

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO
INŽENÝRSTVÍ**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

NATÁLIE TUROŇOVÁ



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra přírodovědných oborů**

Srovnání a simulace vidění živočichů

Comparison and simulation of animal vision

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

Autor bakalářské práce: Natálie Turoňová

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Jana Urzová, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Turoňová** Jméno: **Natálie** Osobní číslo: **474362**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra přírodovědných oborů**
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**
Studijní obor: **Optika a optometrie**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Srovnání a simulace vidění živočichů

Název bakalářské práce anglicky:

Comparison and simulation of animal vision

Pokyny pro vypracování:

Studentka v rámci teoretické části práce zpracuje formou rešerše problematiku anatomie a fyziologie vidění zvlášť člověka a zvlášť vybraných živočichů. Při popisu se bude soustředit na přizpůsobení se okolnímu prostředí a způsobu života vybraných živočichů v porovnání s člověkem. Při srovnání se bude zabývat různými aspekty vidění, např. vnímaná vlnová délka, barevné vidění, zraková ostrost, zorný úhel, ... Na základě zjištěných poznatků v praktické části své práce s využitím vhodného grafického programu nasimuluje vidění těchto živočichů v porovnání s tím, jak by daný objekt viděl člověk. Cílem práce je vizualizace rozdílů vidění člověka a vybraných živočichů na základě prostudovaných anatomických a fyziologických rozdílů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] KUCHYŇKA, P. a kol., Oční lékařství, ed. 1, Praha: Grada Publishing, 2007, 812 s., ISBN 978-80-247-1163-8
- [2] ŠIKL, Radovan, Zrakové vnímání, ed. 1, Grada, 2012
- [3] ROZSÍVAL, P. a kol., Oční lékařství, ed. 1, Galén, Karolinum, 2006, ISBN 80-7262-404-0
- [4] AUTRATA, Rudolf a Jana VANČUROVÁ, Nauka o zraku, Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2002, ISBN 80-7013-362-7
- [5] RUTRLE, Miloš, Brýlové optika, Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1993, ISBN 80-7013-145-4

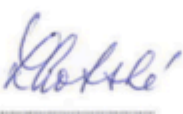
Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

Mgr. Jana Urzová, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **10.02.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2021**


doc. Ing. Lenka Lhotská, CSc.
podpis vedoucí(ho) katedry


prof. MUDr. Ivan Dylevský, DrSc.
podpis děkana(ky)

Název bakalářské práce: Srovnání a simulace vidění živočichů

Abstrakt:

Bakalářská práce se zabývá rozdíly mezi viděním člověka a vybraných druhů živočichů. První polovina je věnována teoretické části, která popisuje základní anatomickou a fyziologickou stavbu oka, dále také centrální a periferní vidění, akomodaci a v neposlední řadě se zaměřuje na vnímání barev, jenž se dělí dle teorie oponentního procesu a teorie trichromatické. Poslední součást teoretické části je zaměřena na odlišnosti ve zrakové ostrosti, prostorovém vnímání či zorném poli.

Na základě výchozích informací byla vypracována praktická část, v níž byly pořízeny fotografické snímky, jež byly následně pomocí vhodně zvoleného grafického programu upravovány. Cílem bylo vizualizovat odlišnosti mezi viděním člověka a vybraných živočichů.

Klíčová slova:

Jednoduché a složené oko, fotoreakce, světločivné receptory, odrazová vrstva

Bachelor's thesis title: Comparison and simulation of animal vision

Abstract:

The bachelor thesis deals with the differences between the human vision and the vision of selected animal species. The first part is dedicated to theory that describes the basic anatomical and physiological structures of the eye, the central and peripheral vision, accommodation, and last but not least it also focuses on the color perception and its distribution based on the opponent process theory and trichromatic theory. The last part is focused on the distinctions in visual acuity, spatial perception or field of vision.

Based on the given information there was created the practical part, in which photographs were taken. Those photographs were then edited in an appropriately selected graphic software. The aim was to visualize the differences between the human vision and the vision of certain species.

Key words:

Simple and compound eye, photoreactions, light-emitting receptors, reflective layer

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala Mgr. Janě Urzové, Ph.D. za vedení práce, trpělivost a její cenné rady. Také děkuji rodičům a babičce za podporu během celého studia.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Srovnání a simulace vidění živočichů“ vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V *Kladně* dne

.....

podpis

Obsah

Úvod	1
1 Lidské oko	2
1.1 Anatomie lidského oka	2
1.1.1 Oční koule (<i>Bulbus oculi</i>).....	2
1.1.2 Přídavné orgány oka	3
1.2 Fyziologie lidského oka.....	4
1.2.1 Rohovka (<i>Cornea</i>).....	4
1.2.2 Oční čočka	6
2 Vidění člověka.....	8
2.1 Centrální vidění	8
2.2 Periferní vidění	8
2.3 Akomodace	8
2.4 Vnímání barev	9
2.4.1 Trichromatická teorie	9
2.4.2 Teorie oponentního procesu	10
2.5 Zorné pole.....	12
2.6 Zraková ostrost	12
2.7 Vnímání prostoru.....	13
3 Oči živočichů.....	15
3.1 Jednoduché oko	15
3.2 Složené oko.....	15
4 Vidění živočichů.....	17
4.1 Reakce na světlo	17
4.2 Barevné vidění u zvířat.....	17
4.3 Prostorové vnímání zvířat.....	20
5 Vizualizace vidění živočichů.....	22
5.1 Vizualizace vidění orla	22
5.2 Vizualizace vidění včely.....	24
5.3 Vizualizace vidění kočky.....	25
5.4 Vizualizace vidění mouchy	28
5.5 Vizualizace vidění žraloka.....	30

Závěr.....	32
Seznam použité literatury	33
Seznam Obrázků.....	36

Úvod

Zrak patří mezi nejdůležitější smysly člověka. V mé práci popíšu lidské oko z anatomického hlediska, zaměřím se na základní strukturu, tedy oční kouli a poté na přídatné oční orgány, mezi které se řadí okohybné svaly, spojivka, víčka a slzné ústrojí. Dále se budu zabývat fyziologií lidského oka, zaměřím se na vznik obrazu pomocí optického systému a jeho nejdůležitější části, jako je rohovka a čočka, u kterých se budu věnovat jejich stavbě a funkci.

Vidění člověka z hlediska centrálního vidění bude další součástí mé práce. Zde budu klást důraz na žlutou skvrnu, což je místo nejostřejšího vidění. Také se budu zabývat tím, jakou má souvislost periferní vidění s místem uložení fotoreceptorů. Důležitá bude i schopnost čočky měnit své zakřivení, akomodace. Poté budu popisovat barevné vidění u člověka, tedy pouze v rámci viditelného spektra. S tímto kontextem vylíčím trichromatickou teorii, která je více známá a uznávána, ale i teorii oponentního procesu. Následně se budu zabývat zorným polem, konkrétně jeho rozsahem, který může být ovlivněn věkem. Popíšu zrakovou ostrost a možné ovlivnění zrakové ostrosti. V poslední části u lidského oka se budu zabývat vnímáním prostoru, kde vysvětlím, jak je vnímaná velikost předmětu závislá na vzdálenosti od pozorovatele.

Druhá část mé práce bude věnována anatomii a fyziologii jednoduchého a složeného oka živočichů, kde se zaměřím na stavbu, vývoj a v případě složeného oka i na mozaikový obraz. Neopomenu ani reakci na světlo, která bude odlišná u různých živočišných druhů, taktéž jako barevné vidění. Zde se zaměřím na vnímání jednotlivých vlnových délek světla. Poslední součástí teorie bude přiblížení informací o prostorovém vnímání živočichů v závislosti na postavení očí na hlavě.

V praktické části se budu snažit za použití grafických programů jako photoshop, gimp či mobilní aplikace snapseed vizualizovat rozdíly mezi viděním vybraných druhů živočichů a člověka, a to z hlediska vnímání barev, zrakové ostrosti a zorného pole.

1 Lidské oko

1.1 Anatomie lidského oka

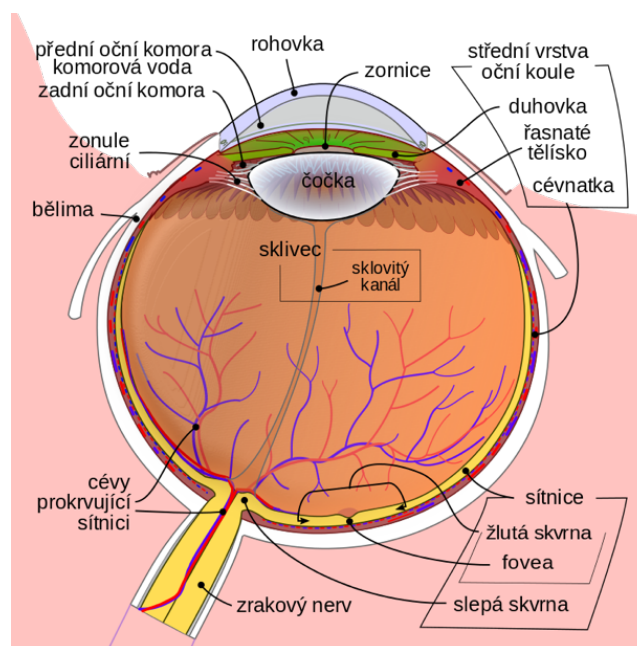
Zrak je právem považován za nejdůležitější smysl, neboť právě díky němu člověk získá téměř 80 % veškerých informací [1]. Zrakové ústrojí (*organum visus*) se skládá ze dvou částí – oční koule (*bulbus oculi*) a přídatných orgánů oka (*organa oculi accessoria*), které popisují následovně.

1.1.1 Oční koule (Bulbus oculi)

Jedna z hlavních částí zrakového ústrojí je oční koule (*bulbus oculi*), která je uložena v kostěné jamce ve tvaru čtyřboké pyramidy, orbitě, kde je mimo jiné i orbitální tuk chránící bulbus před nárazy. Bulbus je sestaven ze tří částí, a to z vazivové (zevní) vrstvy dělicí se na bělimu a rohovku, cévnaté (střední) vrstvy a nervové vrstvy, což je vnitřní část, nazývána také jako retina – sítnice [2,3,4]. Na zadním pólu retiny jsou uloženy receptory (čípky a tyčinky), gangliové a bipolární buňky. Přední plocha se označuje jako slepá, neboť neobsahuje fotoreceptory a nervové buňky, ale pouze pigmentový epitel. [1,2,3,4] Za bod nejostřejšího vidění se označuje žlutá skvrna, *macula lutea*, jenž leží temporálně od slepé skvrny, kde se vyskytují pouze čípky. [2]

V sítnici je téměř 120 milionů tyčinek a 6-7 milionů čípku. Tyčinky, ležící v periférii sítnice, velmi dobře reagují na nízkou intenzitu světla a jsou schopny rozlišovat odstíny šedé, plní svou roli především v noci. Zatímco čípky, které zprostředkovávají barevné vidění, potřebují vyšší intenzitu světla pro plnění své funkce. [1,3,5,6]

Světločivné buňky přenášejí vzruch, který vznikl po dopadu fotonů, do bipolárních buněk, jenž signál zpracují a dále jej pomocí synapsí vedou ke gangliovým buňkám. Při průchodu světelného paprsku okem přechází paprsek nejdříve skrze gangliové buňky, poté skrz vrstvu bipolárních buněk a až následně dopadá na receptory (tyčinky a čípky). Sbíhající se odstředivé výběžky gangliových buněk vytváří svazky nervových vláken, které poté přecházejí ve zrakový nerv vedoucí do mozku, kde se v okcipitálním laloku vytváří zrakové vjemy. [1,3] Celé schéma oční koule je možné vidět na obrázku č. 1.



