

Analýza parametrů měřených křivek akomodace avergence oka v programu MATLAB

Václav Baxa, Jaroslav Dušek*, Miroslav Dostálek***

**Katedra radioelektroniky, FEL ČVUT Praha*

***Oční oddělení, Nemocnice, Litomyšl*

Abstrakt

Práce se zabývá analýzou primárních výsledků měření očních synkinetických reakcí (akomodace avergence oka) zaznamenaných videosekvencí užitím metod excentrické fotorefrakce (akomodace) a polohy I. Purkyňova obrazu vzhledem ke středu čočky oka (vergence). předmětem práce je normování a extrakce ukazatelů odpovědí. Výsledkem je grafická prezentace průběhů reakce a hodnoty popisující jejich dynamiku a kinematiku jak celkovou, tak v příslušných fragmentech odpovědí. Dále jejich příprava pro statistické zpracování, umožňující včasnou diagnostiku strabizmu malých dětí.

Úvod

Analyzátor očních pohybů a akomodace E.M.A.N. je komplexní a jednoúčelová videometrická aparatura vytvořená pro záznam a analýzu vergenčně akomodační synkinézy (VAS) u nejmenších dětí. Základním prvkem systému je řídicí počítač s měřicí kamerou. K počítači je také připojen uzavřený televizní okruh fixačních monitorů, který stimuluje pacientovy oční reakce. Relativně samostatnou součástí aparatury je uzavřený televizní okruh pro sledování obličeje měřeného dítěte. Poměr akomodace a konvergence je dán jejich geometrickým umístěním v prostoru. Během záznamu velmi rychlou kamerou (360 fps) je pacient osvětlen měřicím infračerveným zdrojem světla. Toto světlo je voleno v infračervené oblasti proto aby nerozptylovalo pacientovu pozornost. Obrazová analýza se skládá z několika kroků zpracování zaznamenaných videosekvencí. Tato část je podrobně popsána např. v [1, 2]. Výstupem této analýzy je nenormovaný průběh primární akomodace avergence nazývané též dukce.

Následuje matematická úprava primárních měření dukce a akomodace. Smyslem této fáze je upravit jednotlivá měření akomodace a dukce pořízená (primární) obrazovou analýzou snímků z měřicích videosekvencí. Cílem je přiřadit každému snímku čas měření a relativní hodnotu dukčního postavení α [°] a absolutní hodnotu refrakčního stavu A [D]. Výsledkem této fáze je sestavení sekvenčních řad měření α a A. Dále je vytvořen graf VAS, který z jednotlivých měření rekonstruuje dynamiku dukce a akomodace.

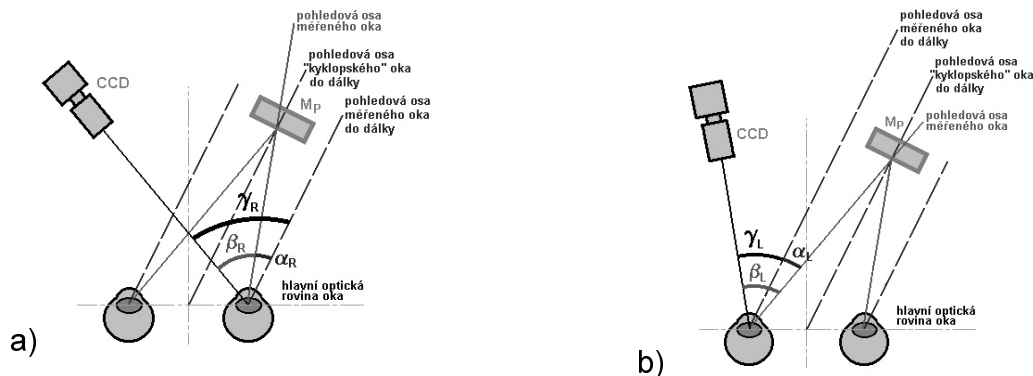
Poslední částí je extrakce ukazatelů dynamiky dukce a akomodace. Smyslem této fáze je získat číselné hodnoty ukazatelů, které vyjadřují základní vlastnosti dynamiky měřených dějů VAS. Cílem je stanovit latenci odpovědi, popsat kinematiku a dynamiku úvodního (iniciálního) a následného (konsekventního) segmentu odpovědi. Samostatná pozornost je věnována preiniciálnímu segmentu odpovědi a sakadickému podílu na vergenční reakci (analýza fragmentů odpovědi).

