

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Jana Vlachová

Stereoskopické promítání

Katedra didaktiky matematiky

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jana Hromadová, Ph.D.

Studijní program: Matematika

Studijní obor: Učitelství matematiky – deskriptivní geometrie pro SŠ

Praha 2012

Ráda bych poděkovala RNDr. Janě Hromadové, Ph.D. nejen za to, že mi umožnila věnovat se v rámci řešení diplomové práce tak zajímavému tématu, ale též za to, že mi vždy ochotně poskytla cenné rady a připomínky. Dále bych chtěla poděkovat Jendovi Kříženeckému za jeho rady v oblasti praktické stereoskopické fotografie, jež mi v počátcích práce velmi pomohly. Poděkování patří také RNDr. Petře Surynkové, jejíž pomoc s programem Rhinoceros dala vzniknout mnohým z obrázků uvedených v kapitole 7. V neposlední řadě děkuji mému příteli, rodině a kamarádkám za jejich podporu, toleranci a trpělivost při mé práci.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala 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 v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 27.7.2012

Jana Vlachová

Název práce: Stereoskopické promítání
Autor: Jana Vlachová
Katedra: Katedra didaktiky matematiky
Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jana Hromadová, Ph.D., KDM
E-mail vedoucího: Jana.Hromadova@mff.cuni.cz

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá speciálním případem dvojestředového promítání – stereoskopickým promítáním, při němž je poloha středů promítání a průmětny přizpůsobena podmínkám lidského vidění. Práce seznamuje se stručným historickým vývojem zobrazování a vlastní stereoskopie, základními biologickými a optickými vlastnostmi lidského oka a vidění a principy stereoskopického promítání. Dále se zabývá postupy tvorby stereoskopických rysů a fotografií spolu s metodami jejich pozorování včetně tvorby některých potřebných pomůcek pomocí běžně dostupných materiálů. Závěr této práce je věnován možnostem využití stereoskopie nejen v praxi, ale především ve výuce deskriptivní geometrie. Práce obsahuje mnoho stereoskopických obrazů, z nichž některé je možné pozorovat čočkovými brýlemi či brýlemi na anaglyf přiloženými v závěru této práce.

Klíčová slova: dvojestředové promítání, stereoskopické promítání, anaglyf

Title: Stereoscopic Projection
Author: Jana Vlachová
Department: Department of Mathematics Education
Supervisor: RNDr. Jana Hromadová, Ph.D.
Supervisor's e-mail address: Jana.Hromadova@mff.cuni.cz

Abstract: This graduation thesis deals with a special case of a double-central projection – the stereoscopic projection, whereas the position of the centres of projection and the projection plane is adjusted to the conditions of the human vision. The thesis introduces a brief historical development of the imaging and the stereoscopy itself, basic biological and optical characteristics of a human eye and vision and the principles of stereoscopic projection. Furthermore it occupies with the procedures of making stereoscopic drawings and photographs along with the methods of their observation and creating some necessary tools using generally available materials. The end of this thesis is devoted to the possibilities of not only practical usage of the stereoscopy, but mainly of its application in the descriptive geometry teaching. The thesis includes many stereoscopic pictures, some of them are viewable with the lens-glasses or the anaglyph-glasses accompanied in the end of this thesis.

Keywords: double-central projection, stereoscopic projection, anaglyph

Obsah

Úvod.....	1
1 Historie zobrazování	2
1.1 Pravěk a starověk	2
1.2 Středověk.....	3
1.3 Novověk	5
1.4 Současnost	6
2 Historický vývoj stereoskopie	7
3 Oko a vidění.....	10
3.1 Stavba lidského oka.....	10
3.2 Monokulární vidění.....	12
3.2.1 Vznik zrakového vjemu.....	12
3.2.2 Rozlišovací mez oka.....	12
3.2.3 Akomodace, akomodační úhel a konvenční zraková vzdálenost.....	13
3.2.4 Zorný úhel a zorné pole.....	14
3.3 Binokulární vidění.....	14
3.3.1 Stereoskopická báze	15
3.3.2 Binokulární zorné pole	16
3.3.3 Konvergence a konvergenční úhel	16
3.3.4 Paralaktický úhel a mez binokulárního vidění.....	17
3.3.5 Poloměr binokulárního vidění	17
3.3.6 Rozsah binokulárního vidění.....	18
4 Stereoskopické promítání.....	22
4.1 Odvození stereoskopického promítání.....	22
4.2 Základní parametry stereoskopického promítání	24
4.3 Sdružené průměty a vliv změny jejich vzdálenosti na výsledný obraz.....	25
4.4 Změna parametrů stereoskopického promítání a její vliv na výsledný obraz	28
4.4.1 Změna stereoskopické báze	29
4.4.2 Změna vzdálenosti pozorovatele od průmětny	30
4.4.3 Změna vzdálenosti sdružených průmětů objektu	30
4.4.4 Změna velikosti sdružených průmětů objektu.....	31
5 Tvorba stereoskopické dvojice obrazů.....	32
5.1 Rýsování stereoskopické dvojice obrazů	32
5.2 Tvorba stereoskopické dvojice fotografií	40
5.2.1 Stereoskopické fotoaparáty a typy pro vytváření stereoskopických dvojic fotoaparátem s jedním objektivem	40
5.2.2 Pravidla pro snímání stereoskopických dvojic fotografií fotoaparátem s jedním objektivem	41
5.2.3 Deviace stereoskopické fotografie	43
5.2.4 Hypostereoskopická a hyperstereoskopická fotografie	47
5.2.5 Úprava stereoskopické dvojice fotografií.....	48

6	Metody pozorování stereoskopické dvojice obrazů	56
6.1	Metoda rovnoběžných očních os	56
6.2	Metoda zkřížených očních os.....	59
6.3	Metoda s použitím zrcadla.....	61
6.4	Anaglyf.....	62
6.5	Použití stereoskopu.....	64
6.5.1	Historické vs. moderní stereoskopy	64
6.5.2	Prohlížečka vlastní výroby	65
6.6	Moderní technologie.....	68
7	Využití stereoskopie	72
7.1	Využití stereoskopie v praxi.....	72
7.2	Využití stereoskopie ve výuce	74
7.2.1	Anaglyfické obrazy	75
7.2.2	Phantogramy.....	76
7.2.3	Obrazy k pozorování metodou rovnoběžných os	78
7.2.4	Obrazy k pozorování metodou zkřížených očních os	79
7.2.5	Obrazy k pozorování metodou s použitím zrcadla	80
7.2.6	Obrazy k pozorování čočkovými brýlemi	81
	Závěr.....	82
	Seznam použité literatury a dalších zdrojů informací	83
	Příloha č. 1	88
	Příloha č. 2	89
	Příloha č. 3	90
	Příloha č. 4	96

Úvod

Tato diplomová práce má za cíl přiblížit čtenáři základní principy stereoskopického promítání, historický vývoj stereoskopie a možnosti tvorby a pozorování stereoskopických obrazů. Práci mohou využít učitelé středních a vysokých škol ke zpestření výuky a názornému vyložení složitějších prostorových vztahů napříč předměty. Pomoci může i jejich studentům, kteří se mohou o stereoskopické promítání zajímat z vlastní iniciativy.

Vzhledem k tomu, že většina kapitol, zejména ty o tvorbě stereoskopických fotografií a metodách pozorování stereoskopických obrazů, nepředpokládá znalost deskriptivní geometrie, může tento text posloužit i komukoliv, kdo má pouze zájem tvořit stereoskopické fotografie bez hlubšího porozumění teorie jejich tvorby.

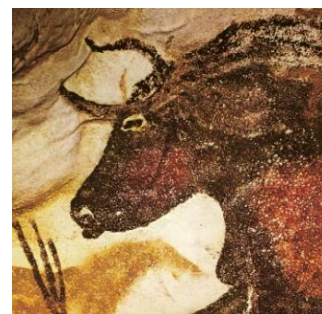
První dvě kapitoly této práce ve stručnosti popisují historický vývoj zobrazování a stereoskopie samotné, třetí kapitola objasňuje základní biologické a optické vlastnosti lidského oka, monokulárního a binokulárního vidění. Čtvrtá kapitola předkládá odvození stereoskopického promítání jako speciálního případu promítání dvojstředového.

Následující dvě kapitoly se zabývají tvorbou a metodami pozorování stereoskopických obrazů, a to jak rýsovaných, tak i ve formě fotografií. Závěr práce je věnován využití stereoskopie v praxi a ve výuce deskriptivní geometrie a je doplněn čtenými stereoskopickými obrazy vytvořenými s využitím programů StereoPhoto Maker, DesignCAD Pro 2000, Rhinoceros a GIMP.

1 Historie zobrazování

1.1 Pravěk a starověk

Od počátku věků se lidé snaží různými způsoby zachytit svět kolem sebe. Již pravěcí lovci zobrazovali to, s čím se během svého života setkávali, a tak dnes můžeme obdivovat paleolitické skalní malby zvířat například v jeskyních Lescaux ve Francii či Altamira ve Španělsku. Problém, jak zobrazit prostorový objekt na rovinnou plochu, vyřešil pravěký malíř po svém – francouzský Černý býk (obr. 1 – [1, s. 15]) se vyznačuje tzv. kroucenou perspektivou, kdy samo zvíře je znázorněno z profilu, zatímco jeho rohy odpovídají pohledu zepředu [1].



Obr. 1 Černý býk, Francie, cca 13 000 – 15 000 př. n. l.

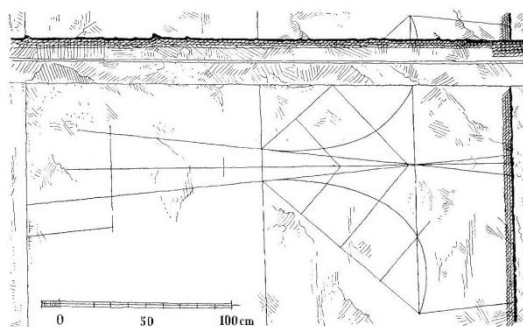
Malíři a písaři starověkého Egypta rozprostírajícího se v úrodném povodí Nilu vytvořili mnoho dalších uměleckých památek, z nichž můžeme usuzovat na způsob vnímání a zobrazování světa této dávné civilizace. Staří Egypťané vytvořili vlastní charakteristický způsob znázorňování lidské postavy – hlava a končetiny z profilu,



Obr. 2 Naarmerova paleta, Egypt, cca 3100 př. n. l.

trup a oko zepředu, jenž byl přesně daný a malíři ho až na výjimky striktně dodržovali. K vyjádření vzdáleností užívali tzv. pásovou perspektivu – jednotlivé objekty zobrazovali do horizontálních pásů (obr. 2 – [1, s. 50]) v závislosti na jejich vzdálenosti k pozorovateli. Společenské postavení zobrazovaných postav vyjadřovali tzv. hieratickou perspektivou – vysoce postavení (bohové, faraoni) byli zobrazováni větší než jejich služebnictvo či prostý lid (obr. 2).

Z období starověkého Egypta také pochází jeden z nejstarších důkazů o znalosti kolmého promítání na jednu průmětnu – na kamenné střeše chrámu v Efdu se dochoval nákras řezu chrámové věže, tzv. pylonu (obr. 3 – [2, s. 8]).



Obr. 3 Profil pylonu z Efdu, Egypt, cca 120 – 30 př. n. l.

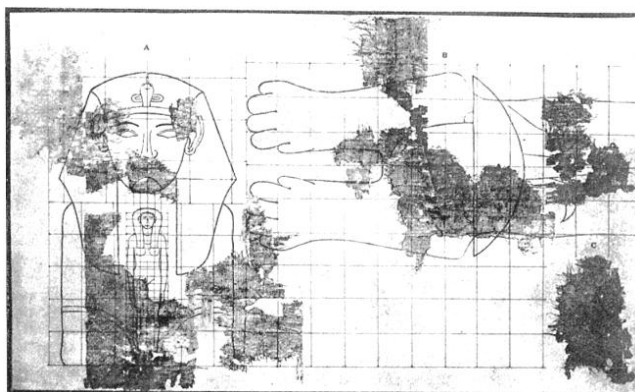
Starověký Řím si v době svého největšího rozmachu na přelomu 1. a 2. st. n. l. podmanil celou oblast Středozemního moře, část Británie a oblasti Černého moře. Jednou z římských provincií se tak stalo i Řecko, z něhož čerpali Římané velkou část inspirace. Ve výzdobě interiérů podobně jako Řekové hojně využívali iluzi třetího prostoru – na stěny místností malovali fresky zobrazující závěsy, nábytek, květiny či průhledy do zahrad nebo jiných místností, které měly nejen dekorativní funkci, ale navíc místnosti opticky zvětšovaly (obr. 4 – [3, s. 256]).



Obr. 4 Nástěnná malba v domě Vettiů, Pompeje, Itálie, kolem roku 50 n. l.

Z období římské invaze do Egypta se zachovaly nákresy některých egyptských staveb, mezi nimi půdorys a nárys sfingy na papyru (obr. 5 – [2, s. 13]) datovaný do 4. století před n. l., jenž byl sice velmi poškozen, ale pomocí známých zákonů o poměrech zvířecího a lidského těla se ho podařilo doplnit.

Pravouhlé promítání na dvě k sobě kolmé průmětny [2, s. 20], jehož znalost nalezený papyrus dokládá, je společně s první písemnou zmínkou o perspektivě [4, s. 3] obsaženo v díle *De architectura libri X* (*Deset knih o architektuře*) římského stavitele a teoretika Marca Vitruvia Pollia (cca 80 – 25 př. n. l.).



Obr. 5 Papyrus, Egypt, cca 330 př. n. l. – 390 n. l.

