

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA OPTIKY

**VLIV CROWDINGU NA MĚŘENÍ ZRAKOVÉ OSTROSTI
ZA RŮZNÝCH KONTRASTNÍCH PODMÍNEK**

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Ivana Švachová

obor N5345 OPTOMETRIE

studijní rok 2017/2018

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

RNDr. František Pluháček, Ph.D.

Čestné prohlášení

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

V Nedašově 24. 4. 2018

.....

Bc. Ivana Švachová

Poděkování:

Touto cestou děkuji všem, kteří mi byli oporou při vypracování mé diplomové práce, zejména však vedoucímu této diplomové práce, RNDr. Františku Pluháčkovi, Ph.D., za jeho cenné rady a čas strávený při konzultacích.

Tato práce byla vytvořena za podpory projektů IGA PřF UP v Olomouci s názvem "Optometrie a její aplikace", č. IGA_PrF_2017_003 a IGA_PrF_2018_007.

Obsah

ÚVOD.....	5
1 ZRAKOVÁ OSTROST A JEJÍ MĚŘENÍ	6
1.1 Rozlišovací mez oka	6
1.2 Klinické hodnocení zrakové ostrosti.....	8
1.3 Formy zápisu zrakové ostrosti	9
1.4 Optotypy.....	11
1.4.1 Konstrukce optotypů	12
1.4.2 Klinické postupy stanovení zrakové ostrosti	16
1.4.3 Technické provedení optotypů	17
2 KONTRASTNÍ CITLIVOST A JEJÍ MĚŘENÍ	19
2.1 Definice kontrastní citlivosti	20
2.2 Klinické metody měření kontrastní citlivosti	21
2.2.1 Písmenové testy	22
2.2.2 Testy založené na sinusové mřížce.....	23
3 STAVBA SÍTNICE A RECEPTIVNÍ POLE	26
3.1 Stavba sítnice	26
3.1.1 Tyčinky.....	28
3.1.2 Čípky	28
3.2 Receptivní pole.....	28
4 CROWDING EFEKT A KONTUROVÁ INTERAKCE	30
4.1 Crowding efekt.....	30
4.1.1 Vlastnosti crowding efektu.....	32
4.1.2 Mechanismus crowding efektu	33
4.1.3 Odlišení crowdingu od ostatních fenoménů	34
4.2 Konturová interakce	35
4.2.1 Vlastnosti konturové interakce	36
4.2.2 Mechanismus konturové interakce	38
5 PRAKTICKÁ ČÁST	40
5.1 Metodika výzkumu.....	41
5.2 Výsledky	47
5.3 Diskuze.....	48
ZÁVĚR	50
LITERATURA	51

ÚVOD

Vidění pokládáme za velmi složitý proces, jehož kvalita je ovlivněna mnoha faktory. Kvalitu lidského vidění posuzujeme zejména podle dosažené zrakové ostrosti, kontrastní citlivosti a zorného pole, ale i podle dalších aspektů, např. barvocitu. Zraková ostrost se vyšetřuje na speciálně vytvořených souborech znaků, tzv. optotypech. Správná konstrukce optotypů při měření zrakové ostrosti hraje důležitou roli, neboť je pozorován jev, kdy se blízkce seskupené znaky u sebe hůře rozlišují. Tento jev se nazývá crowding efekt.

Výzkumem crowdingu se vědci stále zabývají, protože nebyl doposud dostatečně objasněn. Crowding je komplexní jev, který zahrnuje konturovou interakci, fixační oční pohyby a faktor pozornosti. Konturová interakce se projeví v případě, pokud fixovaný znak obklopíme konturami. Typickým příkladem takového podnětu je Landoltův prstenec obklopený ze čtyř stran úsečkami. Crowding se oproti tomu pozoruje při rozlišování složitějších podnětů, např. několika znaků v řadě či nad sebou. Oba jevy charakterizujeme pomocí jejich rozsahu a velikosti při centrálním nebo periferním vidění. Jestli se konturová interakce nebo crowding při rozlišování fixovaného znaku projeví, záleží mimo jiné na vzdálenosti mezi tímto znakem a dalšími obklopujícími stimuly.

Vzhledem k experimentu, který byl v rámci této diplomové práce proveden, se teoretická část zabývá důležitými souvisejícími pojmy tak, aby teoretická i praktická část diplomové práce tvořila provázaný celek. V první kapitole je popsána zraková ostrost a její měření. Druhá kapitola se věnuje problematice kontrastní citlivosti. Třetí kapitola krátce shrnuje nejpodstatnější poznatky o sítnici a receptivních polích. Stěžejní čtvrtá kapitola se věnuje hlavnímu tématu diplomové práce, kterým je již zmíněný crowding efekt.

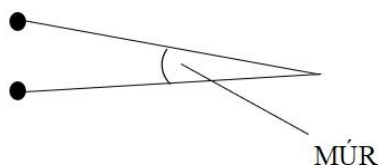
Cílem provedeného experimentu, popsaného v kapitole 5, bylo sledování současného vlivu kontrastu a separace znaků (crowdingu) na měření zrakové ostrosti. Pro účely experimentu byl sestaven speciální optotyp na principu Bailey-Lovie designu, který respektuje crowding efekt. Tento výzkum crowdingu může pomoci objasnit, jakým způsobem jsme schopni od sebe rozlišovat jednotlivé objekty, protože se s ním setkáváme v našem každodenním běžném životě - např. při čtení, rozlišování obličejů, určování orientace stimulu. Stojí za zmínění, že crowding hraje nemalou roli u pacientů, kteří trpí např. amblyopií, dyslexií nebo makulární degenerací.

1 ZRAKOVÁ OSTROST A JEJÍ MĚŘENÍ

Mezi nejdůležitější parametry, kterými hodnotíme zrak, patří centrální zraková ostrost, kontrastní citlivost a zorné pole. Tato kapitola bude věnována zrakové ostrosti. Zrakovou ostrost definujeme jako prostorovou rozlišovací schopnost zrakového systému. Vyjadřuje úhlovou velikost detailu, který právě dokáže pozorovatel rozlišit. Rozlišení detailu je limitováno optickými a neurálními faktory včetně jejich kombinací. [1]

1.1 Rozlišovací mez oka

Obvykle bývá jako rozlišovací mez oka považována nejmenší úhlová vzdálenost dvou bodů, při které jsou okem ještě od sebe rozlišeny (viz obr. 1). Jak již bylo uvedeno, je limitována optickými a neurálními faktory. Mezi optické faktory patří např. difrakce světla, která úzce souvisí s velikostí zornice (čím je zornice užší, tím je difrakce větší), dále chromatické a monochromatické vady oka (projevují se více u rozšířených zornic, tedy zejména za šera), ametropie a neschopnost zaostření (z důvodu špatné akomodace nebo špatně stanovené korekce refrakční vady).

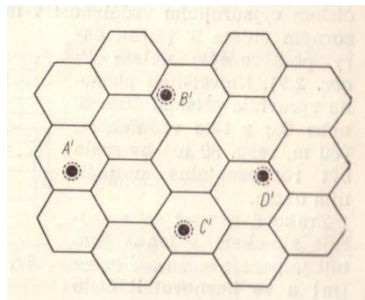


Obr. 1: Minimální úhlové rozlišení (MÚR).

Z hlediska optického je kvalita zobrazení do určité míry dána velikostí zornice – při malé zornici převládá difrakce, která již zhoršuje kvalitu obrazu, při velké zornici jsou patrné především aberace vyšších řádů (např. koma, otvorová vada). Z tohoto pohledu se obvykle uvažuje, že optimálního zobrazení dosáhneme s průměrem zornice okolo 2,5 mm, přičemž minimální úhlové rozlišení (viz obr. 1) je v tomto případě menší než 1' [1]. Konkrétně na základě difrakce a tzv. Rayleighova kritéria [16] lze optickou úhlovou rozlišovací mez oka α pro optické vlnění o vlnové délce λ a při průměru zornice d stanovit jako

$$\alpha = 1,22 \cdot \lambda/d.$$

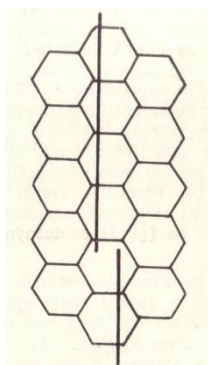
U neurálních faktorů hrají hlavní roli fotoreceptory, jejich schopnost reagovat na světlo a rovněž vzájemné interakce mezi neurony na sítnici a ve zrakové dráze, tj. receptivní pole (blíže viz podkapitola 3.2). Nejlepší zrakové ostrosti je dosaženo v centrální části sítnice – fovee, kdy velikost receptivních polí je velmi blízká velikosti samotného fotoreceptoru, konkrétně čípku [28]. V této souvislosti se odvozuje tzv. fyziologická rozlišovací mez oka, kdy považujeme dva body za rozlišené, pokud mezi jejich obrazy na sítnici bude alespoň jeden nestimulovaný čípek, viz obr. 2. Na základě např. standardního redukovaného oka, u kterého má uzlový bod vzdálenost od sítnice 16,67 mm, lze stanovit úhlovou vzdálenost dvou takovýchto bodů (a tedy fyziologickou/neurální rozlišovací mez oka) jako 0,82', která je blízká optickému limitu. Vzhledem k tomu, že se blíží 1', bývá v klinické praxi jako referenční velikost rozlišovací meze oka uvažována právě 1'. Obvykle bývá úhlová rozlišovací mez oka značena jako minimální úhlové rozlišení se zkratkou *MÚR*, případně jako tzv. minimum separabile. [1]



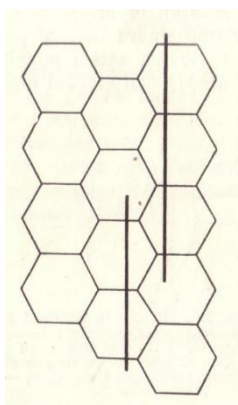
Obr. 2: Fyziologická rozlišovací mez oka. Bod A' a B' budou vnímány jako dva body, neboť je mezi nimi jeden čípek nepodrážděn. Body C' a D' budou splývat v jeden. [23]

V klinické praxi se též užívá tzv. minimum legibile, převážně při vyšetření vidění na blízko. Jedná se schopnost číst a pochopit význam textu (slov, vět). Tzv. minimum cognocibile je schopnost poznat (důležitá např. u rozeznání symbolů). [21,22]

Lepších hodnot rozlišovací schopnosti může oko dosáhnout při pozorování na sebe zdánlivě navazujících rovnoběžných úseček. Noniovou rozlišovací mezí, viz obr. 3 a 4, rozumíme úhlovou vzdálenost dvou úseček a nabývá hodnot přibližně 5'' až 10''. Noniové rozlišení je proto až 20x lepší než minimální úhlové rozlišení. [22, 23]



Obr. 3: Noniová rozlišovací mez. Ačkoliv koncové body úseček leží na kolmici, obě úsečky jsou prezentovány v jedné řadě čípků. Proto tyto dvě úsečky nebudou viděny odděleně. [23]



Obr. 4: Noniová rozlišovací mez. Tyto dvě úsečky budou viděny pouze jako jedna úsečka, protože se výrazně svými konci překrývají. [23]

1.2 Klinické hodnocení zrakové ostrosti

Většina vyšetření zrakové ostrosti probíhá za fotopických podmínek. K jejímu zhodnocení se používají tzv. optotypy, které představují speciální vhodně řazené sady znaků (blíže se jim věnuje podkapitola 1.4.3). Jako nejideálnější je považováno běžné denní osvětlení. Standardní jas optotypu byl stanoven na $160 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, avšak klinická tolerance má rozpětí 80 až $320 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Kontrast je další proměnnou, která ovlivňuje výsledek měření zrakové ostrosti. Existují optotypy s nízkým kontrastem, které se hojně využívají např. u pacientů s onemocněním rohovky či nitrooční čočky a u osob po refrakčních operacích. Kontrastu a jeho měření je blíže věnována kapitola 2. [1]

Standardní vyšetřovací vzdálenost do dálky je obvykle 6 m. Pokud pacient nepřečte ani největší znaky ze standardní vzdálenosti, může být použita kratší vzdálenost. Pro vyšetřování do blízka bývá za standardní považována vzdálenost 40 cm. Do blízka ovšem bývá často měřeno spíše minimum legibile než separabile. [1, 21]

1.3 Formy zápisu zrakové ostrosti

Zrakovou ostrost lze číselně vyjádřit pomocí již výše zmíněného parametru $MÚR$, častěji pak pomocí jeho logaritmu, $\log MÚR$, který lépe odpovídá citlivosti lidského oka v souvislosti s Weber-Fechnerovým zákonem. Weber-Fechnerův zákon říká, že v případě, kdy roste podnět řadou geometrickou, roste vjem řadou aritmetickou. Takové progrese velikosti je dosaženo právě u optotypů využívajících $\log MÚR$, kdy velikost znaků na řádku roste o koeficient $\sqrt[10]{10} = 1,2589$ (viz oddíl 1.4.1). Lidské smyslové vnímání se tedy chová jako logaritmický převodník vnějších podnětů. [19, 21]

V klinické praxi je rozšířen také zápis zrakové ostrosti pomocí bezrozměrné veličiny vízus, označováno V , definovaného vztahem

$$V = 1' / MÚR.$$

Tento zápis je v podstatě srovnání konkrétního úhlového rozlišení vyšetřované osoby s referenční hodnotou $1'$. Vízus je možné zapsat desetinným číslem (decimálně) nebo pomocí zlomku (tzv. Snellenův zlomek) či jinak, viz níže. [1]

Snellenův zlomek

Snellenovým zlomkem vyjadřujeme úhlovou velikost optotypového znaku pomocí tzv. čísla řádku a vyšetřovací vzdálenosti. Vízus je vyjádřen vztahem

$$V = \frac{\text{vyšetřovací vzdálenost}}{\text{číslo řádku}}.$$

Číslo řádku pak odpovídá vzdálenosti, ze které by testové znaky právě přečetla osoba s vízem 1. Lze ukázat, že tento zápis koresponduje s definicí vízu. Takto zapsaný vízus jako jediný navíc poskytuje užitečnou informaci o vyšetřovací vzdálenosti. Za předpokladu, že je sítnicový obraz dobře zaostřen, by se zraková ostrost neměla měnit při různých vyšetřovacích vzdálenostech. Proto zápisy 5/50, 6/60 a 20/200

vyjadřují jednu a tu samou hodnotu. Běžně se vzdálenosti uvádějí v metrech, jinak je tomu ale např. v USA, kde se vzdálenosti uvádějí ve stopách. [1]

Decimální zápis

V tomto případě se jedná o zjednodušení, kdy je Snellenův zlomek vyjádřen desetinným číslem. Takto udaný vízus však ztrácí informaci o vyšetřovací vzdálenosti. Zlomek 6/60 je tedy odpovídá desetinnému číslu 0,1 a $6/6 = 1,0$ atd. Jedná se o nejběžnější způsob zápisu zrakové ostrosti v Evropě. [1]

Minimální úhlové rozlišení (MÚR, anglicky MAR)

MÚR udává úhlovou velikost právě rozlišeného detailu znaku vyjádřenou obvykle v úhlových minutách. Abychom testovací znak rozlišili, je nutné rozlišit jeho detail, jehož velikost odpovídá jedné pětině výšky optotypového znaku. Při vízu 1,0 (zlomkem 6/6) je tedy znak viděn pod úhlem 5' a MÚR se rovná 1'. Vypočítat MÚR můžeme pomocí vyjádření ze vzorce $V = 1/MÚR$, z čehož plyne $MÚR = 1/V$. [1]

LogMÚR

Zlogaritmováním hodnoty MÚR pomocí logaritmu o základu 10 získáme další způsob zápisu vízu. Pokud vezmeme v úvahu vízus 6/6, kdy $MÚR = 1'$, potom výpočet $\log 1 = 0$. Pro $MÚR = 2'$ platí $\log 2 = 0,5$. Při zrakové ostrosti lepší než $V = 1$ ($MÚR < 1'$) nabývá logaritmus záporných hodnot. U optotypů, kde velikost znaků progresivně narůstá o konstantu $0,1 \log MÚR$ a každý řádek obsahuje 5 znaků, lze všem znakům přiřadit hodnota $0,02 \log MÚR$. Zhodnocením každého přečteného či nepřečteného znaku může být zraková ostrost vyšetřena velmi přesně. Proto tento zápis velmi často objevíme v různých vědeckých studiích spojených s vyšetřováním zrakové ostrosti na optotypech, které splňují principy Bailey-Lovieho designu [1]. Bailey-Lovie design a různé další možnosti stanovení vízu pomocí $\log MÚR$ hodnot jednotlivých řádků či znaků jsou podrobně rozepsány v oddílu 1.4.1.

