

ANALÝZA JASOVÝCH PROFILŮ PŘI EXCENTRICKÉ FOTOREFRAKCI - POROVNÁNÍ ALGORITMŮ PRO LOKALIZACI ZORNICE

T. Jindra, S. Vitek*

Katedra radioelektroniky, Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze

Abstrakt

Stanovení akomodačního stavu lidského oka metodou excentrické fotorefrakce je rychlé a nenáročné videometrické měření. Výsledky je možné využít pro hodnocení reakce akomodace očí při sledování prostorových podnětů v multimédiích nebo pro měření v očním lékařství. Důležitou součástí je analýza videometrických dat a lokalizace zornice v získaném obraze. Přesnost lokalizace zornice v obraze je zásadní podmínkou pro následnou analýzu. Časová náročnost zpracování výrazně ovlivňuje možnosti využití metody a cílem je její minimalizace při zachování vysoké přesnosti. Práce se zabývá porovnáním přesnosti lokalizace a časové náročnosti 5 různých metod segmentace obrazu – kruhová Houghova transformace, konvoluční filtrace Gaborovou vlnkou, Daugmanova metoda, gradientní metoda a algoritmus Starburst.

1 Úvod

Statické měření akomodace lidského oka je v současnosti rutinní metodou prováděnou lékaři a optometry pomocí komerčně dostupných zařízení. Měření je většinou založeno na metodě Badalova optometru s mechanicky posouvanou čočkou pro stanovení refrakce. Současné autorefraktometry využívající tento princip jsou schopné změřit refrakci v řádu desítek milisekund. Pro měření dynamiky procesu změny refrakčního stavu oka je však nutné získat data s časovým rozlišením v řádu jednotek milisekund. Z toho důvodu jsou vyvíjeny videometrické techniky s absencí pohyblivých optických prvků. V naší studii používáme metodu excentrické fotorefrakce [1], která je založena modulací měřicího svazku optickou soustavou oka a jeho obrazové analýze. Hodnocením jasových profilů zornice je možné získat informaci o aktuální refrakci oka. Současně je možné ze snímků extrahovat polohu očí, která může být využita pro sledování očních pohybů. Časová rozlišovací schopnost tohoto systému je dána pouze snímkovací rychlostí kamery a je tedy vhodná pro zkoumání rychlých dějů při změně akomodace. Zásadní částí metody je segmentace výstupního obrazu z videometrického systému. Přesnost lokalizace zornice má zásadní dopad na přesnost výsledků v případě, že jsou získaná data analyzována rovněž pro získání informace o aktuální poloze oka. Rychlost segmentace přímo ovlivňuje maximální snímací rychlost celého systému. Ideální situací metody je real-time zpracování obrazu, které je však při používaných rychlostech snímání (> 100 fps) problematické. V současnosti jsou data zpracovávána po ukončení záznamu metodou kruhové Houghovy transformace, která je díky implementaci využívající trojrozměrný akumulární prostor časově a paměťově náročná. Kompletní vyhodnocení 1000 snímků trvá průměrně 360 s, největší podíl na má právě segmentace zornice. Z toho důvodu je nutné nalézt dostatečně přesnou alternativu, která by více vyhovovala rychlostí zpracování.

2 Princip měření

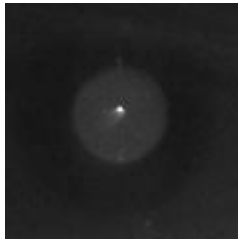
Získání kvalitních dat pro analýzu jasového profilu a vergenčního postavení očí je podmíněno přesnou lokalizací zornic v obraze. Vzhledem k pozici zdroje měřicího svazku blízko pohledové osy oka a použité vlnové délce (850 nm) se oční zornice jeví jasnější než duhovka – tzv. bright pupil. Rozhraní mezi zornicí a duhovkou je výraznější než v případě klasických metod s tmavou zornicí.