Obrázek 1: Schéma oční koule [7]

1.1.2 Přídatné orgány oka

Další část zrakového ústrojí jsou přídatné orgány oční, *organa oculi accessoria*. Mezi ně se řadí okohybné svaly, víčka, spojivka a slzní ústrojí. [2,3,4]

Na správné pohyblivosti bulbu se podílejí čtyři svaly přímé (*m. rectus superior*, *m. rectus inferior*, *m. rectus medialis* a *m. rectus lateralis*), které se ve shodě s jejich pojmenováním napojují na horní, dolní, zevní a vnitřní část bulbu a jejich úpon se nachází ve sklěře. Na mobilitě se dále účastní také svaly šikmé (*m. obliquus inferior et superior*), jejichž úpony jdou zepředu směrem dozadu na bulbus, tedy obráceně než u svalů přímých. [2,3]

Oční víčka (*palpebra*) lze popsat jako ploténky kolagenního charakteru, na které se upínají snopce kruhového svalu očního (*m. orbicularis oculi*). Víčka jsou složena z vnitřní a zevní strany. Vnější část je pokryta jemnou pružnou kůží a vnitřní část tvoří tenká slizniční blána, spojivka. *Tunica conjunctiva* prostupuje na limbu do epitelu rohovky a na okraji víčka do jejích kůže. Jedná se o velmi vaskularizovanou část. Místo setkání horního a dolního víčka se nazývá margo, pod nímž ústí řasy ve 3-4 řadách. V okolí řas leží Mollovy aromatické potní žlázy a Zeisovy mazové žlázy. Za řasami směrem k margu se nacházejí Meibomské žlázy, které jsou pro oko velmi důležité, neboť sekret, který vylučují, zabraňuje přetékání slz přes okraj víčka. [3,4,6,8]

Poslední součástí přídatných orgánů očních je slzné ústrojí, které se skládá ze slzné žlázy (*glandula lacrimalis*) a slz (*lacrimae*). Slzná žláza se nachází při zevním a horním okraji orbity. Rozděluje se na orbitální a palpebrální část, kterou lze pozorovat jako růžový útvar při pohledu klienta dolů a nasálně při odtažení horního víčka. *Glandula lacrimale* odpovídá za reflexní tvorbu slz, které se dostávají na spojivku a díky mrkání se rozprostřou na rohovce a bělimě, a tak zajišťují lubrikaci povrchu oka. Slzy se sbíhají do spojivkového vaku, dále jsou odváděny slznými kanálky do slzného vaku, poté procházejí skrz *ductus nasolacrimalis* ústí pod dolní skořepou nosní. [2,3,4,6,8]

1.2 Fyziologie lidského oka

Fyziologie lidského oka se zabývá popisem průběhu vzniku obrazu prostřednictvím optické soustavy oka, která se skládá z rohovky (*cornea*), komorové vody (*aqueus humor*), oční čočky (*lens*) a sklivce (*corpus vitreum*). Kromě toho se také zabývá vnímáním kvality obrazu. Zrakový vjem se neutváří jen v závislosti na zobrazení optickou soustavou, ale také díky detekci tyčinek, čípků a nervovému zpracování podnětu oka. Vizuální stimul oka je způsobený dopadem světla na sítnici. Množství dopadajícího světla na sítnici je ovlivněno reakcí zornic. Možný dosažitelný vizus a rozlišovací schopnost je podstatně omezena částmi optické soustavy, z nichž je prvořadá oční čočka a *cornea*. [9,10]

1.2.1 Rohovka (*Cornea*)

Přední část oka je tvořena rohovkou. Jedná se o průhlednou, zakřivenou tkáň, která tvoří téměř 1/6 bulbu. Lomivost rohovky tvoří většinu optické mohutnosti oka, a to 43 dpt, což jsou asi 2/3 celkové hodnoty. *Cornea* je zcela bezbarvá a bezcévná, ale na rozdíl od skléry je bohatě inervovaná. Její tloušťka v centru dosahuje cca 540 μm . Průměr rohovky v horizontální rovině je 12 mm a ve vertikální rovině 11,5 mm. [2,3,4,8,9,10,11,12]

Úroveň hydratace rohovky, která je zajištěna slzami, se pohybuje okolo 76-80 %. Zevní okraj rohovky se nazývá *limbus corneae*, což je místo, kterým rohovka přechází ve skléru, jenž probíhá dvojím způsobem. Buď je periferie rohovky zakotvena do kanálku v bělimě, nebo je periferie rohovky směrem od vnější části šikmo k okraji ztenčena a okrajem bělimy překryta. [3,9]

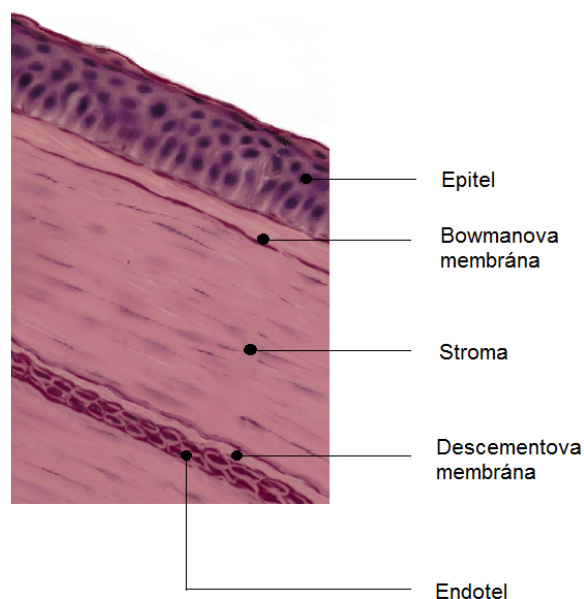
Rohovka je složena z pěti základních vrstev (viz obrázek č. 2) – epitel, Bowmanova membrána, stroma, Descemetova membrána a endotel. První vrstva, epitel, je tvořen pěti vrstvami buněk, což představuje 10 % rohovkové tloušťky. Jeho regenerace (epitelizace) je velmi rychlá a probíhá v průběhu sedmi dnů pomocí limbálních buněk. Epitel má ochrannou funkci, neboť zabraňuje vniknutí infekce do rohovky v případě, pokud není poškozen jeho povrch. [3,8,9,12]

Bowmanova membrána je velmi tenká vrstva tvořící hranici mezi stromatem a epitelem. Jestliže je poškozená, není schopná se regenerovat a defekt se poté projevuje v podobě rohovkové jizvy. Bowmanova membrána se účastní uspořádání bazální vrstvy buněk epitelu. [3,9,12]

Střední vrstvu rohovky tvoří nejtlustší část – stroma, jejíž stavební složkou je extracelulární matrix, jehož složkami jsou kolagenní vlákna složená z fibril. Rozstup mezi kolagenními fibrilami je zajištěn díky proteoglykanům a fibroblastům. [8,9,12]

Na stroma naléhá Descemetova membrána. Jedná se o velmi křehkou ale pevnou vrstvu složenou také z kolagenních vláken jako stroma, avšak jiného složení. V průběhu let se ztlušťuje. [3,8,9,12]

Endotel tvořící poslední část rohovky, se skládá z jednovrstevných buněk hexagonálního tvaru. Jeho propustnost a hydratace je zodpovědná za neměnnou lomivost rohovky. Po narození je epitel jedince tvořený 400 000 buňkami. Tento počet se však věkem redukuje na 2 600 až 3 000 buněk/mm², což odpovídá hustotě zdravého jedince. Buňky nejsou schopné množení, tudíž regenerace endotelu je nulová. S přibývajícím věkem a množstvím onemocnění, nitroočních operací či po transplantaci rohovky se počet buněk výrazně snižuje a může klesnout na kritickou hodnotu 500 buněk/mm². Jelikož buňky nejsou schopny regenerace, prázdná místa vyplňují zvětšením svého objemu. [9,12]



Obrázek 2: Stavba rohovky [13]

1.2.2 Oční čočka

Čočka (*lens*) je těleso průhledného, bílkovinného charakteru a bikonvexního tvaru. Je umístěna za duhovkou, před sklivcem. Polohu čočky zajišťuje závěsný aparát, díky kterému je připojena k řasnatému tělísku, pomocí něhož a také pomocí své pružnosti a elasticity může měnit svou optickou mohutnost. Jedná se o zcela bezcévnou a strukturu, která navíc není ani inervována, a proto je závislá na komorové vodě. Lámavost se pohybuje okolo 20 dpt, tedy 1/3 celkové optické mohutnosti oka. [2,3,4,9,10]

Věkem se stále vyvíjí, zvětšuje se a vykazuje větší tuhost a mění rozložení indexu lomu. Oční čočka se skládá ze tří částí – pouzdro (*capsula lentis*), epitel a jádro s kortexem. [9]

Capsula lentis je pružná, průhledná membrána na povrchu oční čočky, která je tvořena z povrchového epitelu. Zadní část pouzdra je produktem čočkových lamel. Celé pouzdro je tvořeno z několika typů bílkovin, např. glykoproteinů. Pouzdro čočky během života mění svou tloušťku. Přední část má po narození největší tloušťku oproti zadnímu pólu. Věkem tloušťka předního pólu výrazně roste a naopak zadní pól se ztenčuje. [9]

Epithelium lentis se rozprostírá pod pouzdrem čočky až k ekvatoriální oblasti. Je tvořen epitelem kubického typu. Na zadním pólu pouzdra se žádný epitel nevyskytuje. Rozvojem se mění do podoby tzv. prizmatických vláken (*fibrae lentis*), které následně vyplní obsah jádra. [4, 9]