VAR stupnice (Visual Acuity Rating scale)

Tato stupnice byla vytvořena pro jednodušší a intuitivnější zápis zrakové ostrosti v logaritmických jednotkách při zhodnocování každého přečteného znaku, pro jednodušší statistickou analýzu dat a grafickou prezentaci výsledků. *VAR* je odvozen ze vztahu $VAR = 100 - 50 \log MÚR$. Jedná se pouze o transformaci logaritmické stupnice do jiného zápisu. Platí tedy:

- $VAR = 100$ odpovídá $\log MÚR = 0$ (případně 6/6 při použití zápisu zlomkem)
- $VAR = 50$ odpovídá $\log MÚR = 1,0$ (6/60)
- $VAR = 0$ odpovídá $\log MÚR = 2,0$ (6/600)
- negativní hodnoty VAR nabývá za podmínky, že $MÚR > 100$ (zraková ostrost horší než 6/600)

Na optotypech s 5 znaky na řádku a progresí velikosti řádku $0,1 \log MÚR$, lze každému znaku odvodit hodnotu $VAR = 1$, každé řadě potom $VAR = 5$. Proto v praxi stačí zaznamenávat počet přečtených/nepřečtených znaků. Zjednodušeně můžeme tedy VAR považovat za počet správně přečtených znaků. [1,9]

1.4 Optotypy

Optotypem nazýváme soubor znaků, na kterém se vyšetřuje zraková ostrost. Obvykle se jedná o znaky seřazené do řádků s postupným zmenšováním znaků mezi řádky. Přitom na řádku mají všechny znaky stejnou velikost. Každému řádku je přiřazena určitá hodnota zrakové ostrosti, která se určuje na základě struktury daných znaků. Obvykle je zraková ostrost určena podle velikosti detailu daného znaku. Pokud je totiž rozlišen detail znaku, můžeme bezpečně rozlišit celý znak. Konkrétní hodnota zrakové ostrosti se určuje podle nejmenších viděných znaků – obvykle podle posledního přečteného řádku, přičemž řádek je považován za přečtený, pokud je přečteno alespoň 60 % znaků (např. 3 z 5). Dále je možné, jak již bylo uvedeno výše (viz podkap. 1.3), zrakovou ostrost hodnotit pomocí jednotlivých přečtených znaků (metoda stupnice *VAR* nebo pomocí $\log MÚR$). Tyto podrobnější postupy hodnocení zrakové ostrosti jsou úzce spojeny s typem použitého optotypu a budou rozebrány v oddílu 1.4.2. Soubor pozorovaných optotypových znaků mohou tvořit písmena (Sloan letters, British letters), číslice, Pflügerovy háky, Landoltovy prstence, obrázky pro děti či analfabety. [1,19, 21]

1.4.1 Konstrukce optotypů

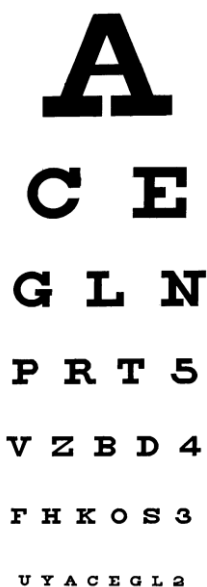
První optotypy byly konstruovány na základě zkušenosti vyšetřujících, tedy empiricky (např. Snellenův optotyp). Další typy svou konstrukcí odpovídaly zápisu zrakové ostrosti (např. aritmeticky řazený optotyp pro decimální zápis, modifikovaný Snellenův optotyp pro zápis zlomkem). Vzhledem k nedostatkům, které například představovalo hrubé a tím pádem nedostatečné dělení v oblasti nízkých vizů, nebo naopak zbytečně husté dělení v oblasti vysokých vizů či nerespektování Weber-Fechnerova zákona, byly konstruovány optotypy odpovídající měření vizu v $\log MÚR$ s logaritmickým (resp. exponenciálním) řazením velikosti řádků. Mezi nejznámější patří tzv. Bailey-Lovie design, který reprezentuje ideálně konstruovaný optotyp a řada dalších vychází z jeho konstrukce. Z této konstrukce typově vychází i optotyp použitý v experimentální části práce. Proto bude dále podrobněji rozebrán. [21]

Snellenův optotyp

Původní optotyp podle Snellena měl 7 různě velkých řádků. Na největším řádku, odpovídající nejnižší hodnotě vizu, bylo pouze jedno písmeno a počet znaků na řádku progresivně narůstal až do počtu 8 znaků – 7 písmen a 1 číslice (viz obr. 5). Velikost znaků byla udána číslem řádku (viz podkapitola 1.3) a rostla empiricky určenou posloupností: 6, 9, 12, 15, 21, 30, 60. Optotypovými znaky byla patková písmena s velikostí detailu $1/5$ výšky znaku. Patkou rozumíme krátkou linii přidanou k zakončení písmene. Původní Snellenův optotyp prošel řadou úprav od změn písma (v současné době převládá bezpatkové písmo), velikosti progrese, mezer až po změny počtu znaků na řádku. Přesto se však stále běžně nazývají Snellenovými optotypy nebo dokonce standardními Snellenovými optotypy. [1]

Optotypy s aritmetickým řazením

U optotypů s aritmetickým řazením je dána progrese velikosti znaků aritmetickou řadou: 0,1; 0,2; 0,3; ...; 0,9; 1,0; 1,2 a 1,5. Hlavní nevýhodou takového řazení je hrubé a nedostatečné dělení v oblasti nižších vizů a naopak zbytečně husté dělení v oblasti vyšších vizů. Proto se např. některé hodnoty vynechávají. [21]



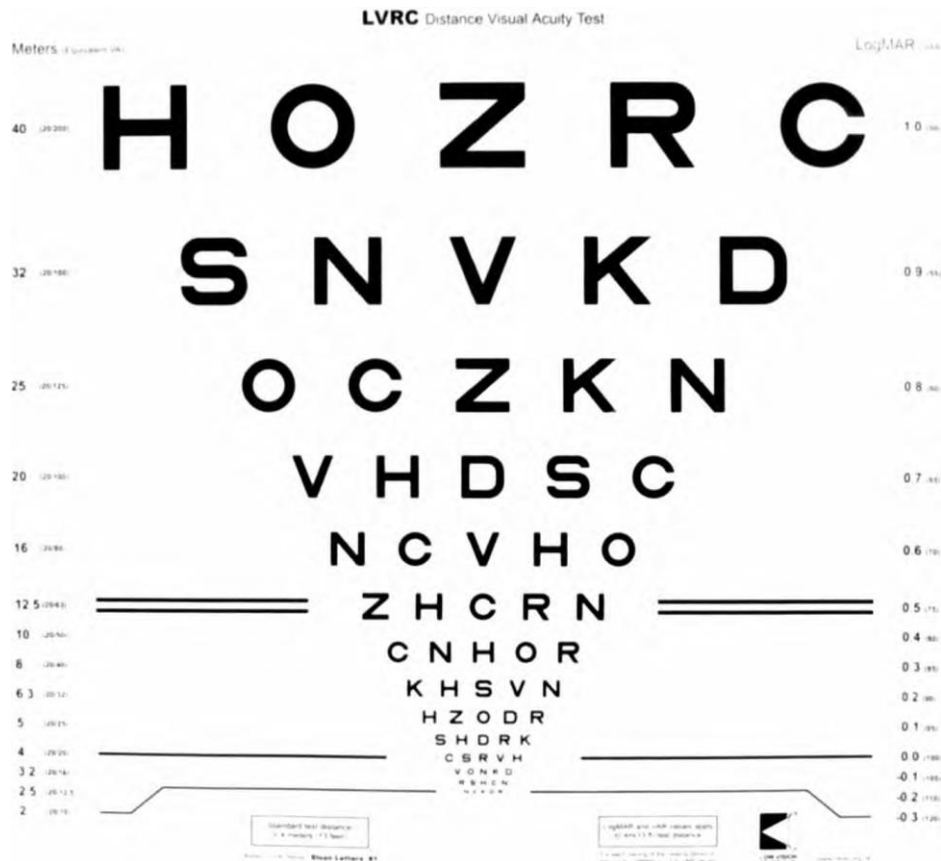
Obr. 5: Původní optotyp podle Snellena. [1]

Bailey-Lovie design

Potřeba přesného měření zrakové ostrosti ve studii slabozrakosti nasměřovala I. L. Baileyho a J. E. Lovie-Kitchin k návrhu vlastního optotypu (viz obr. 6). Jejich principy byly přijaty ve většině hlavních klinických studií i v klinické praxi. V roce 1974 začala jejich dvouletá studie nazvaná „*Vidění při senilní makulární degeneraci*“ (z angl. originálu *Vision in Senile Macular Degeneration*), ve které měli naplánováno studovat vztahy mezi zrakovou ostrostí, kontrastní citlivostí, schopností čtení, vlivem osvětlení a použitím lup u slabozrakých pacientů se senilní makulární degenerací. A protože většina těchto pacientů měla velmi nízké hodnoty vízu, dospěli k závěru, že pro jejich studii žádný z běžných Snellenových optotypů nebyl vhodný, hlavně kvůli hrubému dělení v oblasti nízkých hodnot vízu a nedostatečném počtu znaků na řádku. Navíc chtěli vytvořit nový design optotypu tak, aby redukoval problémy se zapamatováním si použitých znaků. [9]

V té době British Standards Institute doporučil používání skupiny 10 bezpatkových písmen (D, E, F, H, N, P, R, U, V, Z) zakreslených v rastru 5 jednotek na výšku a 4 jednotky na šířku, se šířkou detailu o velikosti 1 jednotky. Šlo o tzv. British letters, jež měly podobnou čitelnost a vypadaly více přirozeně než písmena použitá ve Snellenových optotypech. Na každém řádku bylo 5 písmen tak, aby se statistická přesnost stanovení čitelnosti řádku řádek od řádku neměnila.

Pro regulování vlivu, nikoliv však eliminaci, konturové interakce a crowding efektu (viz kapitola 4) byla každá řada navržena tak, že mezera mezi sousedními písmeny byla rovna šířce jednoho písmena a mezera mezi řádky byla rovna výšce menšího z nich. [9]



Obr. 6: Optotypy dle principů Baileyho a Lovie-Kitchin se znaky Sloan Letters. [1]

Optotypy byly navrženy pro použití na 35mm standardním projektoru. Pro konstrukci optotypu uvažovali změnu velikosti znaků odpovídající $0,1 \log MÚR$ mezi řádky, tj. odpovídající změně vízu geometrickou řadou s koeficientem $\sqrt[10]{10} = 1,2589$, který byl navržen Sloanem. Taková systematická progresse velikosti znaků dává poměrně malé, avšak praktické přírůstky velikosti, čímž poskytuje obstojně citlivý rozsah předpokládaného rozmezí měření zrakové ostrosti v souladu s Weber-Fechnerovým zákonem. [9]

Kombinace konstantního nárůstu velikosti, stejného počtu písmen na řádku, uzpůsobení velikosti mezer vzhledem k velikosti použitých znaků společně s přibližně stejnou čitelností jednotlivých znaků efektivně standardizuje zrakové úkoly realizované při měření zrakové ostrosti. Velikost je tedy jediným signifikantním proměnným faktorem. [9]

Pro zaznamenávání zrakové ostrosti se rozhodli zapisovat data výrazem logaritmu minimálního úhlu rozlišení $\log MÚR$ (též označovaný jako logaritmická jednotka). Tím vznikl praktický systém hodnocení zrakové ostrosti s konstantním rozdílem $0,1 \log MÚR$ každými dvěma po sobě jdoucími řádky znaků v optotypu. Na této $\log MÚR$ stupnici odpovídá hodnota $\log MÚR = 0$ hodnotě $MÚR = 1'$, resp. vízu $V = 1$. Pro lepší hodnoty zrakové ostrosti ($MÚR < 1'$) vychází její hodnoty záporně, jak již bylo výše uvedeno. [9]

Vzhledem k tomu, že mezi dvěma řádky je vždy rozdíl $0,1 \log MÚR$ a na každém řádku je stejný počet pěti znaků, z nichž každý má průměrně stejnou čitelnost, každému znaku lze přiřadit hodnotu $0,02 \log MÚR$. To umožňuje zhodnotit každý přečtený znak, a oproti obvykle hodnocenému celořádkovému vízu tak výrazně zvyšuje přesnost stanovení zrakové ostrosti. Hodnocení písmene po písmenu (viz 1.4.2 - letter-by-letter scoring) poskytuje mnohem přesnější měření zrakové ostrosti. [9]

Výše uvedené a zdůvodněné zásady konstrukce optotypů vedoucí k tomu, že jedinou signifikantní proměnnou je pouze velikost znaku, lze shrnout následovně:

- Velikost znaků optotypu roste geometrickou řadou, tj. odpovídající hodnota $\log MÚR$ roste aritmetickou řadou; doporučený krok je $0,1 \log MÚR$.
- Na každém řádku se nachází shodný počet znaků, obvykle 5.
- Mezery mezi jednotlivými znaky a mezi jednotlivými řádky odpovídají šířce a výšce znaku.

