



Fyzikální optika

Semestrální projekt

**Analogová a digitální fotografie. Principy fotoaparátů.**

8. dubna 2024

Martin Zmitko (xzmitk01)

### **Abstrakt**

Tato práce se zabývá principy fotoaparátů. Fotografie je nejprve zasazena do historického kontextu, kde je popsán vývoj fotografie, fotografického média a objektivů s ohledem na problémy vycházející z různých optických jevů, které musely být průkopníky vyřešeny. Dále jsou osvětleny principy moderních digitálních obrazových senzorů a jejich vnímání barev. Pro optické systémy jako jsou objektivy je popsána simulace pomocí maticové optiky.

***Klíčová slova:*** fotografie, objektiv, čočka, fotografické médium, optické vady, obrazový snímač, maticová optika

## Obsah

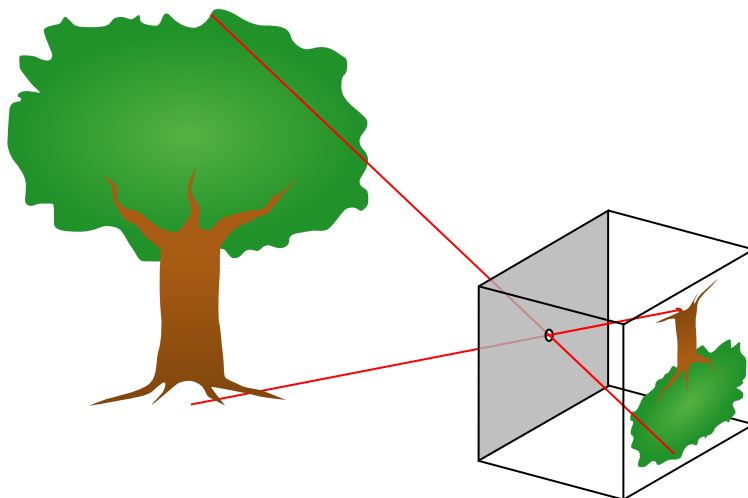
|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod</b>                              | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Historie fotografie</b>               | <b>3</b>  |
| 2.1      | Vývoj fotografického média . . . . .     | 4         |
| 2.2      | Vývoj objektivů . . . . .                | 5         |
| <b>3</b> | <b>Digitální fotografie</b>              | <b>7</b>  |
| 3.1      | Technologie obrazových snímačů . . . . . | 7         |
| 3.2      | Snímání barev . . . . .                  | 9         |
| <b>4</b> | <b>Paprsková maticová optika</b>         | <b>9</b>  |
| <b>5</b> | <b>Závěr</b>                             | <b>11</b> |

# 1 Úvod

Fotografie, tedy proces zachycení reality na trvalém médiu, je převážně fenoménem posledního staletí. Její historie však zasahuje hlouběji, než se může zdát. V kapitole 2 proberu její historii, vývoj analogových fotografických médií pro záznam obrazu a vývoj objektivů, zasazený do kontextu problematických optických jevů, které musely být vyřešeny. Kapitola 3 pojednává o fotografii v moderní době – o digitálních optických snímačích. Zde proberu známé technologie a způsoby, jakými lze obohatit digitální fotografie o barevnost. Pro účely simulace komplexních optických systémů, jakými jsou objektivy, rozeberu v kapitole 4 maticovou optiku – způsob, jakým zjednodušeně simulovat paprsky procházející optickými prvky.

## 2 Historie fotografie

Fotografie, ač ve velmi odlišné formě, než je známa dnes, je již překvapivě starým konceptem. První písemné zmínky se datují až do 5. století př. n. l., kdy čínský filozof Mo Zi popsal tzv. *camera obscura* (z latinského *temná komora*, také označovanou jako dírková komora) [15]. V principu se jedná o uzavřenou schránku (od malé schránky do velikosti místnosti) s dírkou v jedné stěně. Dírka propouští přímé světelné paprsky odrážející se od zobrazovaného objektu a promítá je převráceně na protější stěně komory. Ilustrace dírkové komory je na obrázku 1.



