



MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Viktor Němeček

Percepční učení a Ideální Bayesovský pozorovatel při zrakovém vyhledávání

Katedra softwaru a výuky informatiky

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Filip Děchtěrenko, Ph.D.

Studijní program: Informatika

Studijní obor: Obecná informatika

Praha 2018

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Poděkování.

Název práce: Percepční učení a Ideální Bayesovský pozorovatel při zrakovém vyhledávání

Autor: Viktor Němeček

Katedra: Katedra softwaru a výuky informatiky

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Filip Děchtěrenko, Ph.D., Katedra softwaru a výuky informatiky

Abstrakt: Abstrakt.

Klíčová slova: klíčová slova

Title: Perceptual learning and Ideal Bayesian observer in visual search task

Author: Viktor Němeček

Department: Department of Software and Computer Science Education

Supervisor: Mgr. Filip Děchtěrenko, Ph.D., Department of Software and Computer Science Education

Abstract: Abstract.

Keywords: key words

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 2 |
| Struktura práce | 2 |
| 1 Teoretický úvod | 3 |
| 1.1 Šum | 3 |
| 1.1.1 Barva šumu | 3 |
| 1.2 Gabor patch | 3 |
| 1.2.1 Definice | 3 |
| 1.2.2 Použití | 5 |
| 1.3 Úvod do teorie detekce signálu | 5 |
| 1.3.1 Senzitivita | 6 |
| 1.4 Entropie | 8 |
| 1.5 Modely pozorovatele | 9 |
| 1.5.1 d' mapa | 9 |
| 1.5.2 Modely chování pozorovatele | 10 |
| 2 Cíle práce | 12 |
| 3 Metody | 13 |
| 3.1 Účastníci | 13 |
| 3.2 Nástroje a stimuly | 13 |
| 3.3 Procedura | 15 |
| 3.4 Limitace | 17 |
| 4 Měření | 19 |
| 4.1 Výsledky | 19 |
| 5 Implementace | 21 |
| Závěr | 22 |
| Seznam použité literatury | 23 |
| Seznam obrázků | 26 |
| Rejstřík | 27 |
| .1 První příloha | 28 |

Úvod

Jedna z činností, kterou provádíme mnohokrát denně, je zrakové vyhledávání. Proto také existují mnohé výzkumy o tom, jak člověk zrakové vyhledávání provádí. Jeden z oborů, který se o zrakové vyhledávání zajímá, je psychofyzika.

Jedním z úkolů, který se řeší, je vyhledávání konkrétního cíle v kruhovém poli. Najemnik a Geisler (2005) v nedávné době představili model Ideálního Bayesovského pozorovatele, který modeluje chování lidského pozorovatele s překvapivou přesností. Algoritmus, pomocí kterého Ideální Bayesovský pozorovatel vybíral lokace, které zkoumat, byl ale kubický v počtu možných lokací cíle. Ve svém pozdějším článku (Najemnik a Geisler, 2009) představili pozorovatele ELM, který Ideálního Bayesovského pozorovatele dobrě approximuje, a navíc pracuje v kvadratickém čase.

V této práci se podíváme na dva dosud neřešené problémy. Prvním z nich je, zda se lidští pozorovatelé chovají stejně, když se musí vědomě rozhodovat, jaké na jaké místo se ve kterém kroku podívají. Druhou, navazující otázkou je, zda se člověk naučí cíl hledat lépe, když to bude sám zkoušet, nebo když při učení dostane navíc po každém pohledu informaci o tom, jak dobré si vybral místo, na které se podíval, srovnáním s hodnotou, kterou tomuto bodu přiřazuje hodnotící funkce ELM pozorovatele.

Struktura práce

V první kapitole jsou představeny pojmy, teorie a starší výsledky, které tato práce využívá. V druhé kapitole jsou představeny cíle práce. V následující kapitole je popsána metodika experimentu. Poté jsou prezentovány vizualizace naměřených dat, nad nimiž je následně provedena diskuse. K práci jsou též přiloženy dvě přílohy. V první z nich jsou další grafy z naměřených dat, v druhé se nachází dokumentace aplikace, prostřednictvím které byl prováděn experiment a jejíž vznik byl součástí této práce.

1. Teoretický úvod

V této kapitole přiblížíme některé pojmy a teorie, které jsou v práci využity.

1.1 Šum

V teorii detekce signálu šumem nazýváme nechtěnou (a typicky neznámou) modifikaci signálu.

1.1.1 Barva šumu

U aditivního¹ šumu můžeme měřit intenzitu šumu na různých frekvencích. Tu změříme tak, že na šum aplikujeme Fourierovu transformaci

Šumu se říká bílý šum, pokud by světlo, které by mělo stejnou distribuci intenzity napříč frekvencemi, jako daný šum (který ale vůbec nemusí být světelný), bylo bílé. Podobně známe například ještě růžový, červený (někdy též označovaný jako Brownův či nesprávně hnědý²) či modrý šum.

Intenzita p všech zmíněných šumů na v na dané frekvenci lze vyjádřit jako $p = 1/f^\beta$, kde hodnota β je -1 pro modrý šum, 0 pro bílý, 1 pro růžový a 2 pro hnědý. Proto se růžový šum někdy též označuje jako $1/f$ šum. Pro ostatní barvy šumu není podobné označení běžné. O šumu a jeho barvách je uvedeno více v knize Noise (Kosko, 2006).

Pravděpodobnostní rozdělení jednotlivých složek Fourierovy transformace ale není definicí barvy šumu dáno. Pokud je rozdělení normální³, řekneme, že se jedná o Gaussovský šum.

V této práci se budeme zabývat vizuálním šumem, tedy šumem, kde místo obvykle používané časové souřadnice použijeme dvě souřadnice prostorové, a měřenou hodnotou bude jas.

1.2 Gabor patch

Gabor filter (v českých textech někdy označovaný jako Gaborova vlnka) je lineární filtr používaný ve zpracování obrazu, chceme-li detektovat signál mající danou frekvenci a směr, který se vyskytuje kolem daného bodu.

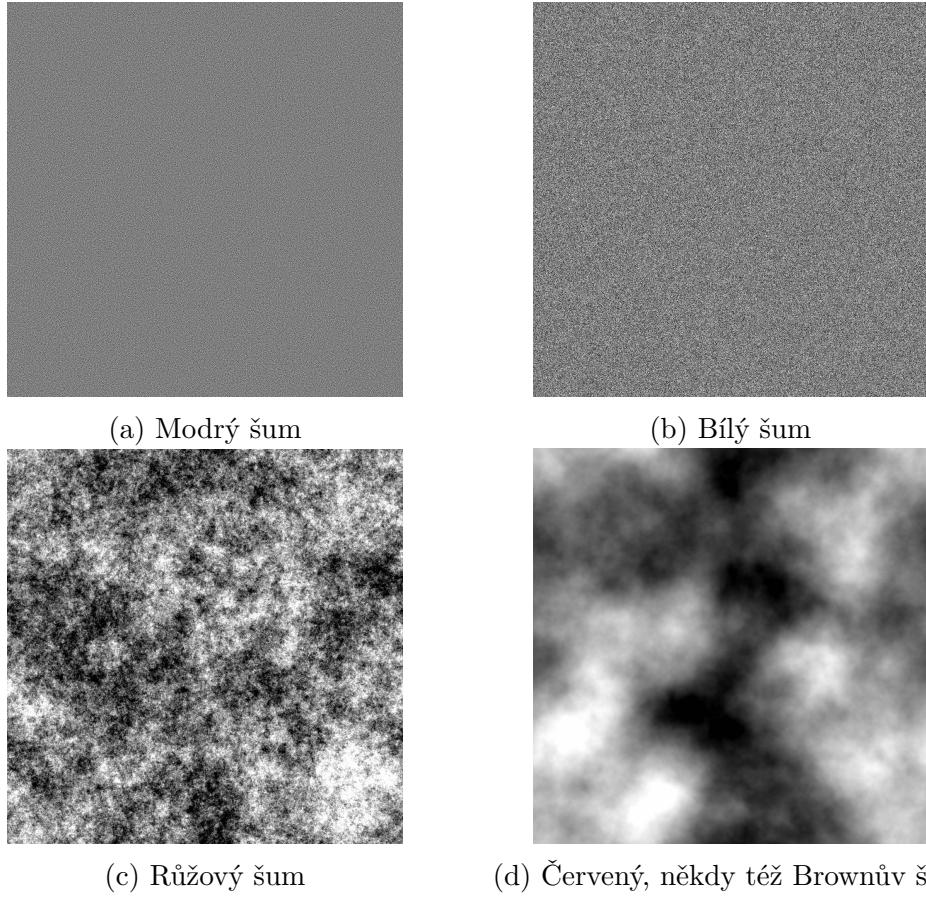
1.2.1 Definice

Hodnotu filtru v daném bodě spočítáme jako součin dvou funkcí. První z nich je vždy sinus či cosinus (někdy uváděný v podobě komplexní exponenciály, pokud potřebujeme i reálnou, i imaginární složku). Jeho parametry určují, jaké

¹Šumu říkáme aditivní, pokud se jeho hodnoty přičítají k hodnotě signálu. Dále existuje například ještě šum multiplikativní či fázový (šum, který se projevuje krátkodobým fázovém posunem signálu).

