

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA OPTIKY

KONTUROVÁ INTERAKCE PŘI DISPARÁTNÍM ZOBRAZENÍ KONTUR

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Klára Hesounová

Obor 5345T008 Optometrie

Školní rok 2023/2024

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

doc. RNDr. František Pluháček, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením doc. RNDr. Františka Pluháčka, Ph.D., za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne 17. 4. 2024

.....

Bc. Klára Hesounová

Poděkování

Chtěla bych srdečně poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. RNDr. Františku Pluháčkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, doporučení a drahocenný čas, který mi věnoval.

Velké poděkování patří také mým rodičům, kteří mi poskytli podporu a prostředky pro studium. V neposlední řadě bych ráda poděkovala Bc. Nikol Valentové, Bc. Stele Levické a Bc. Magdaléně Wanecké za jejich přátelství, pomoc a podporu během studia.

Tato práce byla vytvořena za podpory projektů IGA PřF UP v Olomouci s názvem “Optometrie a její aplikace“, č. IGA_PrF_2023_004 a IGA_PrF_2024_019.

Obsah

| | |
|---|----|
| 1 Úvod do zrakové ostrosti a binokulárního vidění..... | 6 |
| 1.1 Zraková ostrost..... | 6 |
| 1.2 Měření zrakové ostrosti a optotypy | 7 |
| 1.3 Úvod do binokulárního vidění | 10 |
| 1.3.1 Senzorické aspekty BV..... | 11 |
| 1.3.2 Stereopse..... | 12 |
| 1.3.3 Stereoskopická paralaxa, stereoskopický práh..... | 12 |
| 1.3.4 Stereoskopy | 13 |
| 2 Crowding a konturová interakce..... | 18 |
| 2.1 Vliv excentricity stimulu na CI a CW | 20 |
| 2.2 Vysvětlení mechanismů CI a CW | 22 |
| 2.3 CI a CW při prostorovém zobrazení flankerů..... | 24 |
| 3 Experimentální část..... | 27 |
| 3.1 Metodika | 27 |
| 3.1.1 Subjekty | 27 |
| 3.1.2 Stimul..... | 28 |
| 3.1.3 Postup měření..... | 29 |
| 3.1.4 Analýza dat..... | 32 |
| 3.2 Výsledky | 33 |
| 3.4 Diskuse | 40 |
| Závěr | 42 |
| Seznam použité literatury | 44 |

Úvod

Vznik lidského zrakového vjemu představuje komplikovaný proces, na kterém se podílí řada složek. Základní podmínkou je vytvoření kvalitního obrazu na sítnici, který zajišťuje optická složka. Optický obraz je následně přeměněn na nervové vzruchy a tento tzv. neurální obraz je veden zrakovou dráhou do zrakového centra v mozku. Ke zpracování vzruchů dochází jak ve zrakovém centru, tak částečně i v průběhu celé zrakové dráhy. Navíc při zpracování neurálního obrazu dochází při normálním binokulárním vidění ke kombinaci vjemů z obou očí. V důsledku vytvoření optického obrazu a následného komplikovaného zpracování obrazu neurálního, dochází k řadě jevů, které mohou ovlivnit výsledný zrakový výkon. Je obecně známo, že pokud se v blízkosti pozorovaného znaku nachází jiné objekty nebo znaky, dochází ke změně zrakového výkonu, obvykle k jeho zhoršení, a tudíž také k odpovídající změně zrakové ostrosti. To platí jak pro centrální vidění, tak pro periferii zorného pole. Tomuto jevu obecně říkáme crowding. Naopak k nejlepšímu rozlišení dochází v případě pozorování izolovaných objektů, znaků či písmen. Pokud je pozorovaný objekt obklopený jednoduchými konturami, jedná se speciálně o tzv. konturovou interakci, která představuje jednodušší a lépe popsateľný jev. Jelikož se oba jevy projevují jak při monokulárním, tak binokulárním vidění, můžeme se s nimi setkat v běžném životě ať už při čtení písmen na optotypu, řízení nebo při jakékoliv jiné zrakové interakci s okolím.

Cílem teoretické části práce bylo popsat základní mechanismy crowdingu a především konturové interakce, které jsou nutné pro pochopení těchto jevů a porozumění následné experimentální části. V běžném životě je zrakový stimul tvořen většinou prostorově rozmístěnými objekty. Proto bude pozornost také zaměřena na binokulární aspekty obou jevů. Část práce tak bude cílit i na problematiku binokulárního vidění a popisu zařízení vhodných ke studiu těchto jevů za binokulárních podmínek. V rámci experimentu pak bude sledován vliv prostorového rozložení kontur s cílem vyhodnotit dopad tzv. disparátního zobrazení na konturovou interakci při různých pozicích kontur. S ohledem na předchozí práce zaměřené na periferní crowding očekáváme oslabení interakce za studovaných stereoskopických podmínek.

1 Úvod do zrakové ostrosti a binokulárního vidění

Zraková ostrost a metody jejího měření jsou často využívány při studiu crowdingu a konturové interakce, současně se tyto jevy do měření zrakové ostrosti významně promítají. V našem experimentu bude sledována konturová interakce za binokulárních podmínek. Následující text proto uvádí do problematiky zrakové ostrosti a binokulárního vidění.

1.1 Zraková ostrost

Zraková ostrost je jedním z obvyklých a základních parametrů, který využíváme pro zhodnocení zraku. Mezi další podstatné parametry, nutné pro vytvoření komplexního přehledu o stavu zraku, patří zejména informace o rozsahu zorného pole, o barvocitu nebo kontrastní citlivosti. Zraková ostrost závisí na řadě faktorů, např. na refrakčním stavu oka, transparentci optického prostředí, rozlišovací schopnosti optické soustavy oka a na stavbě sítnice, zejména na rozložení a funkci čípků. Také závisí na stavu zrakového nervu a funkci zrakového korového centra. Dalším podstatným faktorem je poloha pozorovaného objektu vůči oku, tj. zda se nachází v centru zorného pole či v jeho periferii. Přitom nejvyšších hodnot dosahuje v centrální oblasti, směrem do periferie klesá. Zraková ostrost může být také ovlivněna okolím pozorovaného objektu, které může obsahovat další objekty podobného nebo odlišného charakteru, jejichž přítomnost ji může (většinou negativně) ovlivnit právě ve formě konturové interakce a crowdingu. Číselně můžeme zrakovou ostrost charakterizovat příslušnou prahovou hodnotou, jejíž povaha se odvíjí od typu zrakové ostrosti. (Tunnacliffe 1993, Benjamin 2006)

Zrakovou ostrost lze popsat z různých úhlů pohledu, a to jako detekční, rozlišovací, noniovou či identifikační. Detekční zraková ostrost popisuje schopnost detekovat (zjistit) přítomnost stimulu a udává se prahovou velikostí sledované charakteristiky podnětu (např. jasu, při kterém je podnět právě detekován). Rozlišovací (úhlovou) zrakovou ostrost můžeme popsat jako nejmenší úhlovou vzdálenost dvou bodů, při které je oko schopno je ještě jako dva body rozlišit. Značíme ji jinak jako $MÚR$, tj. minimální úhlové rozlišení (minimum separabile) či v angličtině jako minimal angle resolution MAR . Vzhledem k nelineárnosti zrakového vnímání, které je popsáno Weber-Fechnerovým psychofyzikálním zákonem, je vhodnější použití hodnoty $\log MÚR$, tj. logaritmu minimálního úhlového rozlišení. (Tunnacliffe 1993, Benjamin 2006) V klinické praxi se též často využívá tzv. vízus V , který představuje relativní veličinu,

vztahující se k referenční hodnotě $1'$ a je definován vztahem (Tunnacliffe 1993, Kuchynka 2016)

$$V = \frac{1'}{MÚR}$$

Noniová zraková ostrost lze charakterizovat jako nejmenší úhlová odchylka mezi dvěma zdánlivě navazujícími úsečkami, při které ještě okem rozlišíme jejich posunutí, tzv. rozlišíme, že se jedná o dvě samostatné úsečky nikoliv jednu dlouhou úsečku. Identifikační zraková ostrost přímo souvisí s $MÚR$ a někdy se ani nezavádí jako samostatný typ. Popisuje schopnost identifikovat znaky, např. písmena, číslice. (Tunnacliffe 1993, Benjamin 2006)

V obvyklé klinické praxi, ale často i ve studiích, je ponejvíce využívána zraková ostrost ve smyslu $MÚR$. Lze na ni pohlížet z fyziologického anebo optického hlediska. Z fyziologického hlediska jsou od sebe dva body rozlišeny, pokud mezi dvěma fotoreceptory leží alespoň 1 nepodrážděný fotoreceptor. V centrální oblasti sítnice to přibližně odpovídá hodnotě $1'$. Pro periferii je toto pojetí poněkud zjednodušené, jelikož zde dochází ke slučování signálů z více fotoreceptorů v určité oblasti, které spolu vytváří tzv. receptivní pole, a fyziologické rozlišení pak závisí na velikosti těchto oblastí. V centrální oblasti velikost receptivních polí přibližně odpovídá velikosti fotoreceptoru, směrem do periferie roste (a tím se zhoršuje i $MÚR$). Z optického hlediska je rozlišovací mez oka, a tedy hodnota zrakové ostrosti, dána difrakcí a dalšími aberacemi, které jsou závislé na velikosti pupily. Maximální rozlišení udává tzv. Rayleighovo rozlišovací kritérium, které nám říká, že dva monochromatické bodové zdroje od sebe ještě odlišíme, pokud centrální maximum difrakčního obrazce jednoho z bodů spadá do 1. minima difrakčního obrazce druhého z nich. (Tunnacliffe 1993, Benjamin 2006)

1.2 Měření zrakové ostrosti a optotypy

Ke stanovení $MÚR$, resp. $\log MÚR$, se obvykle využívá identifikační zraková ostrost. Měření probíhá tak, že hledáme nejmenší velikost vhodných testových znaků, které vyšetřovaná osoba ještě identifikuje, přičemž se předpokládá, že velikost detailu těchto znaků udává $MÚR$. Vhodné testové znaky označujeme jako optotypy. Jedná se o soubor znaků [písmena, čísla, obrázky nebo speciální znaky jako Landoltovy prstence, Plügerovy háky, E háky (Tunnacliffe 1993, Benjamin 2006)] proměnné velikosti sloužící

k měření zrakové ostrosti. Znaky dané velikosti považuje za přečtené (identifikované), pokud je testovaná osoba schopna přečíst alespoň 60 % znaků (obvykle 3 z 5). Pro tento účel jsou znaky o stejné velikosti často řazeny do řádků, kdy velikost řádků postupně klesá. (Synek & Skorkovská 2014, Zadnik 1997, Lee 2019, Veselý & Beneš 2019, Ryan 2013, Tunnacliffe 1993, Benjamin 2006)

Optotypy mohou mít několik forem provedení. Mohou být ve formě papírové nástěnné tabule, podsvícené či nepodsvícené. Dále projekční, kde je nutné zajistit ztmavení místnosti, aby nedošlo ke ztrátě kontrastu pozorovaných znaků, či LCD. Právě LCD optotyp je využíván především kvůli jeho počítačovým programům, díky kterým můžeme náhodně generovat znaky o dostatečném kontrastu a jasů, nastavit potřebnou vzdálenost, zobrazit vÍzus či testy určené pro vyšetření jiných funkcí týkajících se např. binokulárního vidění. (Synek & Skorkovská 2014, Zadnik 1997, Lee 2019, Veselý & Beneš 2019, Ryan 2013, Tunnacliffe 1993, Benjamin 2006)

Obvyklým standardem při konstrukci testových znaků je Snellenova konstrukce, která byla též využita v experimentální části této práce. Konstrukce znaku je nastavena tak, aby se detail znaku rovnal 1/5 výšky znaku, znak je obvykle vepsáno do rastru 5 x 5 nebo 5 x 4. Ve studiích včetně našeho experimentu jsou často využívány písmena podle Sloanové – jedná se o sadu deseti písmen (C, D, H, K N, O R, S, V, Z) vepsaných do rastru 5 x 5. (Tunnacliffe 1993, Benjamin 2006)

Pro měření centrální zrakové ostrosti, v praxi nejčastější případ, je obvykle celý optotyp složen z řádků, které obsahují znaky stejné velikosti, které se s každým dalším řádkem zmenšují. S ohledem na Weber-Fechnerův zákon, který říká, že roste-li podnět řadou geometrickou, roste vjem řadou aritmetickou, je optimální, pokud se odpovídající hodnota zrakové ostrosti mění s konstantním krokem $\log MUR$, obvykle 0,1. Tomuto řazení se též někdy říká logaritmické a vÍzus V se poté mění řadou geometrickou. Pro stejnou přesnost stanovení zrakové ostrosti na všech jejích úrovních je nutné, aby počet znaků na všech řádcích byl stejný (obvykle 5). Všechny znaky na optotypu by měly mít stejnou čitelnost. Tuto podmínku nejlépe splňují Landoltovy prstence, které mají tvar písmene C, tzv. jedná se o přerušovaný kruh, jehož mezeru je možné prezentovat ve čtyřech různých pozicích (vpravo, vlevo, horní a dolní) případně také v šikmých pozicích. Kvůli zhoršené komunikaci s vyšetřovaným není jeho použití příliš rozšířené. Z důvodu zajištění vhodné komunikace a zároveň dodržení stejné čitelnosti, využíváme pouze

vybrané znaky abecedy, např. již zmíněná písmena podle Sloanové nebo tzv. British Standart Letters (D, E, F, H, N, P, R, U, V, Z, N). Hodnota zrakové ostrosti je významně ovlivněna crowdingem (viz kap. 2), tj. měřená zraková ostrost klesá, jsou-li testové znaky příliš blízko. Pro konstrukci optotypů je optimální, pokud je vzdálenost znaků na řádku rovna alespoň jejich šířce a vzdálenost řádků alespoň výšce menšího z nich. Tyto zásady konstrukce ideálního optotypu navrhli Bailey a Lovie. Typickým příkladem jsou tzv. ETDRS optotypy, často využívané pro standardizované měření vízu. Každý řádek je obvykle označen hodnotou příslušné zrakové ostrosti, ať už v $\log M\acute{U}R$ nebo V . Někdy je nutné měnit vyšetřovací vzdálenost, pak je výhodné využít tzv. číslo řádku, které udává vzdálenost v metrech, ze které by testové znaky právě přečetlo oko o vízu 1. Vízus pak lze určit vztahem

$$V = \frac{\text{vyšetřovací vzdálenost (m)}}{\text{číslo právě přečteného řádku}}.$$

Je-li při vyšetření do dálky nutné zajistit minimální akomodaci (zaostření) oka, doporučuje se měřit alespoň na vzdálenost 5 až 6 m. V této vzdálenosti je akomodace oka menší než 0,25 dioptrií. (Synek & Skorkovská 2014, Zadnik 1997, Lee 2019, Veselý & Beneš 2019, Ryan 2013, Tunnacliffe 1993, Benjamin 2006)