Obrázek 1: Ilustrace primitivní dírkové komory [13]

Vzhledem k vlastnostem takového zobrazení má obraz přesně zachované barvy a perspektivu, jeho ostrost ale závisí na průměru dírký. S menší dírkou je propuštěn menší rozsah různě směřujících světelných paprsků, obraz se tedy jeví jako ostřejší. Pokud se ale průměr dírký začne blížit vlnové délce propouštěného světla, projeví se zde difrakce a kvalita obrazu opět začne degradovat, taktéž je propuštěno méně světla a obraz se může stát příliš tmavým. Následující rovnice (kde  $d$  je průměr dírký,  $f$  je vzdálenost dírký od zobrazovací plochy a  $\lambda$  je vlnová délka světla) objevená Josephem Petzvaem v roce 1857 popisuje ideální průměr dírký [17]:

$$d = \sqrt{2} \sqrt{f \lambda}$$

## 2.1 Vývoj fotografického média

Camera obscura v průběhu historie nesloužila jako fotoaparáty, které známe dnes. Protože ještě nebyl znám způsob, jak takto zachycené obrázky uchovat, dírková komora sloužila hlavně jako umělecká pomůcka a obraz byl ručně překreslen na podklad. To se změnilo ve 30. letech 19. století, kdy francouz Joseph Nicéphore Niépce jako první použil přenosnou dírkovou komoru k zachycení fotografie na plát cínové slitiny pokryté vrstvou bitumenu. Expozice světlem bitumen vytvrdila a plát byl následně vyvolán odleptáním neexponovaného bitumenu, výsledkem čehož byl negativ. První známá fotografie je na obrázku 2.



Obrázek 2: První historicky známá fotografie, Pohled z okna v Le Gras od Josepha Nicéphore Niépce (1826)

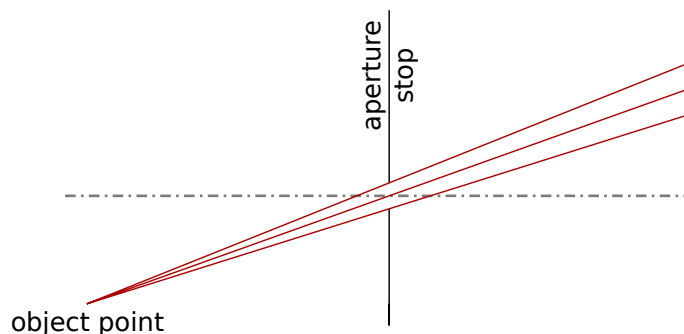
Bitumen se prokázal jako nevhodné médium, jeho expozice trvala několik hodin, což pro běžné fotografie nebylo praktické. Po Niépceho smrti v roce 1833 jeho práci převzal Louis Daguerre, kterému se podařilo vytvořit první komerčně úspěšný fotografický proces – daguerrotypie, veřejnosti odhalený v roce 1839. Daguerrotypie spočívá v exponování destičky pokryté světlocitlivým jodidem stříbrným, následném vyvolání parami rtuti a ustálením thiosíranem sodným [19].

Daguerrotypii (a později používanou kalotypii s podobným principem) v druhé polovině 19. století nahradil mokrá koloidový proces. Ten spočíval v nanesení světlocitlivého materiálu na skleněnou desku pomocí nedávno objeveného kolodia. To umožnilo vytvářet kvalitnější médium s vyšší světlocitlivostí a doba expozice se zkrátila na pár sekund, proces přípravy, expozice a vyvolání však musel proběhnout v rychlém sledu za sebou, což jej učinilo nepraktickým pro přenosnou fotografii [19].

Proces se později podařilo vylepšit použitím emulze solí stříbra v želatině, což umožnilo fotografické desky vyrobit dopředu a používat za sucha. Ke konci 19. století George Eastman vymyslel a získal patent na revoluční technologii – fotografický film. Ten vznikl nanesením želatinové emulze na nitrocelulóзовý, ohebný film. Tento film nabyl kvůli snadné práci s ním a nízké ceně na velké popularitě široké veřejnosti, Eastman později získal patent na fotoaparát pracující s tímto filmem a založil společnost Kodak [16]. Film se v analogové fotografii s dalšími inovacemi používá dodnes.