²V anglické literatuře se používá termín *Brownian noise*, setkáme se ale i se zavádějícím termínem *Brown noise*. Jméno je odvozeno od souvislostí s Brownovým pohybem částic

³Nezáleží na tom, zda má normální rozdělení šum sám nebo jeho Fourierův obraz – tyto dvě vlastnosti jsou ekvivalentní.



Obrázek 1.1: Ukázky různých šumů. Tyto šumy byly vygenerovány pomocí algoritmu, který je použitý přímo v aplikaci, která je součástí této práce. Algoritmus je blíže popsán ve druhé příloze.

vlastnosti má mít signál, který chceme detektovat. Druhé funkci říkáme obálka, a určuje, na jakém okolí daného bodu signál zkoumáme.

Funkce tedy vypadá jako

$$g(x,y) = \sin\left(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \phi\right) * \text{obálka}(x',y'),$$

kde vektor $(x',y')^T$ je vektor $(x,y)^T$ otočený o úhel, který svírá osa x se směrem, podél nějž chceme měřit signál (tentot úhel budeme značit Θ), a posunutý do bodu, v němž chceme měřit signál, λ je frekvence signálu, který hledáme, a ϕ je fázový posun (Fogel a Sagi, 1989).

Jako obálka se používá dvojrozměrná Gaussova funkce, raised cosine, nebo prostá lineární funkce vzdálenosti.

Gaussovou funkci vyjádříme jako

$$\text{obálka}(x,y) = \exp\left(\frac{x'^2 + y'^2}{2\rho}\right),$$

kde ρ je směrodatná odchylka Gaussovy křivky. Její výhodou je, že chování Gabor filtru, jehož obálku tvoří Gaussova funkce, je nejlépe popsané. Raised cosine

vyjádříme jako

$$\text{obálka}(x,y) = \begin{cases} \frac{\cos(\pi\sqrt{x'^2+y'^2}/r)+1}{2} & \text{pro } \sqrt{x'^2+y'^2} \leq r, \\ 0 & \text{jinak,} \end{cases}$$

kde r je poloměr oblasti, v níž chceme signál detektovat. Výhodou raised cosine oproti Gaussově funkci je, že ve vzdálenosti alespoň r od středu filtru jeho hodnota nabývá nuly. Při výpočtech tedy stačí počítat s malou oblastí kolem středu (kdežto při použití Gaussovy funkce je nutné počítat s celým obrazem). Výhodou oproti lineární funkci vzdálenosti je, že raised cosine se pro většinu aplikací chová dostatečně podobně, jako Gaussova funkce.

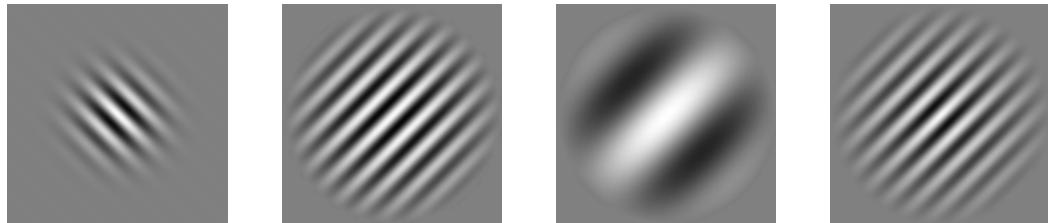
1.2.2 Použití

Chceme-li detektovat signál ve vizuálním šumu, spočítáme hodnotu

$$s = \sum g(x,y) * n[x,y],$$

kde n je šum a sumu bereme přes všechny body (x,y) , v nichž jsme naměřili hodnoty šumu. Je-li hodnota s blízko nuly, signál v daném místě není přítomen, nebo je přítomen s jinými parametry. Vysoké hodnoty značí, že signál pravděpodobně přítomen je, hluboce záporné značí, že signál je přítomen, ovšem s fází posunutou π .

Gabor filter ale můžeme používat i k samotné tvorbě signálu. Chceme-li vytvořit v nějakém bodě signál, můžeme spočítat Gabor filter, jako bychom chtěli detektovat signál s právě takovými parametry, jaké má mít tvořený signál, a potom ho sečist se šumem. Takto vytvořenému signálu budeme říkat Gabor patch.



Obrázek 1.2: Ukázky několika Gabor patchů. Všechny Gabor patche jsou 100 pixelů široké i vysoké. Levý patch má $\Theta = 1/4\pi$, ostatní mají $\Theta = -1/4\pi$, levý má jako obálku Gaussovou funkci, prostřední dva raised cosine, pravý lineární funkci vzdálenosti, první, druhý a čtvrtý mají frekvenci (v cyklech na pixel) 0.1, třetí 0.02.

1.3 Úvod do teorie detekce signálu

Hlavním problémem, který řeší teorie detekce signálu, je rozlišení dvou různých signálů, případně signálu a šumu. V této práci se budeme zabývat problémem, kdy je potřeba rozhodnout, zda se v dané ploše nachází signál, či ne. Této úloze budeme říkat Yes-No problém (Macmillan a Creelman, 2004), nebo pouze Y/N.

V kontextu této úlohy můžou po odpovědi pozorovatele nastat čtyři možné situace (Amemori, 2016):

| | Signál je přítomen | Signál není přítomen |
|----------------------------|--------------------|--------------------------|
| Pozorovatel odpoví kladně | <i>Hit</i> | <i>False alarm</i> |
| Pozorovatel odpoví záporně | <i>Miss</i> | <i>Correct rejection</i> |

V této úloze se pozorovatel chová tak, že si zvolí kritérium (někdy též práh odpovědi), které udává, jaká musí být pravděpodobnost, že signál je přítomen, aby pozorovatel odpověděl kladně (Green a Swets, 1988, kapitola 1.7).

Poté pozorovatel provede pozorování, z nějž získá informaci s . Poté spočítá hodnotu rozhodovací proměnné, tedy spočítá, jaká je pravděpodobnost, že je signál přítomen. Tato pravděpodobnost se z Bayesovy věty spočítá jako

$$\begin{aligned} P[\text{Signál je přítomen} | \text{Pozorování dalo informaci } s] &= \\ &= \frac{P[\text{Pozorování dalo informaci } s | \text{Signál je přítomen}] * P[\text{Signál je přítomen}]}{P[\text{Pozorování dalo informaci } s]} \end{aligned}$$

Potom porovná tuto rozhodovací proměnnou s kritériem a podle výsledku tohoto porovnání odpoví.

Odsud je zřejmé, že zvyšováním kritéria zvedáme pravděpodobnost, že nastane miss, ale snižujeme pravděpodobnost false alarmu.