Použití jednoduchých segmentačních metod je ale vzhledem k jasovým změnám důležitým pro metodu excentrické fotorefrakce problematické a dochází k chybné interpretaci dat a nepřesnosti lokalizace rozhraní. Naším cílem bylo porovnat přesnost a rychlost možných metod segmentace zornice. Testování přesnosti algoritmů v určení polohy a rozměru zornice je nutné provádět za předem definovaných podmínek. V případě použití nativních snímků získaných měřicí aparaturou by nebylo možné relevantně posoudit odchylku výsledku hodnocení od skutečné polohy a rozměru zornice. Za tímto účelem byl vytvořen model zornice, který simuluje jevy vznikající při fotorefrakčním měření akomodace lidského oka. Výstupem je obrazová matice s přesně danými parametry generovaného obrazu, která umožňuje porovnání výsledku segmentace vstupního obrazu analyzačním algoritmem.

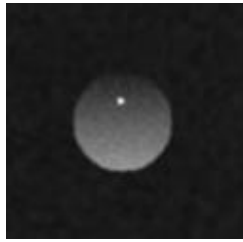
Fotorefrakční model obrazu zornice

Model fotorefrakčního jevu musí zachycovat několik typických vlastností. Hlavní z nich je jasový profil zornice vytvořený metodou excentrické fotorefrakce. Na videokameře pro záznam měřené scény je umístěn zdroj IR světla. Je složen ze sady LED ($\lambda = 850$ nm) uspořádaných do pole tvaru lichoběžníku s definovanou excentricitou vzhledem k ose kamery. V závislosti na akomodačním stavu oka se lineárně mění gradient jasového profilu zornice. Průměr zornice ovlivňuje množství celkového záření, které při měření vstoupí do očních médií a odrazí se od sítnice zpět. Výsledný jasový profil zornice je tedy určen součtem jasového gradientu a průměrného jasu. Dalším parametrem, který je nutné modelovat, je šum v obraze. Množství IR světla, které se v oku odráží a vytváří měřitelný jasový profil, je kolem 2 % dodaného výkonu. Měřicí systém používá pro záznam scén kameru AVT Prosilica GE-680 s CCD čipem KAI-0340. Jeho účinnost pro vlnovou délku $\lambda = 850$ nm je kolem 7 %. Vzhledem k povaze akomodace je nutné zajistit záznam snímací rychlostí až 100 snímků za vteřinu. Tato podmínka omezuje možnosti zvýšení citlivosti kamery prodloužením času závěrky. S ohledem na hygienické normy limitující množství IR záření, kterému může být lidské oko vystaveno, není možné zvyšovat výkon zdroje IR záření. Pro získání dat s dostatečnou dynamikou je vzhledem k výše uvedeným omezujícím vlastnostem systému nutné zvýšit vnitřní zesílení kamery, které však do obrazu zanáší rušivé artefakty.

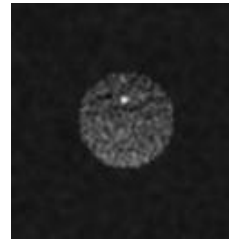
Funkce pro generování modelu zornice má 6 vstupních parametrů. Parametr určující velikost výstupní obrazové matice umožňuje testování časové náročnosti analýzy v závislosti na rozměrech obrazu. Dalším parametrem je požadovaný poloměr zornice. Při generování předpokládáme stabilní umístění zornice ve středu výstupní matice. Dále je zadána počáteční a koncová hodnota jasového profilu, kde předpokládáme jeho lineární průběh a vertikální orientaci gradientu. Šum je v modelu zornice realizován jako gaussovský pomocí funkce *imnoise*. V modelu je možné dále nastavit celkový jas pozadí a parametry přidaného šumu. Posledním parametrem je možné do modelu přidat korneální reflex vznikající odrazem světla na rozhraní vzduch - rohovka. Výsledný obraz je nakonec filtrován funkcí *fspecial* s LP gaussovským filtrem velikosti 3×3 px a $\sigma = 2$. Během testování algoritmů se mění rozptyl aditivního šumu, aby bylo možné stanovit případné limity jednotlivých detekčních algoritmů pro zašuměná data. Na následujícím obrázku je příklad skutečné zornice (Obr. 1a) a modelu zornice generovaného vytvořeným algoritmem – obr. 1b (poloměr 26 px, jasové hodnoty 30 – 150, $\sigma = 0.001$) a obr. 1c (poloměr 26 px, jasové hodnoty 50 – 90, $\sigma = 0.03$).