Teoretická část

Matematická úprava primárních měření dukce

Měřený úhel dukce je úhel který svírá pohledová osa s osou objektivu videorefraktoru (v obr. 1, 2 označen β). Lze jej vypočítat jako součin vzdálenosti mezi geometrickým středem prvního Purkyňova obrazu (corneální reflex) a středem zornice a tzv. Hirschbergovým

koeficientem. Hirschbergův koeficient vyjadřuje o kolik milimetrů se posune corneální reflex při dukci oka o jeden stupeň. Dalším krokem je převedení měřeného úhlu dukce na standardizovaný úhel dukce (v obr. 1, 2 označen α), který je definován jako úhel mezi pohledovou osou a pohledovou osou oka do dálky. Pohledová osa oka do dálky je rovnoběžná s pohledovou osou „kyklopského“ oka procházející středy fixačních monitorů M_D a M_P . Vzorce pro přepočítání β na α jsou různé pro pravé a levé oko jak vyplývá z obr. 1. Pro přepočítání je významný úhel, který svírá osa objektivu s pohledovou osou měřeného oka do dálky. Tento úhel odklonu kamery označujeme γ a byl určen empirickým měřením pro standardní polohu hlavy.



Obrázek 1: Prostorové vztahy měřených očí, měřící kamery a fixačních monitorů v horizontální rovině (zobrazeno v horizontální rovině shora) a) pravé oko, b) levé oko.

Vzorec pro výpočet měřeného úhlu dukce je $\beta_s = PIR_s * K * H$,

- kde β měřený úhel dukce na snímku s [°],
 PIR vzdálenost středu corneálního reflexu a středu zornice na snímku s [px],
 H Hirschbergův index [°/mm],
 K konverzní faktor [mm/px],
 s pořadové číslo snímku [-].

Vzorec pro standardizovaný úhel dukce při měření pravého oka je $\alpha_{Rs} = \gamma_R - \beta_{Rs}$ pro pravé, resp $\alpha_{Ls} = \beta_{Ls} - \gamma_L$ pro levé oko. Hirschbergův index je individuálně různý a je závislý na vzdálenosti otočného bodu oka a středu zakřivení přední plochy rohovky (v horizontálním meridiánu při měření v horizontální rovině). Pro obtížnost výpočtu individuální hodnoty Hirschbergova indexu kalibrujeme jeho velikost pro každou sekvenci individuálně. Poslední procedurou při výpočtu dynamiky dukce je matematická kompenzace rozdílu skutečné polohy hlavy probanda a ideální polohy hlavy, kdy koinciduje pohledová osa kyklopského oka do dálky a osa fixačních monitorů. Skutečná poloha hlavy není monitorována. Kompenzace je provedena pouze zjednodušeně, posunutím (transpozicí) celé řady měření tak, aby průměrná hodnota prvních 40 měření skutečné dukce mělo hodnotu odpovídající teoretické velikosti vergence do blízka, resp. do dálky. Transpoziční koeficient který se přičítá ke každé naměřené hodnotě je výsledkem výpočtu:

$$T = \frac{\sum_{s=1}^{40} \alpha_s}{40} - \alpha_D, \text{ kde } \alpha_D \text{ je teoretická velikost vergence.}$$

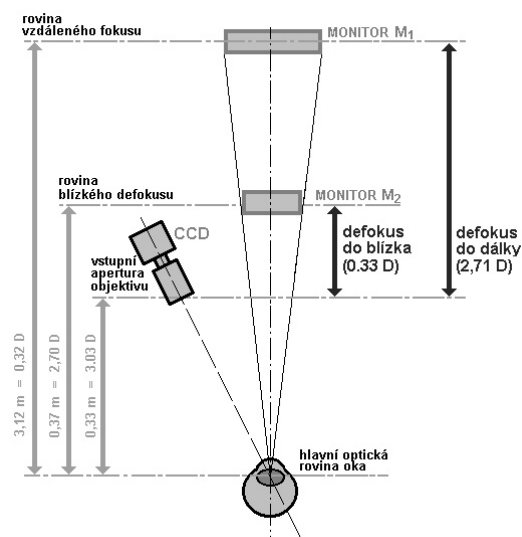
Matematická úprava primárních měření akomodace