V souvislosti s Y/N úlohou je ale ještě nutné zavést následující pojmy:

Definice 1. Mějme pozorovatele p v úloze Y/N. Potom jeho hit rate H_p , definujeme jako

$$P[\text{hit} | \text{Signál je přítomen}]$$

a jeho False alarm rate F_p jako

$$P[\text{False alarm} | \text{Signál není přítomen}].$$

1.3.1 Senzitivita

Jedním s dílčích problémů je též určení, jakou rozlišovací schopnost má daný pozorovatel na daný signál. Z předchozího odstavce by mělo být vidět, že kvantifikovat citlivost pouze pomocí hit rate není vhodné – například pozorovatel, který vždy odpoví „ano“ by měl v tomto případě optimální citlivost, což jistě nechceme. Taktéž není vhodné charakterizovat pozorovatele pomocí poměru hitů a false alarmů, optimalizace takového parametru by též vedla k scestnému nastavení kritéria.⁴

Další možností by bylo charakterizovat pozorovatele jeho poměrem správných a špatných odpovědí. To ale též není vhodné, protože potom by jeho citlivost

⁴V typickém případě, který je popsán v následujících třech odstavcích, se pro kritérium jdoucí k nekonečnu tento poměr též blíží k nekonečnu. Dobrý pozorovatel by tedy téměř vždy odpovídal „ne“, optimální pozorovatel by neexistoval.

nezávisela jen na jeho vlastnostech, ale v případě, kdy by pravděpodobnost hitu a pravděpodobnost correct rejection nebyla stejná, i na pravděpodobnosti, že bude signál přítomen.

Při detekci signálu rozeznáváme dva druhy šumu. Šum vnitřní a šum vnější (Heeger, 1997). Vnější šum je zkreslení dat, které se stane ještě mimo pozorovatele. Vnitřní šum je naopak šum, který je způsoben přímo algoritmem, který používá pozorovatel, aby dekódoval, zda signál je přítomen, či není.

Pro lepší porozumění představíme případ z praxe. Nechť je pozorovatel člověk, který není příliš pozorný a chystá se přejít silnici. Jeho (podvědomým) pozorováním je informace, která dorazí do jeho mozku z periferií jeho sítnic, a signál, jehož přítomnost zkoumá, je, zda přijíždí auto. V takovém případě se v mozku spustí algoritmus, který převede pozorování na číslo X . Poznamenejme, že v mozku je hodnota tohoto čísla dobré kvantifikovaná, i když je mimo záběr této práce popisovat, co přesně z fyzikálního hlediska tato hodnota znamená. Pro porozumění stačí představa, že se jedná o frekvenci určitého druhu impulsu, které si mezi sebou neurony posílají. Mozek ví, jakou distribuci má náhodná veličina X v případě, že se auto blíží, a jakou má v případě, že nikoliv. Podle konkrétní hodnoty X kterou naměřil, se rozhodne, jestli auto přítomno není, a je tedy bezpečné silnici přejít, nebo zda je pravděpodobnost přijíždějícího auta dost vysoká na to, aby mělo smysl zvednout hlavu a podívat se příslušným směrem znovu s cílem získat lepší pozorování.

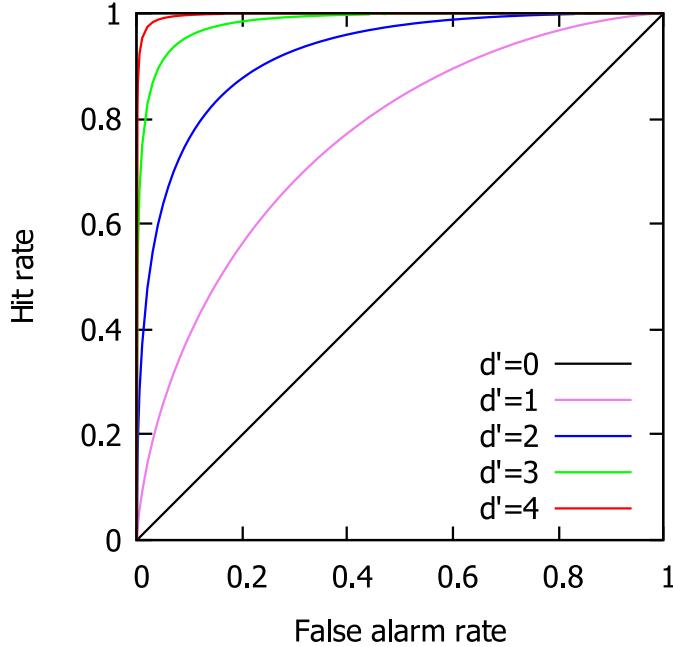
Praxe ukazuje, že v těchto situacích je rozdelení veličiny X často dobře approximováno normálním rozdelením, a to jak v případě, že signál přítomen je, tak v případě, že přítomen není. Obě tato normální rozdelení navíc mají v tomto typickém případě stejný rozptyl a liší se jen svou střední hodnotou (Swets, 1996). Potom je přirozená otázka ptát se, jaký je rozdíl mezi jejich středními hodnotami (či lépe rozdíl mezi jejich středními hodnotami vydělený směrodatnou odchylkou).

Právě tuto hodnotu označíme jako hodnotu d' . Protože ale ne vždy je rozdelení normální, musíme nadefinovat hodnotu d' způsobem, která nebude závislá na rozdelení veličiny X .

Definice 2. Nechť má pozorovatel p hit rate H_p a false alarm rate F_p obě ostře mezi jedničkou a nulou. Potom budeme jeho senzitivitu značit d' a spočítáme jí jako $d' = \Phi^{-1}(H_p) - \Phi^{-1}(F_p)$, kde Φ^{-1} je inverzní distribuční funkce normovaného normálního rozdělení.

Nahlédneme, že senzitivita má následující vlastnosti:

- Pokud $d' = 0$, tak jsou indikátorové náhodné veličiny „Pozorovatel odpověděl kladně“ a „Signál je přítomen“ nezávislé.
- Pokud $d' > 0$, tak mají tyto dvě veličiny kladnou korelacii.
- Pokud skutečně má náhodná veličina X jak v případě, že signál přítomen je, tak v případě, že signál přítomen není, normální rozdelení liší se pouze střední hodnotou, pak hodnota d' nezáleží na nastavení kritéria (samozřejmě krom případů, kdy kritérium nastavíme na plus nebo mínus nekonečno, pak hodnota d' není dobře definovaná).



Obrázek 1.3: Závislost hit rate a false alarm rate pro různé hodnoty d' . Těmto křivkám se říká ROC křivky z anglického Receiver Operating Characteristic (Swets, 1996; Green a Swets, 1988).

1.4 Entropie

Entropií (nazývanou též Shannonova entropie, aby nedošlo k záměně s entropií tak, jak jí chápe termodynamika) náhodné veličiny se v teorii informace rozumí střední hodnota informace, kterou nám hodnota této veličiny přinese. Například mějme náhodné veličiny X a Y . X nechť nabývá hodnoty 0 s pravděpodobností 1/2 a hodnoty 1 s toutéž pravděpodobností. Y nechť nabývá hodnoty 1 s pravděpodobností 1 a hodnoty 0 s pravděpodobností 0. Je vidět, že pokud se dozvímme, jaké hodnoty nabývá veličina X , získáme více informace, než když zjistíme, jaké hodnoty nabývá Y .

Hodnotu informace, kterou nám přineslo zjištění, že náhodná veličina A nabývá hodnoty a , spočítáme jako

$$I(A = a) = -\log_b (P[A = a]) = \log_b \left(\frac{1}{P[A = a]} \right).$$

Jako základ logaritmu b se běžně používá 2 (což budeme dělat i v této práci), e nebo 10. Všimneme si, že toto vyjádření množství informace je konzistentní s intuitivní představou, že zjištění, že A nabývá nějaké nepravděpodobné hodnoty, je cennější, než zjištění, že nabývá nějaké pravděpodobné. Odsud tedy entropii $H(A)$ lze vyjádřit jako

$$H(A) = \mathbb{E}[I(A)] = - \sum_{a \in \Omega} P[A = a] \log_2 P[A = a],$$

kde $\Omega = \{a | P[A = a] > 0\}$. Všimneme si, že podle tohoto vzorce je entropie veličiny X , tak jak byla naefinována v předchozím odstavci, rovna jedné, kdežto entropie veličiny Y je rovna nule.

Podobně jako u pravděpodobnosti můžeme poměrně přímočaře nadefinovat i podmíněnou entropii $H(A|B)$

Shannonova entropie byla v této podobě zavedena Claudem Shannonem v jeho článku (1948).

