

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO
V OLOUMOUCI

KATEDRA OPTIKY

Měření parametrů Panumova fúzního prostoru

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Anna Čechová

VEDOUCÍ PRÁCE:

Mgr. Miroslav Gavenda Ph.D.

Obor: R150136 OPTOMETRIE

Studijní rok: 2016/2017

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením
Mgr. Miroslava Gavendy, Ph.D., s pomocí odborného konzultanta
RNDr. Františka Pluháčka, Ph.D. a za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci:

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce panu Mgr. Miroslavu Gavendovi, Ph.D. za nadšení, ochotu, rady a trpělivost při vedení mé práci. Poděkování patří i panu RNDr. Františku Pluháčkovi, Ph.D. za ochotu při odborných konzultacích. Tato práce byla vytvořena za podpory projektu IGA PřF UP v Olomouci s názvem “Optometrie a její aplikace“, č. IGA_PrF_2017_003.

Obsah

<u>1. ÚVOD.....</u>	<u>5</u>
<u>2. TEORETICKÁ ČÁST</u>	<u>6</u>
2.1 SÍTNICE A ZRAKOVÁ DRÁHA	6
2.2 BINOKULÁRNÍ VIDĚNÍ.....	8
2.2.1 VNÍMÁNÍ SMĚRU	9
2.2.2 FÚZE	11
2.2.3 VNÍMÁNÍ HLOUBKY	12
2.3 HOROPTER.....	15
2.3.1 MĚŘENÍ HOROPTERU.....	17
2.4 PANUMŮV FÚZNÍ PROSTOR	20
2.4.1 MĚŘENÍ PANUMUOVA PROSTORU	21
<u>3. PRAKTICKÁ ČÁST</u>	<u>29</u>
3.1 SOUBOR VYŠETŘOVANÝCH OSOB	29
3.2 VSTUPNÍ VYŠETŘENÍ	30
3.3 TECHNIKA	31
3.4 POSTUP.....	32
3.5 POUŽITÉ STIMULY	34
3.6 METODA HODNOCENÍ.....	38
3.7 VÝSLEDKY	39
3.8 DISKUZE	51
3.9 ZÁVĚR.....	55
<u>4. POUŽITÁ LITERATURA.....</u>	<u>56</u>

1. Úvod

Tato práce se zabývá Panumovým prostorem. Panumův prostor byl objeven roku 1838 a pojmenován o 20 let později Peterem Ludvigem Panumem. Následně v 50. a 60. letech 20. století bylo téma Panumova prostoru velmi populární a jeho měřením se zabývala řada vědců např. P. L. Panum, D. Palmer, D. E. Mitchel, K. N. Ogle. V dnešní době se však mnoho vědců Panumovým prostorem nezabývá, ikdyž s rozvojem 3D technologie se naskytla nová metoda, kterou lze Panumův prostor měřit.

Teoretická část se věnuje tématům potřebným k pochopení problematiky Panumova prostoru. Zabývá se základními znalostmi týkajícími se sítnice, zrakové dráhy, binokulárního vidění, horopteru a Panumova prostoru. V binokulárním vidění je práce zaměřena na pojmy jako je vnímání směru, fúze a vnímání hloubky, a to hlavně stereopsí. Dále jsou zde popsány teorie horopteru a metody jeho měření. Panumově prostoru je věnována samostatná kapitola, která se zabývá definicí, historií a hlavně metodami, kterými by mohl být Panumův prostor měřen.

V rámci praktické části byl změřen horizontální Panumův prostor pomocí aktivní 3D technologie. Studie se zaměřuje na horizontální Panumův prostor a jeho změny se změnou fixační vzdálenosti a změny v úhlech. Předpokládanými výsledky jsou nárůst parametrů Panumova prostoru s nárůstem vzdálenosti fixačního bodu a rozšíření parametrů do periferie. Panumův prostor byl měřen ve třech vzdálenostech a v každé vzdálenosti ještě v pěti úhlech. V každé pozici byl měřen Panumův prostor v horizontální rovině (hloubka) a vertikální rovině (výška).

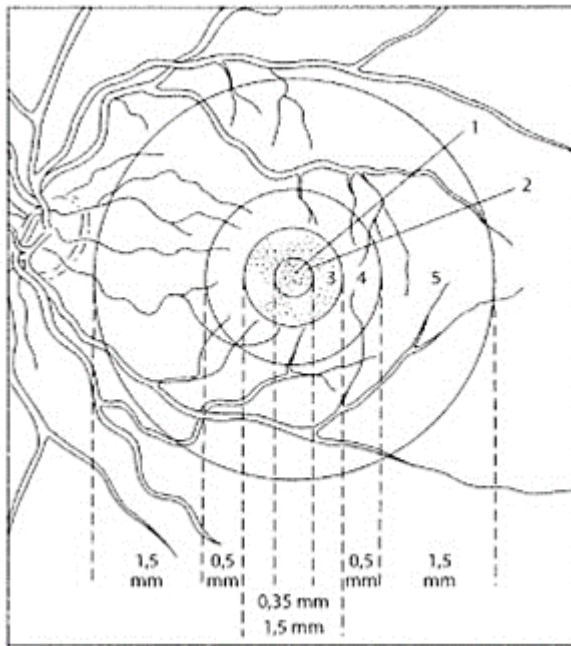
Hlavním cílem práce je objasnit chování a změřit parametry hloubky a výšky Panumova prostoru s narůstající vzdáleností fixačního bodu a s rostoucím úhlem do periferie horizontální roviny. Z naměřených dat je vypočítána hloubka a výška Panumova prostoru a pozice horopteru.

2. Teoretická část

V teoretické části jsou probírány témata jako sítnice, zraková dráha, binokulární vidění, fúze, vnímání směru, vnímání hloubky, stereopse, horopter, měření horopteru, Panumův prostor a měření Panumova prostoru.

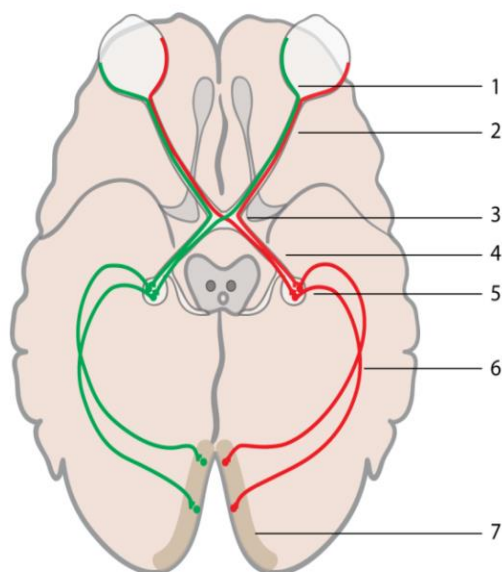
2.1 Sítnice a zraková dráha

Sítnice je vnitřní vrstva oka, která se začíná vytvářet ve 4. týdnu života plodu z vychlípeniny mozkové tkáně. S mozkem je spojena pomocí zrakové dráhy. Sítnice je obklopena cévnatkou a sklivcem. Optická část sítnice (*pars optica retinae*) je silnější a je tvořena deseti vrstvami. V periférii přechází v slepou část sítnice (*pars caeca retinae*), která není schopna vytvářet zrakový vjem, neboť neobsahuje žádné světločivé elementy a nervy. Slepou část sítnice tvoří pouze dvě vrstvy. Slepá část sítnice se táhne od zubaté linie (*ora serrata*) až na zadní část duhovky. Optická část obsahuje velký počet světločivých elementů (tyčinek a čípků), jejichž podrážděním vznikne impuls vytvářející zrakový vjem. Čípky jsou lokalizovány převážně v zadním pólu oka a nejvíce se jich nachází ve žluté skvrně (*macula lutea*), které se také říká místo nejostřejšího vidění. Čípky nám umožňují vidění ve dne a vnímání barev. Směrem k periférii čípků ubývá a přibývá tyčinek. Tyčinek je přibližně 19 krát více než čípků a umožňují nám vidění za tmy a šera a též černobílé vidění. Oblast žluté skvrny rozdělujeme dále na umbo, foveola, fovea, parafovea a perifovea (Obr. 1). Umbo je střed makuly a nachází se v ní 300 000 čípků na mm² a žádné tyčinky. Umbo je obklopeno foveolou, která obsahuje velké množství čípků. Fovea je avaskulární deprese sítnice a obsahuje 200 000 čípků na mm². Do periferie rychle klesá hustota čípků a roste hustota tyčinek. Ve 20° se na sítnici nachází oblast největší koncentrace tyčinek s hustotou 160 000 tyčinek na mm². Hustota tyčinek do periferie rychle klesá. Na snímcích očního pozadí vidíme zrakový terč jako nažloutlou skvrnu, odkud vchází a vychází cévy a nervy oka. Tmavší skvrna nacházející se na očním pozadí se nazývá žlutá skvrna. [1, 2, 3]



Obr. 1 – Macula lutea – 1- umbo, 2- foveola, 3- fovea, 4- parafovea, 5- perifovea [25]

Vjem detekovaný světločivými elementy se pomocí zrakových vláken vedoucích zrakovou drahou dostává až do korového centra, kde je vjem zpracován (obr. 2). Zraková vlákna ze světločivých elementů se sbíhají po povrchu sítnice do zrakového terče, který nazýváme také slepou skvrnou. Pomocí optického nervu se zraková vlákna dostávají mimo oční. Tato vlákna jsou vedena přes chiasma, kde se 67 % nervů, hlavně z nazálních polovin sítnic kříží, na rozdíl od temporálních. Z chiasmatu temporální a nazální nervová vlákna pokračují zrakovými drahami do corpus geniculatum laterale a optickou radiací přímo do korových center v mozku. [1, 2, 3]



Obr. 2 - Zraková dráha- 1- sítnice, 2- zrakový nerv, 3- chiasma opticum, 4- zraková dráha, 5- corpus geniculatum laterale, 6- optická radiace, 7- korové centrum mozku [1]

2.2 Binokulární vidění

Úkolem binokulárního vidění je vytvořit jednoduchý prostorový vjem za pomoci koordinace obou očí. Správná funkce binokulárního vidění závisí na anatomii, motorickém a senzorickém systému. Anomálie v anatomii a systémech znamená narušení nebo ztrátu binokulárního vidění. Anatomie optických prostředí zajišťuje dopad obrazu na sítnici. Motorický systém se stará o pohyby očí, které směřují obraz do fovey. Senzorickou část tvoří nervové spojení sítnice a korových center, které zajišťují převod zrakového vjemu. [4, 5, 6, 7]

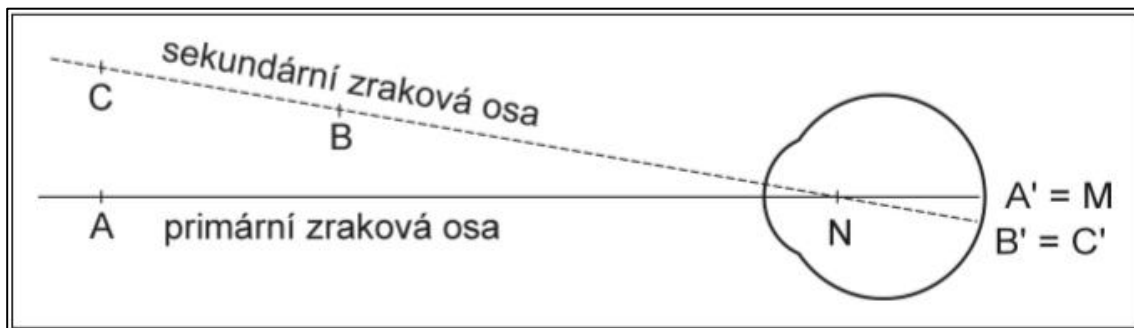
Kvalitu a vývoj binokulárního vidění můžeme rozdělit do 3 složek: simultánní vidění, fúze a stereopse. Simultánní vidění je nejjednodušší složkou binokulárního vidění, jedná se o schopnost současného vidění a superpozice makulárních obrazů. Fúze je schopnost oka superpozice skoro stejných sítnicových obrazů pravého a levého oka do jednoho obrazu. Nejvyšší složkou binokulárního vidění je stereopse, kdy dokážeme spojit dva obrazy s nepatrnými rozdíly, díky nimž vnímáme obraz prostorově. Výhodami binokulárního vidění je větší zorné pole, stereopse, binokulární sumace (zlepšení vizuálních vlastností při pohledu oběma očima), lepší prostorové vnímání a koordinace. [4, 5, 6, 7]

2.2.1 Vnímání směru

Pozice hlavy, očí a vnějšího předmětu napomáhá zraku lokalizovat předmět v prostoru. Vnímání směru nám umožňuje určit pozici vnějších podnětů v dvojdimenzionálním prostoru, který vnímáme zrakem, ale i hmatem a sluchem. [6]

Monokulární vnímání směru

Monokulární vnímání směru předmětu posuzujeme dle vzájemné vzdálenosti obrazu předmětu a fovey na sítnici. Linie spojující fixační bod a foveu se nazývá primární zraková osa, která má směrovou hodnotu přímo vpřed neboli nulovou. Pro lokalizaci předmětů v prostoru vytvoříme linii spojující daný bod, uzlový bod a bod na sítnici, kterou nazýváme sekundární zrakovou osou se směrovou hodnotou vpravo či vlevo. Tyto osy vytváří úhel popisující předmět v prostoru. Tomuto typu lokalizace říkáme okulocentrická (Obr. 3). Přesnost lokalizace závisí na počtu receptorů v daném místě sítnice, na kterou dopadá obraz. Při monokulárním vnímání směru se pohybujeme v dvojdimenzionálním prostoru. [4, 6, 7]

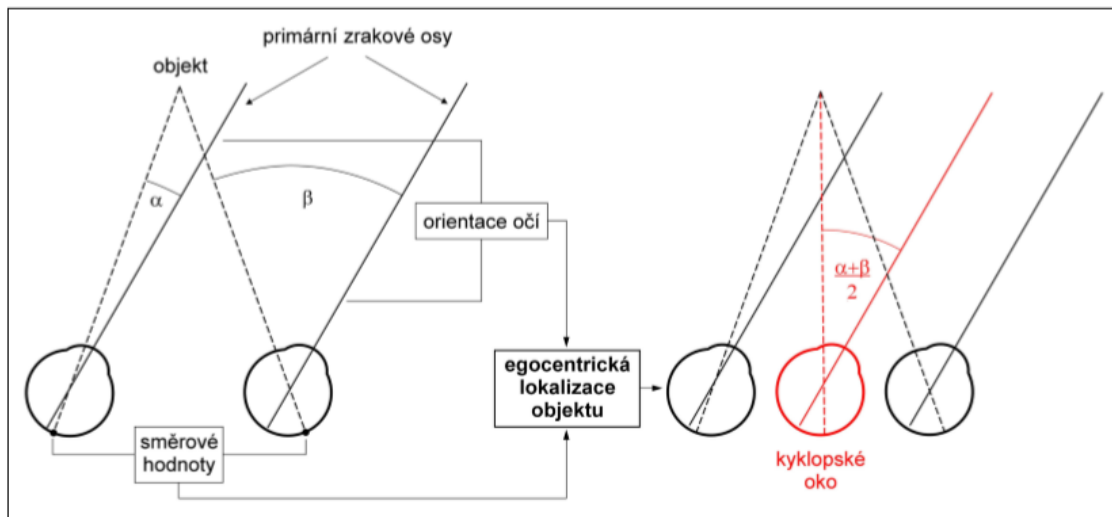


Obr. 3 - Okulocentrická lokalizace [4]

Binokulární vnímání směru

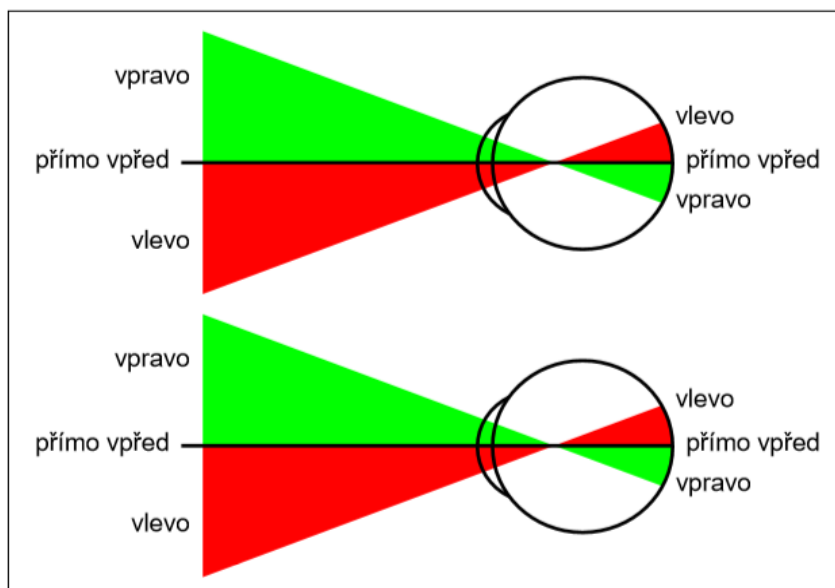
Binokulární vnímání směru vnějších předmětů posuzujeme dle jejich polohy vůči oběma očím. Utvoříme-li přímku vedoucí z fixovaného bodu kolmou na spojnici středů otáčení levého a pravého oka při pohledu přímo vpřed, přímka povede středem mezi oběma očima. Přímka v tomto případě prochází imaginárním kyklopským okem. Směr předmětu se vztahuje vždy ke směru kyklopského oka. Pokud osy obou očí svírají stejný

úhel, je obraz lokalizován na přímce kyklopského oka, jedná se o lokalizaci v egocentru. Této formě binokulární lokalizace říkáme egocentrická lokalizace (Obr. 4). V rámci egocentrické lokalizace se ptáme, kde se nachází předmět vůči mně. Při binokulárním vnímání směru se pohybujeme v trojdimenzionálním prostoru. [4, 6, 7]



Obr. 4 - Egocentrická lokalizace [4]

Body na sítnici se stejnou okulocentrickou lokalizací se nazývají korespondující body sítnice. Nejznámějšími korespondujícími body s nulovou směrovou hodnotou jsou fovey pravého a levého oka (Obr. 5). Ostatní body s různou okulocentrickou lokalizací nazýváme disparátní body sítnice. [4, 6, 7]