Epitel se dělí do několika částí – přechodná (tranzitorní), geminativní, pregerminativní a centrální. Největší podíl, 80 %, epitelu je tvořen právě z centrální části. V této části nedochází k množení ani migraci buněk, tudíž je tato část vhodná ke sledování stárnutí. Pouze 5 % epitelu tvoří pregerminativní zóna. Zde se buňky množí zcela ojediněle a jsou stále dobře pozorovatelné. Druhou procentuálně největší částí je zóna germinativní (10 %), kde již probíhá velmi četné množení buněk ve formě mitózy a následná diferenciacce. Prvořadá je však tranzitorní zóna, neboť zde buňky přechází přeměnou ve vlákno čočky. [9]

Jádro oční čočky (*nukleus lentis*) a kortex nelze od sebe z histologického hlediska téměř rozeznat. Jádro je tvrdší hmota uložená hluboko v čočce. Skládá se téměř z 70 % bílkovin a 30 % vody. Rozděluje se na čtyři části podle rozdělení vláken. Embryonální část sestává pouze z primárních vláken čočky. Fetální, infantilní a dospělá část je složena z vláken sekundárních, které se v průběhu let připojují k předešlé vrstvě. Vnější obal jádra tvoří tzv. epinukleus, jenž je utvořen z infantilních a dospělých vláken. Navazující nažloutlá část, perinukleus, je obklopena z jedné strany jádrem a z druhé kortexem. Celé jádro je chráněno kortexem. [3,9,14]

2 Vidění člověka

2.1 Centrální vidění

Žlutá skvrna (*macula lutea*) je pojmenována podle žlutě zbarveného pigmentu, jenž se vyskytuje v oblasti žluté skvrny. *Macula lutea* je místem centrálního vidění a také vidění barevného. Schopnost rozlišení je velmi vysoká, neboť právě v macule je bohaté množství čípků. Aby byl obraz co nejpřesnější a nejkvalitnější, střed rohovkového zakřivení a obou čočkových ploch musí ležet na optické ose. Při soustředění se na daný předmět náš pohled není v souladu s optickou osou, ale kopíruje přímkou mezi bodem fixace a žlutou skvrnou. [4,10,15]

2.2 Periferní vidění

Jakmile oko fixuje daný bod v prostoru, je také schopno registrovat jeho okolí, tento prostor se vyznačuje jako zorné pole. Periferní vidění sice není však tak ostré jako centrální, ale zajišťuje nám vnímání prostoru a pohybu. Na retině od fovey dochází k poklesu počtu čípků a růstu počtu tyčinek. Na okraji orbity leží už jen tyčinky. [4,10,15]

2.3 Akomodace

Akomodace je označení pro schopnost oka změnit své zakřivení, a tedy i optickou mohutnost oka díky smršťování *musculus ciliaris*, jenž je částí *corpus ciliare*. Schopnost čočky měnit zakřivení je umožněna pomocí pružného jádra a elasticitě obalu. Akomodaci lze do určité míry ovládat vůlí, ale zpravidla se jedná o automatický reflex. [4,9,10,16]

Oční čočka má plochý tvar, který udržuje závěsný aparát. Jakmile čočka zafixuje blízký bod, dojde ke smrštění ciliárního svalu, okraje *corpus ciliare* se přitáhnou více k sobě a čočka se vyklene směrem dopředu, optická mohutnost čočky vzrůstá a tím i lomivost čočky. Opačný proces probíhá v případě, pokud se soustředíme na vzdálený bod (tři metry a více). Zakřivení čočky je velmi malé, neboť ciliární sval je uvolněný a oko je zaostřeno na nekonečný bod. [10,17]

2.4 Vnímání barev

Vnímání barev je schopnost oka rozeznávat různé odstíny barev v závislosti na vlnové délce světla. Viditelná spektrální oblast se pohybuje v rozmezí vlnových délek od 380 nm do 760 nm. K rozpoznávání barev slouží čípký, ve kterých musí nejdříve dojít k aktivaci fotopigmentů, z nichž každý je citlivý na jiný druh světla – červené, modré a zelené. Rozsah pro modrou barvu se pohybuje v rozmezí vlnové délky 440-450 nm, pro zelenou barvu 535-555 nm a pro barvu červenou 570-590 nm. V případě dráždění všech typů čípků vnímáme světlo bílé. Oko vnímá různé barevné tóny, když dojde k podráždění více druhů čípků různou intenzitou osvětlení. Schopnost vnímat barvy mají čípký za podmínek dobrého osvětlení, tedy přes den. Tento jev se označuje jako vidění fotopické. Jakmile klesne intenzita světla pod určitou úroveň, čípký již nejsou schopny barvy rozlišovat a jejich funkci zastupují tyčinky. Vidění se označuje za skotopické a nastává především v noci. Přechodné vidění mezi fotopickou a skotopickou částí se označuje jako mezopické. V této oblasti spolupracují čípký i tyčinky a uplatňuje se hlavně za šera. Barevné vidění lze popsat podle dvou teorií – trichromatická teorie a teorie oponentního procesu. [1,4]

2.4.1 Trichromatická teorie

Trichromatická teorie vychází z předpokladu, že barvy vznikají mísením základních tří barev – modrá, červená a zelená. První záznamy se objevily již v roce 1777 v díle *Theory of Colours and Vision* od George Palmera. Palmer vycházel z předpokladu, že světlo je složeno ze třech různě barevných paprsků, které barevně odpovídají třem typům čípků. Více do detailů tuto problematiku zkoumal začátkem 19. století Thomas Young, který se snažil objasnit, že se v oku vyskytuje pouze omezená četnost typů receptorů, kde určitý typ receptoru vnímá bohatší interval vlnových délek a relativní stupeň jejich aktivace předpovídá vnímanou barvu. Jak už bylo dříve zmíněno, receptory jsou citlivé na zelené, modré a červené světlo. V polovině 19. století Hermann von Helmholtz tuto teorie obohatil díky pokusům s mícháním barev. Zjistil, že senzitivita každého typu čípků není pouze na určité pásmo vlnové délky, ale že všechny vnímají celou škálu vlnových délek, nicméně s odlišnou intenzitou. Dále se snažil posoudit rozklad spektrální citlivosti dílčích typů čípků a také, že informace z čípků putuje k dalšímu zpracování do mozku pomocí třech typů neuronů. Veškeré tyto poznatky vedly ke vzniku tzv. trichromatické teorie neboli Young-Helmholtzovy teorie. [17,18,19, 20]

Ve 2. polovině 20. století došlo k mnoha fyziologickým výzkumům, díky nimž bylo hlouběji popsáno vnímání na sítnici. Ke vzniku konečného barevného vjemu bylo potřeba, aby paprsek, jenž měl určitou vlnovou délku, dopadl na sítnici, kde došlo k podráždění tří typů fotoreceptorů v závislosti na vlnové délce světla. Na příklad vjem žluté barvy vzniká při podráždění čípku světlem o dlouhých a středních vlnových délkách. [17,18]

Aby byla trichromatická teorie prověřena, musela se určit spektrální citlivost čípků pomocí mikrospektrofotometru. Na přístroji se nastavil úzký paprsek světla mířící na zevní část jediného čípku. Prostřednictvím světla bylo možné vidět počet světelných částic, které vstupovaly skrz čípek a také přímo před osvit světla. Tyto dvě hodnoty byly po měření velmi podobné, což představovalo, že zrakový pigment měřeného čípku absorboval pouze miniaturní část použitého paprsku o určité vlnové délce, avšak na druhou stranu bylo absorbováno velké množství částic světla. Z toho vychází, že čím víc světla pigment pohltí, tím je daný čípek citlivější ke světlu o dané vlnové délce. [17]

2.4.2 Teorie oponentního procesu

Teorie oponentního procesu nevychází pouze z existence tří barev jako teorie trichromatická, nýbrž ze čtyř. Představitelem, či zakladatelem této teorie byl v 19. století fyziolog Ewald Hering. V době, kdy působil ve Fyziologickém ústavu v Praze, prováděl pomocí dobrovolníků a vzorníku barev testy, kde bylo úkolem probandů zvolit základní barvy. Základní barvou je taková barva, která nemůže být vytvořena smícháním jiných barev, a to červená, žlutá, zelená a modrá. Dle Heringa tento počet vystačil k popsání celé škály barev díky jejich mísení. Např. oranžová vzniká spojením červené a žluté barvy. Nelze však kombinovat všechny ze základních barev. Pokud se objevovala červená v barvě, zároveň nemohla být přítomná i zelená. Jednalo se o tzv. barvy oponentní. Hering došel k závěru, že zrak je složený z mechanismů, jenž odpovídají protichůdně na jednotlivé vlnové délky a intenzitu světla. Jeden z nich reaguje na červenou barvu pozitivně a na zelenou negativně. Stejně to funguje u mechanismu druhého, kdežto ten zpracovává barvu modrou a žlutou. U modré barvy dochází k inhibici a u žluté k excitaci. Třetí mechanismus se zabývá bílou barvou, kterou excituje a černou, jenž inhibuje. Podle Heringa je zodpovědná za inhibici a excitaci jednotlivých barev tvorba a zánik chemických látek na úrovni sítnice. [17]

Po smrti Heringa nebyl projev oponentní teorii příliš velký zájem a ustupovala do pozadí. Ve 20. století však přišli Hurvich a Jameson s návrhem, jak jednoduše předložit oponentnost barev. Vypozorovali, že obsazení základní barvy v barvě vnímaného stimulu mohou eliminovat dodáním barvy oponentní. V případě osvětlení tyrkysové barvy s pravděpodobným výskytem zelené jednobarevným červeným světlem se tato vytratí. [17]

Experiment fungoval na principu řízení kvantity oponentního světla při působení rozmanitě zbarvených předmětů. V oblasti viditelného světla, které se skládalo z barev s příměsí zelené, se následně nařídilo správné kvantum červeného světla a v oblasti, kde byla obsažena barva červená, se naopak dodalo zelené světlo. Na stejném principu fungovala také barva modrá a žlutá. Hurvich a Jameson se dozvěděli, že aby odstranili pocit čisté barvy v barvě kontrolovaného předmětu, musí se množství světla v závislosti na rozdílných vlnových délkách měnit. Metoda nastíněná těmito dvěma autory je jedna z prvních, jenž byla schválena jako platná teorie, kterou vysvětlil Hering. [17]

V roce 1966 vypozorovali DeValois, Abramov a Jacobs, že v *corpus geniculatum laterale* se nacházejí čtyři druhy neuronů reagující na barvy. První druh neuronů (+R-G) odpovídal podrážděním na červené světlo a snížením aktivity na zelené světlo. Neuron druhý (+G-R) reagoval protichůdně. Neuron +B-Y a +Y-B, tedy třetí a čtvrtý, odpovídaly stejně v rámci barvy žluté a modré. V polovině 70. let bylo zjištěno, že v gangliových buňkách sítnice se vyskytují buňky oponentní. Citlivost oponentních buněk v závislosti na různé aktivaci čípků je velmi vysoká. Jsou také různě reagující na jednotlivé typy vlnových délek. Neurony reagující na červenou a zelenou barvu podněcují středovou část receptivního pole, což následně nutí k vzrůstu nervové aktivity daného neuronu, jenž reaguje na červené světlo. Dráždění obvodové části receptivního pole naopak tlumí nervovou aktivitu neuronu reagujících na zelené světlo. [17,18]

