

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ



Projekt do předmětu FYO  
Vidění včelím okem, oči živočichů

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod a cíle</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Dva typy včelích očí – složené a jednoduché</b>	<b>2</b>
2.1	Složené oko . . . . .	2
2.1.1	Ommatidium . . . . .	4
2.2	Ocelli - jednoduchá očka . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Vnímání reality složeným okem</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Porovnání lidského a včelího oka</b>	<b>6</b>
4.1	Lidské oko . . . . .	6
4.2	Hlavní rozdíly ve vnímání . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Aplikace</b>	<b>7</b>
5.1	Popis aplikace a jejího ovládání . . . . .	7
<b>6</b>	<b>Oči dalších živočichů</b>	<b>8</b>
6.1	Oči obratlovců . . . . .	8
6.2	Složené oko . . . . .	9
6.3	Parietální oko . . . . .	9
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>9</b>

## 1 Úvod a cíle

TODO změnit podle toho, jak to nakonec napíšu

Jak již název této práce napovídá, jejím cílem je vysvětlit problematiku vidění včelím okem. V první sekci se zaměřím na popis včelího oka jako takového, jelikož se od klasického lidského oka velmi liší. V následující sekci krátce porovnám oba typy očí, vysvětlím hlavní rozdíly a pokusím se popsat, jak se liší realita vnímaná těmito dvěma druhy očí. Další sekce bude sloužit k popisu aplikace, kterou jsem vytvořil pro účely tohoto projektu. TODO!!! Poslední sekce se dále věnuje ostatním zajímavým očím živočichů - jmenovitě očím chobotnic a TODO.

## 2 Dva typy včelích očí – složené a jednoduché

V této sekci proberu dva druhy včelích očí. Primárně se zaměřím na její hlavní oči, tedy ty, které můžeme vidět na její hlavě při pohledu zepředu. Zmíním se ale také o druhém typu oka, tzv. *ocelli*, malých jednoduchých očích na vrcholku hlavy, které slouží pro měření světelné intenzity.

### 2.1 Složené oko

Včelí oko je zástupcem tzv. složených očí[2]. To v praxi znamená, že jedno včelí „oko“ není jednou integrální soustavou, ale systémem několika tisíc velmi jednoduchých světlocitlivých orgánů – ommatidií (viz 2.1.1).

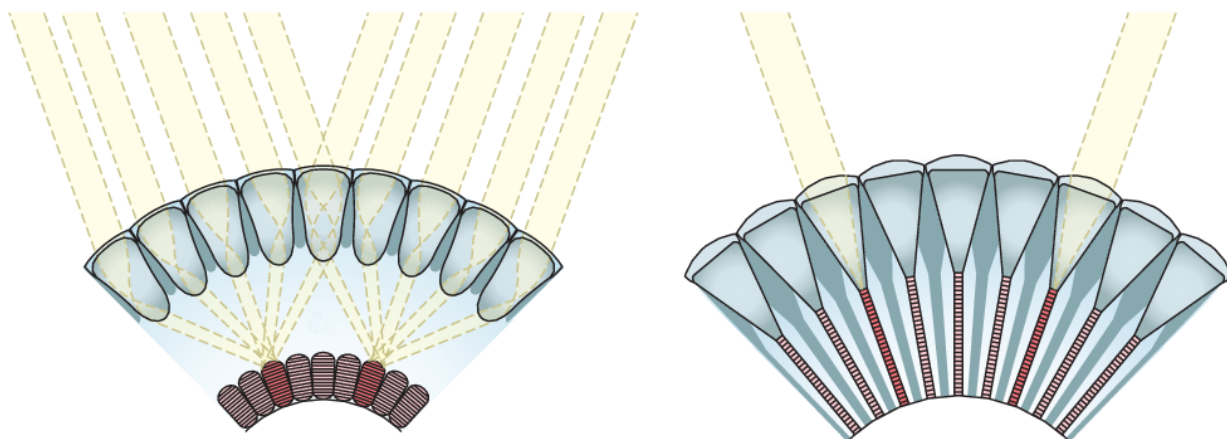


Obrázek 1: Detail na včelí složené oko. Vpravo dole je poté zvětšená oblast modrého obdélníku. Obrázek přejat z TODO německá BP

Existuje několik způsobů rozdělení složených očí – například podle počtu ommatidií, podle citlivosti různých druhů ommatidií na různou vlnovou délku a podobně.