V případě že má vyšetřovaný horší zrakovou ostrost nebo pouze zbytky zraku a nedokáže tudíž přečíst ani největší písmeno na optotypu, je nutné zvolit jiné metody vyšetření zrakové ostrosti. Pacient se nejprve snaží přečíst největší písmeno na optotypu z kratší vzdálenosti, než jaká je při čtení písmen na optotypu běžná. Dále je možné ze vzdálenosti půl metru spočítat prsty, které mu ukazuje vyšetřující. Pokud je ovšem zraková ostrost příliš slabá, přechází se na identifikaci pohybu ruky před pacientem případně alespoň detekci světla. (Zadnik 1997)

V případě měření zrakové ostrosti v periférii je nutné zohlednit skutečnost, že rozlišovací schopnost a zraková ostrost se výrazně mění se vzdáleností od centra zorného pole. Periferní zraková ostrost tedy výrazně závisí na umístění znaku v zorném poli. (Tunnacliffe 1993, Benjamin 2006) Je proto nutné správně přizpůsobit měření zrakové ostrosti včetně konstrukce optotypů (Norton a kol. 2002). Z fyziologického hlediska je zhoršení zrakové ostrosti v periférii dáno jiným rozmístěním čípků a jejich nervovým spojením oproti centru. Zraková ostrost se zlepšuje se zmenšující se vzdáleností čípků od sebe, a tedy menší velikostí $M\acute{U}R$. (Norton a kol. 2002, Reich & Bedell 2000, Levin a

kol. 2011) Periferní pokles zrakové ostrosti je také dán propojením fotoreceptorů s bipolárními a gangliovými buňkami. Na rozdíl od fovey, kde jsou jeden až dva čípky spojeny přes bipolární buňku s jednou gangliovou, v periférii sítnice je gangliová buňka napojena i na větší počet fotoreceptorů. Díky sumaci signálů, které vycházejí z většího počtu fotoreceptorů je sice zaznamenám i menší světelný podnět, ale detail obrazu není kvalitní tak jako v případě fovey. (Tunnacliffe 1993) Pro měření periferní zrakové ostrosti se využívají optotypy speciální konstrukce, kdy se např. znaky směrem do periferie zvětšují nebo je např. možné využít opakovanou prezentaci jednoho testového znaku v daném místě zorného pole. Již zmíněný crowding se v periférii projevuje daleko intenzivněji než v centru, což je nutné mít též na zřeteli. (Norton a kol. 2002, Reich & Bedell 2000, Levin a kol. 2011, Benjamin 2006)

1.3 Úvod do binokulárního vidění

Binokulární vidění (BV) je stav, kdy jsou pro vidění využity obě oči. V případě, že se vytvoří jednoduchý obraz pozorovaného předmětu díky koordinované senzomotorické činnosti obou očí, hovoříme o jednoduchém binokulárním vidění (JBV). Jedná se nejdokonalejší formu spojení dvou obrazů ze sítnic levého a pravého oka, kdy vzniká jediný sensorický vjem. Výsledný vjem má tak mnohem vyšší kvalitu než vidění pravým a levým okem zvlášť. Předpokladem binokulárního vidění je správná funkce jeho jednotlivých složek, a to konkrétně složky optické, motorické a sensorické. (Rozsival 2006, Tunnacliffe 1993)

Optická složka zajišťuje, že se na sítnici vytvoří ostrý obraz předmětu, který pozorujeme. Druhá motorická složka zajišťuje rovnovážné postavení očí a jejich správné pohybové souhry tak, aby obraz předmětu dopadal do fovey každého oka. Poslední sensorická složka převádí signály z podrážděné sítnice do korových zrakových center a zajišťuje tak spojení obrazů obou očí v mozku. Při poruše jedné ze složek dochází k narušení BV. (Rozsival 2006, Tunnacliffe 1993)

Rozlišujeme tři stupně JBV. První a nejnižším stupněm je tzv. simultánní vidění, kdy oba, obecně různé, makulární obrazy z levého a pravého oka jsou viděny současně. Druhým stupněm JBV je fúze, díky které jsou tyto dva téměř stejné sítnicové obrazy nejen viděny současně, ale zároveň dochází k jejich spojení v jeden binokulární smyslový vjem. Fúze má dvě základní složky – motorickou a sensorickou. Motorická zajišťuje pomocí

oko-hybných svalů správnou pozici očí, při které se svými zrakovými osami zaměřují na pozorovaný objekt. Senzorická fúze pak zajišťuje vlastní spojení obrazů z obou očí. Při narušení některé ze složek jsou viděny dva obrazy přes sebe. Senzorickou fúzi můžeme dále dělit na paramakulární, makulární a foveolární podle rozsahu zapojených sítnicových oblastí. Znalost sensorických aspektů fúze a BV je podstatná pro pochopení experimentu, a proto jim bude věnován samostatný odstavec. Mezi sensorické aspekty BV patří také třetí a nejvyšší stupeň - stereopse. Jedná se o binokulární vnímání hloubky (tzv. trojrozměrné vnímání), kdy je výsledný obraz prostorový. (Rozsival 2006, Tunnacliffe 1993)

1.3.1 Sensorické aspekty BV

Za předpokladu správné činnosti motorické fúze se při pohledu na pozorovaný objekt díky tzv. disjunktivním pohybům očí stočí pohledové osy tak, aby se protnuly v pozorovaném bodě. V případě normálního zrakového systému se pak pozorovaný objekt zobrazí do centrální části sítnic obou očí, kterou označujeme jako fovea. Zde má oko největší zrakovou ostrost. Tyto body sítnice odpovídají pohledu přímo před oko, tj. pohledový úhel 0° . Ostatním bodům sítnice jsou přiřazeny jiné pohledové úhly, tzv. směrové hodnoty. Pokud obraz dopadá do obou očí na místa se stejnou směrovou hodnotou (na tzv. korespondující body), je dokonale fúzován. Fovey jsou tzv. hlavní korespondující body. Množinou bodů v prostoru, které se při pozorování daného bodu zobrazují do korespondujících bodů, nazýváme horopter. (Tunnacliffe 1993)

Body, které se nepromítají na korespondující místa sítnice, protože se nachází před nebo za horoptrem, nazýváme disparátní. Jim odpovídající body sítnice tedy mají různou směrovou hodnotu a nazývají se též disparátní. V okolí každého sítnicového bodu se však nachází tzv. Panumův areál, ve kterém je mozek schopen tolerovat disparátní zobrazení a vytvořit i tak jednoduchý binokulární vjem. V prostoru Panumovým areálům odpovídá tzv. Panumův prostor, který obklopuje horopter. V okolí horopteru, která spadá do Panumova prostoru, tedy ještě dochází k fúzi. Mimo tuto oblast však již fúze nedokáže sensoricky obrazy spojit a dochází k rušivé diplopii (tzv. fyziologické diplopii). (Tunnacliffe 1993)

1.3.2 Stereopse

Sítnicová disparita, která vzniká zobrazením bodů z Panumova prostoru ležících mimo horopter, je senzorickou částí zrakového aparátu vyhodnocena jako hloubkový vjem, stereopse. Na základě sítnicové disparity je systém schopen vyhodnotit vzájemnou vzdálenost pozorovaných objektů v Panumově prostoru (popř. i mírně za či před ním) vůči sobě a vytvořit stereoskopický vjem, tzv. „pravé prostorové vidění“. Disparitu pozorovaných objektů můžeme udat v úhlové míře. Stereopse není přítomna v nejbližším okolí horopteru ani na horopteru samotném (disparita je zde nulová nebo příliš malá), ale také v příliš velké vzdálenosti od pozorovatele (kdy je opět disparita příliš malá). Vzájemnou vzdálenost objektů můžeme pro účely popisu stereopse vyjádřit pomocí tzv. stereoskopické paralaxy.

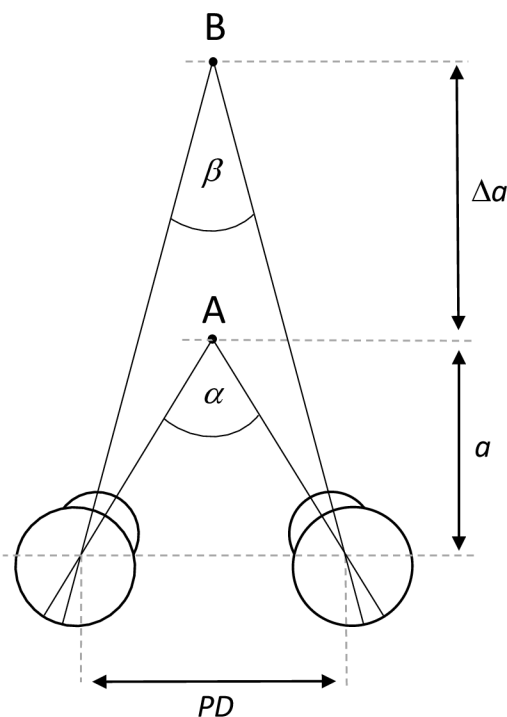
1.3.3 Stereoskopická paralaxa, stereoskopický práh

Sítnicovou disparitu a stereopsi je možné navodit řadou způsobů. Může se jednat o přirozeně prostorově rozmístěné předměty, disparita navozená pomocí promítání vhodných polarizovaných obrazců anebo pomocí stereoskopů. Stereoskop představuje jednoduchou metodu pro studium disparity, stereopse i jiných aspektů BV a jedna z jeho modifikací byla využita i v našem experimentu. (Howard & Rogers 2012)

Při pohledu na určitý předmět svírají oči mezi sebou určitý úhel, tzv. úhel stereoskopické paralaxy, tj. úhel stereopse. Jeho velikost můžeme určit pomocí vztahu

$$\eta = \alpha - \beta, \text{ kdy } \alpha \approx \frac{PD}{a} \text{ a } \beta \approx \frac{PD}{a + \Delta a},$$

viz obr. 1. Jedná se o rozdíl dvou konvergenčních úhlů α a β , které binokulárně svírají oční osy při fixaci bodu A ve vzdálenosti a a bodu B ve vzdálenosti $a + \Delta a$. PD představuje pupilární vzdálenosti obou očí při pohledu přímo vpřed. Vzdálenost a je obvykle výrazně větší než PD a Δa . Parametr Δa tedy označuje vnímanou hloubku mezi body A a B. Stereoskopická ostrost poté představuje nejmenší hodnotu Δa , při které ještě pozorovatel rozezná vzájemnou pozici (hloubku) obou bodů. Tato hodnota závisí na pozorovací vzdálenosti. (Howard & Rogers 2012)



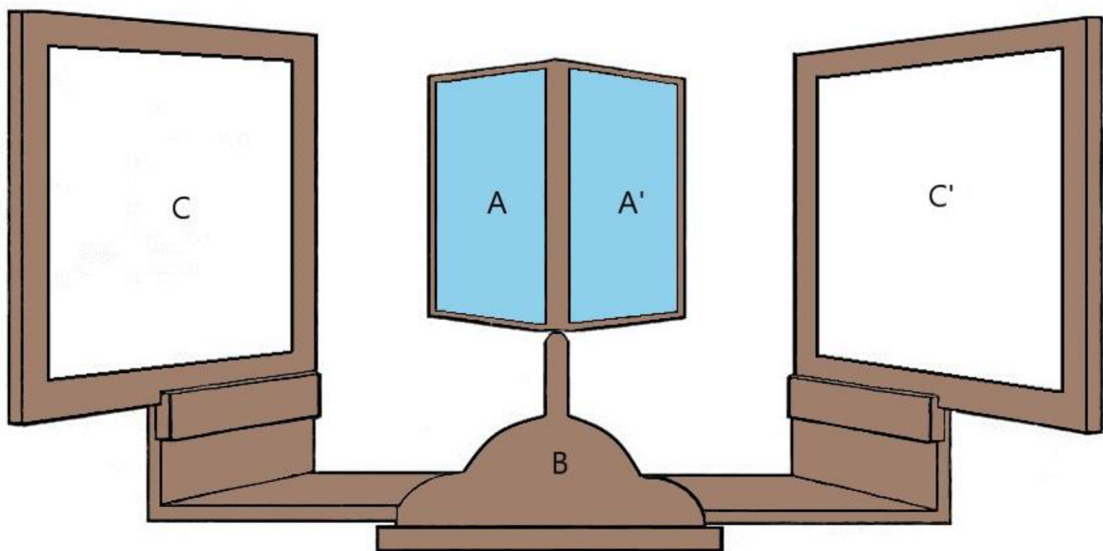
Obrázek 1: Schéma k objasnění pojmu stereoskopická paralaxa, upraveno podle Tunnacliffe (1993)

Dále zavádíme pojem stereoskopický práh η_P , což je nejmenší hodnota paralaxy, při které jsme ještě schopni okem správně rozpoznat (vyhodnotit) vzájemnou vzdálenost dvou objektů. Za hranici η_P považujeme přibližně hodnotu 20". Jedná se o hodnotu stanovenou v laboratorních podmínkách. V klinické praxi se za normu považuje hodnota 60" a menší. Po překročení η_P jsou objekty A a B již tak blízko, že není možné určit, který z nich je blíž a který dál. Ke stereopsi proto nedochází např. při velkých vzdálenostech objektů od pozorovatele, kdy i při velké Δa je η_P velmi malý. (Tunnacliffe 1993)