Tyto principy představují klinické hodnocení zrakové ostrosti v logaritmických jednotkách. Bylo vytvořeno několik optotypů na základě těchto principů. Mezi nejznámější patří optotyp ETDRS, který byl sestaven pro studium brzké léčby diabetické retinopatie. Optotyp ETDRS obsahuje Sloan letters místo původních British letters a standardní vyšetřovací vzdálenost byla 4 m. Sloan letters je momentálně

nejčastěji používané bezpatkové písmo zakreslené v rastru o velikosti 5 x 5 jednotek. Tvoří je tato sada písmen C, D, H, K, N, O, R, S, V, Z. Dále byly vytvořeny optotypy ku příkladu s čínskými znaky, číslicemi, abstraktními symboly pro děti nebo Landoltovy prstenci. Bailey-Lovie design se tak stal novodobým zlatým standardem při konstrukci optotypů. [1,9]

1.4.2 Klinické postupy stanovení zrakové ostrosti

V klinické praxi se obvykle můžeme setkat se dvěma způsoby hodnocení zrakové ostrosti – celořádkovým (row-by-row scoring) a po jednotlivých písmenech – tzv. prahový vízus (letter-by-letter scoring). Přičemž první metoda se nejvíce využívá v ambulantní praxi, druhá je pak častější v klinických studiích. [21]

Row-by-Row Scoring/celořádkový vízus

Při této metodě hodnotu zrakové ostrosti udává nejmenší řádek, ve kterém vyšetřovaný správně identifikoval obvykle 60 % všech písmen stejné velikosti na daném řádku. Toto hodnocení vízu je poměrně hrubé a nepřesné v případě, že chceme spolehlivě detekovat malé změny zrakové ostrosti. V praxi se tedy musí změnit vízus alespoň o dva řádky, abychom mohli s jistotou prohlásit, že nastala významná změna zrakové ostrosti. I přes tuto relativní nepřesnost je však stále nejpoužívanější metodou hodnocení vízu. Někteří z odborníků ve snaze upřesnit zrakovou ostrost doplňují její hodnotu o počet písmen, které vyšetřovaný přečetl navíc z dalšího řádku nebo naopak nedokázal rozlišit na přečteném řádku (např. $6/6^{+2}$ nebo $6/6^{-1}$). [1]

Letter-by-Letter Scoring

Zrakovou ostrost lze posuzovat s vyšší citlivostí i pro její malé změny pomocí hodnocení každého přečteného písmena na řádku. Pokud je zraková ostrost zaznamenávána pomocí logaritmického vyjádření v $\log MÚR$, každému písmenu může být přidělena hodnota, která se přičte (případně odečte) k celkové hodnotě zrakové ostrosti. U optotypů s pěti znaky na každém řádku a při změně velikosti řádků o 0,1 $\log MÚR$ lze určit hodnotu 0,02 $\log MÚR$, která je přiřazena každému z pěti znaků. [1]

PŘÍKLAD:

Pacient 1

- Přečte všechna písmena správně na řádku, který odpovídá $\log MÚR = 0,1$ a navíc správně určí další 1 písmeno z řádku následujícího, který odpovídá vízu $\log MÚR = 0,0$.
- Potom výsledný vízus se vypočítá jako $\log MÚR = 0,1 - 1 \cdot 0,02 = 0,08$.

Pacient 2

- Přečte 3 písmena z řádku, kterému je přiřazena hodnota $\log MÚR = 0,3$ a další 2 písmena z řádku následujícího, kde $\log MÚR = 0,2$.
- Vízus u tohoto pacienta se vypočítá jako $\log MÚR = 0,3 + 2 \cdot 0,02 - 2 \cdot 0,02 = 0,3$.

Ve srovnání s row-by-row scoringem je tato metoda daleko preciznější a citlivější na změny. Pro normálně vidoucí osoby, které byly opakovaně testovány na $\log MÚR$ optotypech, row-by-row scoring poskytoval shodu v přibližně 60 % porovnaných naměřených hodnot zrakové ostrosti. Z čehož vyplývá, že ve 40 % případů se testovaná hodnota lišila o 0,1 $\log MÚR$ a občas i o víc. Následkem toho je pro klinické posouzení významné změny vízu mezi dvěma měřeními požadován rozdíl alespoň dvou řádků (0,2 $\log MÚR$). Naproti tomu u letter-by-letter scoringu dochází v porovnání opakovaných měření k ideální shodě pouze v přibližně 20 % případů. Avšak pro více než 95 % porovnaných hodnot neshody nepřesáhly 0,08 $\log MÚR$ (což odpovídá 4 znakům). To umožňuje 95% jistotu pro signifikantní změny 0,1 $\log MÚR$ nebo 5 znaků. [9]

1.4.3 Technické provedení optotypů

Optotypy sloužící k vyšetření zrakové ostrosti mohou nabývat mnoha podob. Dříve byly nejběžnější tištěné optotypy, následovaly prosvětlené či projekční optotypy a v dnešní digitalizované době přecházíme na LCD optotypy. Při nedostatečných rozměrech vyšetřovací místnosti vzhledem k vyšetřovací vzdálenosti lze docílit potřebné vzdálenosti použitím zrcadel, čímž se prodlouží optická dráha mezi pacientem a optotypem. Níže budou uvedeny základní výhody či nevýhody jednotlivých typů optotypů. [1]

Tištěné optotypy

Nejčastěji jsou tyto optotypy natištěny na neprůhledné papírové nebo plastové ceduli. Číslo označující řádky obvykle značí vzdálenost, ze které by byly znaky viděny pod úhlem 5'. Standardní vyšetřovací vzdálenost je 6 m a zrková ostrost je zapisuje Snellenovým zlomkem. Vyšetření na kratší vzdálenost probíhá např. u slabozrakých pacientů, kteří ze 6 m nedokáží rozlišit ani ty největší znaky na optotypu. Pak je velmi vhodné volit vyšetřovací vzdálenost tak, aby bylo dosaženo jednoduchého Snellenova zlomku. Uvedme příklad: Při přečteném řádku č. 60 ze vzdálenosti 3 m (nikoliv ze standardních 6 m) bude Snellenův zlomek roven 3/60. Jejich největší nevýhodou je nemožnost měnit optotypové znaky, tudíž jsou snáz zapamatovatelné. To může vést k mylnému stanovení skutečné zrkové ostrosti. [1]

Prosvětlené optotypy

Prosvětlené optotypy jsou speciální formou optotypů tisknutých na průhlednou fólii a jsou opatřeny osvětlovacím systémem, který je umístěn za fólii. [1]

Projekční optotypy

Další formou je projekční optotyp, který se skládá z projektoru a projekční desky nebo plátna. Pokud je čočka projektoru a oko vyšetřovaného stejně vzdálené od projekční desky, úhlová velikost promítaných znaků se nemění s pozorovací vzdáleností. U nás je nejběžnější decimální zápis dosažené zrkové ostrosti. Většina těchto optotypů je konstruována pouze na jednu určitou pozorovací vzdálenost (6 m). Standardní 35mm diaprojektor umožňuje promítat 5 znaků na řádku až do hodnoty vízu 6/60. Pro menší řádky klesá počet znaků na řádku. [1]

LCD optotypy

Už i v běžné praxi se stále častěji setkáváme s optotypy, které jsou pacientovi prezentovány na digitálních monitorech. Jejich nesporná výhoda tkví v možnosti měnit pořadí optotypových znaků, aby nedocházelo k jejich zapamatování si, měnit typy promítaných znaků a jejich parametry (kontrast, vzdálenosti mezi znaky/řádky a dobu prezentace znaku). Limitem pro zobrazování extrémně malých či velkých znaků je rozlišení obrazovky v pixelech a její skutečné rozměry. [1]

2 KONTRASTNÍ CITLIVOST A JEJÍ MĚŘENÍ

V běžném životě je zrak velmi důležitým smyslem, jehož kvalitu nejčastěji posuzujeme pomocí vyšetření zrakové ostrosti a zorného pole. Pro dosažení kompletnějšího zhodnocení zrakových funkcí jedince jsou nezbytné další testy. Mnoho studií ukazuje právě na kontrastní citlivost, která poskytuje užitečné informace o tom, jak svět vlastně vidíme – při řízení, čtení, udržení rovnováhy a jakou roli hraje při pádech či autonehodách. Měření kontrastní citlivosti je poměrně rychlé a snadné a lze jím odhalit i velmi malé zhoršení ve zrakovém vnímání oproti vyšetření zrakové ostrosti. K redukci kontrastní citlivosti dochází při mnoha onemocněních, přičemž zraková ostrost může nabývat normálních hodnot. Jedná se např. o stavy po refrakčních operacích, u pacientů s roztroušenou sklerózou, kataraktou, glaukomem nebo u diabetiků [1]. Dále se snížená kontrastní citlivost objevuje u amblyopie, věkem podmíněné makulární degenerace i u nekorigovaného astigmatismu při nošení měkkých kontaktních čoček [20].

Měření vízu probíhá zpravidla na optotypech za použití vysokého kontrastu, mnohem častěji se ale v běžném životě setkáváme s kontrastem nižším. Proto by mělo být měření kontrastní citlivosti standardem. Pro kvantitativní zhodnocení citlivosti určujeme prahový stimul, což je nejmenší stimul, který dokáže vyvolat smyslový vjem (u kontrastu rozlišit 2 plochy o rozdílném jasu). Tuto prahovou hodnotu ovlivňuje řada faktorů, např. pohyb, úroveň adaptace na světlo/tmu, osvětlení apod. Citlivost na kontrast je definována jako převrácená hodnota prahu kontrastu, jehož hodnota je u zdravých očí 0,01. K měření kontrastní citlivosti se využívá např. Pelli-Robsonova tabule a Vision Contrast Test System (označován také jako Vistech, VCTS), případně počítačové programy na standardizovaném monitoru. [2]

V dnešní době oproti tištěným papírovým testům dosahují větší oblíby počítačové programy, které nabízí efektivnější a objektivnější vyšetření za použití široké škály stimulů. Obvyklé metody měření kontrastní citlivosti jsou subjektivní, tj. vycházejí ze subjektivní odezvy vyšetřované osoby. Objektivní metoda, eliminující nutnost odpovědi subjektu, je např. metoda evokovaných zrakových potenciálů, kterou popisuje zdroj [27]. Subjektivní metody jsou založeny na vlastní zkušenosti a vnímání pozorovatele a jsou významně ovlivněny mírou pochopení prováděného zrakového úkolu, tj. též vhodnou instruktáží. V klinické praxi je cílem požadovaný zrakový úkon co nejvíce zjednodušit, jedná se tedy např. o metody vycházející ze čtení známých

znaků (Pelli-Robsonova tabule), určování orientace stimulu nebo vymezení, ve kterém je ze dvou částí testu o stejném průměrném jasu přítomen stimul. [3]

2.1 Definice kontrastní citlivosti

Kontrast definujeme jako rozdíl mezi dvěma jasy. Kontrastní práh (C_p) je nejnižší hodnota kontrastu, při kterém dokážeme rozlišit 2 plochy o různém jasu. Kontrastní citlivost (C_s) je převrácená hodnota kontrastního prahu a lze vyjádřit vztahem $C_s = \frac{1}{C_p}$. Vyšetřovaný, který požaduje vysoký kontrast, aby rozlišil 2 plochy, má nízkou kontrastní citlivost a naopak. Předtím, než se k měření kontrastní citlivosti využívalo sinusových mřížek, byl kontrast vypočítáván na základě Weberova kontrastu C , jež je definován podle [1] vztahem

$$C = \frac{L_b - L_t}{L_b},$$

kde L_b značí jas pozadí a L_t jas testového symbolu. V dnešní době se obecně tento vzorec používá k výpočtu kontrastu u písmen nebo jednoduchých symbolů. Například velikost kontrastu u Snellenova optotypu je obvykle vyšší než 90 %, protože se při konstrukci optotypu používají černé znaky s nízkým jasnem na bílém pozadí s mnohem vyšším jasnem. [1]

V 50. a 60. letech 20. století se začala využívat pro měření kontrastní citlivosti sinusová mřížka. Jedná se o terč, ve kterém se střídají světlé a tmavé pruhy – rozložení jasu je popsáno matematickou funkcí sinus. Nejvyšší hodnotu jasu v mřížce označujeme L_{\max} a nejnižší L_{\min} . V tomto případě se obvykle uvažuje tzv. Michelsonův kontrast (C_m), který je definován vztahem

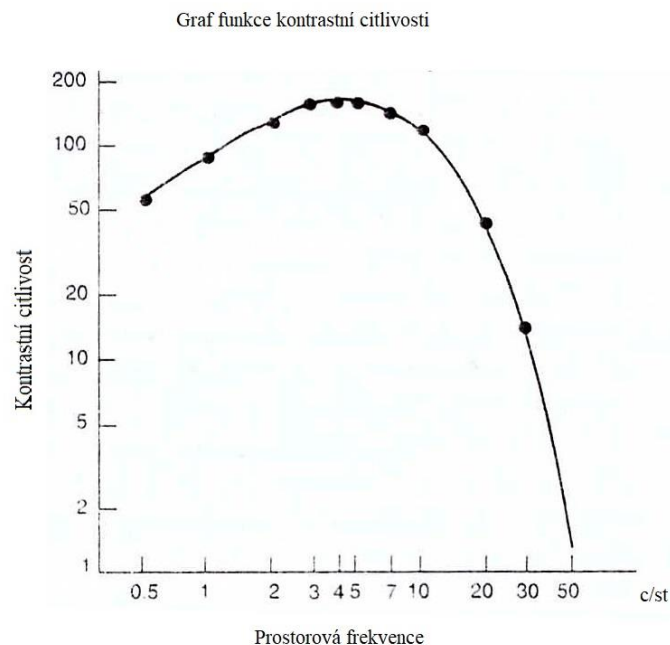
$$C_m = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}},$$

a nabývá hodnot od 0 do 1 nebo od 0 % do 100 %. Jeden pár tmavého a světlého pruhu označujeme jako jeden cyklus, přičemž počet cyklů na jeden stupeň je označován jako tzv. prostorová frekvence mřížky [1]. Prahový kontrast byl stanoven Fechnerem na přibližnou hodnotu 1 % pro širokou škálu podnětů bez ohledu na jeho velikost nebo jas [3].

2.2 Klinické metody měření kontrastní citlivosti

V běžném prostředí se člověk setkává s objekty, které mají různé kontrasty. Klasické měření zrakové ostrosti probíhá obvykle za použití vysokého kontrastu černých znaků na bílém pozadí. Vyšetření kontrastní citlivosti poskytuje obsáhlejší zhodnocení zrakových funkcí i za suboptimálních světelných podmínek. Při rozlišování jemných prostorových detailů závisí na dvou faktorech – na prostorové frekvenci a kontrastní citlivosti. [20]

Prostorová frekvence, výše definovaná jako počet cyklů na stupeň, charakterizuje strukturu pozorovaného objektu. Vysoké prostorové frekvence (tj. úzké pruhy na testu) odpovídají vnímání hran a jemných detailů v pozorované scéně, naopak nízké prostorové frekvence (široké pruhy na testu) odpovídají vnímání větších plošných objektů a tvarů. Je známo, že kontrastní citlivost se mění s prostorovou frekvencí. Sledováním kontrastních prahů pro různé prostorové frekvence získáme funkci kontrastní citlivosti (viz obr. 7). [20, 21]



Obr. 7: Závislost kontrastní citlivosti na prostorové frekvenci. Upraveno. [19]

Z grafu, který je na obr. č. 7, vyplývá, že nejvyšší kontrastní citlivost má lidské oko pro hodnoty prostorové frekvence přibližně mezi 3–6 c/st. Při nižších i vyšších prostorových frekvencích citlivost klesá. Pro křivku kontrastní citlivosti

je charakteristický její zvonovitý tvar. S přibývajícím věkem se často mění (klesá) i kontrastní citlivost, a to ve všech prostorových frekvencích, typicky však u středních a vyšších prostorových frekvencí. [20,21]

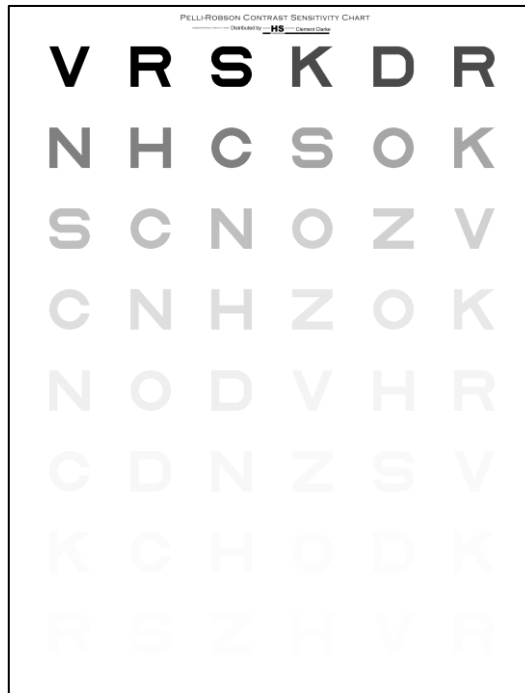
Pro vyšetřování kontrastní citlivosti se používají 2 základní typy testů – písmenové testy a testy se sinusovou mřížkou, jež budou blíže popsány v následujících dvou oddílech. V současnosti již existují i digitální formy testovacích systémů, které jsou prezentovány většinou na LCD monitorech. Jedná se např. SmartChart, TCP-2000, Holladay Automated Contrast Sensitivity System.