Dalším důležitým faktorem je také množství interommatidiové výplně – materiálu, který se nachází mezi očima:

- **Apoziční složené oko** využíváno především denním hmyzem, který se pohybuje za dostatku slunečního záření. Mezi jednotlivými ommatidii se nachází vrstva pigmentu, který je pro světlo neprostupný. To má za následek, že se jednotlivá ommatidia neovlivňují a světlo „neprosakuje“ z jednoho do druhého. To má za následek větší „pixelizaci“ obrazu v surovém stavu (před zpracováním mozem).
- V případě **superpozičního složeného oka** je světlo pohlcujícího pigmentu méně a nezasahuje až k tyčinkám, jedno ommatidium tedy ovlivňuje druhé. Tím dochází k zvýšení množství dopadajícího světla do každého ommatidia. Tento trik využívají hlavně zástupci nočního hmyzu.[6]



Obrázek 2: Vlevo apoziční, vpravo superpoziční složené oko. Na obrázku vlevo si lze všimnout, že izolační pigment (tmavě šedá) nezasahuje až k rhabdomu (tyčince, červeně) a světlo z jednoho ommatidia proniká do druhého. U superpozičního oka toto nenastává.

Včelí složené oko přitom také reaguje na jinou vlnovou délku než lidské[3]. Rozsah viditelného spektra je u lidí i včel přibližně stejný (okolo 350 nm), včely ovšem vidí světlo již od vlnových délek cca 300 nm (na rozdíl od lidí, jejichž citlivost začíná až někde kolem 390 nm). Včely (a většina dalšího hmyzu), tedy vidí i ultrafialové světlo. Toto je obzvláště výhodné při hledání potravy v květech rostlin, které velmi často odrážejí právě UV světlo. Na druhou stranu, včely nevidí červenou barvu, která jim připadá pravděpodobně jako šedá<sup>1</sup>.

Pokud bychom se zaměřili na počet ommatidií, tento počet se u včel může poměrně výrazně lišit. Průměrná dělnice obsahuje zhruba 5000+500 ommatidií (závisí na druhu i na konkrétním jedinci), u královny je počet ommatidií zhruba o 10 % nižší. Počet ommatidií v oku trubce přitom může atakovat až hranici 10 000. zdroj: [https://www.researchgate.net/figure/Number-of-ommatidia-in-honeybee-eyes\\_tb11\\_215486941](https://www.researchgate.net/figure/Number-of-ommatidia-in-honeybee-eyes_tb11_215486941). Při pohledu na trubce můžeme vidět i značně větší oči než u běžných dělnic.

<sup>1</sup>Zde se dostáváme do oblastí spekulací, ale jelikož včelí oko nezaznamenává červenou, objekty vyzařující světlo okolo vlnové délky 700 nm se budou včelám jevit, jako kdyby nevyzařovaly žádné světlo – na druhou stranu, mnoho pro člověka červených květů vyzařuje/odráží světlo i v UV části spektra a pro včely vypadají takové květy úplně jinak.

### 2.1.1 Ommatidium

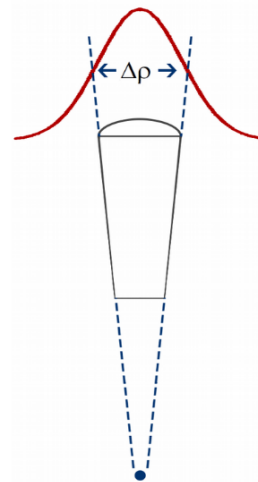
Jak již bylo řečeno, včela nemá oči tvořené jednou integrální optickou soustavou, ale několika tisíci menších oček, ommatidií<sup>2</sup>. Ommatidium je přitom základní jednotkou obrazu - ekvivalentem pixelu v rastrové fotografii. Na rozdíl od pixelu je (minimálně u včel) šestiúhelníkové.