1.2 Středověk

Po pádu Západořímské říše roku 476 našeho letopočtu se jednotlivé oblasti, dříve římské provincie, začaly samostatně rozvíjet. Nově vznikající společnost měla kořeny v křesťanství, které se na evropském kontinentu rychle šířilo a promítalo se do veškerého společenského, kulturního a politického života obyvatelstva. V období románského slohu¹ tak vznikaly rozličné církevní stavby doplňované uměleckými díly, jejichž hlavním tématem byly biblické náměty. Zobrazování svatých, panovníků

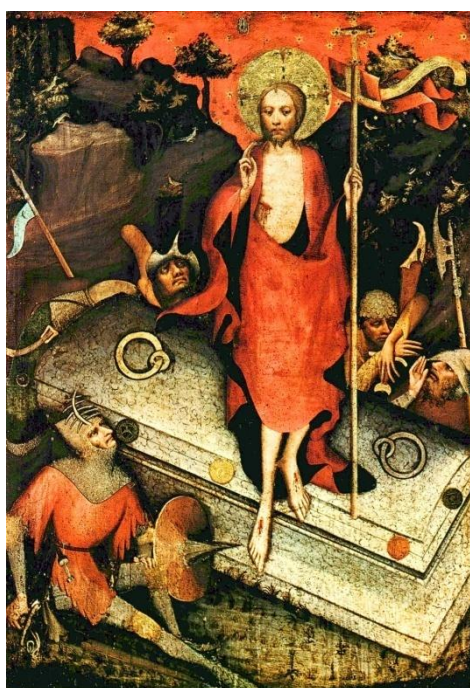
¹ Původ románského slohu nacházíme v zemích s románskými jazyky (dnešní Itálie a Francie).

a ostatních postav se opět drželo určitých zásad, jak je vidět například na následující ukázce (obr. 6 – [5]) – jednotlivé postavy se od sebe příliš nelišily a jejich rozlišení bylo provedeno pomocí tzv. atributů, předmětů charakteristických pro danou osobu.

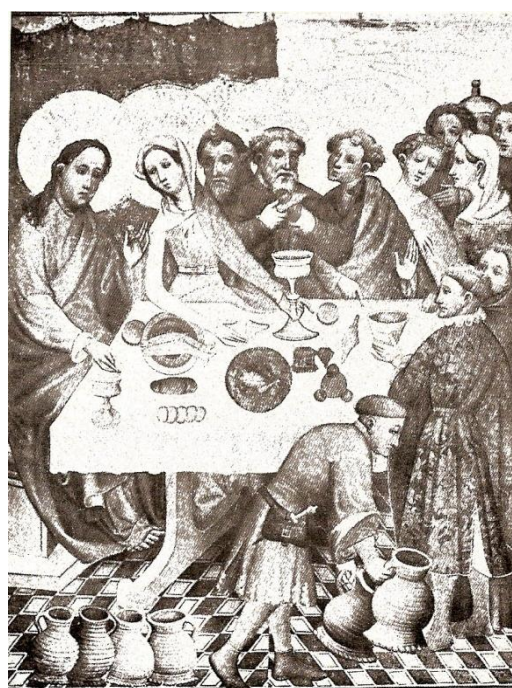
Románský sloh se na přelomu 12. a 13. století začal prolínat se slohem gotickým², jenž byl v určitých částech Evropy vystřídán renesancí až během 16. století. Na některých dochovaných uměleckých dílech gotických mistrů, jako je například desková malba Mistra treboňského oltáře (obr. 7 – [6]), je vidět způsob, s jakým se gotičtí malíři vypořádávali se zachycením prostorové situace na plochu plátna či desky. Na deskovém obraze (obr. 8 – [2, s. 67]) dolnosaského mistra z Lüneburgu je zachycena nepříliš úspěšná snaha o zobrazení perspektivy – nohy stolu odpovídají jinému pohledu než jeho deska, některé nádoby na stole je namalováno z mírného nadhledu, jiné v pohledu přímo shora, způsob zobrazení dlaždic se snad ani perspektivou nazvat nedá.



Obr. 6 Pergamen Kodexu Vyšehradského, 11. st.



Obr. 7 Zmrtvýchvstání Krista, Mistr treboňského oltáře, desková malba z let 1380 – 1385.



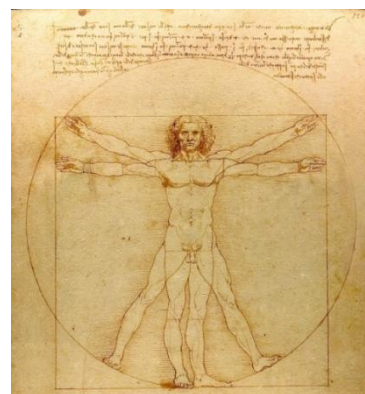
Obr. 8 Poslední večeře Páně, dolnosaský mistr, desková malba z roku 1410.

² Název byl odvozen od Gótů, švédských barbarických kmenů, a původně nabýval hanlivého významu.

1.3 Novověk

Tyto ač ne příliš zdařené první pokusy gotických mistrů o perspektivní zobrazení prostoru byly předstupněm k plnému ovládnutí perspektivy v období renesance³, která se částečně odvrací od náboženských témat a znovuobjevuje antiku. Postup tvorby obrazů v perspektivě byl přitom odvozen z praxe – malíři si povšimli, že vzdálenější předměty se zdají menší, rovnoběžné přímky se zdánlivě sbíhají v jednom bodě apod.

Většina renesančních umělců tedy perspektivu znala a užívala, ale málokterý z nich rozuměl jejím geometrickým principům. Ty jako první shrnul italský architekt a teoretik umění Leon Battista Alberti (1404 – 1472) ve svém spise *De Pictura (O malbě)* [3, s. 60]. Nejprve v něm definuje základní geometrické pojmy a jejich vlastnosti, poté uvádí základy perspektivního promítání [7]. Dalším umělcem, který se věnoval teorii malířské perspektivy, byl italský malíř Piero della Francesca (1412 – 1492), v jehož malířské dílně se vzdělával Luca Bartolomeo de Pacioli (1445 – 1514). Tento italský matematik se ve svém díle *De Divina Proportione (Božská proporce)* systematicky věnuje zlatému řezu a základům perspektivního zobrazování v malířství. Ilustrace této knihy, z nichž nejznámější je tzv. Vitruviova figura (obr. 9 – [8]) znázorňující základní poměry lidské postavy, vytvořil Leonardo da Vinci (1452 – 1519), jenž se studiem perspektivy také intenzivně zabýval.



Obr. 9 Vitruviova figura, Leonardo da Vinci, skica z let 1485 – 1490.

Na systematické pojetí výkladu perspektivního promítání navazuje Quido Ubaldo del Monte (1545 – 1607) důkazem, že obrazy rovnoběžných přímek se při perspektivním promítání zobrazí jako různoběžky protínající se v jednom bodě. Dalším matematikem, který se věnoval teorii perspektivního promítání, byl Girard Desargues (1593 – 1662), jenž bodům v prostoru přiřadil souřadnice a těm jejich perspektivní obrazy pomocí obrazů jednotek na souřadnicových osách. *The Linear Perspective (Lineární perspektiva)* anglického matematika Brooka Taylora (1685 – 1731) je souhrnem všeho, co bylo až do té doby o perspektivě sepsáno, a tvoří základ metody středověho promítání užívané v deskriptivní geometrii [9, s. 21].

S rozvojem průmyslu se objevila potřeba zobrazovat nejrůznější technické nástroje a součástky strojů tak, aby přímo z obrazu bylo možné zjistit potřebné údaje, například velikost, tvar či vzájemnou polohu jednotlivých útvarů. V dosavadní technické praxi bylo užíváno promítání na jednu průmětnu s pomocnými příčnými profily a k přenesení daných údajů do rysu bylo často třeba užít ještě sádrového modelu. Od perspektivního promítání se proto začalo ustupovat a nahradilo ho pravoúhlé promítání na dvě sdružené, vzájemně kolmé průmětny, jež zavedl francouzský matematik a geometr Gaspard Monge (1746 – 1818) [9, s. 22].

³ Název odvozen z francouzského slova „renaissance“, jež v češtině znamená znovuzrození.

Dále se vyvíjely i další zobrazovací metody, jako například různé druhy axonometrie. Lineární perspektiva posloužila jako vzor pro zavedení obecného středového promítání, jež mohlo být vnímáno jako podstatně složitější než Mongeovo, ale jeho výsledky byly mnohem názornější.

1.4 Současnost

S vývojem techniky během válek první poloviny 20. století a s následným rozmachem počítačů a internetu se může zdát, že dlouho budované metody zobrazování pomalu upadají v zapomnutí. A skutečně – vrcholná léta deskriptivní geometrie, kdy byla vyučována na téměř každé škole, jsou zcela jistě nenávratně pryč, avšak její principy a postupy jsou stále aktuální. Při studiu některých technických oborů je deskriptivní geometrie stále nepostradatelná, a to nejen díky svému vlivu na rozvoj prostorové představivosti, jenž v dnešní době opět nabývá na významu. Ač obsah většiny kurzů věnujících se zobrazovacím metodám deskriptivní geometrie často končí Mongeovým promítáním, ostatní zobrazovací metody také nabízejí zajímavé možnosti. Například výše zmíněná lineární perspektiva, tedy středové promítání s vhodně zvolenými parametry, poskytuje obrazy podobné těm, jež vnímá člověk při pohledu jedním okem. Zapojením druhého středu promítání získáme dvojstředové promítání, jež při vhodné volbě vzdálenosti středů promítání a jejich polohy vůči průmětně vznikají obrazy podobné těm, jež vnímá člověk při pohledu oběma očima⁴. Takové promítání se nazývá stereoskopické promítání, krátce stereoskopie, a příklady jeho praktického využití lze najít podkapitole 7.1 kapitoly 7.

⁴ Při tzv. binokulárním vidění, tj. vidění oběma očima.

2 Historický vývoj stereoskopie

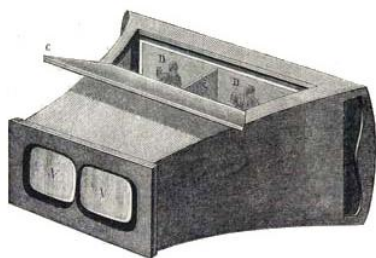
Již Leonardo da Vinci (1452 – 1519) ve svých pracích studoval vnímání hloubky a možnosti vyvolání dojmu hloubky v obrazech [10, s. 13]. První kresby založené na principu dvojtředového promítání ale vytvářeli až na přelomu 16. a 17. století italský učenec Giovanni Batista della Porta (1538 – 1615) a malíř stejné národnosti Jacopo Chimenti da Empoli (1554 – 1640), (obr. 10 – [11]).



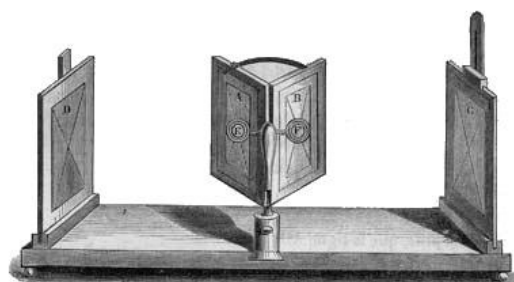
Obr. 10 Stereoskopická malba, J. Chimenti da Empoli, kolem r. 1600.
Stereoskopický obraz lze pozorovat čočkovými brýlemi přiloženými v závěru práce.

Teorii dvojtředového promítání se zabýval také belgický matematik, fyzik a architekt François d’Aguillon (1567 – 1617), jenž ve svém spise *Opticorum Libri Sex philosophis juxta ac mathematicis utiles* (*Šest knih o optice vhodných pro filosofy a také matematiky*) jako první zmiňuje slovo „stéréoscopique“ – „stereoskopický“ [12]. Od teorie k praxi ovšem vedla ještě dlouhá cesta, a tak bylo třeba si na první pokusy o sestavení zařízení umožňujícího vytváření a pozorování stereografických obrazů počkat až do 1. poloviny 19. století.

Tehdy se studiem stereoskopického vidění zabýval Sir Charles Wheatstone (1802 – 1875), jenž roku 1838 představil veřejnosti první nástroj k pozorování stereoskopických obrazů – zrcadlový stereoskop (obr. 11 – [13]). Tento stereoskop byl původně určen k pozorování stereoskopických kreseb, ale o tři roky později Wheatstone navrhl jeho použití k prohlížení stereofotografií. S vynálezem stereoskopu je také spojován Sir David Brewster (1781 – 1868), jenž k vytvoření stereoskopického obrazu využil optických čoček (obr. 12 – [14]).



Obr. 11 Brewsterův čočkový stereoskop, kolem r. 1840.



Obr. 12 Wheatstoneův zrcadlový stereoskop, 1838.

Později, roku 1849, Brewster popsal první binokulární fotoaparát, a stereoskopické fotoaparáty začaly být vyráběny⁵ a prodávány zájemcům ze širokých vrstev společnosti. Léta 1860 až 1890 bývají označována za zlatou éru stereofotografie [12].

Prvním komerčně vyráběným stereoskopem byl ruční stereoskop (obr. 13 – [15]) navrhnutý americkým fyzikem a spisovatelem Oliverem Wendellem Holmesem (1809 – 1894), jenž byl patentován v roce 1859. Jiným oblíbeným ručním stereoskopem byl již zmiňovaný Brewsterův stereoskop. Kromě lehkých, snadno ovladatelných a dostupných ručních stereoskopů se následně objevily i stereoskopy stolní – mezi nejprodávanější z nich v tehdejší době patřily ty od firem Duboscq&Soleil, Jules Richard či Gaumont (obr. 14 – [16, 17, 18]).



Obr. 13 Holmesův stereoskop, 1859.



Obr. 14 Stereoskop značky Duboscq&Soleil, tzv. taxiphote značky Jules Richard a tzv. stereodrom značky Gaumont.

