

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO
V OLOMOUCI

KATEDRA OPTIKY



**KONTUROVÁ INTERAKCE
ZA DICHOPTICKÝCH PODMÍNEK**

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Kristýna Zbraňková

Obor. číslo: 5345T008 Optometrie

Studijní rok: 2020/2021

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

doc. RNDr. František Pluháček, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Konturová interakce za dichoptických podmínek vypracovala samostatně pod vedením doc. RNDr. Františka Pluháčka, Ph.D. a za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne: 30. 4. 2021

.....

Bc. Kristýna Zbraňková

Poděkování:

Tímto bych chtěla moc poděkovat vedoucímu mé práce doc. RNDr. Františkovi Pluháčkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi v průběhu psaní práce poskytnul a velmi mi tím pomohl při zpracování.

Tato práce byla vytvořena za podpory projektů IGA PrF UP v Olomouci s názvem “Optometrie a její aplikace“, č. IGA_PrF_2020_008 a IGA_PrF_2021_012.

OBSAH

ÚVOD.....	6
1 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU ZRAKOVÝM APARÁTEM	8
1.1 ANATOMIE ZRAKOVÉ DRÁHY	8
1.2 SÍTNICE	9
1.3 NERVOVÉ BUŇKY SÍTNICE	9
1.4 KŘÍŽENÍ NERVOVÝCH VLÁKEN	11
1.5 ZRAKOVÁ KŮRA.....	12
2 MECHANISMY ZPRACOVÁNÍ VIZUÁLNÍ INFORMACE	15
2.1 INFORMAČNÍ KANÁLY.....	15
2.2 RECEPTIVNÍ POLE NEURONŮ	16
2.3 RECEPTIVNÍ POLE GANGLIOVÝCH BUNĚK	17
2.4 RECEPTIVNÍ POLE BUNĚK CORPUS GENICULATUM LATERALE	18
2.5 RECEPTIVNÍ POLE BUNĚK ZRAKOVÉ KŮRY	18
2.5.1 HVĚZDICOVITÉ NEURONY.....	20
2.5.2 JEDNODUCHÉ BUŇKY	20
2.5.3 KOMPLEXNÍ BUŇKY	21
3 ZRAKOVÁ OSTROST OKA A BINOKULÁRNÍ VIDĚNÍ	22
3.1 CENTRÁLNÍ A PERIFERNÍ ZRAKOVÁ OSTROST	23
3.2 VYŠETŘENÍ ZRAKOVÉ OSTROSTI	23
3.3 KONSTRUKCE OPTOTYPŮ.....	24
3.4 BINOKULÁRNÍ VIDĚNÍ	26
3.4.1 STEREOSKOPICKÉ (PROSTOROVÉ) VIDĚNÍ.....	28
3.4.2 TYPY STEREOSKOPŮ	30
4 CROWDING FENOMÉN A KONTUROVÁ INTERAKCE.....	33
4.1 DEFINICE A CHARAKTERISTIKA	33
4.2 KONTUROVÁ INTERAKCE A CROWDING ZA DICHOPTICKÝCH PODMÍNEK .	36
4.3 PŮVOD CROWDINGU A KONTUROVÉ INTERAKCE.....	37
4.4 DŮSLEDKY KONTUROVÉ INTERAKCE A CROWDING FENOMÉNU	40
5 PRAKTICKÁ ČÁST.....	43
5.1 SESTAVA PRO DICHOPTICKÉ ZOBRAZENÍ.....	43
5.2 SOUBOR	46
5.3 METODIKA	46
5.3.1 STIMUL.....	46

5.3.2 POSTUP MĚŘENÍ.....	48
5.3.3 ANALÝZA DAT	48
5.4 VÝSLEDKY	49
5.5 DISKUSE.....	52
ZÁVĚR.....	55
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	57

ÚVOD

Tato práce se zaměřuje na analýzu zrakových funkcí, a to zejména na konturovou interakci a crowding fenomén. Jedná se o jevy, při kterých okolí pozorovaného objektu negativně ovlivňují rozlišovací schopnost oka, přičemž se jejich účinek projeví především snížením zrakové ostrosti. Předpokládá se, že oba jevy mají neurální původ a jejich chování tak do značné míry odráží mechanismy zpracování signálu ve zrakové dráze. S ohledem na její anatomii lze rozlišit části, kde je zpracováván signál monokulární, a kde již dochází ke kombinaci vjemu z obou očí. Na otázku, v kterých částech zrakové dráhy může ke vzniku těchto jevů docházet, tak mohou odpovědět experimenty, při kterých je konturová interakce nebo crowding pozorován tzv. dichopticky, tedy kdy jsou tyto jevy vytvářeny kombinací odlišných vjemů obou očí.

Cílem teoretické části této práce je jednak poskytnout dostatečný teoretický základ pro pochopení základních procesů zpracování zrakového signálu, na kterých mohou oba sledované jevy stavět, jednak shrnout stávající znalosti o těchto jevech s ohledem na dichoptickou prezentaci příslušných stimulů. Za tímto účelem je teoretická část rozdělena do čtyř kapitol. V první kapitole je rozebrána anatomie zrakové dráhy a zpracování světelného signálu v jednotlivých jejích vrstvách. Navazuje kapitola věnující se zejména receptivním polím, která hrají významnou roli při detekci světelného signálu vstupujícího do zrakového aparátu a také při jeho zpracování zejména na neurální úrovni korových center. Právě receptivní pole zřejmě hrají významnou roli při vzniku crowdingu a konturové interakce. Třetí kapitola se věnuje definici zrakové ostrosti jako jednoho ze základních popisných parametrů zraku, možnostem jejího měření a také popisem konstrukce optotypů, která, jak se ukazuje, musí mimo jiné respektovat vlastnosti crowdingu a konturové interakce. Jelikož následující experimentální část cílí na zmiňované dichoptické stimuly, jsou v této kapitole dále stručně shrnuta vybraná témata z oblasti binokulárního vidění včetně možnosti vytvoření dichoptického zobrazení pomocí stereoskopu. Poslední kapitola teoretické části je zaměřena na popis a charakteristiku crowdingu a konturové interakce včetně jejich chování při dichoptické prezentaci stimulu na základě rešerše dostupných odborných studií.

Experimentální část, prezentovaná v kapitole 5, má dva stěžejní cíle. Prvním je sestavit zrcadlový stereoskop, který by s využitím LCD monitorů a vhodného počítačového programu byl vhodný k dichoptické prezentaci stimulu navozujícího konturovou interakci, a ověřit jeho funkci. Druhým cílem je za pomoci tohoto vybavení

ověřit dosud publikované informace o vlastnostech dichoptické konturové interakce, zejména její srovnání s konturovou interakcí za monokulárních podmínek.

1 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU ZRAKOVÝM APARÁTEM

Informace z okolního prostředí získáváme v podobě akčních potenciálů, a to pomocí smyslových orgánů a jejich specializovaných buněk. Jedná se o propracovaný nástroj centrální nervové soustavy. Pomocí zraku, který je jedním z nejdůležitějších smyslů, přijímáme nejvíce poznatků z našeho okolí. Kvalita zrakového aparátu se vyvíjí také od narození dítěte až do školního věku, kdy dochází ke složitému a komplexnímu procesu. Na procesu zrakového vnímání se podílí zejména optická soustava oka, ale také biochemické pochody na sítnici a elektrofyziologické procesy ve zrakové kůře. Zrakový vjem vzniká za vzájemné spolupráce mozkové kůry, ale i podkorových nervových center. Schopnost identifikovat sledované podněty a schopnost lokalizovat (detekovat jejich pohyb v prostoru) patří mezi klíčové funkce zrakového aparátu při zpracování zrakových informací. Zpracování signálu zrakovým aparátem může být ovlivněno několika faktory např. refrakční vadou, průhledností jednotlivých optických prostředí, patologií na sítnici či ve zrakové dráze, ale i okolním prostředím daného testovaného znaku. Stěžním tématem práce budou jevy crowding fenomén a konturová interakce, blíže popsané v kapitole 4, které úzce souvisí se zpracováním signálu a vychází z mechanismů zpracování. Jelikož se v dnešní době předpokládá především jejich neurální původ vycházející z teorie receptivních polí (viz kapitola 2), bude jejich vznik úzce souviset se strukturou a stavbou zrakové dráhy, zejména také strukturou receptivních polí jednotlivých stupňů zrakové dráhy. Text této kapitoly představuje úvod do problematiky zrakové dráhy, v rámci, které dochází k transformaci světelného signálu na nervový vzruch a jeho šíření do vyšších zrakových center. [1]

1.1 ANATOMIE ZRAKOVÉ DRÁHY

Zraková dráha je spojením sítnice s korovým zrakovým centrem, který se nachází v týlním laloku mozku. Zraková dráha je čtyřneuronová se začátkem na nervové části sítnice. Prvním vertikálním neuronem jsou receptory sítnice, druhým jsou bipolární buňky uložené i se svými dendrity v sítnici. Dalším neuronem jsou buňky gangliové, které svými jádry leží ještě v úrovni sítnice, ale jejich dlouhé neurity jdou optikem, chiasmatem a zrakovým traktem až do podkorového či primárního zrakového centra v corpus geniculatum laterale (CGL) v diencefalu. V CGL, které se skládá z šesti buněčných vrstev a začíná v něm poslední neuron jehož neurity se nazývají zraková

radiace a končí v buňkách korového zrkového centra v týlním laloku. Následující kapitoly se budou zabývat bližším popisem jednotlivých částí zrkové dráhy. [2]

1.2 SÍTNICE

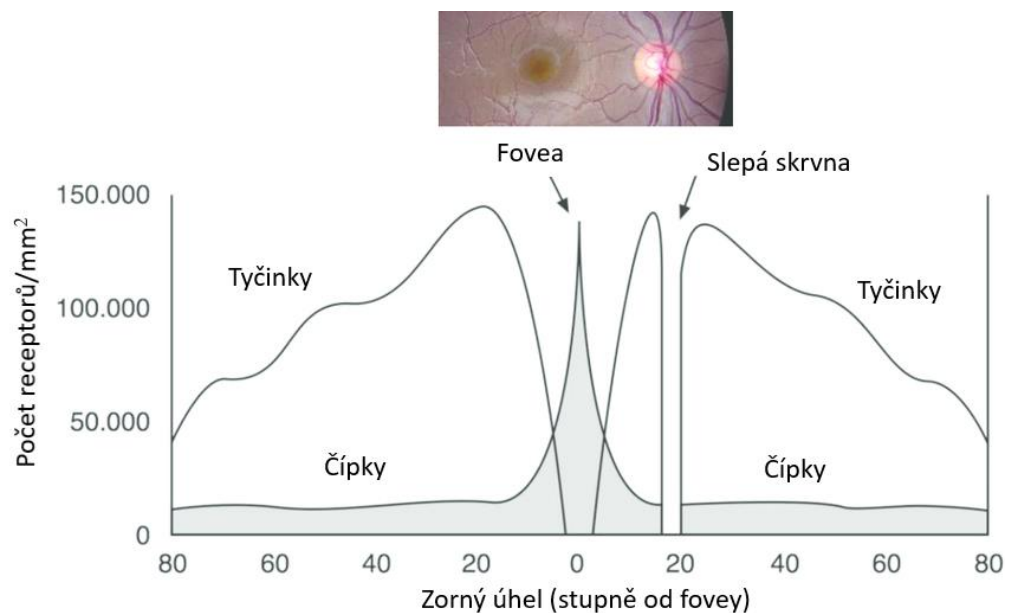
Nejvnitřnější list stěny oční koule je tvořen sítnicí. Rozděluje zevní vrstvu pigmentového epitelu a vnitřní vrstvu sítnice. V přední části bulbu je její tloušťka redukována na tenkou vrstvičku podpurných buněk – pars caeca retinae (část neoptická). Zadní část obsahuje buňky podpurné, ale i světločivné nervové buňky – pars optica retinae (část optická). Optická část sítnice se skládá ze tří vrstev, ve kterých se nachází pět druhů nervových buněk. Při popisu vrstev ve směru od zadního povrchu do nitra oční koule je první tzv. vnější nukleární vrstva. Sousední vrstvou je pigmentová, která obsahuje světločivné receptory – tyčinky a čípky. Další buněčnou vrstvou je vnitřní nukleární vrstva, která obsahuje bipolární, horizontální a amakrinní buňky. Nejvnitřnější vrstvou je vrstva gangliových buněk jejichž axony se sbíhají do papily zrkového nervu, kterým také opouštějí oční bulbus jako nervus opticus. [1]

1.3 NERVOVÉ BUŇKY SÍTNICE

V případě, že dojde k vytvoření obrazu vnějšího světla na sítnici, dochází k zakódování obrazových informací (jako je kontrast, barva, pohyb obrazu apod.) do vzruchové aktivity gangliových buněk sítnice, tedy k transformaci světelného signálu v elektrický. Mechanismus pohlcení fotonů viditelného světla a jejich transformace v elektrický signál je klíčovým dějem v procesu vidění a zároveň je shodný jak v tyčinkách, tak v čípcích. Dopadající kvantum světla vhodné vlnové délky na systém membránových disků zevního segmentu způsobí rozpad fotopigmentů. Tyto buňky jsou určeny k přijímání světelného podráždění a k následnému převodu tohoto impulsu na elektrický signál. Základními receptory na lidské sítnici jsou tyčinky (130 milionů) a čípky (7 milionů), které se od sebe liší zejména tvarem, rozmístěním na sítnici a také funkcí. Čípky reagují na světlo o vyšších světelných intenzitách a tím umožňují vidění ve dne a při umělém osvětlení. Mezi jejich hlavní přednosti lze zařadit zejména schopnost rozlišení jemných detailů v zorném poli. Naopak tyčinky zajišťují vidění za snížených světelných podmínek, v noci a jejich významnou vlastností je vysoká citlivost na světlo. Největší zastoupení čípků se nachází v oblasti fovea centralis uprostřed makuly. Na ploše 1 mm² může být seskupeno až 150 000 čípků. Směrem do periferie se počet čípků snižuje a současně přibývá počet tyčinek. V oblasti přibližně 17 stupňů od fovey nazálně se

nachází místo, kde se sbíhají axony gangliových sítnicových buněk a vytvářejí zrakový nerv. Tato oblast je označována jako slepá skvrna a receptory zde zcela chybí. Nepravidelné rozdělení receptorů a jejich rozdílná funkce souvisí s optimalizací různých částí sítnice pro zpracování odlišných typů percepčních úloh. Obraz, který je promítán na foveu je viděn ostřeji a detailněji oproti objektům promítající se v periférii. Podobně je tomu s vnímáním barev. S rostoucí vzdáleností od fovey barevný vjem bledne a při úhlu větším než 45 stupňů se naše vidění stává achromatické. Naproti tomu oblast přibližně 20 stupňů od fovey obsahuje nejvíce tyčinek a jedná se o místo nejvíce citlivé na podmínky vnímané při nižších hodnotách osvětlení. Tato skutečnost vysvětluje lepší detekci velmi vzdálených předmětů (hvězdy) při zaměření kousek vedle něj, nikoliv přímo. [1, 3, 4, 5]

Vnitřní segment fotoreceptorů obsahuje nervová vlákna a buněčné jádro. Pomocí axonů je daný fotoreceptor propojen se sousedními horizontálními a bipolárními buňkami a pomocí synapse, která je posledním segmentem fotoreceptoru, je signál předáván. K propojení fotoreceptorů s gangliovými buňkami slouží zejména bipolární neurony ležící ve střední vrstvě sítnice (nejvíce reagují na světlo). Bipolární neurony jsou také označovány jako 2. neuron zrakové dráhy a jejich spojení tvoří ganglion retinae. Velké multipolární neurony uložené na vnitřním povrchu sítnice tvoří 3. neuron. Z několika bipolárních buněk jsou informace sbírány právě jedním multipolárním neuronem. Neurity těchto neuronů se sbíhají po povrchu sítnice směrem k papile zrakového nervu a po průchodu stěnou oka tvoří zrakový nerv. [4, 6]



Obrázek 1: Schématické rozložení fotoreceptorů na sítnici [7]

Axony gangliových buněk sítnice odvádí zpracované informace o zrakových podnětech zachycených receptory sítnice směrem k mozku. Vlákna jsou shromažďována v papile zrakového nervu (nervus opticus) a z bulbu odchází skrze laminu cribrosa sclerae. Informace vedeny vlákny z makuly vnikají do nervus opticus temporálním kvadrantem papily a až za okem probíhají v centrální části optiku. Zde jsou tyto svazky obklopeny vlákny z paramakulární oblasti sítnice a ta zase vlákny z periferie. Průběh nervu je mírně esovitě zakřivený, aby mohl kopírovat pohyby očí do stran. V oblasti hrotu očníce vniká do kanálku zrakového nervu a spolu s arteria ophtalmica prochází do nitrolební dutiny. [2]

1.4 KŘÍŽENÍ NERVOVÝCH VLÁKEN

Po dosažení lební dutiny se oba zrakové nervy přibližují a spojují se do tzv. chiasma opticum. V chiasma opticum dochází k promísení a částečnému překřížení vláken z nasálních polovin sítnic. Vlákna z temporálních částí sítnice probíhají bez překřížení. Po průchodu chiasma opticum vlákna přechází do tractus optici v podobě dvou mohutných nervových svazků, a nakonec vnikají do prvního spínače zrakové dráhy, kterým je corpus geniculatum laterale, jenž je součástí tzv. thalamu (oddíl diencefala). Thalamus je důležitou zastávkou přijímání a dalšího šíření senzitivních podnětů z celého těla. [2]

V corpus geniculatum laterale (CGL) většina velkých vláken tractus opticus končí a jen malá část se CGL vyhne a běží do tzv. pretektální krajiny na přelomu diencefala a mezencefala a vstupují do vlastního mezencefala. Pro sítnici každého z očí se projekce axonů do CGL uskutečňuje odděleně, a to v šesti vrstvách. Vlákna jdoucí z temporálních polovin sítnic téže strany končí u buněk 2., 3. a 5. vrstvy, zatímco vlákna zkřížená pak u buněk 1., 4. a 6. vrstvy. Zmíněné uspořádání se nejvíce projeví u člověka, který přišel o jedno oko. Vrstvy, do nichž měla vstupovat vlákna ztraceného oka, postupně podléhají atrofii, jejich buňky jsou menší a mají méně výběžků než buňky spojené se sítnicí oka zachovalého. Největší část projekce sítnice do CGL zaujímají makulární vlákna, která ústí do kuželovité oblasti s bází nahoře a vzadu. Paramakulární vlákna končí přímo za nimi a nejvíce vpředu a nejdolněji končí vlákna periferní. [1]