#### Meziommatidiální/interommatidiální úhly

Zjednodušeně řečeno se jedná o úhlovou vzdálenost mezi dvěma ommatidii. Tento úhel se přitom liší v horizontálním a vertikálním směru, stejně tak jako se liší podle části oka, která je momentálně zkoumaná. Čím blíže středu, tím je hustota ommatidií vyšší a tím menší interommatidiální úhel bude zaznamenáván. V praxi je tento úhel roven zhruba 3 stupňům.

#### Akceptační úhel a akceptační funkce funkce

Akceptační úhel je prostorový úhel, který určuje, odkud může světlo přicházet, aby bylo zaznamenáno daným ommatidiem. Akceptační funkce poté popisuje senzitivitu daného ommatidia na základě směru, ze kterého světlo přichází. Můžeme říci, že největší citlivost má ommatidium na světlo, které přichází kolmo na jeho fazetu a čím větší úhel přicházející paprsek svírá, tím méně je zaznamenáván. Akceptační funkce má poté podobu 2D Gaussovy křivky.



Obrázek 3: Ommatidium, jeho akceptační úhel  $\Delta\rho$  a akceptační funkce (červeně). Zdroj TODO německá BP

<sup>2</sup>Bavíme-li se přímo o „ploškách“ na povrchu oka, lze použít i termín „fazeta“.



## 2.2 Ocelli - jednoduchá očka

Včely (a nejen ty) mají na vrcholku hlavy tři malá „očka“. I přes to, že se jim běžné říká oči, jedná se pouze o senzory úrovně osvětlení – podobně jako například fotorezistor. Včely používají tyto oči pro zjištění úrovně osvětlení, případně pro jednoduchou orientaci.