Obr. 5 - Směrová hodnota [4]

2.2.2 Fúze

Fúze vytváří jednoduchý obraz spojením sítnicových obrazů levého a pravého oka. Fúzi můžeme rozdělit do dvou kategorií dle systému, který se na ní podílí. Na fúzi se podílí oční svaly (motorická fúze) a korová centra (senzorická fúze). [4, 5, 6, 7]

Motorická fúze

Úkolem motorické fúze je po změně pohledu koordinovaně, s pomocí přímých a šikmých očních svalů, zobrazit obraz fixovaného předmětu do fovey. V případě odchylky dochází k dopadu pozorovaného obrazu mimo foveu na jednom nebo obou očích. Odchylka v motorické fúzi způsobí disparitu, která může, ale také nemusí být vnímána. Disparita netolerovaná vergenčním systémem způsobí rozdělení obrazu (diplopii). Na stabilní odchylku ve vergenčním systému může vzniknout adaptace a tak nemusí dojít k rušivé diplopii. Za správnou fixaci odpovídají oční svaly a nervy, které jim dodávají impuls. Oční pohyby obstarávají čtyři přímé svaly a dva šikmé. Horizontální a vertikální pohyby očí jsou obstarány přímými svaly. Pohyb očí nazálně obstarává vnitřní přímý sval (*musculus rectus medialis*), pohyb temporálně zevní přímý sval (*musculus rectus lateralis*), pohyb nahoru horní přímý sval (*musculus rectus superior*) a pohyb dolů dolní přímý sval (*musculus rectus inferior*). Šikmé svaly obstarávají torzní pohyby oka. Funkcí horního

šikmého svalu je intorze a dolního šikmého svalu extorze. Oční svaly inervuje nervus oculomotorius, nervus abducens a nervus trochlearis. Nervus oculomotorius inervuje vnitřní, dolní a horní přímý sval a dolní šikmý sval. Nervus abducens inervuje zevní přímý sval a nervus trochlearis inervuje horní šikmý sval. [2, 4, 6, 7, 8, 9]

Senzorická fúze

Senzorická fúze zpracovává obraz dopadající na světločivé elementy sítnice v korových centrech. Její hlavní funkcí je spojení dvou obrazů do jednoho vjemu a vytvoření prostorového vjemu. Dochází ke spojení obrazů přesně se překrývajících, ale i mírně rozposunutých. Vytvořením prostorového vjemu získáme údaje o vzájemné pozici předmětů a tedy potřebné informace k jejich lokalizaci v prostoru. [6, 7, 8]

Obraz dopadající na korespondující body sítnice je zobrazen jednoduše. V případě dopadu obrazu na disparátní body sítnic může dojít k diplopii, neboli k dvojitému vidění. V případě malé disparity obrazů jsou fúzním systémem spojeny do jednoho vjemu. Pro dokonalou fúzi obrazů je potřeba, aby byly obrazy stejně ostré, měly stejnou svítivost, stejnou velikost a barvu. Jinak může dojít k střídavé supresi (rivalita), ke kombinaci vjemů levého a pravého oka nebo k diplopii. K těmto jevům dochází při heterotropii, heteroforii, anizometropii a anizeikonii způsobenou korekcí. Centrální část sítnice je k disparitám méně tolerantní než periferie. [6, 7, 8, 10]

2.2.3 Vnímání hloubky

Vnímání hloubky nám napomáhá posoudit polohu předmětu vůči poloze jiného předmětu v prostoru, a tak napomáhá k jeho správné lokalizaci. Vnímání hloubky je možno monokulárně i binokulárně. Monokulární vnímání hloubky je postaveno na zkušenostech. Binokulární vnímání hloubky je založeno na stereopsi. [4, 5, 6,7]

Monokulární vnímání hloubky

Monokulární vnímání hloubky je získáno na základě zkušeností. Vzdálenost objektů posuzujeme monokulárně dle velikosti objektů, překrytí, geometrické a vzdušné

perspektivy, stínu, pohybové paralaxy a kinetických hloubkových efektů. Objekty větší, překrývající jiný objekt či vrhající stín na další objekt, jsou vnímány blíže. Vzdalující se rovnoběžné linie se sbíhají (např. fotky vysokých budov, koleje). Objekty níže nad obzorem jsou vnímány dál než objekty položené výše. Vzdálenost objektů je možné vnímat i dle jejich vzájemného pohybu, neboť vzdálenější objekty se pohybují pomaleji než předměty blíže k pozorovateli. Jistou informací o hloubce vjemu nám dává i míra zapojené akomodace, a tedy i míra nervového impulsu. Vnímání vzdálenosti ovlivňuje i barva předmětu. Červené předměty se zdají být blíže než předměty modré a zelené. Tento jev se vysvětluje pomocí chromatické axiální aberace, kdy různé vlnové délky (barvy) jsou fokusovány do různých vzdáleností na ose. Odhad vzdálenosti se zhoršuje při menších kontrastech, jako třeba v mlze a při méně jasných barvách. [4, 6, 9, 11]

Binokulární vnímání hloubky, stereopse

Vnímat blízké předměty ostře a jednoduše nám umožňuje takzvaná triáda do blízka, která se skládá z akomodace, konvergence a miózy. Konvergence je schopnost očních os se stočit a fixovat blízký předmět. Míra konvergence nám dává určité informace o pozici předmětu. S konvergencí a akomodací je spojená i mikropsie, což znamená vnímání předmětů menších a bližších, než jsou ve skutečnosti. Temporální disparita způsobí chybné vnímání pohybu kyvadla při oddělení vjemu pravého a levého oka. Lineární pohyb je vnímán jako elipsovité nebo kruhový. [6]

Stereopse je založena na spojení dvou vůči sobě rozposunutých obrazů do jednoho prostorového obrazu. Pokud obraz dopadá na temporální části sítnic, hloubka roste. Zatímco při dopadu na nazální části sítnic hloubka vjemu klesá. Při ztrátě obrazu jednoho oka, tato vlastnost zaniká. Při stereopsi jsou spojeny dva obrazy, kdy jeden leží na horopteru a druhý leží před či za horopterem, avšak v rozmezí Panumova prostoru nebo v jeho blízkosti. Z tohoto vyplývá, že prostorově není viděn fixovaný bod. Práh citlivosti stereopse je u horopteru nejmenší, ale přesnost vnímání hloubky je u horopteru nejvyšší. Správné vnímání hloubky se zlepšuje s prodlužující se dobou fixace pohledu. Stereopse mírně přesahuje Panumův prostor. Mimo Panumův prostor je obraz viděn dvojité, ale stále lze vnímat jeho polohu. Hlouběji v prostoru nelze prostorový vjem přesně lokalizovat. Nedokážeme rozpoznat, zda je před či za fixovaným bodem. Dál v prostoru jsou předměty vidět pouze dvojité. [6, 10]

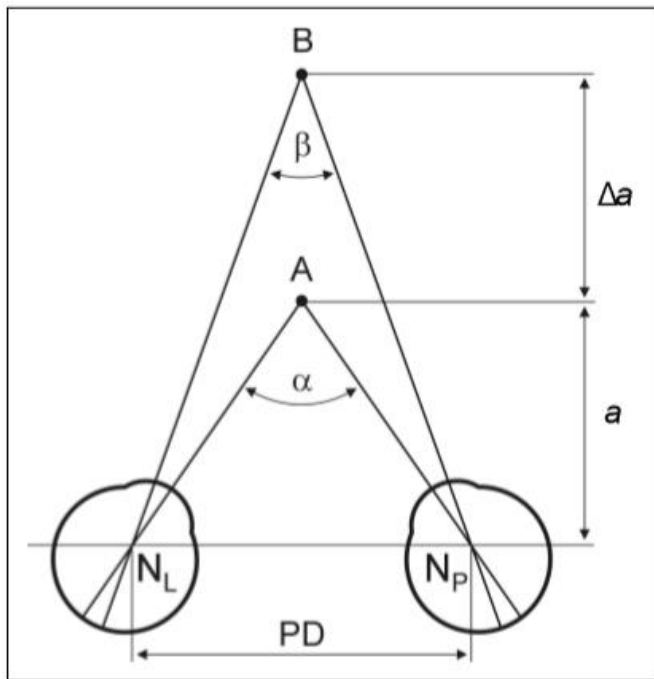
Stereopsi můžeme rozdělit do dvou skupin dle míry disparity na jemnou a hrubou stereopsi, které jsou závislé na uskupení světločivých elementů na sítnici. Jemná stereopse odpovídá za obrazy dopadající do fovey a za obrazy rozposunuté do 30'. Současně zodpovídá za stacionární, pomalu se pohybující a složité prostorové předměty. Jemná stereopse dominuje ve foveálním vidění, podporuje vysokou stereoskopickou ostrost a spojuje obrazy o stejném tvaru a velikosti. Hrubá stereopse zobrazuje nesložité prostorové obrazy, s disparitou od 30' do 10°, rychle se pohybující a blikající předměty. Hrubá stereopse se týká především periferie sítnice. Spojuje obrazy stejných i rozdílných tvarů. Ztráta hrubé stereopse nebývá zjištěna základními binokulárními testy. Anomálie v binokulárním systému jsou většinou spojeny s jemnou stereopsí. [6, 11]

Stereopse dokáže ze dvou obrazů, které nejsou vnímány prostorově, udělat prostorový vjem. Podle tohoto můžeme také rozdělit stereopsi na lokální a globální. V případě lokální stereopse je již v samotném monokulárním vjemu vodítko k odhalení jeho prostorové orientace. Tím může být například náznak pohybu, barva nebo kontura. Zatímco globální stereopse spojuje obrazy, které nemají žádné monokulární vodítko. Takto rozdělujeme i testy na stereopsi, kdy vhodnější pro vyšetření jsou samozřejmě testy postavené na principu globální stereopse. Dají se však použít pouze u lidí s funkční jemnou i hrubou stereopsí. [6, 7, 11]

Stereopse nám umožňuje lepší lokaci předmětů a detekci blížících se předmětů. Pomáhá nám při pohybu přeplněnými ulicemi vyhnout se jdoucím chodcům a rozpoznat předmět v chaotickém terénu. [6]

Stereoskopický práh je minimální úhel, pod kterým ještě vidíme obraz prostorově. Stereoskopický práh můžeme vyjádřit pomocí stereoskopické paralaxy (Obr. 6). Stereoskopickou paralaxu můžeme vyjádřit jako rozdíl dvou pozorovacích úhlů.

$$\gamma = \alpha - \beta$$



Obr. 6 - Stereoskopická paralaxa [4]

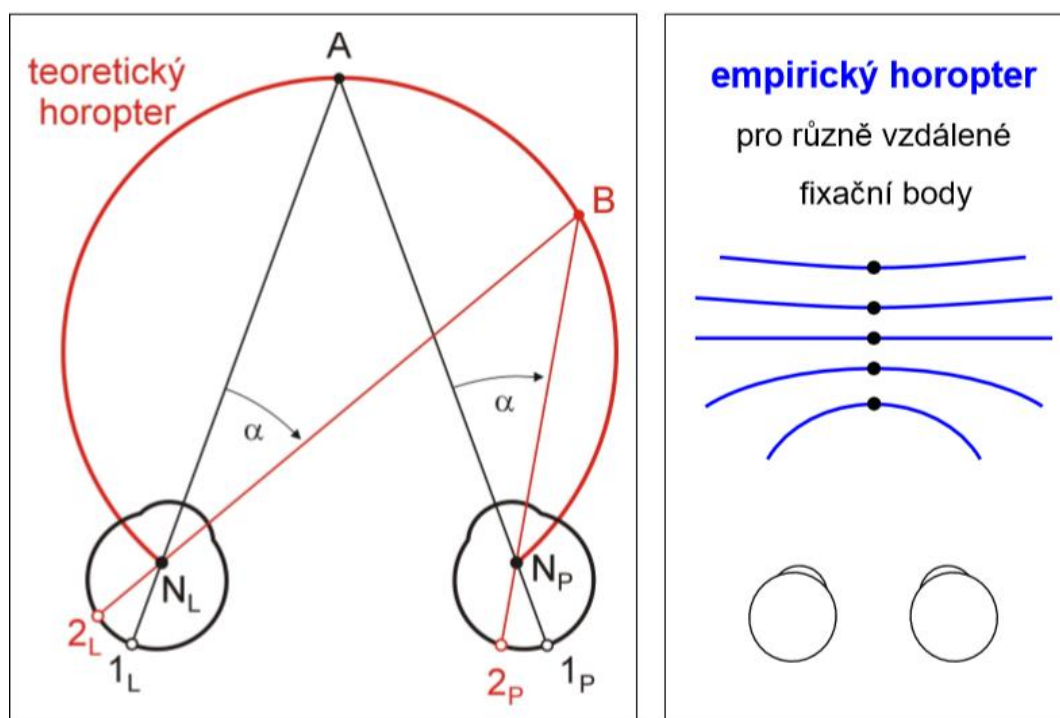
Pokud je stereoskopický úhel příliš malý, nevznikne prostorový vjem, neboť předmět leží na horopteru nebo v jeho blízkosti. K prostorovému vjemu však nedochází, ani když je stereoskopický úhel příliš velký. U stereoskopických testů se udává mezní hodnota $60''$. Stereoskopický práh není stejný jako práh fúze. Fúze je limitována Panumovým prostorem, zatímco stereopse Panumův prostor přesahuje. [4, 7]

2.3 Horopter

Horopter je složený z latinských slov *horos* – hranice a *optér* – pozorovatel. Základními typy horopteru je teoretický (geometrický) a empirický horopter. První zmínka o horopteru pochází z 11. století a zmiňuje se o něm arabský vědec Ibn al-Haytham, v západním světě známý pod jménem Alhazen. Horopter byl pojmenován až v roce 1613 vědcem Franciusem Aguloniusem. Horopter byl poprvé definován jako prostor, kde se obraz zobrazí jednoduše. Gerhard Vieth a Johannes Müller přišli s myšlenkou, že horopter se skládá z bodů v prostoru, které jsou viděny pod stejným úhlem levého a pravého oka a vytvořili tak teoretický neboli geometrický horopter. Následným měřením byla hypotéza o teoretickém horopteru vyvrácena. Poslední definicí horopteru je, že se skládá z množiny bodů obrazů dopadajících na korespondující body

sítnice a vytvářející jednoduchý obraz. Horopterová linie se mění s pohybem oka. [6, 9, 12, 13]

Teoretický horopter neboli Vieth-Müllerův horopter tvoří Vieth-Müllerovu horopterovou kružnici (VMC; Obr. 7), která prochází fixačním bodem a uzlovými body obou očí. Obraz dopadající na VMC dopadá na korespondující body sítnic (na Obr. 7 jsou to body A i B) a je viděn jednoduše. S touto myšlenkou přišel nejdříve Gerhard Vieth a o pár let později tuto myšlenku podpořil i Johannes Müller. Předpokladem teoretického horopteru je, že při pohybu do stran dopadá obraz ve stejných úhlech na korespondující body sítnic pravého a levého oka. Ukázalo se, že obraz mimo pohled přímo vpřed na kružnici horopteru se zobrazí dvojité. Důvodem je chybný předpoklad, že sítnice je izomorfní a tvoří dokonalou polokouli. Teoretický horopter není omezen pouze na horizontální rovinu, ale nachází se i v rovině vertikální. Vertikální část horopteru je opět podmíněna stejným úhlem pohledu obou očí a nazýváme ji Prévost-Buckhardova linie. Pokud je fixace očí symetrická, prochází Prévost-Buckhardova linie fixačním bodem. V případě, že linie fixačním bodem neprochází, jedná se o asymetrickou fixaci a fixační bod se nachází mimo pohled přímo vpřed. Teoretický horopter je založen na geometrické optice. [6, 10, 12, 13]



Obr. 7 - Teoretický horopter - Vieth-Müllerova horopterová kružnice - VMC (vlevo) a Empirický horopter (vpravo) [4]

U empirického horopteru se již počítá s nedokonalostmi kulového tvaru sítnice (asféricita a asymetrie sítnic, optická distorze, fixační disparita; Obr. 7). Empirický horopter je mnohem plošší a širší než horopter teoretický. Tvar horizontálního horopteru se mění dle vzdálenosti fixovaného bodu. V takzvané „abathic“ vzdálenosti je křivka rovinná, tato vzdálenost je různá a její pozice je mezi 1-6 metry. Při fixaci bližšího předmětu získává křivka horopteru konkávní tvar. Při větších vzdálenostech získává konvexní tvar. Míra zakřivení závisí na vzdálenosti fixovaného bodu od „abathic“ vzdálenosti, čím větší vzdálenost, tím větší zakřivení. [6, 9, 10]

Karl Ewald Konstantin Hering a Hermann von Helmholtz došli k podobným závěrům o vzhledu horopteru, ale každý na základě různých matematických postupů a předpokladů. Jejich teorie tvrdí, že při paralelitě očních os je horopter plocha pokrývající celý prostor za blízkou vzdáleností. Blízkou vzdáleností se myslí vzdálenost, na kterou již oční osy konvergují. V blízké vzdálenosti je horopter tvořen již VMC a vertikálním horopterem procházejícím fixačním bodem. Obě tyto teorie se prokázaly jako chybné. [14]

Hillebrand následně kritizuje teorie týkající VMC. Neboť VMC nepočítá s fyziologií oka, ale je postaven pouze na matematické konstrukci. Rozdíl mezi tvarem VMC a empirickým horopterem nazýváme jako Hering-Hillebrandovu odchylku. Tato odchylka je měřena v horizontálním prostoru horopteru. Kladná hodnota svědčí o menším zakřivení empirického horopteru vůči VMC, zatímco záporná hodnota ukazuje na větší zakřivení empirického horopteru než VMC. [6, 14]