Od 50. let 20. století byly uznávány obě teorie vnímání barev, neboť díky různým studiím vyšlo najevo, že teorie nejsou v nesouladu. Každá teorie se zabývá různým zpracováním barev zrakem. Trichromatická teorie se zabývá zpracováváním barev fotoreceptory. U oponentní teorie dochází k vzájemnému působení čípků, jenž zpracovávají vnímání barev v gangliích a v *corpus geniculatum laterale*. Mechanismus, který se zabývá zelenou a červenou barvou, získává stimul z L čípku (červená) a M čípku (zelená), kdežto neuron pro modrou a žlutou nabývá podnět ze všech typů fotoreceptorů reagujících na barvu. [17]

2.5 Zorné pole

Zorným polem se označuje oblast, kterou vnímáme při fixaci oka na určitý bod. Šířka zorného pole je různá. Vnější rozsah zorného pole pokrývá až 90 %, směrem nazálně pouze 60 %, kraniálně 60 % a kaudálně 70 %. Velikost zorného pole je tedy částečně ovlivněna rysy obličeje. [21,22, 23]

Pokud se obě oči zároveň soustředí na jeden bod, dochází k částečnému překrytí zorného pole, což zprostředkovává binokulární vidění, jenž je zásadní pro tvorbu stereopse. Ve vnějším okolí oka nejsou zorná pole schopny překrytí. Jedná se o tzv. vidění monokulární, které odpovídá téměř 1/6 zorného pole. [22, 23]

Věkem zorného pole ubývá, zejména z vnější části. V 60 letech může klesnout až o 50 %. Tato situace nastává zapadnutím očního bulbu hlouběji do orbity a také ptózou horního víčka, což omezuje zorné pole. Dochází také k věkem snížené senzitivě sítnice v její periférii, a to až o 50 % oproti středu. Díky těmto dvěma změnám, degenerativní změny oka a senzitivity sítnice, se starší lidé hůře orientují v prostoru. [22, 23]

2.6 Zraková ostrost

Termín zraková ostrost sahá do 19. století, kde je spojena se jménem F.C. Donders. Jedná se o způsobilost oka rozpoznávat jednotlivé detaily. Na oko má vliv několik faktorů, a to fyzikální, mezi které patří vady oka, fyziologické (přizpůsobení) a psychologické, mezi které náleží např. pozornost. Zjištění zrakové ostrosti neboli visus slouží k ověření funkčnosti sítnice v centrální zóně. Schopnost oka rozlišovat od sebe dva body je dána úhlem pohledu. Minimálním úhlem rozlišení se rozumí 1', která je úměrná podráždění dvou čípku, mezi nimiž se nachází čípek třetí, jenž není podrážděn. Visus je ovlivněn jasem podnětu, vzdáleností podnětu vzhledem k sítnici, kontrastu vůči okolí, rozměru zornice a refrakčními vadami. [10,21]

Nejčastěji používanou vyšetřovací pomůckou pro zjištění visu do dálky je Snellenův optotyp. Vyšetřující by měl být ve vzdálenosti pět až šest metrů od optotypu. Optotypy jsou složeny z číslic, obrázku, písmen, Landoltových krůhu, Pflügerových háků atd. Rozměr znaků je tvořen tak, aby byl díl znaku viděn ze vzdálenosti, která je přidělena řádku, a to při úhlu jedné minuty. Právě tato číslice udává, z jaké dálky by měl člověk určitý řádek přečíst v případě normálního visu. Visus na dálku se zaznamenává pomocí zlomku, kde v čitateli

leží vzdálenost, na kterou vyšetřujeme, a ve jmenovateli je číslice nejnižšího řádku, jenž člověk dokáže přečíst. Osoba s normálním visem by měla dosáhnout hodnoty 6/6. Velkou roli při vyšetřování hraje správné osvětlení místnosti, které by mělo odpovídat 85 cd/m^2 a také správně osvětlený optotyp. Současné optotypy téměř nepoužívají písmena jako O, B, S a další kruhového tvaru, neboť jsou mezi sebou z vyšetřovací vzdálenosti těžko rozlišitelné. Kromě zlomkového zápisu se používá i zápis decimální, tedy visus 6/6 je totožný jako 1,0. Nedávno se objevily i tzv. log MAR tabulky, kde MAR znamená minimální rozlišovací úhel, který by se měl u zdravého oka dosahovat v rozmezí 30 úhlových vteřin až 1 minuty. Vzhledem ke Snellenovým vyšetřovacím tabulkám hodnota 6/6 odpovídá logaritmické hodnotě 0,1. Pokud má člověk nižší zrakovou ostrost např. na $10'$, odpovídá visu LogMAR 1,0. [21]

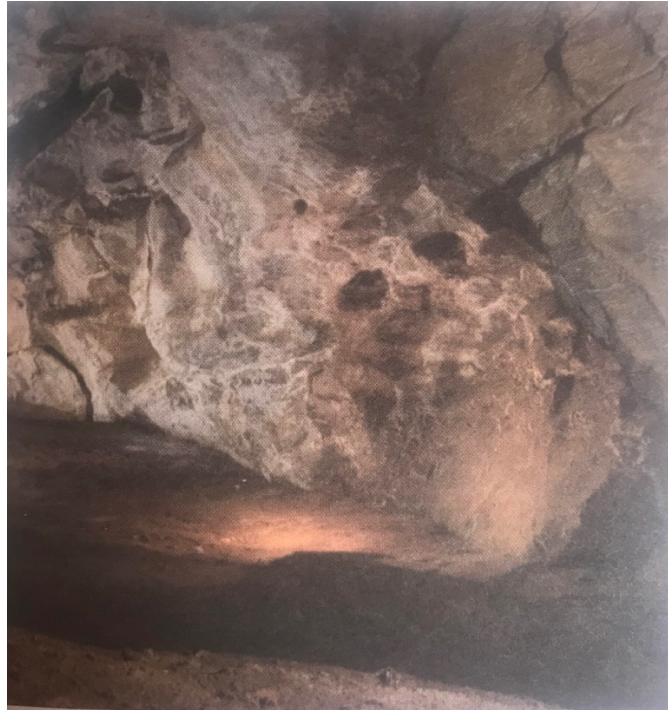
2.7 Vnímání prostoru

Jednou z důležitých informací pro hloubkové vnímání je rozměr sledovaného obrazu, který se zobrazuje na sítnici. Velikost předmětu se mění v závislosti na vzdálenosti od pozorovatele. Tato sítnicová informace však neumožňuje přesné určení vzdálenosti, nýbrž vzdálenost poměrnou. Pokud neznáme skutečný rozměr předmětu objevujícího se v zorném poli, nejsme schopni určit jeho reálnou vzdálenost. Pokud se však stejný předmět vyskytuje současně s předměty podobné velikosti, jsme schopni relativní vzdálenost určit. Můžeme tedy rozpoznat, který předmět leží ve větší či menší vzdálenosti od nás. [17]

Rozměr zobrazovaného objektu nám umožňuje prostorové vnímání (*stereopsi*), když pozorujeme řadu objektů obdobných rozměrů. Dalším přínosem je neklesající hloubkový rozdíl při rostoucí vzdálenosti předmětu od pozorovatele, tedy pokud bude objekt číslo jedna větší o 3 % a více než objekt číslo dva, jsme schopni určit, zda se vyskytují v totožné vzdálenosti. [17]

Rozměr obrazu sítnice nám dává informaci o vzdálenosti předmětu jen v souvislosti s jinými předměty. Vzhledem k tomu, že známe např. skutečnou výšku předmětu, jsme schopni určité dílčí vzdálenosti upřesnit. Odhad jednotlivých vzdáleností získáváme také během života. Víme, jaké výšky dosahuje dospělý muž či jak velký je golfový míček. Právě tento dodatkový údaj lze také začlenit do propočtu vzdáleností a zlepšit stereopsi. Na obrázku tři vidíme pro nás ne příliš známý objekt, tudíž nejsme schopni určit jeho přesnou velikost. Jakmile ale porovnáme tento objekt s objektem známé velikosti, jsme poté

schopni určit i velikost pozorovaného objektu, neboť přiložený objekt nám slouží jako měřítko. Není vždy výhodou znát skutečnou velikost předmětu, i když umožňuje stereopsi specifikovat, neboť situace, kdy dojde k chybnému odhadu, může končit odlišně než naše představy. Příkladem je špatný přepočítání zbytku času řídiče v případě hrozby střetnutí s pěší osobou, u které předvídal určitou velikost. V takové situaci se děti díky jejich malému vzrůstu mohou jevit jako dospělí, ale ve větší vzdálenosti a jsou tedy ohroženější. [17]



Obrázek 3: Jeskynní výklenek [17]

3 Oči živočichů

3.1 Jednoduché oko

Fotoreceptory jednoduchého oka jsou velmi primitivní. Často se shlukují do podoby složitějších orgánů a poté se nazývají oči. Jednoduché oči se také často označují jako ocelli, jenž umožňují vnímat jen směr a množství světla. Tyto útvary mohou měnit svou podobu, a to buď změnou na konvexní tvar nebo vnořením se pod povrch a tím vzniká komorové oko. Shluk receptorů reagujících na světlo se pak označuje jako sítnice. Dostředivé výběžky receptorů mohou mít směr k přichozímu světelnému paprsku nebo mohou být naopak od něj odkloněné. V případě odkloněných receptorů dochází k vnímání světla pomocí odrazu od základní roviny pigmentových buněk, jenž formuje reflexní pozadí oka. Jak již bylo zmíněno, komorové oko umožňuje vnímat pouze směr a množství dopadajícího světla, ale vytvoření obrazu je na velmi primitivní úrovni, téměř nulové. U dravců je zraková ostrost velmi důležitým znakem, a proto v průběhu vývoje vznikla v komorovém oku čočka. [24]

