



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Természettudományi Kar

Atomfizika Tanszék

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Egészségügyi mérnök MSc

Egérszemet és vizuális agyi központot optimálisan stimuláló készülék modellezése

Készítette

Baumgärtner Margaréta

Konzulens

Dr. Maák Pál

2023

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	3
2. Az egér látásának jellemzői	4
2.1. A szem anatómiája.....	4
2.2. A látás jellegzetességei	5
3. Célkitűzés.....	7
4. Módszerek.....	8
4.1. Szemmodellek paraméterei	8
4.2. Vetítőrendszerek paraméterei	9
4.3. Analízis módszerei.....	11
5. Tanulási folyamatot vizsgáló kísérletek	13
6. Eredmények	15
6.1. Szem- és fejmodell.....	15
6.2. Látótér vizsgálata	15
6.3. Vetítőrendszerek távolságfüggése	17
6.4. Vetítőrendszerek moduláció-átviteli függvénye.....	20
6.5. Fázislemez vastagságának hatása	21
7. Az eredmények elemzése.....	22
7.1. Szem- és fejmodell.....	22
7.2. A szemmodell korlátjai, fejlesztési lehetőségek	22
7.3. Vetítőrendszerek	23
8. Összefoglalás	26
Irodalomjegyzék	27

1. Bevezetés

A természetes folyamatok során zajló agyi funkciók jobb megértéséhez elengedhetetlenek a viselkedéssel kapcsolatos, a látás neurofiziológiáját vizsgáló kísérletek. Az egér ezeknek elterjedten alkalmazott modellállata.

A vizsgálatok általános sémája, hogy az állatok szabadon mozognak, miközben vizuális információt szereznek környezetükről, ami lehet valós vagy digitális. Utóbbi esetben egy sík vagy homorú képernyőn vetítik az információt a kísérleti állat szemébe. Az ilyen kísérletek azonban két fő nehézséggel rendelkeznek: egyrészt a szabad mozgás megnehezíti az agy vizsgálatát, másrészt az egerek, sok más állathoz hasonlóan, nem érzékelik megfelelően a képernyők képeit, agyuk nem képes térbeli információt előállítani a síkból, ezért ezek az eszközök számukra nem alkalmasak a valós világ reprezentációjára.

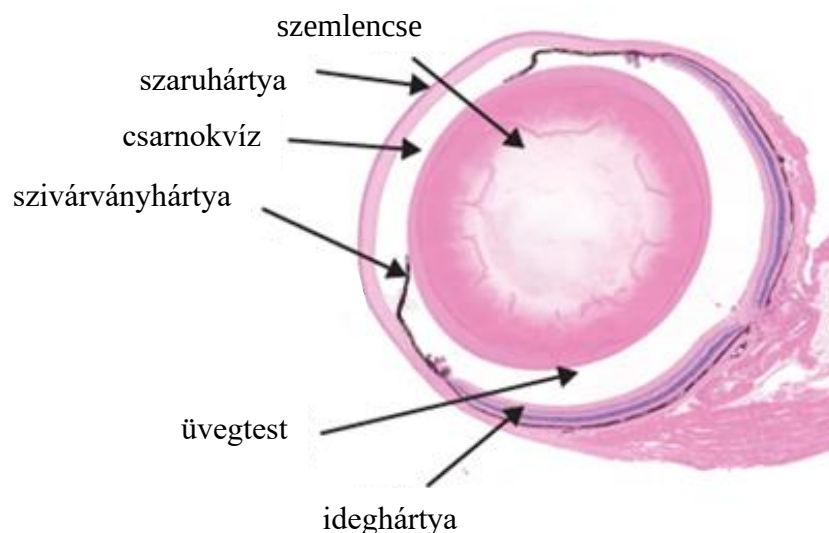
Ezen problémákra megoldást kínálhat egy olyan virtuális valóság alapú (VR) rendszer, amely két kisméretű képernyőn két különböző képpel közvetlenül stimulálja az egér szemét, rekonstruálva a binokuláris látást és lehetővé téve a térbeli mélységérzékelést. A rendszer a teljes látóteret lefedi, a környezetet kizárja, így teljes kontrollt biztosít afelett, hogy az állatot milyen vizuális ingerek érik. Mivel egy ilyen rendszerben a látott információ külsőleg változtatható, az egér fejének rögzítése nem limitálja a kísérleteket, a megfelelő minőségű adatfelvételt azonban jelentősen megkönnyíti. Tudományos diákköri munkám során ezen rendszer optikájának továbbfejlesztésében veszek részt.

2. Az egér látásának jellemzői

Az egér vizuális rendszerének tulajdonságairól számos kutatás és publikáció számol be. Ezek között azonban előfordulnak olyanok, amelyek eredményei a módszerek és a körülmények eltérései miatt nincsenek összhangban vagy egyenesen ellentmondanak egymásnak, például abban a kérdésben, hogy az egér rövid- vagy távollátó-e [1]. Az alábbiakban az egér látásának azon sajátosságait foglalom össze, amelyeket a modell megalkotása során figyelembe vettem.

2.1. A szem anatómiája

Az emlősök szemének szerkezete alapvetően azonos, bennük négy, különböző törésmutatójú fénytörő közeg található (2.1. ábra). Ezek előlről hátrafelé (anterior-posterior irányban) haladva a szaruhártya (cornea), a csarnokvíz (humor aqueus), a szemlencse (lens oculi) és az üvegtest (corpus vitreum). Optikai szempontból jelentős még a pupilla, ami a szembe jutó fény mennyiségének szabályozásáért felelős. A fénysugarak optimális esetben az ideghártya (retina) legkülső rétegében található fotoreceptorokra fókuszálódnak, amelyek érzékelik a fényt és továbbítják az ingerületet a központi idegrendszer felé.



2.1. ábra: Az egér szemének főbb részei anatómiai metszeten [2]

2.2. A látás jellegzetességei

A retina három különböző típusú fotoreceptort tartalmaz: középhullámhossz-érzékeny (érzékenységi maximum (továbbiakban: max.): 508 nm) és ultraibolya-érzékeny (max.: 360 nm) csapokat, valamint pálcikákat (max.: 498 nm) [7]. Az egerek tehát érzékelik az UV-fényt, a nagyobb hullámhosszú (>600 nm), vörös fényre viszont nagyságrendekkel kevésbé érzékenyek, mivel nem rendelkeznek rá érzékeny fotoreceptorral. A csapok és a pálcikák sűrűsége a retina centrális részén a legnagyobb, és a perifériák felé csökken, azonban nem különíthető el az éleslátás helye (fovea centralis) [7].

A szemlencse a szem térfogatának mintegy 75%-át elfoglalja [3], gömbölyű és merev, ezért nem képes alakját és törőerejét megváltoztatni, nem lehetséges az akkomodáció [4]. Ennek ellensúlyozásaként a szem mélységélessége nagy, tehát nagy tárgytávolság képezhető le közel azonos minőségben [5-6].

Állatkísérletek és optikai vizsgálatok is kimutatták, hogy az egér szemének képalkotása rossz minőségű, távol van a diffrakciókorlátosságtól. A retinán megjelenő kép minőségét a szem optikai aberrációi nagy mértékben rontják: pozitív szférikus aberráció, asztigmatizmus és nagy mennyiségű kóma van jelen [5]. Ugyanakkor a térbeli felbontás idegileg is korlátozott, az egér idegrendszere nem képes finom térbeli információt feldolgozni [6]. Evolúciósan nem indokolt, hogy a szem optikája tovább fejlődjön, és ennél nagyobb felbontást tegyen lehetővé. Tehát a rágcsálók szemének gyenge képalkotása az idegrendszer korlátozott képességeihez illeszkedik.

A szemek az egér fejének oldalsó részén helyezkednek el, pupilláik $51,7^\circ$ -os szögben kifelé fordulnak [8]. Egy-egy szem széles látószögtartományban érzékel (monokuláris látótér: 160° [9]), azonban a szemek nagy divergenciája miatt mindkét szemükkel csak egy keskeny tartományt látnak a fej elülső részén (binokuláris látótér: 40° [9]). A szemek nyugalmi helyzetben a vízszintes síkhoz képest 15° -kal felfelé fordulnak [10].