1.5 Modely pozorovatele

V teorii detekce signálu je velmi důležitým konceptem ideální detektor. Mohlo by se nám zdát, že by nás ideální pozorovatel nemusel zajímat – pracujeme přece s pozorovatelem lidským. Pro lidského pozorovatele ale potřebujeme srovnání. V případě, kdy je algoritmus ideálního pozorovatele v určitém smyslu přirozený, například nedělá žádné kontraintuitivní kroky, můžeme také tvrzení „Lidský pozorovatel se chová ideálně“ použít jako úvodní hypotézu, kterou poté už pouze upravujeme či zpřesňujeme (Green a Swets, 1988).

V této práci se budeme zabývat úlohou, kdy pozorovatel hledá Gabor patch v kruhovém poli, v němž se nachází růžový šum. Předchozí výzkum ukázal, že lidští pozorovatelé v této úloze využívají krátkých pohledů a rychlých pohybů očí (Najemník a Geisler, 2005). Jednomu takovému krátkému pohledu budeme říkat *fixace*. Očnímu pohybu se říká *sakáda* (Králíček, 2002).

Abychom ale mohli hodnotit fixace lidského pozorovatele, potřebujeme mít nějaký model, který nám bude říkat, jak se chová optimální pozorovatel. Nejprve ale stručnou odbočku:

1.5.1 d' mapa

Ještě předtím, než začneme zjišťovat, podle jakého modelu se chová lidský pozorovatel, je nutné zjistit, kolik informace člověk jednou fixací získá. Je například zjevné, že kdyby jedním pohledem bez ohledu na to, kam se dívá, získal stejné množství informace o všech možných polohách cíle, jsou všechny modely ekvivalentní. Proto je potřeba najít tzv. d' mapu, funkci, která nám pro každé dva body x, y řekne, jakou hodnotu d' má lidský pozorovatel, pokud hodnotí pozici y a dívá se na pozici x . U pozadí s uniformními nebo téměř uniformními lokálními kontrasty lze tuto funkci zjednodušit, stačí, když budeme pro každý bod x vědět, jaká je hodnota d' pro rozhodování, zda je cíl v bodě x , pokud zafixujeme střed.

Funkcím, které dávají do souvislosti parametry stimulů a chování subjektu v experimentu, se říká *psychometrické funkce* (Kingdom a Prins, 2009). Zde je tedy parametrem poloha stimulu, a chování subjektu je vyjádřeno jeho hodnotou d' .

Předchozí výzkum ukázal, že u běžného člověka je d' mapa poměrně nepravidelná (Najemník a Geisler, 2008), ale dá se s přijatelnou přesností approximovat mapou, kde křivky spojující body se stejnou hodnotou d' jsou tvořeny čtyřmi čtvrtelipsami (jednou v každém kvadrantu) se středem v počátku, s excentritami a velikostí poloos danou hodnotou d' a individuálními vlastnostmi pozorovatele a cíle (Bradley a kol., 2014).

Ke kompletnímu vyjádření approximace funkce d' potřebujeme celkem 6 hodnot, které závisí na konkrétním pozorovateli a cíli. Jedná se o hodnotu $d'_0 = d'(0,0)$, hodnoty e_L, e_R, e_U a e_D , které určují vzdálenost ve čtyřech základních směrech takovou, že v nich je hodnota d' poloviční oproti počátku, a hodnotu β

popisující sklon této funkce. Funkci d' pak vyjádříme jako

$$d'(x,y) = \frac{d'_0}{1 + \left(\frac{x^2}{e_H^2} + \frac{y^2}{e_V^2}\right)^\beta},$$

kde e_H je rovno e_L pro záporná x a e_R pro kladná, a e_V je rovno e_D pro záporná y a e_N pro kladná.

1.5.2 Modely chování pozorovatele

Všechny modely, které zde budeme zkoumat, vypadají tak, že mají tzv. *Mapu aposteriorních pravděpodobností*. V této mapě je pro každou lokaci, kde by signál (též cíl) mohl být, uvedeno, jaká je pravděpodobnost, že se na ní cíl nachází vzhledem k informaci, kterou již o dané lokaci pozorovatel získal. Ve chvíli, kdy na nějaké lokaci pravděpodobnost přesáhne kritérium, pozorovatel ukončí hledání a ohláší nalezení cíle na této lokaci.

V rámci předchozího výzkumu bylo otestováno mnoho modelů, jako například pozorovatel, který volí fixace náhodně nebo pozorovatel, který volí fixace tak, aby nikdy nezafixoval tutéž lokaci vícekrát. Všechny tyto modely se ale ukázaly jako nevhodné, vzhledem k tomu, že v praxi dosahují mnohem horších výsledků (měřeno pomocí střední hodnoty počtu fixací před nalezením cíle) než lidský pozorovatel.

MAP pozorovatel

Nejjednodušší model, který dosahuje podobných výsledků, jako lidský pozorovatel, je tzv. MAP⁵ pozorovatel, který vždy zafixuje lokaci, která má v jeho mapě aposteriorních pravděpodobností nejvyšší hodnotu. Tento pozorovatel již dosahuje podobných výsledků jako lidský, ale jeho strategie fixací neodpovídá strategii, jakou volí lidský pozorovatel. Lidský pozorovatel umístí svoji první fixaci do středu scény. Ostatní fixace jsou pak rozmištěny v okolí kružnice se středem ve středu scény a poloměrem rovným přibližně 2/3 poloměru scény, s preferencí pro horní a spodní okraj. MAP pozorovatel oproti tomu vybírá každou lokaci se zhruba stejnou pravděpodobností.

Ideální Bayesovský pozorovatel

Ještě o malinko lepších a hlavě statisticky lidskému pozorovateli bližších výsledků dosahuje model Ideálního Bayesovského pozorovatele.

Ideální Bayesovský pozorovatel (dále IBO) je pozorovatel, který $T + 1$ lokaci vybírá tak, aby maximalizoval pravděpodobnost, že v následujícím kroku odhalí cíl. Vybere tedy lokaci

$$k_{opt}(T + 1) = \arg \max_{k(T+1)} \left(\sum_{i \in L} p_T(i) \Pr [p_{T+1}(i) \geq c | i, k(T + 1)] \right), \quad (1.1)$$

⁵Z anglického „Maximum Aposteriori Probability“.

kde p_N je mapa aposteriorních pravděpodobností po N -té fixaci, L je množina všech potenciálních lokací cíle a c je kritérium, které musí hodnota v mapě aposteriorních pravděpodobností překročit, aby bylo ukončeno hledání a nahlášeno nalezení cíle. Výraz $P[p_{T+1}(i) \geq c|i, k(T+1)]$ pak tedy znamená „pravděpodobnost, že po $T+1$ fixaci bude ukončeno hledání a nahlášen signál v lokaci i , za podmínky, že tam signál opravdu je a byl zafixován bod $k(T+1)$ “.

IBO však ale též není příliš dobrý kandidát na model, podle nějž se lidé chovají. Ač má jeho vyhledávání podobné statistické vlastnosti, jako vyhledávání lidského pozorovatele, vyžaduje perfektní paměť a ideální integraci informace mezi fixacemi. Ani jednu z těchto dovedností ale lidský pozorovatel nemá. Dále si můžeme všimnout, že přinejmenším přímočaré vyhodnocení výrazu (1.1) je kubické v počtu potenciálních lokací (výpočet druhého činitele součinu v sumě je lineární, suma sama je přes lineárně mnoho členů, a vnější maximum má též lineárně mnoho možných voleb $k(T+1)$). Lidský pozorovatel při vyhledávání volí další fixaci přibližně třikrát až čtyřikrát za vteřinu, je tedy nepravděpodobné, že by lidský mozek dokázal takový výpočet provést (Najemník a Geisler, 2008).