Další přístroj k pozorování stereoskopických obrazů patentoval roku 1858 francouzský fotograf Antoine François Jean Claudet (1797 – 1867), tentokrát se jednalo o tzv. stereomonoskop umožňující pozorování obrazů více osobám najednou jejich promítnutím na stínítko z broušeného skla. Pozadu nezůstali ani američtí fotografové – bratři William a Frederick Langenheimové roku 1856 jako první získali autorské právo na papírové stereofotografie, které zájemcům za poplatek promítali pospojované do podoby příběhu. Podobnost s pozdějším biografem nelze nepostřehnout, a i proto lze toto hromadné promítání stereofotografií považovat za jeho předchůdce.

⁵ Jako první se výrobou stereofotoaparátů začala zabývat francouzská firma Duboscq&Soleil (zakladatelé: Louis Jules Duboscq (1817 - 1886) a Jean Baptista Soleil (1798 – 1878)).

Souběžně s výše uvedenými metodami tvorby a pozorování stereoskopických obrazů se rozvíjela dnes známá metoda anaglyfu. V roce 1853 německý matematik Wilhelm Rollman (1821 – 1890) jako první popsal princip anaglyfu, k jehož vytvoření použil modré a červené barvy na černém pozadí, k pozorování pak brýle se skly v týchž barvách. Jednalo se ale pouze o anaglyfické kresby tvořené čarami a křivkami. První tištěné anaglyfické fotografie vytvořil až v roce 1891 francouzský fotograf Louis Arthur Ducos du Hauron (1837 – 1920). Tehdejší anaglyfická fotografie mohla vypadat například jako ta následující (obr. 15 – s využitím [19]).



Obr. 15 Anaglyf vytvořený z historické stereoskopické dvojice fotografií, který lze pozorovat brýlemi na anaglyf přiloženými v závěru práce.

S nástupem biografu ve 20. letech 20. století obliba stereoskopické fotografie a anaglyfů poklesla. Principy stereoskopie byly ale nadále využívány a jsou aktuální i dnes. Navíc je tvorba stereoskopických fotografií díky vývoji fotografické techniky a počítačů velmi snadná a dostupná téměř každému. To je zřejmě důvodem dnešního znovuoobjevení a dalšího rozvoje stereoskopické fotografie a s ní úzce spjatého 3D filmu.

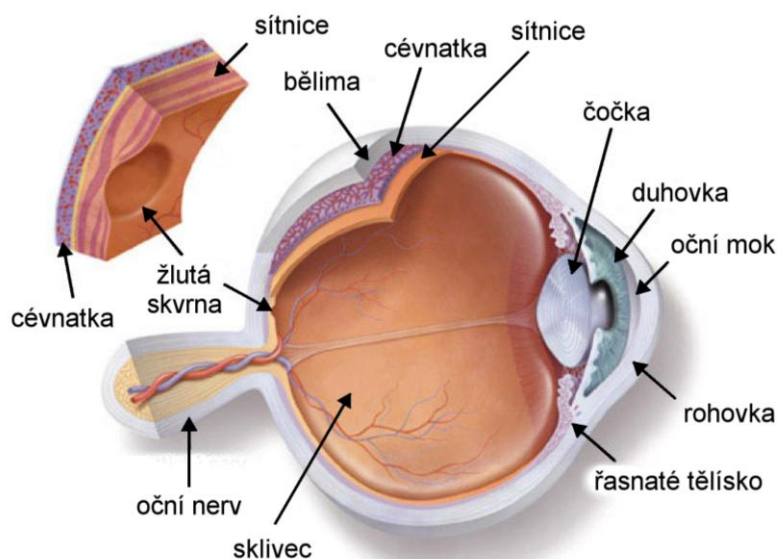
3 Oko a vidění

Jelikož hlavním cílem stereoskopického promítání je napodobovat přirozené lidské vidění, jsou vlastnosti lidského oka a lidského vidění důležitými faktory stereoskopického promítání. Předtím, než se budeme hlouběji věnovat stereoskopickému promítání, je proto vhodné zabývat se stavbou lidského oka, jeho optickými vlastnostmi a charakteristickými prvky lidského vidění. To vše je přehledně shrnuto v [20, s. 224 – 243].

3.1 Stavba lidského oka

Oko je párový zrakový orgán kulovitého tvaru. Je umístěno v oční dutině, v níž se otáčí pomocí tří párů tzv. okohybných svalů. V zadní části oční bulvy na oko navazuje oční nerv, jenž slouží k přenosu nervových signálů do mozku.

Vnější část oční bulvy (obr. 16 – s využitím [21]) je tvořena třemi blánami – vnější, střední a vnitřní. Asi 5/6 vnější blány zabírá bělima, jež v přední části oka navazuje na zcela průhlednou rohovku. Střední blána obsahuje tři části – mezi nimi cévnatku, jež pokrývá celou vnitřní část bělimy. Dále ciliární neboli řasnaté tělísko prstencového tvaru, jež se napojuje na bělimu a tvoří závěsný a akomodační aparát oční čočky [22]. Řasnaté tělísko je umístěno za duhovkou, jež je třetí částí střední blány. Otvor nacházející se uprostřed duhovky se nazývá zornice neboli pupila.



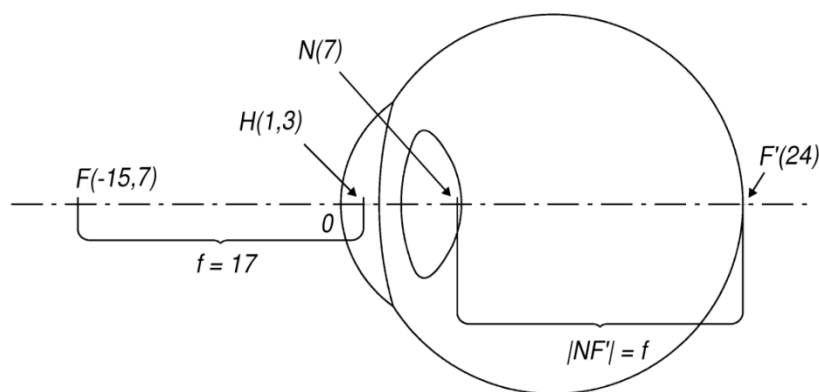
Obr. 16 Stavba lidského oka.

Vnitřní blánu vnější části oka tvoří sítnice, jež je plošným rozvětvením očního nervu. Sítnice obsahuje buňky citlivé na světlo – tyčinky a čípky. Tyčinky umožňují vnímání světelných kontrastů, na rozdíl od čípků, díky nimž vnímáme barvy. Tyto buňky nejsou na sítnici rozmístěny rovnoměrně – největší hustota čípků je v jamce sítnice, tzv. žluté skvrně. Díky vysoké koncentraci čípků je toto místo nejcitlivější oblastí sítnice. Oko je proto při pozorování určitého objektu vždy nasměrováno tak,

aby nejdůležitější oblast objektu dopadla právě na žlutou skvrnu. Směrem od žluté skvrny hustota čípků klesá. Nejméně citlivým místem sítnice je tzv. slepá skvrna, kde z oka vystupuje oční nerv, jenž do mozku vysílá světelný vjem zachycený sítnicí.

Vnitřní část oční bulvy zahrnuje oční mok, oční čočku a sklivec. Oční mok je bezbarvá kapalina, jež vyplňuje prostor mezi rohovkou a čočkou. Oční čočka je v oku upevněna svaly vycházejícími z řasnatého tělíska. Jedná se o bikonvexní, tj. dvojbypuklou čočku, jež je v dětství tvořena mnoha tenkými vrstvami. Ty v dospělosti splynou ve dvě rozpoznatelné vrstvy – jádro a kůru. Prostor za oční čočkou vyplňuje průhledná rosolovitá kapalina nazývaná sklivec.

Z fyzikálního pohledu lze oko považovat za optickou soustavu, jež je tvořena čtyřmi prostředními – rohovkou, očním mokem, oční čočkou a sklivcem. Lámavé plochy této soustavy mají přibližně kulový tvar a středy těchto kulových ploch leží na jedné přímce – optické ose oka. Optickou soustavu oka lze charakterizovat třemi páry význačných bodů – dvěma hlavními body, předním a zadním ohniskem a dvěma uzlovými body⁶ [25]. Vzdálenosti jak uzlových tak hlavních bodů jsou pro potřeby této práce zanedbatelné, a proto je možné oba tyto páry bodů nahradit body mezi nimi [26, s. 8]. Na následujícím obrázku (obr. 17) je vidět zjednodušený náčrt optické soustavy oka⁷, kde písmena F , H , N a F' značí po řadě předmětové ohnisko, hlavní bod, uzlový bod a obrazové ohnisko soustavy a čísla v závorkách jejich souřadnice v milimetrech. Počátkem souřadnicové osy je bod, v němž osa optické soustavy protíná rohovku. Písmenem f označme obrazovou ohniskovou vzdálenost optické soustavy oka, tj. vzdálenost obrazového ohniska F' od uzlového bodu N , jejíž hodnota je 17 mm. Tímto zjednodušením získá zobrazený jediný uzlový bod stejnou funkci jako optický střed obyčejné čočky – optické paprsky jím procházejí beze změny směru [25]. Úhlové vzdálenosti popisované v dalším textu jsou uvažovány s vrcholem úhlu v tomto bodě.



Obr. 17 Zjednodušená optická soustava oka.

⁶ Jedním z modelů optické soustavy oka charakterizované těmito třemi páry bodů je tzv. Gullstrandovo schematické oko. Bližší informace k vlastnostem nejen tohoto modelu lze nalézt např. v [23, s. 128-132] či [24].

⁷ Jeden z modelů oka, jenž popisuje optickou soustavu oka pomocí jednoho uzlového bodu, jednoho hlavního bodu a dvou ohnisek je tzv. Donersovo redukované oko. Bližší informace k vlastnostem tohoto velmi zjednodušeného modelu optické soustavy oka lze nalézt např. v [23, s. 132] či [26, s. 8].

3.2 Monokulární vidění

3.2.1 Vznik zrakového vjemu

Zrakový vjem vzniká po průchodu světelných paprsků optickou soustavou oka nervovým podrážděním tyčinek a čípků. Jak již bylo naznačeno výše, tyčinky jsou buňky citlivé na světlo, všechny barvy ale vnímají ve škále modrošedé. Naopak čípky jsou vůči světelné intenzitě méně citlivé, ale díky nim dokážeme rozeznat barvu dopadajícího světla a detaily pozorovaného předmětu – zajišťují ostrost vidění [20, s. 228].

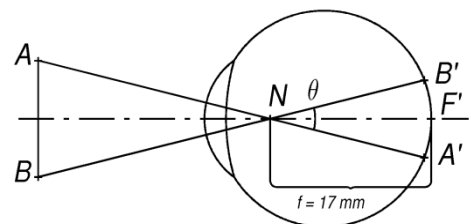
Díky rozmístění tyčinek a čípků na sítnici je citlivost sítnice při slabém osvětlení v jejím středu, tzn. v oblasti žluté skvrny, nízká a se vzrůstající vzdáleností od středu sítnice se zvyšuje [20, s. 228]. Po dosažení určité úhlové vzdálenosti od středu sítnice její citlivost opět klesá. Naopak při dostatečném osvětlení je citlivost sítnice nejvyšší právě v oblasti žluté skvrny a se zvyšující se vzdáleností od jejího středu klesá [20, s. 227 – 228]. První z uvedených vlastností je důvodem, proč slabě zářící hvězdu rozeznáme snáze nepřímým pohledem než pohledem přímým [20, s. 227] – při nepřímém pohledu dopadnou paprsky promítající obraz hvězdy mimo sítnici, kde je její citlivost při slabém osvětlení vyšší než přímo v oblasti žluté skvrny.

3.2.2 Rozlišovací mez oka

Viditelnost předmětu závisí na mnoha faktorech, jako jsou např. jeho velikost, jas, kontrast vůči pozadí a další. Jedním z těch nejvýznamnějších je rozlišovací schopnost oka a z ní odvozená rozlišovací mez oka.

Rozlišovací schopnost oka je schopnost oka vnímat obrazy dvou různých bodů opět jako dva různé body. Rozlišovací mez oka je nejmenší úhlová vzdálenost dvou různých bodů, které oko dokáže vnímat odděleně [27, s. 13]. Abychom takové body nevnímali jako jeden, je nutné, aby mezi jejich obrazy vytvořenými na sítnici byla alespoň jedna buňka citlivá na světlo. Vzhledem k tomu, že oko je vždy v takové poloze, aby obraz pozorovaného předmětu či jeho nejdůležitější části dopadl do oblasti žluté skvrny, jedná se v tomto případě o čípky. Průměr čípků ve žluté skvrně je zhruba 0,005 mm, tedy obrazy dvou bodů na sítnici od sebe musí být alespoň 0,005 mm vzdáleny.

V případě znázorněném na obr. 18 uvažujme, že se obrazy A' , B' bodů A , B zobrazily na sítnici oka tak, že délka kruhového oblouku $A'B'$ je rovna uvedené mezní hodnotě 0,005 mm. Tato hodnota je v porovnání s ostatními charakteristikami oka velmi malá, proto je možné nahradit skutečný střed kruhového oblouku $A'B'$, tj. střed kulové plochy oka, středem v uzlovém bodě N . Pro poloměr $|NA'| = |NB'|$ tohoto kruhového oblouku pak platí $|NA'| = f$.



Obr. 18 Výpočet hodnoty rozlišovací meze oka.