2.2.1 Písmenové testy

Písmenové testy jsou sestaveny ze souboru písmen. Jedná se tak o optotypy s proměnlivým kontrastem. Přestože existuje více druhů těchto testů, detailněji bude níže popsána pouze Pelli-Robsonova tabule, jelikož je u nás používána nejčastěji. Mezi další písmenové testy patří např. Hamilton-Veale Contrast Sensitivity Test, Mars Letter Contrast Sensitivity Test a Regan Low Contrast Letter Acuity Chart. Hodnota kontrastní citlivosti se zjišťuje pomocí poslední správně přečteného písmena z testu. U těchto testů lze kontrast definovat pomocí Weberova kontrastu, viz podkapitola 2.1. [20]

Pelli-Robsonova kontrastní tabule

Tuto tabuli (viz obr. 8) tvoří soubor písmen ze skupiny Sloan letters, ve kterém mají všechna písmena přibližně stejnou čitelnost (minimálně v případě vysokého kontrastu). Písmena jsou rozvržena do 8 řádků, přičemž na každém řádku nalezneme 6 znaků. Kontrast se snižuje zleva doprava a shora dolů, vždy v druhé půlce řádku, tzn. poslední 3 písmena mají nižší kontrast než ta na začátku řádku. Vyšetření pomocí tohoto testu je poměrně jednoduché a rychlé, proto se osvědčilo v běžné klinické praxi. Kontrast se mění vždy po trojici písmen, kdy každé trojici je přiřazena hodnota $\log C_s$ (logaritmus kontrastní citlivosti). První trojici odpovídá hodnota $\log C_s = 0,05$, poslední pak 2,30. Změna kontrastu mezi trojicemi písmen je rovna 0,15 logaritmických jednotek. Kontrastní citlivost určíme na základě minimálně dvou přečtených znaků z jedné trojice. Tento test neměří závislost kontrastní citlivosti na vízu ani na prostorové frekvenci. [19]



Obr. 8: Pelli-Robsonova tabule s proměnným kontrastem. [18]

2.2.2 Testy založené na sinusové mřížce

Tyto testy umožňují sledovat hodnotu kontrastní citlivosti při dané prostorové frekvenci. Testy obsahují stimuly, které jsou složeny ze sinusové mřížky, jejíž frekvence pak definuje prostorovou frekvenci stimulu. Výhoda použití sinusové mřížky jako podnětu spočívá v tom, že u degradovaného obrazu takového podnětu vytvořeného špatným optickým systémem se zhorší pouze kontrast, avšak rozložení jasů zůstává stejné. Můžeme tedy měřit vidění pouze jako funkci kontrastu. [19]

U těchto testů lze kontrast definovat pomocí Michelsonova kontrastu, viz podkapitola 2.1. Mezi další testy se sinusovou mřížkou řadíme např. původní Ardenovy tabule, které se však již v dnešní době nevyužívají, Cambridge Low Contrast Chart a různé odvozené testy od níže popsaného testu Vision Contrast Test System. [20]

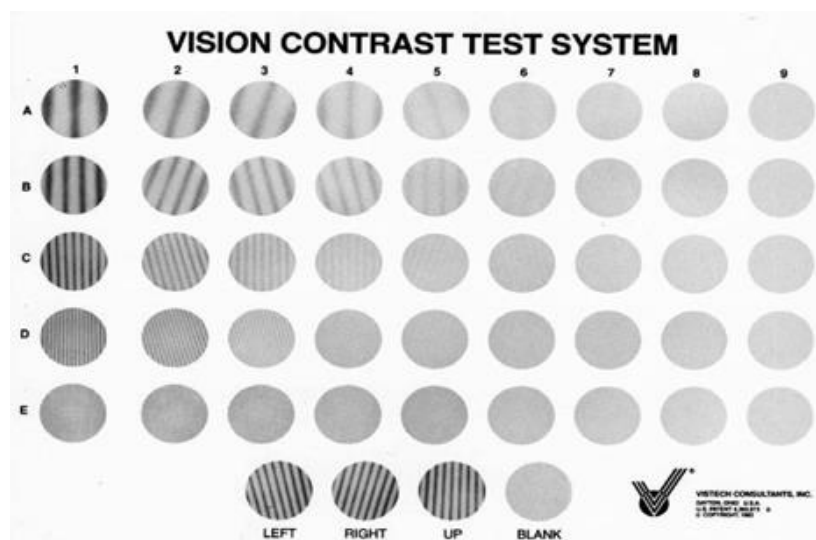
Vision Contrast Test System (VCTS 6500, Vistech)

Mezi nejznámější testy, které jako podnět využívají terč tvořený sinusovou mřížkou, patří Vision Contrast Test System. Tento test navrhl Arthur Ginsburg. Jeho princip spočívá v určování orientace seskupení čar (sinusové mřížky – viz výše)

z možných tří orientací (vlevo, vpravo, nahoru), případně pacient oznámí prázdné kolečko, pokud není schopen čáry rozeznat. Orientace mřížky je prezentována náhodně a vyšetřující je schopen odpovědi vyšetřovaného objektivně kontrolovat. [19]

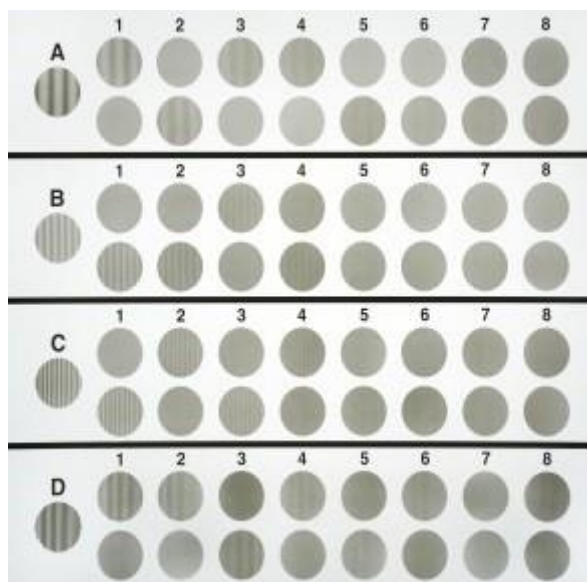
Testová tabule, viz obr. 9, je navržena na vyšetřování na vzdálenost 3 m. Existuje však také provedení testu pro vyšetření na blízkou vzdálenost - 45 cm. Skládá se z pěti řádků o prostorových frekvencích 1,5, 3, 6, 12 a 18 cyklů/stupeň (označení řádků A až E), kde se na každém řádku nachází 9 mřížek. Pacient musí přesně zaostřovat na tabuli a prahový kontrast je odvozen pro každý řádek od poslední správně určené orientace mřížky. Rozdíl kontrastu mezi dvěma terči není konstantní, avšak v průměru nabývá hodnoty $0,25 \log C_s$. [19, 20]

Výsledky se zaznamenávají do standardizovaného diagramu vystihujícího závislost prostorové frekvence na příslušné kontrastní citlivosti. Odlišná křivka pro pravé a levé oko naznačuje možnou patologii. Za abnormální rovněž považujeme rozdíl o 2 kontrastní hodnoty mezi pravým a levým okem pro jednu prostorovou frekvenci, případně pokud se liší mezi pravým a levým okem o 1 kontrastní hodnotu u dvou či více prostorových frekvencí. Dále je možné stanovené hodnoty porovnávat s věkovou normou, vyznačenou ve standardizovaném diagramu. Hlavní výhoda tohoto testu spočívá v testování při 5 různých prostorových frekvencích. [19, 20]



Obr. 9: Ukázka Vistech testu. [17]

Velmi hojně používanou alternativou tohoto testu je test CSV-1000, kde pro danou prostorovou frekvenci vyšetřovaný rozlišuje mezi kroužkem, kde je přítomna sinusová mřížka, a kroužkem, kde je monotónní šedá plocha (viz obr. 10). Test zahrnuje 4 testované prostorové frekvence 3, 6, 12 a 18 cyklů/stupeň. [32]



Obr. 10: Ukázka testu CSV-1000. [32]

3 STAVBA SÍTNICE A RECEPTIVNÍ POLE

Jednou z obvykle akceptovaných teorií vzniku crowding efektu a konturové interakce je teorie založená na receptivních polích (blíže viz kapitola 4). Receptivní pole se dle této teorie díky své struktuře a vlastnostem významně podílejí na vzniku těchto efektů. Následující kapitola proto přináší stručný pohled do problematiky receptivních polí. Vzhledem k tomu, že se receptivní pole neuronů nacházejí přímo na sítnici, věnuje se první podkapitola stavbě sítnice a fotoreceptorům. Obsah druhé podkapitoly tvoří receptivní pole a jejich vlastnosti. Vztahem receptivních polí ke crowdingu a konturové interakci se podrobně zabývá kapitola 4.

3.1 Stavba sítnice

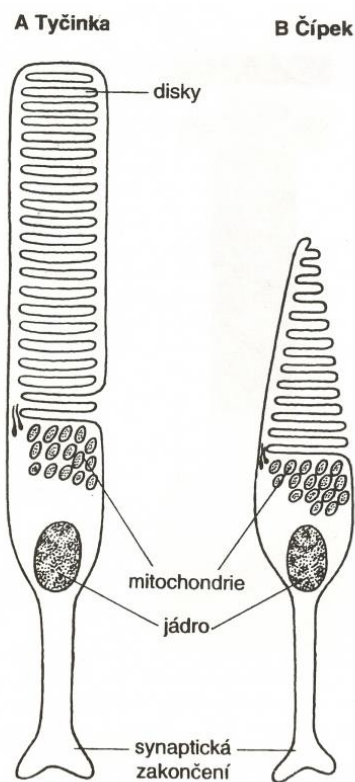
Sítnice (*retina*) se rozprostírá ve vnitřní vrstvě oka, zvané *tunica nervosa*. Makroskopicky se jedná o jemnou průhlednou blanku narůžovělé barvy, jejíž tloušťka nabývá hodnot 0,1 až 0,25 mm. Rozlišujeme u ní 2 části, které od sebe odděluje zubovitá linie (*ora serrata*). Část slepou (*pars caeca retinae*), jež neobsahuje fotoreceptory a nervové buňky, a část optickou (*pars optica retinae*), která obsahuje fotoreceptory a nervové buňky a podílí se tak na zrakových funkcích. Sítnice je volně přiložena k cévnatce, pevně je ukotvena pouze u zubovité linie a při papile zrakového nervu. [2, 24]

Sítnice je místem, kde se světelná energie z dopadajícího světla mění na elektrické impulzy, které se následně přenáší v podobě nervových vzruchů ke zpracování do dalších částí zrakové dráhy. Přenos probíhá za pomoci neuronů zrakové dráhy, které tvoří bipolární a gangliové buňky, jež jsou součástí sítnice, a buněk v *corpus geniculatum laterale*. Samotná přeměna světelné energie na elektrický impulz probíhá velmi složitými chemickými procesy. Dopadající světlo musí projít všemi vrstvami sítnice, neboť fotoreceptory se nacházejí v její nejhlubší vrstvě. [2, 24]

Lidská sítnice obsahuje přibližně 130 milionů fotoreceptorů neboli smyslových buněk. Vzhledem k jejich odlišnému tvaru a funkci dělíme fotoreceptory na 2 typy – tyčinky a čípky, viz obr. 11. Rozložení tyčinek a čípků není na sítnici rovnoměrné. Ani jejich počet není stejný, poměr počtu tyčinek a čípků je asi 20 : 1. Jednotlivé fotoreceptory jsou podrobněji popsány níže. [24]

Za místo nejostřejšího vidění považujeme na sítnici žlutou skvrnu (*macula lutea*) s průměrem 3–5 mm. Žlutá skvrna svým fyziologickým prohloubením vytváří oblast zvanou *fovea centralis*, která nabývá průměru 1,5 mm. Střed fovey tvoří foveola, jejíž průměr dosahuje pouhých 0,3 mm. Ve foveole nalezneme pouze čípky, a proto se jedná o oblast, která zodpovídá za nejostřejší vidění (nejlepší zrakovou ostrost). Foveola má tedy nejvyšší citlivost pro rozlišování detailů. [19, 26]

Existují dva druhy propojení neuronů na sítnici – vertikální a horizontální. Vertikálně se vzruch šíří od fotoreceptoru k bipolárním buňkám a od nich k buňkám gangliovým. Horizontální propojení na sítnici se uskutečňuje pomocí buněk horizontálních, které vytváří spojení mezi fotoreceptory a bipolárními buňkami, a amakrinních buněk, jež odpovídají za propojení buněk bipolárních a gangliových. Díky horizontálnímu propojení může jeden fotoreceptor stimulovat více bipolárních či gangliových buněk, a proto dochází k horizontálnímu rozptylu stimulu. [19, 31]



Obr. 11: Stavba tyčinky a čípku. [15]

3.1.1 Tyčinky

V lidské sítnici nalezneme asi 120 milionů tyčinek. Hustota tyčinek je největší v prstenci asi 5–6 mm vzdáleném od fovey a dosahuje hodnoty asi 160 000 tyčinek/mm². Směrem k periférii se počet tyčinek pomalu snižuje. Tyčinky obsahují látku rhodopsin, která je velmi citlivá na světlo. Osvětlením tyčinek dochází k přestavbě molekul rhodopsinu, čímž se mění světelná energie na nervové vzruchy. Tyčinky odpovídají za vidění při horších světelných podmínkách, tedy při vidění za šera a tmy (tzv. skotopické vidění). Výsledný zrakový vjem není barevný ale v odstínech šedé. [19, 24]