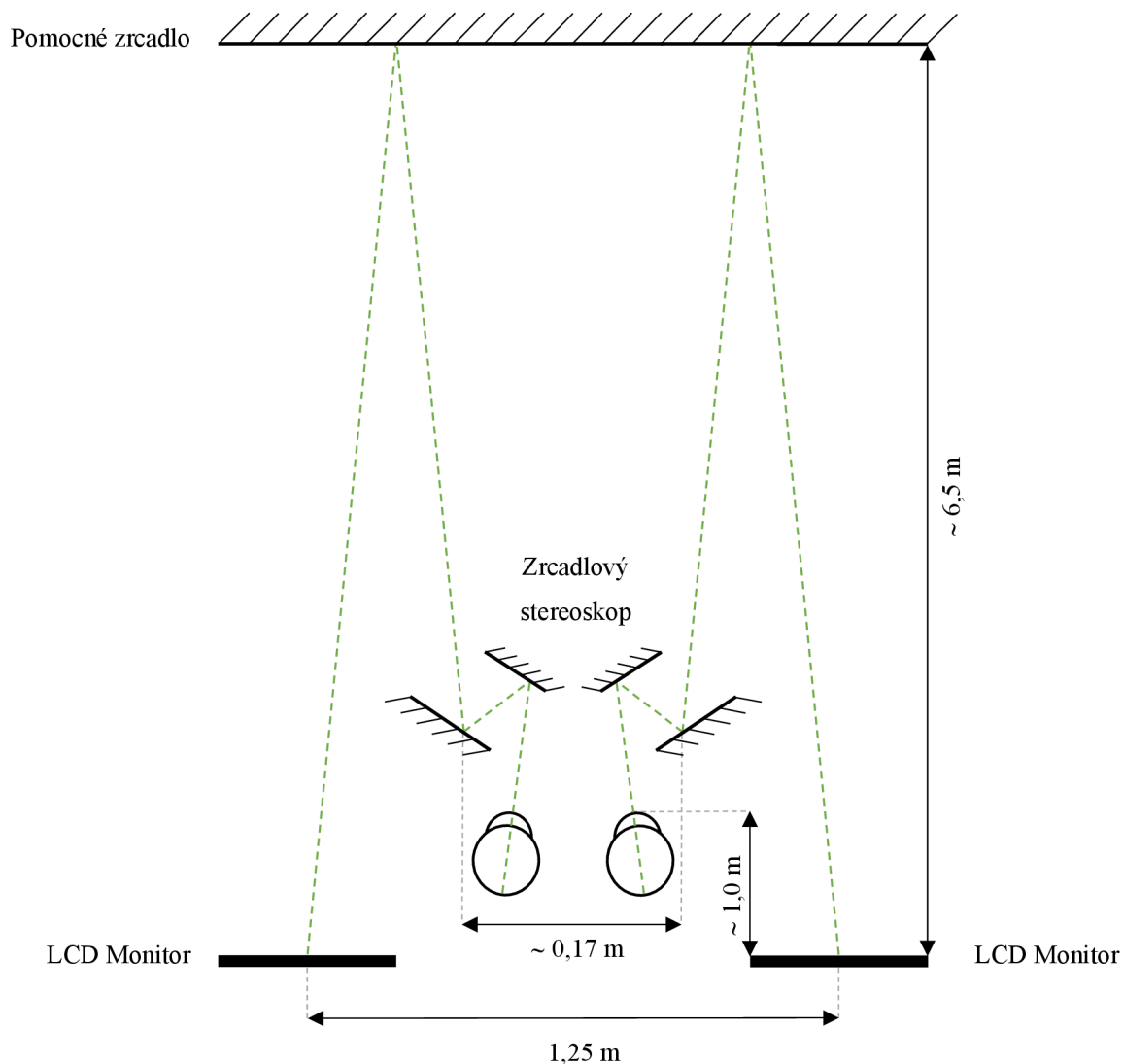
1.3.4 Stereoskopy

Stereoskopy jsou optická zařízení, která umožňují dichoptické zobrazení, tj. umožňují prezentovat rozdílný obraz pro pravé a levé oko. Při vhodné konstrukci obrazů, kdy je zařízením navozena sítnicová disparita, lze stereoskopem též simulovat prostorový, stereoskopický vjem. Stereoskopy jsou různých konstrukcí, využívají čoček, mechanických překážek nebo zrcadel. (Krimsky 1937) Typickým zástupcem je zrcadlový stereoskop, který vychází z návrhu, který vytvořil sir Charles Wheatstone roku 1838

(Howard & Rogers 2012), který je vyobrazený na obr. 2. Pro rozdělení vjemu pravého a levého oka se zde využívá zrcadel (Hubel 1995). Zrcadla, která prezentují pozorované obrázky, mezi sebou svírají úhel 90° , a jsou označena písmeny A a A'. Písmena C a C' označují obrázky pro pravé a pro levé oko. Stojan, na kterém drží samotná zrcadla A a A', je označen písmenem B. V současnosti se mnohem častěji můžeme setkat se zjednodušenou verzí z roku 1910 navrženou Pigeonem (Howard & Rogers 2012). Právě z konstrukce Wheatstonova zrcadlového stereoskopu vychází dnes i moderní vyšetřovací přístroje využívané jak pro samotné měření, tak i pro řešení okohybných odchylek, pro které jsou určeny přístroje jako je např. cheioskop nebo troposkop.



Obrázek 2: Obecná konstrukce Wheatstonova zrcadlového stereoskopu, upraveno podle (Hubel 1995)

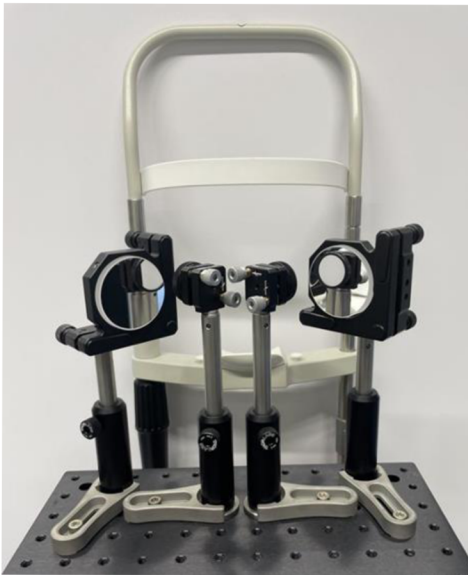


Obrázek 3: Schématické zobrazení sestavy zrcadlového stereoskopu použité v praktické části této práce

V našem experimentu byla využita modifikace zrcadlového stereoskopu, navržená a sestavená na katedře optiky PřF UP v Olomouci v rámci diplomové práce Kristýny Zbraňkové (Zbraňková 2021). Stereoskop umožňuje prezentaci odlišného obrazu pro pravé a levé oko, který je vytvořen na jednom ze dvou LCD monitorů, které mají rozlišení 1920 x 1080 pixelů a úhlopříčku 24 palců. Oba monitory jsou připojeny na jeden počítač, přičemž pro každý monitor je generován speciálním programem samostatný obraz, promítaný v rámci funkce „rozšířená plocha“ v systému windows. Na každém monitoru tak může být promítán jiný obraz. Schéma stereoskopu je na obr. 3. Samostatná zrcadlová soustava je umístěna na stolku spolu s opěrkou na bradu a čelo, před kterou se nachází podložka s optickou sestavou. Ta zahrnuje samotnou optickou soustavu, která obsahuje pro každé oko dvě zrcadla. Umožňuje pozorovat levý monitor levým okem a pravý

monitor pravým okem. Díky teleskopickým stojanům se mohou tato dvě zrcadla vůči sobě navzájem posouvat. Nastavení výškové pozice je umožněno právě díky teleskopickým stojanům a sklon je možné upravit pomocí justážních šroubků na stojanech. Oba monitory jsou navíc pozorovány přes další přidané zrcadlo, což umožňuje zkrácení fyzické velikosti celé soustavy. Zrcadlo je dostatečně veliké na to, aby bylo možné do něho zobrazit současně oba monitory. Celková optická pozorovací vzdálenost činí 11 metrů. Stereoskopická soustava se individuálně nastavuje na každého probanda, aby obrazy z obou monitorů vytvořily jeden společný zfúzovaný obraz. Fotografie soustavy stereoskopu jsou na obr. 4.





Obrázek 4: Stereoskopická soustava

2 Crowding a konturová interakce

Je obecně známo, že nejlepšího rozlišení znaku neboli dosažení nejlepší zrakové ostrosti, je dosaženo v případě izolovaných znaků či písmen, tzv. znak je hůře rozpoznatelný, pokud se v jeho blízkosti nacházejí jiné znaky. Toto tvrzení platí jak pro foveu, tak pro periferii. Tyto jevy jsou známé pod pojmem crowding (CW) nebo konturová interakce (CI). O konturovou interakci se jedná, pokud je znak obklopen jednoduchými konturami. Crowding představuje obecnější případ, kdy je znak obklopen libovolnými jinými znaky, jako jsou například písmena abecedy (Pluháček a kol. 2021). Obklopující znak či kontura se v cizojazyčné odborné literatuře často označuje jako flanker. Uvedené označení bude použito i v tomto textu. (Flom 1991, Bouma 1970, Toet & Levi 1992, Levi a kol. 2002c)

S CW se můžeme setkat například u čtení písmen na optotypu. Zde se např. ukazuje, že písmena uspořádaná v řádcích nad sebou jsou hůře rozpoznatelná než písmena v jedné horizontální řadě (Davage & Summer 1950) nebo písmena prezentovaná samostatně. CW je ovšem všudypřítomný v prostorovém vidění. Ovlivňuje naše běžné činnosti jako je čtení, řízení nebo interakce s okolím. Omezuje vnímání objektů, vyhledávání za pomoci zraku, ovlivňuje pohyby na úrovni ruka-oko a další funkce, a to jak v centrálním, tak v periferním vidění. Roli hraje také při rozvoji vidění. Pokud se v blízkosti objektu nachází další objekty, dochází k horšímu rozlišování rysů a obrysů daného objektu. Objasnění tohoto jevu je důležité pro pochopení procesů, které se podílejí na rozpoznávání objektů. (Whitney & Levi 2011, Levi 2008) CW také zhoršuje například orientaci (Andriessen & Bouma 1976, Westheimer a kol. 1976) nebo rozpoznávání obličejů (Louie a kol. 2007, Martelli a kol. 2005). Dále je přítomen u pohybujících se testovacích značek, při testování noniového rozlišení či při měření stereoskopické ostrosti. CW má rovněž klinický význam pro pacienty s makulární degenerací, amblyopií a dyslexií (Levi 2008). Původ vzniku CW a CI se historicky mnohokrát zkoumal a vzniklo tak několik možných teorií, které budou dále rozebrány v kapitole 2.2.

Řada studií (Flom a kol. 1963a, Kooi a kol. 1994, Levi & Klein 1985, Westheimer & Hauske 1975) ukázala, že ke CW dochází jak v případě, kdy je sledovaný znak a flankery prezentovány jednomu oku, tak binokulárně či dokonce dichopticky, kdy jedno oko vidí pozorovaný znak a druhé flankery. Chování CW a CI za těchto podmínek dosud

není dostatečně zdokumentované. Objasnění některých dílčích aspektů je cílem experimentální části této práce.

Magnituda, rozsah a měření separace

CI a CW můžeme charakterizovat pomocí magnitudy a prostorového rozsahu. Magnitudu lze definovat jako maximální pokles zrakového výkonu, kterého je dosaženo během rozpoznávání znaku za přítomnosti flankerů v porovnání s případem, kdy nejsou přítomny žádné flankery. (Marten-Ellis & Bedell 2021)

Prostorový rozsah udává maximální vzdálenost flankerů od pozorovaného znaku, při kterém daná přítomnost flankerů negativně ovlivňuje rozpoznání výsledného znaku (Marten-Ellis & Bedell 2021). Přítom je též podstatná i metodika měření této vzdálenosti (separace), která souvisí s mechanismy původu CI a CW. Při vhodně zvolené metrice, odrážející původ interakce, by se rozsah interakce neměl měnit se změnou velikosti znaku.

Výsledky a interpretace jednotlivých dat mohou být rozdílná v různých studiích právě v závislosti na zvolené metodice měření – metrice (Levi a kol. 2002c). Obvykle bývají využívány dva typy metrik. První z nich je „center to center“, kdy dochází k měření separace znaku a flankeru od středu znaku ke středu flankeru (např. Bouma 1970, Toet & Levi 1992, Tripathy & Cavanagh 2002). Druhá je „edge to edge“, neboli od hrany k hraně, kdy se měří vzdálenost přilehlých hran znaku a flankeru (např. Siderov a kol. 2013, Siderov a kol. 2014, Flom a kol. 1963b, Danilova & Bondarko 2007). V případě obou metrik může být separace uvažována jako relativní nebo absolutní, a to jak v případě CI, tak CW. Relativní je vztažena vůči velikosti centrálního znaku (např. v procentech), zatímco absolutní je obvykle určena v úhlové míře, nejčastěji v úhlových minutách (Bedell a kol. 2013, Siderov a kol. 2013). Dalšími podstatnými parametry jsou velikost a kontrast flankerů. Ukazuje se však, že CI a CW závisejí především na kontrastu flankerů (Takahashi 1968, Chung a kol. 2001, Pelli a kol. 2004, Kooi a kol. 1994, Rashal & Yeshurun 2014) nikoliv na jejich velikosti (Takahashi 1968, Siderov a kol. 2013, Pelli a kol. 2004).

Metody měření

CI a CW lze vyhodnocovat různými způsoby. Jednou z obvyklých metod je sledování závislosti úspěšnosti identifikace sledovaného znaku obklopeného flankery na separaci flankerů, tedy kontur (Hess a kol. 2000a, Hess a kol. 2000b, Levi a kol. 2002a, Danilova & Bondarko 2007, Siderov a kol. 2013, Bedell a kol. 2013, Musilová a kol. 2018, Bedell a kol. 2019, Siderov a kol. 2020) nebo písmen (Bouma 1970, Pluháček a kol. 2021). Tento způsob je také využit v experimentální části této práce. Další metodou studia těchto jevů je sledování změn vhodně zvolené prahové charakteristiky zraku v závislosti na přítomnosti a separaci flankerů, např. zrakové ostrosti, prahového kontrastu atp. V případě zrakové ostrosti lze s výhodou použít stimul ve formě standartního optotypu pro vyšetřování zraku, kdy jsou sledované znaky uspořádány do řádků umístěných pod sebou, přičemž velikost řádků postupně klesá (viz kapitola 1.2). Současně lze měnit vzájemnou separaci znaků na řádku a jednotlivých řádků, viz např. (Ošťadalová 2015, Pluháček & Siderov 2018, Pluháček a kol. 2022). Pro objasnění příčin CI a CW bývá také sledována změna jejich základních charakteristik (magnitudy, rozsahu) v souvislosti se změnami jasu, kontrastu, velikosti flankerů atd., viz např. (Siderov a kol. 2013, Kooi a kol. 1994, Rashal & Yeshurun 2014, Siderov a kol. 2014, Pluháček & Siderov 2018, Pluháček a kol. 2022).

2.1 Vliv excentricity stimulu na CI a CW

Je známo, že zraková ostrost se mění v závislosti na excentricitě stimulu v zorném poli, a to tak, že s narůstající excentricitou se snižuje, jak potvrdili např. Aubert & Foester (1857). Poloha stimulu v zorném poli také významně ovlivňuje chování CI a CW.

CW i CI se projevují jak ve foveální oblasti, tak v periférii zorného pole. Ukazuje se ale, že oba jevy jsou celkově výraznější v periférii než ve fovee. Současně bylo zjištěno, že CW je v periférii signifikantně silnější, tj. má větší magnitudu, než CI (Marten-Ellis & Bedell 2021). V případě foveálního vidění se podstatné rozdíly nepotvrdily (Marten-Ellis & Bedell 2021), i když jiné práce určité odlišnosti naznačují, např. Pluháček a kol. (2021). Dalším rozdílem mezi foveálním viděním a periférií je rozsah pozorovaných jevů. Ve fovee se jak CI, tak CW vyskytuje pouze ve velmi malé vzdálenosti odpovídajících 2-6 obloukovým minutám (Flom a kol. 1963b, Bouma 1970, Toet & Levi 1992, Liu & Arditi 2001, Danilová & Bondarko 2007). Tato skutečnost vedla

k tomu, že v některých studiích, které nevhodně volily velikost separací, nebyly tyto typy interakce pozorovány vůbec (Strasburger a kol. 1991). Oproti tomu v periférii mají oba jevy výrazně větší rozsah, přičemž při dané excentricitě stimulu je rozsah CW větší (Marten-Ellis & Bedell 2021, Bouma, 1970, Toet & Levi 1992, Kooi a kol. 1994, Levi a kol. 2002a). Dalším rozdílem je vhodnost použité metriky při sledování obou jevů. Zatímco ve fovee se rozsah u CI i CW chová stejně, tj. téměř se nemění s velikostí pozorovaného znaku při separaci měřené „edge to edge“ (Norgett & Siderov 2014, Danilova & Bondarko 2007, Marten-Ellis & Bedell 2015), v případě periferie je tomu jinak.