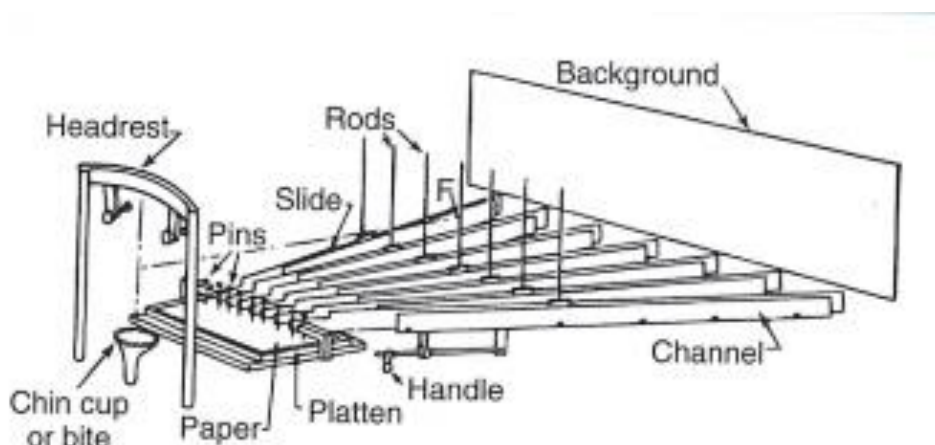
2.3.1 Měření horopteru

Pro měření horopteru jsou použity vertikální válce. Válec umístěný ve středu ve směru přímo vpřed při binokulárním pozorování je použit jako fixační. Ostatní válce jsou v různých vzdálenostech od fixačního válce a dá se s nimi pohybovat pouze vpřed a vzad. [6]

Měření fronto-paralelního horopteru

Prostorové vnímání je založeno na dopadu obrazu na disparátní body sítnic. Zatímco horopter je založen na dopadu na korespondující body sítnic, kde nedochází ke vzniku prostorového vjemu. Horopter tedy můžeme měřit na principu plochého vnímání obrazu. Úkolem subjektu bude zarovnat vertikální válce do objektivního fronto-paralelního horopteru, který je paralelní s rovinou obličeje. Subjekt v prostoru bude vnímat válce jako zarovnané do roviny, ale válce mohou být reálně od roviny odchýlené do konvexní či konkávní křivky. V tomto případě subjekt nezarovnal vertikální válce do objektivního fronto-paralelního horopteru, ale do zdánlivého fronto-paralelního horopteru, který je založen na subjektivním vnímání. [6, 9]

Ogle zkonstruoval aparát pro měření fronto-paralelního horopteru a pomocí něho měřil parametry horopteru. Experiment byl zkonstruován pomocí 13 vertikálních válců. Měřeno bylo ve vzdálenostech 20, 40 a 75 cm. Válcí bylo možné pohybovat od a k pozorovateli (Obr. 8). [6, 9]



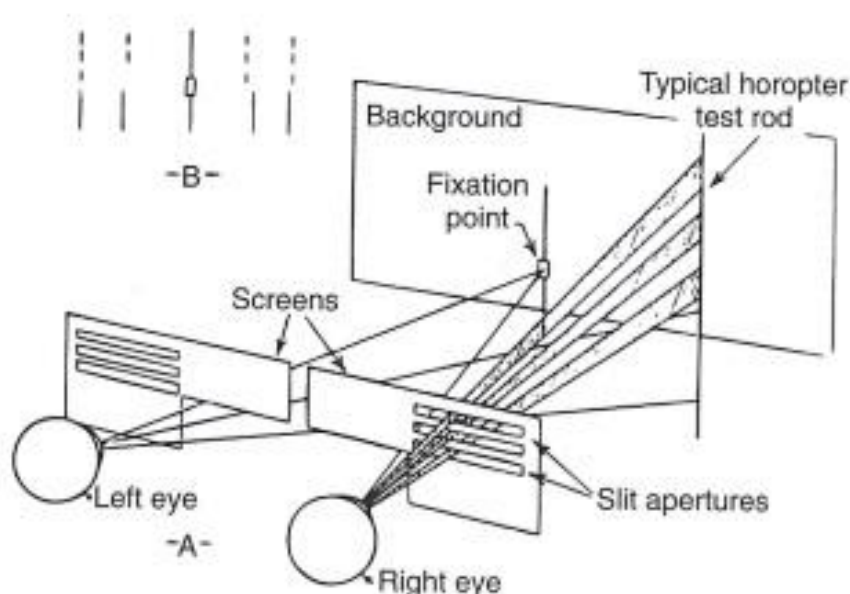
Obr. 8 - Přístroj pro měření frontoparalelního horopteru [9]

Měření horopteru na základě stejné směrové hodnoty

Přesnější metodou je měření horopteru na základě stejného směru pohledu. Fixační válec zůstává fixován na místě. Pohyblivé válce v periferii jsou rozděleny fyzicky nebo pomocí polarizačních filtrů na horní a dolní polovinu a každá polovina je vnímána jiným

okem. Subjekt pohybuje periferními válci od sebe a k sobě tak, aby horní a dolní část válce a sebe navazovala. U tohoto experimentu je důležité, aby válce byly úzké. [6]

Ogle tento aparát zkonstruoval, kdy části válců byly fyzicky zakryty překážkou. Při měření byla zakrytá horní nazální a dolní temporální část zorného pole. Horní temporální část byla tvořena horizontální štěrbinami. Každý válec byl pohyblivý dopředu a dozadu. V okamžiku kdy horní a dolní části válce na sebe navazovaly, byl válec umístěn do místa, kde se nacházel horopter. Tento aparát byl také použit Pedrem Nunesem pro měření horopteru (Obr. 9). [9, 10]



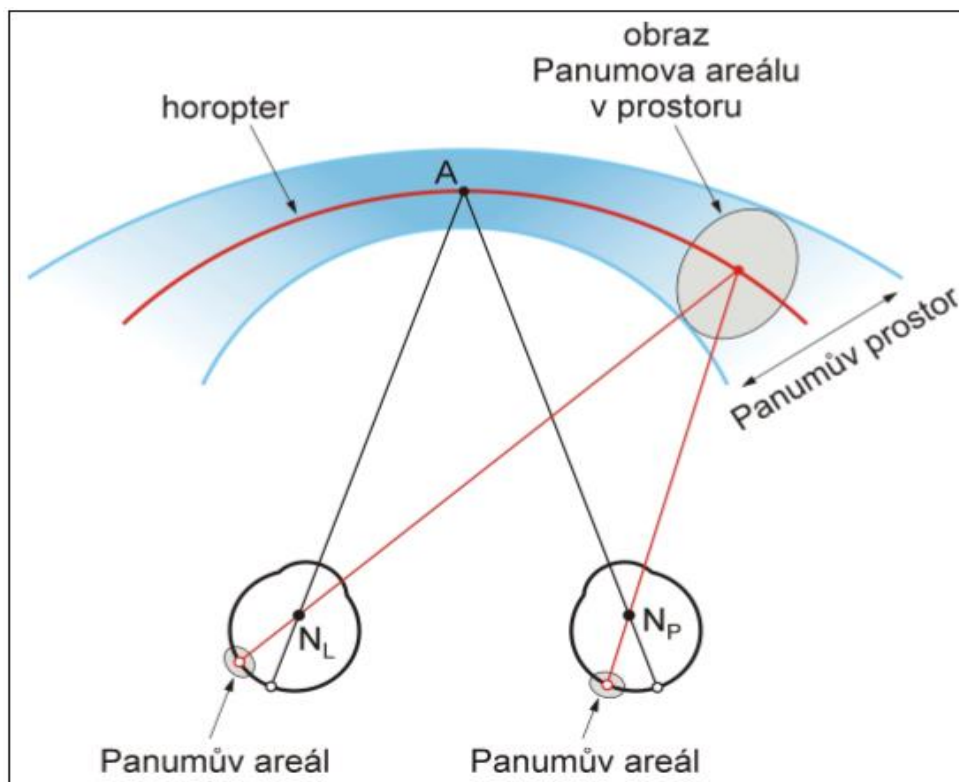
Obr. 9 - Přístroj pro měření horopteru založeném na stejných směrových hodnotách [9]

Měření horopteru na základě jednoduchého obrazu

První definice horopteru říkala, že horopter je množina bodů, které jsou viděny jednoduše. Metoda měření založená na jednoduchém obrazu se nazývá haplopická metoda. Při této metodě se počítá i s předpokladem, že horopter leží uprostřed Panumova prostoru. Fixační válec je statický a pohyblivými válci pohybujeme před fixační válec do doby, než se rozdvojí. Následně pohybujeme válcem za fixační válec do doby, než se rozdvojí. Při rozdvojení před a za, zaznamenáme vzdálenost mezi rovinou fixačního válce a pohyblivým válcem. Součet rozdvojení před a za fixační rovinou nám udává hloubku Panumova prostoru. Pokud součet vydělíme dvěma, získáme polohu horopteru. [6]

2.4 Panumův fúzní prostor

V roce 1838 vynalezl Charles Wheastone stereoskop, pomocí kterého zkoumal empirický horopter. Použitím stereoskopu zjistil, že ne pouze body na horopteru se zobrazují jednoduše. Toto zjištění vedlo k vyvrácení teorie, že body obrazu nedopadající na korespondující body sítnic, se zobrazí dvojité. Tuto skutečnost potvrdil Peter Ludvig Panum v roce 1858. Panum zjistil, že kolem každého korespondujícího bodu je pole, v kterém je obraz viděn jednoduše. Jednoduchý obraz tedy vzniká i na disparátních bodech sítnice. Prostor na sítnici, kde se utváří jednoduchý obraz, se nazývá Panumův areál. Panumův areál je obrazem Panumova prostoru, který obklopuje horopter (Obr. 10). Stejně jako horopter můžeme i Panumův prostor rozdělit na horizontální a vertikální část (v praktické části je měřen pouze horizontální Panumův prostor). Ogle měřením Panumova prostoru došel ke zjištění, že horizontální Panumův prostor je větší než vertikální a také že se směrem k periférii rozšiřuje. Rozšíření Panumova prostoru do periferie způsobuje menší hustota světločivých elementů na sítnici. Velikost Panumova prostoru je ovlivněna mírou schopnosti fúze, velikostí Panumova areálu, velikosti stimulu, tvaru a anomálie v binokulárním vidění. [6, 10, 13]

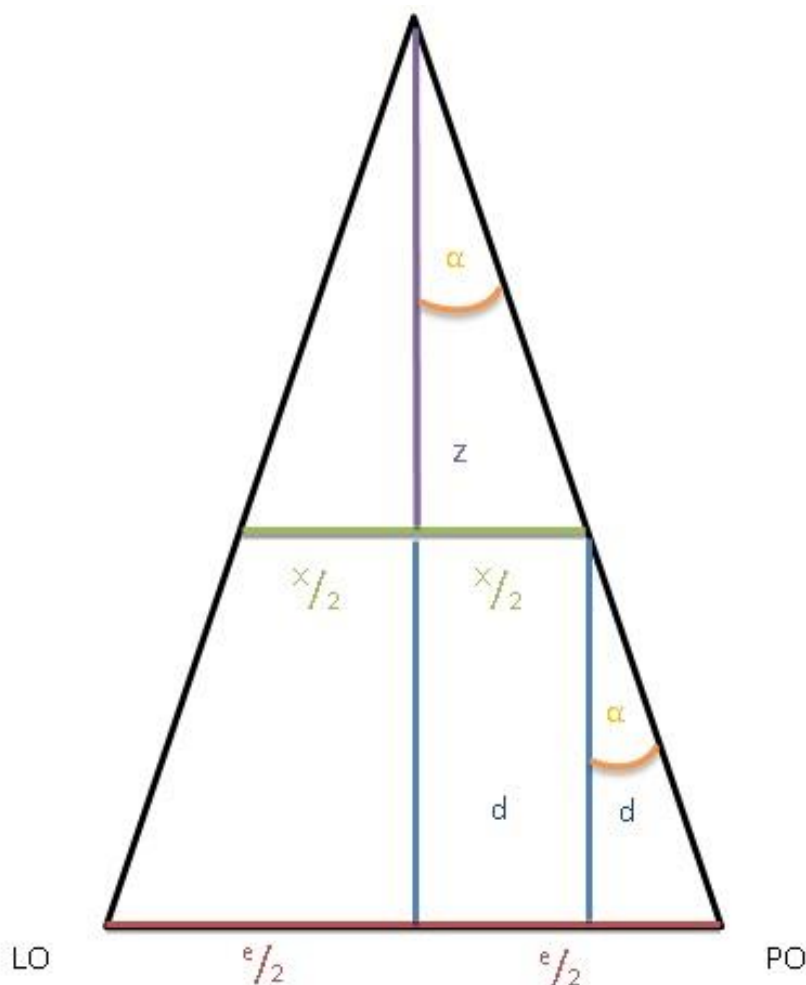


Obr. 10 - Panumův prostor – Panumův prostor se rozprostírá okolo horopteru, a jeho obraz na sítnici se nazývá Panumovým areálem. [4]

Spojením disparátních obrazů v rámci Panumových areálů vznikne prostorový vjem. Vzdálenost těchto obrazů je oproti realitě zkreslená z důvodu zprůměrování směrů pohledů obou očí. Drobná chyba v lokalizaci se odstraní díky zkušenostem a možností porovnání předmětu s dalšími předměty v prostoru. [6, 7, 10]

2.4.1 Měření Panumova prostoru

Měření Panumova prostoru se provádí za použití dvou stimulů, fixačního a pohyblivého. Fixační stimul slouží k udržení neměnné konvergence a akomodace, které způsobují fúzi obrazu. Druhým stimulem se pohybuje v okolí fixačního bodu a detekuje se rozhraní, kde se obraz rozdvíjí. Z měření nám většinou vyjde hodnota rozposunutí (kromě mechanického měření), kterou musíme přepočítat na hloubku prostorového vjemu. K odvození vzorce nám pomůže schéma na Obr. 11. [15]



Obr. 11 – Schéma pro výpočet hloubky rozposunutých stimulů

Vzorec odvodí pomocí výpočtu přes pravoúhlé trojúhelníky. Nejprve si vyjádříme úhel α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{e}{2} - \frac{x}{2}}{d} \qquad \operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{x}{2}}{z}$$

Tyto dva vzorce dáme do rovnosti a vyjádříme z:

$$\frac{\frac{e}{2} - \frac{x}{2}}{d} = \frac{\frac{x}{2}}{z} \quad \rightarrow \quad z = \frac{d * \frac{x}{2}}{\frac{e}{2} - \frac{x}{2}}$$

Nyní se už jen zbavíme $\frac{1}{2}$ a vyjde nám vzorec pro výpočet hloubky stimulu v prostoru vzhledem k pozici fixačního bodu:

$$z = \frac{d * x}{e - x}$$

hloubku lze tímto vzorcem vypočítat ze vzdálenosti fixačního bodu od vyšetřovaného (d), pupilární distance (e) a rozposunutí (x). [15]

Hloubku Panumova prostoru lze měřit mechanicky nebo změřením křivky fixační disparity, nebo lze použít metody, kterými nasimulujeme prostorový obraz. Simulovaný 3D obraz se liší od reality mírou zapojení konvergence a akomodace. [15]

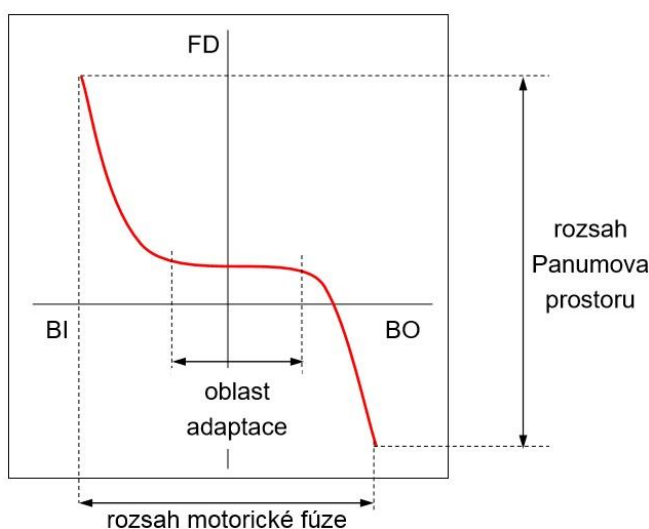
Mechanické měření Panumova prostoru

Mnoho metod, které by se daly použít pro měření Panumova prostoru, bylo použito pro měření horopteru. Tschermak k měření prostoru, kde je obraz fúzován, využil černých vláken na bílém pozadí. V místě, kde Panumův fúzní prostor končil, se vlákna rozdvojila. [13, 16]

Metoda posuvných se černých, tenkých válců na bílém pozadí byla použita pro měření horopteru i Panumova prostoru. Jeden z válců sloužil k fixaci a ostatními válce se pohybovali v jeho okolí, dokud se jejich obraz nerozdvojil. [9, 16]