3.1.2 Čípky

Sítnice obsahuje asi 6 až 7 milionů čípků a největší hustotu čípků pozorujeme v oblasti fovey (150 000 čípků/mm²). Směrem do periferie sítnice jejich počet významně klesá. Čípky mají obdobnou základní strukturu jako tyčinky. V čípku je přítomen zrakový pigment jodopsin. Uplatňují se při vidění za dobrých světelných podmínek, tedy ve dne a za dostatečného osvětlení (tzv. fotopické vidění). Čípky také odpovídají za barevné vidění a rozlišení jemných detailů. [19, 24]

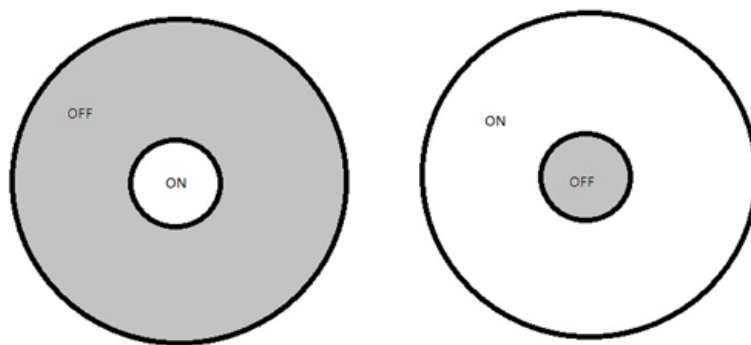
3.2 Receptivní pole

Pojmem receptivní pole neuronu rozumíme tu část sítnice, která vlivem podráždění vyvolá jeho odpověď. Receptivní pole jednotlivých neuronů zrakové dráhy nabývají různých tvarů a velikostí a mají i odlišné funkce. Množství receptivních polí se navzájem překrývá. Soustředná kruhová receptivní pole mají bipolární, gangliové buňky a buňky v corpus geniculatum laterale. Protáhlejší a oválná receptivní pole nacházíme u neuronů ve zrakové kůře. [19, 28, 29]

Na úrovni sítnice dochází ke konvergenci nervových vzruchů, což je dáno jejím uspořádáním. Fotoreceptory jsou napojeny na buňky bipolární, ty potom dále na buňky gangliové. V periférii sítnice je napojeno na jednu gangliovou buňku mnoho tyčinek a čípků. Počet napojených fotoreceptorů na jednu gangliovou buňku určuje i velikost jejího receptivního pole. Velikost receptivního pole úměrně roste s intenzitou podnětu,

v periférii sítnice může jeho průměr dosahovat až 1 mm. Nejmenší průměr receptivního pole pozorujeme v oblasti fovey, kde může jeho velikost odpovídat velikosti čípku. [19, 28]

Kruhová receptivní pole dělíme na 2 typy podle uspořádání jejich centra a periferie. První typ je ON-centrum s OFF-periferií, druhý pak OFF-centrum s ON-periferií. Oba tyto typy jsou znázorněny na obr. č. 12. Při podráždění ON-oblasti receptivního pole dojde k excitaci buňky (podráždění vyvolá odezvu buňky). Naopak při osvitu OFF-oblasti receptivního pole nedojde k odezvě buňky. [19, 28]



Obr. 12: Typy uspořádání centra a periferie kruhových receptivních polí.

Funkce receptivních polí spočívá ve vnímání kontrastu, pohybu, rychlosti pohybu, tvaru či barvy podnětu. Za detektory kontrastu považujeme právě kruhová receptivní pole s uspořádáním centrum-periferie. [19, 28, 30]

4 CROWDING EFEKT A KONTUROVÁ INTERAKCE

Schopnost rozlišení znaku se výrazně snižuje, pokud je obklopeno určitými konturami, znaky, písmeny či jinými objekty. V případě, že fixovaný znak je ohraničen jednoduchými postranními konturami (úsečkami), uplatňuje se jev zvaný konturová interakce. Avšak pokud fixovaný znak obklopují další znaky (písmena seřazená do řádku či nad sebe), jedná se o složitější podnět a mluvíme o tzv. crowding efektu (nebo jinak crowding fenoménu). Konturovou interakci považujeme společně s fixačními očními pohyby a pozorností za součást crowding efektu. Oba tyto jevy pozorujeme jak u normálních, tak i amblyopických očí, a můžeme je charakterizovat rozsahem a magnitudou (velikostí). Rozsah udává hodnotu kritické separace (vyjádřenou v % šířky znaku nebo v úhlových minutách), při které dochází k projevení daného jevu, a tím ke zhoršení rozlišitelnosti pozorovaného znaku. Magnituda představuje největší pokles zrakové ostrosti vzhledem ke zrakové ostrosti měřené na samostatném znaku. V následujících dvou podkapitolách budou tyto jevy popsány podrobněji. [4, 15]

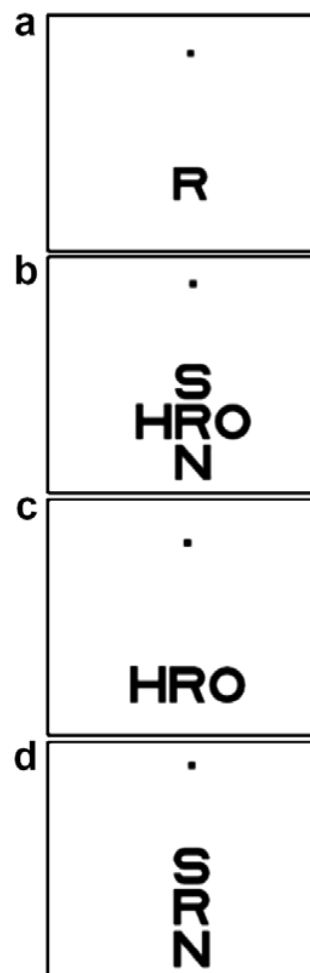
4.1 Crowding efekt

Obecně definujeme crowding jako negativní vliv blízkých objektů na schopnost jejich rozlišení. Crowding snižuje schopnost rozpoznat velmi nahuštěné znaky (např. písmena) u sebe, přičemž všechny znaky mají podobný charakter. Jedná se tedy o inhibiční interakci. Studium crowdingu může výrazně napomoci objasnění procesů probíhajících při rozpoznávání objektů a nemalou roli hraje i u pacientů, kteří trpí např. amblyopií, dyslexií nebo makulární degenerací. S vlivem crowdingu se setkáváme v běžném životě neustále, např. při čtení, rozlišování obličejů, při určování orientace podnětu, dokonce i v případě, když se stimul pohybuje. [15]

Při centrálním vidění (v oblasti fovey) podle některých studií [40] crowding nastává, avšak pouze u poměrně malých vzájemných vzdálenostech znaků (4 až 6 úhlových minut). Při periferním vidění lze jinak lehce rozlišitelné písmeno rozpoznat o poznání hůře, pokud tento znak obklopíme dalšími písmeny, viz obr. 13. V periférii crowding nastává i při velkých vzájemných vzdálenostech pozorovaných symbolů (obvykle větších, než je polovina vzdálenosti znaku od fixovaného bodu, tj. než je polovina excentricity pozorovaného znaku vůči fixačnímu bodu). Velmi znatelný je

rovněž crowding u amblyopů; zde je výrazný crowding i v centrální oblasti, srovnatelný s periferním crowdingem. [15]

Pro posuzování crowding efektu je jedním z nejpodstatnějších faktorů separace znaků, tedy při jakých vzdálenostech mezi znaky je jejich rozlišení ještě ovlivněno a při kterých už ke crowdingu nedochází. Separace může být měřena formou center-to-center, kdy je měřena od středu testovacího znaku po střed znaku vedlejšího, nebo edge-to-edge, tedy od hrany testovacího znaku po hranu znaku vedlejšího. Jako kritickou separaci označujeme takovou vzdálenost mezi znaky, při které je identifikace znaku zhoršena přítomností znaku dalšího [15]. Proto je velmi důležité zohlednit velikost separací vůči crowdingu při konstrukci optotypů [19].



Obr. 13: Crowding efekt. Při fixaci tečky lze pozorovat zhoršenou identifikaci prostředního znaku obklopeného dalšími písmeny. [15]

Crowding efekt lze názorně ukázat na souboru s větším počtem znaků, které by měly být čteny postupně pomocí sekvenčních fixačních očních pohybů. Prvotní vysvětlení tohoto efektu se zakládalo na souboru písmen E při různých orientacích a při fixní separaci znaků. Subjekty pozorování musely pohybovat očima po písmenech E a měly za úkol určit jejich orientaci. Poté byla písmena zakrývána tak, že šlo vidět každé druhé E, třetí atd., čímž narůstala separace mezi znaky. U všech testovaných amblyopických očí narůstala zraková ostrost s rostoucí separací mezi znaky. Další podobné testy došly ke stejnému závěru s tím, že tento výsledek je obecně platný pro všechny oči, nejen oči amblyopické. Crowding efekt tedy souvisí s úrovní zrakové ostrosti a je známo, že je ještě více patrný u amblyopických očí při strabismu. [5]

4.1.1 Vlastnosti crowding efektu

Přestože zatím nebyl crowding efekt z vědeckého hlediska plně objasněn, na základě proběhlých výzkumů lze shrnout několik charakteristických znaků, kterými se crowding vyznačuje. Díky zjištěným vlastnostem se poté dá více či méně pravděpodobně vysvětlit několik existujících teorií crowdingu.

Crowding při periferním vidění je úměrný excentricitě, nezávisí však na velikosti znaku a lze jej poměrně snadno odlišit od běžného maskování. Navíc jeho prostorový rozsah dosahuje přibližně 0,5násobku excentricity znaku. Protože foveální crowding dosahuje malých rozsahů (4 až 6 úhlových minut), je těžké odlišit zhoršenou schopnost rozlišení jednotlivých znaků jako důsledek crowdingu od rozmazání, které souvisí s rozlišovací schopností oka. Je tedy prakticky nemožné vytvořit menší testovací znak, než je rozlišovací schopnost oka. [4, 15, 40]

V periférii není crowding izotropní. Pokud umístíme obklopující znaky vertikálně ve spodní části zorného pole, způsobí větší problémy při rozeznávání znaků. Ve zbylém zorném poli platí přesný opak. Průměrně crowding dosahuje okolo 0,1násobku excentricity znaku v tangenciálním směru až po 0,5násobek v radiálním směru. Rozsah crowdingu pravděpodobně závisí i na umístění znaků v zorném poli. Současné studie poukazují na větší crowding ve všech čtyřech kvadrantech při horizontálním uspořádání znaků. [15]

V periférii je crowding asymetrický. To znamená, že krajní znaky se lépe rozlišují než znaky umístěné ve středu řady, ačkoliv by se dalo očekávat, že prostřední znaky, na které fixujeme (dopadají do fovey), budeme rozlišovat snáz. Crowding rovněž významně závisí na podobnosti použitých znaků – na jejich orientaci, prostorové frekvenci, velikosti a tvaru, barvě i kontrastní polaritě. Pokud vezmeme v úvahu kontrastní polaritu, crowding je silnější a rozsáhlejší, když mají znaky stejnou polaritu (všechny znaky černé nebo bílé). [15]

Dalším zajímavým faktem je, že crowding můžeme pozorovat i za tzv. dichoptických podmínek, kdy prezentujeme testovací znak a okolní znaky odděleně obou očím zároveň. Dokonce i v případě, že obklopující znaky prezentujeme v okolí slepé skvrny a testovací znaky do oblasti monokulární slepé skvrny druhého oka. Fakt je o to zajímavější, jelikož zde chybí jakékoliv přímé sítnicové aferentní spojení s vyššími strukturami zrakové dráhy. To napovídá zpracování informací dále ve zrakové dráze. [15]

4.1.2 Mechanismus crowding efektu

Zpočátku se nabízely dvě možnosti objasnění crowding efektu podle Stuarda a Buriana [34]. První možnost se týkala očních pohybů. U běžných optotypů je vyžadována přesná fixace na každý znak, aby mohl být rozlišen od ostatních. Podstatně nižší schopnost takto přesné fixace najdeme u dětí do 6 let věku. Výraznější crowding u amblyopie při strabismu může být důsledkem nestabilní monokulární fixace na postiženém oku (tj. oku s nevyvinutou rozlišovací schopností). Nedostatečně vyvinutá schopnost rozlišování jako taková však nemůže být hlavním vysvětlením, protože studie Kotheho a Regana [35] uvádí, že šestileté děti mají sice řádkový vízus nižší než dospělí, nikoliv však vízus měřený na izolovaných optotypových znacích (tj. rozlišovací schopnost sítnice je již dostatečně vyvinuta).

Druhá možnost zahrnuje neurální aktivitu v sítnici. Předpokládalo se, že na crowding efektu se aspoň minimálně podílí výraznější podráždění sítnice při osvětlení amblyopického oka. Po 7 letech Burian rozšířil vysvětlení crowdingu o vliv konturové interakce a pozornosti [36]. Vymezil tedy 3 faktory ovlivňující crowding efekt: fixační oční pohyby, nervové inhibice vyvolané postranními stimuly (hrany postranních znaků přilehlé k právě zaměřenému znaku působí jako stimuly pro vznik

konturové interakce, u které se předpokládá neurální původ) a pozornost [5]. Přitom souhra drobných pohybů oka a nepozornosti vede k záměně centrálního znaku s okolními znaky (tzv. substitute), popřípadě ke vjemu znaku, který vznikne na základě smísení jednotlivých prvků pozorovaného znaku a znaků okolních (tzv. pooling) [37]. Z dichoptických experimentů dále vyplývá, že crowding je lokalizován na úrovni oblasti V1 ve zrakové kůře a případně v ještě hlubších částech za touto oblastí [15].

V současné době převládá názor, že mechanismus crowdingu lze ze značné části vysvětlit pomocí principu receptivních polí. Tento mechanismus je popsán níže v oddílu 4.2.2. A protože je konturová interakce součástí crowdingu, předpokládáme u něho stejný mechanismus jako u konturové interakce. Některá další původně uvažovaná objasnění crowdingu, založená na efektech typu masking, laterální interakce a další, však plně nekorespondují s vlastnostmi tohoto jevu a ukazují se tedy jako lichá. Jejich přehled stručně uvádí následující oddíl.

4.1.3 Odlišení crowdingu od ostatních fenoménů

Maskování, laterální interakce a obklopující suprese (surround suppression) jsou odlišné fenomény od crowdingu, zdánlivě se mu však podobají, a proto je důležité je od sebe rozeznat. Tyto jevy nastávají, jakmile společně se sledovaným znakem prezentujeme další znaky v jeho okolí. Můžeme vypořádat společnou vlastnost a to tu, že okolní znaky znesnadňují rozlišení pozorovaného znaku. Všechny tyto fenomény jsou však rozdílné a odrážejí různé neurální procesy. Autoři studie [41] se domnívají, že crowding efekt lze rozeznat pomocí kritéria, které stanovuje, že kritický rozestup mezi znaky pro crowding závisí na excentricitě a je nezávislý na velikosti stimulu. Naopak je tomu u běžného maskování, tedy kritický rozestup nezávisí na excentricitě a je závislý na velikosti stimulu. [15] Níže jsou stručně popsány uvedené fenomény.

Překrytí neboli (běžné) maskování

Detekce určitého rysu pozorovaného předmětu či znaku je znesnadněna, pokud se pozorovaný znak překrývá s maskujícím znakem. Nejsilnější překrytí je dosaženo, pokud se neliší prostorová frekvence a orientace pozorovaného a maskujícího znaku.