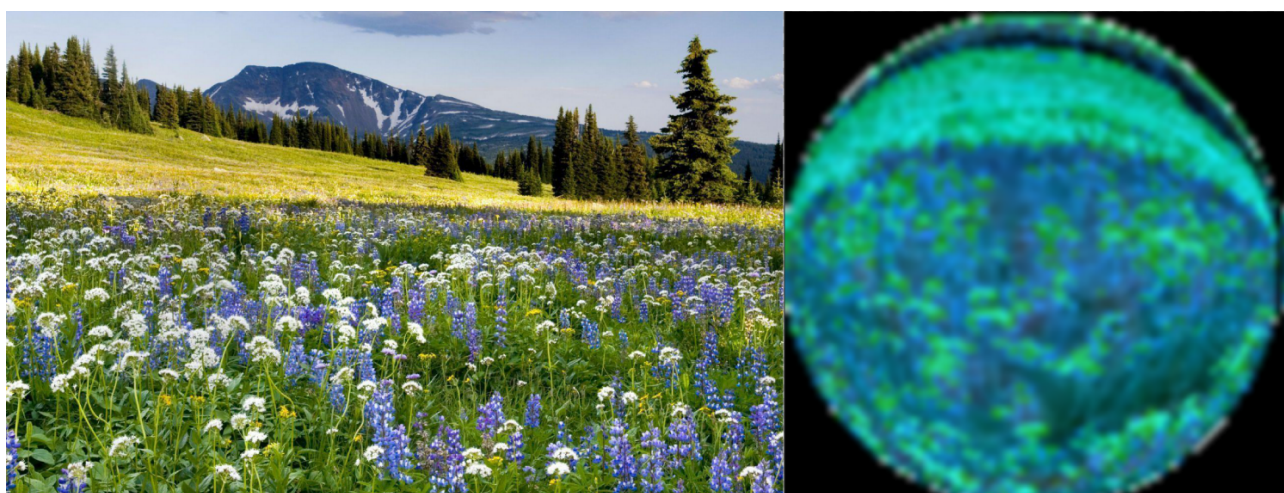
## 3 Vnímání reality složeným okem

Obraz, který je složeným okem vytvářen, je z principu rastrovaný, na druhou stranu ale zůstává nerozmazaný i při rychlém pohybu. Zajímavostí je také to, že při rychlém letu včela nevnímá barvy – i přes to, že ommatidia se z principu nedají „vypnout“, informace o barvě se v mozku nezpracovává a naopak se posílí detekce pohybu. I při nízkých rychlostech ovšem včela detekuje pohyb velmi dobře – jak se posouvá objekt, posouvá se i jeho obraz a mění se ommatidia, která ho vnímají<sup>3</sup>. Resterizace má ale i své nevýhody. Při pohledu na louku plnou květů včela vidí jen shluky různ barevných teček a nebyť UV záření, které je odráženo většinou květů, včela by nebyla schopná žádný z nich najít. Detaily květu poté rozezná až z bezprostřední blízkosti. Další důležitý aspekt vnímání je geometrie obrazu. Vzhledem k tvaru oka je výsledný obraz podobný efektu „rybího oka“.

Samostatnou kapitolou je poté již jednou zmíněný rozdílný rozsah vnímaných barev. Vnímání UV spektra kompenzuje jinak nekvalitní zrak v úloze rozeznávání detailů, kdy pro včelu důležité objekty (primárně květy), v UV spektru září, což jí umožňuje tyto objekty nalézt i v nepříliš kvalitní obrazové informaci.



Obrázek 4: Pohled na jednoduchá očka



Obrázek 5: Na obrázku je možné vidět pohled na louku tak, jak ji vnímá člověk, vpravo poté pokus o simulaci včelího vnímání pomocí skriptu, který je taktéž součástí projektu.

<sup>3</sup>Proto je špatný nápad mávat rukama v domněnku, že tím včelu zaženete. Rychlý pohyb ji naopak upoutá a vyprovokuje.

## 4 Porovnání lidského a včelího oka

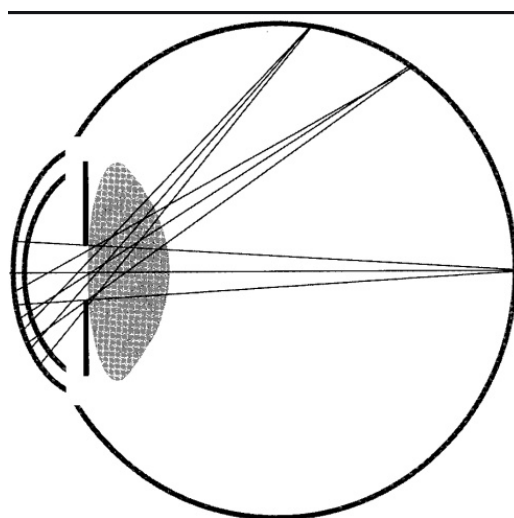
Během předchozího textu docházelo často k narážkám na rozdíly mezi lidským a včelím/složeným okem. Zde tedy budou tyto informace uceleny do krátkého shrnutí.

### 4.1 Lidské oko

Abychom mohli korektně porovnat vidění lidským[5] a včelím okem, je nejprve nutné lehce nastínit i fungování lidského oka. To je, na rozdíl od včelího, složené z jedné „zobrazovací jednotky“ - jakási pixelizace probíhá až uvnitř samotného oka na tyčinkách a čípcích. Velmi zjednodušeně můžeme lidské oko popsat obrázkem vpravo:

Světlo nejprve prochází přední komorou, dále prochází spojnou čočkou a přes sklivce dopadá na sítnici, na jejímž povrchu se nachází cca 100 milionů tyčinek pro černobílé vidění a vidění za horších světelných podmínek a asi 10 milionů čípků pro barevné vidění při dostatku světla. Platí přitom, že čípky pro svou činnost potřebují řádově větší světelnou stimulaci než tyčinky.

Tyto (a mnoho dalších) vlastností tvoří z lidského oka velmi kvalitní zobrazovací aparaturu, která umožňuje mj. akomodaci (zaostřování na různou vzdálenost), adaptaci (lidské oko zaznamená intenzitu světla přes 5 řádů) aj.



Obrázek 6: Schéma lidského oka. Paprsek nejprve projde přední komorou, poté spojnou čočkou (šedě) a dále přes sklivce až na sítnici – zadní stranu oka.

