997750/fujifilmfinepixf200exr>.
26. *Fujifilm uvedl nový Super CCD EXR čip. Dostupné z WWW:* <https://www.digimanie.cz/fujifilm-uvedl-novy-super-ccd-exr-cip/2454>.
27. HANUS, S. *Optoelektronické měniče*. Brno: VUT, 2008.
28. HYAN, J., T. *Digitální fotografie*. 1. vyd. Praha: JTH-Soft, 1998. 158 s. ISBN 80-238-3176-3.
29. IEEE Std 1789™-2015. *IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers.*
30. *Image Sensor Formats.* Dostupné z WWW: <https://machinevisiondirect.com/pages/image-sensor-formats>.
31. JÍLEK, F., KUBA, J., JÍLKOVÁ, J. *Světové vynálezy v datech*. Praha: Mladá fronta, 1980.
32. KADLEC, O. *Historie digitální fotografie*. Brno: FI MU. Dostupné z WWW: <http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2004/xkadlec2.htm>.
33. KRESTA, D. *Dějiny světového filmu 1. Němý film*. Olomouc, UJEP, 2013.
34. KUMAR, N. *Digital Image Processing Basics*. Dostupné z WWW: <https://www.geeksforgeeks.org/digital-image-processing-basics/>.
35. LEVINSKÝ, O., STRÁNSKÝ, A. a kol. *Film a filmová technika*. Praha: SNTL, 1974.
36. LORAL FAIRCHILD CCD IMAGING DATABOOK. *CCD Sensors, Systems & Developmental Technology*. Milpitas: Loral Fairchild Imaging Sensors, 1995.
37. LUCENT TECHNOLOGIES. CCD - *The History of CCDs or Charge Coupled Devices*. 2008. Dostupné z WWW: <https://www.thoughtco.com/history-of-the-digital-camera-4070938>.
38. MACENAUER, A. *Foveon X3 - inovace čipu CMOS*. Dostupné z WWW: <https://www.fotoaparat.cz/clanek/124/foveon-x3-inovace-cipu-cmos-3041/>.
39. *Nejlepší 3D kamery pro rok 2022.* Dostupné z WWW: <https://recenzes.cz/nejlepsi-3d-kamery-pro-rok-2022>.
40. *Optoelectronic mixing with high-frequency graphene transistors.* Dostupné z WWW: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-22943-1>.
41. *Plenoptický fotoaparát*. Dostupné z WWW: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Plenoptick%C3%BD_fotoapar%C3%A1t>.
42. RAMBOUSEK, V. a kol. *Technické výukové prostředky*. 1. vyd. Praha: SPN, 1989.
43. RAMBOUSEK, V. Východiska a koncepty technologické podpory edukace. In *Vzdělávání pro život v informační společnosti I*. Praha: Vydavatelství ČVUT Praha, 2005, s. 25-84. ISBN 80-7290-198-2.
44. ROBINSON, D. (1997). *From Peepshow to Palace: The Birth of American Film*. New York and Chichester, West Sussex: Columbia University Press, 1997. ISBN 0-231-10338-7.
45. ŘÍČNÝ, V. *Videotechnika*. Brno: VUT, 2006. 135 s. ISBN 80-214-3225-X

46. ŘÍČNÝ, V. *Vlastnosti a využití řádkových světlocitlivých snímačů CCD*. Knižnice odborných a vědeckých spisů VUT v Brně. Brno: VUT, 1990, s. 116. ISBN 80-214-0222-9
47. *Segmentace obrazu*. Dostupné z WWW: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Segmentace_obrazu>.
48. SONTAGOVÁ, S. O *fotografii*. Praha: Paseka, 2002, s. 181. ISBN 80-7185-471-9.
49. *Stereoskopie*. Dostupné z WWW: <https://www.wikiwand.com/cs/Stereoskopie>.
50. TAUSK, P. *Dějiny fotografie I. : Přehled vývoje fotografie do roku 1918*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1987, s. 212.
51. *Technologie*. Dostupné z WWW: <https://www.fotografovani.cz/vybirame/technologie1/lytro-plenopticky-fotoaparat-1g-v-testu-166613cz>.
52. THOMAS, S. *CMOS-compatible graphene*. Nature Electronics, volume 1, 2018. Dostupné z WWW: <https://www.nature.com/articles/s41928-018-0178-x>.
53. *Types Of Camera Sensor.* Dostupné z WWW: <https://www.photometrics.com/learn/camera-basics/types-of-camera-sensor>.
54. *Úvod do techniky CCD čipů.* Dostupné z WWW: <https://www.gxccd.com/art?id=303&lang=405>.
55. VÁVRA. V., ŠTELCEL, J. *Konstrukce a základní komponenty digitálních přístrojů.* Dostupné z WWW: <https://is.muni.cz/elportal/estud/prif/ps08/digitech/web/kapitola1/3.html>.
56. VEENDRICK, H*. Deep-Submicron CMOS ICs: From Basics to ASICs.* Kluwer Academic Publishers, 2000. ISBN 9044001116.
57. VOJÁČEK**,** A. *Principy a málo známé vlastnosti CCD snímačů obrazu.* Dostupné z WWW: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006041001>.
58. *What is pixel binning?* Dostupné z WWW: <https://www.digitalcameraworld.com/features/what-is-pixel-binning-everything-you-need-to-know-about-this-camera-tech>.
59. ZMEŠKAL, O., BUCHNÍČEK, M., SEDLÁK, O. *Principy digitálního záznamu obrazu*. Dostupné z WWW: <http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/harfa.htm>.