Překrytí vzniká přímou stimulací detektorů, které jsou nejvíce citlivé na detekování signálu [15].

Laterální interakce (maskování)

Aby došlo k interakci, nemusí se testovací a maskující znaky překrývat. Tento jev vysvětlujeme tak, že nervové kanály mohou být vybuzeny ostatními kanály v rozmezí vzdálenosti 2 vlnových délek od svého umístění a inhibovány kanály, jež pocházejí z delších vzdáleností [15].

Obklopující suprese

U tohoto fenoménu prezentujeme maskující znak mimo klasické receptivní pole neuronu, které zpracovává informaci o testovacím znaku. Tento jev má hodně společných rysů s crowdingem, avšak bližším porovnáním jsou výrazně odlišné. Např. zatímco crowding vykazuje silnou závislost na polaritě přilehlého znaku, obklopující suprese nikoliv [15].

4.2 Konturová interakce

Konturovou interakci definujeme jako snížení schopnosti rozpoznat pozorovaný objekt, je-li obklopen konturami. Např. se jedná o pokles čitelnosti pozorovaných písmen, které jsou obklopeny blízkými konturami [6]. Zatímco většina klinických vyšetření zrakové ostrosti probíhá na dostatečně separovaných optotypech, skutečnost se značně liší. Běžně musíme rozlišovat blízce seskupené znaky či předměty u sebe. Přítomnost přilehlých kontur v blízkosti pozorovaného předmětu značně znesnadňuje rozlišení jeho detailů. V řadě případů je konturová interakce vedle velikosti písma jedním z nejdůležitějších faktorů, které ovlivňují čitelnost psaného textu [8].

Nejjednodušeji si ji můžeme znázornit pomocí černého Landoltova prstence na bílém pozadí, které je obklopeno čtyřmi černými postranními úsečkami, viz obr. 14. Takový obrazec použil pro zkoumání konturové interakce Merton C. Flom a kol. [4]. Určení pozice mezery Landoltova prstence je zhoršeno přidáním postranních úseček k jeho okrajům. [4]



Obr. 14: Landoltův prsteneček obklopený různě vzdálenými úsečkami. Upraveno. [12]

4.2.1 Vlastnosti konturové interakce

Konturová interakce je ovlivněna separací mezi jednotlivými znaky, níže bude popsán i vliv excentricity, jasů a kontrastu. Maximální separace způsobující konturovou interakci mezi prstencem a přilehlými konturami je úměrná velikosti minimálního úhlového rozlišení u normálních i amblyopických očí. Byl vysloven předpoklad, že konturová interakce souvisí s velikostí receptivního pole odpovídajícího té části sítnice, která fixovala testový znak. Dále Flom a kol. [4] zjistili, že při velkých separacích přilehlých kontur od prstence je pozorovatelná jen malá nebo žádná interakce. Avšak pokud tyto přilehlé kontury postupně přibližujeme k prstenci, interakce se významně zvyšuje a způsobuje ztíženou identifikaci orientace prstence. Maximální separace, která ještě způsobuje interakci mezi prstencem i konturami, byla shledána jako poměrně stálá. U amblyopických očí, pokud vyjádříme rozsah konturové interakce v násobcích šířky znaku, byl o něco větší a při vyjádření v úhlových jednotkách byl takový rozsah výrazně větší. Nejmenší problémy u rozpoznávání orientace prstence způsobovaly velké separace a překvapivě i velmi malé separace, kdy se přilehlé kontury téměř dotýkaly prstence či ho dokonce ohraničovaly. Naopak nejhůře šla orientace identifikovat v případě, když separace byla úměrná minimálnímu úhlovému rozlišení. [4]

Minimální úhlové rozlišení nabývá u člověka nejmenších hodnot ve fovee a zvyšuje se s narůstající sítnicovou excentricitou. Tento nárůst může souviset s průměrem receptivního pole, jenž rovněž narůstá více v periférii sítnice. Další roli hraje stupeň překrytí jednotlivých receptivních polí. Pozitivní vzájemný vztah mezi minimálním úhlovým rozlišením a rozsahem konturové interakce může být

vysvětlen na základě různě velikých receptivních polí. Toto vysvětlení podporuje minimálně v případě amblyopie fakt, že redukovaná zraková ostrost u amblyopů může být zdůvodněna pomocí normálně snížené zrakové ostrosti v periférii sítnice při monokulární fixaci. U amblyopů je totiž běžná excentrická fixace. Potom i u normálních očí v centrální oblasti sítnice lze předpokládat vztah mezi *MÚR* a úhlovým rozsahem interakce, který je založen na individuálních rozdílech ve velikostech průměrů receptivních polí. Je pravděpodobné, že i u normálních očí je vztah mezi *MÚR* a úhlovým rozsahem konturové interakce ovlivněn individuální velikostí receptivních polí v centrální oblasti sítnice. [4]

Objevují se důkazy, že kritická separace pro konturovou interakci není závislá na velikosti testovacího znaku při centrálním ani periferním vidění [40] a rozsah konturové interakce roste směrem od fovey k periférii sítnice [6]. Studie [10] pro porovnání foveální konturové interakce za vysokého a nízkého kontrastu vychází z předpokladu, že pokud se prostorový rozsah crowding efektu nezvyšuje s velikostí použitého znaku, potom by měly být separace mezi znakem a obklopujícími stimuly spíše určeny fixní úhlovou velikostí (místo vyjádření v násobcích šířky znaku).

Vliv excentricity na rozsah konturové interakce je popsán ve studii [33], ze které je patrné, že rozsah konturové interakce je v periférii sítnice větší než ve fovee a roste úměrně se sítnicovou excentricitou. Rozsah konturové interakce je udán jako 0,1 násobek excentricity.

Vliv jasu na foveální konturovou interakci zkoumal Bedell a kol. ve studii [6], přičemž výsledky této studie poukazují na fakt, že úhlový rozsah konturové interakce se s jasnem nemění, avšak magnituda konturové interakce systematicky klesá se snižujícím se jasnem pozadí. Tyto výsledky rovněž naznačují, že rozsah konturové interakce není závislý na velikosti testovacího znaku. Redukovanou magnitudu konturové interakce v důsledku sníženého jasu nelze přičítat pouze změně ve zrakové ostrosti, neboť výsledky studie [10] ukazují, že obdobné snížení zrakové ostrosti vlivem sníženého kontrastu nemá na magnitudu konturové interakce vliv.

Při měření foveální zrakové ostrosti pomocí znaků s vysokým kontrastem vůči jejich pozadí bylo zjištěno, že u normálních i amblyopických pacientů je konturová interakce úměrná minimálnímu úhlovému rozlišení. Na základě tohoto zjištění se tradičně konturová interakce vyhodnocuje pomocí grafů, kde se zakreslují počty

(procenta) správně přečtených znaků vůči velikosti separace mezi znakem a postranním stimulem (obvykle se velikost udává v násobcích šířky znaku nebo v úhlových minutách). [10]

Foveální konturová interakce měřená na znacích s vysokým kontrastem u normálních probandů dosahuje průměrně jednu velikost znaku nebo jinak vyjádřeno 4 až 6 úhlových minut [10]. Při měření na znacích o nízkém kontrastu, jak tomu bylo ve studii [11], nebyla zaznamenána žádná foveální konturová interakce u normálních ani u amblyopických probandů. Přítomnost konturové interakce byla prokázána pouze při testování za vysokého kontrastu. Simmers a kol. [11] tedy došli k závěru, že k foveální konturové interakci dochází pouze za podmínek vysokého kontrastu znaků. Tento závěr však vyvrací studie [12], kdy za použití Landoltova prstence a postranních stimulů se vzájemnou separací 1 šířkou znaku byla zjištěna konturová interakce jak u vysokých, tak i nízkých kontrastů. Avšak pro nízké kontrasty dosahovala velikost konturové interakce nižších hodnot.

4.2.2 Mechanismus konturové interakce

Mechanismus konturové interakce není dodnes plně objasněn. Původně byla snaha konturovou interakci vysvětlovat (obdobně jako crowding) na základě např. maskování (viz oddíl 4.1.3) nebo na základě navýšení dominantních prostorových frekvencí celého pozorovaného stimulu mimo mez rozlišení oka vlivem přiblížení postranních kontur (tzv. fyzikální vysvětlení konturové interakce) [14]. Tyto teorie však neodpovídají reálnému chování konturové interakce [40]. Zdá se, že redukce zrakové ostrosti vlivem střetu úkolů – rozlišováním mezery prstence a současného odlišování postranních kontur od prstence je pouze sekundární efekt. Hlavním důvodem, proč se při konturové interakci snižuje vizus, může být neurální původ vycházející z vlastností receptivních polí [5].

Z dostupné literatury [4, 7] a z provedených studií [6, 10] se zdá, že vysvětlení konturové interakce může vycházet právě z chování receptivních polí. A protože je konturová interakce součástí crowdingu, předpokládáme stejný princip vysvětlení i u crowdingu. Hlavní myšlenkou této teorie je, že postranní kontury stimulují periferní (off) část on-center receptivního pole, čímž působí útlum signálu. Tento útlum pak vede ke zhoršenému rozlišení centrálního znaku. Zjištění, že se konturová interakce objevila

i za dichoptických podmínek (viz níže), naznačuje kortikální původ tohoto jevu. Je známo, že přínos antagonisticky uspořádané periferie receptivního pole na výstup gangliové buňky se snižuje při adaptaci na tmu. Ačkoliv prvotní studie tvrdily, že během adaptace na tmu periferní oblast receptivního pole gangliových buněk zmizí, pozdější studie došly k závěru, že vliv adaptace na tmu spočívá ve snížení vlivu periferie receptivního pole beze změny na uspořádání receptivního pole. Taková redukce vlivu periferie vzhledem k centru receptivního pole byla pozorována i u buněk v corpus geniculatum laterale a ve zrakové kůře. Potom výsledky studie [6] ukazují, že snížení magnitudy konturové interakce a její víceméně fixní rozsah odpovídá změnám ve struktuře receptivních polí.

Neurální původ konturové interakce podporují i výsledky dřívějšího experimentu provedeného Flomem a kol. [5]. Normálním i amblyopickým subjektům prezentovali Landoltův prstenec obklopený čtyřmi přilehlými konturami v náhodně stanovených vzdálenostech od prstence. Přilehlé kontury byly polovinu doby prezentace stimulu promítány oku ipsilaterálnímu, které fixovalo prstenec, a druhou polovinu promítacího času prezentovali přilehlé kontury oku kontralaterálnímu (jedná se o výše zmíněné dichoptické podmínky). V obou případech byly prostorový rozsah a intenzita konturové interakce shodné. To nasvědčuje, že oblast pro inhibiční efekt konturové interakce se nachází supraretinálně, je neurálního původu a musí se nacházet dále ve zrakové dráze, kde dochází ke spojení informací z obou očí – v corpus geniculatum laterale nebo pravděpodobněji v okcipitálním laloku mozku. [5]

Dalším podpůrným argumentem neurálního původu konturové interakce je její nezávislost na velikosti znaku při pevně dané excentricitě. Velikost znaku byla měněna např. v závislosti na změně kontrastu či jasu [6, 10], přičemž rozsah interakce se neměnil.

5 PRAKTICKÁ ČÁST

V předchozích kapitolách jsou shrnuty teoretické poznatky, které jsou důležité pro níže popsany experiment. V souvislosti s provedeným experimentem v rámci praktické části diplomové práce byla nejprve popsána rozlišovací schopnost oka, měření zrakové ostrosti a konstrukce optotypů – viz kapitola 1. Následující kapitola 2 je věnována kontrastu a kontrastní citlivosti. Třetí kapitola stručně popisuje sítnici a receptivní pole, neboť ta jsou součástí jedné z možných teorií vysvětlení crowding efektu i konturové interakce.

Mnoho vědců, kteří se zabývají konturovou interakcí a crowdingem, preferuje vysvětlení těchto jevů na základě antagonistického uspořádání receptivních polí. Přítomnost konturové interakce i při prezentaci stimulu za dichoptických podmínek naznačuje, že tyto interakce vznikají ve zrakové kůře. Při snižování jasu na úroveň prahu dochází k útlumu periferní (off) části receptivních polí. Tím by mělo též docházet ke snížení velikosti konturové interakce. Tento jev byl ve foveální oblasti skutečně pozorován. [6]

Cílem experimentální části je sledování současného vlivu kontrastu a separace znaků na měření zrakové ostrosti pomocí optotypu obvyklé konstrukce používaného v klinické praxi. Na základě stávajících znalostí bylo vysloveno několik předpokladů, které se dále uvažují v provedeném experimentu. Prvním předpokladem je, že zraková ostrost se snižuje s klesajícím kontrastem [38]. Podle studie [10] rovněž předpokládáme, že u konturové interakce rozsah ani magnituda nezávisí na kontrastu a vzhledem k tomu, že konturová interakce je součástí crowding efektu, domníváme se, že by se crowding mohl chovat obdobně.

5.1 Metodika výzkumu

V následující podkapitole je představena metodika, která byla použita v provedeném experimentu.

Testované subjekty

Výzkumu se celkem zúčastnilo 21 probandů (17 žen a 4 muži) ve věkovém rozmezí od 19 až 37 let. Nejdříve byli probandi informováni o metodice a cílech výzkumu, včetně možných rizik při probíhajícím měření. Svůj souhlas s účastí na výzkumné studii všichni potvrdili podpisem informovaného souhlasu. Podmínkou pro výběr vhodných účastníků studie byla normální naturální nebo korigovaná zraková ostrost. Proband nesměl mít žádné oční abnormality.

Stimul

Zraková ostrost byla měřena na třech speciálně k této studii vytvořených optotypech. Ty se lišily v kontrastu mezi znaky a pozadím. Použity byly optotypy s Weberovým kontrastem 90 %, 10 % a 5 % (viz podkapitola 2.1) při jasů pozadí přibližně $228 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Kontrast znaků byl nastaven na základě kalibrace monitoru, popsané níže. Nejprve byl prezentován optotyp s nejvyšším kontrastem, optotyp s nejnižším kontrastem byl prezentován jako poslední. Optotyp se promítal pomocí LCD monitoru s konstantním nastavením na rovinné zrcadlo, kdy celková vzdálenost mezi monitorem a probandem činila podle testovaného hodnoty vízu 12 nebo 6 metrů. Zrcadlo bylo využito proto, aby byla dodržena stanovená vyšetřovací vzdálenost při menší délce laboratoře, než je požadováno. Kvůli stranově převrácenému obrazu za použití rovinného zrcadla byl odpovídajícím způsobem převrácen i prezentovaný optotyp, viz obr. 15 a 16.

Před každým měřením bylo zkontrolováno nastavení monitoru. Samotné měření probíhalo nejdříve 30 min po zapnutí monitoru, kdy se jas jeho obrazovky dostatečně stabilizoval. Znaky Sloan letters (C, D, H, K, N, O, R, S, V, Z) byly představovány náhodně ve třech řadách po pěti znacích. Velikost znaků na každém řádku byla stejná. Rozdíl zrakové ostrosti mezi jednotlivými řádky činil $0,05 \log M\acute{U}R$.



Obr. 15: Příklad prezentovaného stranově převráceného optotypu s kontrastem 90 %
a separací 100 % šířky znaku.