Obr. 1a



Obr. 1b



Obr. 1c

Většina algoritmů testovaných v této práci předpokládá tmavou zornici a světlé okolí. Proto byly některé z nich upraveny pro možnost detekce světlé zornice a tmavšího okolí. Původní implementace metod však byla mimo této úpravy zachována, aby bylo možné jejich porovnání v provedení podle autorů. V průběhu testování byly pro každý algoritmus generovány modelové obrazy zornice s konstantními hodnotami rozměrů a jasového profilu. Průběžně se však měnila úroveň aditivního šumu v rozmezí $\sigma = 0 - 0.03$ s krokem 0.002.

3 Hodnocené metody

K hodnocení bylo vybráno 5 metod s odlišným způsobem segmentace obrazu. První a široce užívanou metodou je kruhová Houghova transformace implementovaná ve funkci Matlabu *imfindcircles* [2,3,4]. Nevýhodou této metody může být nutnost velkého počtu iterací pro hledané útvary s více parametry s dopadem na časovou náročnost v případě nevhodné implementace. Dalšími hodnocenými metodami jsou Daugmanův integro-diferenciální algoritmus [5], metoda gradientních obrazů ve spojení s detekcí kruhových útvarů pomocí RANSAC [6], prstencová Gaborova konvoluční filtrace [7] a algoritmus Starburst [8]. Implementace uvedených metod byly převzaty z původních zdrojů, případně upraveny pro funkci v režimu „bright pupil“.

Kruhová Houghova transformace

Kruhová Houghova transformace (Circular Hough Transform – CHT) je metoda vyhledávající kruhové objekty ve vstupním obraze. CHT je speciální aplikací obecné Houghovy transformace používané hlavně pro detekci rovinných útvarů. Funkce CHT je založena na vyhledávání maximální shody hodnoceného obrazu s předlohou, v našem případě s kružnicí. Algoritmem je sestavena hlasovací matice, tzv. akumulární prostor, kde jsou uchovávány hodnoty popisující míru shody obrazu s předlohou pro jednotlivé body obrazu a parametry hledaného útvaru. Výsledná hodnota je poté určena hledáním lokálního maxima akumulárního prostoru. V případě detekce kružnice je nutné v akumulárním prostoru uchovávat nejen informaci o poloze, ale i o vhodném poloměru kružnice. Algoritmus v tomto případě vytváří 3D akumulární prostor (namísto 2D v případě detekce přímky) a zvyšují se jeho časové i paměťové nároky. Implementace CHT je nově zařazena v Image Processing Toolbox v Matlab 2012a jako funkce *imfindcircles*. Pro snížení nároků na běh funkce jsou implementovány modifikace „Two-stage“ a „Phase-Coding“, které vytváří pouze 2D akumulární prostor. Pro segmentaci obrazu z excentrické fotorefrakce byla použita funkce *imfindcircles* s fázovým kódováním a citlivostí 0,95.

Gaborův filtr

Metoda detekce kruhových objektů pomocí Gaborova prstence je založena na konvoluční filtraci obrazu pomocí modifikované Gaborovy vlnky. V obrazové analýze jsou Gaborovy vlnky používány například v texturní analýze nebo při rozpoznávání objektů. Jejich popularita v oblasti strojového vidění pramení především z přirozené podstaty funkce, která je velmi podobná receptivnímu poli v primárních zrakových centrech mozku savců. Jádru konvolučního filtru je navrženo podle vztahu

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma r_0} e^{-\pi \left[\frac{(r-r_0)^2}{\sigma^2} \right]} e^{i[2\pi f_0(r-r_0)]},$$

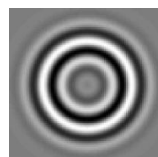
kde

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2},$$

σ označuje směrodatnou odchylku Gaussovské obálky a r_0 je poloměr prstence. Druhý exponent je komplexní rovinná vlna s frekvencí f_0 ve směru vlny. (x_0, y_0) udává souřadnice středu filtru v prostoru. Příklad jádra filtru je na obr. 2a (reálná část) a 2b (imaginární část).