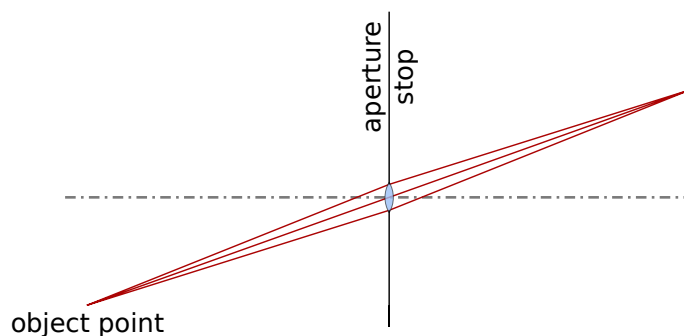
## 2.2 Vývoj objektivů

Dírková komora jako taková není dostatečně přesným optickým nástrojem ke kvalitnímu zachycení fotografie. Její výraznou limitací je neostrost v zobrazení i při ideálně malé díрке – bod na zobrazovací ploše není bodem na zobrazovaném objektu, ale je to kruh o průměru dírkky, velikost dírkky tedy omezuje maximální rozlišení obrazu, ukázka je na obrázku 3. Dírková komora bez objektivu nebyla v začátcích fotografie úspěšná v zachycení snímku.



Obrázek 3: Ilustrace dírkové komory s velkou dírkou, umožňující více propuštěného světla za cenu rozostřeného obrazu [5]

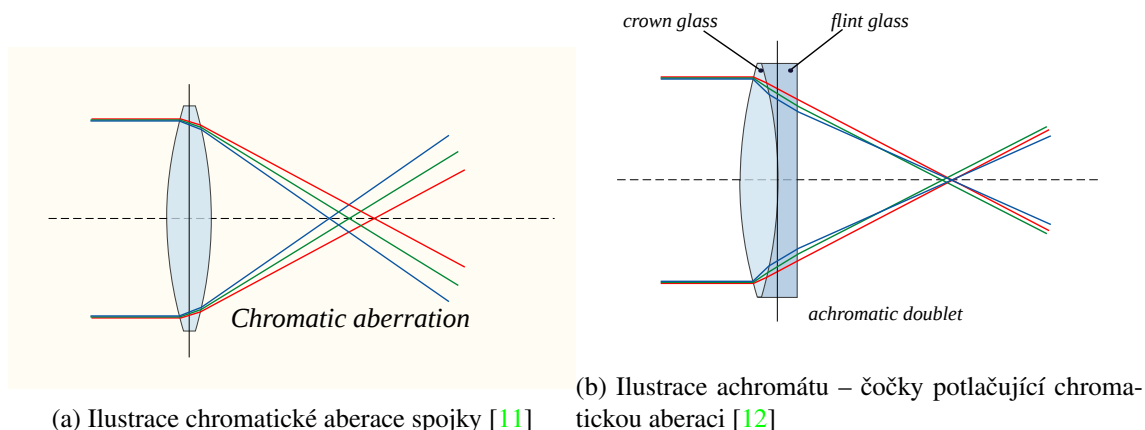
Výrazné vylepšení přineslo použití jednoduché konvexní čočky v prostoru dírkky s fokální vzdáleností rovné vzdálenosti od zobrazovací plochy. Tato čočka zajistila zaostření všech paprsků do jednoho bodu nezávisle na jejímu průměru, díky čemuž bylo možné zvýšit množství propuštěného světla se zachováním ostrosti, což vedlo k prvním úspěšně pořízeným fotografickým snímkům [10]. Ukázka použití takového primitivního objektivu je na obrázku 4.