Ukazuje se, že při vhodně zvolené metrice je pro odpovídající místo sítnice rozsah CI i CW konstantní, nezávislý na velikosti centrálního znaku. V případě CI této podmínce vyhovuje měření separace stylem „edge to edge“, a to jak ve fovee (Danilova & Bondarko 2007, Siderov a kol. 2013), tak v případě periferie (Pelli a kol. 2004, Simunovic & Calver 2004, Tripathy & Cavanagh 2002).

Tato separace se ukazuje být vhodná i pro CW v případě centrálního vidění, viz např. Marten-Ellis & Bedell (2021). Nezávislost rozsahu CW na velikosti znaku byla potvrzena i v periférii (Chung a kol. 2001, Hariharah a kol. 2005, Pelli a kol. 2004, Tripathy & Cavanagh 2002), avšak při separaci „center to center,“ (Hariharan a kol. 2005, Levi a kol. 2002a, Levi a kol. 2002c, Pelli a kol. 2004, Strasburger a kol. 1991, Tripathy & Cavanagh 2002). U CW bylo zjištěno, že jeho rozsah odpovídá přibližně dvojnásobku excentricity stimulu (Bouma 1970), u CI je tato závislost zřetelně slabší. Přehled chování CI a CW lze v závislosti na excentricitě lze dohledat např. v práci Chung a kol. (2001) tabulka 1. Lze tedy shrnout (viz např. Musilová (2019)), že CW a CI mají v případě fovey velmi podobné chování, zatímco v periférii se oba jevy zřetelně liší, a to jak rozsahem, tak magnitudou. Z toho lze také usuzovat na výrazně odlišný původ těchto jevů v periférii, viz např. Marten-Ellis & Bedell (2021). Obecně se předpokládá, že CW je komplexnější jev, přičemž CI je pokládána za jeho součást.

2.2 Vysvětlení mechanismů CI a CW

Od počátků zkoumání CW a CI bylo vysloveno mnoho teorií o jejich vzniku, které sahají od fyzikálně-optického objasnění přes laterální maskování až po neurální mechanismy, vycházející ze složité struktury zrakové dráhy a hierarchie zrakového kortexu.

I když konkrétní mechanismy vzniku CW a CI nejsou dosud zcela objasněny, v současnosti se má zato, že hlavní příčinou jsou různé neurální mechanismy. CW je oproti CI považován za složitější jev, jelikož zahrnuje například fixační pohyby očí, rozdělení pozornosti mezi jednotlivé znaky či retinální nebo supraretinální nervovou inhibici. Komplexnost CW je dán právě tím, že u CW znak neoklopují jednoduché kontury, tak jak je tomu u CI, ale složitější znaky, díky kterým se může do procesu vnímání zapojovat více mechanismů. CI je proto považována za podmnožinu CW, jak bylo řečeno výše. (Flom a kol. 1963b)

V případě foveálního vidění byl v minulosti uvažován tzv. fyzikální původ, který nesouvisel s fyziologií zrakového systému, ale s fyzikální podstatou stimulu. Byl založen na předpokladu, že vizuální výkon je snížen, protože blízké kontury ovlivňují prostorové frekvence stimulu a posouvají kritické frekvenční pásmo, díky kterému je možné detekovat detaily stimulu, do oblastí vyšších prostorových frekvencí, pro které má však fovea sníženou citlivost. (Hess a kol. 2000b) Následující studie však předpovědi vycházející z tohoto modelu nepotvrdily ani ve fovee (Danilova & Bondarko 2007, Siderov a kol. 2013), ani v periférii (Pelli a kol. 2004, Simunovic & Calver 2004, Tripathy & Cavanagh 2002).

Pelli a kol. (2004) ve své studii uvedly, že vysvětlením jevů může být tzv. laterální maskování. Vjem stimulu je negativně ovlivněn tím, že pozorovaný objekt a přilehlé kontury či objekty (tzv. masky) vytvoří superpozici. Objekty se nemusí v rámci stimulu nutně překrývat. Z toho zjištění by vyplývalo, že mezi velikostí pozorovaného znaku a rozsahem daného jevu je přímá úměra. Studie, které se tímto zabývaly jak ve fovee (Danilova & Bondarko 2007, Siderov a kol. 2013), tak v periférii (Pelli a kol. 2004, Simunovic & Calver 2004, Tripathy & Cavanagh 2002) ovšem neprokázaly takovou závislost.

V současnosti nejvíce zastoupené teorie vysvětlující vznik CI a CW jsou založeny na neurálních interakcích neuronů zrakové dráhy (tzv. neurální původ). Ve prospěch těchto studií hovoří řada zjištěných faktů. Např. se ukazuje, že prostorový rozsah obou studovaných jevů odpovídá danému místu sítnice, přičemž roste s rostoucí vzdáleností stimulu (s rostoucí excentricitou) od středu zorného pole (Bouma 1970, Wolford & Chambers 1984, Levi a kol. 2002a), což je plně v souladu s vlastnostmi receptivních polí. V rámci neurálního původu bývají CI a CW vysvětlovány na základě tzv. integrace, inhibice, poolingů či groupingu.

Podle integrační neurální teorie se CW a CI řídí tzv. dvoufázovým modelem. První fáze zahrnuje detekci jednoduchých rysů (základních komponentů objektů), která se pravděpodobně odehrává v oblasti V1 zrakové kůry mozku. Druhá fáze zahrnuje integraci (neboli interpretaci) rysů, tentokrát již jako celku, která se odehrává v dalších částech mozku. Je-li vyžadována pouze detekce jednoduchého signálu, je taková úloha vůči CW téměř imunní. Složitější úkoly, které vyžadují více než pouhou detekci jednoduchého signálu, jsou na vznik CW náchylné. Tato druhá fáze není zcela pochopena a neexistuje pro ni jasné vysvětlení. Zrakový systém má mnoho integračních polí, která mají různé velikosti a navzájem se překrývají. Na rozdíl od receptivních polí nemusí být pevně daná a statická, jelikož jsou centrována na signál. Integrační pole je oblast, kde dochází ke kombinaci jednoduchých rysů, a tudíž rozpoznání předmětu. Pokud signály, které vycházejí z pozorovaného znaku a přilehlých objektů dopadají do stejného integračního pole, dochází ke sloučení jednotlivých signálů a výsledek se může jevit nejasně a nerozeznatelně. Periferní CI se vysvětluje jako jev, který nastává uvnitř receptivních polí mísením nebo kombinací obrazu kontur a sledovaného znaku (Dakin a kol. 2010, Freeman a kol. 2012, Greenwood a kol. 2009, Zhang a kol. 2012). Předpokládá se, že právě CW nastává po prvotní fázi detekce rysů a před či během druhé fáze integrace rysů. Pokud máme složitější objekt, u kterého vzniká více informací z více detekcí, je nutná integrace, u které by mělo právě docházet ke vzniku CW (Levi 2008, Levi 2002c).

Dalším možným neurálním vysvětlením je inhibice vycházející z existence tzv. antagonistické struktury receptivních polí (Flom a kol. 1963b, Latham & Whitaker 1996, Wolford & Chamber 1984). Tento jev může být patrný například u bipolárních a gangliových buněk. Tyto buňky mají koncentrické receptivní pole, jehož centrální část se chová antagonisticky oproti periférii. Typicky při podráždění centra buňka zvýší svoji aktivitu, naopak při stimulaci okrajové části svoji aktivitu utlumí (Tunnacliffe 1993).

Bedell a kol. (2013) podpořil předpoklad, že při foveálním vidění kontur dochází k jejich zobrazení do okrajové inhibiční části receptivního pole buňky, a tím k útlumu signálu vjemu pozorovaného znaku a vzniku CI nebo CW. Vlastnosti CI i CW ve fovee, zejména jejich útlum s poklesem jasů, plně odpovídají změnám v této antagonistické struktuře receptivních polí s jasem (Bedell a kol. 2013, Musilová a kol. 2018, Marten-Elis & Bedell 2021). Oproti tomu periferní chování CI a CW tomuto mechanismu neodpovídá (Musilová a kol. 2018, Pluháček a kol. 2020, Marten-Elis & Bedell 2021) a je pravděpodobně zapříčiněno jinými procesy.

Tzv. pooling předpokládá, že dochází k náhodné kombinaci signálů, které přicházejí z obrazů flankerů a daného pozorovaného znaku v rámci receptivních polí. Tento jev je uvažován především v periférii (Dakin a kol. 2010, Freeman a kol. 2012, Greenwood a kol. 2009, Hanus & Vul 2013, Herzog & Manassi 2015). Opakem je seskupování flankerů se sledovaným znakem do známých tvarů, tj. vycházející z předchozí zkušenosti (grouping). Tomu odpovídá skutečnost, že CW silně závisí na podobnosti pozorovaného znaku s flankerem. Tzv. čím více jsou si podobné, tím je CW silnější a rozsáhlejší (Kooi a kol. 1994, Hess a kol. 2000a, Hess a kol. 2000b).

Ukazuje se, že CW silně závisí na podobnosti pozorovaného znaku a přilehlého znaku (flankeru). Tzv. čím více jsou si podobné, tím je CW silnější a rozsáhlejší. Například pro rozlišení orientace T (Kooi a kol. 1994) nebo Landoltova C (Hess a kol. 2000a, Hess a kol. 2000b) bylo prokázáno, že CW je silnější a má větší rozsah, když pozorovaný znak a flankery mají stejnou kontrastní polaritu (např. oba černé nebo oba bílé), než když mají opačnou polaritu (např. cíl černý, okraje bílé).

2.3 CI a CW při prostorovém zobrazení flankerů

V běžném životě jsou pozorované objekty obvykle rozmístěny v prostoru. Další otázkou tedy je, jak se CI a CW chovají v závislosti na takovémto prostorovém rozložení flankerů. Logicky je nejprve nutné se ptát, zda k těmto vjemům dochází i při kombinaci vjemů z obou očí, nebo zda se jedná o ryze monokulární jevy.

Otázkou vzniku CI při kombinaci vjemů z obou očí se jako jedna z prvních studií zabývala práce Flom a kol. (1963a). Konkrétně byla porovnávána CI jak za monokulárních podmínek, kdy kontury i centrální znak (konkrétně Landoltův prstenek) byly současně prezentovány jednomu oku (ipsilaterálně), tak za podmínek dichoptických,

kdy kontury byly prezentovány jednomu oku a Landoltův prsteneček oku druhému (kontralaterálně). Výsledky studie ukázaly, že rozsah CI je za obou uvažovaných podmínek shodný. CI tedy vzniká nejen při monokulární prezentaci, ale také při kombinaci výsledného vjemu z obrazů obou očí. To znamená, že ke vzniku CI musí docházet v místě zrakové dráhy, kde dochází ke spojování informací z obou očí. Je proto pravděpodobné, že CI vzniká v corpus geniculatum laterale (CGL) nebo dále ve zrakové dráze, tj. ve zrakovém kortexu v týlním laloku mozku. Hodnoty rozsahu monokulární CI přitom byly ověřeny i dalšími studiemi (Musilová a kol. 2018, Bedell a kol. 2013, Danilova & Bondarko 2007). Přítomnost CI ve fovee prokázaly též další studie (např. Saiym a kol. 2008, Zbraňková 2021). Saiym a kol. (2008) při studiu noniové zrakové ostrosti dokonce zjistili, že za dichoptických podmínek je CI silnější než při prosté binokulární prezentaci vjemu. Oproti tomu u Zbraňkové (2021) byl zjištěn slabší efekt při dichoptickém zobrazení. Příčinou mohl být problematický stimul, kdy při dichoptických podmínkách mohlo intermitentně docházet k supresi jednoho z vjemů. V periférii se dichoptickým zobrazením stimulů zabývala práce autorů Kooi a kol. (1994). I zde byla zjištěna přítomnost CI při dichoptické prezentaci, přičemž nebyl zjištěn rozdíl mezi dichoptickým a monokulárním zobrazením stimulu. Závěr, vyslovený Flomem a kol. (1963a), že CI vzniká v hlubších částech zrakové dráhy, v CGL či dále, tedy platí i pro periférii.

Prostorovému rozložení flankerů oproti centrálnímu znaku, tj. vlivu disparity flankerů, se také věnovalo několik prací (Kooi a kol. 1994, Saiym a kol. 2008, Astle a kol. 2014). Bylo zjištěno, že foveální CI v případě noniového stimulu (Saiym a kol. 2008) a periferní CW (Kooi a kol. 1994) jsou přítomny i za těchto podmínek, avšak oproti prostému binokulárnímu pozorování jsou slabší. Podrobněji se CW zabývala práce Astle a kol. (2014), která zkoumala CW za pomoci tzv. Gaborových obrazců (jedná se o sinusovou mřížku, jejíž intenzita od středu ke kraji klesá). Oproti publikaci Saiym a kol. (2008) však autoři ve fovee nepozorovali žádný CW, což mohlo být velkým rozsahem použitých separací flankerů. Periferně potvrdili slabší efekt CW při prostorovém zobrazení flankerů. Ve všech studiích byl hloubkový vjem navozen disparátním zobrazením flankerů, popř. centrálního obrazce, v levém a pravém oku. Astle a kol. (2014) navíc zjistili, že příčinou poklesu CW je přímo disparita flankerů jako taková, nikoliv jejich prostorová vzdálenost od centrálního znaku nebo monokulární posun vjemu (navozujícím disparitu). Studie dále uvedla, že CW je slabší v situaci, kdy pozorovaný

znak stojí prostorově před flankery (nezkřížená disparita flankerů), oproti situaci, kdy stojí za nimi (zkřížená disparita flankerů).

3 Experimentální část

Dosavadní studie, zabývající se vlivem prostorově rozložených flankerů (flankerů, jejichž obrazy v obou očích vykazují vzájemný posun – disparitu) oproti pozorovanému znaku, většinou poukazují na snížení vlivu CW nebo CI (Kooi a kol. 1994, Saiym a kol. 2008, Astle a kol. 2014), přičemž cílí především na CW při periferním vidění (Kooi a kol. 1994, Astle a kol. 2014). Foveální CI při disparátním zobrazení kontur se věnovala pouze práce Saiym a kol. (2008), a to při studiu noniové zrakové ostrosti, která představuje specifický případ. CI ve foveální oblasti při disparátně zobrazených konturách tedy není dostatečně prozkoumána. Cílem experimentální části této diplomové práce proto bylo určit, zda má disparita kontur při foveální prezentaci stimulu vliv na CI. Přitom byla volena disparita 90", která přesahuje v klinické praxi uvažovaný stereoskopický práh a navozuje tak zřetelný prostorový vjem flankerů. Na základě chování CW v periférii a noniové zrakové ostrosti ve fovee předpokládáme, že CI bude disparitou kontur oslabena, a to více při nezkrřížené disparitě. Pro posouzení vlivu disparity s ohledem na monokulární změnu separace kontur od centrálního znaku bude CI vyhodnocena jednak pro čtyři kontury umístěné oproti centrálnímu znaku nahoře, dole, vlevo a vpravo, jednak pro dvojice kontur umístěné vlevo a vpravo, jednak nahoře a dole.