Další průběh axonů je v podobě radiato optica (optická radiace), která vede do příslušné oblasti mozkové kůry. Následkem je vějířovité rozšíření a smyčkovité obíhání

její dolní části podél postranní mozkové komory až do temporální krajiny – Meyerova klička. [1]

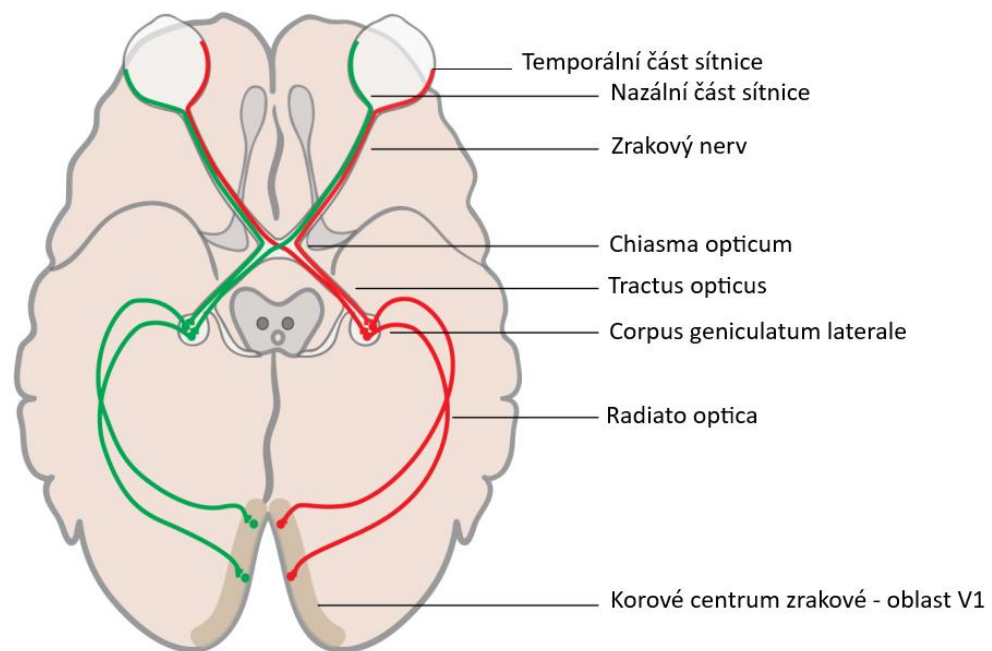
1.5 ZRAKOVÁ KŮRA

Nejdůležitější mozkovou oblastí týlního laloku je primární zraková kůra (area 17). Právě tato oblast přijímá signál přicházející z CGL. I tato oblast je členěna do vrstev, v jejím případě celkem do šesti, přičemž většina axonů vedoucích z CGL končí ve 4. vrstvě. Každý neuron v primární zrakové kůře (kortexu) reaguje pouze na malou plochu zorného pole, která se při dopadu světla na sítnici rovná velikosti receptivního pole neuronu. Receptivní pole je složeno z inhibičního a excitačního středu a periferie s opačnou reakcí na světelné podráždění (viz podkapitola 2.2). V primární zrakové kůře dochází k fúzi obrazů promítnutých na sítnici pravého a levého oka. V případě, že se zpracování informace z obou očí odehrává odděleně v různých vrstvách CGL a tato informace je vedena do primární zrakové kůry axony různých neuronů, tak právě čtvrtá vrstva korových neuronů je posledním místem oddělení neuronů z levého a pravého oka. [6]

Ve zrakové kůře jsou buňky s různými vlastnostmi receptivních polí což vytváří hierarchický jev. Posloupnost je následující – jednoduché, komplexní a speciální komplexní buňky. Až na výjimku ve čtvrté vrstvě mají všechna neuronová receptivní pole danou orientaci. Část buněk přijímá informace pouze z jednoho oka, ale větší část buněk zpracovává informace střídavě z obou očí. Nalezneme zde i buňky, které se primárně zajímají o barvu pozorovaného předmětu. Hubel a Weisel předložili výskyt základní korové organizace v oblasti V1, která popisuje celou složitost uspořádání buněk v korové části mozku. Kortex je organizován do modulů nazývaných jako hypercolumns, jejichž rozměry jsou 1 x 1 x 2 mm a poslední číslo udává přibližnou tloušťku kortexu. Základní korová struktura obsahuje všechny neuronové techniky potřebné k analýze malé části zorného pole. Separace jednotlivých modulů není ryze ohraničena, protože se jednotlivě překrývají. [1]

Spodní čtyři vrstvy kortexu přijímají informace z pravého a levého oka odděleně. Na další straně hypercolumnu se formují sloupce jdoucí přes kortex čtvrtou vrstvou a vytvářejí nepravidelné pásy. Šíře jednotlivých sloupců je přibližně 0,5 mm z čehož vyplývá, že k rozeznání informace z obou očí je zapotřebí 1 mm – jedna dimenze

hypercolumnu. Nad a pod místem, kde vstupují informace z CGL se nachází buňky binokulární. [1, 8]



Obrázek 2: Zjednodušený popis jednotlivých částí zrakové dráhy [9]

a) kortex zrakový – primární

Informace z fovey jsou vedeny přibližně polovinou vláken zrakového nervu do poloviny buněk primární zrakové kůry. Primární zrakovou kůrou je označena Brodmannova area 17 a nalezneme ji v okcipitálních lalocích nad a pod fissura calcarina (týlní lalok). Stejně jako jiné části zrakové dráhy i primární zrakový kortex má retinotopologickou organizaci. Vlákná horního svazku optických radiací končí nad týlním lalokem, zatímco dolní svazek končí pod ním. Do zadní části zrakového kortexu vedou vlákna zejména z makuly. Periferní oblasti homolaterálních a kontralaterálních zorných polí jsou zastoupeny poněkud více v přední části. Nejhlubší části na konci týlního laloku patří vláknům tzv. temporálního srpku – monokulární část binokulárního zorného pole. Zastoupení makuly v kortexu je nepřímě úměrné její malé sítnicové oblasti – zabírá přibližně 50 % primární zrakové kůry, protože se jedná o oblast s nejvyšší zrakovou ostroostí oka. Centrum je zodpovědné za rozeznávání barvy, tvaru a pohybu pozorovaných předmětů. [10, 11]

b) kortex zrakový – sekundární

Oblast přilehlá k primární zrakové kůře se značí jako sekundární zraková korová oblast (area 18, 19). Do této oblasti vstupují aferentní vlákna z primární zrakové kůry a z asociačních jader thalamu. Eferentní část vláken pokračuje dále do primární zrakové oblasti a do přidružených korových zón. Propojení zrakových a asociačních oblastí je nezbytné pro komplexní analýzu zrakových vjemů. Poškození centra vyvolá vizuální agnosii, kdy pozorovaný objekt vidí, ale nedokáže jej charakterizovat. [11]

c) asociační korové oblasti

Asociační korové oblasti se nacházejí v jednotlivých lalocích jako je např. oblast čelního pólu hemisféry, na spánkovém laloku v okolí pólu a na bazální ploše či v týlním laloku sekundární zrakové kůry. Asociační oblasti kůry zprostředkují vzájemné propojení s ostatními korovými oblastmi a jejich plocha se podílem evolučního vývoje zvětšuje. Hlavním úkonem je zajištění integrace sensorických podnětů a ovlivnění složitého utváření osobnosti – emoce, jednání a chování. [11]

2 MECHANISMY ZPRACOVÁNÍ VIZUÁLNÍ INFORMACE

Pouhým zrakem přijímáme až 90 % informací o okolním světě. Pomocí zraku rozlišujeme tvar, barvu, umístění v trojrozměrném prostoru pozorovaného předmětu či jeho pohyb v určitém směru danou rychlostí. Na zpracování zrakového signálu se podílí jak korové centrum mozku, ale také v různých částech zrakové dráhy pomocí receptivních polí neuronů. Jejich hlavními úkoly je detekce a následná integrace světelných a nervových signálů. Způsob zpracování vizuální informace se liší dle typu receptivního pole a jeho umístění. Pojem receptivní pole úzce souvisí i s jevy, kterými se zabývá experimentální část této práce – crowding fenomén a konturová interakce. Původ těchto jevů je velmi často spojován právě s teorií receptivních polí. V následujících kapitolách budou zmíněné fyziologické jevy více rozebrány.

Mezi klíčové schopnosti při zpracování zrakových informací, které jsou důležité pro dokonalé vizuální vnímání okolního světa, patří: schopnost identifikovat nazírané objekty, a to zejména díky schopnosti detekovat kontrast. Kontrastem označujeme rozdíl barev dvou hraničních ploch, tedy rozdíl vlnových délek, jež tyto plochy vyzařují. Základním způsobem, kterým je tvar pozorovaného objektu kódován, spočívá v rozdílném podráždění fotoreceptorů kontrastními liniemi obrazu promítaného na sítnici. Jedná se o mechanismus laterální inhibice a je přítomen zejména v horizontálních buňkách. Hlavní úlohou těchto buněk je převod přijatého signálu téže polaroty z fotoreceptoru na sousední receptor, přičemž dochází k obrácení polaroty původního signálu. Následkem je nižší aktivita sousedních receptorů než samotné podráždění odpovídající dané úrovni osvětlení. [1]

Následující podkapitoly se budou věnovat zejména zpracování zrakové informace na úrovni neuronů a dále zde budou rozebrány vlastnosti receptivních polí jednotlivých částí zrakové dráhy.

2.1 INFORMAČNÍ KANÁLY

V současné době byly dokázány dva informační kanály, které jsou zodpovědné za zpracování obou zmíněných složek zrakové informace. Obě informační cesty začínají již v retině a jejich vztah souvisí se dvěma druhy gangliových buněk označovaných X a Y, z tohoto důvodu se informační kanály označují jako X-cesta a Y-cesta. Asi 80 % gangliových buněk sítnice je tvořeno neurony typu X a jejich největší koncentrace se

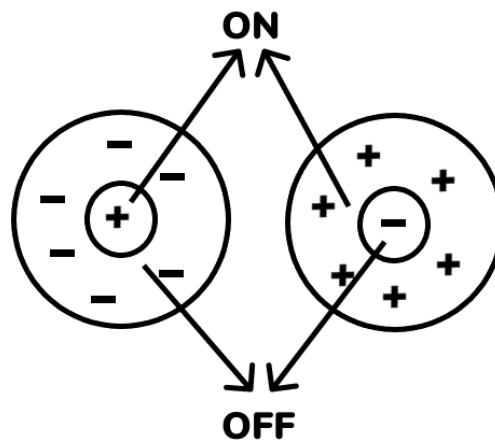
nachází v oblasti fovey. Díky středně velkému tělu a úzkému dendritickému stromu je jejich receptivní pole malé, zajišťují detailnější sběr struktury a barev pozorovaného objektu (X-cesta). Pouze 10 % gangliových buněk je tvořeno neurony typu Y a největší zastoupení mají v periférii sítnice. Neurony mají velké tělo a rozsáhlé dendritické větvení, které způsobí větší rozsah receptivního pole než buňky X. Zmíněné vlastnosti zapříčiňují, že buňky typu Y detekují pohyb a lokalizaci pozorovaného objektu v prostoru (Y-cesta). Zbývajících 10 % všech gangliových buněk se označují jako buňky W, u kterých se předpokládá, že mají vztah k reflexním pohybům očí a hlavy za objektem v zorném poli. Gangliové buňky typu X a Y vedou své axony do CGL, kde vytvářejí synaptické kontakty s neurony s podobnými vlastnostmi. Tento typ zmíněných informačních kanálů je možné rozeznat i v oblasti thalamu. [1]

2.2 RECEPTIVNÍ POLE NEURONŮ

Receptivní pole představují významný prvek zrakového systému, který se podstatnou měrou podílí na zpracování zrakového signálu. Studium receptivních polí bylo také získáno nejvíce informací o mechanismech zrakového vnímání. Pojem receptivní pole daného neuronu představuje oblast sítnice, ve které dojde následkem světelného podráždění k vzrůstu či útlumu aktivity daného neuronu. Jednotlivá receptivní pole se od sebe prostorově liší, podle toho, ke kterému neuronu náleží. K základnímu zpracování obrazu v rámci receptivních polí dochází již u neuronů sítnice, kde je základní senzoričkou jednotkou receptivní pole fotoreceptoru, které po světelném podráždění vyvolá nervový vzruch. Receptivní pole fotoreceptorů má přibližně kruhové uspořádání. Z těchto dílčích receptivních polí se skládají receptivní pole navazujících bipolárních a pak gangliových buněk. Mimo sítnici pak dochází k tvorbě komplikovanějších receptivních polí, vznikajících kombinací předchozích. Jak ukazuje řada experimentů, receptivní pole mají zřejmě značný význam také při vzniku crowdingu a konturové interakce. Z dichoptických experimentů pak vyplývá (viz kapitola 4), že při těchto jevech hrají roli především receptivní pole neuronů z vyšších částí zrakové dráhy, ve kterých dochází k mísení signálů z obou očí. V nadcházejících odstavcích budou rozebrány receptivní pole gangliových buněk, buněk corpus geniculatum laterale a buněk zrakové kůry. [1, 12]

2.3 RECEPTIVNÍ POLE GANGLIOVÝCH BUNĚK

Receptivní pole gangliových a bipolárních buněk mají uspořádání do tvaru terče, které je tvořeno vnitřní středovou a vnější obvodovou částí. Reakce těchto dvou částí je antagonistického charakteru: zatímco podráždění jedné části vyvolá zvýšení frekvence akčního potenciálu, ve druhé tato frekvence klesá. Například pokud podráždění centra receptivního pole vede k excitaci gangliových buněk (tzv. ON-centrum buňky), pak dopad světla do obvodové části (OFF-periferie) vede k jejich inhibici. Mechanismus může fungovat i obráceně. Oba případy schematicky zachycuje obr. 3. Gangliové buňky se nejčastěji vyskytují buď v podobě buňky s excitačním středem a inhibiční obvodovou částí či naopak. [6]

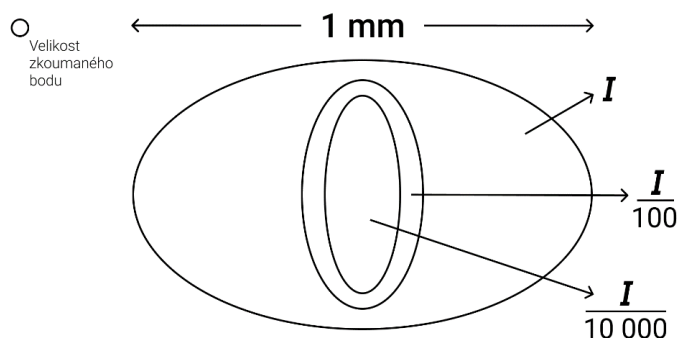


Obrázek 3: Schéma receptivního antagonistického pole gangliové buňky, vlevo buňka s ON-centrem a OFF-periferií, vpravo buňka s OFF-centrem a ON-periferií

Gangliové buňky sítnice detekují kontrast pozorovaného předmětu, díky čemu jsou označovány jako první rysový analyzátor. Studium tvaru receptivních polí těchto buněk byla zjištěna jejich schopnost detekovat příslušný detail vizuálního podnětu. Velikost receptivních polí se mění dle typu gangliové buňky, ale tvar mají stejný – kruh. Podle velikosti receptivních polí můžeme neurony rozdělit na typ X s velmi malým receptivním polem a typ Y s větším receptivním polem (3' až 5'), jak bylo zmíněno již v podkapitole 2.1. [1]

Je známo, že velikost receptivních polí narůstá od centra do periferie sítnice a také že existují oblasti kde se různě velká receptivní pole překrývají. V periferii může velikost receptivního pole dosahovat až rozměru 1 mm. Velikost je také závislá na intenzitě

stimulu. Čím větší je intenzita bodového světla tím větší je i receptivní pole a naopak (obr. 4). [13]



Obrázek 4: Velikost receptivního pole gangliové buňky v závislosti na intenzitě světelného zdroje (bodový zdroj), upraveno podle [13]

2.4 RECEPTIVNÍ POLE BUNĚK CORPUS GENICULATUM LATERALE

CGL má vrstevnatou strukturu, jejíž jádro je tvořeno šesti podkovovitými vrstvami neuronů, oddělenými vrstvami axonů a dendritů. Jelikož zde již může docházet k mísení signálů z obou očí (i když některé dostupné zdroje upozorňují, že zpracování signálu je zde ještě monokulární, viz kapitola 3.4), mohou vlastnosti příslušných receptivních polí ovlivňovat zrakový vjem při dichoptických experimentech. Receptivní pole neuronů CGL se významně neliší svými vlastnostmi ani tvarem od receptivních polí gangliových buněk. Pole jsou opět soustředná s antagonistickou centrální a periferní oblastí. Průměr centrální oblasti se pohybuje v rozmezí několika desetin úhlového stupně až ke dvěma úhlovým stupňům. Odpověď jednotlivých polí na světlo je buď „ON“-reakce (začátek osvětlení) nebo „OFF“-reakce (konec osvětlení). Bylo prokázáno, že vzájemná inhibice centrální a periferní oblasti receptivního pole je v případě neuronů CGL významnější než v sítnici. Předpokládá se, že malé interneurony tvořící asi 20 % všech neuronů struktury mají na hlavní základní neurony inhibiční vliv. Neurony CGL zachovávají typ reakce (tedy X nebo Y) jdoucí ze vstupujícího vlákna zrakového nervu (viz 2.1).

2.5 RECEPTIVNÍ POLE BUNĚK ZRAKOVÉ KŮRY

K finálnímu zpracování zrakového podnětu dochází v týlním laloku mozku, který je tvořen rozsáhlým komplexem navzájem sousedících mozkových oblastí.