ELM pozorovatel

ELM⁶ pozorovatel je pozorovatel, který při výběru následující fixace minimalizuje střední hodnotu entropie náhodné veličiny určující lokaci cíle po fixaci. Tu spočítáme jako

$$\mathbb{E} [H(T+1)|k(T+1)] = -\mathbb{E} \left[\sum_{i \in L} p_{T+1}(i) \log_2 p_{T+1}(i) | k(T+1) \right]. \quad (1.2)$$

Najemník a Geisler (2009) však ukázali, že vyjádření hodnoty entropie podle vzorce (1.2) je sice netriviální, ale lze ho dobře approximovat případem, kdy posleme v limitě $|L|$ do nekonečna. Pak dostáváme výraz

$$\mathbb{E} [H(T+1)|k(T+1)] = H(T) - \sum_{i \in L} p_T(i) d'^2(i - k(T+1)),$$

kde v posledním členu bereme lokace jako vektory od počátku k nim. Člen $H(T)$ navíc nezávisí na $k(T+1)$, takže s ním vůbec nemusíme počítat a k minimalizaci entropie nám stačí maximalizovat hodnotu sumy.

⁶z anglického „Entropy limit minimization“.

2. Cíle práce

Cílem této práce je zjistit, zda se lidé dokáží naučit hledat konkrétní Gabor patch v kruhovém růžovém šumu lépe, pokud jim při tréninku budeme po každé fixaci dávat akusticky informaci o tom, jak dobrý nápad byl zvolit k fixaci právě bod, který zvolili. Jejich schopnost najít cíl budeme hodnotit průměrným počtem fixací potřebných k nalezení cíle. Tohoto cíle dosáhneme následujícími kroky:

1. Vytvoříme aplikaci pro operační systém iOS, v níž bude uživatel hledat Gabor patch v kruhovém poli a volitelně bude dostávat zpětnou vazbu, jako byla popsána v předchozím odstavci.
2. Navrhneme experiment, během nějž budeme pomocí zmíněné aplikace nejprve měřit schopnost účastníků hledat Gabor patch, poté se budou účastníci učit hledat Gabor patch, a nakonec opět tuto schopnost změříme.
3. Najdeme několik účastníků, které náhodně rozdělíme do dvou skupin, kontrolní a experimentální. Všechny účastníky necháme projít experimentem navrženým v předchozím bodě. Účastníci v kontrolní skupině se budou učit hledat Gabor patch pouze tím, že ho budou opakovaně hledat. Účastníci v experimentální skupině budou navíc ve fázi učení dostávat zpětnou vazbu.
4. Výsledky experimentu zpracujeme běžnými statistickými metodami, aby chom zjistili, zda se účastníci v experimentální skupině zlepšili během učení více, než účastníci v kontrolní skupině, a pokud ano, tak zda je rozdíl mezi skupinami statisticky významný.

3. Metody

V této kapitole popíšeme metody, kterým byl prováděn experiment. Technické detaily, jako například algoritmus, kterým byl generován šum, nebo hodnoceny lokace, jsou ale uvedeny až v dokumentaci aplikace, která je druhou přílohou této práce.

3.1 Účastníci

Účastníků bylo celkem deset, pět v každé skupině. Zrak všech z nich byl normální nebo upravený na normální (např. brýlemi). Byli vybráni z okolí autora této práce, nejednalo se tedy o náhodný výběr z populace. Do skupin byli rozřazeni náhodně. Ve skupině se zpětnou vazbou byl věkový průměr 26.8 let, směrodatná odchylka věku byla 10.1, dva z účastníků byli muži a tři ženy. Ve skupině bez zpětné vazby byl průměrný věk 26 let se směrodatnou odchylkou 11.1 let, jeden muž a čtyři ženy. Detailnější statistiky jsou uvedeny v první příloze. Za účast na experimentu nebyli účastníci nijak odměněni a účastnili se ho dobrovolně. Na začátku experimentu žádný účastník nevěděl nic o vlastnostech modelů IBO a ELM.

3.2 Nástroje a stimuly

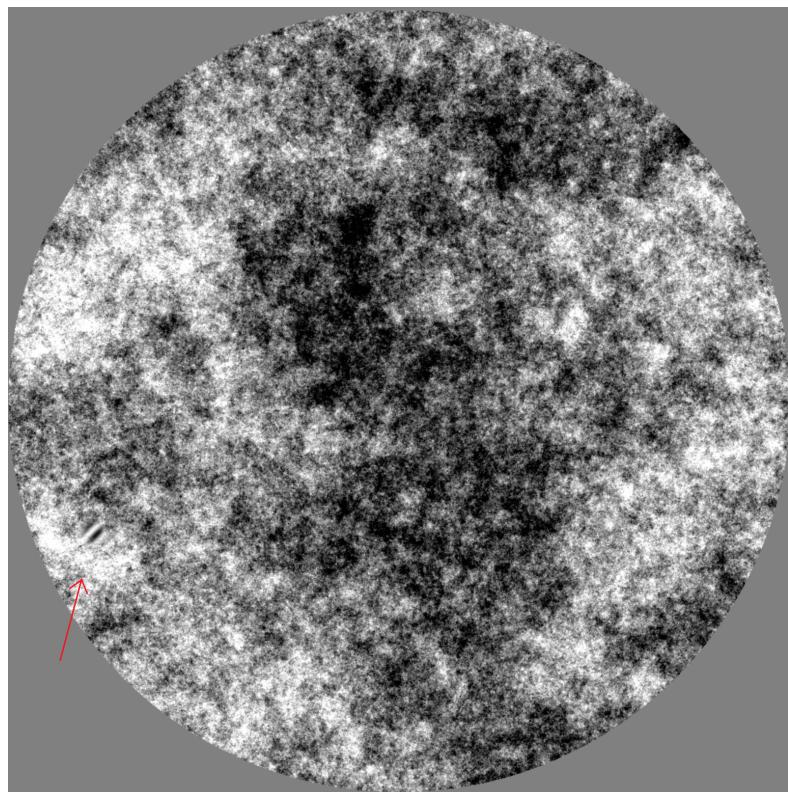
K experimentu byla použita aplikace, která je součástí této práce. Jako zobrazovací zařízení byl použit iPad air s displejem o rozlišení 2048×1536 a o úhlopříčce 9.7 palců, což odpovídá rozměru displeje asi 19.7×14.8 centimetrů. Hustota pixelů je 264 pixelů na palec.

V experimentu použitý růžový šum byl kruhový a jeho průměr byl 1024 pixelů.¹ Tento průměr byl zvolen proto, že je to nejbližší mocnina dvojky ke kratšímu rozdílu displeje iPadu v pixelech. Mocnina dvojky byla zvolena kvůli použití rychlé Fourierovy transformace při generování růžového šumu. RMS kontast² šumu byl po vygenerování roven 0.25, ale při zobrazování byly hodnoty lišící se od střední hodnoty o více než dvě standardní odchylky přiblíženy ke střední hodnotě právě na tuto vzdálenost, čímž byl RMS kontrast mírně snížen.

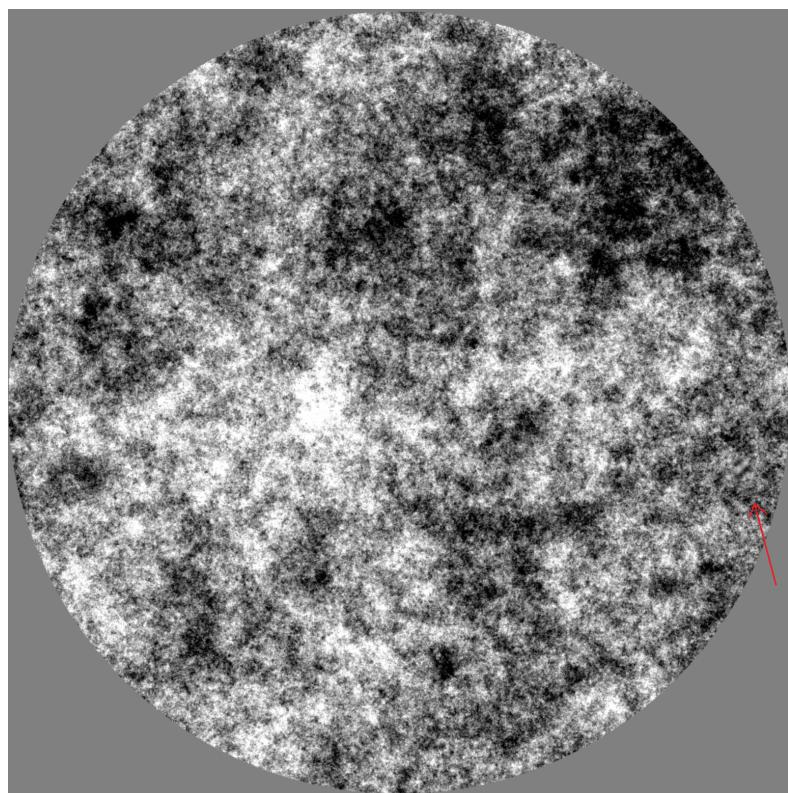
Jako stimulus byl použit Gabor patch. Jedním z problémů aditivního Gabor patche ale je fakt, že jas pixelu je v praxi omezený. Kdybychom tedy přičítali Gabor patch k šumu v místě, které má samo o sobě vysoký jas, museli bychom jeho nejvyšší bod snížit tak, aby součet se šumem nepřesáhl maximální hodnotu jasu pixelu. Obdobný problém bychom měli s oblastí s nízkým jasem. Tento problém byl vyřešen tak, že Gabor k šumu nebyl ale přičten k šumu, ale vložen do něj, jako kdybychom kreslili Gabor patch přes šum a obálka zastupovala alfa kanál. To znamená, že jas pixelu v bodě x byl spočítán jako $S[x] * (1 - o[x]) + G[x] * o[x]$, kde $S[x]$ je hodnota šumu v bodě x , a $G[x]$ a $o[x]$ jsou hodnoty Gaboru a jeho obálky. Zvolené parametry Gabor patche byly:

¹Odsud již všude, kde není zřejmý opak, se pixelem myslí pixel obrázku, nikoliv pixel displeje.

²RMS kontrast je pro černobílý obraz vlastně jiný název pro standarní odchylku jasu pixelu, kdy jas měříme tak, aby černý pixel dostal hodnotu nula a bílý hodnotu jednu (Peli, 1990).

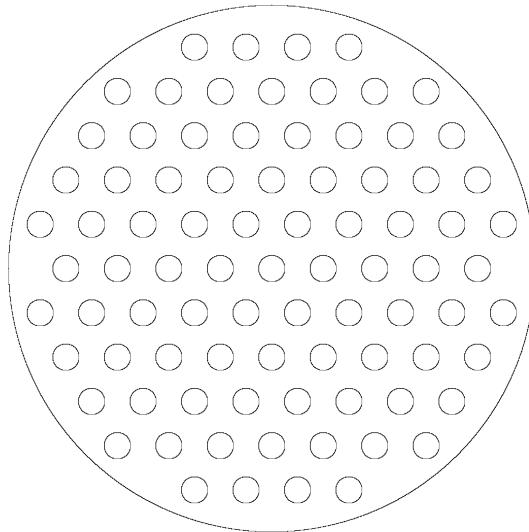


(a) Šum s dobře viditelným Gabor patchem u levého dolního okraje (kontrast 0.99).



(b) Šum se špatně viditelným Gabor patchem u pravého okraje (kontrast 0.61).

Obrázek 3.1: Příklady šumů s cíli.



Obrázek 3.2: Možné lokace Gabor patche

- Obálka: Raised cosine
- Průměr: 50 pixelů
- Frekvence: 1/16 cyklu na pixel
- Fázový posun: 0
- Úhel Θ : 135°

Možných lokací Gabor patche bylo celkem 85, a byly rozmístěny po scéně v trojúhelníkové mřížce tak, aby jedna možná lokace byla ve středu. Vzdálenost dvou sousedních možných lokací byla 100 pixelů.

Kontrast cíle byl daný maximem obálky, tedy při snižování kontrastu byl cíl čím dál tím průhlednější. Hodnoty kontrastu se mohly pohybovat mezi nulou a jedničkou.

3.3 Procedura

Každý účastník prošel sadou 3 testů. V prvním testu mu bylo postupně prezentováno 40 úkolů, kde v každém z nich měl najít Gabor patch v růžovém šumu. V druhém testu bylo prezentováno 120 obdobných úkolů a ve třetím opět 40.

Ve druhém testu dostávaly účastníci, kteří byly ve skupině se zpětnou vazbou, po každé fixaci zvukovou odpověď, která značila, kolik informace mohli od této fixace očekávat (tedy jestli bylo z pohledu ELM moudré udělat právě tuto fixaci). Tato odpověď byla ve formě tónu, jehož frekvence f byla dána vzorcem

$$f = 440 \text{ Hz} * 2^{2 - 2 * \frac{c - \delta}{\Delta - \delta}},$$

kde c je očekávané snížení entropie při fixaci, kterou si subjekt vybral, Δ je maximální dosažitelné očekávané snížení entropie a δ minimální v případě, že by

byla zafixována některá z možných lokací cíle.³

Tento vzorec byl sestaven tak, aby účastník dostal tón a1 v případě, že zvolil lokaci, terá vedla ke stejnemu očekávanému snížení entropie, jako lokace, kterou vybral model ELM jako nejlepší, tón a3 v případě, že naopak zvolil nějakou z nejhorších možných lokací.

V každém úkolu byl šum překryt černou barvou. Subjekt se měl vždy dotknout displeje v místě, které se rozhodl zafixovat. Na tomto místě byl poté šum odkryt na 300 ms. Výpočet tvaru a míry odkrytí oblasti bylo provedeno vynásobením s d' mapou posunutou do bodu fixace, s parametrem d'_0 nastaveným na 1 a ostatními parametry naměřenými na pozorovateli FD ($e_R = 223$, $e_L = 223$, $e_U = 161$, $e_D = 164$, $\beta = 2.46$, všechny veličiny, u nichž má smysl uvádět jednotku, jsou v pixelech).

Tuto d' mapu bylo lepší měřit každému účastníkovi zvlášť. Takové měření ale zahrnuje podle metodiky z článku (Bradley a kol., 2014) přinejmenším 2000 trialů a s metodikou předepsanými přestávkami trvá celý den. Aby bylo možné při něm kontrolovat chování účastníka, je navíc potřeba eyetracker. Proto jsme se rozhodli i vzhledem k nemožnosti kontrolovat přesně podmínky k tomuto měření nepřistoupit. K tomuto problému se ale znova vrátíme závěrem této kapitoly v sekci Limitace.

Ve chvíli, kdy si účastník myslí, že objevil cíl, zmáčkl tlačítko. Poté mu byl ukázán celý odkrytý šum, ovšem bez cíle. Potom se měl účastník dotknout šumu na místě, kde si myslí, že se cíl nachází. Cíl byl považován za nalezený, pokud byla vzdálenost vybraného místa a středu skutečné lokace cíle menší než 60 pixelů displeje. Úkol byl považován za úspěšně splněný, pokud byl cíl nalezen a současně v rámci něj účastník provedl nejvýše šest fixací.

V každém testu byl počáteční kontrast cíle 0.7. Pokaždé, když byl účastník třikrát po sobě úspěšný, byla zvýšena obtížnost snížením kontrastu cíle o 0.01, pokud byl třikrát po sobě neúspěšný, byla obtížnost opět snížena.

Byl tedy využit obecný postup, kterému se říká Up/Down metoda. Tento postup se používá, pokud je závislost pravděpodobnosti daného jevu na nějakém parametru rostoucí (či obecně monotónní) funkce. Spočívá v tom, že se daný parametr snížuje, když jev nastává, a zvyšuje když nenastává (v obou případech o předem danou konstantu, která se během experimentu nemění, nemusí však být v obou směrech stejná). Blíže je popsána v knize Psychophysics: A practical introduction (Kingdom a Prins, 2009). Na rozdíl od implementace této metody, která je popsaná v knize, jsme se rozhodli za jev považovat tři úspěchy za sebou a za jeho absenci tři neúspěchy, abychom zmenšili velký rozptyl, který nás jev jinak má. **Nebo jak tohle okecat?**

Hodnota 0.01 byla vybrána tak, aby se během 120 úkolů, které jsou v prostředním testu, účastník mohl teoreticky dostat až na hodnoty kontrastu kolem 0.3. S kontrastem menším než přibližně 0.45 je ale pravděpodobnost splnění úkolu bez ohledu na strategii podle subjektivního názoru autora práce velmi nízká. V experimentu se tento dojem potvrdil, nejnižší v experimentu dosažený kontrast byl 0.51.