A szemek összetett mozgásokra képesek, amelyek egy része nem konjugált [11], ekkor egyidejűleg különböző irányba mozognak. Ezek a mozgások és a tekintetváltás a fejmozgásokkal erősen csatoltak, együtt játszanak szerepet a környezet megfigyelésében. A fej rögzítése esetén a nagy kiterjedésű és nem konjugált szemmozgások teljesen elvesznek, egyedül kismértékű, horizontális szemmozgások figyelhetőek meg [11], amelyek nem okoznak jelentős változást a látótérben. A kísérleteket tehát megkönnyíti az állatok fejének stabilizálása. Jelen vannak olyan szemmozgások is, amelyek az állat

mozgásával függenek össze, ilyenkor a pupillák egyidejűleg egymáshoz közelítenek vagy egymástól távolodnak. Egy helyben állva a szemek a teljes látótér növelésének érdekében divergensek, futás közben pedig a szemek konvergálnak, hogy megnöveljék a binokuláris látóteret [8].

3. Célkitűzés

Tudományos diákköri munkám során megismerkedtem az optikai tervezés elméletével és gyakorlatával, az Ansys Zemax OpticStudio szoftver használatán keresztül. Ezen tudás birtokában részt veszek az egér szemét stimuláló megvilágítórendszerek optikájának továbbfejlesztésében.

A dolgozatban bemutatott tevékenységem során céljaim voltak:

- az egér szemének optikáját és látásmechanizmusát leíró irodalmi adatok gyűjtése, feldolgozása és alkalmazása az optikai tervezés során,
- nemsorrendi optikai modell létrehozása az egér szeméről, valamint a korábban megalkotott sorrendi optikai modell fejlesztése,
- a szem képalkotási minőségének vizsgálata az elkészített modellek használatával,
- korábban megtervezett megvilágítórendszerek optimalizálása, toleranciaanalízise.

A kutatás a BME Atomfizika Tanszékén működő Biophysics of visual systems, perception and information processing (Vizuális rendszerek biofizikája, érzékelése és adatfeldolgozása) kutatócsoportban folyik, amely a BME Szociológia és Kommunikáció Tanszékével együttműködésben a szem optikáját és érzékelési jellemzőit vizsgálja. A projekt során kutatócsoportunk együttműködik a Brain Vision Center-rel (Agy- és Látáskutatási Központ), célunk a tanulási mechanizmus idegi hátterének megismerése, kísérleti állatok látásmechanizmusa és az ezekhez kapcsolódó agyi folyamatok vizsgálata által.

4. Módszerek

Az optikai rendszerek tervezése, optimalizálása és analízise rendszerint számítógépes szoftverekkel zajlik, az általam használt Ansys Zemax OpticStudio az egyik legelterjedtebben alkalmazott ilyen eszköz. A program két fő működési móddal rendelkezik: vele sorrendi, illetve nemsorrendi sugárátvezetés végezhető. Sorrendi sugárátvezetés olyan optikai rendszerek vizsgálatára alkalmas, amelyekben a fénysugarak a felületeken jól meghatározott sorrendben haladnak át, alapvetően a szemre is ez jellemző. Nemsorrendi sugárátvezetés esetén a fénysugarak áthaladási sorrendje a rendszer objektumain tetszőleges, minden sugárra egyedileg meghatározott, ezáltal vizsgálhatóak felhasadási, szóródási és visszaverődési jelenségek.

4.1. Szemmodellek paramétereit

A szemmodellt Remtulla [12] alapján készítettem, aki meghatározta az egérszem egyes részeinek optikai paramétereit: vastagságot, törésmutatót több hullámhosszon, görbületi sugarat és kúpszelet-együtthatót (4.1. táblázat). Az egyes fénytörő közegeket a Zemax sorrendi módjában gömbfelületek reprezentálják.

szem része	felszín	vastagság (mm)	görbületi sugár (mm)	kúpszelet-együttható	törésmutató 598 nm-en
szaruhártya	anterior	0,093	1,457 *	1,215	1,403
	posterior		1,404	1,075	
csarnokvíz	-	0,452	-	-	1,3353
szemlencse	anterior	2,032 *	1,247*	0,311	1,6665 *
	posterior		-1,084	0,416	
üvegtest	-	0,558 *	-	-	1,3343 *
retina	anterior	0,237 *	-1,570 ^x	1,674	1,3343
	posterior		-1,608 ^x	1,149	

4.1. táblázat: A szem egyes komponenseinek optikai paramétereit [12] és hatásuk mértéke a fénytörési hibára [13]: * erős befolyás, jelöletlen: kis mértékű befolyás, ^x nincs befolyás. A vastagságok az optikai tengely mentén értendők, a pozitív görbületi sugarak balról domború, a negatívak balról homorú felületeket jelölnek. A kúpszelet-együttható a felület aszféríkusságáról ad információt, értéke a fél nagytengely és a fél kistengely hányadosából 1-et kivonva számítható ki [12]: 0 és 1 között ellipszis, 1 felett hiperbola alakú felületet jelöl.

A modellben a pupilla tölti be az apertúrastop szerepét, korlátozza a szembe jutó fénysugarakat. Átmérője sötétben körülbelül 2 mm, nappali fényben 1 mm [14]. A szemmodellek képalkotását több pupillaátmérővel is vizsgáltam, a vetítőrendszereknél pedig az alkalmazott távolságoktól függően kisebb átmérőket is megengedtem, mivel a pupilla szűkül, ha közelebbi tárgyra kell fókuszálni [1]. A retina hátsó felszínén helyezkedik el a detektor, követve annak görbült felszínét.

Azért, hogy az egérszem képalkotásának vizsgálatánál a fényszóródás esetleges hatásai is figyelembevehetőek legyenek, elkészítettem a modell nemsorrendi változatát. A Zemax nemsorrendi módjában felületek helyett objektumokból épülnek fel az optikai rendszerek. A szem modelljében egyszerű lencsét alkalmaztam, a pupillát pedig egy gyűrű alakú síkfelület reprezentálja, amelynek anyaga elnyeli a fényt. A nemsorrendi szemmodell alapján egy, a két szemet az anatómiai viszonyoknak megfelelő elhelyezésben tartalmazó fejmodellt is készítettem.

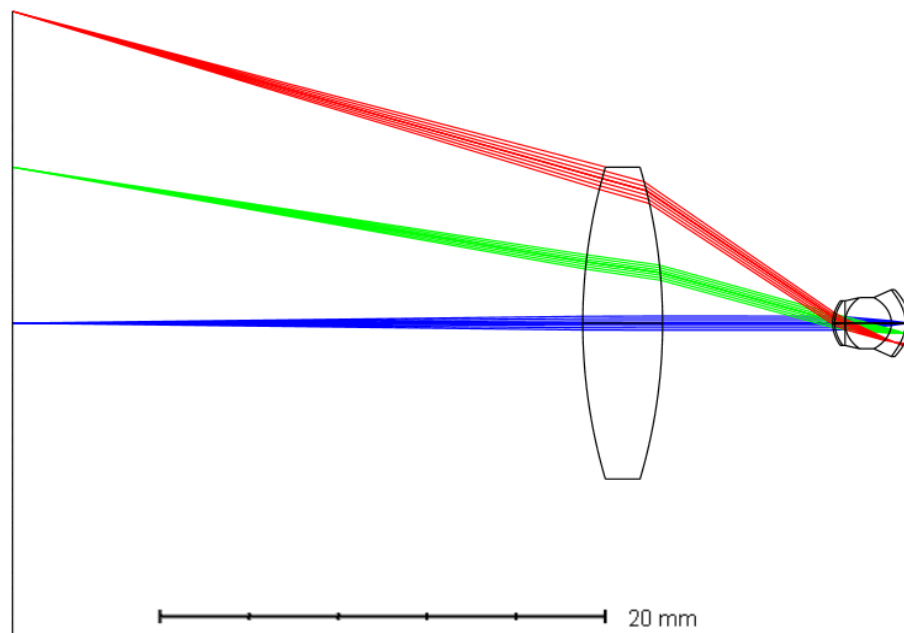
A modellek képalkotásának vizsgálatához az egér látásának optimális távolságába (10 cm-re a szaruhártya felületétől [15]) függőleges síkban pontszerű fényforrásokat helyeztem el, amelyek különböző szögekben ($0-85^\circ$ között) sugároztak a szembe. Hullámhosszaikat a 3 fotoreceptortípus érzékenységi maximumainak megfelelően választottam (508, 498, 360 nm [7]).