Nejvýznamnější oblastí z hlediska zrakového vnímání je primární zraková kůra, popřípadě oblast 17 dle Broadmanovy mapy. Nervové buňky zrakové kůry zachovávají retinotopické uspořádání, při kterém sousední oblasti v zorném poli aktivují sousední neurony ve zrakové kůře. Oproti tomu receptivní pole neuronů zrakové kůry se svými vlastnostmi liší od neuronů sítnice a CGL – receptivní pole jsou elipsoidní, oválná a často i nepravidelného tvaru. Průměr těchto polí se pohybuje v rozmezí od desetin úhlového stupně (ve foveální oblasti zrakové kůry) do desítek úhlových stupňů. Hlavním rozdílem je reakce buněk na světelné podněty. Zatímco pole buněk CGL lze optimálně stimulovat osvětlením části pomocí nepohyblivé světelné skvrny, v kůře je odpověď neuronů kruhovou a nepohyblivou skvrnou nepatrná. [4, 6]

Každý neuron primární zrakové kůry reaguje pouze na jeden malý úsek zorného pole, jehož plocha odpovídá velikosti receptivního pole neuronu. Receptivní pole se skládá z excitačního či inhibičního středu a z periferie s opačnou reakcí na světelný podnět. Následkem retinotopického uspořádání nervových buněk zrakové kůry je deformace tzv. mapy promítnutého obrazu z důvodu vyšší aktivace neuronů zrakové kůry z oblasti zorného pole nacházejícího se v blízkosti osy pohledu. Tento nepoměr zapříčiní korové zvětšení obrazu, který je promítán na žlutou skvrnu, kde nabývá obraz dalšího zvětšení. Odhaduje se, že centrální oblast zorného pole (10°), která odpovídá foveálnímu a parafoveálnímu vidění, je zprostředkována 80 % neurony v primární zrakové kůře. [6, 14]

Studiem receptivních polí nervových buněk v dalších částech zrakové dráhy a zrakovém kortexu byly zjištěny následující poznatky. Genikulátové buňky a hvězdicovité neurony v dolní části IV. korové vrstvy primární zrakové oblasti vykazují podobné vlastnosti jako gangliové buňky. Jejich receptivní pole mají kruhový tvar s koncentricky uspořádanou a vzájemně antagonisticky působící centrální a periferní oblastí. [1]

Hvězdicovité neurony, komplexní a jednoduché buňky vytvářejí ve IV. vrstvě primární zrakové kůry typické mozaikové nebo modulární uspořádání. Seskupení neuronů, které získávají monokulární vstupní informace, je pruhovité a kolmé k povrchu kůry. Tento typ je označován jako sloupce okulární dominance a jsou charakteristicky organizovány. Sousedící proužky obsahují neurony, jejichž receptivní pole jsou lokalizována na identických místech sítnic obou očí. [1]

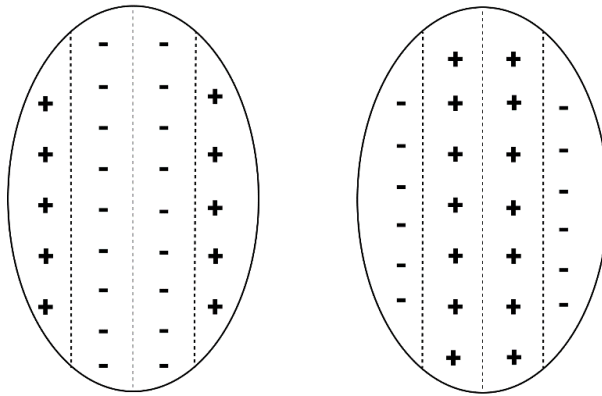
V další vrstvě informačního kanálu X se jednoduché buňky napojují pomocí synaptických spojů na buňky komplexní. Receptivní pole těchto buněk je rozsáhlejší, oválné, ale bez ostře ohraničené excitační a inhibiční oblasti. Ideálním podnětem pro podráždění je opět kontrastní pruh nebo okraj. Konvergence axonů několika jednoduchých buněk vytvoří receptivní pole komplexních neuronů. Jednoduché buňky mají shodnou strukturu receptivních polí, orientaci svých podélných os a sledují určitou přímou linii na sítnici. [1]

2.5.1 HVĚZDICOVITÉ NEURONY

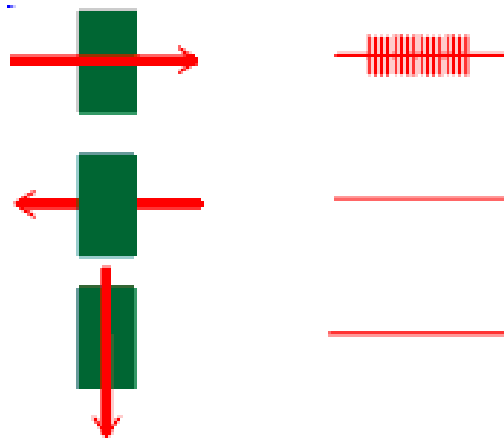
Hvězdicovité neurony, které jsou uloženy v horních částech IV. vrstvy primární zrakové kůry, vytvářejí synaptické spoje se dvěma typy neuronů s diametrálně odlišnými vlastnostmi. Tyto neurony jsou označeny z hlediska jejich funkce na jednoduché a komplexní buňky. Liší se tvarem a velikostí jejich receptivních polí. Jejich tvar je spíše oválný a velikost ve foveální oblasti sítnice se pohybuje od několika desetin do několika desítek úhlových stupňů. Hlavním rozdílem je však vnitřní struktura receptivního pole (viz dále). [1]

2.5.2 JEDNODUCHÉ BUŇKY

Jednoduché buňky se nacházejí v bezprostředním kontaktu s neurony hvězdicovitými. Jejich receptivní pole je oválného tvaru a skládá se z centrální excitační nebo inhibiční zóny, která je obklopena antagonisticky působící periferií. Úroveň podráždění buňky je závislá na poloze excitační či inhibiční zóny uvnitř receptivního pole, ale také na orientaci hraničních linií obou antagonistických zón. Na obr. 5 je vyobrazeno receptivní pole jednoduché buňky IV. vrstvy primární zrakové kůry jejíž podélná osa je orientovaná svisle. Tento typ receptivního pole vzniká konvergencí axonů několika hvězdicovitých neuronů s jednou jednoduchou buňkou. Receptivní pole těchto hvězdicovitých neuronů se shodují ve vnitřní struktuře a navzájem se svými periferiemi překrývají. Největšího podráždění je dosaženo pomocí kontrastního světelného pruhu, jehož šíře odpovídá šířce excitační zóny receptivního pole. Pro maximální aktivaci buňky musí orientace kontrastního pruhu souhlasit s orientací hraničních linií obou antagonistických zón. [1]



Obrázek 5: Schéma receptivního pole jednoduché buňky zrakové kůry, upraveno podle [1]



Obrázek 6: Příklad maximální odezvy jednoho receptivního pole při působení stimulu pouze určitým směrem

2.5.3 KOMPLEXNÍ BUŇKY

Receptivní pole komplexních buněk zrakového kortexu odpovídají zejména na lineární stimul se specifickou orientací. Konstrukce těchto polí neobsahuje „ON“ a „OFF“ části. Příkladem může být maximální odezva jednoho receptivního pole při působení stimulu, který podráždí pole vertikálně a světlo působí zleva doprava. [1]

3 ZRAKOVÁ OSTROST OKA A BINOKULÁRNÍ VIDĚNÍ

Zraková ostrost je jednou ze základních charakteristik zraku. Je podmíněna refrakčním stavem oka, transparentí jeho optických prostředí a zejména rozlišovací schopností její optické soustavy a rozlišením sítnice. Dále závisí na fixaci oka, normální činnosti zrakového nervu a činnosti zrakového korového centra. Může být také významně ovlivněna vlastní pozorovanou scénou, přičemž podstatný vliv mohou mít též crowding či konturová interakce. Jedním z měřítek zrakové ostrosti je rozlišovací schopnost oka (minimum separabile neboli *MAR* – minimální úhlové rozlišení) definovaná jako nejmenší úhel, pod kterým oko od sebe ještě rozliší dva body v prostoru. V praxi se také s ohledem na platnost Weber-Fechnerova zákona [13] používá logaritmus této hodnoty ($\log MAR$) nebo tzv. vízus $V = 1'/MAR$.

Z fyziologického hlediska lze rozlišovací schopnost stanovit z rozlišení sítnice a v centrální oblasti přibližně odpovídá velikosti $1'$. Tato hodnota odpovídá podráždění dvou čípků, mezi kterými leží třetí, bez stimulace. Odvození fyziologické meze na základě vzdálenosti či velikosti fotoreceptorů však představuje určité zjednodušení, akceptovatelné v centrální oblasti. Přesněji bychom měli vycházet z receptivních polí, která se v periférii významně liší od velikosti fotoreceptorů.

Z optického hlediska je hodnota zrakové ostrosti ovlivněna zejména difrakcí (ohybem světla) a dalšími aberacemi a závisí na velikosti pupily, která představuje clonu systému. Pomocí difrakce lze definovat tzv. Rayleighho rozlišovací kritérium, dle kterého jsou dva monochromatické bodové zdroje od sebe ještě rozlišitelné, když centrální maximum intenzity ohybového obrazce jednoho bodu spadne do prvního minima intenzity ohybového obrazce druhého bodu. Pro příslušný úhel θ_{min} , který svírají paprsky dopadající do oka od těchto dvou bodů, můžeme odvodit vztah

$$\sin \theta_{min} = 1,22 \frac{\lambda}{d},$$

kde λ je vlnová délka dopadajícího světla a d je průměr pupily. Ze vztahu vyplývá, že s rostoucí vlnovou délkou a se zmenšováním průměru zornice, schopnost rozlišení dvou bodů klesá. Srovnáme-li výslednou hodnotu získanou pro obvyklé průměry zornice a vlnovou délku 555 nm s fyziologickým limitem, zjistíme, že fyziologický limit hraje v centrální oblasti dominantní roli. [13, 15]

Výsledný zrakový vjem vzniká jako kombinace vjemů z obou očí. Výsledná binokulární zraková ostrost tak díky zpracování signálu ze dvou očí může dosahovat lepších hodnot než u monokulárního vjemu.

3.1 CENTRÁLNÍ A PERIFERNÍ ZRAKOVÁ OSTROST

Pokud popisujeme kvalitu vidění pomocí zrakové ostrosti, nejčastěji mluvíme o foveální (centrální) zrakové ostrosti. V tomto případě je pozorovaný předmět (znak na optotypu) fixovaný foveou. Centrální část fovea centralis neobsahuje tyčinky, ale je zde největší zastoupení čípků. Receptivní pole neuronů napojených na tuto oblast obvykle výrazně nepřevyšuje velikost jednoho čípku. Oproti tomu v periférii jsou receptivní pole rozsáhlá. Jelikož zraková ostrost je závislá na velikosti receptivních polí, která je dána mírou konvergence světelného signálu, zřetelně se snižuje směrem do periferie z důvodu spojení informací z větší části zorného pole do jedné např. gangliové buňky. [16, 17]

3.2 VYŠETŘENÍ ZRAKOVÉ OSTROSTI

V klinické praxi se k měření reálné zrakové ostrosti využívá metoda rozpoznávání různých obrazců, přičemž z velikosti detailu právě rozpoznávaného obrazce je odvozeno rozlišení oka. Nejčastěji se setkáváme s písmeny pro měření zrakové ostrosti. Jedná se o nejsnazší přístup pro pacienta, jehož úkolem je číst prezentované znaky. Nevýhodou však je, že na základě vnitřní struktury písmen mohou být některá písmena rozlišena lépe než jiná, výhodou je menší pravděpodobnost uhodnutí z většího souboru. Je proto nutné obezřetně volit použitou sadu písmen. Jelikož je tato metoda z důvodu jednoduché komunikace často používána v klinické praxi a současně je využita v námi provedeném experimentu, je jí věnován samostatný odstavec podkapitoly 5.1. Z důvodu odlišné čitelnosti jednotlivých znaků by bylo výhodné použít vždy stejný znak, např. sinusovou mřížku či tzv. Landoltův prstenec (prstenec s mezerou připomínající písmeno C), prezentovanou v různých pozicích (čtyř až osmi). Komunikace s vyšetřovaným je ale v tomto případě horší. [13]

K měření zrakové ostrosti se využívají standartní tabulky, které se nazývají optotypy. Ty obvykle obsahují řádky se znaky stejné velikosti, přičemž velikost řádek od řádku klesá. Zraková ostrost je odvozena z velikosti detailu znaku na nejmenším řádku, kde vyšetřovaný ještě správně rozpoznal alespoň 60 % znaků. Nejvíce používanými druhy optotypů jsou Snellenovy tabule a ETDRS optotypy, které se využívají pro

vyšetření zrakové ostrosti do dálky. Zraková ostrost je měřena nejčastěji na vzdálenost 5 nebo 6 m od optotypů, kvůli minimální akomodaci oka. Optotypy jsou tvořeny písmeny či číslicemi, jejichž velikost je konstruována tak, aby části znaků byly viditelné ze vzdálenosti (v m) uvedené u daného řádku (tzv. číslo řádku) pod úhlem 1 minuty. Dané číslo řádku tak označuje skutečnou vzdálenost, ze které by měla osoba s normální zrakovou ostroší přečíst daný řádek. Z definice vízu pak lze ukázat, že platí

$$V = \frac{\text{vyšetřovací vzdálenost (5 nebo 6 m)}}{\text{číslo nejmenšího přečteného řádku}}.$$

Za normální zrakovou ostrost se považují hodnoty 6/6 nebo 5/5 podle vyšetřovací vzdálenosti. [13]

3.3 KONSTRUKCE OPTOTYPŮ

Zraková ostrost je ovlivněna také jasem pozorovaného předmětu, vzdáleností pozorovaného předmětu od sítnice, úrovní kontrastu předmětů oproti okolnímu prostředí, na velikosti zornice a velikosti refrakční vady. Pro jednotnost optotypů byla založena norma, která stanovila tvar znaků, mezery mezi jednotlivými znaky a řádky, odstupňování velikosti znaků, okolní osvětlení optotypu a kontrast. Norma jako vyšetřovací znak využívá Landoltova prstence vepsaného v síti 5 x 5 dílků s tloušťkou čáry o velikosti jednoho dílku, která se shoduje s velikostí mezery v prstenci. Tento prstenec má 8 možností orientace, přičemž danému vízu odpovídá reciproká hodnota přerušení kruhu v úhlových minutách. [18]

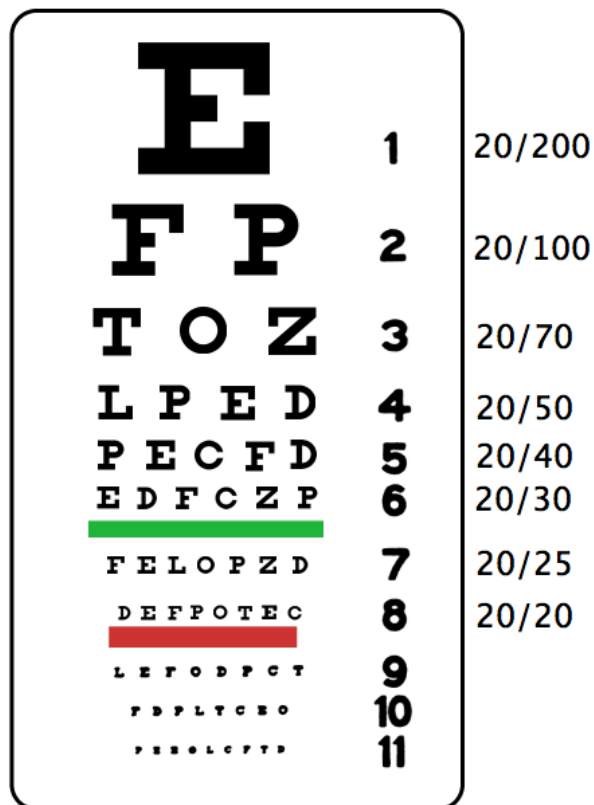
Zraková ostrost – vízus	Nejmenší rozestup znaků – horizontální i vertikální.
Menší než 0,06	2 x šířka mezery Landoltova prstence
0,06 až 0,125	Průměr Landoltova prstence
0,16 až 0,32	1,5 x průměr Landoltova prstence
0,4 až 1,0	2 x průměr Landoltova prstence
Větší než 1,0	3 x průměr Landoltova prstence

Tabulka 1: Rozestup znaků při daném vízu dle normy. [19]

Mezi hlavní faktory, které je třeba zohlednit při jejich návrhu, patří zejména provedení znaků a jejich relativní četnost, velikost mezery mezi jednotlivými znaky a řádky (viz tab. 1), progresi velikosti znaků, kontrast mezi znaky a pozadím a v neposlední řadě také jas optotypu. [13]

A) SNELLENOVY OPTOTYPY

Tento typ optotypu byl vytvořen již v roce 1862. Obvyklá vyšetřovací vzdálenost je 5 nebo 6 m, což je vzdálenost, při které je akomodace oka menší než 0,25 dioptrií. Nejvíce používanými písmeny jsou C, D, E, H, K, N, O, P, R, S, V, Z, vepsané do čtverce o velikosti 5 x 5 jednotek sestavených od největšího po nejmenší. Velikost písmen se v jednotlivých řádcích byla Snellenem určena empiricky. Počet písmen v řádcích není vždy stejný – pohybuje se v rozmezí od jednoho písmena až po pět (obr. 7). [10]

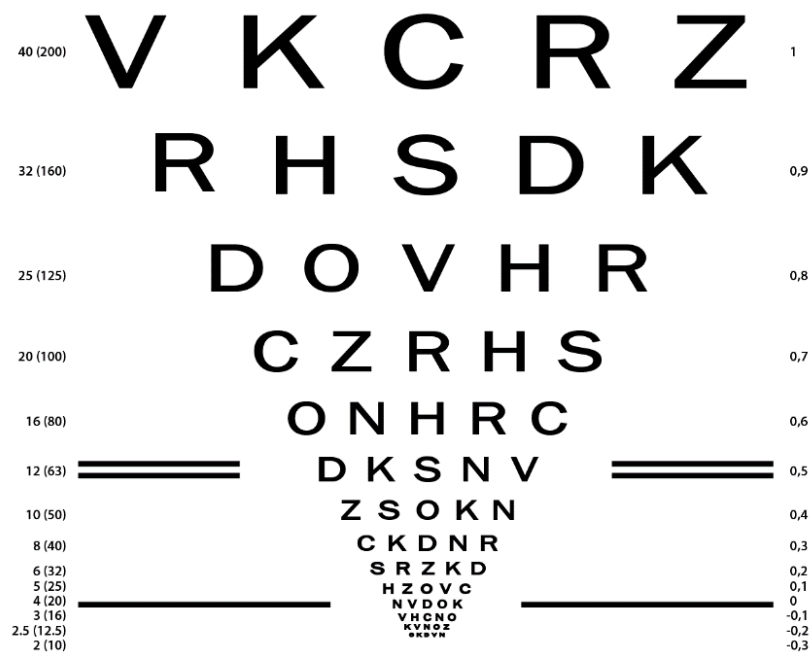


Obrázek 7: Příklad Snellenova optotypu [20]

B) OPTOTYPOVÉ TABULE ETDRS

Dalším rozšířeným typem optotypů jsou ETDRS optotypy (název vychází z jejich původního využití při studii diabetické retinopatie). Jsou konstruovány tak, aby

maximálně respektovaly vlastnosti lidského zrakového vnímání a vycházejí z obecných zásad stanovených Baileyem a Lovie-Kitchinovou, příklad uvádí obr. 8. Na každém z řádků je zobrazen stejný počet (5) znaků o stejné velikosti. Velikost znaků na sousedním řádku je dána jako násobek či podíl číslem 1,2589, tj. rozdíl ve zrakové ostrosti odpovídá 0,1 logMAR. Vzdálenost znaků na řádku a řádků je dána tak, aby byl minimalizován vliv crowdingu (viz kapitola 4.4), tj. mezera mezi písmeny odpovídá šířce písmene, u řádků pak výšce menšího z nich. [10]



Obrázek 8: Optotypová tabule logMAR ETDRS [21]

3.4 BINOKULÁRNÍ VIDĚNÍ

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, binokulární zraková ostrost, ale i jiné parametry, se mohou od monokulárního vidění lišit, jelikož se zrakové vjemy z obou očí mohou vhodně kombinovat či ovlivňovat, jak naznačuje též struktura zrakové kůry popsaná v podkapitole 1.5. Tyto efekty je možné sledovat např. pomocí dichoptických experimentů, přičemž konstrukce vhodného zařízení a ověření chování konturové interakce za dichoptických podmínek jsou součástí experimentální části této práce. Následující text poskytuje nezbytný úvod do problematiky binokulárního vidění se zaměřením na možnosti dichoptické prezentace zrakových vjemů s využitím stereoskopů.