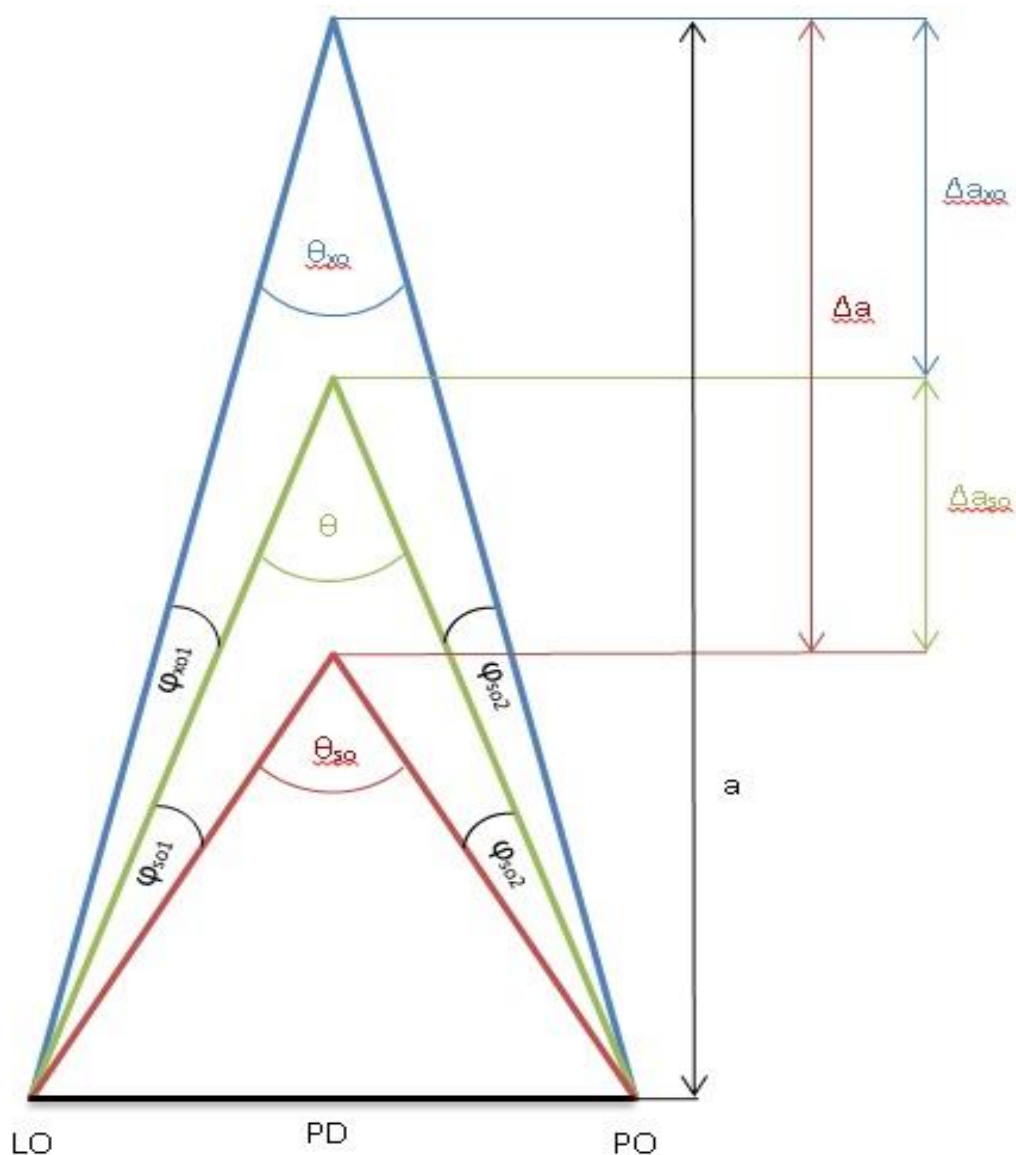
Měření Panumova prostoru pomocí křivky fixační disparity

Analýza fixační disparity slouží k popisu stavu binokulárního systému a znázorníme ji pomocí křivky fixační disparity (Obr. 12). Dává nám informace o fixační disparitě, asociační forii, kompenzaci heteroforie, adaptaci, rozsahu fúze, AC/A poměru, korekci a průběhu či potřebě zrakového tréninku. Měření fixační křivky se provádí pomocí prizmat a testů na asociační forii, kde jsou odděleny vjemy pravého a levého oka. Toto měření se dá uskutečnit pomocí malletova testu, saladin near point card a Wesson card. Tyto testy fungují na dvou principech. Buď mají stupnici, z které odečítáme hodnotu rozposunutí, nebo jsou již samy stimuly rozposunuty a je uvedeno jejich rozposunutí. Test pro měření Panumova prostoru musí obsahovat stimuly, které budou vidět vždy jedním okem a fixační stimul viděný oběma očima současně. Pro odečtení hodnoty Panumova prostoru musí test obsahovat také stupnici nebo hodnotu rozposunutí stimulů. Při měření předkládáme prizmata rovnoměrně mezi obě oči. Prizmata předkládáme střídavě BI a BO, vyšetřovaný vždy při výměně zavře oči. Každé prizma se prezentuje maximálně 15 s, z důvodu adaptace. Jakmile dojdeme při měření k diplopii, přešli jsme hranici Panumova prostoru. Většina těchto testů je udělána do blízka, ale existují i alternativy do dálky. [9, 10, 17, 18]



Obr. 12 – Křivka fixační disparity [19]

Vzorec pro výpočet Panumova prostoru odvodíme pomocí schématu na Obr. 13.



Obr. 13 – Schéma pro výpočet Panumova prostoru pomocí fixační disparity

$$\varphi_{so} = \varphi_{so1} + \varphi_{so2}$$

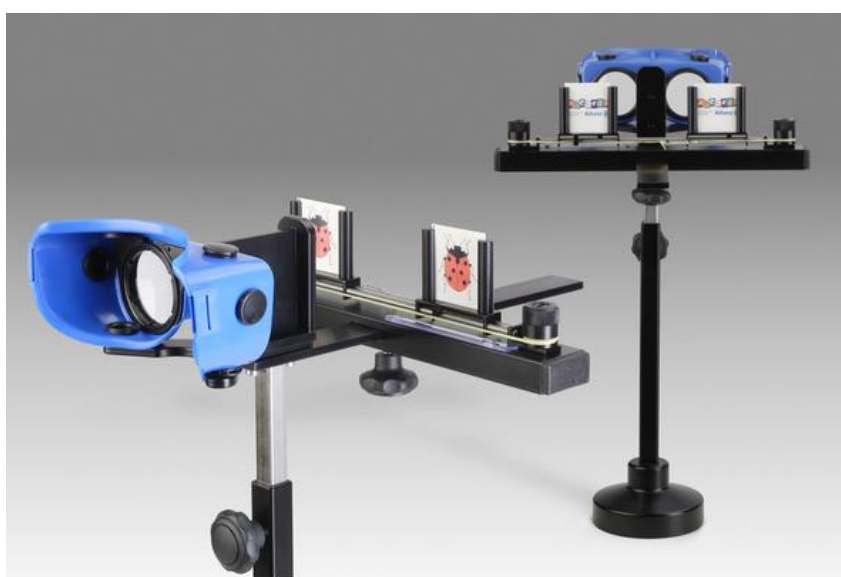
$$\varphi_{xo} = \varphi_{xo1} + \varphi_{xo2}$$

Pomocí vztahů v trojúhelníku získáme výsledný vzorec pro výpočet Panumova prostoru:

$$\Delta a = \frac{a^2}{PD} * (\varphi_{so} + \varphi_{xo})$$

Měření pomocí stereoskopu

Stereoskop je nejstarší přístroj, pomocí kterého lze vytvořit z dvou dvojdimenzionálních obrazů jeden trojdimenzionální. Stereoskop se skládá z přepážky, jezdce, na kterém jsou upevněny obrázky, dvou čoček nebo prismatic, přes které obrázky pozorujeme (Obr. 14). Přepážka rozděluje zorné pole tak, aby levé oko vidělo levý obrázek a pravé oko pravý. Pohybem jezdce můžeme korigovat vzdálenost obrázku od očí pozorovatele. Dále můžeme měnit vzdálenost mezi obrázky. Spojením těchto dvou obrázků vznikne jeden prostorový vjem. Za hranicí Panumova prostoru, kde již není možno obraz levého a pravého oka zfúzovat, se obraz rozdvíjí. [14, 18, 20, 21]



Obr. 14 - Stereoskop [22]

Pomocí stereoskopu lze jednoduše prokázat existenci Panumova prostoru. Charles Wheatstone využil pro měření Panumova prostoru jako stimuly dvě linie. Linie pro levé oko zůstávaly stále ve stejné vzdálenosti, zatímco linie pro pravé oko se rozposunovaly. Pro měření hloubky Panumova prostoru byly linie vertikální a pro měření výšky Panumova prostoru byly linie horizontální. Při vzájemném rozposunutí linií v mezích Panumova prostoru je obraz jednoduchý a prostorový. Pokud se již linie nebudou nacházet v Panumově prostoru, obraz se rozdvíjí. Pomocí posuvných obrázků lze změřit při jakém rozposunutí se obraz rozdvíjí. Rozdvojení nám určuje hranici Panumova prostoru. Klasickým stereoskopem lze však měřit pouze v blízkých vzdálenostech. Běžná

vyšetřovací vzdálenost stereoskopu je 33cm. Stereoskop se běžně používá při diagnostice a terapii v ortoptice. [6, 7, 18]

Obrázky, které se používají ve stereoskopech, se nazývají stereogramy. Stereogramy jsou složeny ze dvou obrázků zachycujících stejný objekt z různých úhlů. Tento úhel napodobuje pohled levého a pravého oka, který díky očnímu rozestupu vnímá předměty z rozdílných úhlů. Vyvolat prostorový vjem pomocí stereogramu můžeme i bez speciální techniky. Při pohledu na prst, umístěný v blízké vzdálenosti přímo proti stereogramu, se snažíme o zfúzování obrazu. Druhou možnou metodou je soustředit se na bod mezi dvěma obrázky na stereogramu a snažit se dívat za ně a tím je spojit do jednoho prostorového vjemu. Tato technika je však o mnoho náročnější. [14, 20, 21]

Měření pomocí anaglyfů

Anaglyf se skládá ze dvou stereoskopických obrázků dvou barev, které při pozorování brýlemi s filtry v doplňkových barvách vytvářejí prostorový vjem (Obr. 15). Anaglyf je předchůdcem 3D technologie. Oddělení vjemů je uskutečněno pomocí barevných filtrů v brýlích. Brýle mívají většinou červený a modrý, nebo červený a zelený filtr. Také existují brýle s filtrem modrým a žlutým nebo bílým a černým. V případě použití nevhodných filtrů nemusí být 3D vjem vůbec vnímán nebo může být nekvalitní. Výhodou tohoto 3D stereoskopického obrazu je, že k jeho pozorování není potřeba žádná speciální technika, ale pouze brýle s barevnými filtry. Nevýhodou bývá zkreslení barev, které může způsobit až rivalitu očí. Z důvodu velké námahy mozku při korekci barev, není anaglyfické 3D zobrazení vhodné pro dlouhodobé pozorování. V případě, že oko trpí barevnou vadou, nemusí být barevný vjem vůbec vnímán nebo může být jeho kvalita nedostatečná pro vytvoření 3D vjemu. [15, 20, 23, 24]



Obr. 15 - Anaglyf [20]

Anaglyf se používá v oboru optometrie pro vyšetření zrakových funkcí. Pomocí 3D anaglyfického vjemu můžeme měřit stereopsi. 2D anaglyfy se používají k analýze strabismu. Anaglyfické 3D zobrazení je využíváno i v mnoha dalších oborech jako třeba v chemii, kde simulují tvar různých sloučenin. V archeologii se využívá při práci s velmi cennými či křehkými předměty. Nebo v případě technických oborů lze touto technologií zobrazit velmi malé součástky, případně jejich defekty. [15, 20, 23, 24]

Měření pomocí 3D technologie

K pozorování 3D obrazu je zapotřebí zobrazovací technika, která je schopná vytvořit 3D obraz. 3D obraz může vzniknout různými způsoby. Technika zobrazující 3D obraz může fungovat na základě aktivní, pasivní a autostereoskopické technologie. U aktivní a pasivní technologie je nutné použít brýle. [25]

Při aktivní polarizaci je v brýlích střídavě zatemněno levé a pravé oko a tak dochází k rychlému střídání viděných obrazů, což způsobuje vytvoření 3D vjemu. Na obrazovce se stejnou frekvencí jako v brýlích se střídají obrazy, každý pro jedno oko. Nikdy není viděn obraz současně pravým a levým okem. V tomto případě je nutný vysílač, který bude střídání obrázků řídit a synchronizovat zobrazovací techniku a brýle. U aktivní polarizace

jsou brýle opatřeny zdrojem energie. V případě, kdy energie není přiváděna, brýle nefungují. Musí být tedy nabité nebo připojeny ke zdroji elektrického napětí. Nevýhodou této technologie je nutnost zdroje pro brýle a jejich váha, další nevýhodou je možná chyba v synchronizaci obrazu mezi brýlemi a obrazovkou. Tato technologie byla použita v praktické části této diplomové práce k měření Panumova prostoru. [18, 25, 26]

U pasivní 3D technologie jsou brýle polarizované a obraz jde současně do pravého a levého oka. Na plátno se promítají pomocí dvou promítaček dva obrazy každý pro jedno oko. Obrazy jsou polarizované po sloupcích. Liché sloupce jsou polarizované například pro levé oko a sudé sloupce pro pravé. Roviny polarizace lichých a sudých sloupců jsou kolmé. U pasivní 3D technologie je důležité, aby oči diváka byly v úrovni středu obrazovky, jinak vzniká rušivé zdvojení obrazu. Náklony hlavy mohou způsobit rozostření obrazu a zkreslení hloubky, z důvodu odchýlení roviny polarizace v brýlích vůči rovině polarizace na obrazovce. Výhodou je, že brýle nemusí být připojeny ke zdroji a jsou tedy lehčí a levnější. [15, 25, 27]

Nejnovější metodou vytváření 3D obrazu je autostereoskopická technologie, při které nemusí mít pozorovatel nasazené brýle. V počátcích této technologie bylo striktně určeno, odkud je 3D vjem dobře viditelný. Kvalita obrazu se měnila i s malými pohyby hlavy. Při nesprávné pozici před monitorem docházelo k rušivému rozdělení. Tento problém byl vyřešen pomocí kamery, která sledovala, odkud se na obraz subjekt dívá. Problém se však naskytl při pozorování obrazu větším počtem lidí, kdy nebyl obraz viděn stejně kvalitně všemi pozorovateli. Tento problém byl vyřešen pomocí odrazných ploch, které odráží obraz do více úhlů a tak umožňují vnímat 3D obraz většímu počtu pozorovatelů. 3D vjem je vytvořen pomocí skleněné desky či fólie, která specificky odráží obraz ve sloupcích do pravého a levého oka. Tato deska funguje na principu Fresnelovy fólie. [15, 25, 26]

3. Praktická část

V praktické části jsme se zabývali měřením rozměrů Panumova prostoru pomocí aktivní 3D technologie. Cílem experimentu bylo zjistit, jak se Panumův prostor mění v závislosti na vzdálenosti od pozorovatele a v závislosti na periferním úhlu pohledu. Předpokládali jsme, že vlivem vzdálenosti by se mohlo měnit zakřivení, hloubka a výška Panumova prostoru. Byl sledován jeho rozsah v horizontálním směru. Na základně dostupných informací jsme předpokládali, že hloubka a výška Panumova prostoru se bude zvětšovat se vzdáleností od pozorovatele, z důvodu menší hustoty světločivých buněk v periférii, a též s rostoucím úhlem (tj. v periférii bude hloubka a výška Panumova prostoru narůstat). Navíc předpokládáme, že výška Panumova prostoru bude oproti hloubce výrazně menší. [10, 28, 29]

3.1. Soubor vyšetřovaných osob

Z důvodu možného vlivu vývoje zraku na výsledky bylo nastaveno věkové kritérium od 18 do 40 let, kdy je zrak stabilní. Výzkumu se zúčastnilo 10 figurantů ve věku 20 až 26 let. Před zařazením do studie byl figurantům změřen vízus a byly vykoušeny základní binokulární funkce. Do výzkumu mohli být zařazeni emetropové a ametropové nosící kontaktní čočky s vízem 1. Pro nositele bylo připravené stanoviště pro aplikaci kontaktních čoček a pro měření jim byly objednány kontaktní čočky o parametrech, které běžně nosí. Vliv korekce zraku kontaktními čočkami na měření Panumova prostoru nebyl prokázán. Pro analýzu binokulárního vidění jsme použili test na blízký bod, zakrývací testy, stereotesty a testy na asociační forii (viz kapitola Vstupní vyšetření). U všech figurantů musely měřené parametry binokulárních funkcí splňovat požadované limity. Při jejich abnormálních hodnotách lze předpokládat nesprávnou funkci binokulárního systému, kterou bylo před měřením třeba vyloučit. [11, 30]

Měření blízkého bodu umožnilo zjistit případné problémy s konvergencí, které mohou ovlivnit měření při bližších vzdálenostech, případně mohou upozornit na další související potíže. Testy na heteroforii by mohly upozornit na přítomnost manifestního strabismu, při kterém není přítomno normální binokulární vidění a není tedy vhodné provádět měření Panumova prostoru. Heteroforie může při vysokých hodnotách zatěžovat zrakový systém stresem a zkreslovat výsledný rozsah Panumova prostoru. Na slabost ve

vergenčním systému mohou také upozornit testy na asociační forii nebo stereopsi. Na základě velikosti asociační forie lze odhadnout míru stresu ve vergenčním systému, který může být způsoben například heteroforií. Vysoké hodnoty stereoskopického prahu měřenému streotesty odpovídají narušenému binokulárnímu vidění a neschopnosti dostatečně vnímat prostorový obraz např. na základě jeho nadměrné zátěže při přítomnosti heteroforie. [9, 18]

Před samotným měřením Panumova prostoru byli figuranti seznámeni s průběhem a požadavky měření. Všichni figuranti před měřením podepsali informovaný souhlas a byli srozuměni, že mohou kdykoliv měření přerušit či zcela ze studie odstoupit.