4.2. Vetítőrendszerek paraméterei

Több lehetséges, vizuális stimulációra szolgáló (korábban megtervezett) vetítőrendszer-elrendezést is vizsgáltam az egyes rendszerek optimális működési paramétereinek meghatározása, illetve teljesítményük összehasonlítása érdekében. A rendszerek vizsgálata sorrendi sugáratvezetéssel történt.

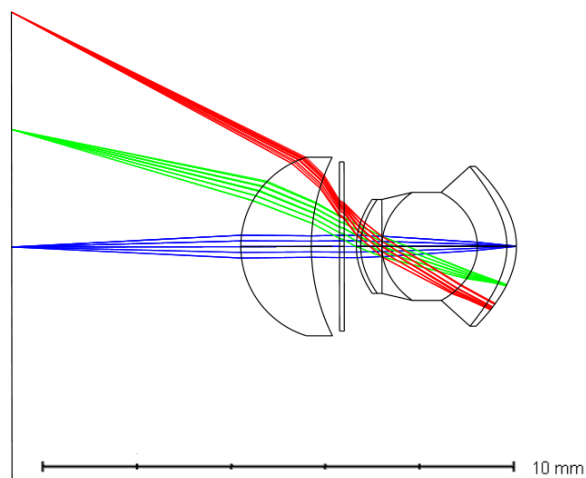
Az egyik vetítőrendszer nagyobb méretű képernyőt (1440x1440 pont felbontás, 51x51 mm kijelző), valamint a fénysugarak fókuszálására egy kétszeresen domború lencsét tartalmaz, mindkét felületének görbületi sugara 25,23 mm (4.1. ábra). A lencse vastagsága 3,5 mm, átmérője 14 mm, anyaga N-BK7, ami a lencsék leggyakrabban alkalmazott üveganyaga. A rendszer kompakt méretének megőrzése érdekében a lencse és a képernyő távolsága maximum 25 mm lehet, az optika és az egér szeme közötti távolság néhány mm. Ebben az esetben nem lehetséges a teljes, 51 mm oldalhosszúságú képernyő leképezése, a középponttól 14 mm-nél tovább lévő sugarak nem jutnak be az egér szemébe, ezért méréseimben ezt a távolságot tekintettem a képernyő szélének. A

kísérletekben ez nem jelent problémát, mivel a vetített információ a képernyő középső részén jelenik meg.



4.1. ábra: Vetítőrendszer nagy képernyővel

A másik vetítőrendszer, amely egy 1280x1024 pont felbontású, 12,3x9,8 mm OLED kivetítőre épül, egy kisebb meniszkuszlencsét tartalmaz (4.2. ábra). A saját tervezésű és a tanszék optikai műhelyében legyártott lencse első felületének sugara 1,991 mm, hátsó felületének 4,259 mm, vastagsága 1,5 mm. A rendszer a lencse mellett egy 0,1 mm vastag és 3,6 mm átmérőjű fázislemezt is tartalmaz, mindkét elem anyaga N-BK7.



4.2. ábra: Vetítőrendszer kis képernyővel és fázislemezzel

A fázislemez szerepe a felületén áthaladó hullámfrontok fázisának megváltoztatása a kép szélein fellépő aberrációk csökkentése érdekében. A fázislemez a programban polinomiális tagokkal reprezentálható, melyek értékeit a fókuszolt méretének minimalizálására irányuló optimalizálással határoztam meg. A kisebb méretű rendszer közelebb helyezhető az egér szeméhez, ezért az analízis során 1 mm alatti távolságot feltételeztem az optika és a szem között.

4.3. Analízis módszerei

A vetítőrendszer-modelleket és a szemmodellt tartalmazó rendszerekben meghatároztam az elemek közötti optimális távolságokat, a programba beépített optimalizációs algoritmus segítségével. A legkézenfekvőbb változtatandó paraméterek a képernyő és lencse, illetve a lencse és a szem közötti távolságok voltak, a céloperandusok pedig az egyes tárgypontokhoz tartozó szóródási foltok RMS (négyzetes középérték) méretének minimalizálása, ami jól reprezentálja a jelenlévő képhibák együttes mértékét. A változók értékét az algoritmus úgy határozza meg, hogy az egyes tárgypontokhoz és sugarakhoz tartozó operandusok (RMS) hibáinak négyzetösszege minimális legyen. Azért, hogy az optimalizáció reális, pozitív előjelű és gyakorlatban alkalmazható távolságokat eredményezzen, kényszereket határoztam meg a minimális távolságértékekre. A fázislemez koefficienseinek meghatározása során szintén a szóródási folt méretére optimalizáltam.

A kísérletek kivitelezése során fontos szempont, hogy az egér fejének esetleges elmozdulásai hogyan befolyásolják a vetítőrendszerek működésének hatékonyságát. Ezért azt is megvizsgáltam, hogy a vetítőrendszer és a szem közötti optimális távolságtól való eltérés milyen mértékben rontja a képalkotást. Minden rendszeren 3 fénynyalábot vezettem át, adott relatív tárgypont koordinátákkal (HY): egy a képernyő közepéről indult ki (HY=0), egy a képernyő szélső pontjából (HY=1) és egy éppen a kettő között helyezkedett el (HY=0,5). Mivel mindegyik optikai rendszer hengerszimmetrikus, elegendő a tárgypontot egy irányban, (az y tengely mentén) elmozdítani.

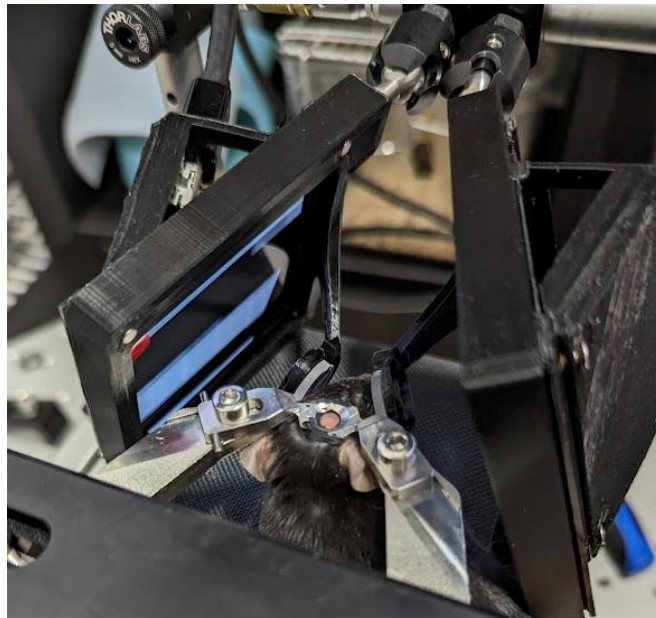
A szemmodell és a vetítőrendszerek képalkotását több szempontból is vizsgáltam. A képminőség próbaképeken történő megfigyelése szemléletes, ám számszerű jellemzésre kevésbé alkalmas. Az RMS szóródási folt egy adott tárgypontból kiinduló fénysugarak képsíkkal vett dőfspontjaiból számítható ki, szórás jellegű mennyiség. A képalkotás geometriai optikai minősítésére alkalmas azokban az esetekben, amikor a leképezés

minőségét a geometriai optikai aberrációk határozzák meg, tehát nem diffrakciókorlátos rendszerekben. A moduláció-átviteli függvény (MTF) megmutatja, hogy a térfrekvencia függvényében hogyan csökken a kép kontrasztja, tehát a vizsgált rendszerrel milyen finom struktúrák képezhetőek le. A tárgyponthoz való távolság függvényében vizsgált MTF információt szolgáltat arról, hogy a képernyő egyes részeiről milyen minőségű kép érkezik a szembe.