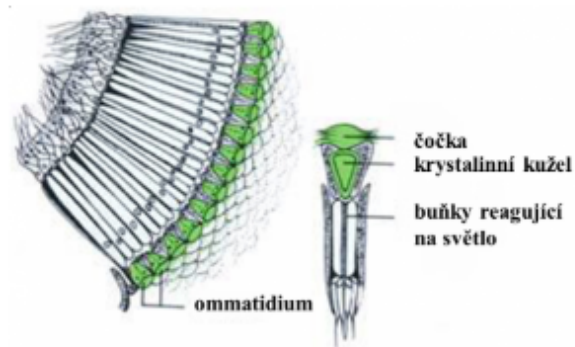
Nejvíce je vyvinuto komorové oko u hlavonožců, kde jsou navíc vyvinuta i víčka, ale i pupila, která dokáže pozměňovat svůj příčný rozměr. Hlavonožci tak dokážou usměrňovat množství přichozího světla. Navíc se u nich vyvinuly i okohybné svaly, tudíž mohou i akomodovat. Je tady jistá podoba s okem obratlovců, avšak z hlediska embryologie se zcela liší. Oko hlavonožců má velikost přibližně 40 cm a množství fotoreceptorů na retině je přibližně 10^{10} , což je oproti člověku podstatně víc. V oku člověka jich je 10^8 . Vidění hlavonožců a obratlovců by tedy mělo být obdobné. [24]

3.2 Složené oko

V průběhu vývoje se oko komorové změnilo do podoby tzv. omatidia. Jakmile se tyto útvary sloučí v objemnější množství, vzniká složené oko. Tento zrakový útvar má původ z pohárku, jenž leží velmi blízko k sobě. Poté došlo k jejich oddělení pomocí vytáhlých pigmentových buněk, jež rozčlenily čirou kutikulu na tzv. korneoly. Takto vzniklý útvar se po sloučení většího množství zúžil a protáhl. V pohárku tak vznikl prostor naplněný rosolovitou hmotou, sklivcem. Následkem došlo ke kontaktu citlivých dostředivých výběžků fotoreceptorů ve spodu pohárku. V průběhu vývoje se začaly z rosolovité hmoty vytvářet krystalové jehlany. Receptory reagující na světlo jsou uloženy ve dvou řadách a aby byla

zajištěna jejich blízká vzdálenost, spojují je rbdomy a z horní části se do nich zanořují jehlany. Množství fotocitlivých receptorů jednotlivých omatidií se označuje jako retinula. U vyspělejšího hmyzu existuje jen jednovrstevná řada fotoreceptorů. [24]

Složené oko je tedy útvar vzniklý z bohatého množství totožných, autentických nezávislých pohárkových očí, jež se změnilly v omatidia. Často se tyto oči nazývají mozaikové, neboť obraz je složený z jednotlivých částí omatidií. Složené oko je známo dobrou registrací pohybu, naopak má ale poměrně špatnou zrakovou ostrost. Rozdíl mezi komorovým a složeným okem je postavení obrazu. Komorové oko má sítnici vydutou a obraz se tvoří převrácený, kdežto oko složené má konvexní sítnici a tvoří vzpřímený obraz. Složené oči se vyskytují u hmyzu a např. u měkkýšů. [24]



Obrázek 4: Složené oko včely medonosné [24]

4 Vidění živočichů

4.1 Reakce na světlo

U živočichů existuje nepřeborné množství detektorů světla, a to od nejjednodušších buněk, které reagují pouze na směr a intenzitu světla až po ty nejsložitější, jenž jsou schopné vytvářet obraz. I když jsou receptory poměrně různorodé, skládají se z téměř stejných pigmentů, které pohlcují světlo, a proto je velká část fotoreceptorů homologická. [26]

Světelná senzitivita spadá pod vlastnosti ektodermálních buněk. Např. krabi vnímají světlo pomocí nervových zakončení. Aby živočichové mohli světlo vnímat, musí se u nich vyskytovat rhodopsin, což je pigment, který obsahuje molekuly, které pohlcují světlo ve formě fotonů. Různě upraveným rhodopsinem se mění kvalita na reagující světlo, např. vnímání určité barvy. Barvocit tedy nezáleží na morfologii oka, nýbrž na jednotlivých rodopsinových modifikacích. [24]

Organely reagující na světlo jsou přítomny již např. u primitivních bičíkovců, kteří jsou jednobuněční. Tyto objekty reagující na světlo se označují jako světločivné skvrny neboli tzv. stigmata. Jedná se o shluk světločivných pigmentů. Některé organismy jsou však daleko vyvinutější a nalezneme u nich podobu komorového oka, které se často označuje jako ocelloid. Tento útvar obsahuje struktury shodné s corneou, retinou a oční čočkou. [24]

U organismů mnohobuněčných se považují za nejjednodušší organely reagující na světlo fotoreceptory jednobuněčné, které jsou na svém povrchu opatřeny klky či brvami. Z toho tedy vyplývá, že receptory vnímající světlo jsou vyvinuty z buněk, které mají bičík nebo brvy (cilia) sloužící jako smyslová vlákna. Během růstu se mohou tato smyslová vlákna sloučit s vnějškem membrány nebo prorůst až do nitra buňky. Pokud se tedy klky sloučí s membránou do podoby valů, označují se jako rabdomy, v případě nesloučení tzv. rabdomery. Podle převahy klků či cilií na receptoru se poté receptory dělí na rabdomové nebo ciliární. [24]

4.2 Barevné vidění u zvířat

Jestliže člověk nemá žádnou poruchu barevného vnímání, označuje se jako trichromat. Na barvy reaguje prostřednictvím tří druhů světločivných receptorů. Někteří živočichové však nejsou schopni barvy rozeznávat vůbec, naopak u ostatních živočichů oproti člověku

převládá mnohem lepší barevné vidění. Člověk vnímá barvy pomocí tří receptorů, kdežto počet fotoreceptorů u živočichů se pohybuje v rozmezí od jedné do pěti. Existují i výjimky, které mají více než pět druhů fotoreceptorů. Např. strašek paví, což je mořský živočich, má přes deset druhů. Dalším rozdílem oproti člověka je citlivost fotoreceptorů. Někteří tvorové mají citlivost sniženou, další reagují více na ultrafialové či infračervené spektrum. Barevné vidění živočichů je zkrátka různé. [17]

Na barevné vidění v současnosti probíhá mnoho výzkumů, jehož informace se čerpají různými metodami, např. mikrospektrofotometrií, sekvencí genů a pozorováním přirozeného prostředí. Zjištěné informace barevného vidění živočichů jsou ale teprve na začátku, neboť existuje nepřeberné množství živočichů. [17]

Již u bezobratlých živočichů najdeme barevné vidění, zejména u pavouků, hmyzu či korýšů. Rozeznávat barvy je velmi důležité pro opylovače. Včely i čmeláci mají senzitivitu vyšší na ultrafialové spektrum, což jim pomáhá nalézt potravu. I když je toto spektrum člověku a velkému množství zvířat neviditelné, opylovačům slouží k navigaci. Rostliny v tomto spektru mají větší kontrast oproti okolí a jsou tedy pro včely pohledově atraktivnější. Velké množství živočichů je schopno rozeznávat barvy v oblasti ultrafialového spektra, avšak u většiny zvířat není možné vidět barevně ve tmě. Existují však i ojedinělé druhy jako lišaj vrbkový, jenž je schopný vyhledat nektar při hodnotě jasu $0,0001 \text{ cd/m}^2$, což odpovídá slabě svítícím hvězdám. Dalším tvorem je gekon, který rozeznává barvy ještě při $0,002 \text{ cd/m}^2$, stejný jas, jenž odpovídá záření měsíce. [17]

Ryby mají barevné vidění velmi rozlišné. Záleží na tom, zda se jedná o rybu žijící ve sladké či slané vodě nebo také, jak hluboko ve vodě žije. Oproti obratlovcům, u nichž je barvivem rhodopsin, u ryb se vyskytuje porfyropsin, jehož vstřebávání je posunuto ke kratším vlnovým délkám, a proto mají sniženou senzitivitu pro červenou. Ve více než 200 metrech hluboko se vyskytuje pouze jediný zdroj světla označující se jako bioluminiscence, která vyzařuje světlo z ryb žijící v hlubině, avšak i tady lze rozeznat barvy. Tak hluboko pod hladinou nejvíce vyzařuje světlo, které dosahuje vlnových délek 450–500 nm, proto se spousta ryb jeví v odstínech zelené či modré barvy. Porfyropsin perfektně absorbuje světlo odpovídající bioluminiscenci. Oči jsou tak dokonale uzpůsobeny těmto podmínkám. V moři existují i ryby, které vyzařují červeně a červenou barvu mohou i ony samy odhalit, což se může zdát jako nevýhoda pro přežití, neboť právě červená má nejmenší vzdálenost dosvícení. Naopak to může být pro ně i výhoda, protože v blízkosti dalších ryb mohou být neviditelné. [17]

Z hlediska vývoje barevného vidění mají nejvíc vyvinutou tuto schopnost právě ptáci. V porovnání s námi, lidmi, jsou na tom ptáci z hlediska barevného vidění daleko lépe, neboť na jejich sítnici, a to hlavně v místě fovey mají přibližně 1 milion čípků na 1 mm². Lidské oko má na 1 mm² jen 150 tisíc čípků. Jak již bylo dříve zmíněno, živočichové vnímají světlo jedním až pěti fotoreceptory, v případy ptáku čtyřmi až pěti fotoreceptory. Mají posunutou senzitivitu k ultrafialovému spektru. Ptáci zkrátka vnímají barvy jinak než my, jejich obraz je více zřetelný a jednodušeji rozlišitelný. Sítnice ptáků navíc obsahuje o jeden mechanismus navíc, který zajišťuje lepší rozlišovací schopnost a lepší přizpůsobení se barevnému vidění. Fotoreceptory ve svém vnitřku mají barevné kapky olejového charakteru, které tvoří filtr, jímž prochází světlo dříve, než ho postřehne zrakový pigment. Tyto útvary nejsou permeabilní pro veškeré pásmo viditelné oblastí, ale jen pro pásmo zúžené. Významně tak působí na konečný průběh míchání barev v receptorech. U některých barevných obrazů mohou zvýraznit intenzitu nebo ji zeslabit. Např. holub má v sítnici nejvíce obsaženy kapénky červené, proto hůře vnímají barvy kratších vlnových délek – fialová a modrá. Tato nevyrovnanost je však adaptabilní, neboť zajišťuje větší kontrastnost vidění při letu nad vodními hladinami nebo v mlze. U ostatních ptáků se červené kapénky vyskytují v menší míře, a proto se jejich obraz může velmi podobat našemu. [17]

Většina lidí žije v představě, že psi, kočky a například i koně vnímají svět jen černobílý, avšak vidění velkého počtu savců je hlavně dichromatické. Savčí oko tedy má jen dva typy fotoreceptorů. První z nich je citlivější na kratší vlnové délky a druhý na delší vlnové délky. Maximální senzitivita fotoreceptorů je rozdílná u jednotlivých savců. Myš má největší senzitivitu v části ultrafialového spektra. Jelikož savci vnímají spíše jen světlo kratších a delších vlnových délek, od žluté po modrou, barvy středních délek nerozpoznávají a vidí je téměř totožně. Oproti člověku jsou schopni rozeznávat menší počet barev. V případě psa je počet čípků v porovnání s celkovým počtem fotoreceptorů pouze 2 % a u fovey pouhých 20 %. Postupným vývojem se u člověka a primátů vytvořil třetí pigment, proto je jejich vidění trichromatické. Tato změna přivedla několik kladů – jednodušší nalézání potravy. Další zajímavostí u primátů je různá forma vnímání barev, jenž se u člověka může jevit různou podobou barvosleposti. [17]