Optický systém oka transformuje trojrozměrný pozorovaný prostor do dvourozměrného obrazu na sítnici, a přesto jsme schopni vnímat třetí rozměr tzv. hloubku prostoru. Tato schopnost se nazývá vidění stereoskopické (prostorové) a úzce souvisí se schopností společně zpracovat vjemy z obou očí. Dokonalého prostorového vidění je dosaženo při správné funkci binokulárního vidění. [1]

Schopnost binokulárního vidění není vrozená, ale v průběhu prvních šesti let dítěte se vyvíjí a upevňuje. Vývoj lze rozdělit do několika etap, které na sebe navazují. Novorozenec je schopen pozorovat svět pouze jedním okem, avšak od druhého měsíce věku začíná používat obě oči najednou a tím si upevní binokulární fixační reflex. Od třetího měsíce se u dítěte rozvíjí reflex konvergence a divergence, které napomáhají sledovat bližší i vzdálenější předměty. Následně se ve čtvrtém měsíci života upevňuje reflex akomodace, díky kterému je dítě schopné zaostřovat. Od šestého měsíce je dítě schopno spojit obrazy obou očí v jeden smyslový vjem – fúze. Důsledkem je rozvoj prostorového a hloubkového vidění. Období stabilizace a upevňování všech reflexů se udává od jednoho roku až do šesti let. Pokud se během tohoto období objeví nějaká překážka či porucha ve zrakové dráze, dojde k přerušení vývoje, který se může projevit šilháním, tupozrakostí či anomální retinální korespondencí. Celý vývoj binokulárního vidění závisí zejména na dozrávání optické části sítnice a místa nejostřejšího vidění – žlutá skvrna. [22]

Jednoduché binokulární vidění (JBV) se dělí na tři stupně. Prvním je superpozice neboli schopnost současného vidění dvou makulárních obrazů a jejich složení, tj. překrytí dvou obecně různých obrazů z obou očí. Druhým stupněm JBV je fúze, která je definována jako schopnost spojit dva téměř stejné sítnicové obrazy v jeden binokulární smyslový vjem. Dle stupně zapojení sítnicové oblasti rozdělujeme fúzy na foveolární, makulární a paramakulární. Nejvyšším stupněm JBV je stereopse – binokulární vnímání hloubky. [23]

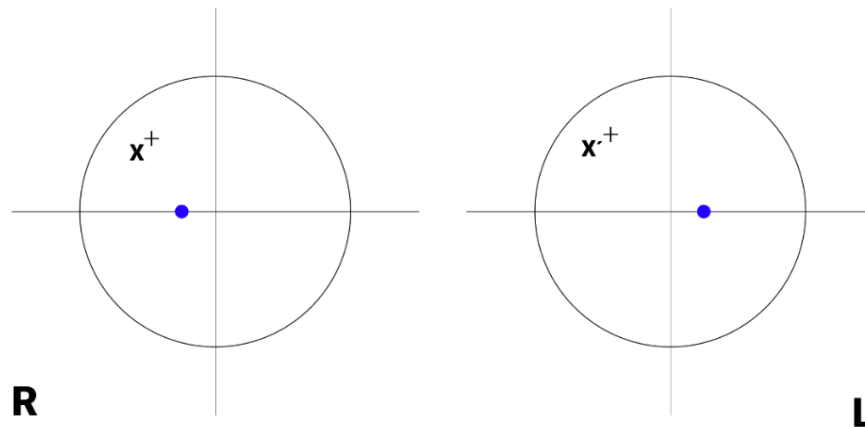
Velkou výhodou pozorování oběma očima, které mají překrývající se zorná pole, je schopnost hloubkového vidění. Tuto schopnost lze demonstrovat jednoduchou úlohou: Pokud si zavřeme jedno oko a bez pohybu hlavy se budeme snažit dotknout konečky ukazováčků proti sobě, ve většině pokusech se nám nepodaří konečky prstů přesně spojit. K dosažení úkonu jednoduše a spolehlivě je zapotřebí aby se informace zpracovaná oběma očima dostala do stejného korového neuronu. Většina neuronů nacházejících se

v oblasti V1 přijímají informace právě z obou očí – jsou binokulární. Ve skutečnosti je oblast V1 první, ve které můžeme na binokulární buňky narazit. Buňky v CGL jsou pouze monokulární – každá vrstva CGL zpracovává pouze informaci z jednoho oka. Avšak bylo demonstrováno, že i korové buňky jsou často silněji řízeny jedním okem, tento fenomén je označován jako oční dominance, která se týká různých faktorů a kvalit vidění. Jedním příkladem je směrové vnímání – jedno oko fixuje detail pozorovaného předmětu o zlomek vteřiny dříve než druhé. Mezi další faktory lze zařadit vnímání kontur, jasu a barev. Oční dominance se bezpodmínečně neváže na oko s vyšší zrakovou ostrovní. Pokud je fixovaný bod předmětu zobrazen současně v centrální jamce fovey obou očí, hovoříme o bifoveálním zobrazení. Body ležící v pravém i levém oku ve stejné vzdálenosti a ve stejném směru od fovey centralis označujeme jako korespondující body sítnice. [8, 24]

Binokulární vidění lze zhodnotit pomocí binokulárních testů, ale také na přístroji, který se nazývá troposkop (viz podkapitola 3.4.2). Pomocí troposkopu lze měřit okohybnou odchylku při šilhání, ale také přítomnost jednotlivých stupňů JBV. Jedná se o důležitý přístroj při samotné diagnostice binokulárních vad, ale také jako terapie v ortoptice. [25]

3.4.1 STEREOSKOPICKÉ (PROSTOROVÉ) VIDĚNÍ

Jedná se o nejvyšší a nejhodnotnější stupeň binokulárního vidění. Teorie stereoskopického vidění je založena na existenci identických a disparátních bodů obou sítnic a jejich projekci do vyšších hladin centrálního nervového systému. Pokud se zaměříme na určitý bod v prostoru, naše oči se automaticky stočí do polohy tak, aby se pohledové osy obou očí protnuly právě v pozorovaném bodu – disjunktivní oční pohyb. Obraz fixovaného bodu se vytvoří ve foveách obou sítnic – na identických místech sítnic. Nejedná se o jediná identická místa sítnic obou očí – všechny body, které mají homolaterální lokalizaci a stejnou vzdálenost od horizontálního a vertikálního poledníku viz obr. 9. [1]



Obr. 9: Schématické zobrazení sítnice pravého (R) a levého (L) oka. Body X a X' značí polohu obrazů identického místa v prostoru. Svislá a podélná čára prezentuje vertikální a horizontální poledník. Modré body znázorňují centrální jamky, upraveno podle [1]

Vidění je způsobeno projekcí předmětů na korespondující a nekorespondující body sítnice. Korespondující místa sítnice se označují jako místa, kde je promítán obraz bodu fixovaný foveou. Korespondující body sítnice definují horopter – množina všech bodů v prostoru, jejichž obraz dopadá na korespondující místa obou sítnic. Body, které jsou v oblasti horopteru jsou dokonale fúzovány a jsou vidět jednoduše. Horopterová kružnice je následkem geometrické aproximace horopteru. Její konstrukce je v horizontální rovině a prochází fixačním bodem a uzlovými body. Body nacházející se před a za oblastí horopteru se nepromítají na korespondující místa sítnice, ale na místa disparátní. Důležitým kritériem stereoskopického vidění je maximální hranice disparace, která ještě vyvolá fúzi (splnutí obrazů obou očí v jeden). Rozsah hloubkového vidění je dán pásem před a za linií horopteru, která se nazývá Panumova oblast, její rozsah je v rozmezí 15' až 20' a vymezuje oblast jemného hloubkového vidění. V případě, že disparace přesáhne Panumovu oblast, pozorované objekty budou vnímány dvojité. [1, 4, 23]

Neurony IV. vrstvy primární zrakové kůry dostávají výhradně monokulární vstupní informace z homolaterálního nebo kontralaterálního oka. Nervové buňky IV. korové vrstvy následně vysílají své axony do vyšších nebo nižších vrstev primární zrakové kůry. V této situaci již není respektována hranice sloupců okulární dominance a do vrstev nad a pod IV. korovou vrstvu se dostávají data z obou sítnic. Z tohoto důvodu se neurony v těchto oblastech označují jako binokulární. Předpokládá se, že zajišťují fúzi

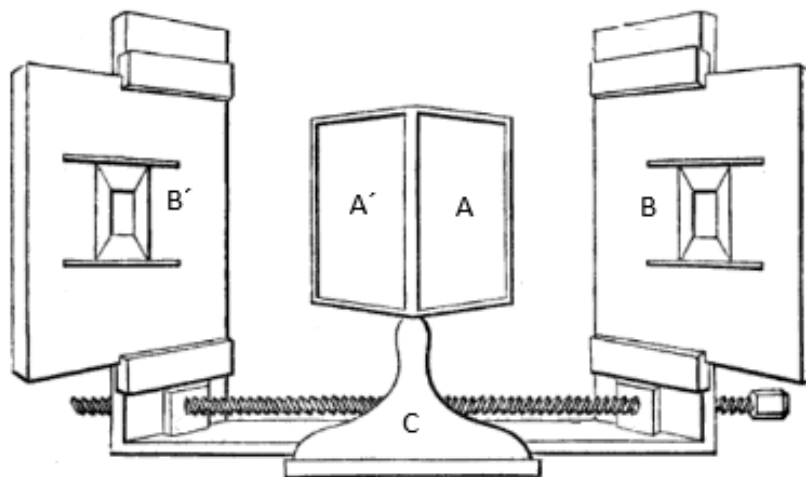
obrazových informací, které přicházejí z identických míst obou sítnic. Binokulární neurony se dále seskupují v podobě sloupečků a jejich aktivace je dosaženo při specifickém stupni retinální disparace. Seskupení slouží jako rysově analyzátory umožňující vnímání prostorové kvality vizuální informace. [1]

3.4.2 TYPY STEREOSKOPŮ

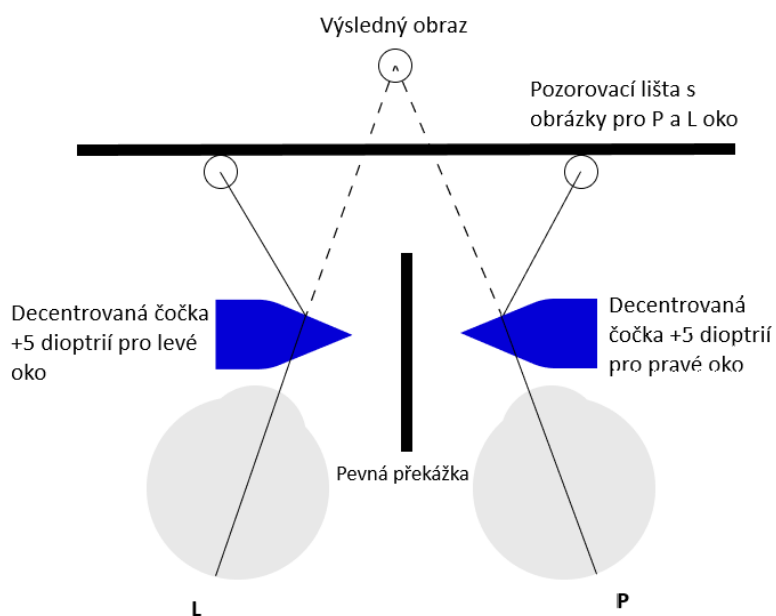
Stereoskopy jsou založeny na principu rozdělení binokulárního zorného pole podélnou přepážkou. Dichoptické zobrazení je chápáno jako prezentace každému oku jiný obraz, při splnění podmínek pro vznik JBV zejména fúze a stereopse. Haploskop (stereoskop) je zařízení, pomocí kterého lze prezentovat současně každému oku jiný obraz. Tento optický přístroj se nejčastěji skládá ze soustavy zrcadel s lesklým povrchem, které směřují od sebe pod úhlem 45 stupňů. Pomocí pravého zrcadla je pozorován objekt vpravo a levým zrcadlem obraz vlevo. Na základě odlišnosti mezi prezentovanými obrazy se mozek daného pozorovatele snaží vytvořit (s fúzovat) jeden obraz. Pokud jsou prezentovány velmi odlišné předměty, mozek je nedokáže spojit v jeden smysluplný vjem. V případě, že jsou obrazy pouze lehce odlišné, mozek je schopný vytvořit jeden společný. V následujících kapitolách budou rozebrány jednotlivé možnosti vytvoření stereoskopických obrazů. [26]

A) Wheatstonův zrcadlový stereoskop

Rozdělení vjemu pravého a levého oka je v tomto případě vyřešeno pomocí zrcadel. Nejstarším druhem je Wheatstonův stereoskop, jehož konstrukce odrážela obrazy v poloze 90° a pozorovatelem byly vnímány přímo před ním. Na tomto principu jsou založeny i moderní vyšetřovací přístroje pro měření, ale i nápravu různých okohybných odchylek jako je např. troposkop, amblyoskop či cheiroskop. Přístroje se skládají ze dvou tubusů zahnutých do písmene L a zrcadel umístěných v ohybu zrcadel a stočených o 45° vůči pohledové ose. V místě přiložení očí se nachází okulár s plusovými čočkami, které zajišťují uvolnění akomodace a tím pozorování objektů v nekonečnu. Na protilehlé straně tubusu nalezneme bodové zdroje světla a drážku pro vložení destiček s obrázky. Jedná se o základní ortoptický přístroj využívaný k diagnostice a k nácviku správného binokulárního vidění. [27]



Obrázek 10: Původní kresba Wheatstonova stereoskopu, A, A' jsou zrcadla pod úhlem 90°, B, B' prezentují pozorované obrázky – obrázek B pro pravé oko obrázky B' pro levé oko a C značí stojan držící zrcadla, upraveno dle [28]



Obrázek 11: Schématické zobrazení chodu paprsků při pozorování obrázků přes čočkový stereoskop, upraveno podle [30]

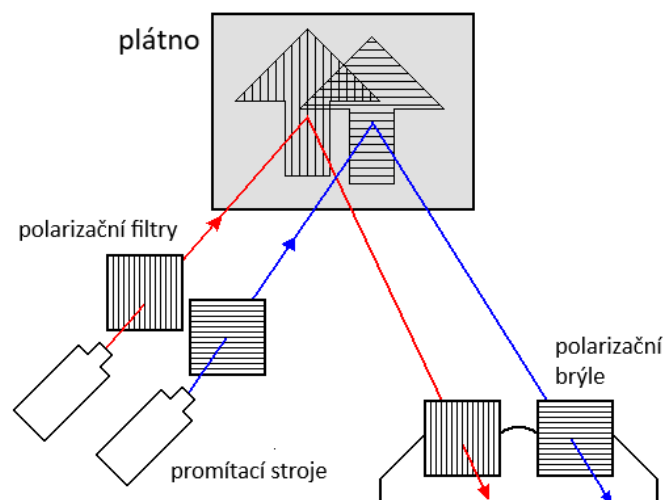
B) Brewsterův-Holmesův stereoskop

Soustava (obr. 11) je složena z posuvné kartičky, která obsahuje dva obrázky (jeden pro pravé a druhý pro levé oko). Obrázky jsou pozorované přes prizmatické čočky, jejichž

báze jsou orientované od nosu. Prizmata zajistí odklonění pohledových os do paralelního postavení. Zároveň se mezi okuláry nachází i pevná překážka za účelem dokonalejšího oddělení vjemu pravého a levého oka. Ruční stereoskop je složen z vodorovné dřevěné lišty se zabudovanou svíslou maskou se zabroušenými decentrovanými čočkami +5,0 dioptrií. Decentrované plusové čočky slouží jako prizmata s bází temporálně a zároveň rozdělují vjem pro pravé a levé oko. Na pozorovací liště se volně pohybují vytištěné obrázky v maximální vzdálenosti 20 cm od čoček. Stereoskop slouží kromě screeningu stereopse také k zhodnocení stavu binokulárního vidění a cvičení šířky fúze. [26, 29]

C) Polarizovaná projekce

Jedná se o nejrozšířenější ze všech metod, která se využívá zejména v kinech. Polarizované světlo se skládá z paprsků o stejném charakteru vlnění. Následkem průchodu prostorem světlo mění své magnetické pole na elektrické a naopak. Polarizace vzniká, pokud se světlo odrazí pod Brewsterovým úhlem, při kterém lomený a odražený paprsek svírají pravý úhel nebo po průchodu speciálními krystaly. Pokud spustíme dva projektory, z nichž jeden je polarizovaný v úhlu 45° a druhý promítá s polarizací v úhlu 135° dochází k tzv. pasivní polarizaci. Divák využívá polarizované brýle s příslušnými filtry pro každé oko (obr. 12). [31]



Obrázek 12: Chod paprsků při polarizované projekci, červený paprsek je pomocí polarizačních brýlí viděn levým okem, pravý paprsek pravým, upraveno dle [31]

4 CROWDING FENOMÉN A KONTUROVÁ INTERAKCE

Schopnost oka správně identifikovat znak na optotypu je ovlivněna nejen zrakovou refrakční vadou oka, ale také přítomností okolních písmen, znaků či kontur. Bylo dokázáno, že pokud rozmístíme písmena s dostatečným vzájemným odstupem, budou lépe rozlišitelné oproti výrazně nahuštěným znakům. Tuto situaci názorně demonstruje obr. 13. Uvedený jev se nazývá crowding fenomén a jedná se o další parametr při rozlišení jednoho písmene od ostatních. Čitelnost písmen či obecně znaků může být též ovlivněna například jeho ohraňčením – tento jev je označován jako konturová interakce. Oba z uvedených jevů mají značný praktický význam zejména při konstrukci testů zraku (viz podkapitola 3.2). Současně jejich objasnění může být nápomocné při pochopení funkcí zrakového systému. Následující text popíše základní charakteristiky obou jevů, objasní stávající teorie jejich původu a popíše jejich praktické dopady. Pozornost bude věnována těmto jevům za dichoptických podmínek ve srovnání s ostatními typy prezentace stimulů.