3.2. Vstupní vyšetření

Měření zrakové ostrosti probíhalo na optotypech vzdálených 6 metrů a 40 cm. Na optotypu na 6 metrů byla možnost měnit písmena, a tak se zabránilo jejich možnému zapamatování. Zraková ostrost byla měřena jak binokulárně, tak monokulárně na každém oku. Figuranti museli splňovat kritérium, aby vízus byl minimálně 1. [4, 18]

Při měření blízkého bodu bylo měřeno rozdvojení a spojení hrotu tužky. Figurant přibližoval tužku směrem k nosu v rovině očí do doby, než se rozdvojila. Následně si vyšetřovaný umístil hrot tužky co nejblíže ke kořenu nosu a oddaloval tužku v rovině pohledu, dokud neviděl hrot jednou. Při rozdvojení a spojení byla vždy změřena vzdálenost. Hraniční hodnoty blízkého bodu byly pro rozdvojení 7,5 cm a pro spojení 10,5 cm. [19]

Heteroforie (skryté šilhání) byla měřena zakrývacími testy (cover testy). Zakrývací test byl proveden na optotypech ve vzdálenosti 6 m a 40 cm. V rámci zakrývacích testů byly figurantovi zakrývány oči okluzním terčem a detekoval se jejich pohyb nebo pohyb subjektivně vnímaného obrazu. Proveden byl jak intermitentní, tak alternující zakrývací test. Při intermitentním zakrývacím testu, který sloužil k vyloučení manifestního strabismu, bylo zakrýváno vždy jen jedno oko a byl pozorován pohyb nezakrytého oka. Manifestní strabismus by se projevil pohybem sledovaného oka. Následně byla alternujícím testem hodnocena přítomnost, typ a velikost heteroforie. Při alternujícím testu bylo střídavě zakrýváno levé a pravé oko. Figurant popisoval či ukazoval směr uskakování obrazu s nebo proti okluznímu terči. Pokud obraz figurantovi uskakoval,

popř. byl zřetelný pohyb oka, byla předkládána prizmata pomocí prizmatické lišty, dokud se obraz nepřestal subjektivně pohybovat nebo se začal pohybovat opačným směrem, popř. pokud se nezastavil pozorovaný pohyb očí. Hraniční hodnoty pro heteroforii byly do dálky 2 eso - 4 exo a do blízka 0 - 6 exo. [3, 4, 18, 19]

Asociační forie představuje minimální hodnotu prizmatu, potřebného pro plnou korekci fixační disparity. Měření bylo provedeno na oddělených obrazech levého a pravého oka, které byly disociovány pomocí technologie anaglyfů (viz kapitola Měření Panumova prostoru - Anaglyf). Do blízka (40 cm) byla asociační forie měřena pomocí Wesson card. Na dálku (6 m) byl použit k měření Malletův test do dálky. Hraniční hodnota pro asociační forii byla 1pD. [4, 10, 18, 19]

Stereopse byla měřena pomocí polarizovaných stereotestů a polarizovaných brýlí do dálky na 6 m a do blízka na 40 cm. Stereopse do dálky se ukázala během měření jako nejčastější příčina pro vyřazení za studie. Maximální požadovaný stereoskopický práh byl 60''. [4, 18, 19]

3.3. Technika

Měření bylo provedeno na notebooku ASUS G51JX-IX052Z (rozlišení 1366x768, frekvence 120Hz) s podporou 3D zobrazení. 3D zobrazení bylo umožněno instalací programu Nvidia 3D vision a komponenty firmy Nvidia. Tento systém funguje na principu aktivní polarizace (viz kapitola: Měření Panumova prostoru pomocí 3D technologie). K simulování 3D obrazu byl použit notebook s nainstalovaným programem Nvidia, speciální brýle a infračervený vysílač, který zprostředkovává komunikaci mezi notebookem a brýlemi (Obr. 16). Na notebooku je pomocí programu Nvidia spuštěna prezentace 3D stimulů. Počítač střídavě zobrazuje obraz pro pravé a levé oko. Synchronizovaně s počítačem se přepíná clona v brýlích, která vždy zakrývá jedno oko. Sestava takto střídá vjemy pravého a levého oka s frekvencí 120 Hz. Do každého oka tedy dopadá obraz s frekvencí 60 Hz. Tato frekvence je minimální pro vnímání plynulé projekce.



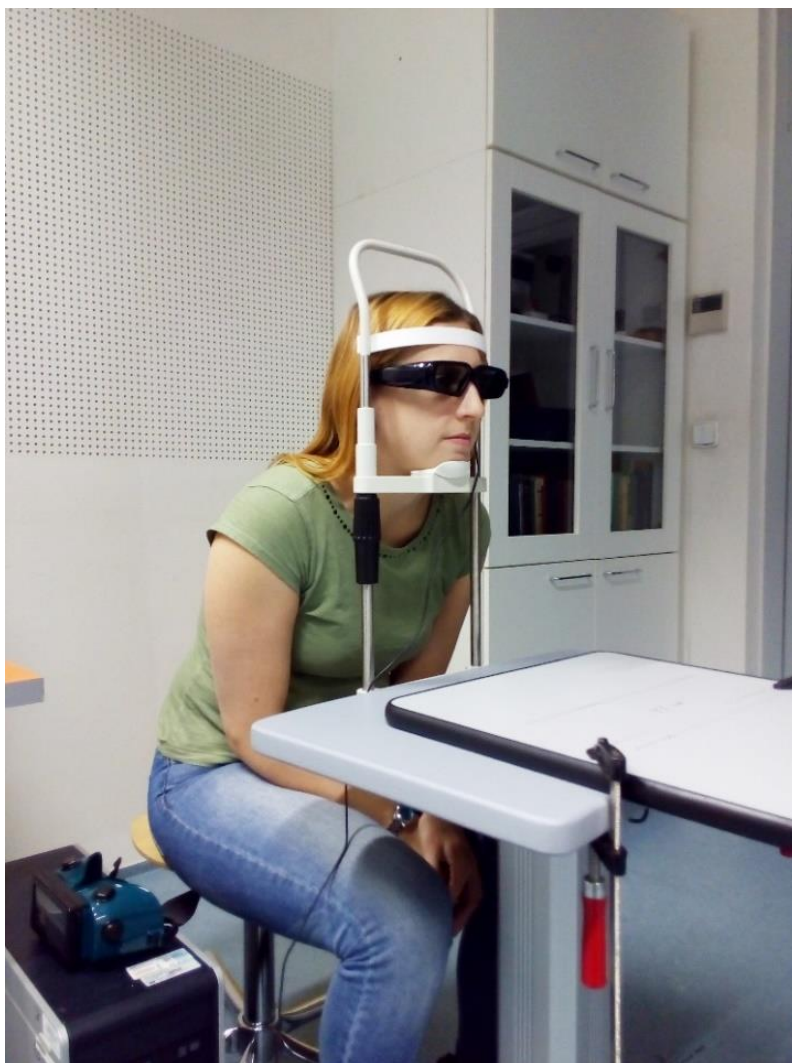
Obr. 16 – Technika použitá při měření – notebook, brýle a infračervený vysílač

3.4. Postup

Veškerá měření probíhala v laboratořích optometrie katedry Optiky Univerzity Palackého v Olomouci. Každý účastník nejprve podstoupil vstupní vyšetření na zrakovou ostrost a binokulární vidění (viz kapitola vstupní vyšetření). Panumův prostor byl měřen ve tmě při jasu černé barvy $0,1 \text{ cd/m}^2$, bílé barvy 200 cd/m^2 a celého stimulu $0,9 \text{ cd/m}^2$. Samotné měření Panumova prostoru bylo rozvrženo do tří dnů z důvodu časové náročnosti, náročnosti na zrakový aparát a soustředěnost účastníka. Únava zrakového aparátu a účastníka by mohla negativně ovlivnit výsledky měření. Jednotlivá měření probíhala přibližně dvě hodiny. V každý den měření byla měřena jiná vzdálenost. U všech účastníků studie byl měřen Panumův prostor nejdříve ve čtyřech metrech, následně ve

dvou metrech a poslední den měření probíhalo v jednom metru. U většiny případů bylo měřeno nejdříve v 0° a následně 5° a 10° vpravo a potom vlevo. Ve dvou případech byla posloupnost změněna, aby technika použitá při měření nemusela být znovu přeinstalována a z důvodu úspory času. V těchto případech bylo nejdříve měřeno v 5 a 10 vstupní vlevo, vpravo a na závěr bylo měřeno v 0 stupních. Nepředpokládá se, že změna v posloupnosti bude mít vliv na výsledky měření. Při prvotních měřeních nebyly vždy prezentace dostačující a nedošlo v nich k požadovanému rozdvojení a spojení stimulů. Z těchto důvodů bylo nutné pozvat dotyčného znovu a pozici přeměřit.

Před samotným měřením bylo vždy vyhrazeno 15 minut pro adaptaci na tmu. Pro získání představy o tvaru Panumova prostoru se měření odehrávalo jak v rovině horizontální (měření hloubky), tak v rovině vertikální (měření výšky). Měření bylo také provedeno v periférii pod úhlem 5 a 10 stupňů pro zjištění změny tvaru Panumova prostoru do stran. Dále bylo měření uskutečněno ve vzdálenosti 1 , 2 a 4 metry, neboť předpokládáme závislost tvaru Panumova prostoru na vzdálenosti fixace. Kvůli eliminaci nežádoucích pohybů hlavy, měl vyšetřovaný opřenou bradu a čelo o opěrku (Obr. 17). Rovina očí, střed tabletu a střed notebooku byly vždy v jedné rovině (viz popis stimulu níže). Figurant sledoval prezentace, které obsahovaly 3D stimuly. Figurant byl vždy před zahájením měření seznámen s prezentacemi a poučen o tom, co se od něj očekává. Figurant během prezentace měl za úkol hlásit rozdvojení a spojení obrazu.

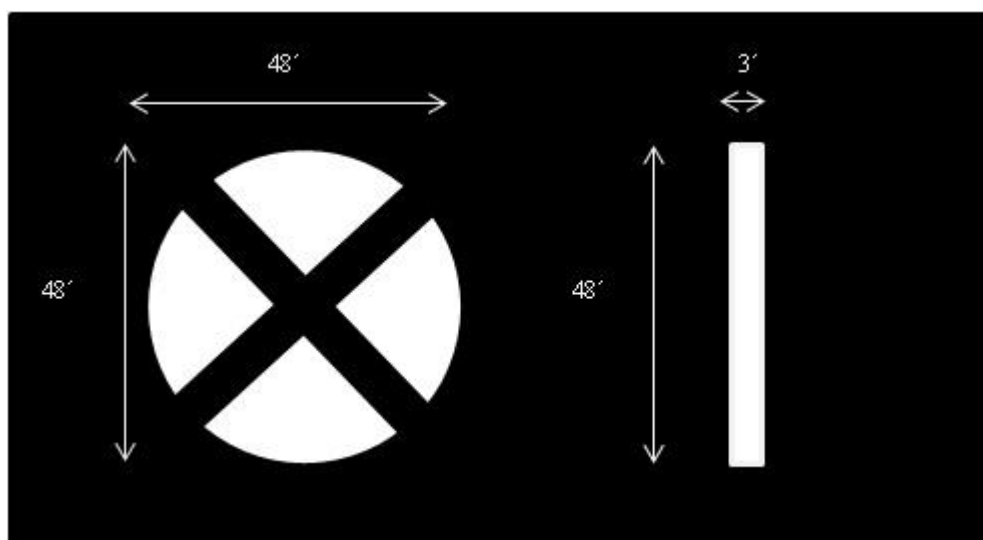


Obr. 17 – Subjekt měl vždy při měření bradu a čelo opřeny v opěrce, aby se zabránilo nežádoucím pohybům

3.5. Použité stimuly

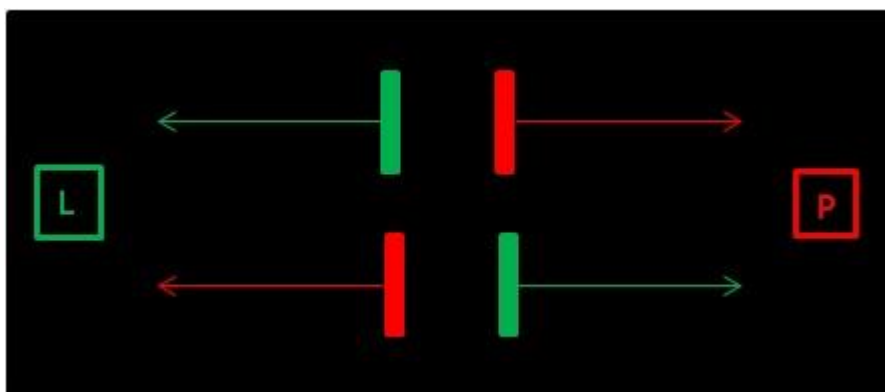
Prezentace obsahovaly dva typy stimulů. První stimul byl tvořen bílými kolečky na černém pozadí s černým písmenem X uprostřed, které se vždy zobrazovaly do fovey levého a pravého oka a byly viděny vždy jednoduše. Tento stimul sloužil pro fixaci. Kolečka byla zobrazována pod zorným úhlem 48' (Obr. 18). Druhým stimulem byly bílé čárky (vždy jedna pro každé oko). Čárky byly viděny pod zorným úhlem 48' a 3' (Obr. 18). Fyzické rozměry stimulu byly přepočítány pro každou vzdálenost tak, aby byly stimuly vidět vždy pod požadovaným (konstantním) úhlem. Stejně jako se měnila fyzická velikost stimulu, tak se měnila i fyzická velikost kroku rozposunutí. Ve čtyřech metrech

se stimuly čar rozposunovaly s krokem 2,0192 mm, ve dvou metrech 1,096mm a v jednom metru 0,5048 mm. Vzájemná pozice čárek (pro pravé a levé oko) se v průběhu prezentace měnila přibližně s krokem 2'.

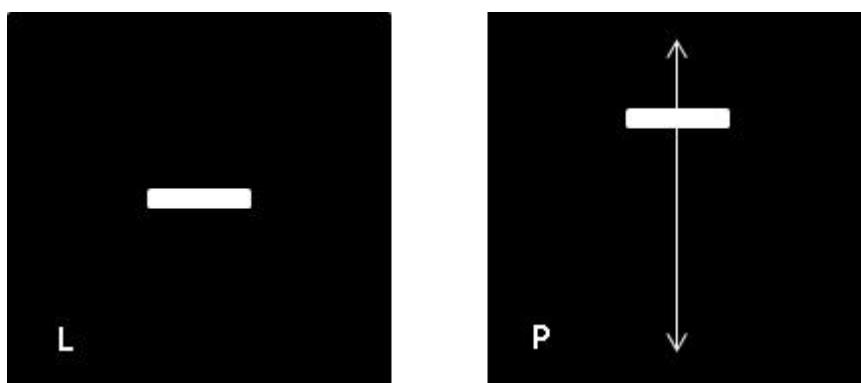


Obr. 18 – Fixační stimul (vlevo) a pohybující se stimul (vpravo)

Pokud se obrazy čar na sítnicích očí posouvaly v rámci Panumových areálů, tj. v prostoru se promítaly do Panumova prostoru, byly figurantem vnímány jako jedna čárka. Při překročení hranice byla každá čárka vnímána samostatně, tj. figurant hlásil vjem dvou čárek. Tyto čárky byly použity pro samotné měření Panumova prostoru. Při měření horizontálního Panumova prostoru se rozposunovaly obě čárky rovnoměrně (Obr. 19). U měření výšky Panumova prostoru byla čárka pro levé oko vždy promítána do fovey a čárka pro pravé oko měnila svou polohu (Obr. 20). Při určitém rozposunutí se čárky rozdvojily či spojily do jednoho prostorového vjemu, což udávalo rozhraní Panumova prostoru.



Obr. 19 – Pohybující se stimul při měření horizontálního Panumova prostoru. Pro názornost jsou vjemy levého a pravého oka odlišeny barevně. Horní dvojice čar znázorňuje jejich vzájemný pohyb při simulaci posunu směrem dozadu v Panumově prostoru, dolní při simulaci posunu dopředu.



Obr. 20 – Pohybující se stimul při měření výšky Panumova prostoru (vjem L pro levé a P pro pravé oko)

V každé vzdálenosti v 0° byl na monitoru nejdříve prezentován fixační stimul na 6s. Po této době se místo fixačního stimulu zobrazily čárky na 140 ms. Tento čas se rovná akomodační odezvě a brání tak adaptaci konvergence a akomodace na vzdálenost čárek. Fixační stimul byl dále prezentován po dobu 3 s, pro navození a upevnění akomodace. Tyto stimuly byly střídavě subjektu zobrazovány v těchto časových intervalech do doby spojení nebo rozdvojení.

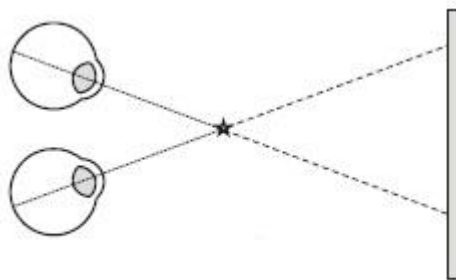
V 5° a 10° byly vždy stimuly rozděleny. Fixační stimul byl umístěn vždy přímo před vyšetřovaného a byl konstantní (Obr. 21). K prezentaci byl použit notebook, tablet nebo telefon v závislosti na potřebné vzdálenosti mezi fixačním a pohybujícím se

stimulem. Čárky byly vždy zobrazeny na notebooku. Stejně jako v případě 0° byly rozposunovány a prezentovány po dobu 140 ms s pauzou 1s mezi jednotlivými kroky posunu.

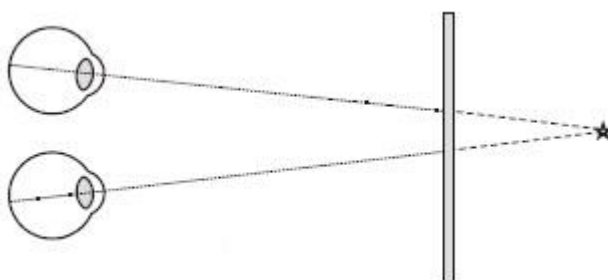


Obr. 21 – Prezentace stimulů pomocí notebooku a tabletu

V rámci měření hloubky se pohybující se stimuly (čárky) posunovali horizontálně. Pokud jsme chtěli měřit Panumův prostor před fixačním bodem, zobrazovali jsme levý obraz pravému oku a pravý obraz levému oku. Docházelo k tzv. zkřížené disparitě, která způsobila posun předmětu blíže k pozorovateli, než byl fixační bod (Obr. 22). Pro posun stimulu za fixační bod jsme prezentovali levý obraz levému oku a pravý obraz pravému oku. V tomto případě docházelo k nezkřížené disparitě a trojrozměrný obraz se pohyboval za fixační bod (Obr. 23).



Obr. 22 - Navození pozice pohybujícího se stimulu před fixačním bodem [31]



Obr. 23 - Navození pozice pohybujícího se stimulu za fixačním bodem [31]

3.6. Metoda hodnocení

Při měření byl zaznamenáván čas od spuštění prezentace, ve kterém figurant nahlásil rozdvojení nebo spojení pohybujícího se stimulu. Tyto hodnoty byly s tabelovaným průběhem prezentace. Tabulky obsahovaly hodnoty rozposunutí stimulů a odpovídající čas jejich zobrazení od spuštění prezentace. Hodnoty rozposunutí od všech deseti subjektů byly zprůměrovány ve všech úhlech, vzdálenostech a směrech. Jejich průměrná hodnota byla přepočítána na hloubku a výšku v prostoru dle vzorce uvedeného v kapitole Měření Panumova prostoru. Z hodnot rozdvojení za a spojení za, rozdvojení před a spojení před fixačním bodem, byly stanoveny průměrné hodnoty, které udávaly pozici Panumova fúzního prostoru od roviny fixačního bodu. U každé měřené pozice byly vypočítány z jednotlivých hodnot rozposunutí též příslušné směrodatné odchylky. Z průměrných hodnot udávajících pozici Panumova prostoru byla vypočítána hloubka Panumova prostoru sečtením absolutních hodnot průměrného rozposunutí za i před rovinou fixačního bodu. Pozice horopteru byla předpokládána přesně uprostřed mezi hranicemi Panumova prostoru v dané měřené pozici. Směrodatná odchylka horopteru byla vypočítána z hodnot pozic horopteru jednotlivých subjektů.