Obrázek 4: Ilustrace primitivního použití konvexní čočky k účelu zaostření v dírkové komoře [6]

Použití tak jednoduché čočky je ale omezeno několika problémy. Prvním z nich je chromatická aberace – barevná vada čočky, způsobená závislostí indexu lomu materiálu čočky na vlnové délce světla, ilustrovaná na obrázku 5a. Důsledkem jsou barevné artefakty na přechodech mezi světle a stínem na výsledné fotografii, u raných fotoaparátů to stěžovalo ostření kvůli odlišné citlivosti tehdy používaných médií na různé vlnové délky. Řešením byl vynález (angličanem Chesterem Moorem Hallem v 17. stol.) tzv. achromátu – složení spojky z materiálu s nízkou disperzí a rozptylky s vysokou disperzí, na obrázku 5b. Taková čočka zajistila zaostření dvou barev do stejného bodu, což chromatickou aberaci výrazně omezilo [10].

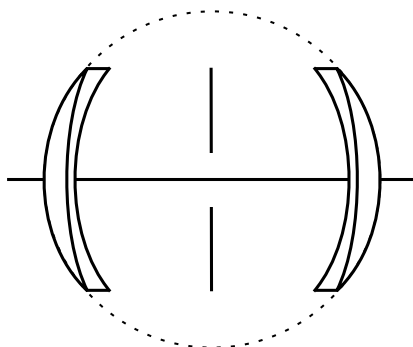
Dalším problémem je optická aberace – zkreslení, kdy jsou původně rovné čáry zakřiveny a neodpovídají původní projekci. Takové zkreslení se u jednoduchých čoček projevuje převážně na okrajích, což má za důsledek nízký použitelný úhel záběru. První mitigací je použití uzávěrky



Obrázek 5: Ilustrace chromatické aberace

– dírký s menším průměrem než čočka, která propustí pouze světelné paprsky blíže středu čočky. Nastavitelná uzávěrka je taktéž užitečná pro nastavení světlosti snímku a adaptaci na různé světelné podmínky [16].

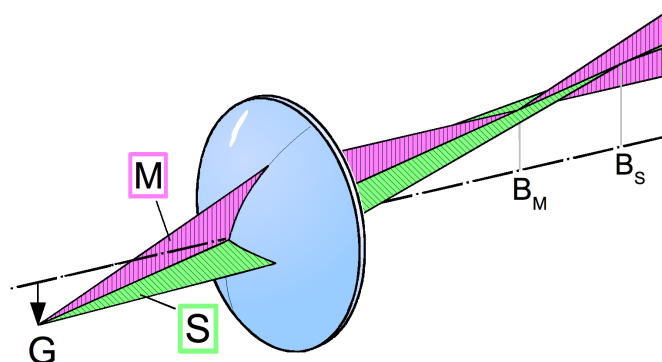
Zkreslení se podařilo výrazně omezit vynálezem symetrického objektivu – použitím dvou složených čoček zrcadlených kolem uzávěrky. To vedlo k prvním širokoúhlým objektivům, na obrázku 6 je první takový objektiv od američanů Harrisona a Schnitzera. Tento objektiv disponoval maximálním obrazovým úhlem  $91^\circ$ , což je výrazné zlepšení oproti dobovým portrétovým objektivům s maximálním použitelným úhlem  $50^\circ$  a výrazným zkreslením u okrajů [10].



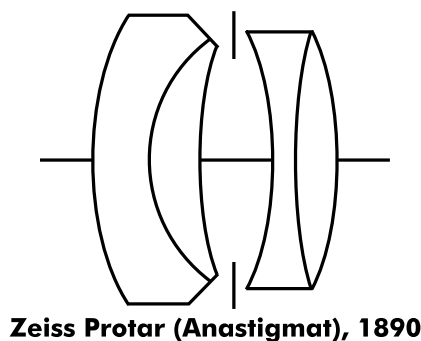
**Harrison & Schnitzer Globe, 1862**

Obrázek 6: Ilustrace prvního širokoúhlého objektivu, potlačujícího optickou aberaci [3]

Objektiv, který by se dal nazývat moderním vznikl na konci 19. století díky pokrokům v materiálech čoček. Byl jím asymetrický Zeiss Protar (na obrázku 8), který obsahoval dobré korekce všech optických aberací, již včetně astigmatismu. Astigmatismus je optická vada, kdy při zobrazení roviny kolmé k optické ose dochází k tomu, že body v navzájem kolmých osách se nezobrazí ve stejné vzdálenosti, také způsobuje rozdílné zobrazení, pokud paprsek dopadá na optickou soustavu kolmo nebo pod úhlem, ilustrace je na obrázku 7. Objektivu s korekcí astigmatismu (a jiných optických vad) se obecně říká anastigmat [10].