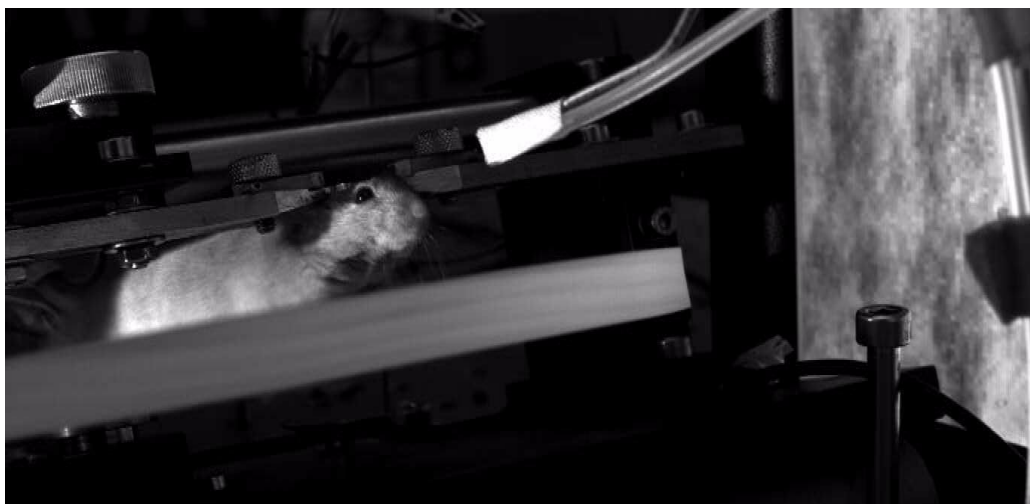
5. Tanulási folyamatot vizsgáló kísérletek

Az alábbiakban röviden ismertetem azt a kísérlettypust, amelyben a vetítőrendszereket alkalmazni fogjuk. A mérések a nagy képernyős rendszert tartalmazó prototípussal már megkezdődtek.

A kísérleti elrendezésben (5.1. ábra, 5.2. ábra) az egér egy futópádon áll, rögzített fejjel, két szeme előtt két vetítőrendszerrel. Ezek egy 3D nyomtatott befogóba rögzítve tartalmazzák a lencsét és a kisméretű képernyőt, a megjelenő képek számítógépről irányíthatók. Az egér feje tetejére beültetett üveglakon keresztül mikroszkóppal követhető az elsődleges vizuális központban az agysejtek működése, úgy, hogy az objektív pontosan a munkatávolságba kerül a megfelelő agyterülettel.



5.1. ábra: Az elkészített, nagy képernyőt tartalmazó vetítőrendszer. A képen nincs ott az objektív, a két kivetítő közé pontosan a látható koponyatetői ablak fölé kerül, amikor az egeret, a befogót és a kamerákat együtt a mikroszkópba illesztik.



5.2. ábra: Az egér feje rögzített, futás során nem mozdul el, hanem egy futószalag, vagy forgó korong van a lába alatt, amely a futás érzetét kelti, miközben a vetítés a futás sebességéhez szinkronizált. A szenzor a futószalag sebességét méri.

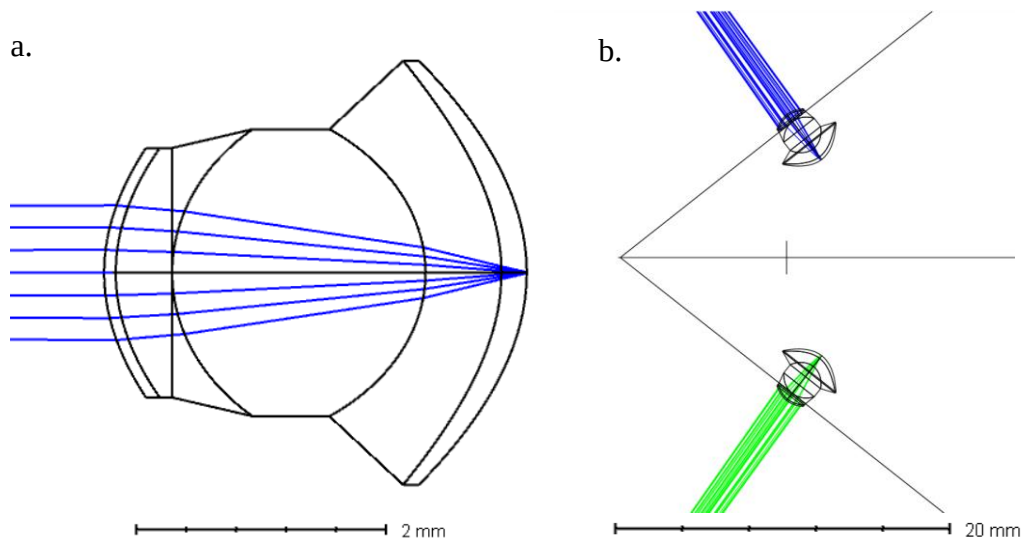
A kísérlet lényege, hogy az egérnek meg kell tanulnia, hogy hogyan viselkedjen különböző vizuális ingerek hatására. A vizuális ingerek különböző orientációjú – a lokális koordináta-rendszerhez képest különböző szög alatt álló – fekete-fehér sávokként jelennek meg, amelyeket a vetítés során véletlenszerű zaj választ el időben egymástól. A függőleges sávok a veszélyzónát jelentik, ha ezt látja, az egérnek el kell futnia; ha ezt nem teszi meg, akkor hátulról levegőfúvást kap. A 45°-os szögben futó sávok a semleges kontroll zóna, ha a tanulási folyamat sikeres, akkor erre az ingerre az egér nem fut. A vízszintes sávok vetítésével egyidejűleg folyadék formájában jutalmat kap. A mérés közben a látókérgi neuronok aktivitása is rögzítésre kerül 3D akusztóoptikai kétfoton mikroszkóp segítségével. Ezáltal végigkövethetők azok a látókéregben lejátszódó sejtszintű folyamatok és működésbeli változások, amelyek a tanulás során lezajlanak.

Közvetlen összefüggés mérhető ki a vetített információ, az egér motorikus válasza, illetve az egyes sejtek aktivitása között. A sejteket egyedileg azonosítják, a mérés nagy sebessége lehetővé teszi több száz sejt aktivitásának mérését az idegi impulzusok időbeli terjedése és megjelenése alatt (az idegsejtekben az ionkoncentráció változása körülbelül két nagyságrenddel lassabb, mint a sejtről sejtre pásztázás sebessége).

6. Eredmények

6.1. Szem- és fejmodell

A szemmodellben a párhuzamosan beérkező fénysugarak megközelítőleg a retinára fókuszálódnak, éles kép keletkezik (6.1. ábra a.). A fejmodell (6.1. ábra b.) biztosítja, hogy csak a két szem pupilláján keresztül jussanak fénysugarak a detektor felszínére: a retinák elnyelő síkjának meghosszabbítása reprezentálja a fej külső felszínét, a két szem közötti elnyelő sík pedig a szöveteket.



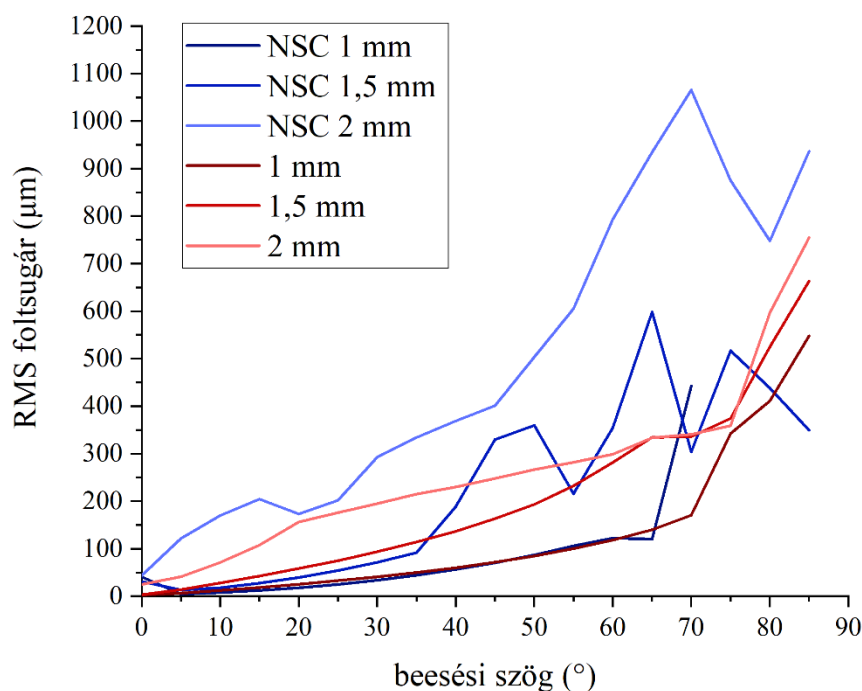
6.1. ábra: A sorrendi szemmodell (a) és a nemsorrendi fejmodell (b) felépítése és képalkotása 10 cm távolságból, vízszintesen beérkező fénysugarak esetén

6.2. Látótér vizsgálata

Fontos, hogy a valósághű képalkotási körülmények között teszteltem a modelleket, annak ellenőrzésére, hogy visszaadják-e a látás irodalomban leírt jellemzőit (képesség, látómező). Az egér szeme alapvetően végtelenre korrigált, ezért távolabbi tárgyakból várható éles kép. Az optimális látótávolság irodalmi adatok alapján 10 cm [15], ezért a szemmodellek képalkotását ilyen tárgytávolság mellett végeztem. A szemmodell effektív fókusz távolsága 1,758 mm, numerikus apertúrája 1 mm pupillaátmérő esetén 0,299, 2 mm-nél 0,531.