### 4.2 Hlavní rozdíly ve vnímání

Jak je již na první pohled patrné, i když oba orgány slouží ke stejnému účelu – poskytovat svému nositeli zrak – lidské a složené oko tuto funkcionalitu implementovaly velmi odlišně. Níže stručně shrnu hlavní rozdíly ve vnímání pomocí těchto dvou typů očí:

- Jak již bylo popsáno výše, složené oko ani jeho jednotlivé části nemají žádný prostředek ke změně ohniskové vzdálenosti – dokonce i samotný pojem „ohnisková vzdálenost“ nemá v kontextu složeného oka úřlíš smysl. Jelikož je ale obraz složen z tisíců malých obrazů, ostrost/neostrost se stává mnohem menším problémem, než by se mohlo zdát.
- Obraz ze složeného oka je kvůli způsobu zachycení světla tisíci jednotlivými soustavami „pixelizovaný“ – je ovšem otázkou, jak je tento obraz zpracováván v mozku.
- Tyčinky ve včelím (a obecně v jakémkoli hmyzím) oku mají také schopnost vnímat trochu jiné záření než lidské oči – i když je rozsah zhruba stejný, spektrum světla, které dokážou včely vnímat, je posunutě zhruba o 100 nm směrem ke kratším vlnovým délkám.
- Poslední důležitý rozdíl spočívá v tom, že hmyz včetně včel dokáže vnímat polarizované světlo. K tomu slouží ommatidia na vrchní straně oka. Rhodopsin (světlocitlivý pigment) v těchto ommatidiích je vytvářen rovnoběžně, což umožňuje vnímat kromě intenzity i polaritu světla. Tato schopnost může být využita například k navigaci.

- Za zmínku také stojí to, že včela mnohem více reaguje na pohyb obrazu. Lidé obecně zpracovávají obraz jako celek a zaznamenávání pohybu je jen jedna z podúloh.

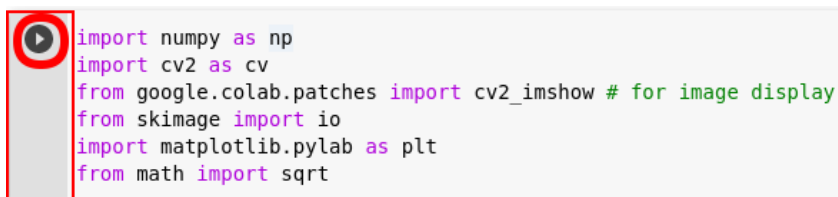
## 5 Aplikace

Součástí tohoto projektu je i vytvořit jednoduchou aplikaci, která vizualizuje danou problematiku. Cílem této aplikace bude vizualizace vidění složeným okem, která bude založená na (velmi zjednodušeném) modelu. Celá aplikace byla pojata poněkud originálně. Místo samostatné aplikace s vlastním uživatelským rozhraním byl vytvořen komentovaný Jupyter notebook na platformě Google Colab<sup>4</sup>. Tento netradiční přístup byl zvolen, jelikož zadání definovalo, že výsledná aplikace musí být spustitelná na systému Windows. Autor bohužel nemá k dispozici funkční systém Windows a tvorba podobného programu na virtuálním stroji by byla velmi komplikovaná. Na druhou stranu, platforma Google Colab umožňuje kromě samotného kódu vkládat i doprovodný text a dohromady tvoří velmi zajímavý celek, kde kromě výstupu případný uživatel pochopí i detaily jak samotného oka, tak i jeho simulace.

Výsledný notebook si lze prohlédnout na této stránce: Odkaz<sup>5</sup>. Přístup je omezen pouze na organizaci VUT, je tedy třeba se přihlásit VUT účtem. Po kliknutí na odkaz může být nutné kliknout v horní části okna na „Otevřít v aplikaci Google Colaboratory“.