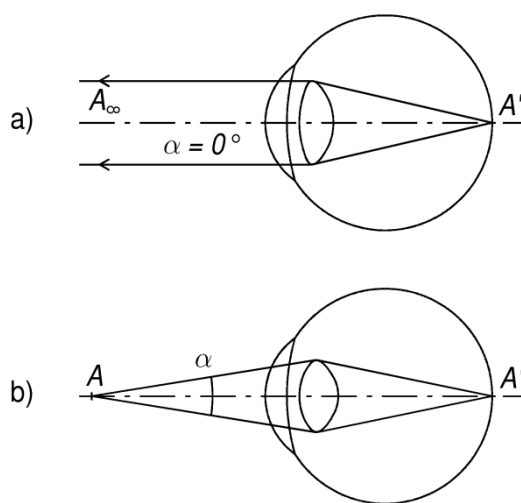
Označme dále mezní hodnotu délky kruhového oblouku $A'B'$ písmenem d , tj. $d = 0,005$ mm, a písmenem θ rozlišovací mez oka, tedy úhel sevřený promítacími paprsky bodů A, B procházejícími uzlovým bodem N příslušející ke kruhovému oblouku délky d . S využitím vzorce pro výpočet délky kruhového oblouku $A'B'$ příslušného k danému úhlu θ s velikostí úhlu v obloukové míře lze získat rovnici $d = f \cdot \theta$, z níž pro rozlišovací mez lidského oka platí $\theta = d/f$, tedy

$$\theta = \frac{0,005}{17} \text{ rad} \doteq 0,003 \text{ rad} \approx 0,0169^\circ \approx 1'.$$

Nutno poznamenat, že rozlišovací mez oka není konstantní veličinou – její hodnota se mění se změnou pozorovacích podmínek, např. intenzitou osvětlení či věkem pozorovatele. V některých zdrojích, např. [27, s. 19], je možné se setkat s experimentálně zjištěnou průměrnou hodnotou rozlišovací meze lidského oka 20'' až 30''. V této práci ale budeme podobně jako v [20] nadále pracovat s rozlišovací mezí o hodnotě 1' jakožto matematicky odvozené hodnotě založené na optických vlastnostech lidského oka⁸.

3.2.3 Akomodace, akomodační úhel a konvenční zraková vzdálenost

Optická soustava oka zobrazí ostře jen určitou část prostoru, resp. pouze ty body, jejichž obrazy dopadnou přímo na sítnici. To platí pro body v jedné konkrétní vzdálenosti od pozorovatele – předměty v jiné hloubce se zobrazí buď před sítnicí, nebo za ni. Avšak díky akomodaci tj. přizpůsobení oční čočky, můžeme vidět ostře předměty v různých vzdálenostech. To je zapříčiněno změnou zakřivení lámavých ploch oční čočky, zejména její přední plochy, a odpovídající změně ohniskové vzdálenosti optické soustavy oka [20, s. 233]. Pro blízké předměty se zakřivení zvětšuje a ohnisková vzdálenost zmenšuje; u vzdálených předmětů je tomu naopak (obr. 19). Maximální úhel sevřený optickými paprsky dopadajícími z pozorovaného bodu do oka se nazývá akomodační úhel [27, s. 21], označme ho písmenem α . Pro velmi vzdálené body se velikost tohoto úhlu blíží hodnotě 0° . Se zmenšující se vzdáleností předmětů od pozorovatele se akomodační úhel zvětšuje.



Obr. 19 Náznak změny zakřivení oční čočky při a) nulové akomodaci, b) nenulové akomodaci s akomodačním úhlem α .

⁸ Zvolením největší z uvedených hodnot bude zaručena platnost později odvozených závěrů pro co nejširší vrstvu pozorovatelů.

Bod, jenž se zobrazí ostře bez potřeby akomodace, se nazývá bod vzdálený neboli „punctum remotum“. U oka bez optických vad je tento bod v nekonečnu a jeho poloha se mění až během stáří. Bod, jenž se zobrazí ostře při maximální akomodaci oční čočky, se nazývá bod blízký neboli „punctum proximum“. Poloha tohoto bodu se odvíjí od schopnosti akomodace, jež s věkem klesá a blízký bod se tak vzdaluje [20, s. 233].

Minimální vzdálenost, na níž je oko schopno pohodlně akomodovat, tj. zaostřit, na drobné předměty, je u zdravého oka přibližně 25 cm. Tato vzdálenost se nazývá konvenční zraková vzdálenost. Pozorování předmětů bližších než 25 cm vyžaduje intenzivní akomodaci oční čočky, kterou se oko po krátké době unaví. Proto by pozorované předměty měly být umístěny ve vzdálenosti minimálně 25 cm.

3.2.4 Zorný úhel a zorné pole

Zorný úhel a zorné pole mají napříč jednotlivými obory mnoho více či méně odlišných definic. Zorný úhel je často definován jako úhel sevřený paprsky procházejícími krajními body pozorovaného předmětu. Velikost takto definovaného zorného úhlu je tedy závislá na velikosti a vzdálenosti pozorovaného předmětu.

Některé zdroje [28] definují zorný úhel jako úhel sevřený promítacími paprsky procházejícími nejzazšími efektivně pozorovatelnými body bez nutnosti změnit směr pohledu. Hodnota takového zorného úhlu však také není jednoznačně stanovena. V učebnicích deskriptivní geometrie je v kapitolách týkajících se lineární perspektivy uváděn zorný úhel 40° až 50° [29, s. 345]. V některých zdrojích, např. [27, s. 16] či [30], lze najít přibližné hodnoty vertikálně 60° směrem nahoru a 70° směrem dolů, horizontálně 65° směrem ke kořeni nosu, 95° směrem na opačnou stranu (viz obr. 21 na str. 20).

Zorné pole je pak část prostoru vymezená takovými paprsky. Jedná se o obecnou kuželovou plochu s vrcholem ve středu optické soustavy oka – jejím uzlovém bodě. Jak bylo naznačeno výše, na tvar této plochy má vliv tvar lidského obličeje. Vzhledem ke geometrické povaze této práce lze zorné pole ve zjednodušení znázornit rotační kuželovou plochou s vrcholem ve středu optické soustavy oka, osou ve směru pohledu a vrcholovým úhlem rovným zornému úhlu φ o hodnotě 50° .

3.3 Binokulární vidění

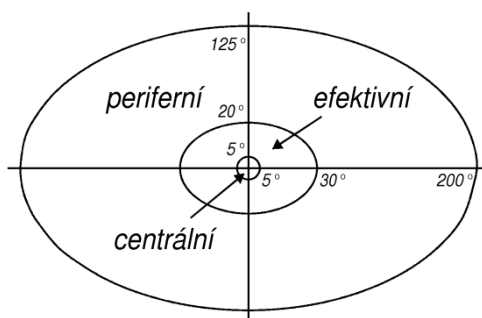
Binokulární vidění neboli vidění oběma očima je jedním z nejdůležitějších předpokladů pro schopnost orientace v prostoru a schopnost vnímání hloubky⁹ a vzdálenosti pozorovaných objektů. Jak je zmíněno v [20, s. 240], při vnímání prostoru jedním okem je člověk schopen správně odhadnout vzdálenost pozorovaných objektů jen do jejich vzdálenosti od pozorovatele o hodnotě cca 4 m. Jako přesvědčivý důkaz důležitosti binokulárního vidění pro vytvoření prostorové představy je v [10, s. 26] uveden následující příklad: pozorujeme-li pouze jedním

⁹ Hloubka objektu = rozměr objektu ve směru kolmém ke svislé rovině obsahující středy promítání.

okem několik neznámých předmětů různých velikostí umístěných v různých vzdálenostech proti tmavému pozadí, pak ve většině případů nejsme schopni správně odhadnout jejich velikosti a vzdálenosti.

Podle [30] lze lidské binokulární vidění rozdělit na tři oblasti – centrální, efektivní a periferní vidění. Jak již názvy napovídají, centrální vidění je zprostředkováno paprsky dopadajícími do žluté skvrny ve středu sítnice. Jedná se o oblast ostrého vidění, jež je způsobeno vysokou koncentrací čípků v této části sítnice. Efektivní vidění je takové vidění, jež umožňuje rozpoznání předmětů, avšak v této oblasti lidského vidění člověk není schopen rozlišit detaily pozorované scény. Periferní vidění dovoluje orientovat se v prostoru, ale bez rozeznání jednotlivých předmětů.

Centrální vidění zabírá velmi malou oblast o zorném úhlu asi 5° , efektivní vidění zahrnuje zorný úhel 30° horizontálně a 20° vertikálně. Periferní vidění, jež je zprostředkováno všemi paprsky dopadajícími do oka, zahrnuje paprsky v rozmezí zorného úhlu o přibližné hodnotě až 200° horizontálně a 125° vertikálně (obr. 20 – podle [30]). Při pohledu jedním okem je však jeho rozsah směrem k nosu značně omezen. Rozsah periferního vidění jedním i oběma očima si může každý sám vyzkoušet. Stačí upřít pohled před sebe, upažit jednu ruku a pomalu s ní pohybovat před sebe, dokud ji nezaregistrujeme. Úhel, jenž svírá paže se směrem pohledu, je přibližný rozsah periferního vidění v daném směru. Změnou směru pohybu paže a následnou výměnou paží získáme přesnější informace o rozsahu periferního vidění.



Obr. 20 Oblasti lidského vidění oběma očima.

Lze se také setkat s rozdělením vidění na přímé, tzn. centrální, a nepřímé – zahrnující vidění efektivní a periferní [27, s. 15].

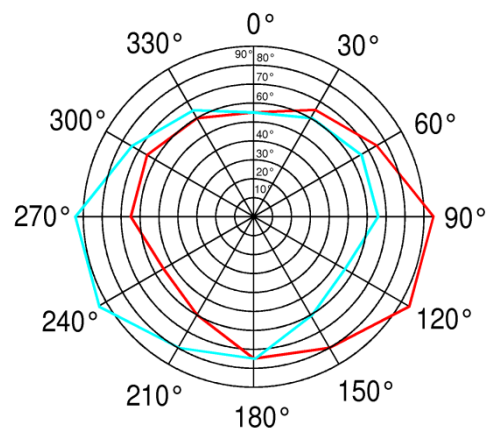
3.3.1 Stereoskopická báze

Vzdálenost středů optických soustav očí se u dospělých lidí pohybuje zhruba v rozmezí od 56 do 72 mm [20, s. 240]. Spojnice těchto bodů se nazývá stereoskopická báze či stereoskopická základna. Stejným pojmem se ve stereoskopické praxi označuje také vzdálenost těchto bodů, jejíž průměrná hodnota je 64 mm a označuje se písmenem *b*. Nejsou tedy výjimkou slovní spojení typu „báze rovnoběžná s danou rovinou“ či „báze dané velikosti“.

3.3.2 Binokulární zorné pole

Při binokulárním vidění dochází k průseku zorných polí a vzniká tzv. binokulární zorné pole o rozsahu zhruba 130° horizontálně, vertikálně 60° směrem nahoru a 70° směrem dolů. Na sousedním obrázku (obr. 21 – podle [27, s. 16]) je azurovou, resp. červenou barvou znázorněn úhlový rozsah zorného pole levého, resp. pravého oka. Průnikem těchto dvou oblastí je binokulární zorné pole.

Objekt, jenž má být prostorově vnímán či stereoskopicky zobrazen, musí ležet v prostoru binokulárního zorného pole.



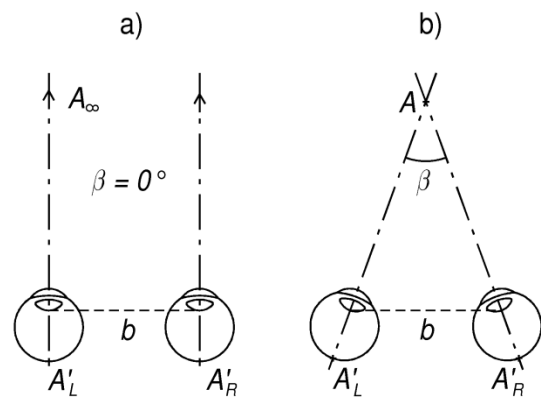
Obr. 21 Složení binokulárního zorného pole.

3.3.3 Konvergence a konvergenční úhel

Při pozorování určitého předmětu jsou oči pomocí okohybných svalů natočeny v očních dutinách tak, aby se jejich optické osy protnuly v právě pozorované části předmětu¹⁰. Tento jev se nazývá konvergence či sbíhavost očních os a úhel sevřený očními osami se nazývá konvergenční úhel; označme jej symbolem β (obr. 22). Pro předměty v konvenční zrakové vzdálenosti 25 cm nabývá tento úhel přibližné hodnoty $14,6^\circ$, tedy zhruba 15° . Pro velmi vzdálené předměty jsou optické osy očí téměř rovnoběžné a konvergenční úhel se blíží hodnotě 0° [31, s. 10].

Při pozorování určitého předmětu oči současně s nasměrováním optických os zaostří na danou vzdálenost akomodací očních čoček. Akomodace a konvergence očí jsou tedy dvě úzce spjaté automatizované činnosti. Avšak s pomocí optických pomůcek či s dostatečnou dávkou cviku je možné tyto dvě oční aktivity oddělit.

Konvergenční a akomodační úhel jsou dalšími důležitými faktory pro posuzování vzdáleností předmětů. Lidský mozek je totiž schopen vnímat stupeň úsilí jak okohybných svalů, tak svalů akomodujících oční čočku. Podle míry využití



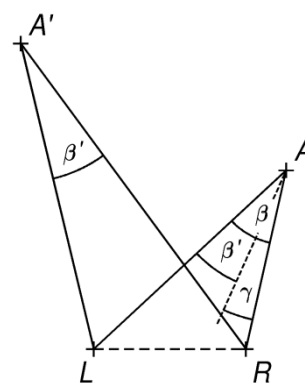
Obr. 22 Náznak konvergence očních os při pozorování
a) velmi vzdáleného bodu A,
b) blízkého bodu A.

¹⁰ Směr pohledu každého oka je přitom od optické osy oka odchýlen asi o 5° až 7° směrem k nosu [26, s. 16] tak, aby obraz pozorovaného objektu dopadl do oblasti žluté skvrny. Pro potřeby této práce ale postačí ztotožnit směr pohledu s optickou osou oka.

těchto svalů pak mozek dokáže posoudit vzdálenost pozorovaného předmětu, přičemž u předmětů ve vzdálenosti do přibližně 5 m se řídí především stavem akomodačních svalů. Při pozorování vzdálenějších předmětů odhaduje mozek jejich vzdálenost z větší míry podle aktuálního stavu okohybných svalů, jež natáčí oči do potřebné polohy [31, s. 13 – 14].