3.1 Metodika

3.1.1 Subjekty

Měření se zúčastnilo celkem 5 probandů. Jednalo se o 4 ženy a 1 muže ve věku 22–47 let. Žádný z probandů nevykazoval oční patologie či zrakové abnormality, které by mohly mít vliv jak na binokulární vidění, tak na zrakovou ostrost. Všichni probandi měli také normální stereoskopické vidění. Měření probíhalo s aktuální korekcí, aby se vykompenzovala případná refrakční vada a docílilo se nejlepšího subjektivně stanoveného vizu. U všech subjektů byl požadován podobný monokulární vizus levého i pravého oka. Délka měření a množství přestávek mezi jednotlivými částmi experimentu byl přizpůsoben fyzické a psychické kondici vyšetřovaného v daný den měření. Probandi byli před samotným měřením seznámeni s celým průběhem a délkou experimentu, studie se účastnili dobrovolně a svůj souhlas s účastí na experimentu potvrdili svým podpisem

na informovaném souhlasu. Celý proces měření probíhal v laboratoři na katedře optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.

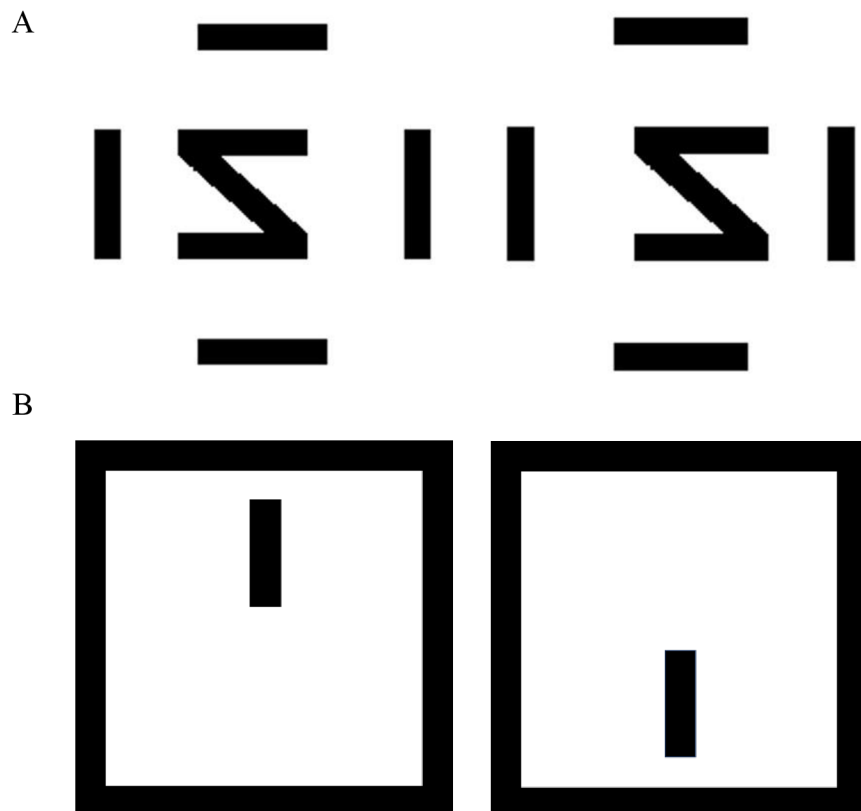
3.1.2 Stimul

V průběhu experimentu byly zobrazovány dva stimuly – vlastní experimentální stimul a pomocný fixační stimul. Fixační stimul byl zobrazen vždy před a mezi dvěma prezentacemi experimentálního stimulu a sloužil ke stabilizaci binokulárního vidění. Doba zobrazení pomocného stimulu byla neomezená, experimentální stimul byl prezentován po dobu 2000 ms, pokud proband neidentifikoval znak dříve.

Experimentální stimul se skládal z centrálního znaku, který byl náhodně zvolen ze sady písmen dle Sloanové (C, D, H, K, N, O, R, S, V, Z), obklopený dvěma (pravá/levá nebo horní/dolní) nebo čtyřmi (pravá/levá/horní/dolní) konturami. Celý stimul, tj. centrální znak i kontury, měl černou barvu a byl zobrazen na bílém pozadí. Weberův kontrast všech částí stimulu byl stejný ($> 95\%$). Šířka kontur byla rovna $1/5$ velikosti znaku a délka odpovídala velikosti znaku. Stimul byl současně generován ve verzi pro pravé a pro levé oko, přičemž obě verze byly buďto stejné, nebo se lišily posunem kontur oproti centrálnímu znaku tak, aby byla simulována jejich zkřížená nebo nezkřížená sítnicová disparita při binokulárním vjemu (tj. aby kontury byly vnímány před nebo za centrálním znkem). Případný posun kontur a znaku byl v obou verzích symetrický. Stimul byl generován pomocí speciálního počítačového programu vytvořeného pro experimentální účely na katedře optiky a byl současně prezentován na dvou monitorech (verze pro pravé oko na jednom a pro levé oko na druhém monitoru). Oba monitory byly pozorovány přes soustavu zrcadlového stereoskopu vyobrazeného na obr. 4 a podrobněji popsaného v kapitole 1.3. Tato sestava umožňovala současně pozorovat každou verzi stimulu příslušným okem, a tak je fúzovat do jednoho binokulárního vjemu. Separace kontur od centrálního znaku byla proměnná, přičemž čtveřice, popř. dvojice kontur byla rozmístěna tak, aby výsledný binokulární vjem všech zobrazených kontur oproti centrálnímu znaku byl symetrický. Příklad experimentálního stimulu s disparátním zobrazením kontur uvádí obr. 5A. Použité monitory (AOC E2470Sw) byly širokoúhlé s délkou úhlopříčky 24 palců a s nastaveným rozlišením 1920 x 1080.

Pomocný fixační stimul, opět ve verzi pro pravé a levé oko, se skládal z černého čtverce prezentovaného oběma očím a dvou svislých čar, kdy pravé oko vidělo horní čáru a levé oko dolní čáru (obr. 5 B). Tyto dvě svislé čáry musely být viděny současně a

zároveň přesně nad sebou. Obrazec viděný v této pozici sloužil ke kontrole správné fúze obrazů z obou očí a ke kontrole případné suprese. V opačném případě bylo překontrolováno nastavení soustavy stereoskopu, viz další odstavec. Velikost pomocného stimulu byla nastavena individuálně tak, aby proband bez problémů rozpoznal zarovnání čar.



Obrázek 5: A) Experimentální stimul ve verzi pro pravé (vlevo) a levé (vpravo) oko s disparátně umístěnými konturami (s ohledem na lichý počet odrazů v soustavě stereoskopu je stimul prezentován zrcadlově převráceně); B) pomocný fúzní stimul, opět ve verzi pro pravé (vlevo) a levé (vpravo) oko

3.1.3 Postup měření

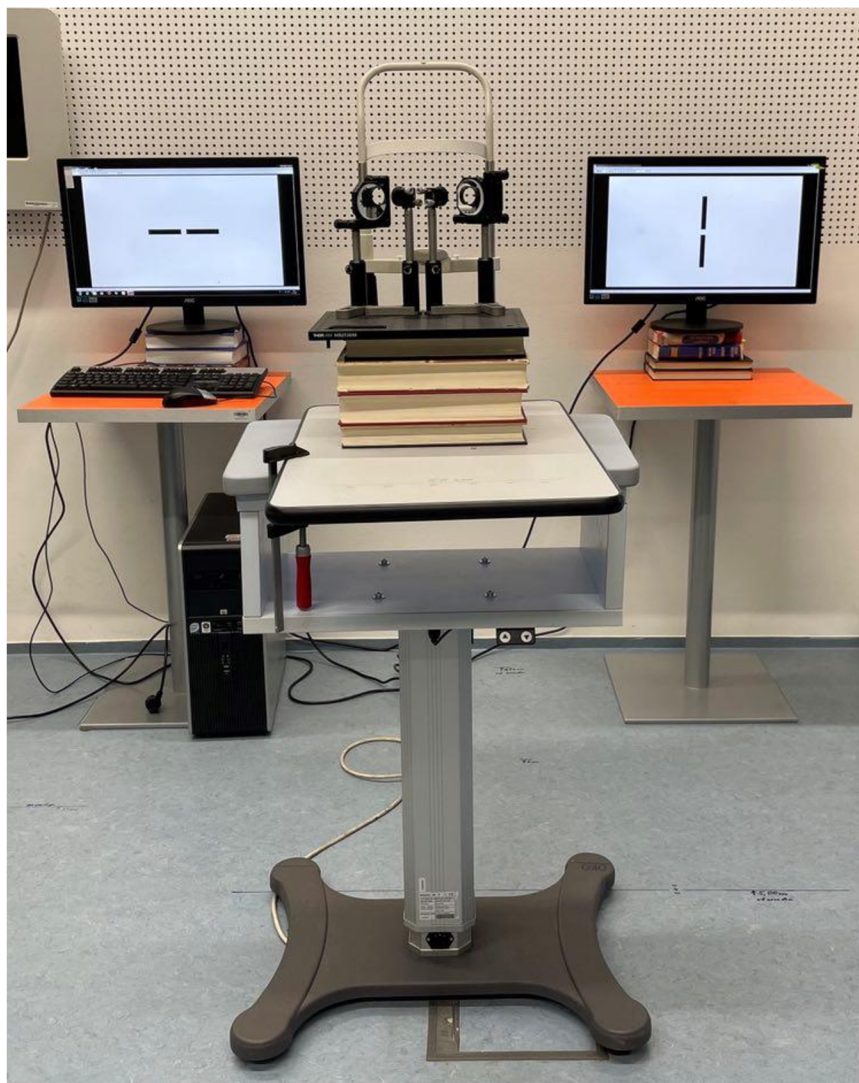
Experiment probíhal v zatemněné místnosti s umělým osvětlením, odpovídajícím standardním fotopickým pracovním podmínkám. Před zahájením experimentu byl pro každého probanda nejprve individuálně nastaven zrcadlový stereoskop. Pro ověření a doladění správné pozice zrcadel stereoskopu byl na monitory promítnut pomocný obrazec sestávající ze dvou uprostřed přerušných čar, vodorovné pro pravé a svislé pro levé oko,

zobrazených centrálně na příslušném monitoru, jak je ukazuje obr. 6. V případě správného nastavení proband přes stereoskopickou soustavu vnímal symetrický kříž tvořený těmito čarami. Toto nastavení bylo zachováno po celou dobu měření daného probanda.

U každého z probandů byla nejprve stanovena velikost samostatného, izolovaného (tj. bez kontur) centrálního znaku pozorovaného binokulárně přes soustavu stereoskopu, při které byl správně identifikován s pravděpodobností pohybující se mezi 70 % a 90 %. Tato velikost, udaná v hodnotě $\log MÚR$ odpovídající detailu znaku, byla následně ověřena na základě prezentace několika sérií po 50 izolovaných znacích, aby se ověřila stabilita pravděpodobnosti identifikace. Pravděpodobnost identifikace v posledních dvou sériích byla uvažována jako výchozí pravděpodobnostní hladina. Velikost znaku se během všech dalších měření u daného probanda již neměnila.

Vlastní měření probíhalo vždy pro tři různá nastavení počtu a pozice kontur: čtyři symetricky rozmístěné kontury, dvě kontury rozmístěné vertikálně (nahore a dole) a dvě kontury rozmístěné horizontálně (vlevo a vpravo). Pro každou z těchto podmínek byly nastaveny tři hodnoty disparity kontur, a to buďto bez disparity, nebo se vzájemnou disparitou kontur o celkovém úhlovém rozsahu 90" zkríženě (levé oko vnímalo kontury posunuté vpravo, pravé vlevo), nebo 90" nezkříženě. Pro každou uvažovanou hodnotu a typ disparity bylo provedeno šest sérií po 100 prezentacích stimulu, přičemž v každé ze sérií byla separace kontur, měřená od hrany kontury k nejbližší hraně znaku („edge-to-edge“) v procentech velikosti znaku, nastavena na jednu z těchto hodnot: 10 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % a 100 %. Pořadí jednotlivých měření, tedy zvolený počet, disparita a separace kontur, bylo zvoleno náhodně formou losování. U každého probanda bylo tedy nutné změřit celkem 54 sérií po 100 znacích, nepočítaje v to úvodní stanovení výchozí pravděpodobnostní hladiny identifikace ani její průběžnou kontrolu. Testovaný proband v každé sérii slovně identifikoval pozorovaný znak. V případě, že nebyl schopen písmeno subjektivně rozpoznat, musel hádat, tzv. zvolit jedno písmeno ze sady písmen dle Sloanové. Jednotlivé odpovědi byly experimentátorem pomocí klávesnice zaznamenány do počítačového programu, který na konci série automaticky stanovil procento správných odpovědí v této sérii. Výsledky byly poté ručně zaznamenány do archu uvedeného na obr. 7. Během jedné série probíhaly 3 až 4 krátké pauzy sloužící k uvolnění a promrkání očí. Delší pauzy sloužící pro větší odpočinek byly zařazeny vždy po několika sériích v závislosti na únavě probanda. Zhruba po 3 až 5 sériích byla překontrolována výchozí pravděpodobnostní hladina na

izolovaných znacích. Došlo-li k významnému poklesu, byla zařazena přestávka, popř. bylo měření přerušeno a pokračovalo v dalším dnu.



Obrázek 6: Stereoskopická soustava s vyobrazeným testem pro ověření správné fúze

Jméno:
Datum měření:

logMAR:

| Disparita 0 | 10% | 20% | 40% | 60% | 80% | 100% |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Pravá/levá | | | | | | |
| Nahoru/dolu | | | | | | |
| 4 | | | | | | |

| Disparita 90" zkřížená | 10% | 20% | 40% | 60% | 80% | 100% |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Pravá/levá | | | | | | |
| Nahoru/dolu | | | | | | |
| 4 | | | | | | |

| Disparita 90" nezkřížená | 10% | 20% | 40% | 60% | 80% | 100% |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Pravá/levá | | | | | | |
| Nahoru/dolu | | | | | | |
| 4 | | | | | | |

Obrázek 7: Protokol k experimentální části

3.1.4 Analýza dat

Normalita dat všech pěti probandů ze všech 54 sérií a v sérii s výchozí pravděpodobnostní hladinou byla testována Shapiro-Wilkovým testem. Bylo zjištěno, že až na dvě série je požadavek normality splněn. Při zahrnutí Bonfferoniho korekce pro opakovaná srovnání nebyla hypotéza o normalitě ani v těchto dvou sériích vyvrácena. Pro posouzení vlivu všech tří sledovaných faktorů (počet, disparita a separace kontur) a jejich interakce na pravděpodobnost správné identifikace písmen byla proto využita metoda analýzy rozptylu (ANOVA) pro opakovaná měření. Pro post-hoc párové porovnání dat byl použit Tukeyův HSD test. Testování statistických hypotéz proběhlo na hladině významnosti 0,05. V textu jsou také uvedeny mezní hodnoty p hladiny významnosti, při kterých by právě došlo k zamítnutí testované hypotézy. Uvedené statistické výpočty byly provedeny v programu STATISTICA 14.0.0.15 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA,

USA), doplňující výpočtu programu MS Excel 2016 (Microsoft Corporation, Remond, WA, USA).