Obrázek 7: Ilustrace astigmatizmu, obraz bodu  $G$  je v bodě  $B_M$  pro paprsky v rovině  $M$ , ale v bodě  $B_S$  pro paprsky v rovině  $S$  [20]



Obrázek 8: Ilustrace objektivu Zeiss Protar [4]

### 3 Digitální fotografie

Díky její jednoduchosti, nízké ceně, dostupnosti a z mnoha dalších důvodů digitální fotografie téměř úplně nahradila analogovou. Na rozdíl od analogových médií, kde fotocitlivý materiál chemickým procesem po vystavení světlu uchová obraz, jsou použity polovodičové senzory se stejnou funkcí.

#### 3.1 Technologie obrazových snímačů

První technologií obrazových snímačů bylo CCD (Charge-coupled device), vynalezené v roce 1969 v Bellových laboratořích. V principu se jedná o pole vzájemně propojených fotocitlivých MOS tranzistorů, tvořících posuvný registr. Při snímání vytvoří dopady fotonů na jednotlivé tranzistory elektrický náboj úměrný intenzitě světla. Poté se tyto náboje čtou pomocí zesilovače, které je převede na napětí, ukládané pomocí převodníku ADC (analog-digital converter) do paměti. Hodnoty jsou čteny postupně, při každém čtení tranzistory převedou svůj náboj sousedovi a uloží se hodnota posledního senzoru v poli [7].

Druhou, novější a v dnešní době více rozšířenou technologií, jsou aktivní pixelové senzory. Tyto senzory mohou fungovat na základě několika principů, dominantní je však technologie využívající CMOS tranzistory. Buňka tohoto senzoru je tvořena fotodiodou a nejběžněji čtyřmi CMOS tranzistory, které umožňují uchování náboje a následně přímé čtení výsledného napětí z každé

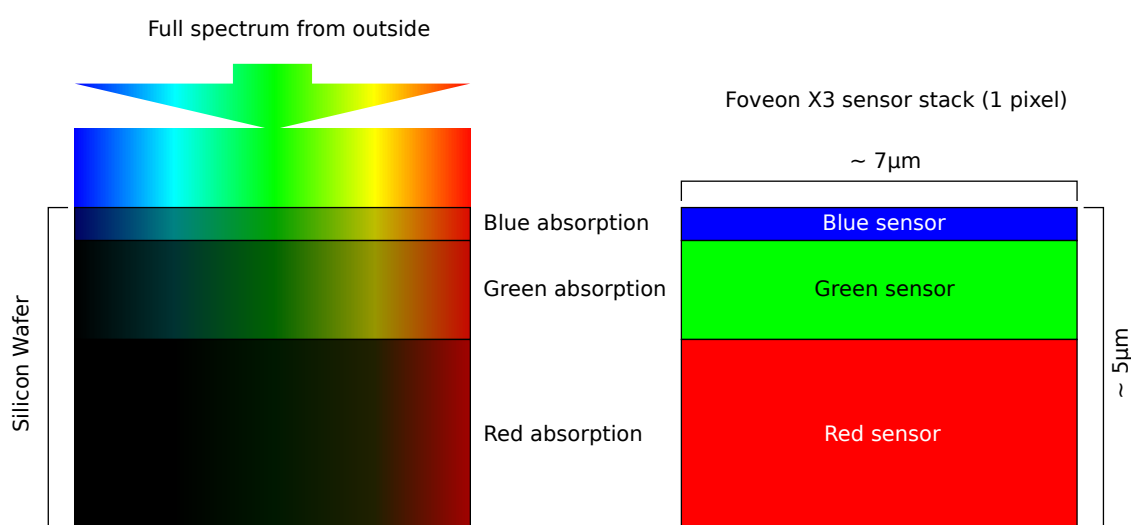


buňky [7].