3.3.4 Paralaktický úhel a mez binokulárního vidění

Uvažujme dva různé body A, A' ležící v binokulárním zorném poli pozorovatele s očima v bodech L, R . Označme písmeny β a β' příslušné konvergenční úhly $LAR, LA'R$ (obr. 23). Pak rozdíl těchto úhlů $\gamma = |\beta - \beta'|$ se nazývá paralaktický úhel [27, s. 19]. V případě, že paralaktický úhel příslušný k bodům A, A' přesáhne určitou minimální hodnotu, je pozorovatel schopen vnímat tyto body jako body v různých vzdálenostech. Tato hodnota se nazývá mez binokulárního vidění¹¹ a není u všech osob stejná – pohybuje se v rozmezí od 10" do 30" [20, s. 240]. Někteří autoři [10, s. 44 – 45] uvádějí mez binokulárního vidění o hodnotě 1', kterou lze předpokládat u většiny případných pozorovatelů. Pro další výpočty budeme proto uvažovat mez binokulárního vidění rovnou 1'.

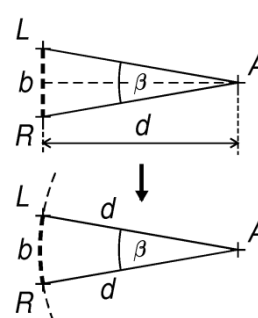


Obr. 23 Paralaktický úhel.

3.3.5 Poloměr binokulárního vidění

Pojem poloměr binokulárního vidění označuje maximální vzdálenost, na kterou je pozorovatel schopen vnímat prostorově, tj. rozlišit vzdálenosti jednotlivých předmětů [20, s. 241]. Je to taková vzdálenost, pro kterou je hodnota konvergenčního úhlu pozorovaného bodu rovna hodnotě meze binokulárního vidění.

Pozorujeme-li s očima v bodech L, R bod A v takové vzdálenosti (obr. 24), je možné nahradit trojúhelník LAR o základně LR a výšce d kruhovou výsečí LAR se středem v bodě A a poloměrem d . Hodnotu d poloměru binokulárního vidění lze následně odvodit pomocí vzorce pro výpočet délky b kruhového oblouku LR příslušného k danému úhlu β o velikosti v obloukové míře $b = d \cdot \beta$. Tedy $d = b / \beta$ [20, s. 240 – 241], kde b označuje stereoskopickou bázi a β konvergenční úhel.



Obr. 24 Výpočet poloměru binokulárního vidění.

¹¹ Tato hodnota bývá také nazývána mezí stereoskopického vidění, kde slovo „stereoskopický“ je ekvivalentem ke slovu „prostorový“. Vzhledem k zachování konzistence celé podkapitoly týkající se binokulárního vidění je nahrazen tento výraz slovním spojením „mez binokulárního vidění“ – podobně u poloměru binokulárního vidění níže.

V případě meze binokulárního vidění o hodnotě $1'$, tj. přibližně $0,00029088$ rad, se jedná o hodnotu

$$d = \frac{64}{0,00029088} \text{ mm} \doteq 220022 \text{ mm} \doteq 220 \text{ m.}$$

Hloubky bodů¹², jejichž vzdálenost od pozorovatele je větší než poloměr binokulárního vidění, pozorovatel není schopen s jistotou rozlišit, jelikož rozdíl jejich konvergenčních úhlů je menší než mez binokulárního vidění. V případě cvičeného zraku s mezí binokulárního vidění blíží se $10''$ se poloměr binokulárního vidění blíží přibližně 1300 m, naopak při slabším zraku s mezí binokulárního vidění kolem $30''$ je poloměr binokulárního vidění přibližně 450 m. U většiny pozorovatelů lze předpokládat mez binokulárního vidění o hodnotě minimálně $1'$, proto nadále uvažujeme poloměr binokulárního vidění roven zaokrouhlené hodnotě 200 m.

3.3.6 Rozsah binokulárního vidění

Představme si, že pozorujeme libovolný objekt v prostoru. Jeho vzdálenost a velikost, pozorovací podmínky i vlastnosti lidského oka určitým způsobem ovlivňují míru prostorového dojmu vyvolaného při pozorování tohoto objektu. Objekt pozorovaný zblízka bude zcela jistě působit prostorověji než tentýž objekt v dálce, a podobně je to s velikostí pozorovaného objektu. Pokud se bude pozorovaný objekt od pozorovatele vzdalovat, od určité vzdálenosti bude působit jako rovinný objekt, jelikož oko pozorovatele již nebude schopno rozlišit hloubky jednotlivých bodů tohoto objektu. Obdobně nebude možné po překročení jisté vzdálenosti odlišit pozorovaný objekt od ostatních objektů v jeho pozadí.

Předpokládejme nyní, že pozorovatel s očima v bodech L, R se stereoskopickou bází $b = |LR|$ pozoruje objekt v prostoru. Nechť je dále bod A libovolným z bodů objektu, jež jsou nejbližší k pozorovateli. Dále uvažujme v prostoru svislou rovinu π rovnoběžnou se stereoskopickou bází b . Rovina π představuje rovinu bodů objektu, jež jsou nejdále od pozorovatele, případně rovinu pozadí objektu. V praxi tyto dva případy popisují pozorování samostatného objektu – např. sochy či automobilu; a objektu umístěného v určitém prostředí – např. domu v krajině apod.

Podle [10, s. 42 – 47] je výhodné analyticky vyjádřit vztah vzdálenosti bodu A a vzdálenosti roviny π od pozorovatele. Následně bude možné vyšetřit rozsah binokulárního vidění v závislosti na vzdálenosti bodu A a vzdálenosti roviny π od pozorovatele, tj. určit minimální vzdálenost bodu A od pozorovatele takovou, že hloubka bodu A a hloubka roviny π nebudou rozlišitelné a daný objekt již nebude působit prostorově.

Pro jednoduchost volme bod A v rovině, která je kolmá ke stereoskopické bází b a prochází středem promítání R (obr. 25 – podle [10, s. 43]). Sestrojíme sdružené průměty A_L, A_R bodu A ze středů L, R a jejich vzdálenost označme písmenem a . Dále označme písmeny x, y a z po řadě vzdálenost roviny π od stereoskopické báze b , vzdálenost bodu A od stereoskopické báze b a vzdálenost bodu A od roviny π .

¹² Hloubka bodu = vzdálenost bodu od svislé roviny obsahující středy promítání.

Z obr. 25 snadno nahlédneme, že $z = x - y$. Z podobnosti trojúhelníků AA_LA_R a ALR plyne rovnost

$$\frac{a}{x-y} = \frac{b}{y}, \text{ a tedy } \frac{a}{b} = \frac{x-y}{y} \text{ neboli } \frac{a}{b} = \frac{x}{y} - 1. \quad (1)$$

Se vzrůstající vzdáleností z bodu A od roviny π poroste také vzdálenost a sdružených průmětů A_L, A_R bodu A . Naopak s přibližováním bodu A k rovině π se vzdálenost a sdružených průmětů bodu A bude zmenšovat. V určité vzdálenosti již oči nebudou schopny rozlišit průměty A_L, A_R od skutečného bodu A či od jiných bodů mezi bodem A a rovinou π . Tato vzdálenost je mezi rozsahu binokulárního vidění a lze ji analyticky vyjádřit následujícím postupem.

V části 3.2.2 byla z praktických důvodů stanovena hodnota rozlišovací meze lidského oka na $1'$. Lidské oko je tedy schopno od sebe rozlišit dva různé body A, B , pokud je jejich úhlová vzdálenost větší než $1'$. Označíme-li písmenem d vzdálenost spojnice bodů A, B od oka a písmenem c velikost úsečky AB , lze podobně jako v části 3.3.5 využít vzorce pro obvod kruhové výseče $c = d \cdot \theta$, kde velikost úhlu θ je vyjádřena v obloukové míře (obr. 26). Hodnota $1' = 1/60^\circ$ odpovídá velikosti úhlu v obloukové míře o hodnotě přibližně 0,00029088 rad, tedy pro obě veličiny platí

$$d \doteq \frac{c}{0,00029088} \doteq 3438 \cdot c, \quad (2)$$

$$\text{tedy } c : d = 1 : 3438. \quad (3)$$

V případě, že je bod A dostatečně daleko od pozorovatele, lze trojúhelník RA_RA_L nahradit kruhovou výsečí RA_RA_L , podobně jako na obr. 26, a je tudíž

$$a : x = c : d = 1 : 3438. \quad (4)$$

Vyjádřením veličiny a ze vztahu (4) je $a = \frac{x}{3438}$, dosazením této rovnosti do rovnice (1) získáme rovnost

$$\frac{x}{3438 \cdot b} = \frac{x}{y} - 1. \quad (5)$$

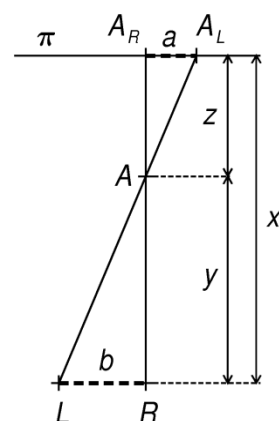
Po vyjádření veličiny y z rovnice (5) je

$$y = \frac{x}{\frac{x}{3438 \cdot b} + 1}. \quad (6)$$

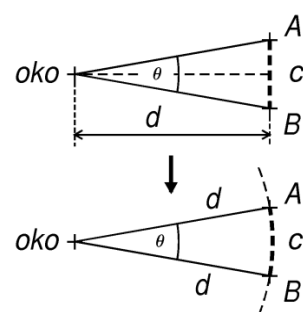
Dosazením hodnoty stereoskopické báze $b = 64 \text{ mm} = 0,064 \text{ m}$ do rovnosti (6) získáme vztah

$$y = \frac{x}{0,0045448 \cdot x + 1}, \quad (7)$$

kde veličina y odpovídá vzdálenosti bodu A od pozorovatele v metrech.

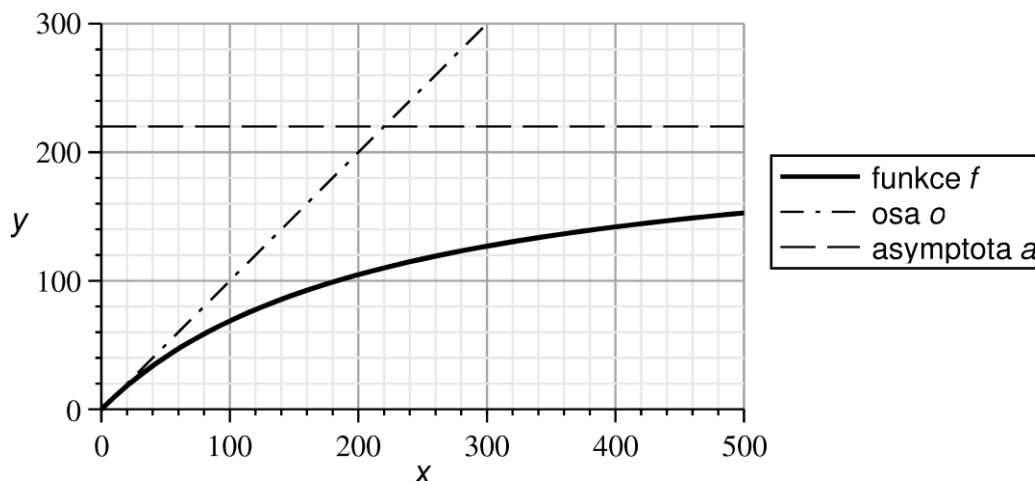


Obr. 25 Pohled shora.



Obr. 26 Vztah vzdáleností a rozlišovací meze lidského oka.

Vztah (7) vyjadřuje funkční závislost vzdálenosti y bodu A pozorovaného objektu od pozorovatele na vzdálenosti x roviny π , jež reprezentuje rovinu pozadí objektu, průmětnu či rovinu nejvzdálenějších bodů pozorovaného objektu. Přitom veličina y vyjadřuje největší možnou vzdálenost bodu A od pozorovatele takovou, že pozorovatel je ještě schopen rozlišit hloubku bodu A od hloubek bodů roviny π či jiných bodů mezi bodem A a rovinou π . Na obr. 27 je znázorněn graf funkce f dané funkčním předpisem (7), u jejíhož definičního oboru se omezíme na množinu všech nezáporných reálných čísel, jelikož proměnná x jako vzdálenost roviny je vždy nezáporná.



Obr. 27 Graf funkce f , jeho asymptota a osa kvadrantu.

Pro přehledné porovnávání hodnot proměnných x a y je graf funkce f doplněn o osu o prvního kvadrantu dané funkcí $g : y = x$. Můžeme tak snadno porovnat, jak velká část ze zobrazovaného prostoru na danou vzdálenost poskytne prostorový vjem a naopak, v jak velké části nebude pozorovatel schopen rozeznat hloubky jednotlivých objektů.

Například při pozorování automobilu, v jehož pozadí ve vzdálenosti přibližně 100 m se nachází skupina budov, bude automobil poskytovat prostorový dojem až do vzdálenosti zhruba 70 m od pozorovatele. Bude-li se automobil nacházet ve vzdálenosti větší než uvedených 70 m, nebude pozorovatel schopen rozeznat jeho hloubku od hloubek libovolných objektů za ním včetně hloubek budov v jeho pozadí. Při skutečném binokulárním pozorování není uvedená vlastnost binokulárního vidění vědomě užívána, avšak ve stereoskopické praxi ji lze spolu s grafem na obr. 27 využít při odhadu prostorovosti zobrazované scény.