Hloubka, resp. výška Panumova prostoru v jednotlivých pozicích byla srovnávána metodou ANOVA při opakovaných měřeních na hladině významnosti 5 % s využití software STATISTICA 12. Tj. pokud se data skutečně rovnala, byla jejich rovnost zamítnuta s pravděpodobností 5 %. Navíc jsou v textu uvedeny mezní hodnoty p hladiny významnosti, při kterých by právě došlo k zamítnutí testované rovnosti. V případě potřeby byla provedena Huynh-Feldtova korekce dat na sféricitu.

3.7. Výsledky

V rámci vyhodnocení rozsahu Panumova horizontálního fúzního prostoru byla porovnána a popsána data charakterizující hloubku a výšku Panumova prostoru v úhlech a vzdálenostech. Ze zjištěných informací o Panumově prostoru byla vypočítána i pozice horopteru. V následujících kapitolách jsou použity zkratky v tabulkách a popiscích grafů a tabulek pro termíny Panumův prostor (PP), fixační bod (FB) a směrodatnou odchylku (SD).

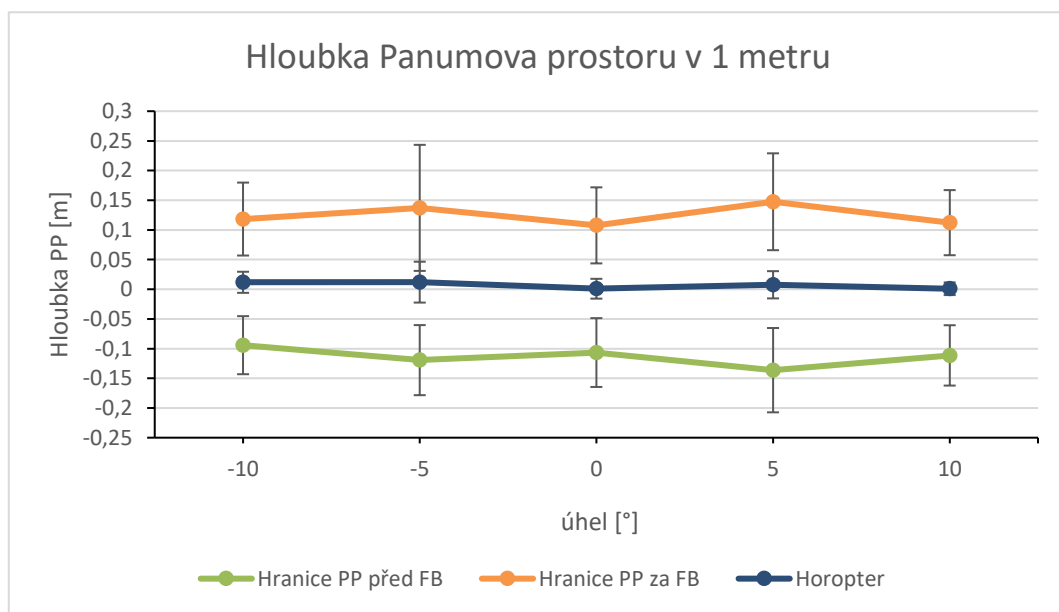
3.7.1 Hloubka horizontálního Panumova fúzního prostoru

Hloubka Panumova fúzního prostoru v 1 metru

Základní naměřené a z nich spočtené parametry a jejich směrodatné odchylky (SD) uvádí Tab. 1. Průběh Panumova fúzního prostoru (PP) graficky zachycuje Graf 1. Z obrázku je zřetelné, že hloubka Panumova fúzního prostoru ve vzdálenosti jednoho metru v rozmezí od 0° do 5° roste, zatímco v rozmezí od 5° do 10° hloubka klesá. Tyto změny jsou na obou stranách přibližně symetrické. Největší hloubka 29,3 cm Panumova prostoru byla naměřena v 5° vpravo. Nejmenší hloubka 21,4 cm Panumova prostoru se nacházela v 10° vlevo. Horopter procházel těsně nad rovinou fixačního bodu (FB) s maximální odchylkou 12 mm.

Hloubka Panumova prostoru v 1metru						
Úhel		-10	-5	0	5	10
rozdvojení před	průměr [m]	-0,120	-0,148	-0,149	-0,181	-0,144
	SD[m]	0,048	0,038	0,052	0,059	0,041
spojení před	průměr [m]	-0,068	-0,091	-0,064	-0,091	-0,079
	SD [m]	0,037	0,067	0,034	0,061	0,044
průměr před	průměr [m]	-0,094	-0,119	-0,107	-0,136	-0,111
	SD[m]	0,049	0,059	0,058	0,071	0,051
rozdvojení za	průměr [m]	0,141	0,161	0,148	0,179	0,138
	SD [m]	0,057	0,051	0,058	0,076	0,047
spojení za	průměr [m]	0,096	0,11	0,067	0,116	0,086
	SD[m]	0,060	0,14	0,047	0,079	0,053
průměr za	průměr [m]	0,118	0,137	0,108	0,147	0,112
	SD [m]	0,061	0,106	0,064	0,082	0,055
Hloubka PP [m]		0,214	0,265	0,221	0,293	0,225
SD- hloubka [m]		0,092	0,160	0,111	0,144	0,072
Horopter [m]		0,012	0,009	0,001	0,006	0,000
SD- horopter [m]		0,018	0,034	0,017	0,023	0,011

Tab. 1 – Parametry hranic PP v horizontální rovině pro vzdálenost 1 metru, jeho vypočítaná průměrná hloubka a pozice horopteru včetně SD.



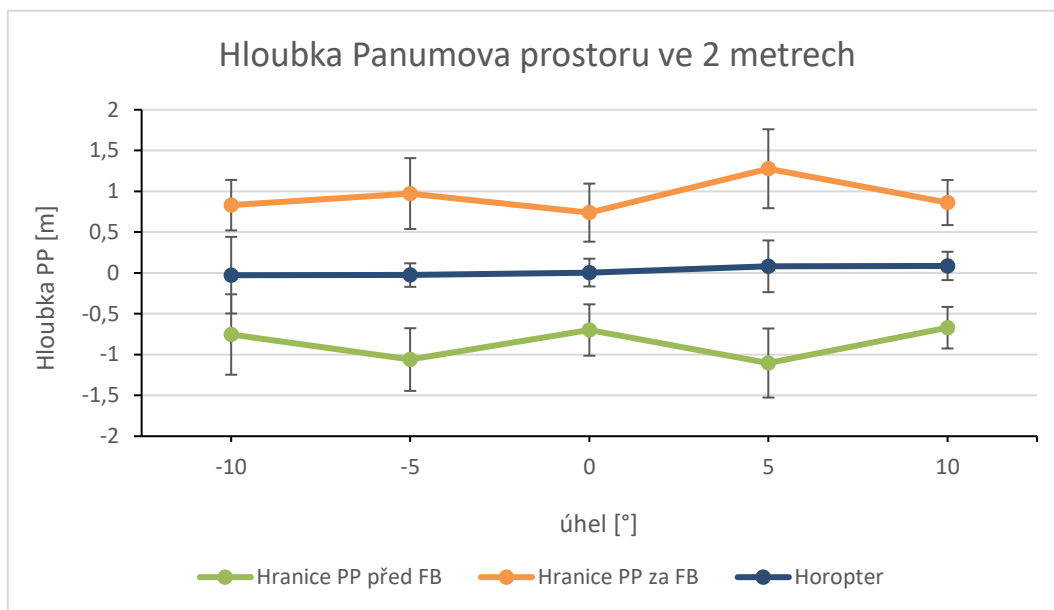
Graf 1 – Hloubka PP v 1 metru je ohraničena zelenou křivkou znázorňující hranici PP před FB a oranžovou křivkou znázorňující hranici PP za FB. Horopter je zobrazen v grafu modrou linií, která vede uprostřed mezi křivkami znázorňující hloubku PP.

Hloubka Panumova fúzního prostoru ve 2 metrech

Parametry základních na měřených a spočítaných dat jsou vypsány v Tab. 2 i s jejich směrodatnými odchylkami. Grafické schéma hloubky Panumova prostoru je znázorněné v Graf 2. Hloubka horizontálního Panumova fúzního prostoru se pohybovala od 1,64 m až do 2,98 m. Maximální hloubka byla v 5° vpravo a nejmenší v 0°. Křivka v oblasti od 0° do 5° měla vzrůstající tendenci. Mezi 5° a 10° křivka Panumova prostoru klesala. Křivka horopteru se pohybovala okolo roviny fixačního bodu s odchylkou nad i pod rovinou 4 cm.

Hloubka Panumova prostora ve 2 metrech						
úhel		-10	-5	0	5	10
rozdvojení před	průměr [m]	-0,829	-1,25	-0,77	-1,06	-0,75
	SD[m]	0,404	0,27	0,29	0,21	0,22
spojení před	průměr [m]	-0,68	-0,87	-0,63	-1,150	-0,60
	SD [m]	0,58	0,47	0,34	0,595	0,28
průměr před	průměr [m]	-0,75	-1,06	-0,70	-1,10	-0,67
	SD[m]	0,49	0,38	0,31	0,42	0,25
rozdvojení za	průměr [m]	1,03	1,19	0,90	1,51	1,04
	SD [m]	0,25	0,31	0,32	0,31	0,22
spojení za	průměr [m]	0,63	0,76	0,58	1,05	0,68
	SD[m]	0,32	0,52	0,36	0,61	0,29
průměr za	průměr [m]	0,83	0,97	0,74	1,28	0,86
	SD [m]	0,31	0,43	0,36	0,48	0,28
Hloubka PP [m]		1,82	2,36	1,76	2,98	1,64
SD- hloubka [m]		1,29	1,33	1,37	1,96	0,66
Horoptyer [m]		0,04	-0,04	0,02	0,09	0,10
SD- horoptyer [m]		0,47	0,14	0,17	0,32	0,17

Tab. 2 – Průměrné hodnoty rozdělení a spojení, které udávají hloubku PP a SD v horizontální rovině pro vzdálenost 2 metry



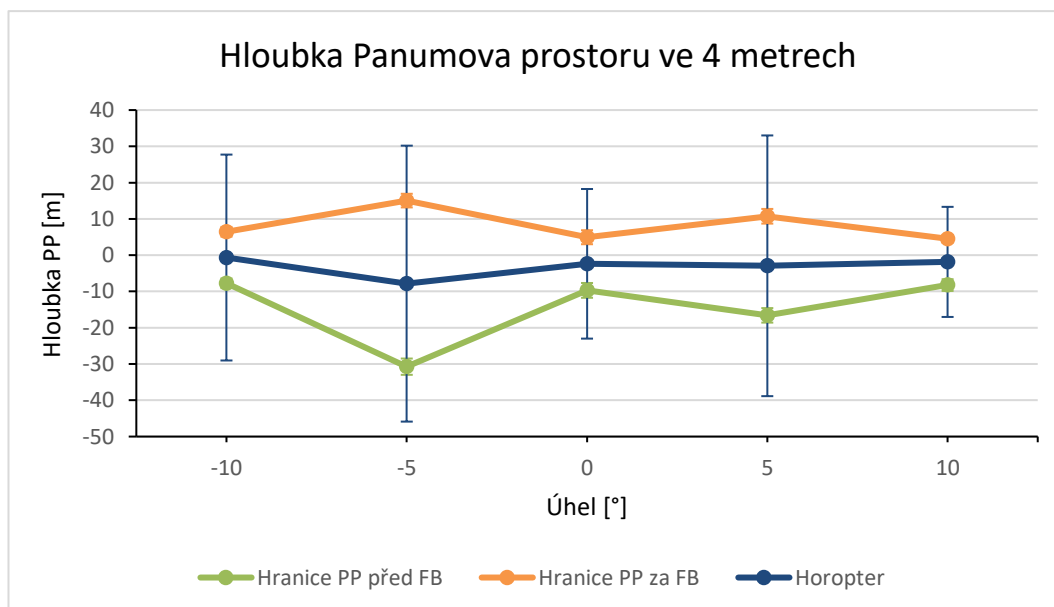
Graf 2 – Hloubka PP ve 2 metrech je ohraničena zelenou křivkou znázorňující hranici PP před FB a oranžovou křivkou znázorňující hranici PP za FB. Horopter je zobrazen v grafu modrou linií, která vede uprostřed mezi křivkami znázorňující hloubku PP.

Hloubka Panumova fúzního prostoru ve 4 metrech

Základní průměrné parametry Panumova prostoru, poloha horopteru a jejich směrodatné odchylky jsou shrnuty v Tab. 3. Graf 3 nám znázorňuje křivku Panumova prostoru určující jeho hloubku. Hloubka Panumova fúzního prostoru je ve 4 metrech největší a pohybuje se od 0,71 m do 39,30 m. Největší hloubka je v 5° vlevo a nejmenší v 10° vpravo. Hodnoty hloubky rostou mezi 0° až 5°. V rozmezí 5° až 10° hloubka klesá. Horopter se nachází pod rovinou fixačního bodu s odchylkou od 0,65 m až 7,84 m.

Hloubka Panumova prostoru ve 4 metrech						
úhel [°]		-10	-5	0	5	10
rozdvojení před	průměr [m]	-9,96	-51,12	-14,272	-28,648	-11,93
	SD[m]	1,13	1,97	2,060	1,497	1,51
spojení před	průměr [m]	-5,54	-10,35	-5,13	-4,52	-4,54
	SD [m]	1,43	2,29	1,76	1,71	1,41
průměr před	průměr [m]	-7,75	-30,74	-9,699	-16,5855	-8,24
	SD[m]	1,33	2,25	2,037	2,0018	1,61
rozdvojení za	průměr [m]	7,55	22,43	6,791	15,04	5,74
	SD [m]	1,13	1,66	2,066	1,67	0,93
spojení za	průměr [m]	5,34	7,66	3,10	6,42	3,329
	SD[m]	1,52	1,89	1,57	2,22	1,067
průměr za	průměr [m]	6,44	15,05	4,94	10,730	4,536
	SD [m]	1,34	1,88	1,93	2,023	1,060
Hloubka PP [m]		39,30	7,07	19,71	0,71	7,18
SD-hloubka [m]		68,51	85,91	39,99	86,93	29,25
Horoptyr [m]		-0,65	-7,84	-2,38	-2,93	-1,8
SD- horoptyr [m]		28,38	38,04	20,62	35,94	15,17

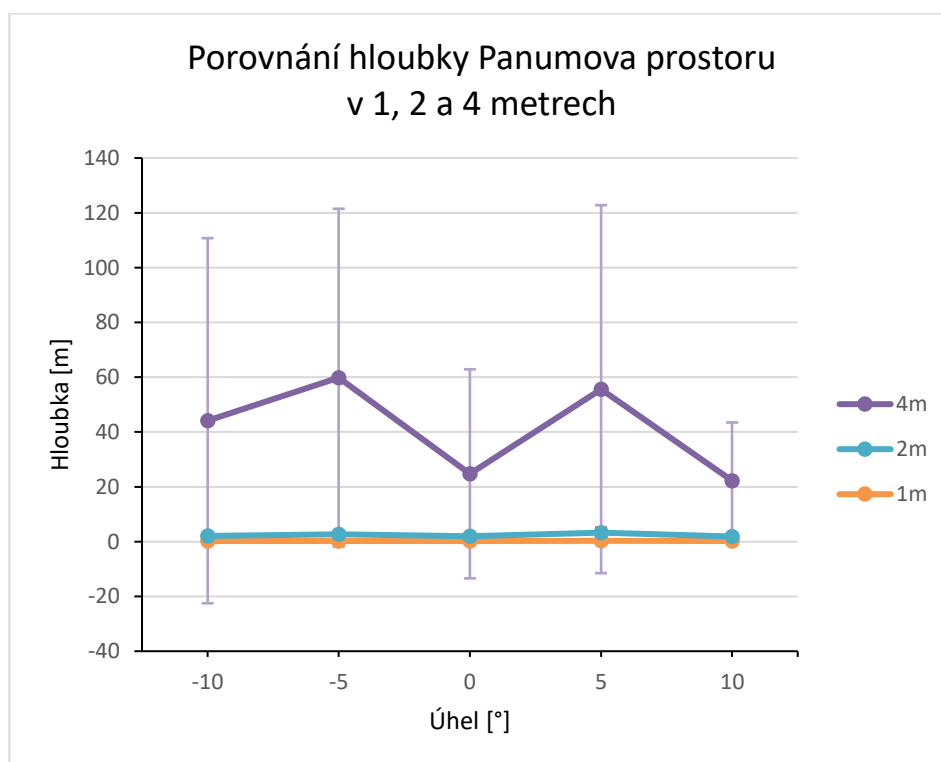
Tab. 3 – Průměrné hodnoty rozdělení a spojení, které udávají hloubku PP a SD v horizontální rovině pro vzdálenost 4 metry



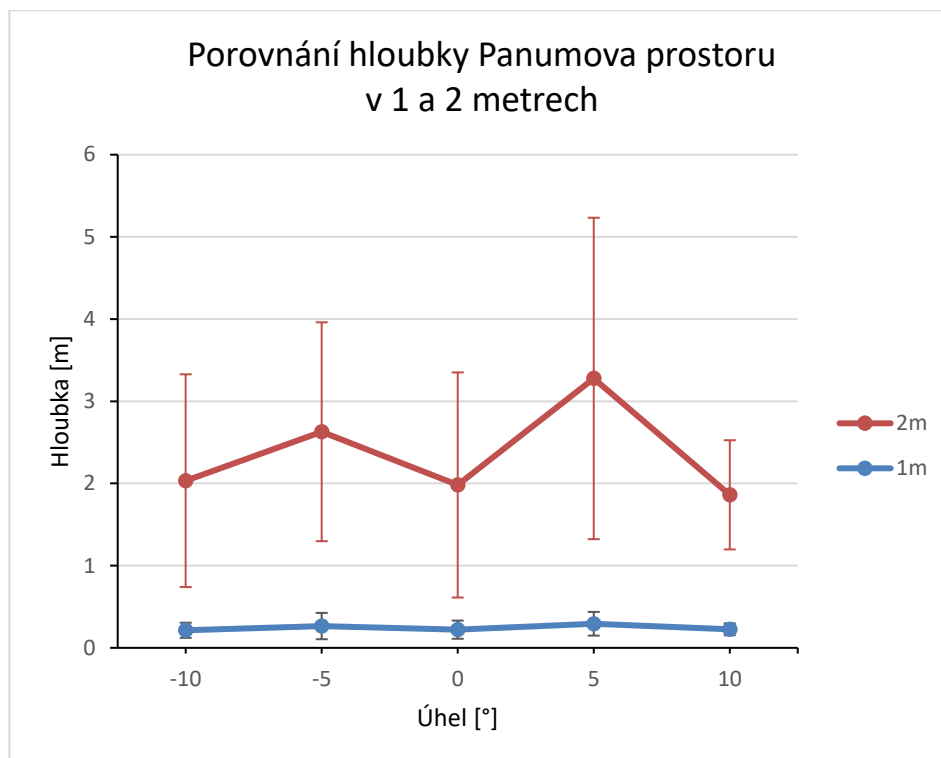
Graf 3 – Hloubka PP ve 4 metrech je ohraničena zelenou křivkou znázorňující hranici PP před FB a oranžovou křivkou znázorňující hranici PP za FB. Horoptyr je zobrazen v grafu modrou linií, která vede uprostřed mezi křivkami znázorňující hloubku PP.