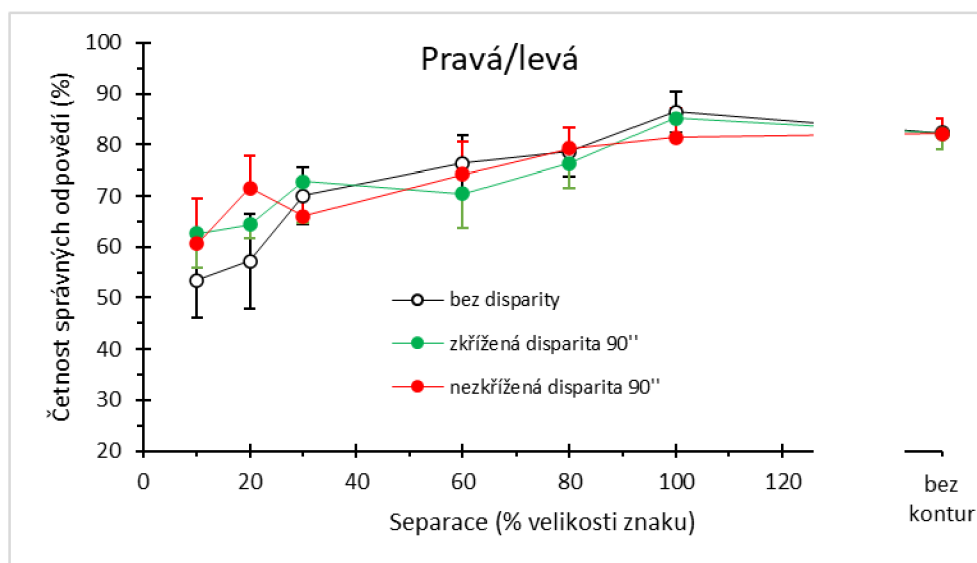
3.2 Výsledky

Kompletní soubor dat, které byly získány z jednotlivých měření, se podařilo získat od všech pěti účastníků. Data těchto pěti probandů (EB, HB, FP, MW, LB), která byla během měření získána, jsou ve formě závislosti průměrné relativní četnosti (pravděpodobnosti) správných odpovědí (průměrováno přes všechny probandy) na velikosti separace prezentována na obr. 8, 9 a 10 pro jednotlivé počty kontur. Hodnota a typ disparity jsou na obrázcích odlišeny barevně. Velikost znaků u jednotlivých probandů a odpovídající výchozí hladinu pravděpodobnosti identifikace znaků pro jednotlivé probandy shrnuje tab. 1. Průměrná velikost znaku byla 2,8'. Za všech sledovaných podmínek (počet a disparita kontur) je v grafech vidět výrazný vliv separace. Dále lze pozorovat, že s rostoucím počtem kontur roste účinek CI, a to jak co do magnitudy, tak do rozsahu. Rozdíl mezi jednotlivými hodnotami a typy disparity se však nezdá nijak zásadní. Tato tvrzení podporují i výsledky statistické analýzy, která zjistila signifikantní vliv separace ($p < 0,0001$) a počtu kontur ($p = 0,001$), vliv disparity se ale nepotvrdil ($p = 0,65$). Dále byl signifikantní vliv interakce počtu a separace kontur ($p < 0,0001$), který lze interpretovat jako rychlejší pokles četnosti správných odpovědí s klesající separací (tj. větší rozsah CI) pro čtyři kontury oproti dvěma konturám. Post-hoc testy prokázaly, že CI je v případě čtyř kontur silnější než v případě dvou kontur od 60% separace. U dvou kontur se četnost správné identifikace liší od výchozí hladiny až pro poslední dvě separace (10 %, 20 %), tj. od hodnoty asi 0,56', zatímco u čtyř kontur pro čtyři poslední separace (10 %, 20 %, 40 %, 60 %), tj. od hodnoty asi 1,7'. Interakce disparity a počtu kontur stejně jako vzájemná interakce disparity, počtu a separace nejsou významné ($p = 0,49$ a $p = 0,28$).

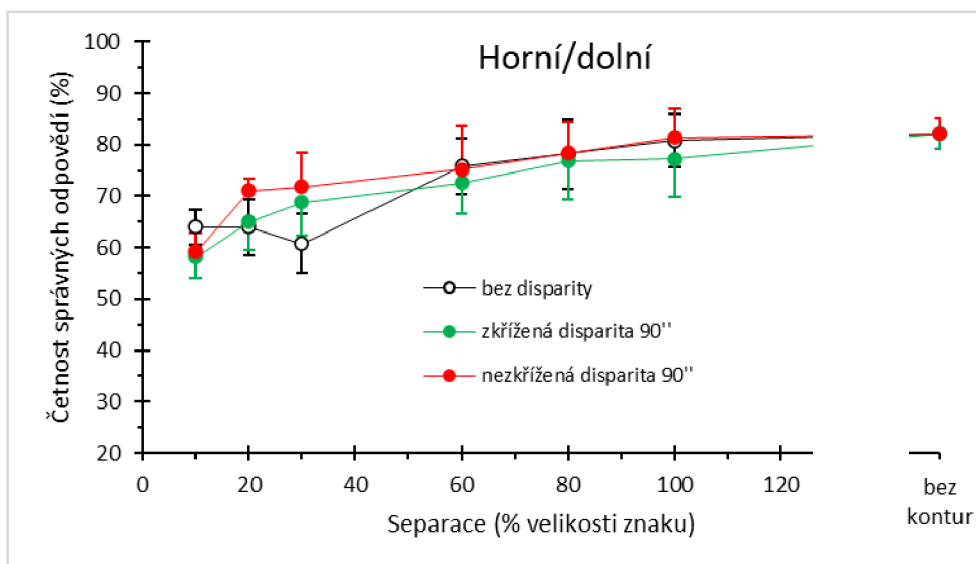
Pro CI je typické mírné zlepšení identifikace znaků při nízkých separacích (Siderov a kol. 2020). Z grafů (obr. 8-10) je patrné, že tento efekt v průměru nastal při čtyřech konturách bez disparity a se zkříženou disparitou, při konturách nahoře a dole nastal pouze bez disparity a při konturách vlevo a vpravo vůbec nenastal. Lze tedy shrnout, že ke zlepšení identifikace u malých separací dochází spíše bez disparity než s disparitou. Tento efekt však nebyl statisticky potvrzen, jelikož interakce separace, disparity a počtu kontur byla nesignifikantní.

Tabulka 1: Velikost znaků v $\log MUR$ a pravděpodobnost P jejich správné identifikace bez zobrazených kontur u jednotlivých probandů a v průměru; uvedena je též směrodatná odchylka SD

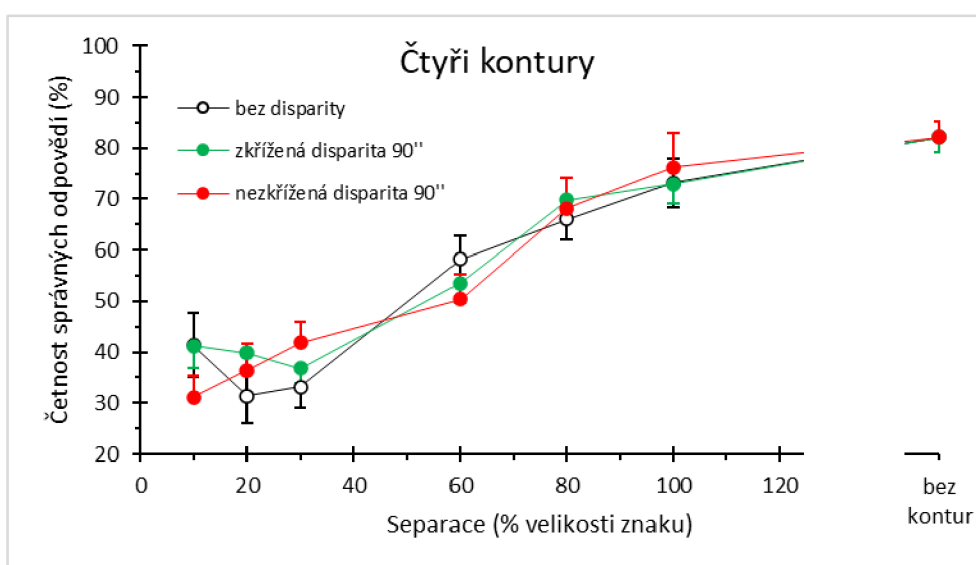
| Proband | EB | FP | HB | LB | MW | průměr | SD |
|------------|------|------|-------|------|------|--------|------|
| $\log MUR$ | -0,3 | -0,2 | -0,15 | -0,3 | -0,3 | -0,25 | 0,07 |
| P (%) | 77,3 | 74,0 | 87,7 | 81,9 | 89,9 | 82,2 | 6,7 |



Obrázek 8: Průměrná závislost četností správných odpovědí všech pěti probandů na separaci dvou kontur umístěných vpravo a vlevo od centrálního znaku; prázdná kolečka reprezentují data měřená bez disparity, zelená kolečka představují data měřená se zkříženou disparitou 90" a červená s nezkříženou disparitou 90", chybové úsečky udávají velikost standardní chyby průměru



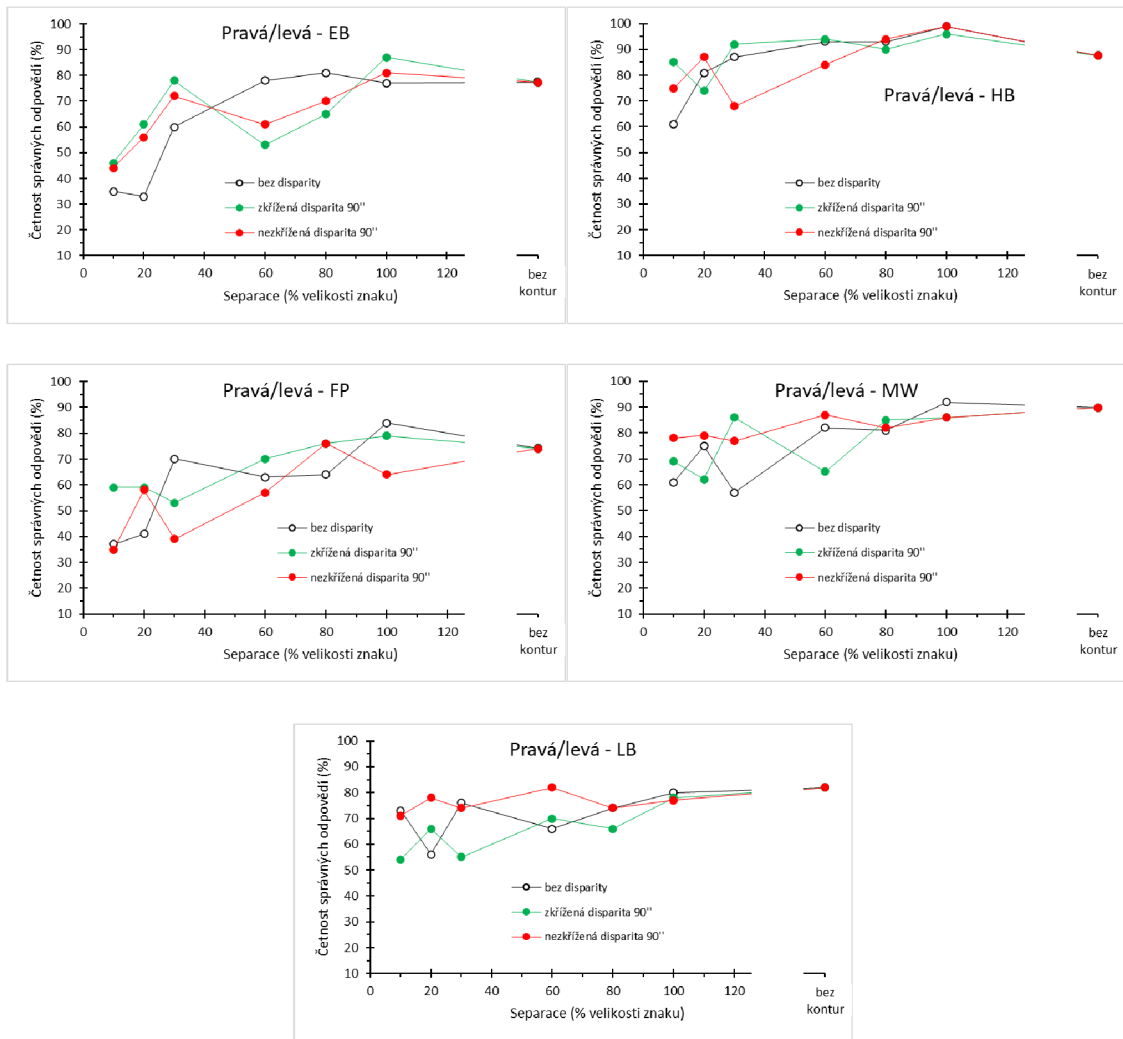
Obrázek 9: Průměrná závislost četnosti správných odpovědí všech pěti probandů na separaci dvou kontur umístěných nad a pod centrálním znakem; prázdná kolečka reprezentují data měřená bez disparity, zelená kolečka představují data měřená se zkříženou disparitou 90" a červená s nezkříženou disparitou 90", chybové úsečky udávají velikost standardní chyby průměru