Výhodou těchto senzorů jsou nižší náklady na výrobu (méně komplikovaný proces výroby, možnost integrace snímání a zpracování obrazu v jednom čipu), vyšší rychlost snímání a nižší spotřeba. Nevýhodou může být tzv. *rolling shutter* – hodnoty jednotlivých pixelů nejsou kvůli technickým limitacím snímány naráz, ale nejčastěji po řádcích či sloupcích, což u snímků rychle se pohybujících objektů umožní zkreslení způsobené prodlevami při snímání, ukázka je na obrázku 9. Technologie CCD touto vadou netrpí, ač je získání finálního snímku kvůli posuvu hodnot pro čtení pomalejší, samotný záznam intenzity světla probíhá pro všechny pixely naráz. Po dlouhou dobu byla výhodou CCD senzorů jejich schopnost snímat s nižším šumem, v posledních letech však vývoj technologie CMOS tento rozdíl vyrovnal [21].



Obrázek 9: Fotografie demonstrující efekt rolling shutter na rotoru vzlétající helikoptéry, oříznuto [9]



Obrázek 10: Ilustrace průřezu silionovým substrátem senzoru Foveon X3 [22]

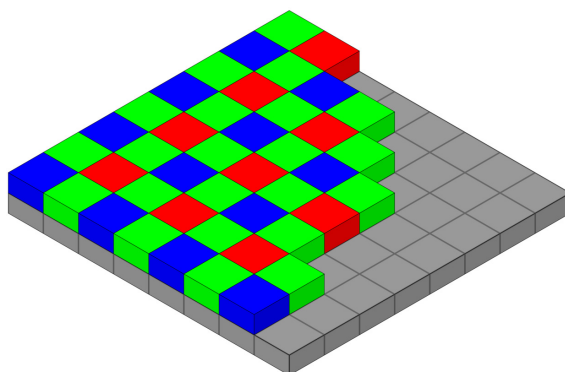
### 3.2 Snímání barev

Digitální senzory z principu snímají pouze jedinou věc – intenzitu dopadajícího světla. Barvy, tedy vlnové délky dopadajícího světla, musí být pro barevnou digitální fotografii, vyžadující tuto informaci běžně jako hodnoty intenzity červené, zelené a modré barvy, získány jinak.

Jednou z technologií je **3CCD** [1], použité v CCD senzorech profesionální fotografické techniky. Tato technologie je považována za nejpřesnější. Spočívá v použití tří senzorů pro každý pixel, dopadající světlo je systémem optických hranolů rozděleno na červenou, zelenou a modrou složku, snímánou každým senzorem zvlášť.

Další technologií je použití senzoru **Foveon X3** [18]. Tento senzor využívá vlastnost polovodičů propouštět a zachytávat různé vlnové délky světla. Každý pixel obsahuje tři fotodiody, postavené v křemíkovém substrátu nad sebe, každá z vrstev zachytává vlnové délky odpovídající jedné z barev. Ilustrace takového senzoru je na obrázku 10.

Zdaleka nejrozšířenější technologií snímání barev je **pole barevných filtrů** [14]. Spočívá v nanesení mozaiky barevných filtrů na jednotlivé pixely. To omezí rozlišení snímaných barev – každý pixel nyní snímá pouze omezenou část světelného spektra, výrazně to ale sníží náklady na výrobu. Nejrozšířenějším filtrem je Bayerův filtr, obsahující mozaiku zelených, modrých a červených filtrů v poměru 2:1:1, ukázka je na obrázku 11. Tento poměr je zvolen z důvodu přiblížení vnímání intenzit těchto barev lidským okem.



Obrázek 11: Ilustrace mozaiky Bayerova filtru na digitálním senzoru [2]

Výsledkem sejmutí obrazu za pomoci Bayerova filtru je mozaika, kde každý pixel obsahuje data jen o jedné barvě. Tyto data při následném zpracování prochází interpolací, kdy jsou chybějící barvy doplněny na základě okolního kontextu. Pro tento proces existuje velké množství algoritmů, od nejjednodušší interpolace na základě barev sousedů po komplikovanější, adaptivní procesy korelující data na celém obrázku. Tento proces má výrazný vliv na kvalitu konečné fotografie. Většina spotřebitelské elektroniky tento proces provádí automaticky, profesionální technika ale dává možnost exportovat surové data ze senzorů, čímž volbu a nastavení procesu interpolace a dalšího postprocessingu ponechává na uživateli [14].