Obrázek 13: Demonstrace crowdingu – při fixaci kříže bude pro pozorovatele mnohem náročnější rozeznat písmeno K obklopené písmeny X (vpravo) oproti osamocenému písmenu K (vlevo) [32]

4.1 DEFINICE A CHARAKTERISTIKA

Crowding fenomén (též označován jako crowding efekt či crowding) je definován jako nežádoucí vliv okolních podnětů, které jsou podobné sledovanému objektu či znaku, na zrakový výkon. V případě konturové interakce je zrakový výkon negativně ovlivněn výskytem kontur kolem pozorovaného znaku. Může se jednat o jednoduché úsečky, ale také o hrany okolních znaků. Uvažuje se, že konturová interakce je součástí crowdingu. Kontura či obklopující znak je v anglicky psané literatuře často jednotně označována jako „flanker“. Vzhledem ke komplikovanému překladu bude tento pojem použit i v tomto

textu. Oba jevy výrazně ovlivňují rozlišitelnost a čitelnost pozorovaného znaku či písmene a schopnost jej správně identifikovat [33, 34, 35]. Souvislost s výskytem crowdingu nalezneme také při rozlišení orientace, pohybujících se předmětů, noniové a prostorové ostrosti či rozpoznávání tváří. [36] V každodenním životě se s těmito jevy setkáváme zejména při čtení či řízení vozidla.

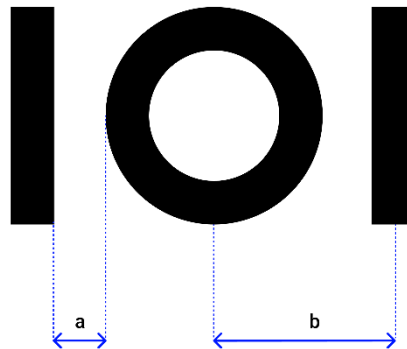
Právě závislost správné identifikace znaků na přítomnosti flankerů bývá častou možností, jak tyto jevy studovat. Typickým postupem pro hodnocení rozsahu a magnitudy je sledování relativní četnosti správných odpovědí při identifikaci znaků v závislosti na vzdálenosti kontur a případně na dalších podmínkách. Ze získané závislosti pak lze na základě vhodné definice stanovit rozsah a z maximálního poklesu odvodit magnitudu. Místo relativní četnosti správné identifikace lze zrakový výkon charakterizovat též dosaženou zrakovou ostrostí. Vzhledem k tomu, že crowding bývá chápán jako obecnější jev, není v literatuře mezi ním a konturovou interakcí často jednoznačně rozlišováno, což vede k řadě nepřesných závěrů. Navíc lze oba jevy dohledat též pod různými dalšími termíny, jako např. laterální maskování, laterální interference, laterální inhibice či kognitivní inhibice. Nicméně tato označení nejsou přesná, např. v případě laterálního maskování se jedná o jev založený na jiných mechanismech s poněkud odlišnými charakteristikami. Příčinám crowdingu a konturové interakce a jejich rozdílu od jiných jevů se bude věnovat podkapitola 4.3.[33]

Crowding i konturová interakce ovlivňují zrakovou ostrost, a to jak centrální (foveální) [34] tak i periferní [34, 37]. Vyskytují se ale i v dalších situacích, např. při rozlišení orientace zrakového stimulu [38] či rozpoznání obličejů [39].

V šedesátých letech 20. století Flom, Heath a Takahashi [34] objevili, že je crowding přítomen v případě, že prezentujeme znak a kontury každému oku zvlášť (dichopticky), což poukazuje na to, že původ obou jevů je zřejmě až v kortikální oblasti zrakové dráhy.

Crowding fenomén [33, 35, 40] i konturovou interakci lze charakterizovat tzv. laterálním rozsahem (kritickým rozestupem) a také magnitudou. Rozsah je definovaný jako maximální vzdálenost obklopujícího flankeru od pozorovaného znaku – u crowdingu je flanker podobný pozorovanému znaku a u konturové interakce se jedná o jednoduchou úsečku – ve které se začíná projevovat jejich vliv na zrakový výkon (např. zhoršením schopnosti znak identifikovat či poklesem zrakové ostrosti). Magnituda určuje nejvyšší

dosáhnutý pokles zrakového výkonu (např. pokles procenta správné identifikace či změna zrakové ostrosti) při přítomnosti flankerů oproti osamocenému znaku. Vzdálenost (separace) mezi flankery a pozorovaným centrálním znakem je často definovaná od středu znaku po centrální část flankeru, zejména při periferním crowdingu (center-to-center neboli separace od středu ke středu) [33, 35, 41]. V případě konturové interakce či u foveálního crowdingu se obvykle využívá měření vzdálenosti od okraje pozorovaného písmene po nejvnitřnější okraj flankeru, tzv. edge-to-edge neboli od okraje k okraji. Příklady obou možností měření separace jsou demonstrovány na příkladu konturové interakce na obr. 14. Ukazuje se, že volba jedné z uvedených možností není libovolná, ale pravděpodobně odráží příčiny daného jevu. Při vhodné volbě tohoto měřítka zůstává např. rozsah při změně dalších parametrů (např. velikosti znaku) konstantní [42].



Obrázek 14: Zobrazení možnosti měření separace: a – od hrany k hraně, b – od okraje k okraji

Jak již bylo uvedeno, v případě foveálního crowdingu a konturové interakce se jako vhodnější jeví využití měření separace od hrany k hraně, viz např. studie [43]. Z uvedených studií vyplývá, že takto měřený rozsah foveální konturové interakce nebo crowdingu se nemění ani při změně velikosti znaku. Přitom změny velikosti znaku bylo dosaženo různými metodami, např. změnou jasu [42] nebo kontrastu [43]. Rozsah se u jednotlivých publikací pohyboval v rozmezí 2' až 4'. Lze tedy uvažovat, že se oba foveální jevy vyskytují jen ve velmi malé, fixní oblasti v okolí pozorovaného znaku. Oproti tomu při poklesu jasu docházelo k výraznému snížení magnitudy [42], které však nebylo pozorováno při změně kontrastu. Tyto rozdíly mohou poukazovat na jeden z možných mechanismů těchto foveálních jevů, viz podkapitola 4.3, který bude zřejmě pro foveální crowding i konturovou interakci společný a dominantní.

Oproti tomu v případě periferní prezentace znaku a flankerů je možné pozorovat výrazné rozdíly. U konturové interakce se zdá spíše vyhovující měřítko od hrany k hraně, kdy je velikost rozsahu nezávislá na velikosti znaku, viz např. [42]. V případě crowdingu v periférii kritériu konstantního rozsahu spíše vyhovuje separace od středu ke středu. Markantní je také rozdíl v závislosti na excentricitě stimulu v zorném poli. Bylo pozorováno, že rozsah konturové interakce je významně nižší než rozsah periferního crowdingu. V případě konturové interakce např. publikace Levi a kol. 2008 [36] udává rozsah jako přibližně 0,1 násobek excentricity, některé studie dokonce žádnou výraznou závislost nezaznamenaly [42]; separace byla měřena od hrany k hraně. Oproti tomu u periferního crowdingu byl pozorován rozsah o velikosti asi 0,5 násobku excentricity, přičemž byla separace měřena od středu ke středu. Navíc konturová interakce v periférii vykazuje menší magnitudu než crowding. Je tedy zřejmé, že v periférii budou mít oba jevy pravděpodobně odlišnou povahu, resp. v případě crowdingu budou převládat jiné mechanismy než u konturové interakce.

Při srovnání centrálních a periferních charakteristik je patrný především rozdíl v rozsahu (jednotky minut ve fovee oproti desítkám minut v periférii), ale také v magnitudě – v periférii často dosahuje teoretické mezní hodnoty dané úrovní hádání znaků, zatím co v centru se obvykle drží výrazně nad touto hladinou. Velmi zajímavou a specifickou problematikou je crowding u amblyopických očí. V tomto případě lze pozorovat velmi silnou magnitudu a výrazný rozsah již u foveálního crowdingu, který lze částečně srovnat s periferním crowdingem. [36]

4.2 KONTUROVÁ INTERAKCE A CROWDING ZA DICHOPTICKÝCH PODMÍNEK

Zajímavé informace přináší srovnání výsledků experimentů, při kterých byl centrální znak a flankery prezentovány binokulárně, monokulárně a dichopticky.

Dříve zmíněné výzkumy Floma a kol. [34, 44] poukazují na možný nervový původ konturové interakce. Ve výzkumech byl vyšetřovaným osobám prezentován Landoltův prsteneček s okolními konturami nacházející se v různých vzdálenostech od prstence. Kontury byly náhodně prezentovány stejnému oku jako prsteneček (ipsilaterálně) a polovinu experimentu oku druhému (kontralaterálně). V obou případech byla výsledkem stejná míra prostorového rozsahu tzn. maximální vzdálenost od testovaného znaku, ve které dochází ke zhoršení rozlišitelnosti daného znaku a také stejný stupeň

ztráty ostrosti při maximální interakci (intenzita). Závěry poukazují na fakt, že inhibiční efekt konturové interakce musí být nervový a supraretinální – odehrává se na takovém místě zrakové dráhy, kde se informace z obou očí spojují. Takovým místem by mohl být CGL a více pravděpodobný týlní lalok mozku.

Kooi a kol. [40] se ve své publikaci zabývají studiem vnímáním hloubky periferního vidění. Tato studie se zabývala zejména crowdingem, protože okolní flankery byly stejného charakteru jako testovací znak. Potřebná doba trvání stimulu (písmena T a okolních písmen T) byla stanovena na 600 ms, jenž poskytuje pozorovateli dostatek času na vytvoření dobrého hloubkového vjemu. Hloubkový rozdíl mezi testovacím znakem a flankery zvýšil procento správných odpovědí a snížil rozsah interakcí. Binokulární stimulace, která je nezbytná k vytvoření dojmu hloubky měla za následek zvýšenou viditelnost testovacího znaku T a redukovala rozsah prostorové interakce ve srovnání s monokulárním testováním. Cílem práce bylo také zopakovat experiment Floma a kol. 1963 [34], který poukazoval na neměnný stupeň prostorové interakce ve fovey v případě, že jsou znak a flankery prezentovány dichopticky oproti monokulární prezentaci. Zvolený stimul byl centrován 10° periferně. Prezentace testovacího znaku a okolních flankerů (písmena T) byla zvolena náhodně mezi pravé a levé oko. Znak a kontury byly tedy viděny buď stejným okem (monokulárně) či dichopticky. Výsledky potvrdily a rozšířily poznatky daného experimentu, že prostorová interakce pro ipsilaterální a kontralaterální stimulaci je identická.

4.3 PŮVOD CROWDINGU A KONTUROVÉ INTERAKCE

Hlavním cílem mnoha studií zabývajících se tématem crowdingu a konturové interakce je stanovit velikost a vlastnosti laterálního rozsahu a magnitudy a na základě získaných poznatků objasnit příčiny těchto efektů. Přitom důležitým a již výše zmíněným poznatkem je skutečnost, že rozsah těchto jevů nezávisí na velikosti znaku za podmínky, že se jeho poloha v zorném poli (resp. v odpovídající oblasti sítnice) nezmění. Objasnit crowding a konturovou interakci se snažilo několik teorií, která staví buďto na optickém (fyzikálním) přístupu nebo na základě neurálních interakcí ve zrakové dráze. Stávající experimenty většinou hovoří ve prospěch neurálních procesů, v případě foveálních jevů z části ovlivněných optickými charakteristikami obrazu. [36]

Z hlediska optické (fyzikální) teorie vzniku crowdingu či konturové interakce by měla být podstata těchto jevů založena zejména na vlivu změny prostorových frekvencí

stimulu, které jsou způsobené přítomností flankerů. Předpokládá se, že zejména v oblasti fovey se crowding nebo konturová interakce vyskytují pouze u znaků o velikosti blízko limitu zrakové ostrosti, ale již ne u velkých stimulů. Hess a kol. [45] předpokládali, že přiblížení flankerů k pozorovanému znaku vede ke změnám ve spektru prostorových frekvencí stimulu (k posunu směrem do vyšších frekvencí), které způsobí sníženou viditelnost stimulu. Z této úvahy však vyplývají některé efekty (např. specifický průběh závislosti crowdingu či konturové interakce na separaci flankerů), které nebyly v pozdějších experimentech pozorovány. Tato teorie také není schopna vysvětlit pozorovanou závislost magnitudy na jasu stimulu, viz např. [42]. Obecně se tedy od této teorie upouští.

Objasnění mechanismu konturové interakce by bylo možné založit na bázi tzv. laterálního maskování. K tomuto jevu nastává při prostorovém nebo i jen časovém překryvu dvou objektů (pozorovaného znaku a masky), popř. při jejich těsném přiblížení. Příkladem může být obtížné počítání svislých čar čárového kódu. Tento jev je dobře prostudován a vyplývá z něj závislost rozsahu na velikosti znaku. Jak již bylo zmíněno, toto bylo v mnoha studiích vyvráceno. Tyto závěry se týkají jak foveálního, tak i periferního crowdingu. [42]



Obrázek 15: Příklad znaku obklopeného flankery – konturami

Jednou z nejpravděpodobnějších příčin výskytu těchto jevů je zejména zpracování signálu na neurální úrovni receptivních polí vyšších vrstev zrakové dráhy (viz kapitola 2). V tomto případě se vychází z předpokladu překrytí neurálních odezev testovaného znaku a flankerů, ke kterému dochází tím, že jejich obrazy dopadají do jednoho stejného receptivního pole. Rozsah dané prostorové interakce flankerů a testovaného znaku je pak závislý na velikosti daného receptivního pole, které je nejvíce citlivé na testovaný znak. Naopak by rozsah neměl záviset na velikosti znaku, jak bylo pozorováno [45]. Zraková

ostrost v periférii klesá [46], což souvisí s rozsáhlejšími receptivními poli a také by vysvětlovalo vyšší rozsah periferního crowding fenoménu. Toto odpovídá i závislosti obou prostorových interakcí na excentricitě. [33, 35]

Řada autorů [34, 35, 47, 48] zabývajících se konturovou interakcí předpokládá, že se jedná o výsledek neurální interakce mezi centrálním znakem a konturami, které jsou promítnuty na receptivní pole s antagonistickou strukturou centrální a periferní části. Pokud pozorovaný podnět (centrální písmeno) dopadne do centra takového receptivního pole (typicky „ON“-centra) a současně flanker dopadne do antagonisticky působící periferie („OFF“-periferie), následkem je inhibice signálu, který nese informaci o pozorovaném podnětu, a ta se projeví zhoršením jeho rozlišitelnosti. Jelikož je známo, že tato antagonistická struktura s klesajícím jasnem slábne [41], mělo by dojít též ke poklesu magnitudy. Toto bylo skutečně pozorováno ve fovee [42, 49, 50], ale nikoliv v periférii [42, 46]. Z toho lze usuzovat, že tento mechanismus je funkční pouze ve foveální oblasti. V periférii lze tedy očekávat jiné příčiny.