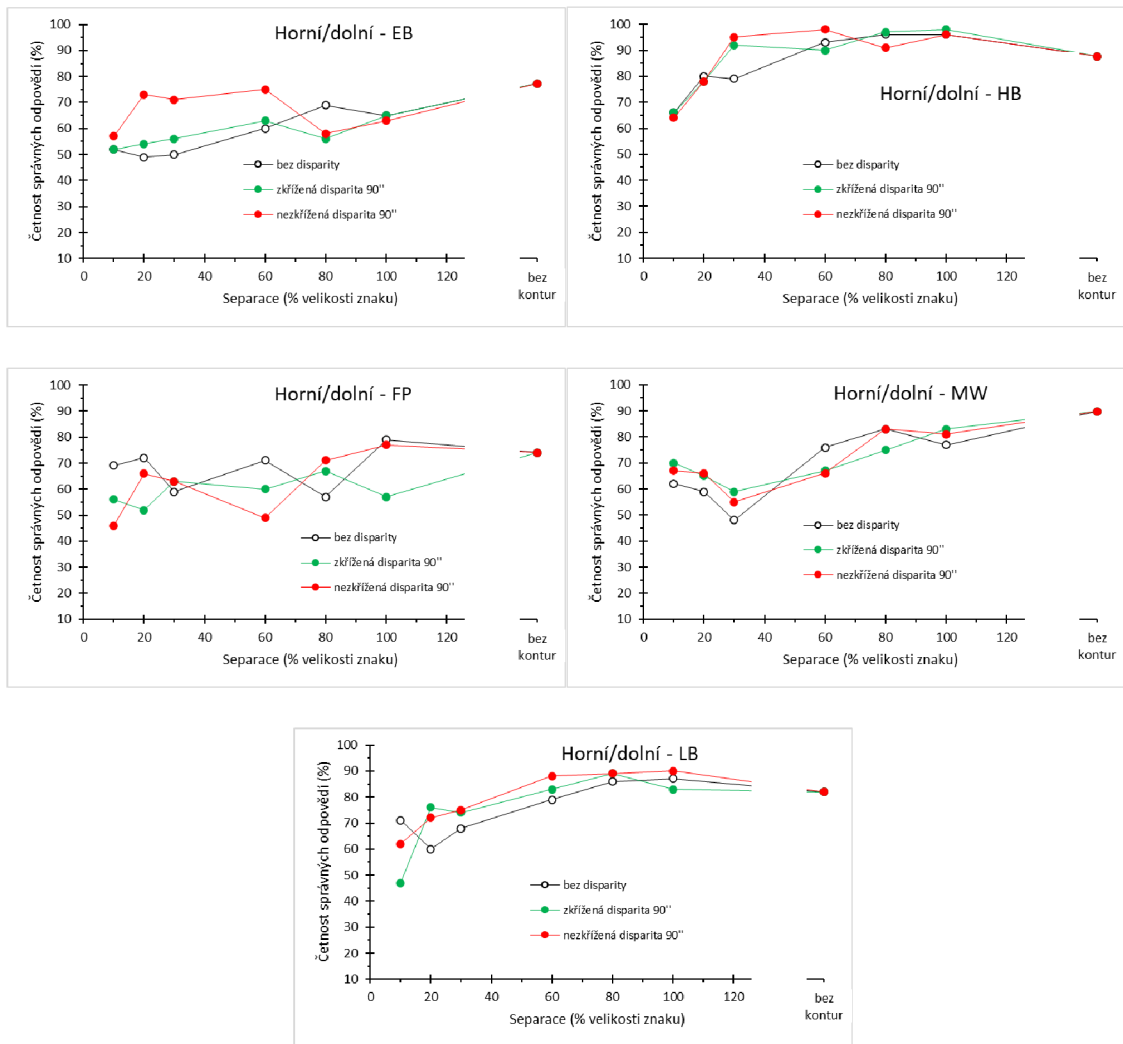
Obrázek 10: Průměrná závislost četnosti správných odpovědí všech pěti probandů na separaci všech čtyř kontur umístěných napravo, nalevo, nahoře a dole od centrálního znaku; prázdná kolečka reprezentují data měřená bez disparity, zelená kolečka představují data měřená se zkříženou disparitou 90" a červená s nezkříženou disparitou 90", chybové úsečky udávají velikost standardní chyby průměru

Pro ilustraci jsou na obr. 11-13 uvedeny hodnoty relativních četností správné identifikace písmen samostatně pro jednotlivé subjekty v případě kontur nahoře/dole, vlevo/vpravo nebo čtyř kontur. Z grafů je viditelný výrazný vliv separace ze všech sledovaných podmínek (počet a disparita kontur), kdy téměř ve všech případech dochází k poklesu správné identifikace s klesající separací. Pokles je největší pro čtyři kontury. Stejně tak lze pozorovat patrný vliv počtu kontur, kdy s rostoucím počtem kontur roste účinek CI. Tento účinek je nejvýraznější v případě čtyř kontur u subjektu HB, kde oproti konturám nahoře/dole a vlevo/vpravo dochází u nižších separací k výraznějšímu poklesu četnosti správných odpovědí. V případě čtyř kontur je u všech subjektů viditelný výraznější pokles relativní četnosti správné identifikace písmen u separací 60 % a nižší. Významný vliv disparity není u většiny probandů patrný, pouze u EB je CI konzistentně za všech podmínek při malé separaci mírně silnější bez disparity. Rozdíly však nejsou nijak velké.

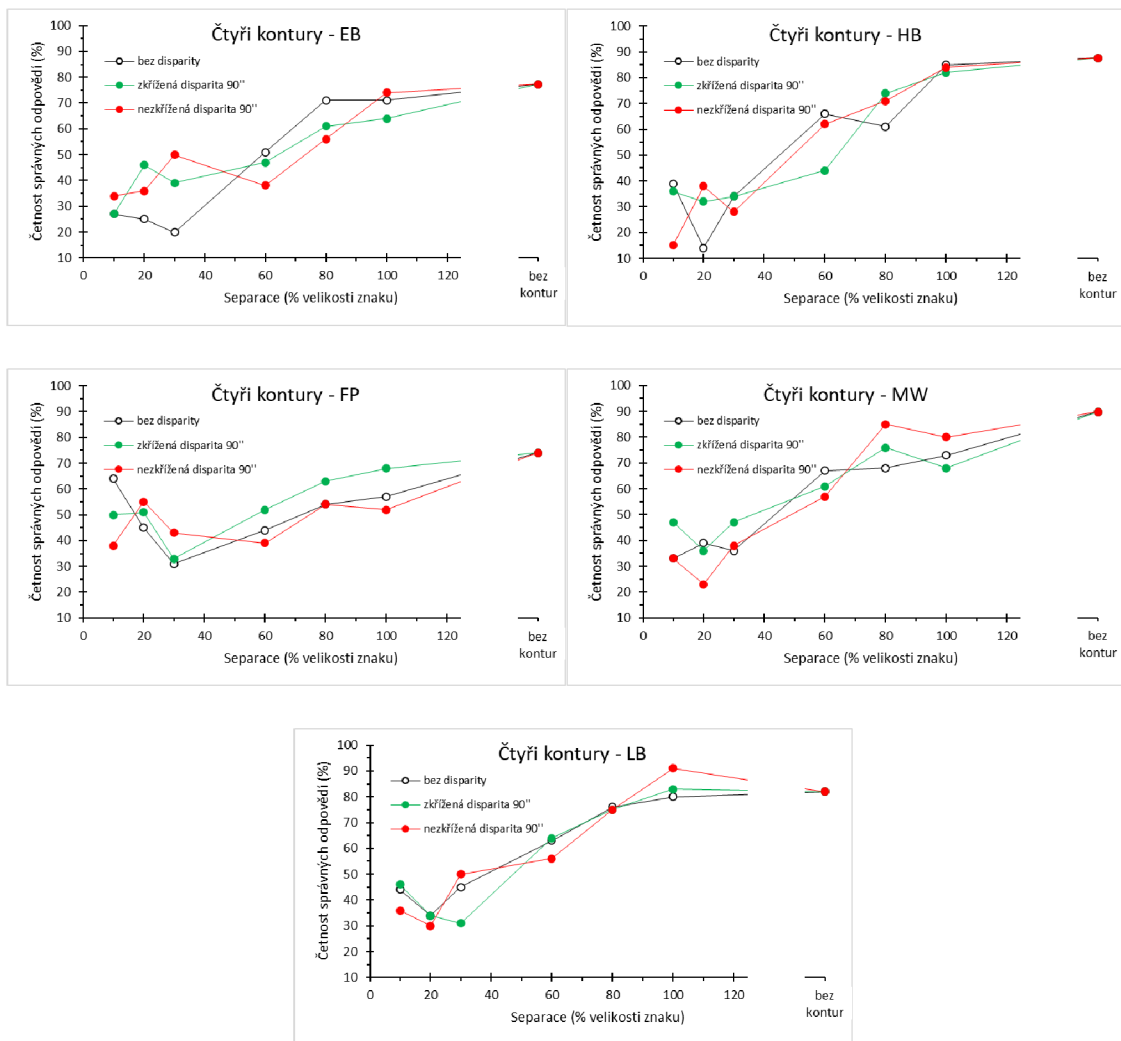
Stejně jako u průměrných grafů (obr. 8-10), i u individuálních dat (obr. 11-13) je možné v některých případech pozorovat mírné zlepšení u malých separací. Nejčastěji a nejvýrazněji se v našem experimentu objevuje v případě separace bez disparity, a to zejména v případě čtyř kontur. Tato skutečnost však není obecně patrná u kontur nahoře/dole a vlevo/vpravo. Výjimku tvoří dva probandi. V případě probanda LB je patrné mírné zlepšení v úspěšnosti rozpoznání znaku u kontur bez disparity vlevo/vpravo a nahoře/dole a u probanda MW se objevuje zlepšení v případě kontur nahoře/dole, a to jak u disparity, tak bez ní. Dílčí data jednotlivých subjektů jsou ve shodě s předešlou analýzou.



Obrázek 11: Hodnoty relativních četností správné identifikace písmen samostatně pro jednotlivé subjekty v případě dvou kontur umístěných vpravo a vlevo od centrálního znaku



Obrázek 12: Hodnoty relativních četností správné identifikace písmen samostatně pro jednotlivé subjekty v případě dvou kontur umístěných nad a pod centrálním znakem



Obrázek 13: Hodnoty relativních četností správné identifikace písmen samostatně pro jednotlivé subjekty v případě čtyř kontur

3.4 Diskuse

Výsledky experimentální části naznačují, že disparita kontur nemá na foveální CI žádný významný vliv. Náš původní předpoklad o vlivu disparity na CI se tedy neprokázal. Oproti tomu počet kontur CI významně ovlivnil – s počtem kontur účinek CI rostl. Způsob rozmístění kontur při daném počtu (nahore/dole a vlevo/vpravo) však sílu nebo rozsah interakce podstatně neovlivňuje.

Dříve publikované studie (Flom a kol. 1963a, Musilová a kol. 2018, Siderov a kol. 2013, Flom 1991, Pluháček & Siderov 2018) potvrzují, že přítomnost flankerů má značný vliv na čitelnost a rozpoznatelnost pozorovaného znaku, jelikož při prezentaci flankerů docházelo ke snížené čitelnosti daných znaků oproti situaci, kde flankery nebyly přítomny. Flom a kol. (1963a) ve své studii uvedli, že v případě, že kontury i centrální znak jsou současně prezentovány jednomu oku, tedy ipsilaterálně, dochází ke vzniku CI. Výsledky našeho experimentu potvrdily, že ve fovee je za binokulárních podmínek CI přítomna, jak již bylo prokázáno předchozími studii (např. Saiym a kol. 2008, Zbraňková 2021). Také rozsah se v případě čtyř kontur řádově shoduje (jednotky úhlových minut), přičemž náš experiment uvádí oproti předchozím monokulárním experimentům (např. Musilová a kol. 2018, Pluháček & Siderov 2018) poněkud nižší hodnoty. To může být způsobeno binokulární sumací, díky které je za binokulárních podmínek dosahováno vyšších hodnot zrakové ostrosti a lze tedy očekávat i mírně nižší rozsah CI.

V oblasti vlivu disparity flankerů jsou však předchozí studie (Kooi a kol. 1994, Saiym a kol. 2008, Astle a kol. 2014) s našimi daty v rozporu, jelikož vykazují zřetelný dopad disparity na účinek okolních kontur či znaků. V případě studií Astle a kol. (2014) a Kooi a kol. (1994) může být za příčinu rozdílů považována odlišná retinální lokace – náš experiment sleduje foveální oblast, zatímco obě zmiňované studie se soustředí především na periferii. Přitom je známo, že jak CI, tak CW se v periferii chovají oproti fovee odlišně (Marten-Ellis & Bedell 2021), čehož příčinou je pravděpodobně odlišný funkční mechanismus. Naše výsledky by tedy mohly domněnku o odlišnosti periferních a foveálních mechanismů potvrzovat. Jelikož některé předchozí studie naznačují, že typ flankerů (kontury x písmena) může i ve fovee ovlivňovat účinek interakce (Pluháček a kol. 2021), byť rozdíl není tak výrazný jako v periferii, může být dalším zásadním rozdílem právě použitý typ flankerů – kontury v našem případě a písmena či flankery

podobné centrálnímu znaku v předchozích studiích. Komplexnější flankery, podobné centrálnímu znaku, mohou totiž vyvolat silnější interakci a případné drobné rozdíly mezi pozorovanými podmínkami tak mohou být zřetelnější. Studie Saiym a kol. (2008), která také prokázala vliv disparity, resp. prostorového zobrazení kontur, se oproti výše diskutovaným dvěma pracem svými podmínkami více blíží našemu experimentu – věnuje se CI ve fovee. Zásadním rozdílem však je typ centrálního znaku – Saiym a kol. (2008) hodnotí noniový optotyp, který se může oproti námi využívanými písmenům chovat specificky. Lze předpokládat, že nonius může detekovat menší rozdíly ve zrakovém výkonu než klasický písmenkový optotyp a že i drobné rozdíly, které se v našich datech neprojeví, jím mohly být zachyceny. Příčinou rozdílů také může být vyšší počet použitých kontur, který může opět posílit účinek CI. V naší studii jsme centrální znak obklopili maximálně jednou konturou z každé strany, Saiym a kol. (2008) použili vždy celou sadu kontur. Zjištěný nesoulad mezi našimi výsledky a výsledky stávajících studií tedy může být způsoben odlišnými mechanismy, které mohou souviset s odlišnou sítnicovou lokací, využívanou v různých studiích, nebo typem použitých flankerů. Pro potvrzení těchto hypotéz by mohl být námi provedený foveální experiment zopakován pro foveální CW nebo periferní CI.

Vedlejším výsledkem našeho měření je ověření funkčnosti použitého stereoskopu. Tento stereoskop byl původně sestaven v rámci diplomové práce (Zbraňková 2021). V původní práci však autorka uvádí značnou nestabilitu vjemu, projevující se nežádoucím posunem či pohybem kontur oproti testovanému písmenu, případně supresí části stimulu. U probandů tudíž nedocházelo k dokonalé fúzi. Autorka vyslovila domněnku, že nestabilitu působí absence společného fúzního podnětu pro obě oči. V našem případě, kdy centrální znak byl vždy promítán do obou očí současně, nebyly uvedené efekty pozorovány, binokulární vjem byl úplný a stabilní. To uvedenou domněnku potvrzuje.

Závěr

Práce shrnuje základní údaje o crowdingu a konturové interakci. První kapitola teoretické části popisuje základní informace týkající se zrakové ostrosti a binokulárního vidění. Popisuje zrakovou ostrost, její měření a stručnou charakteristiku optotypů. Právě zraková ostrost s konturovou interakcí a crowdingem úzce souvisí. Ve druhé části se kapitola zabývá úvodem do binokulárního vidění, včetně popisu senzoričkových vlastností a stereopse, která byla důležitým aspektem v naší experimentální části. Důležitou součástí byl také popis stereoskopů obecně, včetně popisu stereoskopické soustavy, která byla sestavena v rámci diplomové práce (Zbraňková 2021) a využita v rámci této diplomové práce.

Druhá kapitola se zabývá popisem crowdingu a konturové interakce a jejich charakteristikou pomocí magnitudy, rozsahu a měření separace. Rozebírá metody jejího měření. Také porovnává rozdílné chování crowdingu a konturové interakce v periférii a ve fovee a vliv excentricity stimulu na ně. Zatímco ve fovee je chování těchto dvou jevů velmi podobné, v periférii se crowding a konturová interakce výrazně liší jak rozsahem, tak magnitudou. Další podkapitola zkoumá odlišné teorie popisující mechanismy konturové interakce a crowdingu. Za hlavní příčinu vzniku crowdingu a konturové interakce jsou v současnosti považovány různé neurální mechanismy, tj. neurální interakce neuronů zrakové dráhy. Jelikož ke vzniku konturové interakce dochází jak za monokulárních (kontury i centrální znak jsou současně prezentovány jednomu oku), tak za binokulárních podmínek (kdy kontury jsou prezentovány jednomu oku a centrální znak oku druhému), znamená to tedy, že ke vzniku konturové interakce musí docházet v místě zrakové dráhy, kde se informace z obou očí spojují. Je tedy pravděpodobné, že ke vzniku konturové interakce dochází v corpus geniculatum laterale nebo dále ve zrakové dráze.