Graf asymptoty a funkce f zobrazený na obr. 27 dále napovídá, že s rostoucí vzdáleností x roviny π od pozorovatele se maximální možná vzdálenost y bodu A od pozorovatele taková, že hloubka bodu A je rozlišitelná od hloubek bodů v jeho pozadí, blíží hodnotě $\lim_{x \rightarrow \infty} y = 1/0,0045448 \text{ m} \doteq 212 \text{ m}$. Jedná se o mezní hodnotu vzdálenosti, za níž již žádný objekt nebude působit prostorově – hloubky bodů objektu již nebude možné spolehlivě rozlišit od hloubek ostatních bodů prostoru i samotného objektu. Jedná se opět o poloměr binokulárního vidění, jehož zaokrouhlená hodnota 200 m byla jiným způsobem odvozena v části 3.3.5.

Při stereoskopickém zobrazování objektů se zvolenou bází $b = 64$ mm je tedy nutné, aby zobrazovaný objekt vždy ležel nejvýše ve vzdálenosti 200 m od pozorovatele, ovšem s přihlédnutím k jeho velikosti – nemá cenu stereoskopicky zobrazovat malý objekt, který na velkou vzdálenost téměř není vidět.

Uvažujme nyní, že známe velikost objektu ve směru k pozorovateli, tj. jeho hloubku, a chceme zjistit, do jaké největší vzdálenosti od pozorovatele může být tento objekt umístěn tak, aby ještě vyvolával prostorový dojem. Rovina π zde zastupuje rovinu bodů objektu, které leží nejdále od pozorovatele. Velikost objektu je totožná s proměnnou z zobrazenou na obr. 25. Vzdálenost objektu považujeme za vzdálenost jeho nejbližšího bodu od pozorovatele, tudíž se jedná o výše uvedenou proměnnou y .

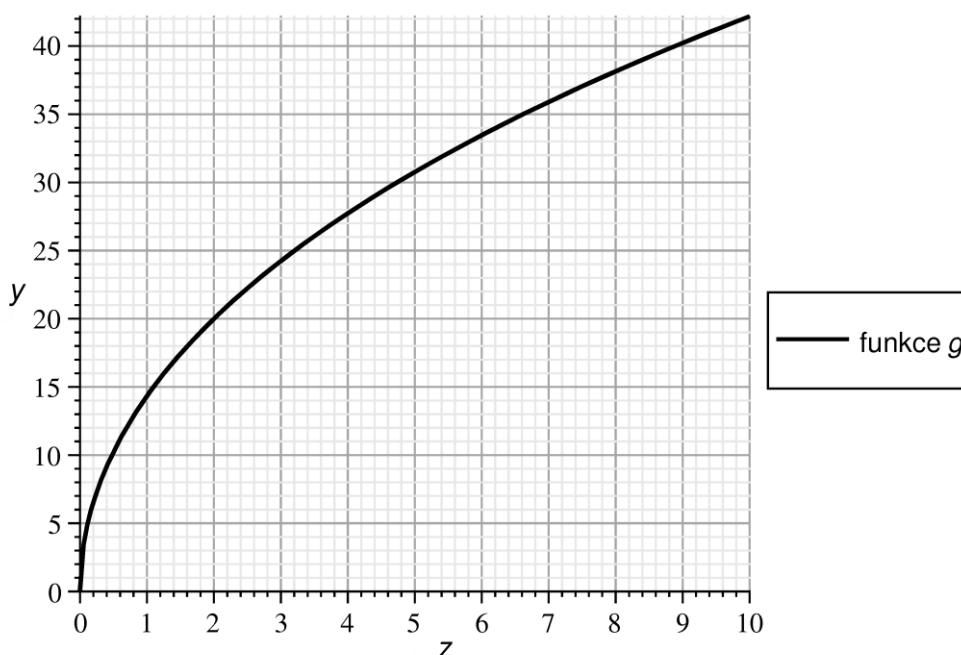
Jelikož je $z = x - y$, lze z rovnice (5) substitucí $x = z + y$ získat kvadratickou rovnici

$$y^2 + zy - 3438bz = 0, \quad (8)$$

jejímž řešením v množině nezáporných reálných čísel po dosazení hodnoty $b = 64$ mm = 0,064 m je

$$y = \frac{-z + \sqrt{z^2 + 880,128z}}{2}. \quad (9)$$

Graf funkce g (obr. 28) dané předpisem (9) znázorňuje závislost maximální vzdálenosti y pozorovaného objektu, při níž ještě vyvolává prostorový dojem, na jeho hloubce z . Pro snazší vyhledávání hodnot nejsou jednotky na osách z a y stejné.



Obr. 28 Graf funkce g .

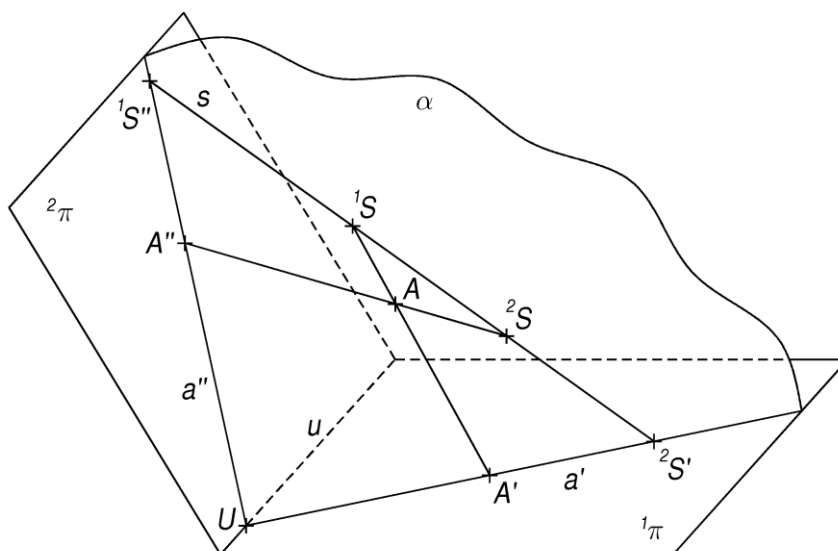
Představme si například, že pozorujeme kruhový válec s průměrem podstavy 10 cm. Je tedy $z = 10$ cm = 0,1 m a po dosazení do rovnice (8) je $y \doteq 4,64$ m. Při vzdálenosti válce od pozorovatele o hodnotě větší než získaných 4,64 m nebude pozorovatel schopen s jistotou rozlišit hloubky jednotlivých bodů válce. Výsledkem pak bude deformace, popřípadě zánik získaného prostorového vjemu.

4 Stereoskopické promítání

Následující text se v jednotlivých podkapitolách zabývá geometrickými základy stereoskopického promítání, jeho charakteristickými prvky a základními geometrickými principy tohoto typu promítání.

4.1 Odvození stereoskopického promítání

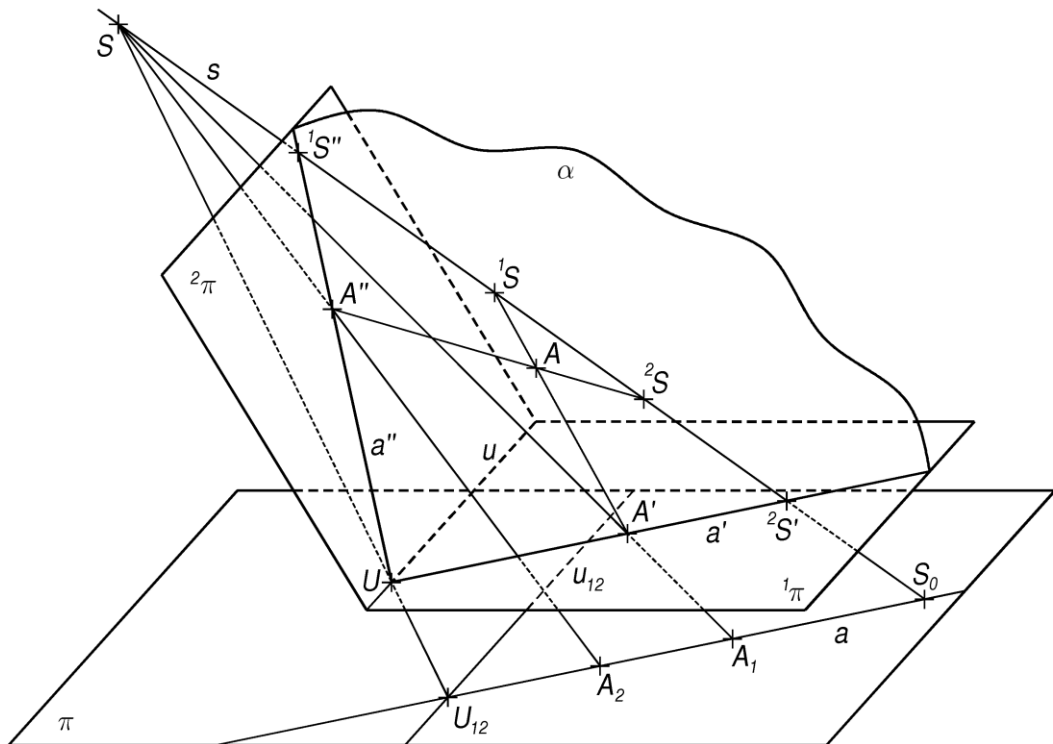
Každou ze známých zobrazovacích metod, kromě kótovaného promítání, lze získat pomocí dvou různých středových promítání do dvou různých rovin, přičemž středy promítání mohou být vlastní či nevlastní body. Výsledkem jsou dva obrazy ve dvou obecně různých rovinách, proto je vhodné převést obrazy do jediné roviny, a to pomocí dalšího středového promítání. Takové zobrazení se nazývá dvojobrazové, jeho speciálním případem je dvojestředové promítání a z něj odvozené promítání stereoskopické. Uvažujme nyní v rozšířeném euklidovském prostoru¹³ dvojí středové promítání (obr. 29 – podle [32, s. 350]), podobně jako v [32, s. 350 – 353]. Jedno určené středem 1S a průmětnou ${}^1\pi$, druhé středem 2S a průmětnou ${}^2\pi$, přičemž ${}^1S \neq {}^2S$. Přímka středů $s = {}^1S{}^2S$ protíná průmětny ${}^1\pi$, ${}^2\pi$ v tzv. uzlových bodech ${}^2S'$, ${}^1S''$, průmětech bodů 2S , 1S ze středů 1S , 2S do rovin ${}^1\pi$, ${}^2\pi$. Promítaný bod A spolu se středy 1S , 2S určují jednu dvojnásob promítací rovinu α , jež protíná průmětny ${}^1\pi$, ${}^2\pi$ ve sdružených přímkách a' , a'' . Tyto přímky se nazývají uzlové, procházejí uzlovými body ${}^2S'$, ${}^1S''$ a leží na nich příslušné středové průměty A' , A'' bodu A do průměten ${}^1\pi$, ${}^2\pi$. V obecném případě, kdy jsou průmětny ${}^1\pi$, ${}^2\pi$ vzájemně různé, se uzlové přímky protínají v bodě U na průsečnici u průměten ${}^1\pi$, ${}^2\pi$. Splývají-li průmětny ${}^1\pi$, ${}^2\pi$, splývají v jeden bod také uzlové body ${}^2S'$, ${}^1S''$, a tímto bodem procházejí splývající uzlové přímky a' , a'' .



Obr. 29 Dvě středová promítání, která jsou základem dvojobrazového zobrazení.

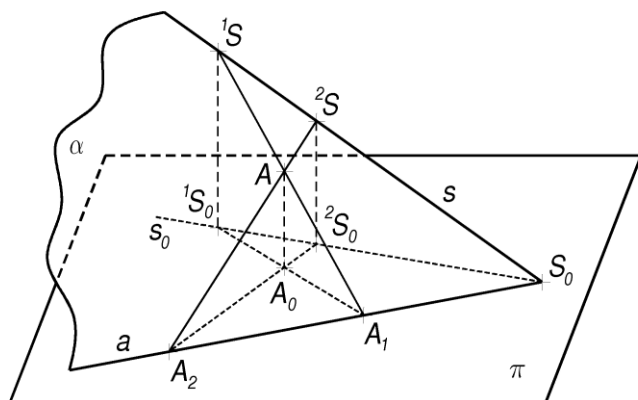
¹³ Rozšířený euklidovský prostor = euklidovský prostor s nevlastními prvky.

Při obecné poloze průměten ${}^1\pi, {}^2\pi$ se jedná o zobrazení bodů prostoru do uspořádaných dvojic bodů ležících opět v prostoru. K převedení obrazů do jediné roviny je třeba promítnout body rovin ${}^1\pi, {}^2\pi$ z dalšího středu promítání S do nové průmětny π (obr. 30 – podle [32, s. 352]). Střed S je třeba volit tak, aby se ani jedna z rovin ${}^1\pi, {}^2\pi$ nezobrazila do přímky, střed S tedy nesmí ležet v žádné z rovin ${}^1\pi, {}^2\pi$. Pro zjednodušení se stačí omezit na případ, kdy $S \in s$ a platí $S \neq {}^1S \neq {}^2S$. Přímka středů s protíná průmětnu π v bodě $S_0 = s \cap \pi$, tzv. hlavním bodě, jímž prochází průmět a uzlových přímek a', a'' . Takové zobrazení nazýváme dvojobrazové a je vzájemně jednoznačným zobrazením bodů prostoru mimo přímku středů do uspořádaných dvojic bodů průmětny různých od bodu S_0 , které leží na přímkách procházejících bodem S_0 .