Jak zmiňuje podkapitola 4.2, bylo v 70. letech minulého století potvrzeno, že konturová interakce nastává i v případě, kdy je centrální znak prezentován jednomu oku a kontury odděleně oku druhému (dichopticky). Důvodem je spojení (fúze) obrazů z obou očí až v primární zrakové kůře což vede k předpokladu, že se jedná o kortikální původ konturové interakce. Část zrakové kůry, kde k fúzi dochází, se označuje V1 (viz kapitola 1.5). Konturová interakce, popř. i crowding tedy vznikají nejdříve v této části zrakové dráhy. Jelikož receptivní pole buněk v korovém zrakovém centru též vykazují antagonistickou jasem ovlivněnou strukturu, je toto zjištění v souladu s antagonistickým původem foveální konturové interakce. [34]

Současný výzkum se přiklání i ke složitějšímu modelu, jehož první stupeň zahrnuje detekci jednoduchých struktur a druhý stupeň odpovídá sloučení struktur. Tyto mechanismy se předpokládají především v periférii, kde vliv zmiňované antagonistické struktury nebyl prokázán. Uvažuje se, že zde dochází k procesům náhodného mísení (tzv. pooling) jednotlivých úseků pozorovaného stimulu, supresi (útlumu znaku či kontur) či cílené integraci (tzv. grouping – seskupení, doplnění či systematické spojení). Výskyt poolingů se vyznačuje tím, že pozorované znaky náhodně přebírají podobu okolních stimulů. Příkladem je percepční vzájemné spojení vícero kontur nacházejících se kolem centrálního znaku, a to na základě jejich podobnosti. Seskupení (grouping) se může

projevit jako na základě předchozí zkušenosti provedené spojení okolních kontur či seskupení centrálního znaku s okolními konturami. [51, 52]

Dalším jevem, který je také uvažován jako příčina crowdingu (ale ne konturové interakce) se nazývá substitute. Jedná se o případ, kdy je fixovaný znak zaměněn se znakem okolním, a to z důvodu jejich vizuální podobnosti. Tomuto jevu také přispívá přítomnost náhodných očních pohybů a nepozornost figuranta. Zvyšující se počet prezentovaných znaků na optotypu vede i k růstu crowding fenoménu, příčinou je rozdělení pozornosti zrakového aparátu mezi vícero znaků. [44, 53]

4.4 DŮSLEDKY KONTUROVÉ INTERAKCE A CROWDING FENOMÉNU

V každodenním běžném životě jsme obklopeni „vizuálně přeplněným prostředím“ a crowding efekt se může projevit zhoršeným rozeznáním většiny objektů v periferním zorném poli jedince. Příkladem může být i čtení, které je mnohem obtížnější vykonávat v periferním zorném poli, kdy je čtení výrazně pomalejší než při centrální fixaci. Soudobé studie upozorňují na to, že nejmenší mezery mezi jednotlivými písmeny by se měly rovnat alespoň kritické separaci pro crowding. [54, 55] Důsledkem nedodržení tohoto doporučení je pomalejší čtení při menších mezerách mezi jednotlivými písmeny. Pro čtenáře je také snazší provést několik fixací za sekundu oproti nepřetržitému sledování textu. Čtení je tedy ovlivněno počtem písmen, které je možné vidět při dané fixaci bez pohybu očí. I když je rychlost čtení obecně spojována s velikostí písmen více než se samotnými mezerami mezi nimi, tak z výzkumů vyplývá, že je čtení crowding efektem určitým způsobem ovlivněno. Jako příklad je možné uvést výzkum [55], který hodnotil vliv velikosti písmen a mezer mezi nimi u amblyopických pacientů. Vzdálenost mezi písmeny (tzv. kritický rozestup) pro čtecí tempo odpovídá crowding fenoménu, a to jak pro centrální i periferní vidění, tak pro amblyopické pacienty i figuranty bez jakékoliv zrakové vady. Výsledky studie poukazují na to, že crowding fenomén má primárně významný vliv na čtení (nikoliv zraková ostrost).

Dále autoři uvádějí, že amblyopie nemá vliv na periferní čtení, ale zároveň není vhodné připodobňovat periferní vidění zdravého člověka k centrálnímu vidění oka amblyopického. Amblyopický aparát je schopný vykazovat normální čtecí tempo při centrální fixaci, avšak za výskytu neobvykle velkých mezer mezi jednotlivými písmeny.

U periferního vidění zdravého oka je kritická separace i čtecí tempo výrazně sníženo v porovnání s viděním centrálním a čtecí tempo se spolu s excentricitou snižuje.



Obrázek 16: Crowding v reálném životě – Při fixaci červené tečky na obrázku je rozpoznání výskytu běžícího dítěte zhoršen výskytem pouličních značek (s podobným barevným charakterem) oproti dítěti, které se vyskytuje na obrázku samostatně. Upraveno podle [56]

Simmers a kol. [57] ve své studii, která zkoumala vliv kontrastu na konturovou interakci u normálních a amblyopických očí, uvádí, že konturová interakce je významnější na optotypech s vyšším kontrastem mezi znaky a pozadím. Při použití optotypů se sníženým kontrastem nedocházelo tak k významné interakci. V rozporu s těmito výsledky je práce Siderova a kol. [43], která uvádí, že velikost i úhlový rozsah konturové interakce jsou s vysokou i nízkou úrovní kontrastu téměř neměnné. Důvodem odlišných výsledků studií je zejména to, že v první zmíněné studii byly figurantům prezentovány znaky a kontury s neměnnou separací za nízkého a vysokého kontrastu. Avšak v případě optotypů se sníženým kontrastem lze očekávat vliv crowdingu na čtení. Bedell a kol. [47] zkoumali kromě vlivu kontrastu na konturovou interakci také vliv jasu. Rozsah foveální konturové interakce je konstantní pro znaky s různým jasnem, ale velikost konturové interakce se systematicky snižuje s klesajícím jasnem.

Crowding fenomén je významný zejména v praxi, když subjekt dosáhne zrakové ostrosti 6/9 na optotypu se správně separovanými písmeny od sebe, ale nedokáže rozpoznat všechna písmena a čísla na státní poznávací značce (SPZ) auta před ním. I když je velikost znaků okolo 6/15, jejich rozlišitelnost je zhoršena právě jejich bližší pozicí. Vliv crowdingu je možné pozorovat v mnoha dalších oblastech zrakového vnímání jako

je například rozpoznání písmen na optotypu [33, 34, 35]). Tato skutečnost je pravdivá jak pro centrální, tak pro periferní část sítnice.

Aby byly hodnoty z vyšetření zrakové ostrosti použitelné pro její hodnocení, je zapotřebí dodržet správnou vzdálenost testovacích znaků od sebe (viz kapitola 3.3) právě z důvodu možného vlivu crowding fenoménu a konturové interakce. Standardizovaná vzdálenost mezi znaky a řádky byla navržena australskými optometry Baileyem a Lovie-Kitchinovou v roce 1976. Těmto nežádoucím vlivům se dá předejít tak, že vyšetřovaný uvidí na optotypu v daný moment pouze jeden znak, ale v praxi se tato možnost spíše nevyužívá. [58]

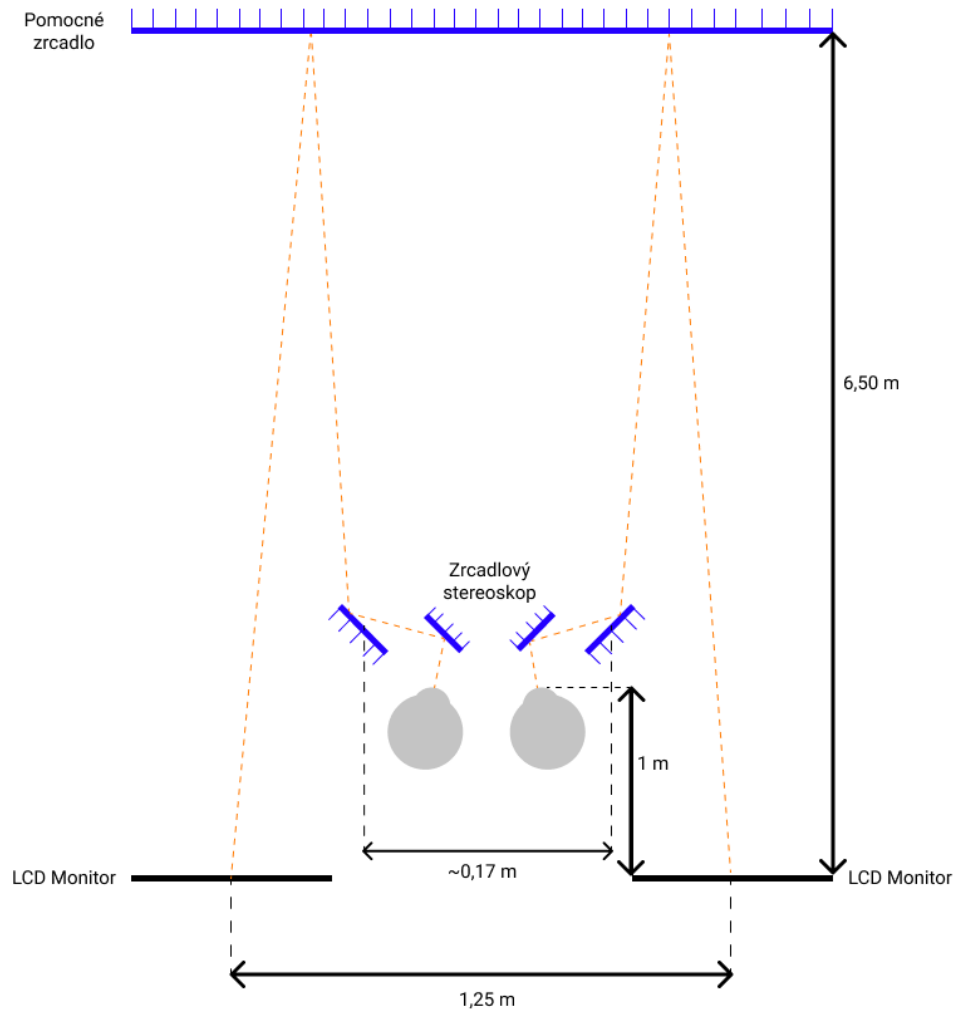
Crowding má také velmi důležité klinické důsledky pro pacienty s makulární degenerací, amblyopií a dyslexií. Současná znalost popisuje crowding jako zásadní překážku při vnímání objektů, která ovlivňuje zejména periferní a amblyopické vidění. [59]

5 PRAKTICKÁ ČÁST

Stávající teorie předpokládají, že konturová interakce vzniká až v kortikální oblasti zrakové dráhy. Jedním z podpůrných argumentů je též existence dichoptické konturové interakce, kdy je jednomu oku prezentován centrální stimul a druhému kontury (viz podkapitola 4.2). Cílem praktické části diplomové práce bylo jednak navrhnout a vytvořit experimentální sestavu pro realizaci dichoptických experimentů, jednak provést vlastní dichoptické pozorování konturové interakce. Dalším cílem bylo porovnat dichoptickou a monokulární konturovou interakci, přičemž jsme na základě doposud publikovaných prací [34, 40, 44] předpokládali, že mezi oběma nebude významný rozdíl. Vlastní experiment měl tedy dvě části – dichoptickou a monokulární.

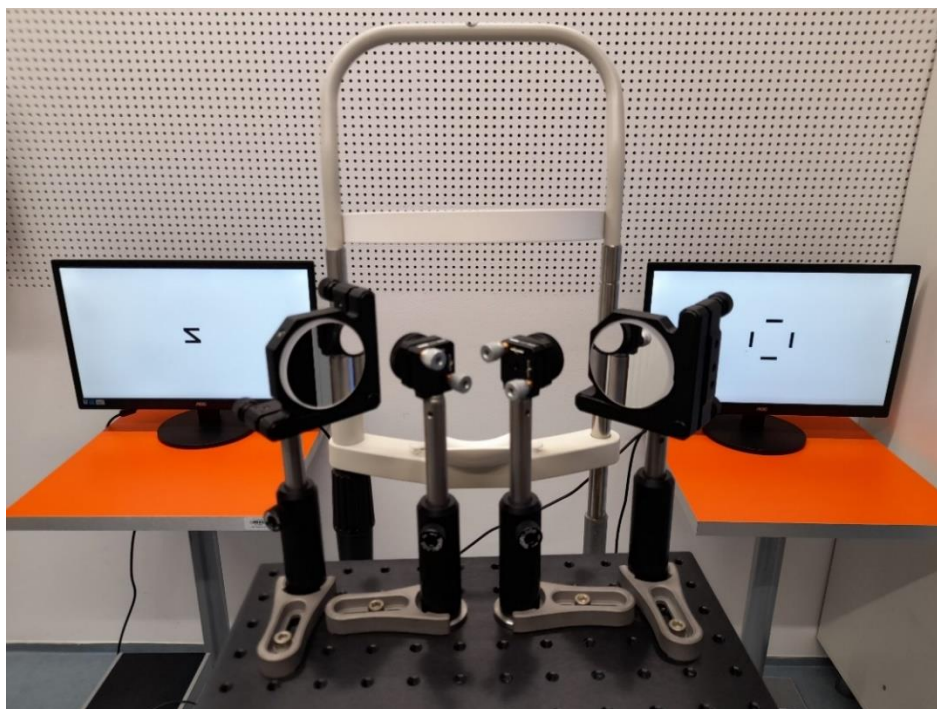
5.1 SESTAVA PRO DICHOPTICKÉ ZOBRAZENÍ

Při konstrukci experimentální sestavy jsme se inspirovali zrcadlovým stereoskopem, který umožňuje prezentovat odlišné vjemy do levého a pravého oka. Principy tohoto přístroje jsou prezentovány v podkapitole 3.4.2. Cílem sestavy bylo zajistit, aby každé oko mohlo samostatně pozorovat obraz vytvořený na právě jednom ze dvou monitorů. Schéma sestavy ukazuje obr. 17. Byly použity dva totožné LCD monitory o rozlišení 1920 x 1080 pixelů a úhlopříčce 22 palců. Oba monitory byly napojeny na jeden osobní počítač, na monitorech byla nastavena tzv. rozšířená plocha, tedy na každém z nich mohl být promítán jiný obraz. Stěžejní část sestavy byla umístěna na výškově stavitelném elektrickém stolku a je zachycena na obr. 18. Jednalo se o opěrku brady, před kterou byla umístěna podložka s optickou sestavou zahrnující pro každé oko dvě zrcadla nastavená tak, že levé oko pozorovalo levý a pravé oko pravý monitor. Tato zrcadla bylo možné vůči sobě navzájem posouvat, vysunutím či zasunutím jejich teleskopických stojanů měnit jejich výškovou pozici a pomocí justážních šroubků na stojanech upravovat jejich sklon. Aby byla zkrácena fyzická velikost celé sestavy, byly oba monitory navíc pozorovány přes další přídavné zrcadlo (jeho velikost byla volena tak, aby v něm bylo možné současně zobrazit do sestavy stereoskopu oba monitory). Celková optická pozorovací vzdálenost tak byla 12 m.



Obrázek 17: Schématické zobrazení sestavy zrcadlového stereoskopu použité v praktické části této práce

Pro každého figuranta bylo nutné před zahájením experimentu celou soustavu důkladně seřídit tak, aby při pozorování monitorů přes stereoskop obrazy obou monitorů dokonale splývaly. Pro co nejlepší seřízení bylo uprostřed jednoho monitoru prezentováno písmeno a uprostřed druhého neúplný čtverec tvořený konturami. Při správném seřízení bylo písmeno přesně uprostřed kontur. Velikost písmene i vzdálenost kontur od středu monitoru byly voleny s ohledem na vîzus figuranta.



Obrázek 18: Fotografie soustavy zrcadlového stereoskopu a LCD monitorů zobrazující testovací znak a kontury



Obrázek 19: Fotografie soustavy zrcadel stereoskopu použité v praktické části práce z pohledu figuranta

5.2 SOUBOR

V rámci výzkumu bylo proměřeno celkem 5 figurantů (2 muži a 3 ženy) ve věku 23 až 44 let. Každý z figurantů splnil předem stanovené požadavky, mezi které se zařadila zejména absence jakéhokoliv očního onemocnění či zrakové abnormality, která by mohla mít vliv na zrakovou ostrost a jednoduché binokulární vidění. Byla požadována monokulární zraková ostrost každého oka i binokulárně alespoň 1,0. V případě snížené zrakové ostrosti refrakční vadou byla refrakční vada kompenzovaná vlastní korekcí, se kterou byla opět požadována monokulární i binokulární zraková ostrost alespoň 1,0. Vyšetření pak probíhalo s touto korekcí. Z důvodu časové náročnosti samotného měření byl brán také zřetel na psychickou i fyzickou kondici v den měření. Před samotným měřením byl každý figurant seznámen s jeho průběhem a svůj souhlas s účastí na něm potvrdil podpisem informovaného souhlasu. U dvou subjektů se při dichoptickém experimentu projevila suprese (zejména při nízkých separacích kontur, viz níže) a nebyla tak získána kompletní sada dat. Do konečného vyhodnocení tedy byli zahrnuti jen tři figuranti (dvě ženy, jeden muž) ve věkovém rozsahu 23 až 44 let. Veškerá měření se uskutečnila v laboratoři na katedře optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého.

5.3 METODIKA

5.3.1 STIMUL

Stimul se skládal z centrálního znaku (náhodně volený znak ze sady písmen dle Sloanové, C, D, H, K, N, O, R, S, V, Z) prezentovaného samostatně nebo obklopeného konturami. Kontury i centrální znak měly vždy stejný jas i kontrast, separace všech kontur od znaku byla jednotná. Kontury byly zobrazeny nahoře, dole, vlevo a vpravo oproti znaku, jejich šířka byla rovna 1/5 velikosti znaku, délka odpovídala velikosti znaku. Stimul byl černý o vysokém kontrastu (> 95 %) prezentovaný na bílém pozadí o vysokém (fotopickém), ale neoslňujícím jasu. Stimuly byly vždy pozorovány přes soustavu stereoskopu a byly zobrazeny na monitorech této soustavy. V průběhu experimentu byly použity dva druhy stimulů: dichoptický a monokulární. Při monokulárním zobrazení byl stimul prezentován pouze na jednom monitoru, který byl pozorován vedoucím okem, druhé oko bylo zakryté. Při dichoptickém pozorování byl stimul rozdělen na oba monitory a byl pozorován oběma očima. Přitom písmeno bylo prezentováno na monitoru, který figurant sledoval vedoucím okem, kontury na druhém monitoru. Kontury byly umístěny tak, aby při překrytí monitorů sloučený stimul odpovídal prezentaci pro monokulární

interakci, tj. pozorované písmeno bylo uprostřed kontur. V případě dichoptického stimulu byl mezi dvěma prezentacemi stimulu vždy zařazen pomocný fúzní podnět, který pomáhal figurantovi udržet správně nastavenou motorickou i senzoricou fúzi. Tento podnět je zobrazen na obr. 20. Sestával z černého čtverce zobrazeného na obou monitorech (tj. viděného oběma očima) a dvou svislých čar, přičemž horní vidělo jen jedno oko a dolní jen oko druhé. Velikost detailu fúzního podnětu odpovídala $2 \times (\log MAR + 0,1)$, kde *MAR* je aktuální *MAR* figuranta v úhlových minutách. Vlastní stimul byl prezentován až ve chvíli, kdy figurant potvrdil, že obě svislé čáry vidí a že je vidí přesně nad sebou. Absence jedné z čar znamenala supresi daného oka. Prodleva mezi ukončením zobrazení pomocného fúzního podnětu a zobrazením vlastního stimulu byla 250 ms, v této době bylo na obou monitorech zobrazeno pouze bílé pozadí. Doba prezentace vlastního stimulu byla omezená na 500 ms, v průběhu delšího intervalu mohlo u dichoptického experimentu dojít k výraznému narušení fúze. Všechny stimuly byly generovány pomocí speciálních počítačových programů (samostatný program pro monokulární a samostatný pro dichoptickou prezentaci), které poskytl vedoucí práce. Laboratoř, ve které probíhalo měření, byla po celou dobu experimentu zatemněna a umělé osvětlení vypnuto, takže osvětlení místnosti zajišťovaly pouze monitory prezentující stimul.