4.3 Prostorové vnímání zvířat

Živočichové jako motýl, pelikán, kůň, chameleon a holub dokáží výborně odhadnout vzdálenost a polohu předmětu v prostoru. Prostorové vnímání je pro živočichy daleko důležitější než pro člověka, neboť je to jedna z podmínek pro přežití. Prostorové vnímání jim pomáhá k vyhledávání potravy, skrýše či při útoku. [17]

V případě barevného vnímání měly důležitou roli fotoreceptory živočichů, kdežto u prostorového vnímání hraje významnou roli postavení očí. Postranní pozici očí nalezneme spíše u obětí. Zvířata jako je myš, holub či králík mají rozhled dopředu, na stranu a zčásti i dozadu, což jim umožňuje velmi dobře vnímat možné nebezpečí. Velké množství ptáků je schopno vnímat očima celé své okolí, tedy 360°. Jakmile se potřebují zaměřit např. na potravu v blízké vzdálenosti, otočí oči směrem dovnitř, aby podnět vnímali oběma očima najednou, dojde tedy k fúzi. Když však pocít'ují hrozící nebezpečí, oči se jim od sebe maximálně oddálí do strany a jejich vidění se poté podobá panoramatu. Pozice očí na čelní straně hlavy je typická pro lovce, predátory. Kočkovité, psovité šelmy, ale také draví ptáci a lidé fixují pohled binokulárně na jeden bod v prostoru, proto je jejich obraz více přesný, plastický a také vnímají více detailů. Díky současnému pozorování oběma očima dokážou tyto živočichové nepřerušeně kontrolovat pohyb možných obětí, předpokládat jejich vzdálenost a vzrůst, což vede k úspěšnému lovu. [17]

Laterální a frontální postavení očí ale ne vždy označuje oběť nebo predátora, existují i výjimky. Laterální postavení očí najdeme u krokodýlů a žraloků, naopak frontální pozice očí je u býložravých primátů nebo kaloňů. Zaslouhou vědců Changizi a Shimojo vznikla jiná teorie. Dle nich byla pozice očí u zvířat vyvinuta podle toho, v jakém prostředí žije a zda je možné, aby binokulární vidění na tomto místě neslo s sebou nějaké klady. Herbivorní primáti, ale i tygři a další živočichové žijí v místech zaplněných listím na stromech a s různými porosty. Pomocí současného pozorování oběma očima můžou tyto živočichové lépe prozkoumat, co je za listím, a tak se velmi dobře pohybují při lovu, útěku a sběru. Naopak živočichové žijící ve volném prostranství, takové vidění příliš nevyužijí. [17]

Hmyz má oči nepohyblivé s pevně danou optikou, takže nejsou schopni přizpůsobit oko na pohled do dálky nebo blízka, což je nevýhoda, protože nemají prostorový odhad. Taktéž stereoskopické vidění používají pouze omezeně, neboť jejich oči jsou postaveny velmi blízko sobě a schopnost oka rozlišovat je nízká. V prostoru se orientují pomocí pohybu. Tři vědkyně, které se zaměřovaly na včely v roce 1990, přišly s návrhem, jak naučit včely najít

potravu. Potravu vždy daly na předmět v určité výšce nad zemí, jenž se nacházel mezi dalšími předměty s rozdílnými výškami. Včely pak potravu s úspěchem našly nehledě na změny velikosti a vzhledu ostatních předmětů. Zjistily, že včely se tak řídily zprávami o relativní projekci pohybu daného předmětu a povrchu země.

Posunutí obrazu vzniklého na sítnici lze navodit i svou lokomocí. Např. sarančata či kudlanky před lovem hýbají hlavou tam a zpět, z důvodů navození motorické informace na sítnici, což vede k oddělení oběti od pozadí a k upřesnění polohy oběti. Jestliže se však oběť pohne při pohybu sarančete, dojde ke špatnému posouzení pozice a predátor sledovaný objekt mine. V případě lovu se vážka snaží při lovu napodobovat trajektorii a pohyb sledovaného objektu, aby posunutí v jejich očích bylo téměř bezvýznamné. Tak se schopnost rychle vnímat drobné předměty jeví jako jednoduchá a účelná. Je však nutné, aby se vážka pohybovala větší rychlostí než oběť. [17]

Majoritní část plazů a obojživelníků má oči v laterální pozici na hlavě a jejich rozsah má až 100° . Mezi obojživelníky, kteří se pyšní velice dobrým odhadem v prostoru, jsou žáby, a proto se vyhýbají překážkám velmi přesně. Při lovení oběti jsou ve vzdálenosti přibližně 6 cm a pak ji získají svým jazykem. Oproti hmyzu mají žáby schopnost akomodovat, avšak akomodace zde neprobíhá jako u člověka změnou tvaru oční čočky, ale jejím posunutím dopředu nebo dozadu, poloha oka zůstává neměnná. Chameleonovy oči jsou vypouklé a vodorovně se pohybují v rozsahu 180° a svisle 80° . Když chameleon hledá potravu, jednotlivými očima vykonává sakády, rychlé pohyby bulbů. Jakmile najde svoji oběť, upře zrak obou očí právě na ni a vyčká, než se vyskytne přesně před ním a vypálí po ní jazykem. Chameleon se v prostoru řídí informacemi získanými akomodací. Čočka chameleona je vyhloubená, což je u zvířat velmi neobvyklé. Díky takovéto čočce zaostřuje nezvykle pohotově, a to s optickou mohutností 45 dioptrií. [17]

Většina ptáků, až na sovy, má binokulárně rozsah zorného pole 15° až 30° . Kladem je široký přehled v okolním prostředí, ale také velká preciznost při různých aktivitách ptáků, jako je předvídání momentu možné kolize a průběžná úprava polohy zobáku vůči postřehnutému cíli. Ptačí oči mají minimální schopnost pohybu a ve spojení s malým zorným polem v případě binokulárního vidění, mohou nastat různá omezení. Holubi a další ptáci si tuto vadu vynahrazují rychlými hlavovými pohyby, které nejčastěji provádí při chození nebo při přistávání. Jejich pohyb je složený ze dvou částí, a to rychlým pohybem hlavy dopředu a vratnou částí, jenž de facto není vratná, neboť poloha hlavy se vůči okolí nemění. Právě v této vratné fázi dochází k ustálení obrazu na sítnici. [17]

5 Vizualizace vidění živočichů

Tato část mé práce je mou praktickou částí, která vychází na základě teoretických poznatků z předchozích částí. V mé praktické části jsem se snažila vizualizovat rozdíly mezi viděním člověka a vybraných druhů živočichů – včely, orla, žraloka, mouchy a kočky. Zvolila jsem tyto živočichy, neboť se dle mého názoru jedná o druhy, jenž se od člověka hlavně z hlediska vidění podstatně liší. Zaobírala jsem se odlišnostmi z hlediska barevného vidění, zrakové ostrosti či zorného pole.

K vytvoření praktické části jsem potřebovala fotografie, jež byly pořízeny pomocí zrcadlovky – Nikonu D3200 a iPhone 7. Poté jsem snímky vložila do grafického programu a pomocí různých filtrů jsem fotografie upravila. Mezi použité grafické programy jsem zahrнула gimp, adobe photoshop a mobilní aplikaci snapseed.

5.1 Vizualizace vidění orla

Již v teoretické části jsem zmínila, že zrak ptáků je jeden z nejvyvinutějších, neboť v porovnání s člověkem obsahuje jejich sítnice podstatně více čípků, a to až 1 milion na 1 mm². Orlí oko tedy vnímá barvy živěji než my. Světlo také registrují daleko lépe, protože zapojují čtyři až pět druhů fotoreceptorů, což jim dodává schopnost vidět ve větším rozlišení.

Obecně pro dravce je zraková ostrost velmi důležitá, protože právě díky ní jsou schopni zaregistrovat velmi malé hlodavce ze vzdálenosti až dvou kilometrů. Dokáží vidět dokonce 4- 5krát vzdálenější obraz než člověk. Vytvořený obraz orla je v centru nepatrně zvětšený a v periferii mírně rozostřený. [27, 28] Oči orla jsou konvexního tvaru. Fungují stejně jako teleobjektiv, tedy zvětšují vzdálený předmět. Mezi jeho další přednosti patří zorné pole, jež dosahuje až 340°. [27]

Dle výchozích informací jsem se snažila zvolit vhodnou úpravu fotografie. Na prvním snímku, který je zachycen na vrcholku hory, vidíme pohled člověka. Na snímku druhém je již vytvořena vizualizace orlího vidění při lovu hlodavce.



Obrázek 5: Pohled člověka



Obrázek 6: Pohled orla

5.2 Vizualizace vidění včely

Včely mají složený typ očí, jak již bylo zmíněno dříve. Složené oko je složeno z tisíce omatidií. Každá omatidie je schopná vidět pouze část celkového obrazu, proto je celkový obraz vnímán jako mozaika. Složené oko není schopno akomodovat, proto je jeho zraková ostrost velmi špatná. Mezi jeho přednosti ale spadá dobrá registrace pohybu. Opylovači, konkrétně včely, mají ve svých očích tři druhy buněk reagující na světlo, obdobně jako u lidí, avšak jejich spektrální citlivost je rozdílná oproti člověku. Jsou schopny vnímat barvy v oblasti ultrafialové, modré a zelené. Červenou barvu tedy podstatná část včel nevnímá nebo je vnímána achromaticky. Včely rozeznávají každou rostlinu jinak, a to nejen podle zbarvení. V ultrafialové oblasti lze vidět na květinách různé vzory, které my nejsme schopni vnímat. Většinou je dochází k zvýraznění květinového centra, což je důležité pro nalákání včel. Můžou být ale i zvýrazněny jen tyčinky či pestík nebo celé okvětní lístky. [29, 30]

Na první fotografii můžeme vidět obraz z pohledu člověka a na druhém z pohledu včely.