A látótér vizsgálatát mind sorrendi, mind nemsorrendi szemmodellen elvégeztem. A fénysugarak beesési szögének függvényében a retinán megjelenő RMS szóródási folt sugarát ábrázoltam, különböző pupillaméretek esetén (6.2. ábra). A két modell más módszerrel és különböző sugárindítási stratégiával számolja a szóródást.

A sorrendi szemmodellben a szóródási foltok mérete a szög függvényében folyamatosan, lassan növekszik, a képminőség csak $70-75^\circ$ felett romlik gyorsan. A nemsorrendi szemmodellben nagyobb, és a szög függvényében nem monoton növekvő szóródási foltok jönnek létre. A pupillaméret növelésével több nagyobb beesési szögben érkező fénysugár vesz részt a képalkotásban, amelyek a képminőség romlásához vezetnek. A legkisebb RMS foltméret, vagyis a legjobb minőségű képalkotás 1 mm pupillaátmérő mellett érhető el, ekkor $0-65^\circ$ szögtartományban a két modell foltmérete nem mutat jelentős különbségeket, tehát a szóródási jelenségek nem jelentősek.



6.2. ábra: A retinán megjelenő RMS foltméret különböző beesési szögben érkező fénysugarak és pupillaátmérők (1 mm, 1,5 mm, 2 mm) esetén, sorrendi és nemsorrendi (NSC) szemmodelleken

A sorrendi szemmodell képalkotását egy próbaképen a 6.3. ábra szemlélteti, a modell alapján „ezt látja az egér”. A szem által a távoli tárgyról alkotott kép közepén éles, míg a széle fele homályosodik, torzul, a valós elvárásoknak megfelelően.



6.3. ábra: A sorrendi szemmodell képalkotása próbaképen

6.3. Vetítőrendszerek távolságfüggése

A fejre illeszthető vetítőrendszerek mechanikai terveikhez az optikai elemek optimális távolságait határoztam meg egymáshoz, illetve a szemhez viszonyítva (6.1. táblázat). Megmértem azt a legnagyobb lencse-szem távolságot is, amely mellett még minden vizsgált fénysugár eléri a szemet. A nagyobb méretű vetítőrendszer (6.4. ábra) értelemszerűen nagyobb távolságtartományban képes leképezni mindhárom vizsgált sugarat. A fázislemezt nem tartalmazó kis rendszerben (6.5. ábra) az optimális lencse-szem távolság 0,071 mm, ami a gyakorlatban nehezen lenne kivitelezhető. Fázislemezt helyezve a rendszerbe (6.6. ábra), az optimális távolság 0,258 mm-re nő, valamint a legnagyobb leképezhető távolság tartomány is kismértékben növekszik.

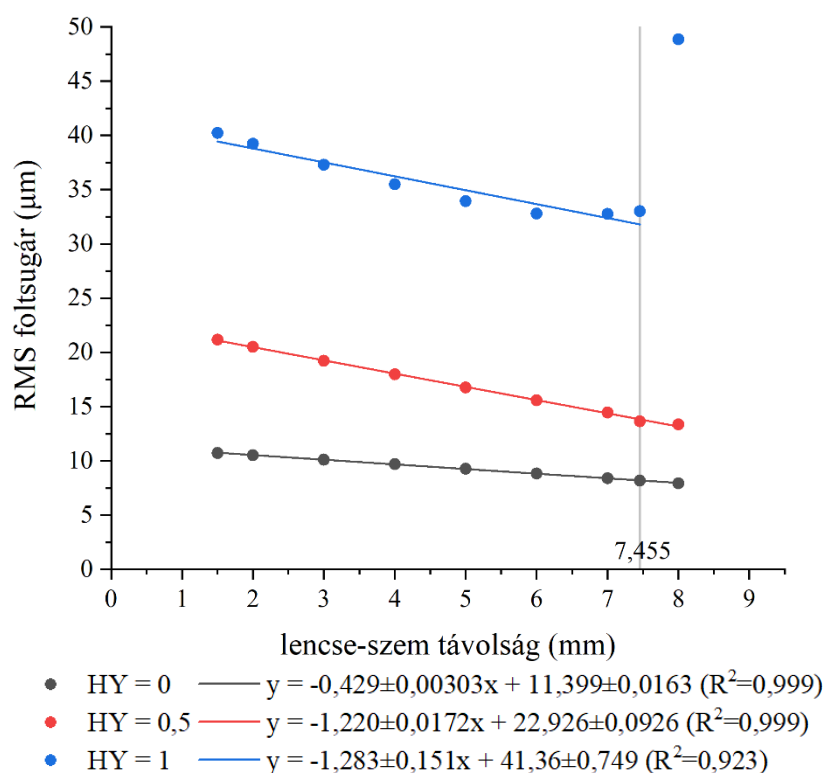
vetítőrendszer	képernyő-lencse távolság (mm)	lencse (fázislemez)-szem távolság (mm)	legnagyobb lencse-szem távolság (mm)
nagy lencse	25	7,455	8
kis lencse	5,552	0,071	0,9
kis lencse és fázislemez	4,873	0,258	1,2

6.1. táblázat: Optimális távolságok a vetítőrendszerekben és a lehető legnagyobb lencse-szem távolság

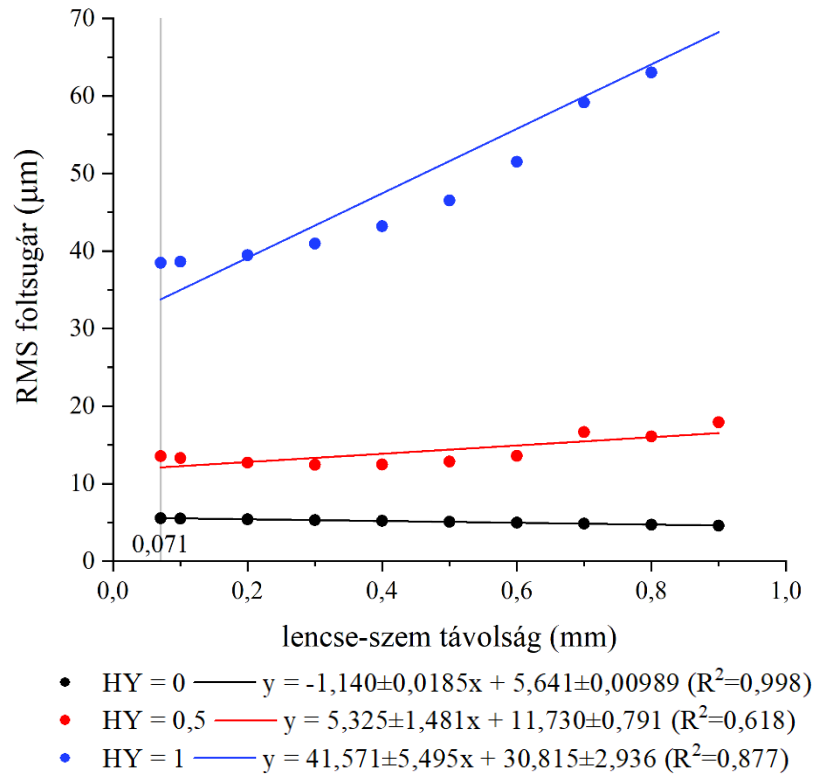
Az optimálistól eltérő távolságok hatását az RMS foltméretre mindhárom optikai rendszer esetén 3 fénysugárra vizsgáltam, amelyek relatív koordinátái minden esetben 0 (a képernyő közepe), 0,5 és 1 (a képernyő széle). Azokra a foltméretekre, amelyek megközelítőleg lineárisan változtak a távolság függvényében egyeneseket illesztettem, a

változások mértékének összevetése érdekében. Ez a fázislemezt tartalmazó rendszer esetén csak a képernyő közepéről induló sugárra volt lehetséges.