Obrázek 20: Pomocný fúzní podnět využitý při měření

5.3.2 POSTUP MĚŘENÍ

Nejprve byla monokulárně stanovena základní velikost znaku tak, aby byl vedoucím okem identifikován s pravděpodobností asi 80 až 90 %. Finální stanovení pravděpodobnosti identifikace samostatného znaku proběhlo na základě několika sérií po 100 prezentacích stimulů (po úvodní sérii proběhlo několik kontrolních, které ověřovaly stabilitu pravděpodobnosti identifikace). Takto nastavená velikost znaku byla v dalším průběhu experimentu u daného figuranta konstantní.

Následně v náhodném pořadí probíhalo měření za monokulárních a dichoptických podmínek za pěti různých separací kontur měřených metodou od hrany k hraně (viz podkapitola 4.1), které odpovídaly 10, 20, 40, 60 a 100 % velikosti znaku. Pro každou separaci a každý typ stimulu (monokulární či dichoptický) byla provedena jedna série o 100 prezentacích. Figurant verbálně znaky identifikoval, jeho odpovědi byly zaznamenány a bylo z nich stanoveno procento správné identifikace pro každou sérii.

5.3.3 ANALÝZA DAT

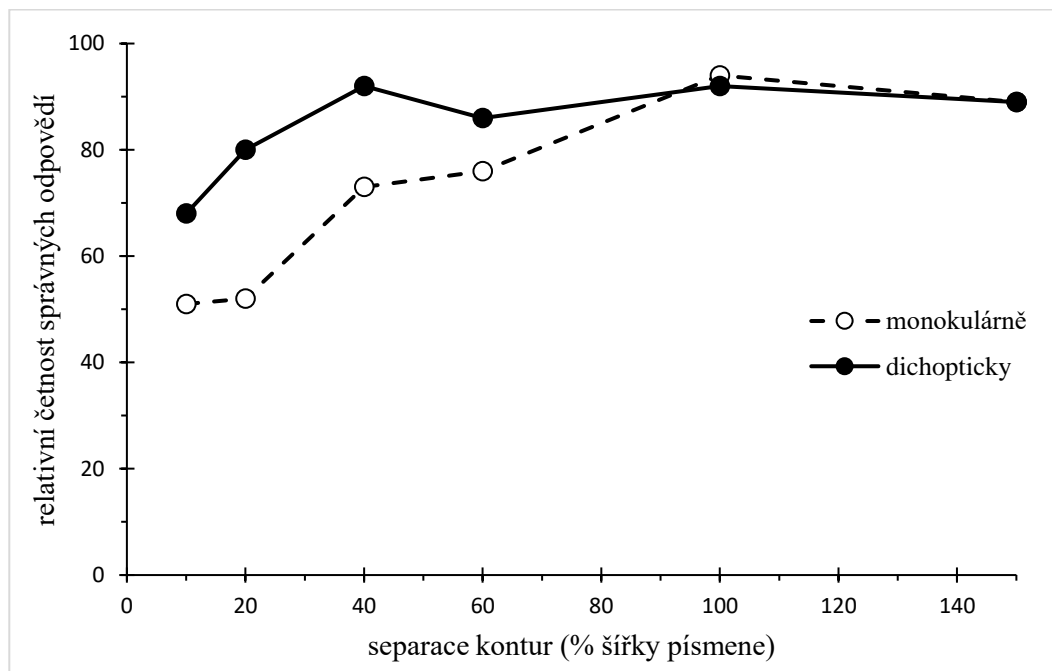
Do vyhodnocení byly zahrnuti pouze tři figuranti, u kterých byla získána kompletní sada data. U každého z nich byla zkonstruována grafická závislost relativní četnosti správných odpovědí na separaci kontur jak pro monokulární, tak pro dichoptické měření. Byla též sestavena křivka z průměrných dat.

Vzhledem k nízkému počtu figurantů byla následně pro účely statistické analýzy všechna odpovídající si data všech do analýzy zahrnutých subjektů sloučena (sloučeny a analyzovány byly absolutní četnosti správných odpovědí). Pro každou z pozorovacích podmínek (monokulární a dichoptickou) byla stanovena kritická separace (rozsah) kontur, při které se již hodnoty údajů o správné identifikaci statisticky významně lišily od výchozí hodnoty bez kontur. Analýza byla provedena na základě porovnání údajů z každé jednotlivé separace s výchozí hodnotou pomocí χ^2 testu (hodnotila se pravděpodobnost odchylky naměřených hodnot od hodnot, které by byly očekávány v případě shody rozdělení u obou srovnávaných situací). Shoda mezi monokulárním a dichoptickým měřením byla opět vyhodnocena pomocí χ^2 testu, přičemž byl současně porovnáván soubor dat získaných pro všechny monokulární separace s odpovídajícím dichoptickým souborem (hodnotila se pravděpodobnost odchylky naměřených dat od hodnot očekávaných v případě shody monokulárního a dichoptického souboru). Testování statistických hypotéz proběhlo na hladině významnosti 0,05.

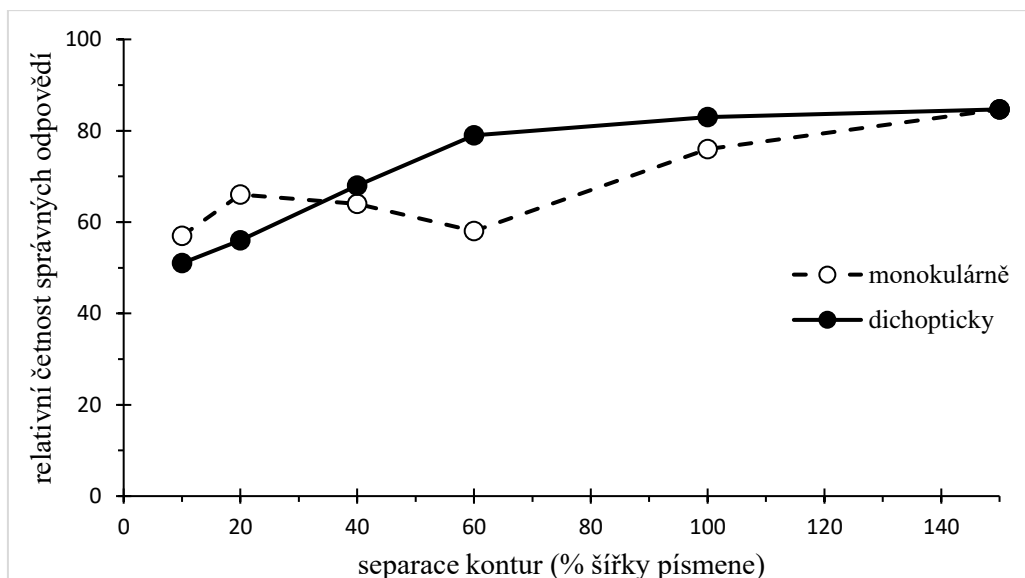
5.4 VÝSLEDKY

Kompletní soubor měření za všech podmínek se podařilo získat pouze u třech subjektů (u zbylých dvou nebylo možné z důvodu suprese provést měření za dichoptických podmínek). Data těchto tří subjektů (KZ, FP, LM) získaná jak při monokulárních, tak dichoptických podmínkách jsou ve formě závislosti relativní četnosti správných odpovědí na separaci prezentována na obr. 21, 22 a 23. Velikost pozorovaných písmen u jednotlivých subjektů byla 4' (KZ), 5' (FP) a 4' (LM).

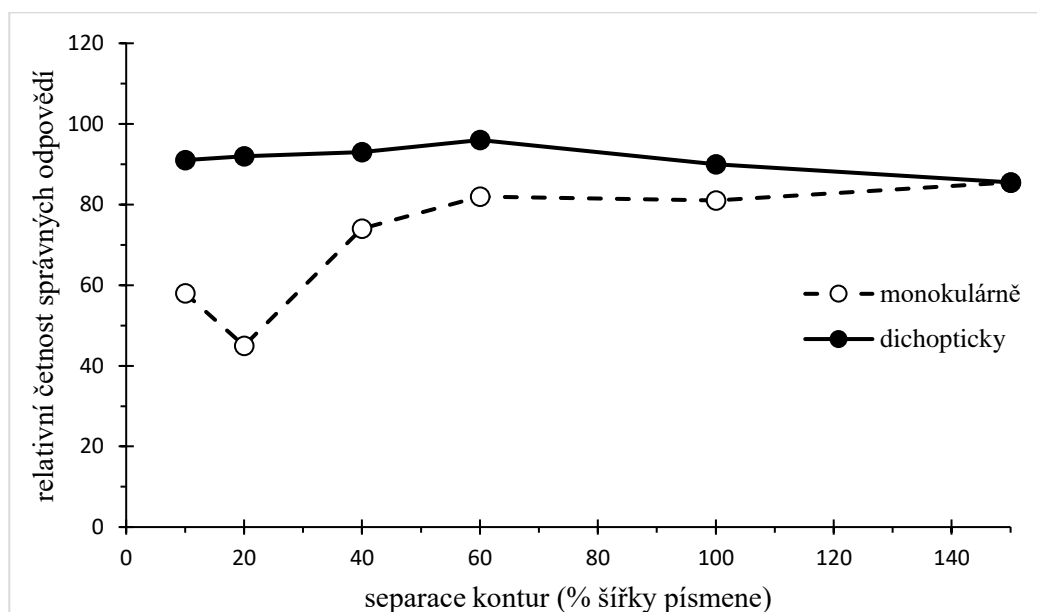
U dvou subjektů (KZ, LM) je patrný rozdíl mezi monokulárním a dichoptickým pozorováním stimulu, kdy za monokulárních podmínek je parná výraznější magnituda i větší rozsah, přitom u figuranta LM se za dichoptických podmínek konturová interakce téměř neprojevila. Naopak v případě figuranta FP jsou si data z monokulárního i dichoptického pozorování podobná, monokulární data vykazují poněkud větší rozsah.



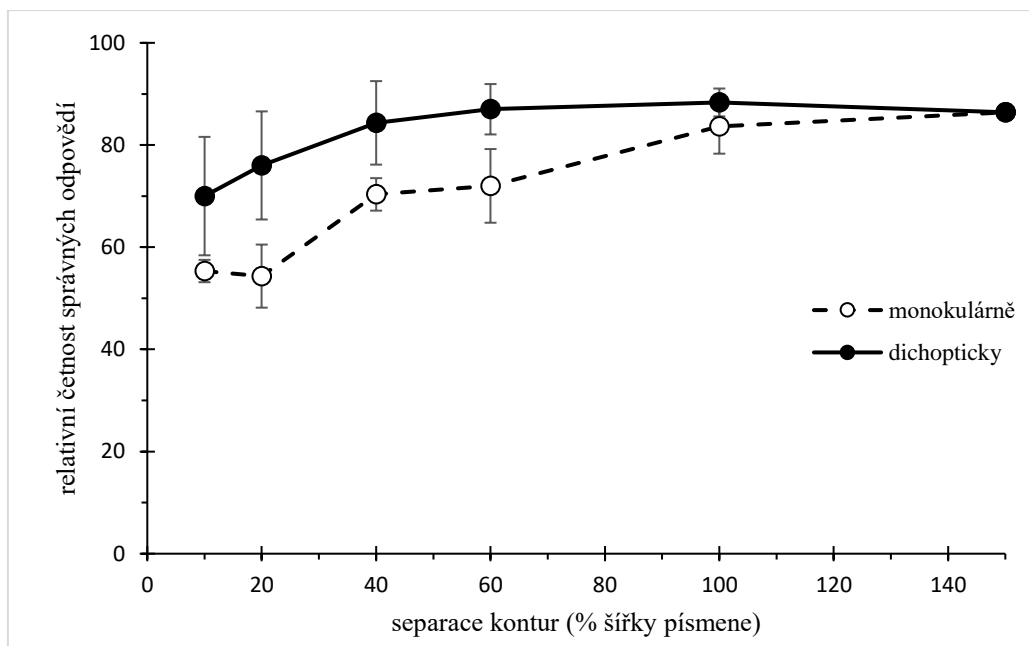
Obrázek 21: Závislost četností správných odpovědí na separaci kontur od centrálního písmene pro subjekt KZ. Plná kolečka reprezentují data získaná dichopticky, prázdná kolečka představují data získaná za monokulárních podmínek.



Obrázek 22: Závislost četností správných odpovědí na separaci kontur od centrálního písmene pro subjekt FP. Plná kolečka reprezentují data získaná dichopticky, prázdná kolečka představují data získaná za monokulárních podmínek.



Obrázek 23: Závislost četností správných odpovědí na separaci kontur od centrálního písmene pro subjekt LM. Plná kolečka reprezentují data získaná dichopticky, prázdná kolečka představují data získaná za monokulárních podmínek.



Obrázek 24: Průměrná závislost četnosti správných odpovědí na separaci kontur od centrálního písmene. Plná kolečka reprezentují hodnoty zprůměrované přes všechny subjekty za dichoptických podmínek, prázdná kolečka za monokulárních podmínek. Polo šířka chybových úseček představuje standardní chybu průměrné hodnoty.

Obr. 24 prezentuje hodnoty získané zprůměrováním údajů od všech tří subjektů a standardní chyby průměrů ve formě chybových úseček. I zde je patrný rozdíl mezi dichoptickým a monokulárním pozorováním stimulu. Statistická analýza četností správných odpovědí prokázala, že zatímco za monokulárních podmínek zrakový výkon s konturami statisticky významně poklesl oproti situaci bez kontur již při separaci 60 % velikosti znaku ($p = 0,048$), u dichoptické prezentace se tak stalo až při minimální separaci 10 % ($p = 0,02$). Jelikož se však vždy jednalo o opakovaná měření (srovnávána byla postupně data z pěti separací s údaji získanými bez kontur), je nutné zohlednit korekci výsledků. Při použití Bonferroniho korekce (snížení hladiny významnosti na $0,05/5$) se významně liší pouze data při separaci kontur 20 % a 10 % šířky znaku monokulárně, dichopticky nebyl nalezen žádný významný rozdíl. Vzájemné porovnání četnosti správných odpovědí mezi monokulárními a dichoptickými daty však neprokázalo žádný významný rozdíl ($p = 0,14$).

5.5 DISKUSE

Z výsledků mnoha studií vyplývá, že okolí pozorovaného znaku má výrazný vliv na jeho čitelnost [34, 42, 43, 44] a následně na stanovení zrakové ostrosti jedince [44, 50]. Předchozí studie poukazují na skutečnost, že tento jev se projevuje jak při monokulární [34, 48, 49], tak dichoptické prezentaci testového znaku a okolních znaků [34, 40, 60], v našem případě kontur. Pro realizaci takovýchto experimentů je třeba použít speciální zařízení pro zobrazení stimulu. Jedním z cílů našeho experimentu byl návrh a realizace sestavy pro dichoptické zobrazení stimulu vycházející ze zrcadlového stereoskopu. Z technického hlediska se toto zařízení povedlo úspěšně zrealizovat. Z pohledu jeho praktické aplikace při vyšetřování foveální dichoptické konturové interakce se jako stěžejní ukázalo správné zjustování zrcadel stereoskopu, na kterých závisela schopnost kvalitně sfúzovat kontury a pozorované písmeno do jednoho vjemu. U většiny figurantů se při měření objevovala značná nestabilita vjemu, která se projevovala nežádoucím posunem kontur oproti testovanému písmenu, kterou se podařilo částečně eliminovat zkrácenou dobou prezentace stimulu. I tak u dvou figurantů nedošlo k dokonalé fúzi a stimul byl viděn buďto výrazně posunut nebo došlo k supresi vjemu jednoho oka. Tento efekt by bylo možné odstranit například vhodným zrakovým tréninkem figurantů před vlastním experimentem nebo začleněním vhodného trvalého fúzního podnětu do vlastního stimulu, např. drobná centrální značka viděná oběma očima. Tomu by se ale musel přizpůsobit vlastní testový znak (např. by mohl být použit Landoltův prstenec, u kterého by se do prázdného středu mohla umístit centrální značka, druhá, totožná, by byla uprostřed kontur). Dané zařízení by se dalo též využít při testování periferní konturové interakce, přičemž zde by mohl být foveálně pozorovaný fúzní podnět (např. použitý v našem experimentu) trvale zobrazen, aniž by rušil periferně pozorovaný stimul.

Dalším cílem bylo ověření chování dichoptické foveální konturové interakce ve srovnání s monokulární interakcí. Konturová interakce byla patrná za všech podmínek, avšak při dichoptické prezentaci stimulu byla oproti monokulárním podmínkám slabší, jak je patrné z dílčích i průměrných dat, viz obr. 21-24 (u dvou subjektů ze třech je zřetelný menší rozsah i magnituda, jeden subjekt vykazuje podobnou magnitudu při odlišném rozsahu). Přímé statistické porovnání dat však (zřejmě i s ohledem na malý počet figurantů) rozdíl nepotvrdilo. Větší množství figurantů však vzhledem k stávající epidemiologické situaci nebylo možné zajistit. Oproti našim výsledkům však jak foveální

[34], tak periferní [40] předchozí studie nevykazují významný rozdíl mezi monokulární a dichoptickou konturovou interakcí. Jednou z příčin může být v našem experimentu pozorovaná nestabilita vjemu, která se projevila jednostranným posunem kontur či střídavým mizením části kontur či celého písmene. Uvedené jevy byly u dvou figurantů natolik markantní, že museli být z experimentu vyřazeni. U zbývajících třech však mohly také do určité míry ovlivnit výsledek, byť se nevyskytovaly při každé dílčí prezentaci. Posun či suprese zejména kontur mohly oslabit konturovou interakci a tím způsobit její zdánlivě slabší efekt za dichoptických podmínek.