8 Seznam obrázků

Obr. 1 Malování krajiny pomocí camery obscury (Převzato z: https://magazine.artland.com/agents-of-change-camera-obscura/) 9

Obr. 2 Kircherova laterna magica (Převzato z: https://www.laterna.net/blogi/mista-tulee-nimi-laterna-magica) 10

Obr. 3 Nejstarší dochovaný snímek „Pohled z okna v Le Gras“ provedený metodou heliografie (Převzato z: https://www.alamy.it/fotos-immagini/niepce.html?sortBy=relevant) 10

Obr. 4 Snímek „Pohled na Boulevad du Temple, Paříž“ z roku 1839 provedený metodou daguerrotypie (Převzato z: https://kouzlo-fotografie.webnode.cz/historie-fotografie/heliografie-daguerrotypie/) 11

Obr. 5 Purkyňův kinesiskop (Převzato z: https://blog.dorotheum.com/de/gut-gesehen-gut-gesammelt-josephinum/kinesiskop-nach-purkyne/) 13

Obr. 6 První digitální fotoaparát Stevena Sassona vytvořený ve firmě Kodak (Převzato z: https://digineff.cz/prvni-byl-kodak/) 16

Obr. 7 Apple QuickTake 100 z roku 1994 (Převzato z: https://www.cnet.com/culture/the-icamera-a-look-back-at-apples-first-digital-camera/) 17

Obr. 8 aktivní třítransistorový (3T) pixel CMOS. Převzato z https://en.wikipedia.org/wiki/Active-pixel_sensor 18

Obr. 9 Obrazové snímače. Zleva: Plošný a lineární snímač CCD, plošný a lineární snímač CMOS a víceřádkový snímač TDI (Převzato z: https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=1007; https://www.vision-systems.com/cameras-accessories/image-sensors/article/1) 21

Obr. 10 Běžně užívané barevné masky obrazových snímačů. Horní řada zleva: RGBG, RGBE, RGBW, RGBW se změnou geometrie. Dolní řada zleva: CYYM, CYGM, (Převzato z http://www.quadibloc.com/other/cfaint.htm) 23

Obr. 11 Pohyb náboje jedné buňky při různých metodách skenu. Zleva: prokládaný sken, progresivní sken, plošný sken (Převzato z https://www.photometrics.com/learn/camera-basics/types-of-camera-sensor) 25

Obr. 12 Interpolace plnobarevných pixelů obrazu z hodnot jednotlivých buněk snímače s mozaikovým filtrem. (Převzato z https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Bayer_interpolace.png) 26

Obr. 13 Pixel binning 2 × 2 (Převzato z https://deepinout.com/camera-terms/camera-4-cell-remosaic-intro.html) 27
Obr. 14 Poměr velikostí vybraných běžných plošných obrazových snímačů (Převzato z https://www.davemorrowphotography.com/camera-sensor-size-guide). 28
Obr. 15 Dynamický rozsah snímače při základní a zvýšené citlivosti. (Převzato z https://cs.wikipedia.org/wiki/Dynamick%C3%BD_rozsah) 33
Obr. 16 Expozice a snímání obrazu jedné buňky CCD. 35
Obr. 17 Řešení snímače Super CCD. (a) Uspořádání fotodiod u klasického CCD. (b) Uspořádání fotodiod u Super CCD. (c) Konstrukce Super CCD. (Převzato z https://www.fotoaparat.cz/clanek/76/technologie-super-ccd-sr-2183/) 36
Obr. 18 Další generace Super CCD. (a) Interpolované pixely (Created pixel) u Super CCD HR. (b) Primární a sekundární fotodiody (S pixel, R pixel) u Super CCD SR. (c) Primární a sekundární fotodiody (S pixel, R pixel) u Super CCD SR II. 37
Obr. 19 Super CCD EXR - Spojování pixelů stejné barvy v rámci Pixel Fusion Technology (Převzato z https://ascii.jp/elem/000/000/211/211425/img.html) 38
Obr. 20 Super CCD EXR - Rozdělení snímače na fotodiody typu A a fotodiody typu B v rámci Dual Exposure Control (Převzato z https://www.digimanie.cz/fujifilm-uvedl-novy-super-ccd-exr-cip/2454) 38
Obr. 21 Schema obecné konstrukce tranzistorů MOSFET. Převzato z WWW: <https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_6.html> 39
Obr. 22 Struktura snímačů CMOS. Vlevo klasický snímač CMOS, vpravo snímač BSI CMOS. (Upraveno podle https://www.digitalkamera.de/Meldung/Toshiba_bringt_BSI-CMOS-Bildsensor_auf_den_Markt/6123.aspx) 41
Obr. 23 Porovnání klasického plošného snímače a snímače Foveon X3. Horní řada: klasický plošný snímač. Dolní řada: Foveon X3 (Upraveno podle https://www.dpreview.com/articles/7559294753/foveonx3) 42
Obr. 24 Výřezy ze snímku pořízeného plenoptickým fotoaparátem. (Převzato z https://tonyee.wordpress.com/tag/plenoptic-camera/) 49