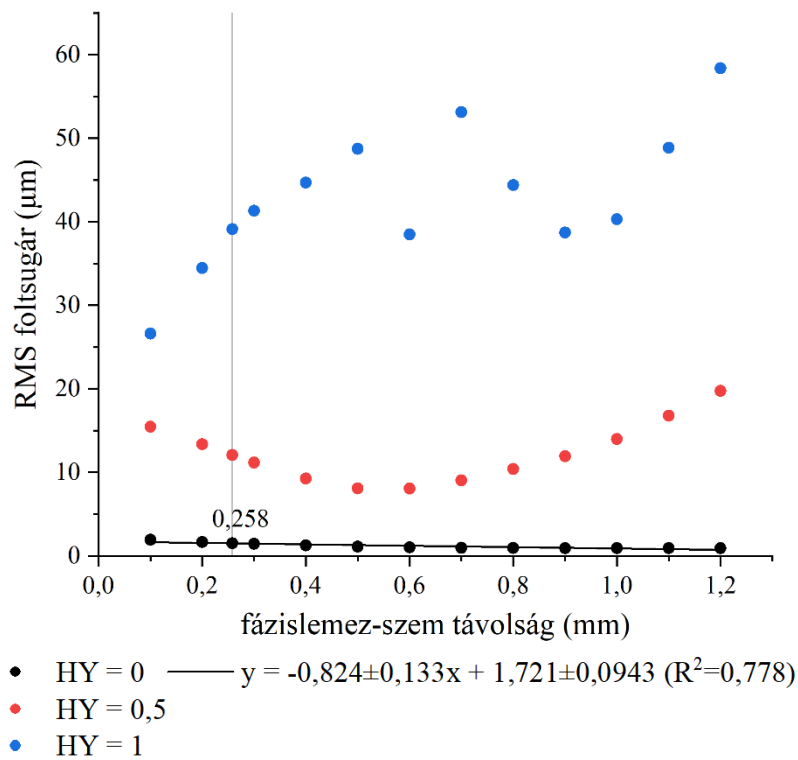
Mindhárom rendszer esetében a képernyő közepéről induló sugarak foltmérete változik a legkisebb mértékben, a távolság növelésével kismértékben csökken. A foltméretekre jól illeszthető egyenes, amelynek meredeksége legfeljebb -1,14 (kis rendszer), tehát 1 mm távolságváltozás 1,14 μm változást okoz a szóródási folt méretében. A köztes pontból induló sugarak foltmérete nagyobb, változásuk szintén szabályos. A képernyő széléről érkező sugarak foltjai változnak a legnagyobb mértékben, és különösen a fázislemezt tartalmazó rendszer esetében viszonylag szabálytalanul. A fázislemez alkalmazása csökkenti a képernyő középpontjából induló, valamint a köztes fénysugár RMS foltméretét, a képernyő széléről induló sugarakra azonban nincs nagy hatással.



6.4. ábra: Foltméret változása a lencse és a szem távolságának függvényében a nagy képernyős vetítőrendszerben



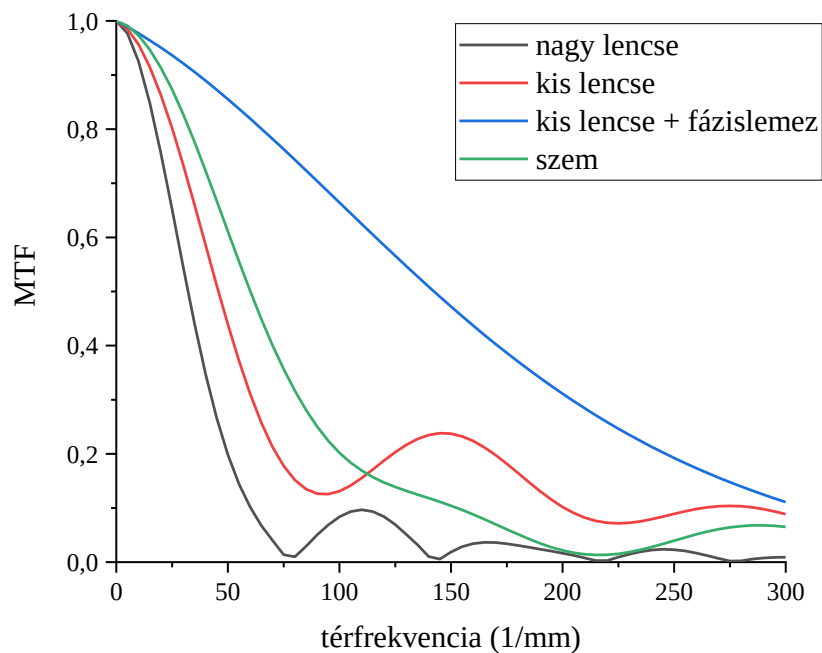
6.5. ábra: Foltméret változása a lencse-szem távolság függvényében a fázislemez nélküli kis vetítőrendszerben (az optimális távolság függőleges vonallal jelölve)



6.6. ábra: Foltméret változása a fázislemez-szem távolság függvényében a fázislemezt tartalmazó kis vetítőrendszerben (az optimális távolság függőleges vonallal jelölve)

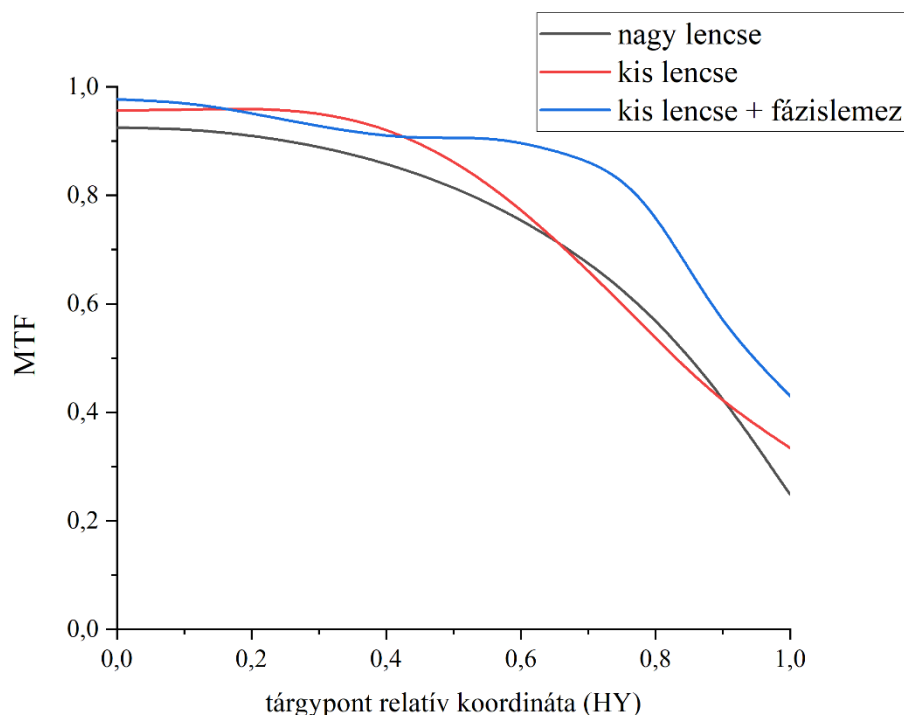
6.4. Vetítőrendszerek moduláció-átviteli függvénye

A moduláció-átviteli függvényt (6.7. ábra) vizsgálva megállapítható, hogy a nagy vetítőrendszer rosszabb, a kis vetítőrendszer fázislemezzel pedig jobb kontrasztot eredményez az ember szeménél minden térfrekvencián. A két kis rendszer görbáját összehasonlítva látható, hogy különösen kis frekvenciákon a fázislemez jelentősen növeli a kontrasztot.