Obr. 2a – reálná část filtru



Obr. 2b – imaginární část filtru

Daugmanova metoda

Daugmanův integro-diferenciální operátor byl navržen k lokalizaci vnitřního a vnějšího okraje duhovky. Funkce předpokládá, že zornice a duhovky jsou kruhové útvary a chová se jako kruhový hranový detektor. Úpravou parametrů je možné realizovat také detekci horního a dolního očního víčka. Funkce je popsána vzorcem

$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left| G_\sigma(r) * \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r, x_0, y_0} \frac{I(x, y)}{2\pi r} ds \right|,$$

kde $I(x, y)$ je analyzovaná obrazová matice. Integro-diferenciální operátor hledá maximum parciální derivace s ohledem na poloměr r v normalizovaném křivkovém integrálu $I(x, y)$ podle oblouku ds s poloměrem r a souřadnicemi (x_0, y_0) .

$$G_\sigma(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(r-r_0)^2}{2\sigma^2}}$$

Gradientní metoda

Gradientní metoda použitá v [6] slouží k extrakci zájmových oblastí z obrazu získaného metodou excentrické fotorefrakce. Spočívá ve výpočtu gradientního obrazu snímku ve směru osy x a y a následném výpočtu magnitudy podle vzorce

$$G(x, y) = \sqrt{(I(x, y) - (I(x - 1, y)))^2 + (I(x, y) - I(x, y - 1))^2},$$

kde $I(x, y)$ jsou body vstupního obrazu a $G(x,y)$ je výstupní gradientní obraz. Získané kandidátní body předpokládané hrany zornice jsou dále zpracovány algoritmem RANSAC, který určí jejich příslušnost k hledanému kruhovému útvaru.

Metoda Starburst

Vyhledávání kruhových objektů metodou Starburst kombinuje podobně jako gradientní metoda detekci možných bodů hrany zornice a metodu RANSAC pro výpočet parametrů optimální kružnice pro kandidátní body. Rozdíl je však ve způsobu určení kandidátních bodů. Detekce je založena na analýze jasových profilů podle zvolených přímek v obraze. Z předem určeného nebo náhodně zvoleného bodu je veden omezený počet přímek v rozsahu plného úhlu. Ve směru přímek je určena derivace pro každý bod a z výsledné funkce jsou prahováním vybrány možné body hrany zornice-duhovka. Z každého získaného bodu je poté vedeny zpětné paprsky do ostatních bodů, které jsou vyhodnoceny stejným způsobem. Poloha těžiště nalezených bodů postupně konverguje ke středu zornice a v konečné skupině kandidátních bodů je tak omezeno množství bodů ležících mimo hledanou hranu. Získané body jsou dále zpracovány metodou RANSAC upravenou pro detekci kruhových objektů.

4 Výsledky hodnocení

Každý algoritmus popsaný v kap. 3 byl testován na sadě modelových obrazů s proměnlivým rozptylem aditivního šumu. Výsledkem jsou hodnoty průměrné velikosti odchylky stanovené polohy a poloměru zornice na hodnoceném modelu a průměrná hodnota časové náročnosti procesu. Při testování zůstala implementace autorů v maximálně původní podobě pouze se změnami, které se týkají úpravy jasové polarizace detekované hrany. Většina algoritmů totiž předpokládá situaci, kde je zornice tmavší než duhovka. V tabulce 1 je přehled výsledných hodnot pro model 1 (velikost obrazu 220×170 px, průměr zornice 26 px, jasový profil zornice 30 – 150, rozptyl šumu $\sigma = 0 - 0.03$), v tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty pro model 2 (velikost obrazu 220×170 px, průměr zornice 26 px, jasový profil zornice 50 – 90, rozptyl šumu $\sigma = 0 - 0.03$).