Obr. 16: Příklad prezentovaného stranově převráceného optotypu s kontrastem 90 %
a separací 10 % šířky znaku.

Procedura

Délka jednoho vyšetření byla individuální, nejčastěji v rozmezí 30 až 40 minut. Během celého vyšetření proband četl optotypové znaky přes stenopeickou clonu o průměru 2,5 mm vloženou do pozorovacích brýlí. Měření probíhalo pouze na jednom (směrově dominantním) oku. Pro docílení konstantních světelných podmínek byl experiment prováděn výhradně za konstantního umělého osvětlení v laboratoři.

Jako první byly probandovi představeny jednotlivé optotypy s různými kontrasty a různými separacemi bez pozorovacích brýlí, aby věděl, jak bude měření probíhat. Po nasazení brýlí s okluzorem a stenopeickou clonou proběhlo zkušební měření zrakové ostrosti tak, aby byla odhadnuta její přibližná hodnota pro začátek měření.

Úkolem vyšetřovaného bylo přečíst prostřední řádek optotypu zleva doprava ve správném pořadí. Prostřední řádek tedy sloužil k hodnocení zrakové ostrosti vyjádřené v $\log M\acute{U}R$. Kromě kontrastu se na optotypech měnily i separace mezi jednotlivými písmeny. Separace nabývaly hodnot 100, 50, 20 a 10 % šířky znaku a byly prezentovány v náhodném pořadí. Vzdálenost mezi dvěma po sobě jdoucími řadami znaků se rovnala výšce menšího řádku.

Při zhoršeném rozlišování jednotlivých znaků byl proband nabádán k pokračování čtení i za cenu pouhého odhadování znaku. Proband tedy musel nahlásit všech 5 znaků v prostředním řádku. Jako první mu byl prezentován řádek o jeden výš, než byla odhadovaná zraková ostrost. Pokud udělal proband při čtení znaků 2 a méně chyb, řádek byl považován za přečtený a pokračoval na další (menší) řádek s odpovídající vyšší zrakovou ostrostí, při 3 a více chybách byl vyhodnocen jako nepřečtený a dál ve čtení nepokračoval. Chybné znaky na posledním přečteném řádku a na prvním nepřečteném byly zaznamenávány. Zraková ostrost pak byla určena metodou letter-by-letter scoring popsané v podkapitole 1.4.2.

V případě, že znaky byly příliš velké (u kontrastů 10 % a 5 %) a jejich vjem mohl být ovlivněn konturami monitoru, byla pozorovací vzdálenost zkrácena na 6 m (opět při pozorování přes zrcadlo), při zachování úhlových velikostí pozorovaných znaků.

Kalibrace monitoru

Nastavení monitoru bylo během celého měření stejné a odpovídalo nastavení při kalibraci. Cílem kalibrace bylo zjistit závislost kontrastu obrazce na monitoru oproti referenčnímu (bílému) obrazci na nastavené barevné hodnotě pixelů těchto obrazců, přičemž byly uvažovány pouze odstíny šedé. Pro nastavení barevné hodnoty pixelů byl využit obvyklý model založený na třech základních barvách – červená, zelená a modrá; příslušné barevné hodnoty těchto složek jsou po řadě označeny jako R , G , B a nabývají hodnot 0 (nepřítomnost základní barvy) až 255 (maximální hodnota základní barvy). Pro potřeby experimentu byly používány pouze bílá a odstíny šedé barvy, tedy byly jednotlivé barevné složky vždy nastaveny na stejnou hodnotu $I = R = G = B$.

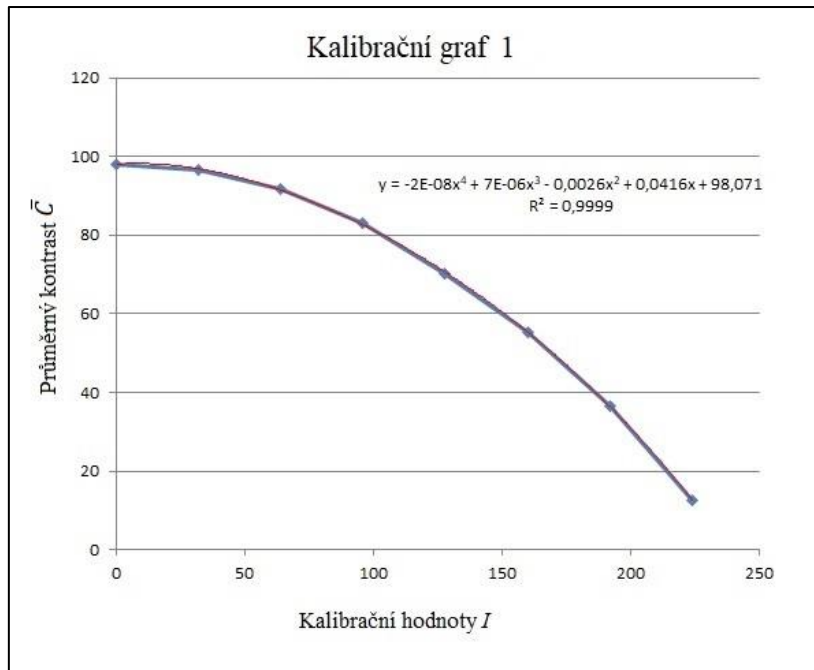
Pro účely kalibrace byly v centrální části monitoru postupně promítány jednolitě obdélníkové kalibrační obrazce s předem nastavenou hodnotou I stejnou ve všech pixelech obrazce. Celkem bylo promítáno 16 různých obrazců, přičemž příslušné (kalibrační) hodnoty I byly stanoveny na základě pilotních měření. Každý obrazec byl prezentován v náhodném pořadí. Celkem byly provedeny tři série měření, kterými byly získány pro každý obrazec tři hodnoty jasu (L_1 , L_2 , L_3) pomocí jasoměru LMT L1003. Pro každý změřený jas byl v i -té sérii stanoven odpovídající kontrast C_i obrazce oproti referenčnímu bílému obrazci ($I = 255$; $C_i = 0$). Použité hodnoty I a odpovídající naměřené jasy a příslušné kontrasty prezentuje tab. 1. Pro vytvoření kalibrační křivky byla využita průměrná hodnota \bar{C} kontrastu pro daný obrazec (resp. danou hodnotu I). Pomocí průměrných hodnot kontrastu a známých I byly vytvořeny dva kalibrační grafy (pro vysoké hodnoty I bylo nutné vytvořit samostatný graf), přičemž jednotlivými body grafu byla proložena hladká křivka metodou polynomické regrese (nejlépe vyhovoval polynom 4. stupně), viz obr. 17 a 18. Na základě této křivky byly stanoveny experimentální hodnoty I tak, aby bylo co nejpřesněji dosaženo požadovaných experimentálních hodnot kontrastu 90 %, 10 % a 5 %. Zjištěné hodnoty I pro jednotlivé požadované kontrasty jsou uvedeny v tab. 2. Přitom bílému pozadí ($I = 255$) odpovídal kontrast 0 a průměrný jas odpovídal hodnotě $227,7 \text{ cm} \cdot \text{m}^{-2}$.

Tab. 1: Nastavené hodnoty I pixelů a odpovídající naměřené jasy.

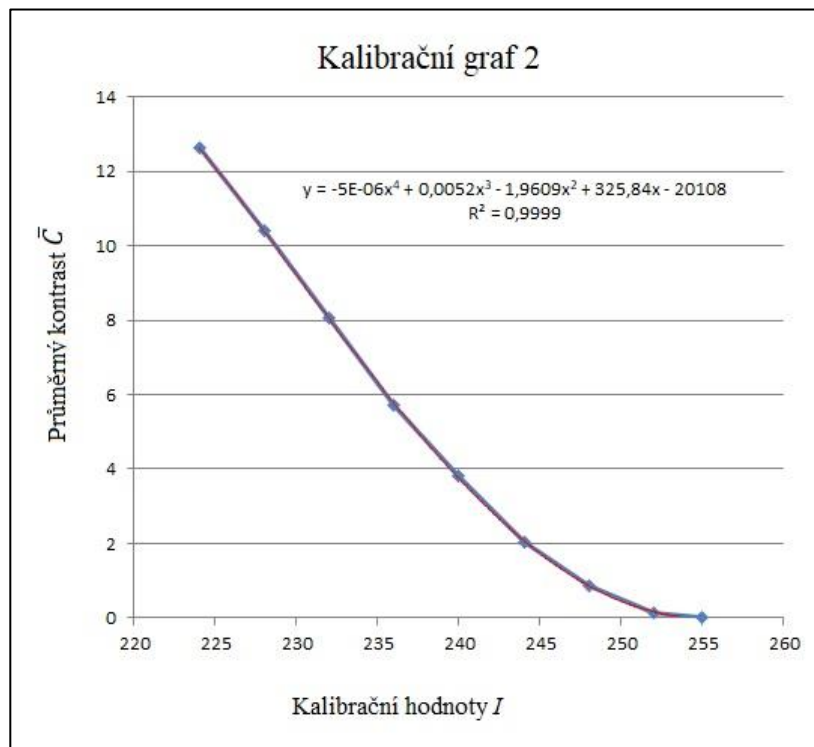
I	Jas L [$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$]			Kontrast v jednotlivých sériích			Průměrný kontrast \bar{C}
	L_1	L_2	L_3	C_1	C_2	C_3	
0	4,30	4,12	4,11	98,11	98,19	98,19	98,17
32	7,92	7,69	7,56	96,53	96,63	96,67	96,61
64	19,20	18,90	18,70	91,58	91,71	91,76	91,68
96	39,30	38,90	38,30	82,76	82,94	83,13	82,94
128	68,20	67,90	67,00	70,09	70,22	70,48	70,26
160	102,60	101,90	100,90	55,00	55,31	55,55	55,29
192	145,20	144,30	143,00	36,32	36,71	37,00	36,68
224	199,70	199,10	198,00	12,41	12,68	12,78	12,62
228	204,00	204,00	204,00	10,53	10,53	10,13	10,39
232	210,00	209,00	209,00	7,89	8,33	7,93	8,05
236	215,00	215,00	214,00	5,70	5,70	5,73	5,71
240	219,00	219,00	219,00	3,95	3,95	3,52	3,81
244	223,00	223,00	223,00	2,19	2,19	1,76	2,05
248	226,00	226,00	225,00	0,88	0,88	0,88	0,88
252	228,00	227,00	227,00	0,00	0,44	0,00	0,15
255	228,00	228,00	227,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. 2: Na základě kalibrace stanovené experimentální hodnoty I pro požadované hodnoty kontrastu C při bílém pozadí ($I = 255$, průměrný jas $227,6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$). Pro ověření tabulka také obsahuje hodnoty kontrastu C_v spočítané na základě následného přeměření jasu.

Požadovaný kontrast C [$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$]	Hodnota I $I=R=G=B$	Spočítaná hodnota C_v
90	70	90,2
10	229	9,2
5	237	4,8



Obr. 17: Kalibrační graf pro hodnoty $I = 0$ až $I = 225$.



Obr. 18: Detailnější kalibrační graf pro hodnoty $I = 225$ až $I = 255$.

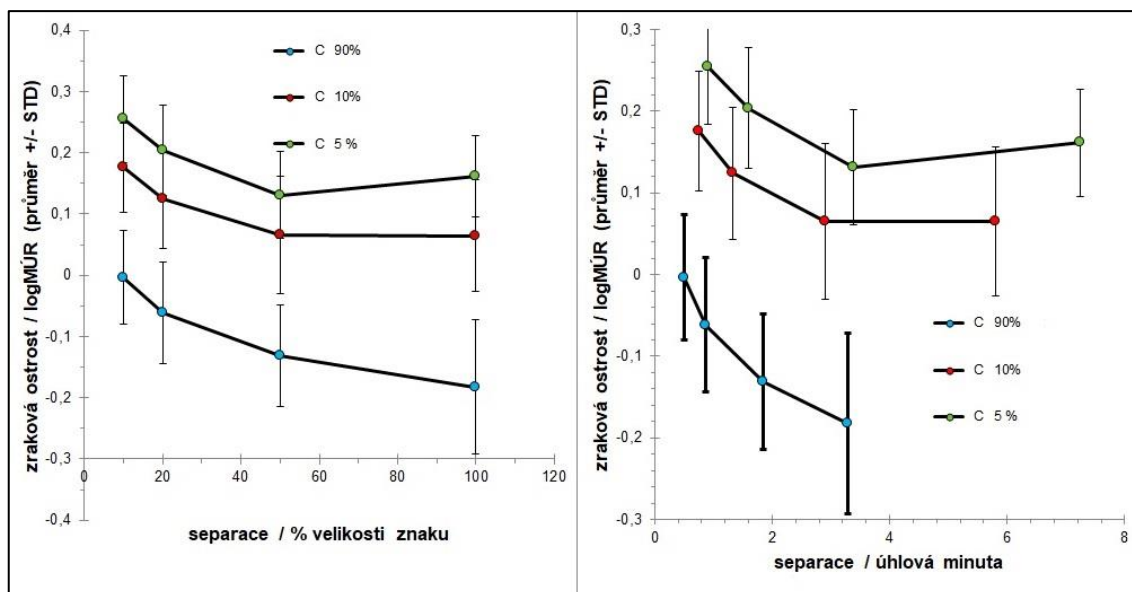
5.2 Výsledky

Zraková ostrost (v $\log MÚR$) měřená za různých kontrastních podmínek a různých separacích znaků byla analyzována pomocí statistické metody ANOVA na hladině významnosti $p = 5\%$. V textu jsou též uvedeny mezní hladiny významnosti p , při kterých by právě došlo k zamítnutí testované hypotézy.

S klesajícím kontrastem se zraková ostrost výrazně snižovala. Napříč všemi testovanými separacemi mezi znaky pro střední a nízký kontrast byla hodnota zrakové ostrosti průměrně o 0,2 a 0,3 $\log MÚR$ vyšší, než tomu bylo u průměrné zrakové ostrosti za vysokého kontrastu (tj. vízus byl u nižších kontrastů horší).

Naměřené hodnoty zrakové ostrosti v závislosti na testovaných separacích pro jednotlivé testované hodnoty kontrastu zachycují spolu s příslušnými směrodatnými odchylkami naměřených dat grafy na obr. 19. Separace je uvedena jak v % z velikosti znaku (levý panel), tak v odpovídající úhlové míře (pravý panel). Zatímco křivky odpovídající nižším hodnotám kontrastu mají téměř shodný průběh (jsou pouze vzájemně vertikálně posunuty), křivka popisující závislost $\log MÚR$ na separaci v % je mírně strmější. Tedy separace vyjádřená v % velikosti znaku má při vysokém kontrastu větší vliv na zrakovou ostrost (crowding je zde silnější a začíná se projevovat při nižších procentních separacích než u nižších kontrastů). Uvedené rozdíly korespondují s výsledky statistického testu, při kterém byl metodou ANOVA zjištěn významný vliv separace ($p < 0,0001$) a kontrastu ($p < 0,0001$). Též byla zjištěna signifikantní interakce separace a kontrastu ($p < 0,0001$), která odpovídá popsanému odlišnému průběhu křivek závislosti zrakové ostrosti na separaci v % šíře znaku.