6.7. ábra: A rendszerek moduláció-átviteli függvénye (MTF), $HY=0$ esetén

A moduláció-átviteli függvényt a tárgy pont helyzetének függvényében is ábrázoltam (6.8. ábra), hogy meghatározzam, hogy hogyan változik a moduláció a képernyő közepétől a széle felé haladva. Az MTF értéke a képernyő közepén, kis relatív tárgy pontkoordináták esetén mindhárom rendszer esetén 0,9 feletti, (nagy rendszer: $HY \leq 0,25$, kis: $HY \leq 0,44$, kis fázislemezzel: $HY \leq 0,58$). Nagyobb távolságokban a két, csak lencsét tartalmazó rendszer átvitele együtt csökken, a fázislemez hatására azonban tovább fennmarad a magas érték (MTF < 0,8: nagy: $HY > 0,525$, kicsi: $HY > 0,565$, fázislemezzel: $HY > 0,77$).



6.8. ábra: A rendszerek moduláció-átviteli függvénye (MTF) a tárgypontról relatív koordinátájának függvényében, 10 1/mm térfrekvencián

6.5. Fázislemez vastagságának hatása

A fázislemez vastagságának hatását vizsgálva az állapítható meg, hogy minél vastagabb a lemez, annál kisebb optimális távolsága a szemtől, 0,4 mm-es vastagság esetén már csak 0,085 mm, ami gyakorlatban nehezen kivitelezhető. Ugyanakkor a képalkotás minőségét jellemző RMS foltméretek csökkenése minden esetben 1 μm -nél kevesebb (HY=0: 0,059 μm , HY=0,5: 0,298 μm , HY=1: 0,931 μm), az MTF levágási frekvencia pedig kismértékben csökken (0,1 mm fázislemeznél 448 1/mm, 0,4 mm: 435 1/mm). A fázislemez vastagságát növelni tehát nem célszerű, mivel a mérések kivitelezését megnehezíti, a képalkotás minőségre azonban nincs érzékelhető hatással. Fontos megjegyezni, hogy optimálisnak talált 0,1 mm vastagságú fázislemez fizikailag előállítható.

7. Az eredmények elemzése

7.1. Szem- és fejmodell

A szemmodellek képalkotásának minősége alapján, mivel a fénysugarak a retinán fókuszálódnak és a próbakép közepe éles, feltételezhetjük, hogy az irodalmi adatok megfelelőek voltak a modell megalkotásához. A nemsorrendi szemmodellben létrejövő nagyobb, és a szög függvényében nem monoton növekvő szóródási foltok magyarázata, hogy itt a fényszóródási, törési és visszaverődési jelenségek is fellépnek, amelyek rontják a képalkotás minőségét.

A pupilla szűkülésének hatására a numerikus apertúra és szóródási folt átmérője csökken, a képalkotás minősége javul. Teljesen kitágult, 2 mm átmérőjű pupilla esetén (sötétben) a numerikus apertúra 0,531, amely összhangban van az élő állaton mért 0,49 értékkel [1]. A kísérleti körülmények között, világosban a pupilla átmérője 1 mm, tehát a látótér szempontjából ezt vizsgáltam meg részletesebben. 1 mm pupillaátmérő esetén a szemmodellben 0-65°-os szögtartományban nincsenek jelentős szóródási jelenségek, a képalkotás minősége megfelelőnek tekinthető. Ez tehát 130°-os látótértartományt jelent az egér egy szemére, ami elmarad az irodalmi 180°-os értéktől. A binokuláris látótér irodalmi tartománya 40° az állat orra előtt, a szem a fej tengelyével 51,7°-os szöget zár be, tehát a modellben a binokuláris látótérnek körülbelül a 30-70° közötti tartomány felel meg. Itt kisebb pupillaátmérőkön az egér látása gyengébb, de értékelhető minőségű, tehát a modell a binokuláris látóteret megfelelően reprezentálja. Mozgás közben, a szemek konvergálásakor [8] a szemek által bezárt szög csökken, ami hozzájárul a képminőség javításához a binokuláris látótérben.

A vetítőrendszerek két képernyőt tartalmazó elrendezésének előnyei közé tartozik az is, hogy róluk a fénysugarak merőlegesen, illetve kis szögben érkeznek be a szemekbe, a lehető legjobb minőségű képalkotást lehetővé téve. Ezzel szemben, ha egy sík képernyőt alkalmaznánk az egér orra előtt, a képalkotás a binokuláris látótérben történne, ahonnan a fénysugarak nagy szögben esnek be a retinára, és a modell szerint rosszabb a képalkotás.

7.2. A szemmodell korlátjai, fejlesztési lehetőségek

A modell képalkotása esetlegesen eltérhet a valóságtól, ennek oka lehet az irodalmi adatok pontatlansága vagy az egyes állatok közötti elérések. A szem részeinek paraméterei eltérő mértékben befolyásolják a szem képalkotását [13] (4.1. táblázat). A

fénytörési hibára a legnagyobb hatással az üvegtest és a szemlencse vastagsága, törésmutatója és első görbületi sugara van. A hátsó görbületi sugarak és a többi komponens törésmutatója csak kismértékben, a retina első és hátsó felszínének görbületi sugara pedig egyáltalán nem befolyásolja a fénytörési hibát. Egy nagyhatású paraméter mérésének kis pontatlansága is jelentősen ronthatja a modell képalkotását a valósághoz képest.

Továbbá a szemlencse törésmutatója nem homogén, értéke a középpontjában a legmagasabb, a szélei felé csökken [16-17], ezt a jelenlegi modell nem veszi figyelembe. A Zemax programban van lehetőség olyan gömbfelületet definiálni, amelynek törésmutatója az általunk meghatározott gradiens szerint változik. A szemlencse törésmutatójának megváltozásával azonban korrigálni kell a modellt, ez lehetséges a szaruhártya görbületének megváltoztatásával.

7.3. Vetítőrendszerek



egérszem



nagy képernyő



kis képernyő



kis képernyő fázislemezzel

7.1. ábra: A vetítőrendszerek és az egér szemének képalkotása optimális távolságokban próbaképeken szemléltetve

A nagy vetítőrendszer ideális lencse-szem távolsága a legtávolabbi pont, amikor még a képernyő széléről érkező sugár is eléri a szemet (7,455 mm), a kis vetítőrendszeré ezzel szemben a szemhez nagyon közel esik (0,071 mm). Utóbbi távolságot a fázislemez alkalmazása 0,258 mm-re növeli. A vetítőrendszerek és az egér szemének képalkotását szemlélteti a 7.1. ábra.

A szóródási foltok méretének változását az egér retinájának receptorsűrűségéhez viszonyítva információt kaphatunk arról, hogy milyen mértékű változásoknak van jelentős élettani hatása a képalkotásra. Az egér fotoreceptorainak 97,2%-a pálcika, amelyek átlagos sűrűsége 437 000 sejt/mm². Ez azt jelenti, hogy egy sejt területe 2,29 μm² [18], ennek négyzetgyökével közelítve átmérője 1,51 μm. A sorrendi egérszemmodell RMS foltátmérője optimális távolságban vízszintesen beeső fénysugár esetén 2,708 μm, a legkisebb foltméretet biztosító, fázislemezt tartalmazó kis vetítőrendszerben optimális távolságban 3,07 μm. Mivel az optikai modellel elérhető minimális foltméretek a pálcikák átmérőjénél minden esetben nagyobbak, a szem felbontását nem a receptorsejtek mérete, hanem a szem optikai teljesítménye korlátozza.

Az MTF görbék alapján a nagy vetítőrendszeren áthaladó fénysugarak amplitúdója a legkisebb, 115 1/mm térfrekvencia alatt az egér szemének minősége a kis rendszerét is meghaladja. A fázislemez alkalmazásának pozitív hatásai a modulációátvitel szempontjából mutatkoznak meg a legjelentősebben: a teljes vizsgált (0-300 1/mm) térfrekvencia-tartományban, kis lencse-szem távolságok alkalmazásával, nagyobb kontraszt érhető el vele, mint amire pusztán az egér szeme képes az ideális, 10 cm-es látótávolságban. Az MTF értékét a képernyő különböző pontjain vizsgálva megállapítható, hogy középen minden rendszer esetén magas a kontraszt (MTF>0,9), a szélek felé haladva pedig a fázislemez alkalmazása mérsékeli a csökkenést.