### 5.1 Popis aplikace a jejího ovládání

Jak již bylo řečeno, aplikace byla vytvořena ve formě Google Colab notebooku. Tento typ dokumentu kombinuje jednak text včetně obrázků, jednak samotný kód. Kód s nachází v samostatných buňkách, které se postupně spouštějí buď kliknutím na šipku v jejich levém horním rohu, případně kombinací kláves Shift+Enter ve chvíli, kdy je buňka aktivní (postačí na buňku kliknout, nachází se v ní kurzor a po levé straně je šedý proužek). Klávesová zkratka poté rovnou přesune aktivitu na další buňku. Pro spuštění celého notebooku naráz lze použít zkratku Ctrl+F9. Notebook ovšem poběží několik desítek vteřin.



```
import numpy as np
import cv2 as cv
from google.colab.patches import cv2_imshow # for image display
from skimage import io
import matplotlib.pyplot as plt
from math import sqrt
```

Obrázek 7: Buď je možné buňku spustit ikonou v levém horním rohu, nebo, pokud je buňka aktivní (jako na obrázku), je možné využít i klávesovou zkratku.

Na úvod aplikace jsou krátce shrnuty informace z tohoto textu a dále se již doprovodný text omezuje na detaily simulace složeného oka. Celá simulace ideově vychází z [4], je ovšem velmi zjednodušená. Níže uvádím základní seznam zjednodušení a aproximací, ke kterým bylo nutno přistoupit:

- Povrch včelího oka byl modelován jako polokoule, i když má včelí oko spíše „fazolovitý“ tvar. Tento popis by ovšem byl matematicky poměrně složitý.
- Interommatidiální úhel byl zanedbán. Ve středu obrazu je ovšem více ommatidií než po jeho okrajích díky způsobu, jakým se vypočítává jejich poloha (podrobněji rozebráno přímo v notebooku).

<sup>4</sup><https://colab.research.google.com/notebooks/intro.ipynb>

<sup>5</sup>Link neumožňuje přímou úpravu, ovšem umožňuje komentáře.



- Fotografie standardně neobsahují informace UV záření – barvy obrazu byly tedy uměle posunuty blíže k modré části spektra, byla potlačena červená barva naopak posílena modrá. Koeficienty byly voleny experimentálně.

Další podrobnosti již obsahuje samotný dokument. Jako ukázka výstupu může sloužit například pravá část obrázku 5.

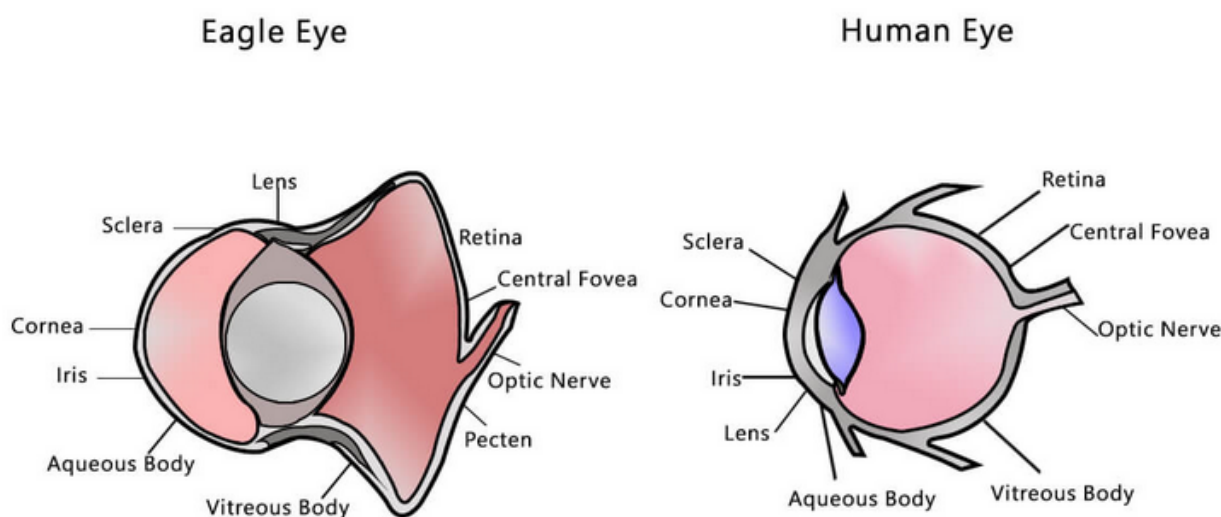
## 6 Oči dalších živočichů

V této sekci stručně popíšu další zajímavé způsoby, jakými některá další zvířata vnímají okolí. Pokusím se vybrat zástupce všech důležitých skupin očí, i když dvě hlavní – složené a oko obratlovců (tedy i lidské) již byly alespoň zevrubně popsány. Pro relativně zdařilé vizualizace doporučuji [1]<sup>6</sup>.