Pokud ale bude pro grafické vyjádření závislosti zrakové ostrosti na separaci použita separace v úhlové míře, všechny křivky budou mít víceméně podobný průběh, pouze vertikálně posunutý (strmost jednotlivých křivek se s kontrastem sice mění, ale poměrně málo). Oblast separací, při kterých se crowding začíná projevovat, pak bude u všech kontrastů také přibližně stejná (mezi 2,5' a 3,5'). Výraznější zhoršení zrakové ostrosti oproti výchozí hodnotě u vysokého kontrastu je dáno tím, že nejmenší uvažovaná relativní separace 10 % odpovídá v tomto případě menší úhlové separaci než u nižších kontrastů. Tento průběh naopak svědčí o skutečnosti, že crowding efekt se s kontrastem znaků mění jen málo (je-li separace uvažována v absolutní úhlové míře).



Obr. 19: Grafické vyjádření výsledků.

5.3 Diskuze

Na základě statistické analýzy bylo zjištěno, že měřená zraková ostrost je signifikantně ovlivněna separací optotypových znaků, tj. byl pozorován crowding efekt. Při nižších separacích bylo dosaženo vyšších hodnot $\log MÚR$ (zraková ostrost byla horší). Dále lze z výsledků vyčíst, že změřená zraková ostrost s klesajícím kontrastem testovacích znaků dle předpokladu statisticky významně klesá. Rovněž byla prokázána statisticky významná interakce mezi separací a hodnotou kontrastu, tj. zraková ostrost se mění se separací jinak při různých hodnotách kontrastu. Konkrétně z grafů na obr. 19 vyplývá, že se zraková ostrost se separací zhoršuje více pro vysoké hodnoty kontrastu než pro nízké.

Pokud vyjádříme separaci v relativních jednotkách (v % velikosti znaku), pak se rozsah crowdingu pro jednotlivé kontrasty liší (mezi hodnotami 20 % a 50 % u nízkých kontrastů a mezi 50 % a 100 % u vysokého kontrastu). Avšak pokud v souladu se studií [10] přepočítáme separaci na úhlové jednotky, jeví se rozsah crowdingu téměř stejný pro všechny použité kontrasty, a to kolem 3'. K obdobným výsledkům došla i studie [10], ovšem v případě foveální konturové interakce. Ty poukazují na fakt, že s klesajícím kontrastem se zvětšovala úhlová velikost písmen,

a dále také naznačují, že rozsah a velikost foveální konturové interakce jsou při vysokém i nízkém kontrastu testovacích znaků přibližně stejné. Jak již bylo zmíněno výše, protože je konturová interakce součástí crowding efektu, předpokládalo se obdobné chování i u crowdingu.

Pokud byla separace vyjádřena v relativní míře (v % z velikosti znaku), byl zjištěn významný pokles crowdingu s poklesem kontrastu. Vzhledem k nastavení experimentu (kde byla pro každou uvažovanou hodnotu kontrastu aplikována stejná relativní míra separace), nebylo dosaženo za všech kontrastních podmínek stejné úhlové míry separace. Tedy při nižších kontrastech nebylo dosaženo úhlových separací, při kterých dosahuje crowding maximálních hodnot. To může být důvodem, proč v tomto experimentu byl pozorován větší pokles zrakové ostrosti za vyšších kontrastů než za nižších. Porovnáváme-li změny v naměřených hodnotách pro stejné úhlové separace (v absolutní míře v úhlových minutách), nedochází k tak výrazným změnám, což demonstruje obdobný průběh křivek na obr. 19 vpravo.

Z výše uvedeného se tedy jeví, že stejně jako foveální konturová interakce, tak i foveální crowding se objevují v určitém pevně daném prostoru bez ohledu na velikost použitých znaků. Velikost foveálního crowdingu na kontrastu použitých znaků (je-li u centrálních i periferního znaku stejný) je sice zřejmě závislá, ale jen velmi málo (oproti např. závislosti crowdingu na jasů) [6]. Je-li kontrast okolních znaků odlišný (centrální a obklopující znaky se liší v kontrastní polaritě), pak se magnituda i rozsah periferního crowding efektu dramaticky snižuje. Obdobný pokles byl pozorován i v případě, že se centrální a obklopující znaky lišily v intenzitě nebo tvaru. Odlišnost v barvě znaků má mnohem menší vliv, avšak u některých osob není zanedbatelná [39]. Naopak, z výsledků [6] vyplývá, že amplituda konturové interakce (a zřejmě i crowdingu) klesá s jasem, což odpovídá změnám ve struktuře receptivních polí. Změna kontrastu však nemá na receptivní pole vliv.

Uvedené výsledky podporují domněnku, že jak konturová interakce, tak crowding jsou minimálně z velké části vysvětlitelné na základě receptivních polí neuronů zrakové dráhy (viz oddíl 4.2.2). Vzhledem k mírné odlišnosti chování crowdingu a konturové interakce za různých kontrastů lze usuzovat na skutečnost, že ke crowdingu mohou přispívat i další efekty popsané v kapitole 4.

ZÁVĚR

V teoretické části se tato diplomová práce zabývá zrakovou ostrostí, jejím klinickým hodnocením a formou zápisu. Taktéž se věnuje kontrastu a kontrastní citlivosti, jež vedle zrakové ostrosti rovněž poskytuje cenné informace o kvalitě lidského vidění. Třetí kapitola stručně shrnuje stavbu sítnice a problematiku receptivních polí, neboť na jejich podstatě je alespoň z části možné vysvětlit mechanismus konturové interakce a potažmo i crowding efektu.

Crowding efekt a konturová interakce mají negativní vliv na rozlišování fixovaného znaku. V případě crowdingu se jedná o zhoršené rozlišení blízkce seskupených znaků, typicky např. u čtení písmen seřazených v řadě nebo nad sebou. U konturové interakce vyvolávají ztížené rozlišení znaku kontury, které znak obklopují. Typickým příkladem je Landoltův prstenec ohraničený čtyřmi úsečkami. Jak crowding, tak i konturovou interakci charakterizujeme pomocí jejich rozsahu a magnitudy. Ty jsou ovlivněny několika faktory, např. separací, excentricitou, jasem nebo kontrastem.

V praktické části této práce je představen experiment, jehož cílem bylo sledovat současný vliv kontrastu a separace znaků na měření zrakové ostrosti pomocí optotypu obvyklé konstrukce používaného v klinické praxi. Po vyhodnocení experimentálně naměřených dat byl prokázán pokles zrakové ostrosti s kontrastem. Dále ze získaných výsledků vyplývá, že se zraková ostrost mění se separací jinak při různých hodnotách kontrastu. Pro statistické zpracování dat byla separace vyjádřena dvěma způsoby. Pokud jsme vyjádřili separaci v relativních jednotkách (v % velikosti znaku), pak se rozsah crowdingu pro jednotlivé kontrasty lišil. Avšak při přepočítání velikosti separace na úhlové jednotky se jeví rozsah crowdingu téměř stejný pro všechny použité kontrasty, přesněji řečeno kolem 3'. Výsledky jsou obdobné jako u dříve provedené studie (Siderov, Waugh, Bedell, 2013), která byla ovšem provedena v případě foveální konturové interakce. Vzhledem k poznatku, že je konturová interakce součástí crowding efektu, předpokládá se obdobné chování i u crowdingu.

Velikost foveálního crowdingu na kontrastu použitých znaků tedy zřejmě závisí, avšak jen málo. S ohledem na výsledky experimentu a výsledky předchozích studií, provedený experiment podporuje domněnku, že jak konturovou interakci, tak crowding lze alespoň částečně vysvětlit na základě receptivních polí neuronů zrakové dráhy.

LITERATURA

- [1] BENJAMIN, J. W. *Borish's Clinical Refraction, second edition*. Philadelphia: Butterworth-Heinemann Elsevier, 2006. ISBN 978-0-7506-7524-6.
- [2] ROZSÍVAL, P. *Oční lékařství*. Vyd. 1. Praha: Karolinum, 2006, 373 s. ISBN 80-246-1213-5.
- [3] PELLI, D. G., BEX, P. *Measuring contrast sensitivity*. Elsevier, Vision Research 90, 2013. Strany 10–14. ISSN 0042-6989.
- [4] FLOM, M. C., WEYMOUTH, F. W., KAHNEMAN, D. *Visual Resolution and Contour Interaction*. Journal of the Optical Society of America, 1963, roč. 53, č. 9. Strany 1026-1032.
- [5] FLOM, M. C. *Contour interaction and the crowding effect*. In Problems in Optometry. Philadelphia: J. B. Lippincott Co., 1991, roč. 3, č. 2. Strany 237–257.
- [6] BEDELL H. E., SIDEROV J., WAUGH S. J., ZEMANOVÁ R., PLUHÁČEK F., MUSILOVÁ L. *Contour interaction for foveal acuity targets at different luminances*. Elsevier, Vision Research 89, 2013. Strany 90-95. ISSN 0042-6989.
- [7] WOLFORD, G., CHAMBERS, L. *Contour interaction as a function of retinal eccentricity*. Percept Psychophys, Perception & psychophysics, 1984 Nov;36(5). Strany 457–460. ISSN 0031-5117.
- [8] LIU L., *Dual oriented mechanisms in contour interaction*. Elsevier, Vision Research 41, 2001. Strany 853–858. ISSN 0042-6989.

- [9] BAILEY, I. L., LOVIE-KITCHIN, J. E. *Visual acuity testing. From laboratory to the clinic.* Elsevier, Vision Research 90, 2013. Strany 2–9. ISSN 0042-6989.
- [10] SIDEROV, J., WAUGH, S. J., BEDELL, H. E. *Foveal contour interaction for low contrast acuity targets.* Elsevier, Vision research 77, 2013. Strany 10–13. ISSN 0042-6989.
- [11] 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, roč. 19, č. 3. Strany 235-260. ISSN 1475-1313.
- [12] PASCAL, E., ABADI, R. V. *Contour Interaction in the Presence of Congenital Nystagmus.* Vision Research, 1995. Vol. 35, No. 12, strany 1785-1789. ISSN 0042-6989.
- [13] CARDAZONE, G. *The effects of crowding on letter identification.* Intel/Westinghouse Science Talent Search: 1998, 14 s.
- [14] HESS, R. F., DAKIN, S. C., KAPOOR, N. *The foveal crowding effect: physics or physiology?* Elsevier, Vision Research 40, 2000, strany 365–370. ISSN 0042-6989.
- [15] LEVI, D. M. *An essential bottleneck for object recognition: A mini-review.* Elsevier, Vision Research 48, 2008, strany 635–654. ISSN 0042-6989.
- [16] VYŠÍN I., ŘÍHA J. *Paprsková a vlnová optika.* 1. vydání, Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 123 stran. ISBN 978-80-244-3334-9.

[17] *University of Calgary: Testing for Contrast Sensitivity* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.ucalgary.ca/pip369/mod4/spatial/testingsensitivity>.

[18] PELLI, D. G., ROBSON, J. G., WILKINS, A. J. *The design of a new letter chart for measuring contrast sensitivity*. *Clinical Vision Sciences*, 2(3), 1988. Strany 187-199. Dostupné z: <http://www.psych.nyu.edu/pelli/pellirobson/>.

[19] TUNNACLIFFE, A. H. *Introduction to visual optics*. 4th ed. Godmersham Park: Association of British Dispensing Opticians, 1993. ISBN 0-9009-928-3.

[20] VENTRUBA, J. *Kontrastní citlivost, testování a příčiny jejího snížení*. Česká Oční Optika. Praha: EXPO DATA, 2008, 49(1/2008). ISSN 1211–233X.

[21] PLUHÁČEK, F. *Fyziologická optika – výukové materiály k předmětu Fyziologická optika*, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2012.

[22] ANTON, M. *Refrakční vady a jejich vyšetřovací metody*. Brno, Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1993, 108 stran. ISBN 80-7013-148-9.

[23] POLÁŠEK, J. *Technický sborník oční optiky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1974.

[24] KUCHYNKA, P. *Oční lékařství*. 1.vyd. Praha: Grada, 2007, [40], 768 s. ISBN 978-802-4711-638.

[25] NOVOTNÝ I., HRUŠKA M., *Biologie člověka pro gymnázia*. Praha: Fortuna, 2008. ISBN 978-80-7373-007-9.

[26] KVAPILÍKOVÁ, K. *Anatomie a embryologie oka: učební texty pro oční optiky a oční techniky, optometry a oftalmology*. 1. vyd. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví v Brně, 2000, 206 s. ISBN 80-7013-313-9.

[27] SYNEK, S., SKORKOVSKÁ Š. *Fyziologie oka a vidění*. 2., doplněné a přepracované vydání. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-802-4739-922.

[28] HUBEL, D. H. *The Visual Cortex of the Brain*. Scientific American, November 1963. Vol. 209. NO. 5, strany 54–63. ISSN 0036-8733.

[29] ŠIKL, R. *Zrakové vnímání*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 312 s. ISBN 978-80-247-3029-5.

[30] KANDEL E. R., SCHWARTZ J. H., JESSEL T. M. *Principles of Neural Science*. 4th Edition. New York: McGraw-Hill, 2000. ISBN 0-8385-7701-6.

[31] HUBEL, D. H. *Eye, Brain and Vision*. Scientific American Library, 1995. ISBN 978-0-7167-6009-2.

[32] VECTOR VISION. *Standardized Contrast Sensitivity Tests*. [online]. © 2004–2018 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <http://www.vectorvision.com/csv1000-contrast-sensitivity/>.

- [33] CHUNG, S. T. L., LEVI, D. M., LEGGE, G. E. *Spatial-frequency and contrast properties of crowding*. Elsevier, Vision Research 41, 2001, strany 1833–1850. ISSN 0042-6989.
- [34] STUART, J. A., BURIAN, H. M. *A study of separation difficulty*. American Journal of Ophthalmology 53, 1962, strany 471-477. ISSN 0002-9394.
- [35] KOTHE, A., REGAN, D. *The component of gaze selection/control in the development of visual acuity in children*. Optometry and Vision Science 67, 1990, strany 770-778. ISSN 1538-9235.
- [36] BURIAN, H. M. *Pathophysiologic basis of amblyopia and of its treatment*. American Journal of Ophthalmology 67, 1969, strany 1-12. ISSN 0002-9394.
- [37] FREEMAN, J., CHAKRAVARTHI, R., PELLI, D. G., *Substitution and pooling in crowding*. Attention, Perception, & Psychophysics 74, 2012, strany 379-396. ISSN 1943-3921.
- [38] CARKEET, A., BAILEY, I. L. *Slope of psychometric functions and termination rule analysis for low contrast acuity charts*. Ophthalmic & physiological optics 37(2), strany 118-127. ISSN 0275-5408.
- [39] KOOI, F. L., TOET, A., TRIPATHY, S. P., LEVI, D. M. *The effect of similarity and duration on spatial interaction in peripheral vision*. Spatial Vision 8(2), 1994, strany 255-279. ISSN 0169-1015.

[40] DANILOVA, M. V., BONDARKO, V. M. *Foveal contour interactions and crowding effects at the resolution limit of the visual system.* Journal of vision 7(2), 2007. ISSN 1534-7362.

[41] PELLI, D. G., PALOMERS, M., MAJAJ, N. J. *Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection.* Journal of Vision 4, 2004, strany 1136-1169 Journal of Vision (2004) 4, 1136-1169. ISSN 1534-7362.