³To znamená, že je potenciálně možné dosáhnout výsledku lepšího než Δ , resp. horšího, než δ . Rozdíl by však neměl být důležitý.

3.4 Limitace

Při návrhu experimentu jsme narazili na několik problémů, které mohou vnést nepřesnosti do měření, ale jejichž řešení je mimo rozsah této práce. Konkrétně se jedná o následující obtíže:

- Vjemy lidského pozorovatele neodpovídají příliš dobře vjemům simulovaného ideálního pozorovatele. Aby si tyto vjemy odpovídaly, alespoň přibližně, museli bychom každému pozorovateli změřit jeho vlastní d' mapu. Měření d' mapy ale i v té nejminimalističtější variantě, která se používá, trvá nejméně jeden pracovní den. Druhým důvodem, proč mohou být vjemy rozdílné i v případě, že by konstanty d' mapy vyšly pozorovateli stejně, jaké byly použity, je, že tato naměřená d' mapa odpovídá situaci, kdy je scéna se šumem umístěna tak daleko od pozorovatele, aby ji viděl pod zorným úhlem 15° . To při velikosti scény v našem případě odpovídá vzdálenosti pozorovatele a zařízení přibližně 65 cm. V našich experimentech nebyla vzdálenost pozorovatele od scény hlídána, a určitě byla nižší, než řečených 65 cm (do držení této vzdálenosti by odpovídalo situaci, kdy by účastníci držely iPad před sebou zhruba na délku natažené paže).
- I pokud odhlédneme od nepřesností zmíněných v předchozím bodě a dovolíme si na chvíli (evidentně sestný) předpoklad, že účastníci měly vlastní d' mapu konstantní, narazíme na další problém. Okraj oblasti, která byla odkrytá, byl ztmavován lineárně se snižující se hodnotou d' v použité d' mapě. Závislost d' na kontrastu ale téměř jistě není lineární.
- S tím souvisí ještě jeden problém: Subjekty samozřejmě nemají svou d' mapu konstantní. Tato mapa se tedy nějak skládá s d' mapou, pomocí které bylo určeno odhalování šumu. V práci jsme toto skládání ignorovali (tedy předpokládali jsme, že d' na kontrastu závisí lineárně a d' mapa účastníků je konstantní.) Nabízela by se otázka, proč tedy bylo zatemňování šumu vůbec prováděno. To se dělo z několika důvodů:
 - Zatemňování šumu zavádí potřebu klikat na místa, která chce pozorovat v dalším kroku prozkoumat. Nutí tedy pozorovatele, aby tato rozhodnutí dělal vědomě a nikoli podvědomě, což byl jeden z efektů, které jsme chtěli zkoumat.
 - Celý proces jedné fixace tímto způsobem také trvá mnohem déle (nižší jednotky vteřin místo nižších desetin vteřiny) a poskytuje nám tedy mnoho času na update mapy aposteriorních pravděpodobností a výpočet množství informace, kterou lze získat následující fixací.
 - Takto navržený experiment též umožňuje zjišťovat, které lokace účastník fixuje bez použití eyetrackeru nebo jiných technologií.
- Je možné, že u lidí, kteří nikdy dříve Gabor patch hledat nezkoušeli, se během testů mění jejich senzitivita na Gabor patch (mění se hodnota $d'(0,0)$).
- Vzhledem k tomu, že počet reálných pixelů displeje neodpovídá (a ani nebyl dělitelný) velikostí scény v pixelech, je možné, že byly efekty jako například antialiasing změněny lokální kontrasty scény.

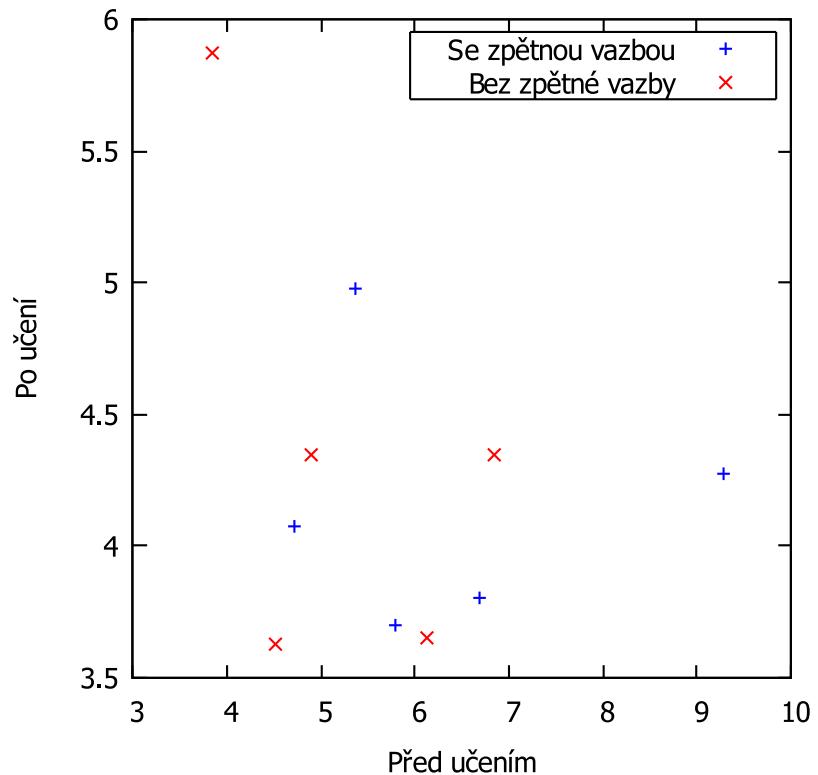
- Ve výzkumu v oblasti psychofyziky se většinou pečlivě kontroluje prostředí (například se zatemňuje místnost, v níž se provádí experiment). To jsme v našem výzkumu nedělali.

Tyto nepřesnosti však nepovažujeme za příliš důležité, protože cílem této práce není přesný experiment, ale pouze proof of concept. Za zásadní chybu naopak nepovažujeme malý počet účastníků – kdybychom chtěli na této práci postavit přesný experiment, nebylo by potřeba zvyšovat počet účastníků, ale pouze počet měření na jednotlivých účastnících, například tak, že bychom vícekrát opakovali první a třetí test. Jinak ale není ve výzkumu nutně přínosné velký vzorek, často je lepší na malém vzorku provést větší počet přesnějších měření (Smith a Little, 2018). Kdybychom se však rozhodli raději pro Large-*N* design, mohli bychom většinu ostatních parametrů experimentu ponechat, ale bylo by potřeba přinejmenším o řád více účastníků.

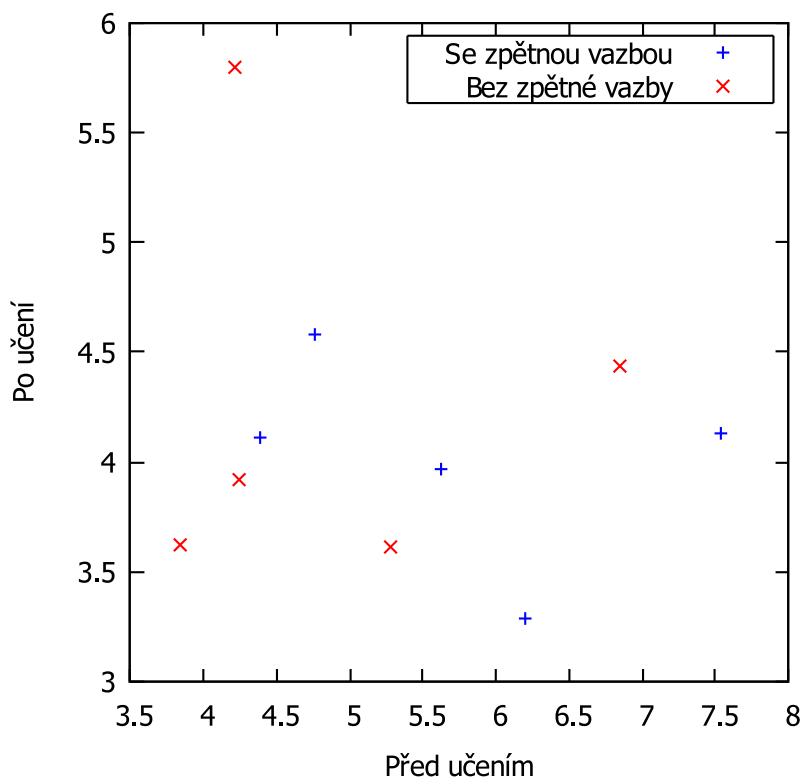
4. Měření

V této kapitole stručně představíme výsledky měření, detailní grafy ke každému pozorovateli zvlášt jsou v první příloze této práce.