Smyslem této procedury je přiřadit naměřeným hodnotám sklonu vertikálního jasového profilu hodnotu v dioptriích. Tato dioptrická hodnota vyjadřuje převrácenou hodnotu axiální vzdálenosti mezi rovinou fokusu oka a rovinou parciální clony před aperturou objektivu měřící kamery (videorefraktoru). Východiskem pro konstrukci kalibrační

přímky je sklon jasového profilu a_{1D} (z grafické analýzy viz. [1]) při fixaci vzdáleného fixačního monitoru M_D (defokus do dálky $d_D = 2,71 D$, viz obr. 2) a sklon jasového profilu a_{1P} při fixaci blízkého fixačního monitoru M_P (defokus do blízka $d_P = 0,33 D$, viz obr. 2). Vzorec pro přepočítání a_{1s} na dioptrickou hodnotu defokusu d_s je:

$$d_s = \frac{(a_{1s} - a_{1p}) * (d_d - d_p)}{(a_{1d} + a_{1p})} + d_p ,$$

kde d dioptrická hodnota defokusu [D],
 a_{1s} sklon jasového profilu [-],
 a_{1D} sklon jasového profilu při fixaci vzdáleného monitoru [-],
 a_{1P} sklon jasového profilu při fixaci blízkého monitoru [-],
 d_D defokus do dálky [D],
 d_P defokus do blízka [D],
 s pořadové číslo snímku [-].



Obr 2: Rozpětí akomodace při sledování fixačních monitorů.

Vzorec pro přepočítání velikosti defokusu na absolutní velikost akomodace A je: $A_s = 3,03 - d$. V případě, že z grafické interpretace dynamiky odpovědi plyne pochybnost, že dítě nesprávně fixovalo výchozí monitor je taková sekvence vyřazena z výpočtu.

Analýza odpovědí

Matematicky upravená sekvenci řada hodnot dukce a hodnot akomodace budou nyní považovány za funkce. Prvním krokem zpracování obou funkcí je jejich konvoluce průměrkovaná přes jednoho souseda:

$$\alpha(t)_k = \frac{\sum_{v=-L_k}^{L_k} \alpha(t+v)}{(2 * L_k) + 1} ,$$

kde

$\alpha(t)_k$ konvoluce funkce $\alpha(t)$ [°],
 L_k polovina šířky konvolučního okna [-],
 t čas snímku [s],
 v vzdálenost bodu okolí [-].

Cílem tohoto kroku je eliminace šumových oscilací. Následuje aplikace zobecněné diference, která (na rozdíl od klasické diference) eliminuje nespojitosti křivky započtením vlivu hodnot okolních bodů podle nastavené šířky váhovacího okna. Zobecněnou diferenci lze matematicky vyjádřit:

$$\alpha(t)_{kd} = \frac{\sum_{v=-L_d}^{L_d} \alpha(t+v)_k}{\sum_{v=-L_d}^{L_d} v^2}$$

kde

| | |
|------------------|--|
| $\alpha(t)_{kd}$ | diference funkce $\alpha(t)_k$ [°/s], |
| L_d | polovina šířky váhovacího okna [-], |
| t | čas snímku [s], |
| v | vzdálenost bodu okolí a jeho váha [-]. |

Tato funkce je ekvivalentní rychlosti dukce, resp. akomodace. Dalším krokem je další aplikace zobecněné diference. Tato funkce je ekvivalentní zrychlení dukce, resp. akomodace.

Podle hodnot největšího zrychlení funkcí určíme latenci dukčních a akomodačních odpovědí. Latence odpovědi je čas, který uplyne od podnětu do začátku reakce. A hodnota největšího záporného zrychlení určí konec iniciálního segmentu.

Po separaci preiniciálního, iniciálního a následného segmentu dukčních a akomodačních odpovědí vypočítáme velikost, rychlost, maximální rychlost a časovou konstantu (čas dosažení 60% maximální hodnoty) iniciálního segmentu. U dukční křivky maximální rychlost určí jde-li o fázický či tónický průběh reakce. V inicializačním a následném segmentu dále provedeme fragmentaci dukční a akomodační odpovědi prostřednictvím lokalizace deflexních bodů, ve kterých dochází ke zlomu kinematiky nebo dynamiky funkcí. U každého fragmentu iniciálního segmentu vypočteme jeho příspěvek v iniciálním segmentu a jeho průměrnou rychlost.