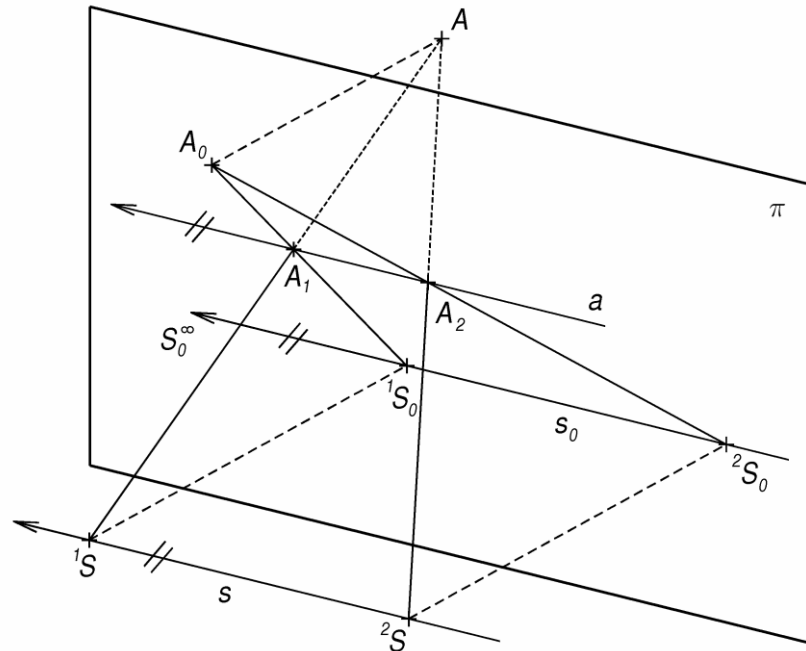
Obr. 30 Dvojobrazové zobrazení prostoru do roviny.

V případě dvou různých středů ${}^1S, {}^2S$ a průměten ${}^1\pi, {}^2\pi$ splývajících v jednu průmětnu π se jedná o tzv. dvojstředové promítání na jednu průmětnu, které je vzájemně jednoznačným zobrazením prostoru do jediné roviny (obr. 31).



Obr. 31 Dvojstředové promítání.

Při volbě přímky středů $s = {}^1S^2S$ v poloze rovnoběžné s průmětnou π tak, že vzdálenost bodů ${}^1S, {}^2S$ je rovna vzdálenosti očních os pozorovatele, získáme speciální případ dvojstředového promítání – promítání stereoskopické (obr. 32 – podle [32, s. 253]).



Obr. 32 Stereoskopické promítání.

4.2 Základní parametry stereoskopického promítání

Při stereoskopickém promítání je třeba přizpůsobit parametry promítání podmínkám lidského vidění. Přímka středů, tj. stereoskopická báze (případně jen „báze“), je volena výhradně v horizontální poloze. Velikost stereoskopické báze by měla odpovídat vzdálenosti očních os pozorovatele, avšak v praxi je až na výjimky volena báze o průměrné hodnotě 64 mm. Jak již bylo naznačeno v části 3.3.1, pojem „stereoskopická báze“ označuje jak veličinu – délku úsečky ohraničené středy promítání, tak geometrický útvar – spojnici těchto bodů.

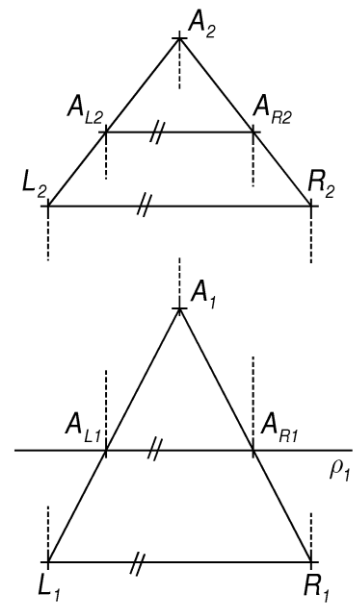
Druhým charakteristickým prvkem stereoskopického promítání je rovina, do níž stereoskopicky promítáme, tedy stereoskopická průmětna (případně jen „průmětna“). Tato rovina, která bude nadále značena písmenem ρ , je rovnoběžná se stereoskopickou bází a až na výjimky vždy svislá¹⁴. Vzdálenost průmětny a báze lze volit libovolně, avšak některé polohy mohou být výhodné pro snazší tvorbu a pohodlnější pozorování výsledných stereoskopických obrazů. V praxi je průmětnou většinou nákrasna či kinofilm, popř. digitální snímač fotoaparátu – podle toho, zda stereoskopické obrazy rýsujeme nebo fotografujeme.

¹⁴ Vodorovně volená průmětna se užívá při konstrukci tzv. phantogramů, viz např. [33].

4.3 Sdružené průměty a vliv změny jejich vzdálenosti na výsledný obraz

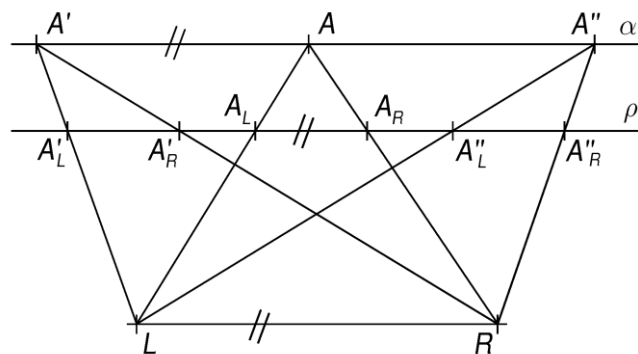
Uvažujme v prostoru dva pevně zvolené body L, R reprezentující středy promítání, tj. pozici levého a pravého oka pozorovatele, dále průmětnu ρ rovnoběžnou se stereoskopickou bází LR a bod A , jenž neleží na přímce středů LR . Středové průměty bodu A ze středů L, R do roviny ρ označme po řadě A_L, A_R (obr. 33 – podle [34, s. 270]) a nazývejme je sdruženými průměty, popř. stereoskopickou dvojicí.

Úsečka $A_L A_R$ je rovnoběžná s přímkou LR , jelikož $A_L A_R$ je průsečnicí roviny ρ s rovinou vedenou přímkou LR taktéž rovnoběžnou s ρ . Tato vlastnost platí pro libovolný bod A prostoru, tedy spojnice sdružených průmětů všech bodů prostoru jsou vzájemně rovnoběžné a současně rovnoběžné s bází LR . Jelikož ve stereoskopickém promítání volíme bází v horizontální poloze, jsou spojnice průmětů bodů prostoru také vždy horizontální.



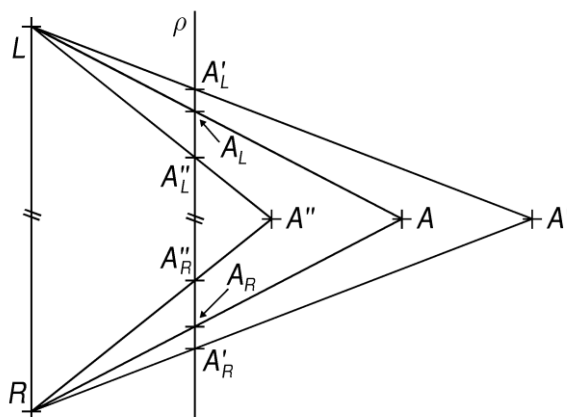
Obr. 33 Nárys a půdorys sdružených průmětů.

Na obrázku níže (obr. 34 – podle [34, s. 270]) je znázorněna rovina α rovnoběžná s průmětnou ρ procházející bodem A . Každý bod A' roviny α má stejnou vzdálenost sdružených průmětů A'_L, A'_R jako bod A , a naopak všechny body se stejnou vzdáleností sdružených průmětů leží v jedné rovině rovnoběžné s průmětnou ρ . Speciálně body, jejichž sdružené průměty splynou, leží přímo v průmětně ρ .



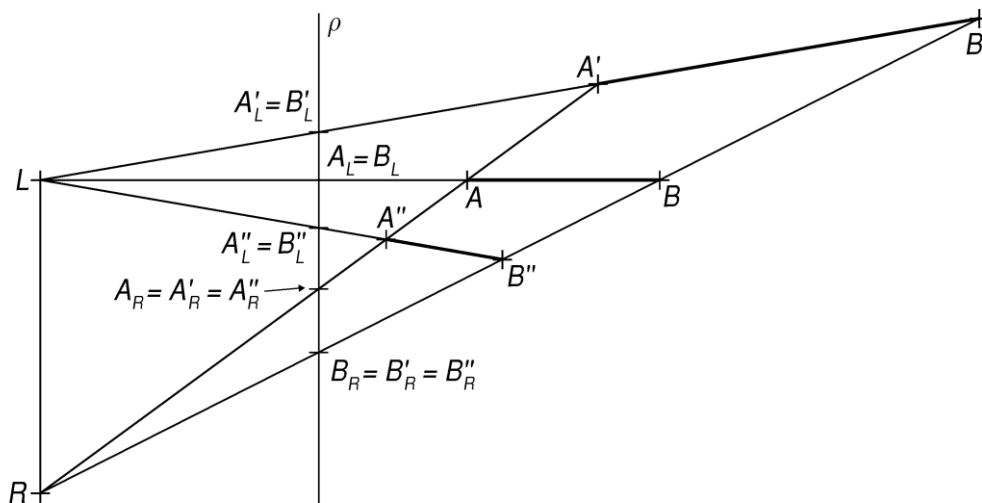
Obr. 34 Sdružené průměty bodů roviny α rovnoběžné s rovinou ρ .

Bude-li se bod A pohybovat směrem od pozorovatele, poroste vzdálenost jeho sdružených průmětů, a naopak při pohybu opačným směrem se bude tato vzdálenost zmenšovat. Hloubka bodu A ve stereoskopickém obrazu je závislá na vzdálenosti jeho sdružených průmětů A_L, A_R – čím větší je jejich vzdálenost, tím hlouběji se bod A zobrazí (obr. 35 – podle [34, s. 270]).



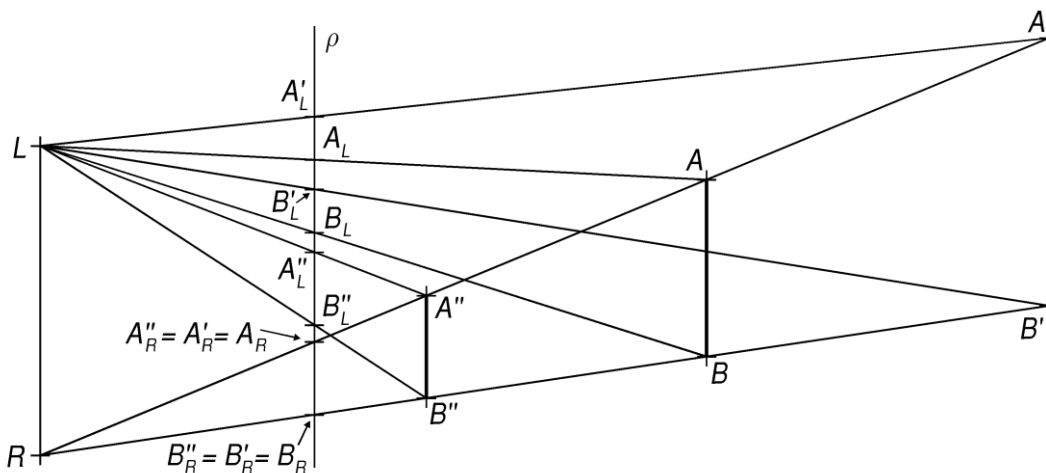
Obr. 35 Závislost vzdálenosti sdružených průmětů bodu na jeho hloubce.

Nyní uvažujme v prostoru se zvolenou stereoskopickou bází LR a průmětnou ρ úsečku AB , která je kolmá k průmětně ρ a pro jednoduchost v prodloužení prochází bodem L . Sestrojíme dále sdružené průměty A_L, A_R, B_L, B_R jejích krajních bodů A, B . Změníme-li vzdálenost sdružených průmětů úsečky AB posunutím bodů A_L, B_L do bodů A'_L, B'_L při zachované poloze bodů A_R, B_R , změní se směr, délka i poloha této úsečky (obr. 36 – podle [34, s. 271]).



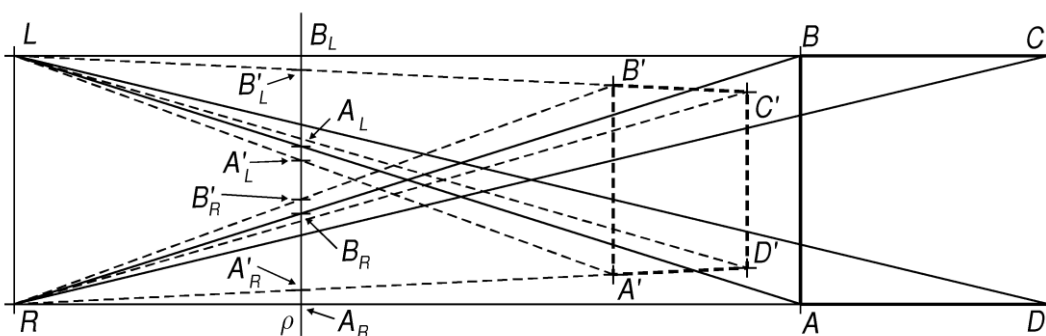
Obr. 36 Změna tvaru, velikosti a směru úsečky v závislosti na změně vzdálenosti sdružených průmětů jejích krajních bodů.

Analogické změny nastanou, nahradíme-li úsečku AB kolmou k průmětně ρ úsečkou v obecné poloze vzhledem k této rovině. Výjimkou je úsečka rovnoběžná s průmětnou ρ (obr. 37). Změníme-li vzdálenost sdružených průmětů takové úsečky AB zachováním polohy bodů A_R, B_R a posunutím bodů A_L, B_L tak, že $|A_L A'_L| = |B_L B'_L|$, změní se délka i poloha úsečky, její směr však zůstane zachován.



Obr. 37 Změna obrazu úsečky rovnoběžné s rovinou ρ .