V rámci experimentální části byl prokázán významný vliv separace kontur na rozpoznatelnost centrálního znaku, přičemž s rostoucím počtem kontur rostl i účinek konturové interakce, a to jak z pohledu magnitudy, tak rozsahu. Vliv disparity kontur na konturovou interakci se ovšem v rámci této experimentální části neprokázal. Také se neprokázal významný rozdíl v hodnotách různých typů zvolené disparity. Jako signifikantní se prokázal vliv interakce počtu a separace kontur, kdy v případě čtyř kontur oproti dvěma konturám se u separace 60 % a níže projevila konturová interakce silnější a docházelo k rychlejšímu poklesu četnosti správných odpovědí, tj. s počtem kontur rostl účinek konturové interakce.

Naše výsledky nejsou v souladu s údaji z některých předchozích studií, které naopak vliv disparity potvrdily. Příčinou může být odlišná retinální lokace. Zatímco v případě našeho experimentu jsme se zaměřovali na foveální oblast, některé předchozí studie (Astle a kol. 2014, a Kooi a kol. 1994) sledovali především periferii. Naše závěry by tedy mohly potvrzovat domněnku o odlišnosti periferních a foveálních mechanismů konturové interakce. Další možnou příčinou je množství použitých kontur, jelikož v našem experimentu byla použita pouze jedna kontura z každé strany, přičemž např. studie Saiym a kol. (2008) použila sadu kontur.

V rámci naší experimentální části došlo také k ověření funkčnosti a využitelnosti stereoskopu, který byl sestaven v rámci diplomové práce (Zbraňková 2021), pro účely sledování foveální konturové interakce. Nestabilita vjemu, kterou autorka stereoskopu udává, a která zapříčinila u jejich probandů nedostatečnou fúzi, zde byla vyřešena pomocí společného fúzního podnětu pro obě oči. Nežádoucí efekty uvedené autorkou, zde tudíž nebyly pozorovány.

Seznam použité literatury

Andriessen JJ, Bouma H. Eccentric vision: adverse interactions between line segments. *Vision Res.* 1976;16(1):71-78. doi:10.1016/0042-6989(76)90078-x

Astle AT, McGovern DP, McGraw PV. Characterizing the role of disparity information in alleviating visual crowding. *J Vis.* 2014;14(6):8. doi:10.1167/14.6.8

Aubert H, Foerster R. Beitdage zur Kenntnisse des indirekten Sehens. *Griifes Archiv ftir Ophthalmologic.* 1857; 3: 1–37.

Bedell HE, Siderov J, Pluháček F. Contrast energy and contour interaction. *Optom Vis Sci.* 2019; 96: 940–947. doi: 10.1097/OPX.0000000000001457

Bedell HE, Siderov J, Waugh SJ, Zemanová R, Pluháček F, Musilová L. Contour interaction for foveal acuity targets at different luminances. *Vision Res.* 2013;89:90-95. doi:10.1016/j.visres.2013.07.009

Benjamin WJ. *Borish's Clinical Refraction.* USA: Butterworth Heinemann - Elsevier Science Inc; 2006.

Bouma H. Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature.* 1970; 226(5241):177-8. doi: 10.1038/226177a0

Dakin SC, Cass J, Greenwood JA, Bex PJ. Probabilistic, positional averaging predicts object-level crowding effects with letter-like stimuli. *J Vis.* 2010;10(10):14. doi:10.1167/10.10.14

Danilova MV, Bondarko VM. Foveal contour interactions and crowding effects at the resolution limit of the visual system. *J Vis.* 2007;7(2):1–18.

Davage RH, Summer FC. *J. Psychol.* 1950; 30:191

Flom MC, Heath GG, Takahashi E. Contour Interaction And Visual Resolution: Contralateral Effects. *Science.* 1963a; 142(3594):979-80. doi:10.1126/science.142.3594.979

Flom MC, Weymouth FW, Kahneman D. Visual resolution and contour interaction. *Journal of the Optical Society of America.* 1963b;53:1026-1032. doi:10.1364/josa.53.001026

Flom MC. Contour interaction and the crowding effect. In *Problems in Optometry*. Philadelphia: J. B. Lippincott Co. 1991; 2: 237–257.

Flom MC. Contour interaction and the crowding effect. *Problems in Optometry*. 1991;3(2):237–257.

Freeman J, Chakravarthi R, Pelli DG. Substitution and pooling in crowding. *Attention, perception & psychophysics*. 2012;74(2):379-396. doi:10.3758/s13414-011-0229-0

Greenwood JA, Bex PJ, Dakin SC. Positional averaging explains crowding with letter-like stimuli. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2009;106(31):13130-13135. doi:10.1073/pnas.0901352106

Hanus D, Vul E. Quantifying error distributions in crowding. *J Vis*. 2013;13(4):17. doi:10.1167/13.4.17

Hariharan S, Levi DM, Klein SA. “Crowding” in normal and amblyopic vision assessed with Gaussian and Gabor C’s. *Vision Res*. 2005; 45: 617–633.

Herzog MH, Manassi M. Uncorking the bottleneck of crowding: a fresh look at object recognition. *Current Opinion in Behavioral Sciences*. 2015;1:86-93

Hess RF, Dakin SC, Kapoor N, Tewfik M. Contour interaction in fovea and periphery. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*. 2000a;17(9):1516-1524. doi:10.1364/josaa.17.001516

Hess RF, Dakin SC, Kapoor N. The foveal 'crowding' effect: physics or physiology? *Vision Res*. 2000b;40(4):365-370. doi:10.1016/s0042-6989(99)00193-5

Howard IP, Rogers BJ. *Perceiving in Depth, Vol. 2: Stereoscopic Vision*. Oxford University Press; 2012.

Hubel DH. *Eye, Brain, and Vision*. New York: Scientific American Library; 1995.

Chung ST, Levi DM, Legge GE. Spatial-frequency and contrast properties of crowding. *Vision Res*. 2001;41(14):1833-1850. doi:10.1016/s0042-6989(01)00071-2

Kooi FL, Toet A, Tripathy SP, Levi DM. The effect of similarity and duration on spatial interaction in peripheral vision. *Spat Vis*. 1994;8(2):255-279. doi:10.1163/156856894x00350

- Krimsky E. The Stereoscope in theory and practice, also a new precision type stereoscop. *Br J Ophthalmol.* 1937;21(4):161-197
- Kuchynka P. *Oční lékařství. 2., přepracované a doplněné vydání.* Praha: Grada Publishing; 2016.
- Latham K, Whitaker D. Relative roles of resolution and spatial interference in foveal and peripheral vision. *Ophthalmic Physiol Opt.* 1996;16(1):49-57.
- Lee J-S. *Primary Eye Examination: A Comprehensive Guide to Diagnosis.* New York: Springer Berlin Heidelberg; 2019.
- Levi DM, Hariharan S, Klein SA. Suppressive and facilitatory spatial interactions in amblyopic vision. *Vision Res.* 2002a; 42: 1379-1394
- Levi DM, Hariharan S, Klein SA. Suppressive and facilitatory spatial interactions in peripheral vision: peripheral crowding is neither size invariant nor simple contrast masking. *J Vis.* 2002b;2(2):167-177. doi:10.1167/2.2.3
- Levi DM, Klein SA, Hariharan S. Suppressive and facilitatory spatial interactions in foveal vision: Foveal crowding is simple contrast masking. *J Vis.* 2002c;2(2): 140–166
- Levi DM, Klein SA. Vernier acuity, crowding and amblyopia. *Vision Res.* 1985;25(7):979-991. doi:10.1016/0042-6989(85)90208-1
- Levi DM. Crowding – an essential bottleneck for object recognition: a mini-review. *Vision Res.* 2008;48(5):635-654. doi:10.1016/j.visres.2007.12.009
- Levin, Leonard A, Kaufman PL. *Adler's Physiology Of The Eye: Clinical Application.* 11.vyd. New York: Elsevier/Sounders; 2011.
- Liu L, Arditi A. How crowding affects letter confusion. *Optom Vis Sci.* 2001;78(1):50-55
- Louie EG, Bressler DW, Whitney D. Holistic crowding: selective interference between configural representations of faces in crowded scenes. *J Vis.* 2007;7(2):1-11. doi:10.1167/7.2.24
- Martelli M, Majaj NJ, Pelli DG. Are faces processed like words? A diagnostic test for recognition by parts. *J Vis.* 2005;5(1):6. doi: <https://doi.org/10.1167/5.1.6>

Marten-Ellis SM, Bedell HE. A Comparison of Foveal and Peripheral Contour Interaction and Crowding. *Optom Vis Sci.* 2021;98(1):41-50. doi:10.1097/OPX.0000000000001625

Marten-Ellis SM, Bedell HE. Do different mechanisms mediate contour interaction and crowding in the fovea and visual periphery? *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2015;56(7):2213.

Musilová L, Pluháček F, Marten-Ellis SM, Bedell HE, Siderov J. Contour interaction under photopic and scotopic conditions. *J Vis.* 2018;18(6):5. doi: <https://doi.org/10.1167/18.6.5>

Musilová L. Psychofyzikální měření zrakových funkcí: crowding a konturová interakce [disertační práce]. Olomouc: Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, Katedra optiky; 2019.

Norgett Y, Siderov J. Foveal crowding differs in children and adults. *J Vis.* 2014;14(12). doi: 10.1167/14.12.23

Norton TT, Corliss DA, Bailey JE. *The Psychophysical Measurement of Visual Function.* Boston: Butterworth-Heinemann; 2002.

Ošťadalová J. Crowding fenomén. *Česká Oční Optika.* 2015;56:10-14.

Pelli DG, Palomares M, Majaj NJ. Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection. *J Vis.* 2004; 4:1136 - 1169. doi: 10.1167/4.12.12. ISSN 1534-7362.

Pluháček F, Bedell HE, Siderov J, Kratkoczká D. Technical Report: The Mechanism of Contour Interaction Differs in the Fovea and Periphery. *Optom Vis Sci.* 2020;97(12):1053-1060. doi:10.1097/OPX.0000000000001615

Pluháček F, Musilová L, Bedell HE, Siderov J. Number of flankers influences foveal crowding and contour interaction differently. *Vis Res.* 2021;179(18):9. doi: 10.1016/j.visres.2020.11.002.

Pluháček F, Siderov J, Macháčová I. Crowding can impact both low and high contrast visual acuity measurements. *Sci Rep.* 2022;12(1):16338.

Pluháček F, Siderov J. Mesopic visual acuity is less crowded. *Graves Arch Clin Exp Ophthalmol.* 2018; 256(9):1739-1746.

- Rashal E, Yeshurun Y. Contrast dissimilarity effects on crowding are not simply another case of target saliency. *J Vis.* 2014; 14(9). doi:10.1167/14.6.9
- Reich LN, Bedell HE. Relative Legibility and Confusions of Letter Acuity Targets in the Peripheral and Central Retina. *Optom Vis Sci.* 2000;77:270-275)
- RF, Dakin SC, Kapoor N. The foveal 'crowding' effect: physics or physiology? *Vision Res.* 2000;40(4):365-370.
- Rozsival P. *Oční lékařství.* Praha: Galén; 2006.
- Ryan SJ. *Retina.* 5 vyd. London: Saunders/Elsevier; 2013.
- Sayim B, Westheimer G, Herzog MH. Contrast polarity, chromaticity, and stereoscopic depth modulate contextual interactions in vernier acuity. *J Vis.* 2008;8(8):1-9. doi:10.1167/8.8.12
- Siderov J, Pluháček F, Bedell HE. Upturn of the contour-interaction function at small flanking bar-to-target separations. *Vision Res.* 2020; 167: 1–7. doi:10.1016/j.visres.2019.12.003
- Siderov J, Waugh SJ, Bedell HE. Foveal contour interaction for low contrast acuity targets. *Vision Res.* 2013;77:10 – 13
- Siderov J, Waugh SJ, Bedell HE. Foveal contour interaction on the edge: response to 'Letter-to-the-Editor' by Drs. Coates and Levi. *Vision Res.* 2014;96:145-148. doi:10.1016/j.visres.2013.12.012
- Simunovic MP, Calver R. Crowding under scotopic conditions. *Vision Res.* Elsevier. 2004;44:(963-969). doi:10.1016/j.visres.2003.11.019
- Strasburger H, Harvey LO, Rentschler I. Contrast thresholds for identification of numeric characters in direct and eccentric view. *Perception & Psychophysics.* 1991;49(6):495-508
- Synek S, Skorkovská Š. *Fyziologie vidění, 2., doplněné a přepracované vydání.* Praha: Grada Punlishnig, a. s.; 2014.
- Takahshi ES. *Effects of Flanking Contours on Visual Resolution at Foveal and Near-Foveal Loci [doctoral dissertation].* Berkeley: University of California; 1968.
- Toet A, Levi DM. The two-dimensional shape of spatial interaction zones in the parafovea. *Vision Res.* 1992;32(7):1349-1357.

- Tripathy SP, Cavanagh P. The extent of crowding in peripheral vision does not scale with target size. *Vision Res.* 2002;42(20):2357-2369. doi:10.1016/s0042-6989(02)00197-9
- Tunnacliffe AH. Introduction to visual optics. 4 vyd. Godmersham Park: Association of British Dispensing Opticians; 1993.
- Veselý P, Beneš P. Vyšetřovací metody v optometrii a interpretace jejich výsledků. Praha: Grada Publishing, a.s.; 2019.
- Westheimer G, Hauske G. Temporal and spatial interference with vernier acuity. *Vision Res.* 1975;15:1137-1141. doi:10.1016/0042-6989(75)90012-7
- Westheimer G, Shimamura K, McKee SP. Interference with line-orientation sensitivity. *J Opt Soc Am.* 1976;66(4):332-338. doi:10.1364/josa.66.000332
- Whitney D, Levi DM. Visual crowding: a fundamental limit on conscious perception and object recognition. *Trends Cogn Sci.* 2011;15(4):160-168. doi:10.1016/j.tics.2011.02.005
- Wolford G, Chambers L. Contour interaction as a function of retinal eccentricity. *Perception & Psychophysics.* 1984;36(5):457-460. doi:10.3758/bf03207498
- Zadnik K. The Ocular Examination Measurements and Finding. Philadelphia: W.B. Saunders; 1997.
- Zbraňková K. Konturová interakce za dichoptických podmínek [diplomová práce]. Olomouc: Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, Katedra optiky; 2021.
- Zhang JY, Zhang GL, Liu L, Yu C. Whole report uncovers correctly identified but incorrectly placed target information under visual crowding. *J Vis.* 2012;12(7):5. doi:10.1167/12.7.5