metoda	chyba lokalizace	chyba poloměru	čas
CHT	0,599 px	0,021 px	0,074 s
Gabor	0,901 px	-	1,040 s
Starburst	4,214 px	3,757 px	0,399 s
Daugman	0,583 px	0,289 px	1,623 s
Gradient	4,544 px	4,191 px	0,094 s

Tab. 1 – výsledky hodnocení modelu 1

metoda	chyba lokalizace	chyba poloměru	čas
CHT	0,854 px	0,325 px	0,041 s
Gabor	0,615 px	-	1,032 s
Starburst	6,101 px	5,254 px	0,349 s
Daugman	0,401 px	0,440 px	2,374 s
Gradient	4,103 px	3,633 px	0,082 s

Tab. 1 – výsledky hodnocení modelu 2

Z výsledků hodnocení modelů zornice lidského oka je patrné, že nejlepších parametrů dosahuje metoda kruhové Houghovy transformace použitá ve funkci *imfindcircles*. Obdobnou přesnost má i Daugmanova metoda, její časová náročnost je však řádově vyšší. Stejná situace je u konvoluční Gaborovy filtrace. Pro zachování původní implementace autorů však nebyla k metodě doplněna funkce pro detekci poloměru nalezené kružnice. Vyšší chybovost byla zjištěna u metod používajících algoritmus RANSAC (Starburst a gradientní metoda). Časová náročnost gradientní metody je však obdobná jako u metody CHT.

5 Závěr

Excentrická fotorefrakce je přístrojově nenáročnou metodou pro určení refrakčního stavu lidského oka. Hlavním účelem článku bylo prověřit vhodnost různých metod pro segmentaci fotorefrakčního obrazu. Chybovost segmentačních algoritmů má zásadní vliv na celkovou přesnost systému. Dalším důležitým parametrem je časová náročnost vyhodnocení. Pro možnost real-time měření je nutné minimalizovat dobu trvání segmentace obrazu. Výsledná chybovost metody CHT (funkce *imfindcircles*) a její minimální časová náročnost funkci jsou pro použití v hodnocení obrazů excentrické fotorefrakce ideální volbou. V příštích testech algoritmů se zaměříme také na zpřesnění výsledku gradientní metody, která má obdobnou časovou náročnost.

6 Poděkování

Tato práce byla podpořena výzkumným grantem SGS 13/082/OHK3/1T/13

7 Reference

- [1] Schaeffel, F., Wilhelm, H., & Zrenner, E. (1993). Inter-individual variability in the dynamics of natural accommodation in humans: relation to age and refractive errors. *The Journal of Physiology*, 461(1), 301-320.
- [2] H.K Yuen, .J. Princen, J. Illingworth, and J. Kittler. "Comparative study of Hough transform methods for circle finding." *Image and Vision Computing*. Volume 8, Number 1, 1990, pp. 71–77.
- [3] E.R. Davies: *Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*. Chapter 10. 3rd Edition. Morgan Kaufman Publishers, 2005
- [4] Dokumentace funkce *imfindcircles*: Image Processing Toolbox, Matlab 2013b. MathWorks [online]. 2013 [cit. 2013-10-22]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/images/ref/imfindcircles.html?searchHighlight=imfindcircles>
- [5] Daugman, J.. How iris recognition works. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 14(1), 21-30, 2004
- [6] Suryakumar, R., Kwok, D., Fernandez, S., & Bobier, W. R. (2009). Dynamic photorefraction system: An offline application for the dynamic analysis of ocular focus and pupil size from photorefraction images. *Computers in Biology and Medicine*, 39(3), 195-205.
- [7] A. Rhodes and L. Bai. Circle Detection Using a Gabor Annulus. Proceedings of the 22nd British Machine Vision Conference. Dundee, UK, 2011
- [8] Li, D., & Parkhurst, D. J. Starburst: A robust algorithm for video-based eye tracking. *Elsevier Science*, 2005

*) Kontaktní informace: Mgr. Tomáš Jindra, jindrto3@fel.cvut.cz, Kat. radioelektroniky, FEL ČVUT