Při srovnání s foveální studií [34] je patrné několik rozdílů, které mohly mít vliv na stabilitu vjemu a tím i na výsledek. V případě článku [34] byly pozorovány Landoltovy prstence prezentované ve čtyřech pozicích (nahoru, dolů, doprava, doleva) a obklopené čtyřmi flankery v podobě kontur, zatímco v našem experimentu byly figurantům prezentovány písmena. Volba jednodušších znaků (prstenců) mohla částečně omezit supresi a nestabilitu vjemu. K omezení zejména suprese kontur mohla také významně přispět prezentace centrálního znaku horšímu oku [34] oproti námi zvolené prezentaci testovacího znaku oku dominantnímu. Dalším rozdílem mezi studii je promíchání dichoptického a monokulárního testování při jedné sérii testování oproti našemu postupu, kdy jsme testovali 100 znaků buď pouze monokulárně či dichopticky. V případě promíchaných prezentací mohla být fúze stabilnější. Na možnou supresi v našem experimentu mohl mít též vliv odlišný fúzní podnět a omezená doba prezentace (nebyl prezentován spolu se stimulem). Flom a kol. [34] použili jako pomocný fúzní podnět malou tečku, která byla figurantem viděna po celou dobu měření. Oproti tomu figurantům v našem experimentu byl prezentován pomocný fúzní podnět v podobě čtverce s dichopticky zobrazenými úsečkami (obr. 20). Rozdílem je u studií i způsob oddělení vjemu pravého a levého oka, a to polarizací [34] a pomocí zrcadlového stereoskopu, který je náročnější na sestavení a zjustování. Námi získané výsledky tedy mohly být ovlivněny řadou dalších dílčích jevů, které mohly způsobit zhoršenou dichoptickou viditelnost kontur a tím i sníženou míru konturové interakce. Z našeho experimentu tedy vyplývá požadavek na silnější stabilizaci fúze v průběhu měření, který je nutné zohlednit v dalších případných experimentech.

Srovnání našich údajů s výsledky další dichoptické studie [40] také poukazuje na rozdíly, které by mohly být i zde objasněny na základě nestability vjemu v našem experimentu. Navíc se v tomto případě experimentální podmínky liší ještě více. Práce

[40] se zaměřila na periferní crowding, zatímco my jsme se zabývaly foveální konturovou interakcí. Z předchozích publikací vyplývá, že konturová interakce se v periférii chová jinak než crowding (pro srovnání viz např. diskuse v publikaci [42] a mají zřejmě odlišný původ. Současně se zdá, že i samotná konturová interakce je způsobena jinými mechanismy ve fovee a jinými v periférii [49]. Alternativní vysvětlení rozdílů mezi našimi výsledky a [40] se tedy může opřít o odlišnost periferního crowdingu a foveální konturové interakce.

V případě monokulární konturové interakce byly naše výsledky v dobré shodě s předchozími studii. Nami udávaný kritický rozsah (bez korekce na opakovaná měření se pohybuje mezi 2,4' a 3') odpovídá údajům např. z prací [42, 47, 48]

ZÁVĚR

Teoretická část této práce shrnula poznatky z oblasti zpracování signálu zrakovým aparátem z hlediska jednotlivých částí zrakové dráhy a následně se věnovala popisu receptivních polí, která mají značný význam při vzniku crowdingu a konturové interakce. Pozornost byla věnována oblastem, kde může docházet k mísení signálů z obou očí. Z provedené rešerše vyplývá, že k určité kombinaci těchto signálů může docházet již v CGL, nicméně ke stěžejnímu zpracování dochází až ve zrakové kůře. Dalším tématem práce byla zraková ostrost, která představuje jeden z významných parametrů při studiu crowdingu a konturové interakce. Jelikož oba jevy podstatně ovlivňují její měření, ukazuje se jako nezbytné je při konstrukci optotypů zohlednit. Následující odstavce zaměřené na binokulární vidění popsaly hlavní pojmy nutné pro pochopení vlastností binokulárního zrakového vjemu a základní konstrukce stereoskopů, které mohou sloužit k dichoptické prezentaci stimulů. Z těchto znalostí pak vycházel návrh stereoskopu sestaveného v experimentální části. Stěžejním tématem práce byla charakteristika jevů konturové interakce a crowding fenoménu. Kapitola se zabývala zejména definicí, původem a důsledky těchto jevů při čtení nebo vnímání reálného okolního prostředí. Pozornost byla též zaměřena na stávající znalosti jejich chování za monokulárních i dichoptických podmínek. Z dostupných studií vyplývá, že by mezi oběma podmínkami neměl být zásadní rozdíl.

V rámci experimentální části práce byla nejprve navržena, sestavena a pak experimentálně ověřena konstrukce zrcadlového stereoskopu pro dichoptickou prezentaci stimulů, zejména stimulů pro konturovou interakci. Následující experiment ověřil jeho funkčnost. V případě konkrétních typů použitých stimulů se však projevila nestabilita výsledného binokulárního zrakového vjemu, která mohla významně ovlivnit následné měření konturové interakce za dichoptických podmínek. Ze získaných zkušeností vyplývá nutnost modifikace stimulu, především zařazení trvalého fúzního podnětu, pro případ dalších dichoptických experimentů. I přes tyto potíže prokázalo pozorování přítomnost konturové interakce jak za monokulárních, tak i za dichoptických podmínek. Naše výsledky však v rozporu s předchozími studiemi vykazují mezi oběma pozorovacími podmínkami rozdíly, přičemž dichoptická interakce se jeví slabší. Příčinou může být již zmíněná horší stabilita dichoptického vjemu, kdy mohlo docházet jednak k nežádoucímu posunu kontur, jednak k částečné či občasné supresi vjemu jednoho oka (zejména vjemu kontur) a tím k oslabení interakce. Jelikož se i za těchto zhoršených

podmínek konturová interakce (byť slabě) projevila, lze na základě našich výsledků a v teoretické části poskytnutých informací říci, že konturová interakce je přítomna i za dichoptických podmínek a že tedy má alespoň částečně původ v částech zrakové dráhy, kde dochází k mísení či kombinaci signálů z obou očí, tj. v corpus geniculatum laterale nebo (pravděpodobněji) dále ve zrakové dráze. Výstupy této práce, zejména vytvořená experimentální sestava, mohou být východiskem pro další studie v oblasti dichoptických prezentací při psychofyzikálních měřeních zrakových funkcí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KRÁLÍČEK, P.: *Úvod do speciální neurofyzologie*. 3., přepracované a rozšířené vyd. Praha: Galén, c2011. ISBN 978-80-7262-618-2.
- [2] OTRADOVEC, J.: *Klinická neurooftalmologie*. Praha: Grada Publishing, 2003. ISBN 80-247-0280-0.
- [3] SYKA, J., VOLDŘICH, L. a VRABEC, F.: *Fyziologie a patofyziologie zraku a sluchu*. Praha: Avicenum, 1981.
- [4] SYNEK, S., SKORKOVSKÁ Š.: *Fyziologie oka a vidění*. 2., dopl. a přepracované vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.
- [5] FERREE, C. E., & RAND, G. (1919): *Chromatic thresholds of sensation from center to periphery of the retina and their bearing on color theory: Part 1. Psychological Review*, 26(1), 16–41. <https://doi.org/10.1037/h0071940>
- [6] ŠIKL, R.: *Zrakové vnímání*. Praha: Grada, 2012. Psyché. ISBN 978-80-247-3029-5.
- [7] Upraveno podle: LÖFGREN, STEFAN & THAUNG, JÖRGEN & LOPES, CESAR. (2013). *Laser pointers and eye injuries. An analysis of reported cases*. zdroj: https://www.researchgate.net/publication/303550015_Laser_pointers_and_eye_injuries_An_analysis_of_reported_cases
- [8] DOWLING, J., E., DOWLING, J., D. (2016): *Vision—How It Works and What can Go Wrong. Perception*. 2017;46(7):882-884. doi:10.1177/0301006617706280
- [9] Upraveno autorkou podle: <http://www.cnsonline.cz/wp-content/uploads/2015/01/zrak-test1-620x634.png> [online]. [2021-04-18].
- [10] VLKOVÁ, E., PITROVÁ, Š., VLK, F.: *Lexikon očního lékařství: výkladový ilustrovaný slovník*. Brno: František Vlk, 2008. ISBN 978-80-239-8906-9.
- [11] KIKALOVÁ, K., L. MACHÁLEK, V. HOLIBKA, M. KUTAL a M. BEZDĚKOVÁ. *NEUROANATOMIE I. - Struktury centrálního nervového systému: Interaktivní učební text. NEUROANATOMIE I. - Struktury centrálního nervového systému* [online]. UPOL, 2008 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <http://www.nan.upol.cz/neuro/index.html>
- [12] REMINGTON, L. A.: *Clinical Anatomy and Physiology of the Visual System*. 3rd edition, Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-1-4377-1926-0.
- [13] TUNNACLIFFE, A. H.: *Introduction to visual optics*. 4th ed. Godmersham Park: Association of British Dispensing Opticians, 1993. ISBN0-9009-928-3
- [14] DRASDO, N. (1977). *The neural representation of visual space*. *Nature*, 266(5602), 554–556. <https://doi.org/10.1038/266554a0>
- [15] KUČYHNKA, P. a kol.: *Oční lékařství*. 2. přepracované a doplněné vydání, Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-247-5079-8.
- [16] ROZSÍVAL, P. a kol.: *Oční lékařství*. 1. vydání, Praha: Galén Karolinum, 2006. ISBN 80-246-1213-5.
- [17] BAILEY I. L., LOVIE-KITCHIN J. E.: *Visual acuity testing. From the laboratory to the clinic*. Vision Research, Vol. 90, 2013, pp. 2–9
- [18] BENEŠ, P.: *Přístroje pro optometrii a oftalmologii*. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2015. ISBN 978-80-7013-577-8.

- [19] ČSN EN ISO 8596. Česká technická norma: Oční optika – Zkouška zrakové ostrosti – Normalizovaný optotyp a jeho zobrazení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, meteorologii a státní zkušebnictví, 2009
- [20] SNELLEN, H. Snellenova tabule. *Wikipedie* [online]. 1862 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Snellenova_tabule
- [21] VESELÝ, P. Optotypová tabule logMAR ETDRS. *Základy metod korekce refrakčních vad* [online]. Lékařská fakulta Masarykovy univerzity Brno, 2013 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js16/refrakcni_vady/web/pages/03-naturalni-zrakova-ostrost.html#prettyPhoto
- [22] HROMÁDKOVÁ, L.: *Šilhání*. 2. dopl. vyd. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1995. Učební text. ISBN 80-7013-207-8.
- [23] PLUHÁČEK, F.: *Normální binokulární vidění – výukové materiály k předmětu Binokulární vidění* Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2017.
- [24] RUTRLE, M. *Binokulární korekce na polatestu*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2000. ISBN 80-7013-302-3.
- [25] ŠPAČKOVÁ, K. *Základy oftalmologie pro speciální pedagogy*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3059-1.
- [26] KRIMSKY E. *The Stereoscope in theory and practice, also a new precision type stereoscop.* *Br J Ophthalmol.* 1937;21(4):161-197
https://eyewiki.aaopt.org/Stereopsis_and_tests_for_stereopsis#cite_ref-13.
- [27] HOWARD, I., P., ROGERS, B., J.: *Binocular Vision and Stereopsis* (Oxford Psychology Series). Oxford University Press, 1995. ISBN 0195084764
- [28] HUBEL, D., H.: *Eye, Brain, and Vision*. New York: Scientific American Library, 1995. ISBN 0716760096 9780716760092
- [29] HROMÁDKOVÁ, L. *Šilhání*. Vyd. 3., nezměn. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2011. ISBN 978-80-7013-530-3.
- [30] upraveno podle: DOSTÁLEK, M. *Strabologie II.: ortoptika – výukové materiály*, katedra Lékařské fakulty Masarykovy Univerzity v Brně, Brno 2016
- [31] REICHL, J. a VŠETIČKA, M.: 3D kina. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/469-3d-kina>
- [32] TILFORD, B. *Perceiving without looking: Designing HUDs for peripheral vision*. Gamasutra - The Art & Business of Making Games [online]. England and Wales, 2016 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.gamasutra.com/blogs/BobTilford/20160329/268648/Perceiving_without_looking_Designing_HUDs_for_peripheral_vision.php
- [33] BOUMA, H. *Interaction effects in parafoveal letter recognition*. *Nature*. 1970 Apr 11; 226(5241):177-8.
- [34] FLOM, M., C., HEATH, G., G., TAKAHASHI, E. *Contour Interaction And Visual Resolution: Contralateral Effects*. *Science*. 1963 Nov 15; 142(3594):979-80.
- [35] TOET, A., LEVI, D., M. *The two-dimensional shape of spatial interaction zones in the parafovea*. *Vision Res.* 1992 Jul; 32(7):1349-57.
- [36] LEVI, D. M. *Crowding - An essential bottleneck for object recognition: A minireview*. *Vision Research*, Vol. 48, 2008, No. 5, pp. 635–654

- [37] JACOBS R.J., *Visual resolution and contour interaction in the fovea and periphery*, Vision Research, Volume 19, Issue 11, 1979, Pages 1187-1195, ISSN 0042-6989, [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(79\)90183-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(79)90183-4)
- [38] ANDRIESSEN, J., J., BOUMA, H., *Eccentric vision: Adverse interactions between line segments*, Vision Research, Volume 16, Issue 1, 1976, Pages 71-78, ISSN 0042-6989, [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(76\)90078-X](https://doi.org/10.1016/0042-6989(76)90078-X)
- [39] MARTELLI, M., MAJAJ, N., J., PELLI, D., G.; *Are faces processed like words? A diagnostic test for recognition by parts*. *Journal of Vision* 2005;5(1):6. doi: <https://doi.org/10.1167/5.1.6>
- [40] KOOI, F., TOET, A., TRIPATHY, S., LEVI, D. (1994): *The effect of similarity and duration on spatial interaction in peripheral vision*. *Spatial vision*. 8. 255-79. 10.1163/156856894X00350.
- [41] TRIPATHY, S., P., CAVANAGH, P. *The extent of crowding in peripheral vision does not scale with target size*. *Vision Res.* 2002 Sep; 42(20):2357-69.
- [42] MUSILOVÁ, L., PLUHÁČEK, F., MARTEN-ELLIS S., M, BEDELL H., E., SIDEROV J.; *Contour interaction under photopic and scotopic conditions*. *Journal of Vision* 2018;18(6):5. doi: <https://doi.org/10.1167/18.6.5>.
- [43] SIDEROV, J., WAUGH, S., J., BEDELL, H., E. *Foveal contour interaction for low contrast acuity targets*. *Vision Res.* 2013 Jan 25;77:10-3. doi: 10.1016/j.visres.2012.11.008. Epub 2012 Nov 29. PMID: 23200866.
- [44] FLOM, M. C.: *Contour interaction and the crowding effect*. In *Problems in Optometry*. Philadelphia: J. B. Lippincott Co., 1991, roč. 3, č. 2, str. 237–257.
- [45] HESS R. F., DAKIN S. C., KAPOOR N. *The foveal “crowding” effect: physics or physiology?* *Vision Research*, Vol. 40, 2000, No. 4, pp. 365–370
- [46] WERTHEIM, T., H., DUNSKY, I., L.: *Peripheral Visual Acuity*, *Optometry and Vision Science*: December 1980 - Volume 57 - Issue 12 - p 915-924
- [47] BEDELL H. E., SIDEROV J., WAUGH S. J., ZEMANOVA R., PLUHACEK F., MUSILOVA L. *Contour Interaction for Foveal Acuity Targets of Different Luminance*. *Vision Research*, 2013
- [48] DANILOVA M. V, BONDARKO V. M.: *Foveal contour interactions and crowding effects at the resolution limit of the visual system*. *J Vis.* 2007;7(2):1-18. Published 2007 Nov 27. doi:10.1167/7.2.25
- [49] PLUHÁČEK, F., BEDELL, H., E., SIDEROV, J., KRATKOCZKÁ, D.: *The Mechanism of Contour Interaction Differs in the Fovea and Periphery*, *Optometry and Vision Science*: December 2020 - Volume 97 - Issue 12 - p 1053-1060 doi: 10.1097/OPX.0000000000001615
- [50] PLUHÁČEK, F., SIDEROV, J. *Mesopic visual acuity is less crowded*. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 256, 1739–1746 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00417-018-4017-6>
- [51] FREEMAN, J., CHAKRAVARTHI, R. & PELLI, D.G.: *Substitution and pooling in crowding*. *Atten Percept Psychophys* 74, 379–396 (2012). <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0229-0>
- [52] HERZOG, M. H., MANASSI, M. (2015). *Uncorking the bottleneck of crowding: a fresh look at object recognition*. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 1, 86-93
- [53] LEVI, D. M., KLEIN, S. A., HARIHARAN, S. (2002): *Suppressive and facilitatory spatial interactions in foveal vision: Foveal crowding is simple contrast masking*. *Journal of Vision*, 2(2), 140–166

- [54] PELLI, D., TILLMAN, K., FREEMAN, J., SU, M., BERGER, T., MAJAJ, N. (2007): *Crowding and Eccentricity Determine Reading Rate*. Journal of vision. 7. 20.1-36. 10.1167/7.2.20.
- [55] LEVI, D. M., SONG, S., PELLI, D. G. (2007) *Amblyopic reading is crowded*. Journal of Vision, 7(2), 1-17
- [56] převzato z: DOERIG A, BORNET A, ROSENHOLTZ R, FRANCIS G, CLARKE AM, ET AL. (2019) *Beyond Bouma's window: How to explain global aspects of crowding?* PLOS Computational Biology 15(5): e1006580. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006580>
- [57] SIMMERS, A. J., GRAY, L. S., MCGRAW, P. V., WINN, B. *Contour interaction for high and low contrast optotypes in normal and amblyopic observers*. Ophthalmic and Physiological Optics, 1999, roč. 19, č. 3, s. 253 – 260
- [58] BEDELL, H. E.: *Spatial Acuity*. In *The Psychophysical Measurement of Visual Function*. Thomas T. Norton, David A. Corliss, James E. Bailey (ed.). Boston: Butterworth–Heinemann, 2002. 361 s. Spatial Acuity, str. 105–136. ISBN 0-7506-9935-3.
- [59] OŠŤÁDALOVÁ, J.: *Crowding fenomén*. Česká oční optika. Brno: Společenstvo českých optiků a optometristů, 2015, roč. 56, č. 4. ISSN 1211-233X
- [60] FORMANKIEWICZ, M., A., WAUGH, S., J., CHIMA, A., S.; *Contour interaction under monocular and dichoptic viewing conditions for luminance-modulated and contrast-modulated Cs*. Journal of Vision 2011;11(11):1147. doi: <https://doi.org/10.1167/11.11.1147>