### 6.1 Oči obratlovců

Do této skupiny patří i lidské oči. Vyznačují se přítomností čočky, která může upravovat paprsky, které do oka vstupují, jinak řečeno, oko může zaostřovat na různé vzdálenosti. Ovšem i v rámci tohoto jednoho typu oka jsou mezi jednotlivými živočichy obrovské rozdíly.

Například oči dravců dokážou rozpoznat širší spektrum barev (včetně UV) a daleko lépe rozlišují detaily. Jejich čočka umí měnit ohniskovou vzdálenost mnohem rychleji než lidská a navíc mohou měnit i tvar rohovky. Mají také nepoměrně větší přední komoru.



Obrázek 8: Porovnání dravčího (vlevo) a lidského oka.

Dalším zajímavým druhem jsou oči hlavonožců. Mimo jiné také nemají zrakový nerv vedoucí dovnitř oka, kde se větví, ale jednotlivá nervová vlákna vedou z příslušných světlocitlivých buněk „za oko“ – tím pádem hlavonožci nemají slepou skvrnu.

<sup>6</sup>Jedná se pouze o vizualizace změn vnímání barev, nikoli samotného tvaru obrazu.

## 6.2 Složené oko

O složeném oku pojednává celý zbytek tohoto textu, proto ho zde nebudu podrobněji znovu rozebírat.

## 6.3 Parietální oko

Neboli také „třetí oko“, svou funkcí a schopností odpovídá třem jednoduchým očím na hlavě včely. Slouží primárně pro určování intenzity světla a vyskytuje se primárně u jednoduchých obojživelníků a plazů. U většiny ostatních tvorů se třetí oko přeměnilo na žlázu s vnitřní sekrecí – šišinku. Například haterie, starobylý rod ještěřům příbuzných tvorů, mají na vrcholu hlavy skutečně oko včetně čočky a mlád'ata haterií tímto okem pravděpodobně skutečně vidí. U dospělých jedinců ovšem oko degeneruje a dále plní pouze funkci rozpoznávání světla a tmy.



Obrázek 9: Třetí oko na hlavě haterie

## 7 Závěr

V této práci bylo popsáno včelí zrakové ústrojí – složené oko. Byly vysvětleny pojmy jako ommatidium, ocelli atp. Byly popsány rozdíly ve vnímání reality lidským a včelím okem, stejně jako další zajímavé druhy očí. Dále byla popsána aplikace, která vznikla jako součást tohoto projektu.

## Reference

- [1] How do other animals see the world? [online]. 2021.  
URL <https://www.nhm.ac.uk/discover/how-do-other-animals-see-the-world.html>
- [2] Složené oko. [online]. 2020.  
URL [https://cs.wikipedia.org/wiki/Slo%C5%BEn%C3%A9\\_oko](https://cs.wikipedia.org/wiki/Slo%C5%BEn%C3%A9_oko)
- [3] Složené oko. [online]. 2011.  
URL <https://news.ncsu.edu/2011/07/wms-what-bees-see/>
- [4] Polster, J.: *Simulating Bee Vision: Conceptualization, Implementation, Evaluation and Application of a Raycasting Rendering Engine for Generating Bee Views*. Dizertan prace, 08 2017.
- [5] Stránký, Z.: *Optický systém oka*. Dizertan prace, 05 2006.
- [6] Warrant, E.: The remarkable visual capacities of nocturnal insects: Vision at the limits with small eyes and tiny brains. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, ročník 372, 04 2017: str. 20160063, doi:10.1098/rstb.2016.0063.