Hloubka Panumova fúzního prostoru – porovnání vzdáleností a úhlů

Statisticky významný vliv na hloubku Panumova prostoru měla pouze vzdálenost ($p = 0,00038$). Vliv úhlu byl nevýznamný ($p = 0,28$) stejně jako interakce úhlu a vzdálenosti ($p = 0,29$). Po nutné korekci dat na sféricitu (Huynh-Feldtova korekce) má signifikantní vliv pouze vzdálenost ($p=0,0062$), vliv úhlu a interakce vzdálenosti a úhlu se po korekci na sféricitu zůstal nevýznamný ($p = 0,28$ a $p = 0,31$). Vliv vzdálenosti byl významný pouze mezi 2 a 4 metry. Vzhledem k tomu, že data pro vzdálenost 4 m jsou nepřesná (viz diskuze), byla analýza zopakována pouze pro vzdálenosti 1 m a 2 m. Opět byl prokázán významný vliv vzdálenosti ($p = 0,000047$). Vliv úhlu a interakce úhlu a vzdálenosti byl opět nevýznamný ($p=0,0797$ a $p= 0,1007$), nicméně p-hodnota pro úhel se blíží stanovené limitní hranici 0,05, přičemž vliv úhlu je mírně naznačen i v grafu. Z Grafu 4 a Grafu 5 je patrné, že křivka Panumova prostoru je podobná pro všechny vzdálenosti a liší se jen variabilitou dat.



Graf 4 – Hloubka horizontálního PP v 1, 2 a 4 metrech



Graf 5 – Hloubka horizontálního PP v 1 a 2 metrech

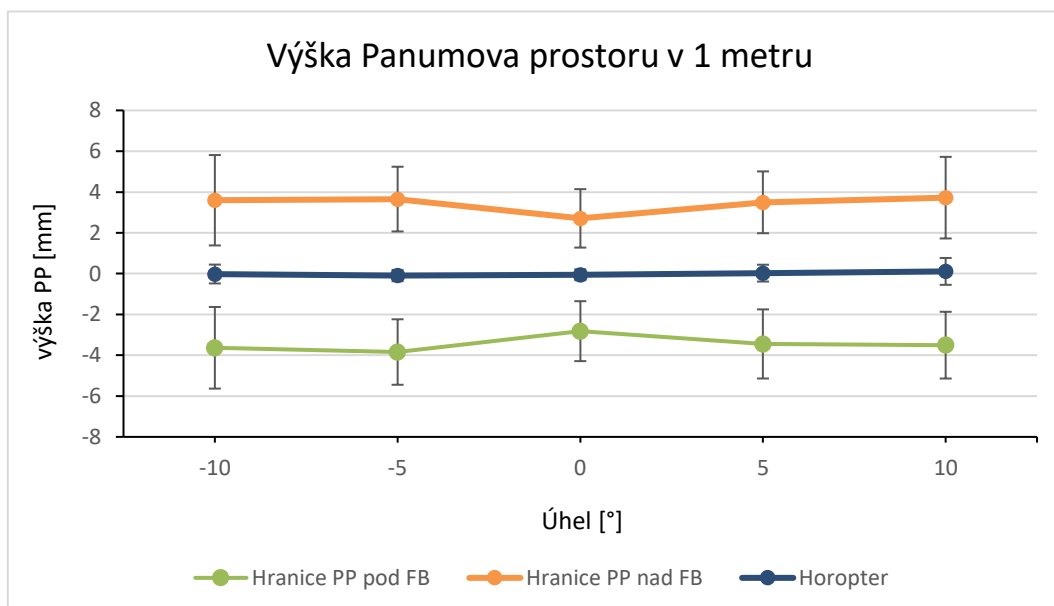
3.7.2 Výška horizontálního Panumova fúzního prostoru

Výška Panumova fúzního prostoru v 1 metru

Hodnoty průměrných výšek, polohy horopteru a jejich směrodatné odchylky jsou uvedeny v Tab. 4. Grafické schéma výšky Panumova prostoru je prezentováno v Graf 5. Výška horizontálního Panumova fúzního prostoru v 1 metru je nejmenší v 0° a činí 5,53 mm. Naopak největší výška Panumova prostoru se nacházela v 5° vlevo a nabyla hodnoty 7,49 mm. Hodnota výšky Panumova prostoru vzrostla z 0° do 5° . V rozmezí 5° až 10° vpravo mírně vzrostla, zatímco hodnoty v 5° až 10° vlevo mírně klesly. Křivka grafu znázorňující výšku Panumova prostoru se v periférii 5° a 10° oplošťovala. Horopter se nachází u roviny fixačního bodu s odchylkou 0,09 mm pod rovinou a 0,11 mm nad rovinou. Levá část a střed horopteru se nachází pod rovinou a pravá část nad rovinou fixačního bodu.

Výška Panumova prostoru v 1metru						
Úhel		-10	-5	0	5	10
rozdvojení dolu	průměr [mm]	-4,95	-4,92	-3,84	-4,30	-4,43
	SD[mm]	1,54	0,95	1,26	1,51	1,26
spojení dolu	průměr [mm]	-2,32	-2,76	-1,79	-2,59	-2,58
	SD [mm]	1,48	1,39	0,79	1,43	1,45
průměr dolu	průměr [mm]	-3,63	-3,841	-2,82	-3,45	-3,50
	SD[mm]	2,00	1,605	1,47	1,69	1,64
rozdvojení nahoru	průměr [mm]	4,80	4,66	3,710	4,22	4,65
	SD [mm]	1,84	0,84	0,897	0,93	1,53
spojení nahoru	průměr [mm]	2,39	2,65	1,71	2,77	2,7948
	SD[mm]	1,89	1,53	1,14	1,64	2,0017
průměr nahoru	průměr [mm]	3,60	3,65	2,71	3,50	3,724
	SD [mm]	2,21	1,59	1,43	1,51	1,999
Výška PP [mm]		7,23	7,49	5,53	6,94	7,23
SD- výška [mm]		3,14	1,95	1,53	2,37	2,49
Horoptyer [mm]		-0,02	-0,09	-0,05	0,03	0,110
SD- horoptyer [mm]		0,46	0,28	0,26	0,41	0,658

Tab. 4 – Průměrné hodnoty rozdělení a spojení, které udávají výšku PP a SD ve vertikální rovině pro vzdálenost 1 metru.



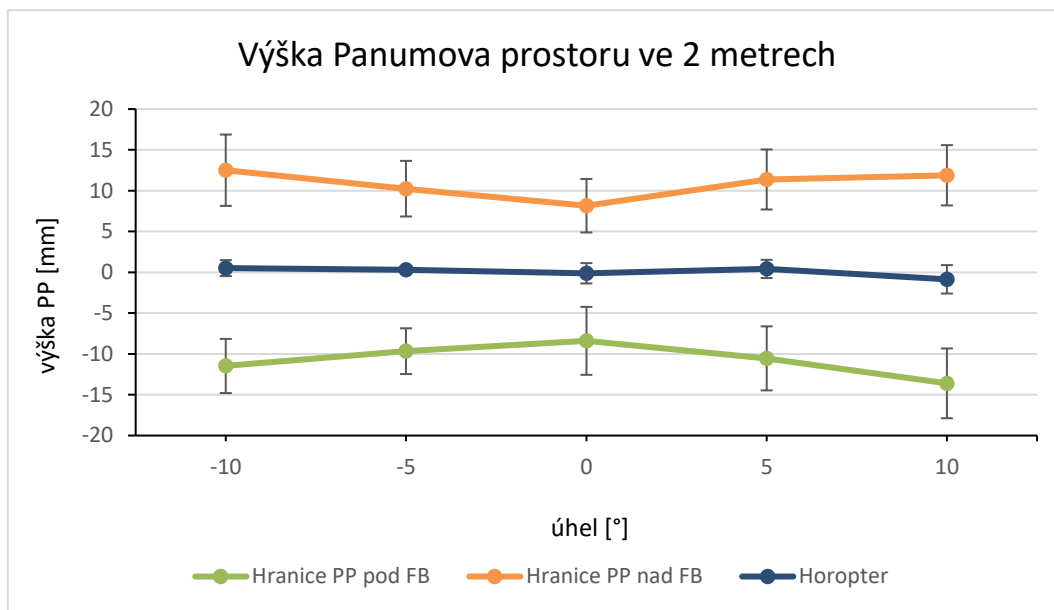
Graf 5 – Výška PP v 1 metru je ohraničena zelenou křivkou znázorňující PP pod FB a oranžovou křivkou znázorňující hranici PP nad FB. Horoptyer je zobrazen v grafu modrou linií, která vede uprostřed mezi křivkami znázorňující výšku PP.

Výška Panumova fúzního prostoru ve 2 metrech

Základní naměřené a z nich spočítané parametry výšky a jejich směrodatné odchylky uvádí Tab. 5. Průběh výšky Panumova prostoru graficky zachycuje Graf 6. Výška Panumova prostoru ve dvou metrech byla přibližně tvarově symetrická. Do periferie se výška zvětšovala. V 0° měl Panumův prostor minimální výšku 16,56 mm. V periferii v 10° vpravo se nacházela maximální výška 25,49 mm. Horopter nacházející se v rovině fixačního bodu se odchyloval o 0,8582 mm pod rovinou a 0,52 mm nad rovinou.

Výška Panumova prostoru ve 2 metrech						
úhel		-10	-5	0	5	10
rozdvojení dolu	průměr [mm]	-11,88	-10,10	-10,21	-11,34	-14,03
	SD[mm]	3,17	2,44	3,99	4,11	4,19
spojení dolu	průměr [mm]	-11,07	-9,22	-6,58	-9,74	-13,18
	SD [mm]	3,47	3,19	3,53	3,62	4,39
průměr dolu	průměr [mm]	-11,48	-9,659	-8,40	-10,54	-13,60
	SD[mm]	3,32	2,803	4,16	3,92	4,27
rozdvojení na-horu	průměr [mm]	13,21	11,48	9,25	12,49	13,51
	SD [mm]	3,68	2,62	3,14	3,19	2,23
spojení na-horu	průměr [mm]	11,81	9,02	7,065	10,26	10,26
	SD[mm]	4,93	3,69	3,085	3,85	4,16
průměr na-horu	průměr [mm]	12,51	10,25	8,16	11,37	11,89
	SD [mm]	4,37	3,41	3,28	3,68	3,69
Výška PP [mm]		23,99	19,91	16,56	21,92	25,49
SD- výška [mm]		6,41	4,96	5,69	5,93	5,17
Horopter [mm]		0,52	0,294	-0,12	0,42	-0,8582
SD- horopter [mm]		0,98	0,487	1,25	1,11	1,7398

Tab. 5 – Průměrné hodnoty rozdvojení a spojení, které udávají výšku PP a SD ve vertikální rovině pro vzdálenost 2 metry



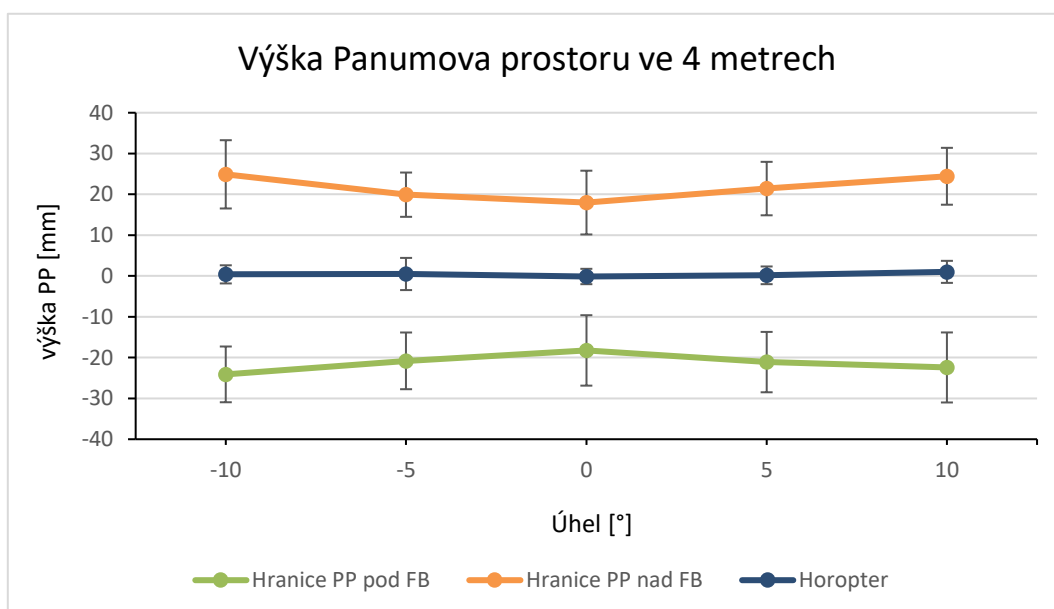
Graf 6 – Výška PP ve 2 metrech je ohraničena zelenou křivkou znázorňující hranici PP pod FB a oranžovou křivkou znázorňující hranici PP nad FB. Horopter je zobrazen v grafu modrou linií, která vede uprostřed mezi křivkami znázorňující výšku PP.

Výška Panumova fúzního prostoru ve 4 metrech

Parametry základních naměřených a spočítaných dat jsou vypsány v Tab. 6 i s jejich směrodatnými odchylkami. Grafické schéma výšky Panumova prostoru je znázorněné v Graf 7. Výška Panumova prostoru byla téměř symetrická a narůstala směrem do periferie. Nejmenší výška se nacházela v 0° s hodnotou 36,23 mm. Maximální výška byla naměřena v 10° vlevo a činila 49,02 mm. Horopter se nalézal v rovině fixačního bodu s odchylkou o 0,4 mm pod rovinou a o 1,0096 mm nad rovinou.

Výška Panumova prostoru ve 4 metrech						
úhel		-10	-5	0	5	10
rozdvojení dolu	průměr [mm]	-25,846	-21,67	-21,84	-22,077	-24,06
	SD[mm]	4,695	4,43	7,63	5,503	8,41
spojení dolu	průměr [mm]	-22,38	-19,92	-14,64	-20,12	-20,76
	SD [mm]	8,16	8,78	8,15	8,89	8,57
průměr dolu	průměr [mm]	-24,11	-20,80	-18,24	-21,101	-22,41
	SD[mm]	6,83	6,95	8,63	7,397	8,58
rozdvojení nahoru	průměr [mm]	29,077	23,02	21,47	23,99	27,596
	SD [mm]	7,496	3,81	6,34	7,67	5,198
spojení nahoru	průměr [mm]	20,731	16,827	14,50	18,85	21,27
	SD[mm]	7,078	5,054	7,67	7,24	7,14
průměr nahoru	průměr [mm]	24,90	19,92	17,99	21,42	24,43
	SD [mm]	8,36	5,43	7,81	6,55	6,97
Výška PP [mm]		49,02	38,87	36,23	42,52	46,85
SD- výška [mm]		11,56	10,05	13,99	9,62	10,07
Horoptyr [mm]		0,40	-0,4	-0,13	0,16	1,0096
SD- horoptyr [mm]		2,22	3,94	1,88	2,17	2,7001

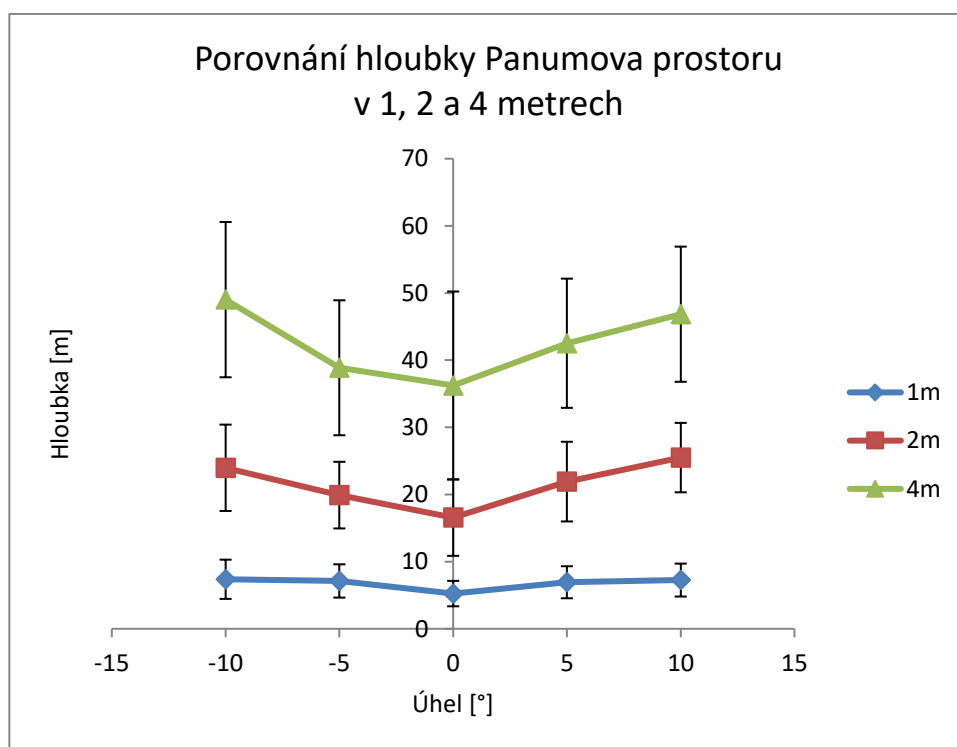
Tab. 6 – Průměrné hodnoty rozdělení a spojení, které udávají výšku PP a SD ve vertikální rovině pro vzdálenost 4 metry



Graf 7 – Výška PP ve 4 metrech je ohraničena zelenou křivkou znázorňující hranici PP pod FB a oranžovou křivkou znázorňující hranici PP nad FB. Horoptyr je zobrazen v grafu modrou linií, která vede uprostřed mezi křivkami znázorňující výšku PP.