Analýza následného segmentu odpovědí určí parametr nestability následného segmentu.

Parametr nestability (undulace) U je konstruován tak, aby numericky vyjadřoval míru nestability dosaženého stupně reakce. Parametru U vyjadřuje míru v jaké se v následném segmentu objevuje reakce opačného směru („od cíle“) než je účelné („k cíli“). Číselná hodnota parametru U je tím větší čím častěji se v záznamu odpovědi objeví inverze směru odpovědi. Výpočet provedeme podle vzorce:

$$U = \frac{\sum_{s=S_{NA}}^{S_{max}} A_{kd}(s)}{s_{max} - s_{NA} + 1},$$

kde

| | |
|-----------|--|
| U | parametr nestability (undulace) následného segmentu [D/s], |
| s | pořadové číslo snímku [-], |
| S_{max} | pořadové číslo posledního snímku měřící sekvence [-], |
| S_{NA} | pořadové číslo následného snímku měřící sekvence [-]. |

V případě dukční funkce nejsou do analogického výpočtu vzaty ty fragmenty reakce, jejichž maximální rychlost je rovna nebo větší 20 °/s. Při vypouštění fragmentu z výpočtu se vypouští celý fragment mimo druhého (pozdějšího) deflexního bodu. Pro rychlost reakce rovno nebo větší 20°/s určíme sakadický (fázický) podíl na dukční odpovědi. Sakadické složky dukční reakce mají dynamiku odlišnou od zbývajících tonických pohybů. Pro analýzu funkce

sakadických fragmentů zavádíme parametry sakadická dráha a sakadický příspěvek. Pro možnost komparace těchto parametrů u měřicích sekvencí pořízených za různých okolností je nezbytná znaménková konvence při jejich výpočtu.

Parametr sakadická dráha SD je definován jako součet absolutních hodnot všech fragmentů dukční reakce jejichž maximální rychlost je > 20 °/s.

Parametr sakadický příspěvek SP je definován jako součet hodnot (se zachováním znaménkové konvence) všech fragmentů dukční reakce jejichž maximální rychlost je > 20 °/s.

Analýza byla realizována v programovém prostředí MATLAB.

Výsledky

Výsledkem obrazové analýzy jsou normované grafy průběhu synkinetických reakcí (akomodace a konvergence) v závislosti na čase (obr. 3). V grafu jsou vodorovnými čarami vyznačené teoretické maximální meze rozsahu průběhu odpovědi synkinetické reakce. Jeli průběh zcela mimo tyto meze je vyřazen z dalšího statistického zpracování. Silné svislé čáry udávají latenci (první čára) a konec iniciálního segmentu. Časová hodnota latence a velikost iniciálního segmentu je uvedena pod průběhy zvláště pro akomodační křivku a dukční křivku. Z fyziologického důvodu musí být latence dukční odpovědi dříve než latence akomodační. Tenká svislá čára v iniciálním segmentu označuje fragment (inflexní bod), jeho příspěvek v procentech a průměrná rychlost je číselně zobrazen. Tenké svislé čáry v postiniciálním segmentu u dukční odpovědi ukazují sakadické fragmenty.