Obrázek 7: Pohled člověka



Obrázek 8: Pohled včely

5.3 Vizualizace vidění kočky

Rozdílné vidění mezi lidmi a kočkami spočívá v sítnici, respektive ve fotoreceptorech. Jak již bylo zmíněno dříve, tyčinky slouží k vidění za skotopických podmínek a čípky jsou důležité pro vnímání barev a vidění za světla. Jednoduše řečeno, čím více má daný živočich čípků, tím rozeznává bohatší oblast barev a čím víc má tyčinek, tím je jeho vidění ve tmě lepší. V sítnici koček je tyčinek podstatně více v porovnání s člověkem, naopak čípků je méně. Člověk má tyto počty tedy obráceně, proto my lidé rozeznáváme větší spektrum barev, ale vidění za tmy je pro nás horší. [31]

Zorné pole kočky je mírně širší a dosahuje 200° , kdežto lidé mají rozsah zorného pole 180° . Zraková ostrost koček je velmi slabá. Průměrný člověk dosahuje zrakové ostrosti 20/20, kdežto u koček nabývá hodnot 20/100–20/200, což znamená, že kočka musí být ve vzdálenosti šesti metrů, aby viděla stejně ostře jako člověk ze vzdálenosti třiceti

až šedesáti metrů. Kočky se tedy řadí mezi myopy. Schopnost vidět dobře na blízko má u koček výhodu, např. při chycení kořisti. [31, 32, 33]

Barevné vidění se od člověka také liší. Spousta lidí si myslí, že kočky nevnímají barvy, ale rozeznávají pouze odstíny šedi. Tento fakt však není pravda. Barevné vidění u koček odpovídá vidění člověka, jenž má poruchu jedné z barev, je tedy dichromát. Vnímají odstíny modré a zelené, ale červená a růžová je pro ně špatně rozpoznatelná. Tyto dvě barvy se jim jeví spíše v zelených odstínech a např. purpurová se jeví v odstínu modré. Kočky tedy nevidí tak bohaté barevné spektrum jako my a nasycenost barev je také slabší. [33, 34]

I když kočky nevidí drobné detaily a bohaté barvy, jejich výhoda je vynikající vidění za tmy, a to díky velkému množství tyčinek v retině. Kočky jsou schopné vnímat obraz i v situaci, kdy do jejich oka dopadá až 6× méně světla než u člověka. K nočnímu vidění jim napomáhá i struktura za sítnicí, jenž se nazývá *tapetum lucidum* neboli odrazová vrstva. Buňky odrazové vrstvy působí jako zrcadlo. Odražené světlo, které projde mezi tyčinkami a čípkami se odrazí od odrazové vrstvy a vrací se zpět k fotoreceptorům. Tato schopnost jim umožňuje zachytit i malé množství světla dostupného v noci, a to je také důvod, proč kočky v noci oči září. [31, 32]



Obrázek 9: Pohled člověka za světla



Obrázek 10: Pohled kočky za světla



Obrázek 11: Pohled člověka ve tmě



Obrázek 12: Pohled kočky ve tmě

5.4 Vizualizace vidění mouchy

V teoretické části bylo zmíněno, že mouchy mají složené oči, jenž se skládají z tisíce malých oček. Díky tomuto složení se jejich obraz podobá mozaice. Dokáží velmi dobře registrovat pohyb, ale zraková ostrost nedosahuje vysokých kvalit, jelikož nemají schopnost akomodace. Nervový přenos mezi mozkem a očima je rychlejší než u lidí, a to až 10×. Proto není snadné mouchu chytit, neboť vnímá pohyb člověka pomaleji než on sám. Další výhodou je vypouklý tvar očí, což mouše přináší široké zorné pole. [35, 36]

Barevné vidění much se opět odlišuje, protože se u nich vyskytují rozdílné zrakové pigmenty než u lidí, pouze dva druhy. Jeden z nich vnímá žlutozelenou barvu a druhý modrou až ultrafialovou. Rozsah vlnových délek těchto barev však není tak široký jako u člověka. Moucha také nemá schopnost vnímat jednu z barev, a tou je červená. [35]



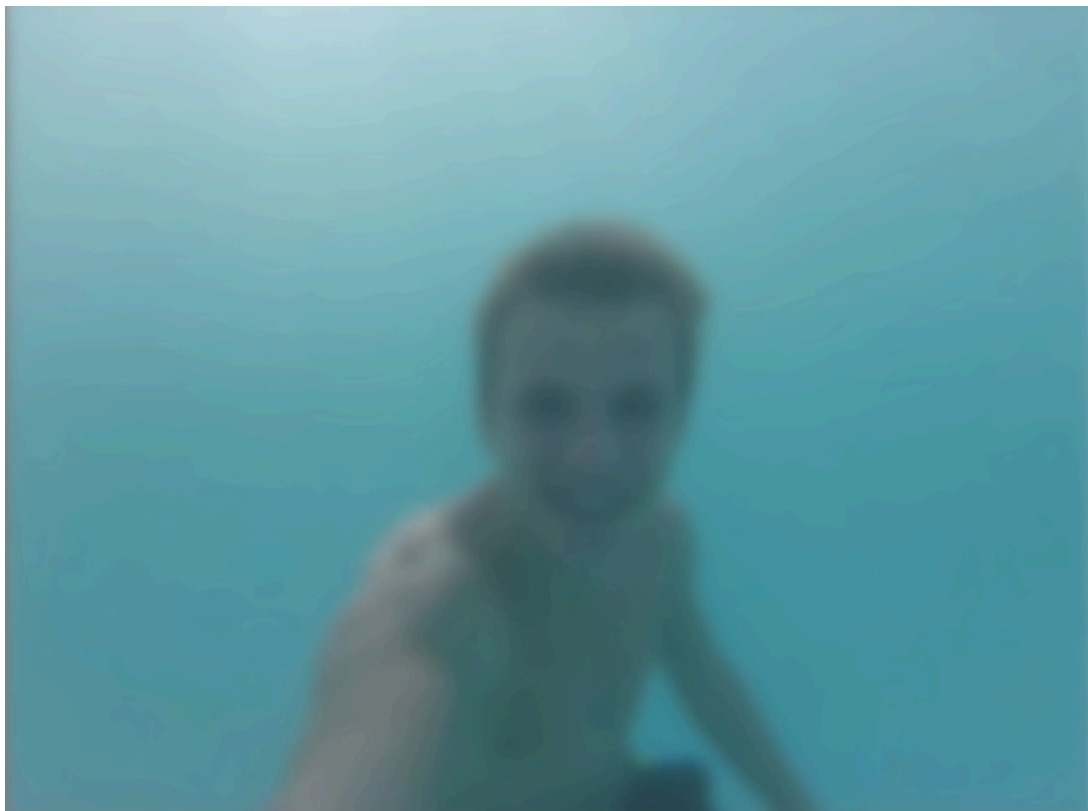
Obrázek 13: Pohled člověka



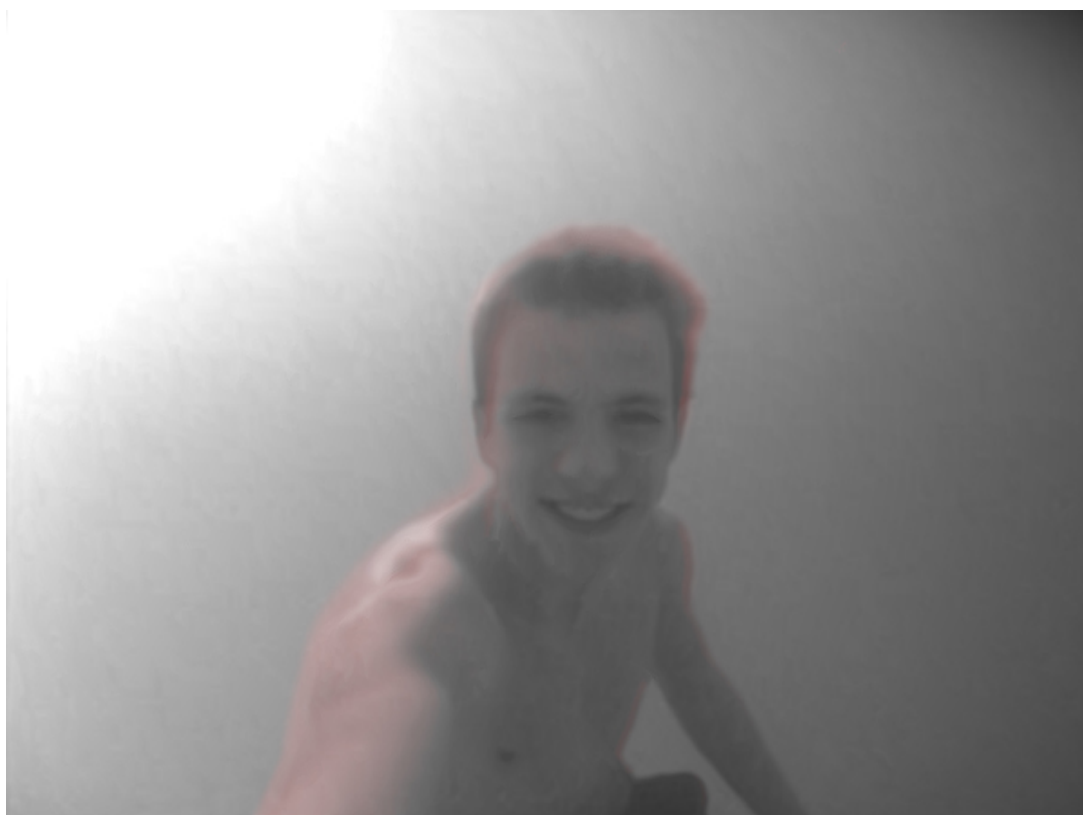
Obrázek 14: Pohled mouchy

5.5 Vizualizace vidění žraloka

Poměrně dlouhou dobu se předpokládalo, že jejich zrak je velmi špatný. Tento fakt však není pravda, u žraloků smysly jsou dobře vyvinuty. Žraločí oči jsou umístěny laterálně na hlavě. Podoba jeho oka je velmi blízká lidskému oku. Také obsahuje základní struktury – rohovku, čočku, zornici nebo duhovku. Jeho sítnice obsahuje velké množství tyčinek, což je důležité při vidění za špatných světelných podmínek, čímž se vyznačuje mořské dno, a málo čípků, tudíž vnímají ne příliš syté barvy. Duhovka má schopnost stažení a roztažení v závislosti na dopadajícím světle, stejně jako je tomu u člověka. Většina ryb tuto schopnost postrádá. V sítnici u žraloka navíc nalezneme odrazivou vrstvu, jenž se označuje *tapetum lucidum*, stejně jako u koček. Úkolem této vrstvy je odrážet světelné paprsky zpět skrz sítnici. Jestliže zasvítíme v noci do žraločího oka, tak se reflex odrazí zpátky, proto budí dojem svítících očí. Za špatných světelných podmínek jsou schopni vidět obraz ve světlých odstínech. Žraločí oko je až desetkrát citlivější na slabé světlo než lidské oko. Další zajímavostí žraloků je přítomnost víčka neboli tzv. mžurky. Jsou to jediné paryby, u nichž se víčka vyskytují. Obecně ani u žádných ryb se nevyskytují víčka. Jakmile jsou v těsné blízkosti kořisti, zavírají je, aby ochránili své oči. Zraková ostrost pod hladinou je mnohem lepší než vidění člověka pod hladinou, a to dokonce do vzdálenosti až 20 metrů. Zorné pole je poměrně široké vzhledem k postavení očí, avšak objevují se v něm i slepá místa, konkrétně za hlavou a přímo před ní. [37, 38]



Obrázek 15: Pohled člověka



Obrázek 16: Pohled žraloka

Závěr

V teoretické části mé práce jsem nejdříve zpracovala anatomii lidského oka, především jeho základní strukturu, tedy bulbus a následně přídavné oční orgány. Popsala jsem fyziologii oka a věnovala se centrálnímu a perifernímu vidění. Zabývala jsem se vnímáním barev, které je možné vysvětlit dvěma teoriemi – známější a více uznávanou trichromatickou teorií a méně známou teorií oponentního procesu. Následně jsem se věnovala zrakové ostrosti a zornému poli. V poslední části o člověku jsem se zabývala jeho prostorovým vnímáním.