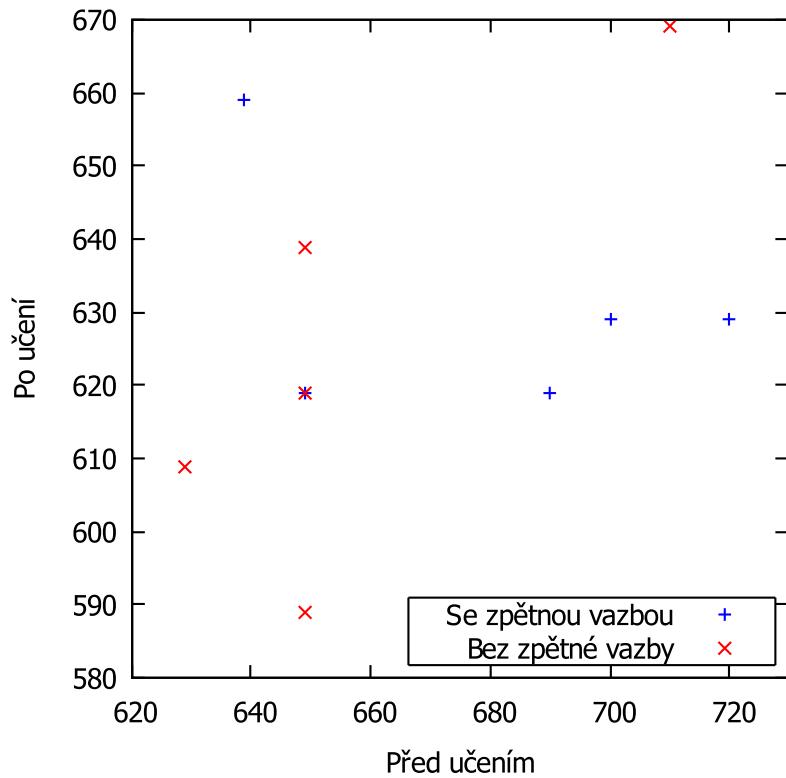
4.1 Výsledky



(a) Průměrný počet fixací



(a) Průměrný počet fixací v úspěšně splněných úkolech



(b) Obtížnost po 40. pokusu

5. Implementace

Tady bych dal nejspíše nějaký high-level přehled a potom páár slov o každém zdrojovém souboru.

Závěr

Seznam použité literatury

- AMEMORI, J. (2016). Ideální bayesovský pozorovateľ s redukovanou detekčnou mapou. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta, Katedra softwaru a výuky informatiky. Vedoucí práce Děchtěrenko, Filip.
- BRADLEY, C., ABRAMS, J. a GEISLER, W. S. (2014). Retina-V1 model of detectability across the visual field. *Journal of Vision*, **14**(12), 22. doi: 10.1167/14.12.22. URL [+http://dx.doi.org/10.1167/14.12.22](http://dx.doi.org/10.1167/14.12.22).
- FOGEL, I. a SAGI, D. (1989). Gabor filters as texture discriminator. *Biological Cybernetics*, **61**(2), 103–113. ISSN 1432-0770. doi: 10.1007/BF00204594. URL <https://doi.org/10.1007/BF00204594>.
- GREEN, D. a SWETS, J. (1988). *Signal Detection Theory and Psychophysics*. Peninsula Pub. ISBN 9780932146236. URL <https://books.google.cz/books?id=AjWwQgAACAAJ>.
- HEEGER, D. (1997). Signal detection theory. URL <http://www.cns.nyu.edu/~david/handouts/sdt-advanced.pdf>.
- KINGDOM, F. A. A. a PRINS, N. (2009). *Psychophysics: A Practical Introduction*. Academic Press, 1 edition. ISBN 9780123736567.
- KOSKO, B. (2006). *Noise*. Viking. ISBN 9780670034956. URL <https://books.google.cz/books?id=skFGSAnR-0YC>.
- KRÁLÍČEK, P. (2002). *Úvod do speciální neurofyziologie*. Karolinum. ISBN 80-246-0350-0.
- MACMILLAN, N. A. a CREELMAN, C. D. (2004). *Detection theory: a user's guide*. Psychology Press, 2 edition. ISBN 0805842306, 9780805842302, 0805842314, 9780805842319.
- NAJEMNIK, J. a GEISLER, W. S. (2005). Optimal eye movement strategies in visual search. *Nature*, **434**, 387–391.
- NAJEMNIK, J. a GEISLER, W. S. (2008). Eye movement statistics in humans are consistent with an optimal search strategy. *Journal of Vision*, **8**(3), 4. doi: 10.1167/8.3.4. URL <http://dx.doi.org/10.1167/8.3.4>.
- NAJEMNIK, J. a GEISLER, W. S. (2009). Simple summation rule for optimal fixation selection in visual search. *Vision Research*, **49**(10), 1286 – 1294. ISSN 0042-6989. doi: <https://doi.org/10.1016/j.visres.2008.12.005>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698908006007>. Visual Attention: Psychophysics, electrophysiology and neuroimaging.
- PELI, E. (1990). Contrast in complex images. *JOSA A*, **7**(10), 2032–2040. doi: 10.1364/JOSAA.7.002032.
- SHANNON, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, **27**(3), 379–423. ISSN 0005-8580. doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

- SMITH, P. L. a LITTLE, D. R. (2018). Small is beautiful: In defense of the small-n design. *Psychonomic Bulletin & Review*. ISSN 1531-5320. doi: 10.3758/s13423-018-1451-8. URL <https://doi.org/10.3758/s13423-018-1451-8>.
- SWETS, J. (1996). *Signal detection theory and ROC analysis in psychology and diagnostics: collected papers*. Scientific psychology series. Lawrence Erlbaum Associates. ISBN 9780805818345. URL <https://books.google.cz/books?id=1vkMAQAAQAAJ>.

Problémy

25: Nebo jak tohle okecat?

Seznam obrázků

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Ukázky různých šumů. Tyto šumy byly vygenerovány pomocí algoritmu, který je použitý přímo v aplikaci, která je součástí této práce. Algoritmus je blíže popsán ve druhé příloze. | 4 |
| 1.2 | Ukázky několika Gabor patchů. Všechny Gabor patche jsou 100 pixelů široké i vysoké. Levý patch má $\Theta = 1/4\pi$, ostatní mají $\Theta = -1/4\pi$, levý má jako obálku Gaussovou funkci, prostřední dva raised cosine, pravý lineární funkci vzdálenosti, první, druhý a čtvrtý mají frekvenci (v cyklech na pixel) 0.1, třetí 0.02. | 5 |
| 1.3 | Závislost hit rate a false alarm rate pro různé hodnoty d' . Těmto křivkám se říká ROC křivky z anglického Receiver Operating Characteristic (Swets, 1996; Green a Swets, 1988). | 8 |
| 3.1 | Příklady šumů s cíli. | 14 |
| 3.2 | Možné lokace Gabor patche | 15 |

Rejstřík

C

Correct rejection, 6

D

d' , 7, 9

d' mapa, 9, 16

E

ELM pozorovatel, 11

Entropie, 8, 11

F

False alarm, 6

False alarm rate, 6

G

Gabor patch, 3, 9

H

Hit, 6

Hit rate, 6

I

IBO, 10

Ideální Bayesovský pozorovatel, 10

M

MAP pozorovatel, 10

Miss, 6

R

RMS kontrast, 13

S

Senzitivita, 6

Shannonova entropie, 8

Š

Šum, 3, 7

bílý, 3

červený, 3

modrý, 3

růžový, 3, 9

Y

Y/N, 5

Yes-No problém, 5

Přílohy

.1 První příloha