## 4 Paprsková maticová optika

Paprsková maticová optika [8] je matematická metoda simulace optických systémů paprskovou metodou v paraxiálních prostorech. Paraxiální prostor je prostor v blízkém okolí osy optického systému, jenž je kolineární – nevznikají při zobrazování žádné vady. Je to takový prostor, kde paprsky dopadají na optické prvky pod malými úhly – platí vztah  $\sin \theta \doteq \theta$ , kde  $\theta$  je úhel paprsku

od optické osy. S narůstajícím úhlem klesá přesnost simulace, začnou se projevovat optické vady, které tato metoda nebere v potaz.

Každý prvek optického systému (volný prostor, zrcadlo, čočka či přechod mezi prostředími) je popsán 2x2 maticí a ohraničen vstupní a výstupní rovinou. Tyto roviny jsou kolmé k optické ose a určují body, ve kterých změní vlastnosti paprsku. Paprsek je popsán vektorem, jehož složky jsou úhel a vzdálenost od optické osy v průsečíku s vstupní či výstupní rovinou.

Obecně lze transformaci paprsku optickým prvkem definovat následovně:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix},$$

kde  $x_1$  a  $\theta_1$  je vzdálenost a úhel paprsku od optické osy na vstupu do optického prvku,  $x_2$  a  $\theta_2$  je vzdálenost a úhel paprsku od optické osy na výstupu z optického prvku a  $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$  je transformační matice optického prvku, kde koeficienty je možné na základě tohoto vztahu vypočítat následovně:

$$A = \left. \frac{x_2}{x_1} \right|_{\theta_1=0} \quad B = \left. \frac{x_2}{\theta_1} \right|_{x_1=0} \quad C = \left. \frac{\theta_2}{x_1} \right|_{\theta_1=0} \quad D = \left. \frac{\theta_2}{\theta_1} \right|_{x_1=0}.$$

Optický systém lze zjednodušit postupným maticovým násobením transformačních matic jednotlivých prvků, což vyústí v transformační matici celého systému.

Například, transformační matice pro prostor s konstantním indexem lomu mezi ohraničujícími rovinami se vzdáleností  $d$  je následující:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

přechodová rovnice bude vypadat následovně:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix},$$

výsledný paprsek se tedy změní takto:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + d\theta_1 \\ \theta_2 &= \theta_1. \end{aligned}$$

Dalším příkladem je vytvoření transformační matice pro tlustou čočku. V kontextu maticové paprskové optiky je tlustá čočka následující sekvence transformací:

1. lom na zahnutém přechodu okolního prostředí s indexem lomu  $n_1$  a čočky s indexem lomu  $n_2$  s poloměrem křivosti  $R_1$ ,
2. volný prostor s konstantním indexem lomu čočky o délce  $d$  (tloušťka čočky),
3. lom na zahnutém přechodu prostředí čočky s indexem lomu  $n_2$  a okolního prostředí s indexem lomu  $n_1$  s poloměrem křivosti  $R_2$ .

Transformační matice pro lom na zahnutém přechodu je  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1-n_2}{Rn_2} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$ , postupným skládáním odpovídajících matic vznikne finální přechodová rovnice pro tlustou čočku:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2-n_1}{R_2n_1} & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1-n_2}{R_1n_2} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}.$$

## 5 Závěr

V této práci byly vysvětleny principy fungování analogové a digitální fotografie. V vývoje fotografie napříč historií byly vysvětleny škodlivé optické jevy, které musely být kvůli kvalitním fotografickým výsledkům vyřešeny. Pro digitální fotografii byly probrány technologie, které umožňují sběr obrazových dat digitálně. Nakonec byla vysvětlena maticová optika za účelem simulace optického systému, jakými jsou například objektivy.