V druhé polovině teoretické části mé bakalářské práce jsem přehledně zpracovala získané informace o vidění živočichů z hlediska anatomie jednoduchého a později i vyvinutějšího složeného oka. Jednoduché oko je velmi primitivní a dokáže vnímat pouze směr a množství dopadajícího světla, s výjimkou hlavonožců, kteří mají vyvinutou i čočku, tudíž mohou akomodovat. Složené oči velmi dobře registrují pohyb, mají konvexní sítnici a tvoří vzpřímený obraz. Vzhledem k jeho stavbě, tedy složení velkého počtu malých očí vzniká obraz mozaikový. Dále jsem popsala reakci na světlo u různých živočichů a fakt, že světločivné buňky nalezneme již u primitivních bičíkovců. Podstatnou část tvoří zpracování barevného vidění živočichů. Oproti člověku existuje u živočichů ta zvláštnost, že u nich najdeme jeden až pět typů fotoreceptorů, nikoli pouze tři jako u člověka. Jednotlivé živočišné druhy reagují rozdílně na různé vlnové délky. Opylovači mají vyšší senzitivitu na ultrafialové světlo, což jim usnadňuje vyhledávání potravy. Ryby mají barevné vidění přizpůsobené podle prostředí, ve kterém žijí, celkově ale mají sníženou senzitivitu pro červenou barvu. Nejvyvinutější barevné vidění je u ptáků, neboť mají v místě fovey až 1 milion čípků na 1 mm². Ptáci mají posunutou citlivost k ultrafialové části spektra. Ani barevné vidění savců a člověka není totožné. Savci mnoha druhů mají pouze dva fotoreceptory, z nichž jeden je citlivější na kratší vlnové délky a druhý na delší vlnové délky. Z toho vyplývá, že vidění savců opravdu není pouze černobílé, jak se všeobecně mylně předpokládá. V poslední kapitole teoretické části jsem se věnovala prostorovému vnímání a zornému poli živočichů, které je ovlivněno pozicí očí na hlavě. Obecně u savců platí, že oči postavené laterálně označují oběti, kdežto frontální postavení mají predátoři a lovci, existují však i výjimky.

V praktické části jsem pomocí grafických programů úspěšně vizualizovala rozdíly mezi viděním člověka a určitými živočišnými druhy. Vizualizace nemusí být stoprocentní, neboť vidění živočichů není ještě zcela do detailů objasněno.

Seznam použité literatury

- [1] JANSKÝ, Ladislav a Ivan NOVOTNÝ. *Fyziologie živočichů a člověka*. Praha: Avicenum, 1981.
- [2] *Přehled anatomie člověka*. Univerzita Palackého v olomouci. Olomouc, 2008. ISBN 80-244-1480-5.
- [3] ČIHÁK, Radomír. *Anatomie 3. Třetí, upravené a doplněné vydání*. Praha: GRADA, 2016. ISBN 978-80-247-5636-3.
- [4] ROZSÍVAL, Pavel. *Oční lékařství*. Praha: Galén, 2006. ISBN 80-7262-404-0.
- [5] *Almanach vědomostí*. Praha: Reader's Digest Výběr, 2003. ISBN 80-86196-63-1.
- [6] Průřez lidského oka. In: *Www.wikiskripta.eu* [online]. Wikiskripta. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a3/Schematic_diagram_of_the_human_eye_cs.svg/800px-Schematic_diagram_of_the_human_eye_cs.svg.png
- [7] DYLEVSKÝ, Ivan. *Somatologie*. Vyd. 2. (přepřac. a dopl.). Olomouc: Epava, 2000. ISBN 80-862-9705-5.
- [8] HEISSIGEROVÁ, Jarmila. *Oftalmologie*. Praha: Maxdorf, 2018. ISBN 978-80-7345-580-4.
- [9] KUČHYNKA, Pavel. *Oční lékařství*. 2., přepracované a doplněné vydání. Praha: GRADA, 2016. ISBN 978-80-247-5079-8.
- [10] Fyziologie oka. *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. Dostupné z: https://is.muni.cz/www/345402/66012191/Fyziologie_oka.pdf
- [11] ATCHISON, David A. a George SMITH. *Optics of the Human Eye*. Edinburgh: Elsevier Books, 2000. ISBN 0750637757.
- [12] *Anatomy of cornea and ocular surface*. , 190-194. DOI: 10.4103/ijo.IJO_646_17.
- [13] Stavba rohovky. In: *Čočky-kontaktní.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.cocky-kontaktni.cz/globalfiles/stavba-rohovky.png>
- [14] Katarakta. *Vyšší odborná škola zdravotnická a Střední zdravotnická škola* [online]. Dostupné z: [http://portal.szsp Praha 1.cz/szs/portal.nsf/0/D3A86C174BA2CE5AC1257CFC0048C193/\\$FILE/Katarakta.pdf](http://portal.szsp Praha 1.cz/szs/portal.nsf/0/D3A86C174BA2CE5AC1257CFC0048C193/$FILE/Katarakta.pdf)

- [15] LESTER C. Loschky, Antje NUTHMANN, Francesca C. FORTENBAUGH, Dennis M. LEVI; Scene perception from central to peripheral vision. *Journal of Vision* 2017;17(1):6. doi: <https://doi.org/10.1167/17.1.6>.
- [16] *Handbook of Optics*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, c2010. ISBN 978-0-07-149891-3.
- [17] ŠIKL, Radovan. *Zrakové vnímání*. Praha: Grada, 2012. Psyché (Grada). ISBN 978-80-247-3029-5.
- [18] Teorie barevného vidění. *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/u7qow/Teorie_barevneho_videni.pdf
- [19] WRIGHT, W.D. The present status of the trichromatic theory. *Doc Ophthalmol* **3**, 10–23 (1949) doi:10.1007/BF00162596
- [20] *The Science of Color*. Second edition. UK, 2003. ISBN 0-444-512-519.
- [21] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění*. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.
- [22] Zorné pole. *Wikiskripta* [online]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Perimetrie_\(2._LF_UK\)](https://www.wikiskripta.eu/w/Perimetrie_(2._LF_UK))
- [23] Zorné pole. *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/vewiu/Bakalarska_praca_-_Zorne_pole..pdf
- [24] ROSYPAL, Stanislav. *Nový přehled biologie*. Praha: Scientia. ISBN 80-718-3268-5.
- [25] Složené oko včely medonosné. In: *Včelařství* [online]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/files/98/7522.png
- [26] CAMPBELL, Neil A. a Jane B. REECE. *Biologie*. Brno: Computer Press, c2006. ISBN 80-251-1178-4.
- [27] Ohromující schopnosti dravých ptáků: Sokolí zrak a síla orlů. *Příroda*. 2017, 2010(11), 1.
- [28] What If Humans Had Eagle Vision? In: Live science [online]. 11 West 42nd Street, 15th Floor, New York: Future US, 2012, February 24. Dostupné z: <https://www.livescience.com/18658-humans-eagle-vision.html>
- [29] Včely a evoluce barev květů. *Vesmír* [online]. 2003, 8. 9. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2003/cislo-9/vcely-evoluce-barev-kvetu.html>

- [30] How bees see and why it matters. *Bee Culture* [online]. 2016, May 20 [cit. <https://www.beeculture.com/>]. Dostupné z: <https://www.beeculture.com/bees-see-matters/>
- [31] Kočičí zrak – jak vidí kočky? *Váš chovatel* [online]. 2019, 30.7. Dostupné z: <https://www.vaschovatel.cz/blog/614-kocici-zrak-jak-vidi-kocky.html>
- [32] Feline Vision: How Cats See the World. *Live science* [online]. 2013, October 16. Dostupné z: <https://www.livescience.com/40459-what-do-cats-see.html>
- [33] This Is How Cats See the World. *Wired* [online]. 2013, 16. 10. Dostupné z: <https://www.wired.com/2013/10/cats-eye-view/>
- [34] Vidí kočky barevně? *Krmení* [online]. 2019, 19. 4. Dostupné z: <https://krmeni.cz/vidi-kocky-barevne-96947>
- [35] Oko mouchy. *Pro život* [online]. Dostupné z: <https://pro-zivot.webnode.cz/co-vime-o-prirode-/oko-mouchy/>
- [36] Kolik očí mají mouchy. *School Press Club* [online]. 2015, 17. července. Dostupné z: <https://pro-zivot.webnode.cz/co-vime-o-prirode-/oko-mouchy/><https://www.schoolpressclub.com/clanky/10312-prirodovedne-okenko>
- [37] How do sharks see, smell and hear? *How stuff works* [online]. Dostupné z: <https://animals.howstuffworks.com/fish/sharks/shark-senses3.htm>
- [38] Shark sensen. *Elasmodiver* [online]. Dostupné z: http://www.elasmodiver.com/shark_senses.htm

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma oční koule [7]	3
Obrázek 2: Stavba rohovky [13].....	6
Obrázek 3: Jeskynní výklenek [17]	14
Obrázek 4: Složené oko včely medonosné [24]	16
Obrázek 5: Pohled člověka	23
Obrázek 6: Pohled orla	23
Obrázek 7: Pohled člověka	24
Obrázek 8: Pohled včely.....	25
Obrázek 9: Pohled člověka za světla	26
Obrázek 10: Pohled kočky za světla.....	27
Obrázek 11: Pohled člověka ve tmě	27
Obrázek 12: Pohled kočky ve tmě	28
Obrázek 13: Pohled člověka	29
Obrázek 14: Pohled mouchy.....	29
Obrázek 15: Pohled člověka	31
Obrázek 16: Pohled žraloka.....	31