Výška horizontálního Panumova fúzního prostoru – porovnání vzdáleností a úhlů

Výsledná data prokázala (po Huynh-Feldtově korekci na sféricitu) statisticky významný vliv jak vzdálenosti, tak i úhlu ($p < 0,00001$, $p = 0,0011$) na rozměr hloubky Panumova prostoru. Dále se prokázal významný vliv interakce vzdálenosti a úhlu ($p = 0,021$). Z grafu 8 je jasné patrné, že výška Panumova prostoru se zvětšuje se vzdáleností i úhlem. Změna hloubky v úhlu se zvětšuje s rostoucí vzdáleností, což odpovídá prokázané interakci vzdálenosti a úhlu.



Graf 8 – Výška horizontálního PP v 1, 2 a 4 metrech

3.8. Diskuze

Naměřené hodnoty hloubky v horizontální rovině Panumova prostoru rostly se vzdáleností pozorovatele od fixačního bodu dle předpokladů. S rostoucí hloubkou však rostla i variabilita dat a ve čtyřech metrech již narůstala až do nepřiměřeně vysokých hodnot. Průměrná hloubka Panumova prostoru se ve čtyřech metrech pohybuje dle dat od 0,71 m v 5° vpravo až po 39,3 m v 10° vlevo. O velké variabilitě dat svědčí i směrodatná odchylka, která několikanásobně převyšuje stanovenou hloubku. Tyto abnormální výsledky jsou dle mého zapříčiněny hodnotou rozposunutí pohybující se okolo hodnoty očního rozestupu (PD), kdy ve jmenovateli vzorce pro výpočet hloubky vychází hodnota blížící se nule nebo dokonce záporná. Pokud je totiž rozposunutí větší než je PD, osa obrazu dopadajícího obrazu směrem od pozorovatele diverguje. Vzhledem k pevné hodnotě rozposunutí pro všechny subjekty a značnému rozsahu PD nebylo možné tomuto zabránit. Měření Panumova prostoru by bylo tedy lepší provádět u lidí s většími hodnotami PD.

Růst hloubky u horizontálního Panumova prostoru s rostoucím úhlem se potvrdil jen částečně, a to v intervalu 0° až 5°, od 5° do 10° byl zaznamenán pokles. Tyto změny však nejsou statisticky významné. Pokles hloubky v periférii neodpovídá informacím získaných v literatuře [29]. Dle teorie by měl Panumův prostor růst směrem do periferie, a to z důvodu ubývajících hustoty světločivých elementů na sítnici. Je možné, že ve vzdálenosti 10° již některé aproximace, použité při odvození vzorců použitých na výpočet rozsahu Panumova prostoru, nebyly dostatečně přesné. Další možnou příčinou pozorovaného jevu by mohla být i zhoršená viditelnost stimulu – zraková ostrost směrem do periferie klesá a pod úhlem 10° již mohla být pozice stimulu (o konstantní velikosti při dané vzdálenosti referenční roviny) hůře rozpoznatelná.

Hloubka Panumova horizontálního prostoru						
		-10	-5	0	5	10
1 metr	Hranice PP před FB	-0,094	-0,12	-0,11	-0,14	-0,11
	Hranice PP za FB	0,12	0,14	0,11	0,15	0,11
	Hloubka PP	0,14	0,13	0,12	0,104	0,16
2 metry	Hranice PP před FB	-0,75	-1,06	-0,699	-1,10	-0,67
	Hranice PP za FB	0,83	0,97	0,74	1,28	0,86
	Hloubka PP	1,82	2,36	1,76	2,98	1,64
4 metry	Hranice PP před FB	-7,75	-30,74	-9,70	-16,59	-8,24
	Hranice PP za FB	6,44	15,05	4,94	10,73	4,54
	Hloubka PP	39,30	7,07	19,71	0,71	7,18

Tab. 7 – Hodnoty hloubky uvedené v m

Ve vertikální rovině Panumova prostoru roste výška směrem do periferie a s rostoucí vzdáleností fixačního bodu a zde se tedy stanovené předpoklady růstu plně potvrdily. Vzhledem k vertikálnímu směru rozposunutí stimulu neměla jeho velikost ve srovnání s PD vliv na měření; zhoršení výsledků a nárůst variability ve vzdálenosti 4 m nebyl pozorován v takové míře, jako u měření hloubky. Oproti horizontálnímu měření nebyl pozorován výrazný pokles v intervalu 5° až 10°. Subjektivně figuranti hlásili zřetelně lepší viditelnost vertikálního rozposunutí oproti horizontálnímu, což může mít příčinu v selektivní rozlišovací schopnosti vzhledem k orientaci úseček.

Výška Panumova horizontálního prostoru						
		-10	-5	0	5	10
1 metr	Hranice PP pod FB	-3,63	-3,84	-2,82	-3,45	-3,504
	Hranice PP nad FB	3,598	3,65	2,709	3,496	3,72
	Výška PP	7,23	7,49	5,53	6,941	7,23
2 metry	Hranice PP pod FB	-11,48	-9,66	-8,397	-10,54	-13,604
	Hranice PP nad FB	12,51	10,25	8,16	11,37	11,89
	Výška PP	23,99	19,91	16,56	21,92	25,49
4 metry	Hranice PP pod FB	-24,11	-20,80	-18,24	-21,10	-22,41
	Hranice PP nad FB	24,90	19,92	17,99	21,42	24,43
	Výška PP	49,02	38,87	36,23	42,52	46,85

Tab. 8 – Hodnoty výšky uvedené v mm

Při porovnání rozsahu Panumova prostoru ve vertikální a horizontální rovině jsme došli k výsledkům, že Panumův prostor ve vertikální rovině je několikanásobně menší a jeho hodnoty se pohybují v milimetrech. Zatímco Panumův prostor v horizontální rovině je větší a jeho velikost se pohybuje v metrech. Z tohoto závěru vyplývá, že průřez Panumova prostoru vertikální rovinou bude mít eliptický tvar.

Veškeré studie zabývající se Panumovým prostorem prezentují své výsledky v minutách, avšak neudávají metodiku přepočtu dat na jednotky délky. Při snaze přepočítat hodnoty hloubky Panumova prostoru jsem vždy došla k dosti odlišným výsledkům. Při přepočtu hodnot výšky Panumova prostoru se data shodovala s mými předpoklady. Další problém, se kterým jsem se setkala při porovnání dat se studiemi, se týká nedostatečných informací o měření. Ve studiích nebyla často uvedena vzdálenost, na kterou byl Panumův prostor měřen. Pravděpodobně nebyla uvedena z důvodu předpokladu, že rozsah Panumova prostoru bude vždy úhlově stejný. Avšak při přepočtu hodnot výšky Panumova prostoru ve vertikální rovině data ukazovala růst jak délky, tak pozorovacího úhlu, což neodpovídá danému předpokladu.

			-10	-5	0	5	10
Výška	1m	[mm]	7,23	7,49	5,53	6,94	7,23
		[']	24,86	25,76	19,00	23,86	24,85
	2m	[mm]	23,99	19,91	16,56	21,92	25,49
		[']	41,23	34,21	28,46	37,67	43,82
	4m	[mm]	49,02	38,87	36,23	42,52	46,85
		[']	42,12	33,40	31,13	36,54	40,26

Tab. 9 – Hodnoty výšky Panumova horizontální prostoru v mm a minutách

Derek Fender a Bela Julesz měřili horizontální Panumův prostor v horizontální a vertikální rovině pomocí aparatury, která rozposunuje stimul pomocí prizmat. Posunující se stimul se pomocí uzávěrky zobrazoval přerušovaně, aby nedocházelo k adaptaci akomodace a konvergence. Fender a Julesz prováděli horizontální měření pouze před fixačním bodem, rozdvojení nastalo v 65' s odchylkou 14' a spojení ve 42' s odchylkou 10'. Vertikální měření prováděli pouze nad fixačním bodem, rozdvojení nastalo 16' s odchylkou 2' a spojení 8,7' s odchylkou 0,2'. Výsledky mého měření se shodují s jejich

v poznatku, že hodnota spojení je menší než hodnota rozdvojení a výška Panumova fúzního prostoru je ve vertikální rovině několikanásobně menší než hloubka v horizontální rovině. [30]

Damin Quin, Takamatsu Mamoru a Nakashima Yoshio v Japonsku měřili Panumův prostor pomocí 3D technologie na vzdálenost 70 cm v 0° (pohled přímo vpřed). Studie se účastnili 3 subjekty. Panumův prostor měřili v 8 směrech vždy po 45° . Výsledné hodnoty ukazovali, že rozsah Panumova prostoru před, nad a pod Panumovým prostorem činí 10,7' a rozsah za fixačním bodem má hodnotu 16'. Z výsledků vyplývá, že Panumův areál tvoří elipsu, neboť rozměr horizontálního Panumova prostoru ve vertikální rovině je menší než v horizontální rovině. Podobný závěr vyplývá i z měření v této studii. Eliptický tvar Panumova prostoru byl v jejich studii nazálně decentrovaný, takže hloubka za fixačním bodem je větší. V této studii však byly parametry hloubky symetrické, takže elipsa nebyla decentrovaná. [28]

3.9. Závěr

Aktivní 3D technologie se ukázala jako vhodná metoda pro měření Panumova horizontálního prostoru v blízkých vzdálenostech. Její hlavní výhodou je možnost volby velmi krátkých kroků rozestupu a nenáročnost na prostor. Hlavními poznatky studie jsou:

- V horizontální rovině Panumova prostoru byl prokázán vliv vzdálenosti, a tedy rostoucí hodnoty hloubky, při zvyšující se vzdálenosti fixačního bodu. Vliv úhlu byl pouze naznačen mezi 1 a 2 metry po odstranění hodnot ze 4 metrů, z důvodu ovlivňování statistického výsledku svou velkou variabilitou dat. Vliv interakce vzdálenosti a úhlu nebyl zjištěn.
- Ve vertikální rovině byl potvrzen vliv vzdálenosti i úhlu na výšku Panumova prostoru. To znamená, že hodnoty výšky Panumova prostoru rostou se vzdáleností fixačního bodu a směrem do periferie. Také interakce vzdálenosti a úhlu se ukázala být významná.
- Ve studii se kromě vzrůstající hloubky a výšky v závislosti na vzdálenosti a periférii prokázala skutečnost, že hodnota spojení obrazů je menší než hodnota určující rozdvojení obrazu.
- V horizontální rovině se se vzdáleností zvyšovala i variabilita dat, a tak s rostoucí vzdáleností ubývala přesnost měření. Ve čtyřech metrech se již hodnoty hloubky pohybovaly v abnormálních velikostech. Tento jev byl způsoben jmenovatelem ve vzorci pro výpočet hloubky, kde se jeho hodnota pohybovala kolem nuly.
- V rámci studie se potvrdila vhodnost zvolené metody pro měření Panumova prostoru pro kratší vzdálenosti. Pro přesnější měření ve větších vzdálenostech je zapotřebí úprava vzorce pro výpočet hloubky, aby bylo možné měřit i ve větších vzdálenostech.

4. Použitá literatura

- [1] AUTRATA, R., ČERNÁ, J. *Nauka o zraku*. Brno: Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2006, ISBN 80-7013-362-7
- [2] ROZSÍVAL P et al. *Oční lékařství*. Galén, 2006 Praha, ISBN 80-7262-404-0
- [3] KUCHYŇKA P. a kol. *Oční lékařství*. Grada, 2016 Praha, ISBN 978-80-247-5079-8
- [4] PLUHÁČEK F. *Normální binokulární vidění – výukové materiály k předmětu Binokulární vidění*, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc
- [5] EVANS BRUCE J. W. *Pickwell's Binocular vision anomalies*, fifth edition, Butterworth-Heinemann Elsevier, 2007 Edinburgh, ISBN 978-0-7506-8897-0
- [6] STIDWILL D., FLETCHER R. *Normal binocular vision: theory, investigation and practical aspects*, Wiley- Blackwell, 2011 Blackwell, ISBN 978-1-4051-9250-7
- [7] BENJAMIN J. W. *Borish's Clinical Refraction*, second edition, Butterworth-Heinemann Elsevier, 2006 Missouri, ISBN 07-506-7524-1
- [8] WRIGHT K. W., SPIEGEL, P. H., THOMPSON L. *Handbook of pediatric strabismus and Amblyopia*, Springer, 2006, ISBN 978-0-387-27925-1
- [9] GROSVENOR T. *Primary care optometry*, fifth edition, Butterworth-Heinemann Elsevier, 2007 Missouri, ISBN 978-0-7506-7575-8
- [10] TUNNACLIFFE A. H. *Introduction to Visual Optics*, ABDO College of education, 1993, ISBN 978-0900099281
- [11] QIN D., TAKMATSU M., NAKASHIMA Y. *Measurement for the Panum's fusional area in retinal fovea using a three-dimension display device*, Journal of light & visual environment, Vol. 28, 2004 Toyama, pp. 12-17, ISSN: 1349-8398
- [12] HOWARD P. A.. *The geometric horopter*. Vision Research, Vol. 51, 2011, pp. 397-399, ISSN: 0042-6989

- [13] VOJNIKOVIĆ. B., TAMAJO E. *Hopters- Definition and construction*. Collegium Antropolologicum, Vol. 37, 2012, pp. 9-12, ISSN: 1848-9486
- [14] GLANVILLE A. D. *The psychological significance of the hopter*. The American Journal of Psychology, Vol. 45, 1933, pp. 592-627, ISSN: 0002-9556
- [15] HOWARD P. A. *Potential hazards of viewing 3-D stereoscopic television, cinema and computer games: a review*. Ophthalmic and physiological optics, Vol. 31, 2011, pp. 111-122, ISSN 0275-5408
- [16] OGLE K. N. *An analytical treatment of the longitudinal hopter; its measurement and application to related phenomena, especially to the relative size and shape of the ocular images*, Journal of optical society of America, 1932, Hanover, ISSN:1520-8532
- [17] PLUHÁČEK F. *Analýza fixační disparity – výukové materiály k předmětu Nestrabické poruchy binokulárního vidění*, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc
- [18] SCHEIMAN M., WICK B. *Clinical management of binokulár vision*, third edition, Wolters Kluwer, 2008 Philadelphia, ISBN 978-0-7817-7784-1
- [19] PLUHÁČEK F. *Výšetřovací postupy BV a akomodace – výukové materiály k předmětu Korekce zraku 2*, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc
- [20] GEDALYAH. *The Difference between 3D Stereograms and Anaglyphs* [online]. Snapily 2017 [2017-3-29]. Dostupné z: <http://www.snapily.com/blog/>
- [21] CONDAX P. *Stereoscope* [online]. North Carolina School of Science and Mathematics: 2000 [2017-2-8]. Dostupné z: <http://courses.ncssm.edu/>
- [22] DIOPTRA, a.s. *Vergenční stereoskop – VS – 03 – D 249B* [online]. Dioptra: 2017 [2017-4-4]. Dostupné z: <http://www.dioptra.cz/>
- [23] HUŠÁK M. *3D technologická knihovna - Anaglyf (červeno-modré 3D brýle)* [online]. Gali-3D: 2011 [2017-3-12]. Dostupné z: <http://cs.gali-3d.com/>

- [24] RICHTERA L.. *Využití 3D vizualizace pomocí anaglyfu k praktickým účelům* [online]. CHEMPOINT: 2012 [2017-3-29]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/>
- [25] BENEDIKOVIČ J. *Jak funguje 3D technologie* [online]. Cinemo: 2011 [2017-3-21]. Dostupné z: <http://www.cinemo.cz/>
- [26] POLÁŠEK R. *Stereoskopie - jak funguje 3D kino* [online]. Stahuj.cz: 2009 [2017-3-29]. Dostupné z: <http://magazin.stahuj.centrum.cz/>
- [27] REICHL J., VŠETIČKA M.. *Pasivní technologie* [online]. Encyklopedie fyziky: 2017 [2017-3-29]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [28] MITCHELL D. E. *A review of the concept of “ Panum’s fusional areas“*, Optometry & Vision Science, Vol. 43, 1996, pp. 387-401, ISSN: 1538-9235
- [29] FENDER D., JULESZ B. *Extension of Panum’s fusional area in binocularly stabilized vision*, Journal of the optical society of america, Vol. 57, 1967, pp. 819-830, ISSN:1520-8532
- [30] KVAPILÍKOVÁ K. *Práce a vidění*, Brno-IDV PZ, 1999, ISBN 80-7013-257-2
- [31] INSTITUT INTERMÉDIÍ *Paralaxa* [online]. ČVUT: 2010 [2017-3-4]. Dostupné z: <https://vyuka.iim.cz/>