## Reference

- [1] Adept Turnkey Pty Ltd: The 3CCD colour advantage: Let the benefits speak for themselves. 2012. Dostupné z: [https://www.adept.net.au/news/newsletter/201203-mar/article\\_3ccd\\_colour.shtml](https://www.adept.net.au/news/newsletter/201203-mar/article_3ccd_colour.shtml)
- [2] Burnett, C.: A Bayer pattern on a sensor in isometric perspective/projection. 2006, CC BY-SA 3.0. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bayer\\_pattern\\_on\\_sensor.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bayer_pattern_on_sensor.svg)
- [3] Chin, P.: A block diagram of the Globe, the first successful wide angle photographic camera lens. 2010, CC BY-SA 3.0. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Globe-text.svg>
- [4] Chin, P.: A block diagram of the Zeiss Protar, the first successful anastigmat photographic camera lens. 2010, CC BY-SA 3.0. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ZeissProtar-text.svg>
- [5] Dale, B. F.: Big pinhole. 2008, CC BY-SA 3.0. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Big\\_pinhole.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Big_pinhole.svg)
- [6] Dale, B. F.: Big pinhole with lens. 2008, CC BY-SA 3.0. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Big\\_pinhole\\_with\\_lens.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Big_pinhole_with_lens.svg)
- [7] Fossum, E. R.; Hondongwa, D. B.: A Review of the Pinned Photodiode for CCD and CMOS Image Sensors. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, ročník 2, č. 3, 2014: s. 33–43, ISSN 2168-6734, doi:10.1109/JEDS.2014.2306412.
- [8] Gerrard, A.; Burch, J.: *Introduction to Matrix Methods in Optics*. Dover, 1994, ISBN 9780486680446.
- [9] Jonen: Eurocopter EC120 B Colibri (SE-JOZ) helicopter from Jämtlands Flyg AB operating out of Östersund, Jämtland, Sweden. 2007, CC BY-SA 3.0. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jamtlands\\_Flyg\\_EC120B\\_Colibri.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jamtlands_Flyg_EC120B_Colibri.JPG)
- [10] Kingslake, R.: *A History of the Photographic Lens*. Elsevier Science, 1989, ISBN 9780124086401.
- [11] Mellish, B.: Chromatic aberration of a single element convex lens. 2006, CC BY-SA 3.0. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chromatic\\_aberration\\_lens\\_diagram.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chromatic_aberration_lens_diagram.svg)
- [12] Mellish, B.: Achromatic doublet. 2010, CC BY-SA 3.0. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lens6b-en.svg>
- [13] Mellish, B.; Pbroks13: Pinhole camera. 2008. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pinhole-camera.svg>
- [14] Nakamura, J.: *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*. USA: CRC Press, Inc., 2005, ISBN 0849335450.
- [15] Needham, J.; Kuhn, D.; Ling, W.; aj.: *Science and Civilisation in China. Vol. 4: Physics and Physical Technology. Part. 1: Physics*. sv. 1, Cambridge University Press, 1962.

- [16] Peres, M. R. (editor): *The Focal Encyclopedia of Photography (Fourth Edition)*. Boston: Focal Press, 2007, ISBN 978-0-240-80740-9.
- [17] Petzval, J. M.: Bericht über dioptrische Untersuchungen. *Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftliche Classe*, ročník XXVI, 1857: s. 33–90.
- [18] Rush, A.; Hubel, P.: X3 sensor characteristics. *Journal of The Society of Photographic Science and Technology of Japan*, ročník 66, 2003: s. 57–60.
- [19] Scheufler, P.: *Historické fotografické techniky*. IPOS-ARTAMA, 1993, ISBN 80-7068-075-X, 58 s.
- [20] Schmid, M.: A convex lens with rays emitted by an off-axis object. 2008, CC BY-SA 3.0. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meridional%2BSagittalPlane.png>
- [21] Stefano, M.: CCD Vs. CMOS: Discovering The Tech Behind Today's Digital Sensors. 2023. Dostupné z: <https://www.scienceshot.com/post/cmos-vs-ccd-who-is-the-clear-winner>
- [22] wdwd: Absorption and cross section of the silicon wafer for one pixel of a Foveon X3 CMOS image sensor. 2012, CC BY-SA 3.0. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Absorption-X3.svg>