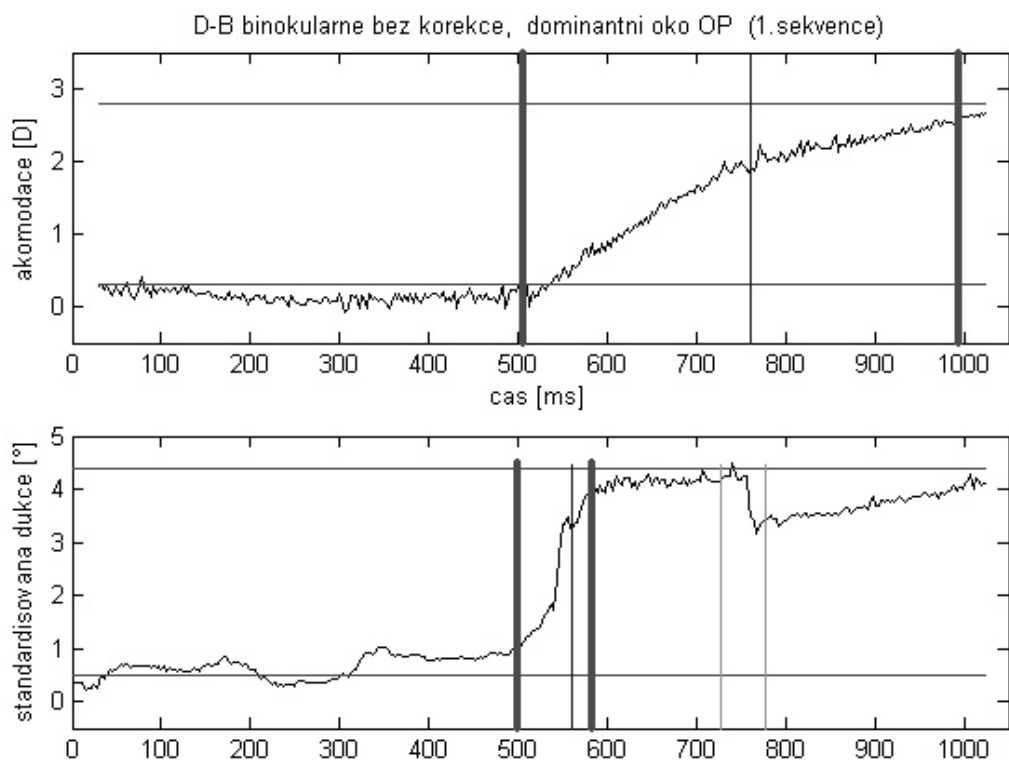
V nadpisu je uvedeno jméno a rodné číslo pacienta. Pod jménem je zobrazeno jde-li o měření z dálky do blízka (D-B), či z blízka do dálky (B-D), monokulárně - binokulárně s korekcí – bez korekce. Je-li měřené dominantní oko pravé (OP), nebo levé (OL) a číslo snímané sekvence.

Pod VAS grafy je dále uvedeno zvláště pro akomodaci a dukci zda byl průběh použit pro kalibraci všech naměřených sekvencí, jde-li u dukční křivky o fyzický či tónický průběh. Maximální a průměrná rychlost iniciálního segmentu, časová konstanta, počet fragmentů v iniciálním segmentu a dosažená procentuální velikost vzhledem k teoretické maximální hranici. Poslední údaj je velikost undulace a u dukční odpovědi velikost sakadické dráhy (SD) a sakadického příspěvku (SP).

Výsledkem je také datový soubor obsahující všechny tyto hodnoty, použitý při statistickém zpracování výsledků.

Závěr

V současné době se popsaná obrazová analýza a celý snímací systém se používá pro klinické studie na ortoptickém oddělení nemocnice Litomyšl. Byla provedena měření a obrazových analýz s více než sto zdravými a nemocnými pacienty. Na základě získaných výsledků se provádí klasifikace jednotlivých průběhů k očním vadám a zpřesňování metody výpočtů.



Akomodace

Pouzito pro kalibraci : ANO
 Latence : 507 ms
 linic. segment: delka 489 ms, rychl. [D/s] 4.84
 Casova konst.: 225 ms Max. rychl. [D/s] 29.7
 1. frag.: pris. 64 proc, rychlost [D/s] 6.46
 2. frag.: pris. 28 proc, rychlost [D/s] 3.07
 Inic. segment 93 proc Pocet frag. : 2

Vergence

Pouzito pro kalibraci : ANO Fazický prubeh
 Latence : 501 ms H = 15 %/mm T = 7.46
 linic. segment: delka 82 ms, rychl. [%/s] 36.9
 Casova konst.: 49 ms Max. rychl. [%/s] 306
 1. frag.: pris. 67 proc, rychlost [%/s] 38.3
 2. frag.: pris. 20 proc, rychlost [%/s] 33.1
 Inic. segment 88 proc Pocet frag. : 2

Velikost undulace : 0

Undulace : 0 SD : 112 proc SP : 67 proc

Obrázek 3: Výsledek analýzy.

Literatura

- [1] Dušek, J.: Diplomová práce E. M. AN. (Eye Movement Analyzer)–softwarové řešení, Praha 2001, 66 s
 [2] Hromádka Z.: Diplomová práce E. M. AN. (Eye Movement Analyzer)–hardwarové řešení, Praha 2001

Poděkování

Tato práce byla podporována výzkumným záměrem Č.21000012 a částečně grantem GAČR No. 102/00/1494.

Kontaktní adresy

baxav@fel.cvut.cz, xdusekj@feld.cvut.cz, dostalek@lit.cz