A fázislemez alkalmazása tehát javítja a képalkotást, mivel magasabb térfrekvenciákon és a képernyő szélei felé távolodva növeli a kép kontrasztját. A kis képernyőt tartalmazó vetítőrendszerben megnöveli az optimális távolságot az optika és a szem között, ami az eszköz gyakorlati megvalósításában előnyös. A lehető legvékonyabb fázislemezt érdemes választani, mivel a vastagság növekedésével az optimális távolság csökken, a képalkotás minősége viszont nem változik számottevően. A vetítőrendszerben ezért 0,1 mm vastagságú fázislemez alkalmazását javaslom, ami még előállítható. A fázislemez előállítására megfelelő paraméterekkel már találtunk vállalkozó partnert, aki a szubsztrát vastagságát is megfelelőnek tudja tartani, a befogás kérdése még nyitott, gyakorlatilag

egy feszítőkeretre van szükség, amely a nagyon vékony lemezt kifeszítve tartja a lencse és a szem között.

8. Összefoglalás

Az egerek szemének megfelelő ingerlésére alkalmas egy olyan virtuális valóság alapú eszköz, amely közvetlenül juttat információt az egér szemébe, térbeli látásérzetet biztosítva. Dolgozatomban bemutattam az eszköz optikájának megtervezését és optimalizálását egy általam összeállított optikai egérszem-modell segítségével.

Tanulmányoztam az egér látásáról szóló szakirodalmat, majd ez alapján modellt készítettem a szemről, amelynek látótere és képalkotása megközelíti az élettani adatokat. A modell bizonyos szempontokból egyszerűsített, például nem veszi figyelembe a szemlencse inhomogén törésmutatóját, az egyszerű ábrákat vetítő berendezés optikai tervezésére azonban megfelel.

A szemmodell felhasználásával többféle vetítőrendszert teszteltem, az egyik nagyobb képernyőt és lencsét tartalmaz, a másik kisebb méretű. A kép szélén fellépő aberrációk korrigálására utóbbi rendszert egy fázislemezzel egészítettem ki, amelynek ideális vastagsága 0,1 mm.

A nagyobb vetítőrendszerben a képernyő és a lencse távolsága 25 mm, az optimális lencse-szem távolság 7,455 mm, ennél kisebb távolságok esetén sem romlik jelentősen a képalkotás minősége. A fázislemezt is tartalmazó kisebb rendszerben az ideális képernyő-lencse távolságot 4,783 mm-nek, a fázislemez-szem távolságot 0,258 mm-nek határoztam meg. Ahhoz, hogy a képernyő széléről induló sugarak is elérjék a szemet, fontos, hogy a szem fázislemeztől mért távolsága 1,2 mm alatt maradjon.

Az RMS foltméret és a moduláció-átviteli függvény alapján a képernyő közepéből induló sugarakat mindhárom rendszer megfelelő minőségben képezi le, a legszélesebb tartományban erre a fázislemezt is tartalmazó elrendezés képes. A vetítőrendszerek által alkotott kép minősége összemérhető a szemmodell képalkotásával az éleslátás távolságában, sok esetben meg is haladja azt.

Képalkotás szempontjából a legjobb választás tehát a kis képernyőt tartalmazó rendszer fázislemezzel. Jövőbeli terveink között szerepel ennek a legyártása, összeállítása és tesztelése. A kísérletek a nagy, csupán egy képernyőt és egy egyszerű lencsét igénylő vetítőrendszer alkalmazásával már megkezdődtek.

Irodalomjegyzék

- [1] Y. Geng és mtsai., „Optical properties of the mouse eye”, *Biomed Opt Express*, köt. 2, sz. 4, o. 717–738, febr. 2011, doi: 10.1364/BOE.2.000717.
- [2] U. F. O. Themes, „Special senses”, *Veterian Key*. Elérés: 2023. május 21. [Online]. Elérhető: <https://veteriankey.com/special-senses/>
- [3] P. M. Treuting, R. Wong, D. C. Tu, és I. Phan, „21 - Special Senses: Eye”, in *Comparative Anatomy and Histology*, P. M. Treuting és S. M. Dintzis, Szerk., San Diego: Academic Press, 2012, o. 395–418. doi: 10.1016/B978-0-12-381361-9.00021-4.
- [4] N. S. Rafferty és D. L. Scholz, „Comparative study of actin filament patterns in lens epithelial cells. Are these determined by the mechanisms of lens accommodation?”, *Current Eye Research*, júl. 2009, doi: 10.3109/02713688908995756.
- [5] E. G. de la Cera, G. Rodríguez, L. Llorente, F. Schaeffel, és S. Marcos, „Optical aberrations in the mouse eye”, *Vision Research*, köt. 46, sz. 16, o. 2546–2553, aug. 2006, doi: 10.1016/j.visres.2006.01.011.
- [6] P. Artal, P. H. de Tejada, C. M. Tedó, és D. G. Green, „Retinal image quality in the rodent eye”, *Visual Neuroscience*, köt. 15, sz. 4, o. 597–605, ápr. 1998, doi: 10.1017/S0952523898154020.
- [7] S. N. Peirson, L. A. Brown, C. A. Potheary, L. A. Benson, és A. S. Fisk, „Light and the laboratory mouse”, *J Neurosci Methods*, köt. 300, o. 26–36, ápr. 2018, doi: 10.1016/j.jneumeth.2017.04.007.
- [8] J. M. Samonds, V. Choi, és N. J. Priebe, „Mice Discriminate Stereoscopic Surfaces Without Fixating in Depth”, *J. Neurosci.*, köt. 39, sz. 41, o. 8024–8037, okt. 2019, doi: 10.1523/JNEUROSCI.0895-19.2019.
- [9] C. P. Heesy, „On the relationship between orbit orientation and binocular visual field overlap in mammals”, *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology*, köt. 281A, sz. 1, o. 1104–1110, 2004, doi: 10.1002/ar.a.20116.
- [10] B. S. Oommen és J. S. Stahl, „Eye Orientation During Static Tilts and Its Relationship to Spontaneous Head Pitch in the Laboratory Mouse”, *Brain Res*, köt. 1193, o. 57–66, febr. 2008, doi: 10.1016/j.brainres.2007.11.053.
- [11] A. F. Meyer, J. O’Keefe, és J. Poort, „Two Distinct Types of Eye-Head Coupling in Freely Moving Mice”, *Current Biology*, köt. 30, sz. 11, o. 2116–2130.e6, jún. 2020, doi: 10.1016/j.cub.2020.04.042.
- [12] S. Remtulla és P. E. Hallett, „A schematic eye for the mouse, and comparisons with the rat”, *Vision Research*, köt. 25, sz. 1, o. 21–31, jan. 1985, doi: 10.1016/0042-6989(85)90076-8.
- [13] G. Bawa, T. V. Tkatchenko, I. Avrutsky, és A. V. Tkatchenko, „Variational analysis of the mouse and rat eye optical parameters”, *Biomed Opt Express*, köt. 4, sz. 11, o. 2585–2595, okt. 2013, doi: 10.1364/BOE.4.002585.

- [14] C. Schmucker és F. Schaeffel, „A paraxial schematic eye model for the growing C57BL/6 mouse”, *Vision Research*, köt. 44, sz. 16, o. 1857–1867, júl. 2004, doi: 10.1016/j.visres.2004.03.011.
- [15] B. Scholl, J. Burge, és N. J. Priebe, „Binocular integration and disparity selectivity in mouse primary visual cortex”, *J Neurophysiol*, köt. 109, sz. 12, o. 3013–3024, jún. 2013, doi: 10.1152/jn.01021.2012.
- [16] M. Hoshino, K. Uesugi, N. Yagi, S. Mohri, J. Regini, és B. Pierscioneck, „Optical Properties of In Situ Eye Lenses Measured with X-Ray Talbot Interferometry: A Novel Measure of Growth Processes”, *PLOS ONE*, köt. 6, sz. 9, o. e25140, szept. 2011, doi: 10.1371/journal.pone.0025140.
- [17] E. R. Muir és mtsai., „Multi-parametric MRI of the physiology and optics of the in-vivo mouse lens”, *Magnetic Resonance Imaging*, köt. 70, o. 145–154, júl. 2020, doi: 10.1016/j.mri.2020.04.015.
- [18] C.-J. Jeon, E. Strettoi, és R. H. Masland, „The Major Cell Populations of the Mouse Retina”, *J Neurosci*, köt. 18, sz. 21, o. 8936–8946, nov. 1998, doi: 10.1523/JNEUROSCI.18-21-08936.1998.