Nyní uvažujme čtverec $ABCD$ umístěný v prostoru se zvolenou stereoskopickou bází LR a průmětnou ρ (obr. 38 – podle [34, s. 272]), pro názornost v rovině kolmé k rovině ρ s hranou AB s touto rovinou rovnoběžnou. Sestrojíme-li sdružené průměty $A_L, \dots, D_L, A_R, \dots, D_R$ jeho vrcholů A, \dots, D , bude změna vzdálenosti sdružených průmětů zobrazovaného čtverce ovlivňovat jeho tvar, velikost a polohu podle výše uvedených pravidel. Změny zobrazené na obr. 38 je dosaženo posunutím pravých a levých sdružených průmětů jeho vrcholů směrem k sobě o vzdálenost $|A'_R A_R| = \dots = |D'_R D_R| = |A'_L A_L| = \dots = |D'_L D_L|$ ¹⁵. Zmenšením vzdálenosti sdružených průmětů objektu se výsledný stereoskopický obraz zmenší, zobrazí se blíže a bude mít menší hloubku než původní objekt. Podobně je tomu při zvětšení této vzdálenosti – obraz objektu se zobrazí větší, vzdálenější a hlubší. Vzdálenost sdružených průmětů objektu má vliv na velikost, tvar a polohu obrazu objektu.



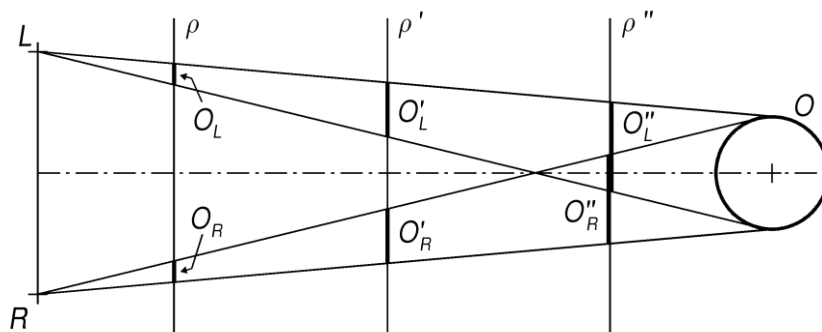
Obr. 38 Změna tvaru, velikosti a polohy čtverce při změně vzdálenosti jeho sdružených průmětů.

¹⁵ Tak, aby zůstala zachována rovnoběžnost obrazů $A'B', C'D'$ úseček AB, CD rovnoběžných s rovinou ρ

Podobně ovlivňují výsledný stereoskopický obraz objektu proporční změny velikosti jeho sdružených průmětů – zvětšená stereoskopická dvojice vyvolá dojem většího předmětu s větší hloubkou než ta původní či dokonce zmenšená. Avšak ve stereoskopické praxi mohou být takové změny spíše na překážku, jelikož hlavním smyslem stereoskopického promítání je většinou napodobit skutečné lidské vidění. Jakákoliv změna proporcí stereoskopického obrazu vůči původnímu objektu je pak nežádoucí. Pokud je z nějakého důvodu možné tyto deformace stereoskopického obrazu akceptovat, lze uvedené vlastnosti stereoskopického promítání nejen zanedbat, ale dokonce i využít – více v části 5.1 další kapitoly.

4.4 Změna parametrů stereoskopického promítání a její vliv na výsledný obraz

Uvažujme objekt O v prostoru a dva pevné body L, R reprezentující středy promítání, podobně jako v [34, s. 271]. Pro jednoduchost a názornost zvolme za pozorovaný objekt O kouli se středem na ose úsečky LR . Dále vložme mezi objekt O a úsečku L, R svislou průmětnu ρ rovnoběžnou s LR a pohybujme s ní mezi těmito útvary tak, aby zůstala svislá, s bází LR rovnoběžná. Tvar sdružených průmětů O_L, O_R objektu O na průmětně ρ zůstane zachován v každé z poloh průmětny – změní se pouze jejich velikost a vzdálenost (obr. 39).



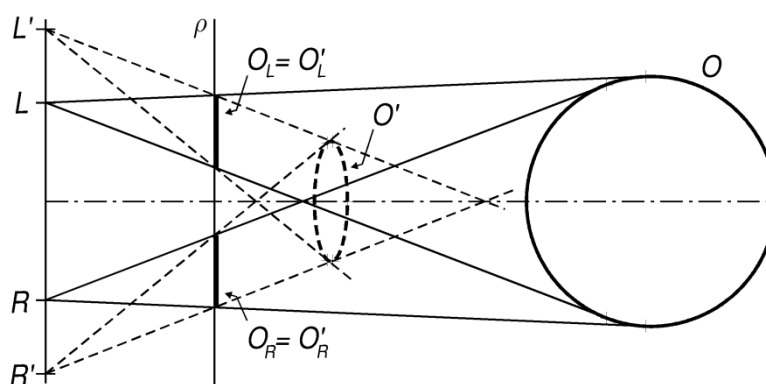
Obr. 39 Změna velikosti a vzdálenosti sdružených průmětů objektu O v závislosti na umístění průmětny ρ .

Nahradíme-li v tomto případě středy promítání očima pozorovatele, vnímaný obraz v jakékoliv poloze průmětny splývá s obrazem vnímaným při pozorování skutečného objektu. Stereoskopický obraz objektu může být tedy vyvolán stereoskopickou dvojicí libovolné velikosti za předpokladu dodržení odpovídající vzdálenosti pozorovatele od průmětny, stereoskopické báze a velikosti a vzdálenosti sdružených průmětů objektu. Pokud některé z těchto parametrů nebudou dodrženy, bude výsledný obraz v porovnání s obrazem vnímaným při skutečném pozorování zdeformovaný. V závislosti na aktuální změně parametrů může výsledný obraz působit menší, bližší a méně hluboký nebo naopak větší, vzdálenější a hlubší, než by působil při původních hodnotách. Uvažujme tedy, jak se změní výsledný obraz objektu O , změní-li se některý s uvedených parametrů stereoskopického promítání – stereoskopická báze, vzdálenost pozorovatele od průmětny, vzdálenost sdružených průmětů objektu či jejich velikost.

4.4.1 Změna stereoskopické báze

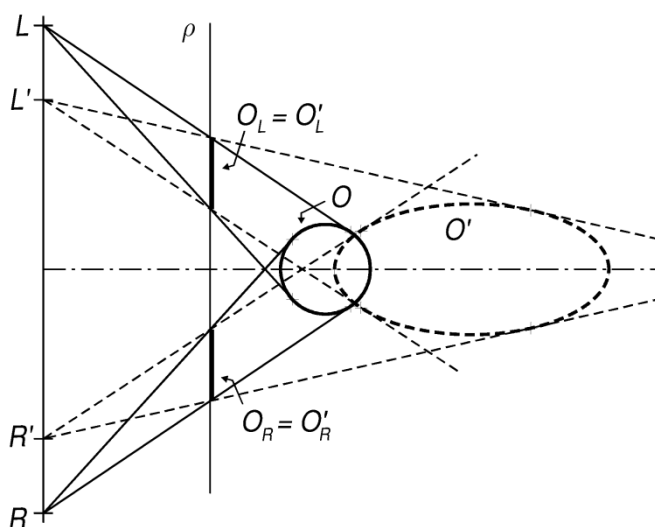
Předpokládejme, že stereoskopicky promítáme určitý objekt O z bodů L, R do roviny ρ se stereoskopickou bází $b = |LR|$ podobně jako na obr. 40. Získané sdružené průměty objektu O označme symboly O_L, O_R . Tuto dvojici obrazů pozorujeme s očima se stereoskopickou bází b' o průměrné hodnotě 64 mm. Necht' jsou středy optických soustav očí umístěny v bodech L', R' ležících na přímce LR tak, že $S_{LR} = S_{L'R'}$ a $|L'R'| = b'$. Uvažujme nyní, jak změna velikosti stereoskopické báze b ovlivní výsledný vnímaný obraz O' objektu O , jenž vznikne pozorováním získaných sdružených průmětů O_L, O_R ze středů L', R' s pevně stanovenou bází b' .

Zvolíme-li bázi b pro vytvoření sdružených průmětů O_L, O_R objektu O menší než bází b' , s níž budou tyto sdružené průměty pozorovány, bude výsledný vnímaný obraz O' objektu O menší, bližší a méně prostorový než skutečný objekt O (obr. 40).



Obr. 40 Výsledný obraz O' objektu O pro stereoskopickou bází $b < b'$.

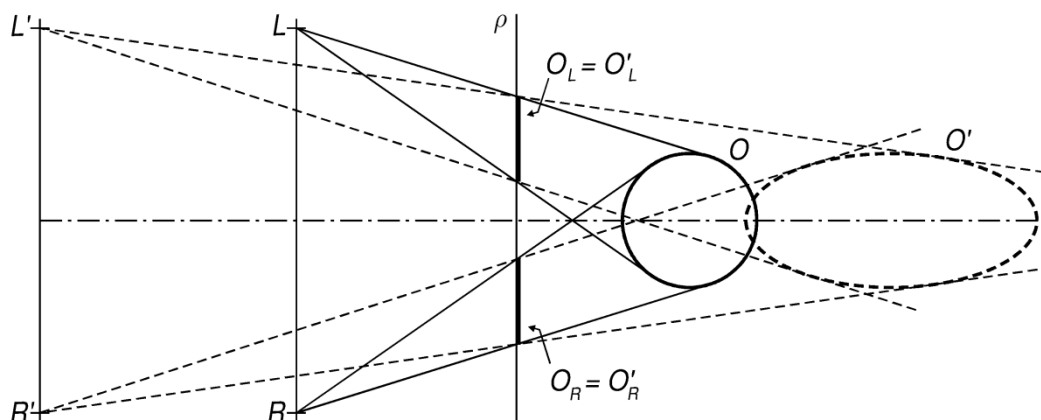
Vytvoříme-li naopak sdružené průměty s bází $b = LR$ větší než je báze $b' = L'R'$, s níž tyto průměty pozorujeme, bude výsledný vnímaný obraz O' objektu O větší, vzdálenější a s větší hloubkou než skutečný objekt O (obr. 41).



Obr. 41 Výsledný obraz O' objektu O pro stereoskopickou bází $b > b'$.

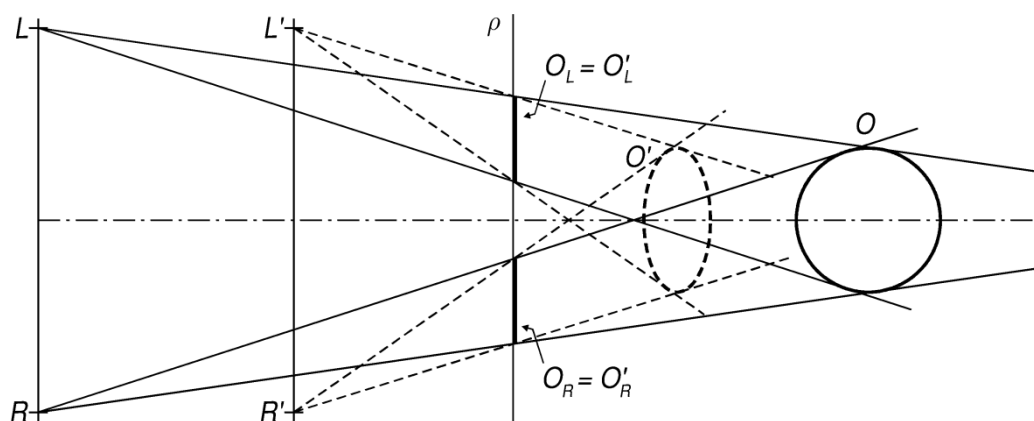
4.4.2 Změna vzdálenosti pozorovatele od průmětny

Podobné změny nastanou, dojde-li ke změně vzdálenosti pozorovatele od průmětny ρ zatímco ostatní parametry stereoskopického promítání zůstanou zachovány. Pozorujeme-li sdružené průměty O_L, O_R objektu O ze vzdálenosti větší, než z jaké byly tyto průměty vytvořeny, bude výsledný vnímaný obraz O' objektu O větší, vzdálenější a více prostorový (obr. 42).



Obr. 42 Vliv zvětšení vzdálenosti pozorovatele od průmětny ρ na výsledný obraz O' objektu O .

A naopak, pozorujeme-li dvojici sdružených průmětů O_L, O_R objektu O ze vzdálenosti menší, než z jaké byly tyto průměty vytvořeny, výsledný vnímaný obraz O' objektu O bude menší, bližší a méně prostorový (obr. 43).

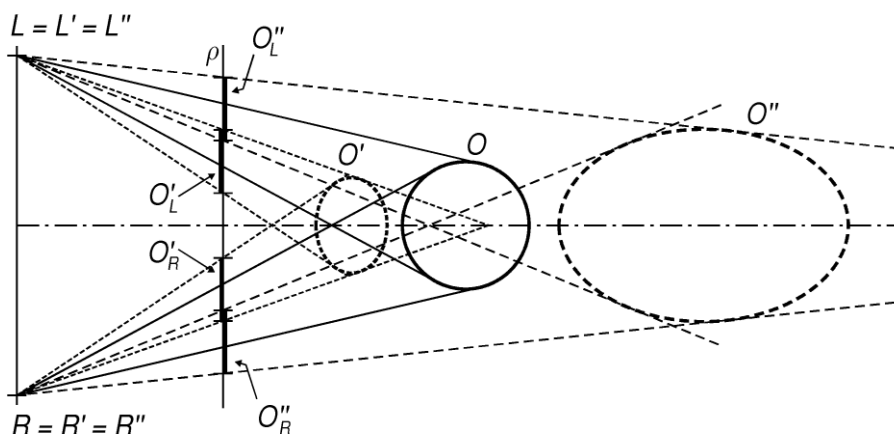


Obr. 43 Vliv zmenšení vzdálenosti pozorovatele od průmětny ρ na výsledný obraz O' objektu O .

4.4.3 Změna vzdálenosti sdružených průmětů objektu

Vytvořme nyní sdružené průměty O_L, O_R objektu O jeho promítnutím z daných bodů L, R do zvolené roviny ρ . Uvažujme, jak se změní vnímaný obraz O' , resp. O'' objektu O , posuneme-li jeho sdružené průměty O_L, O_R v rovině ρ blíže k sobě či dále

od sebe. Jak je vidět na obr. 44, dojde u vnímaného obrazu O' objektu O k podobným změnám jako v předchozích případech 4.4.1 a 4.4.2.

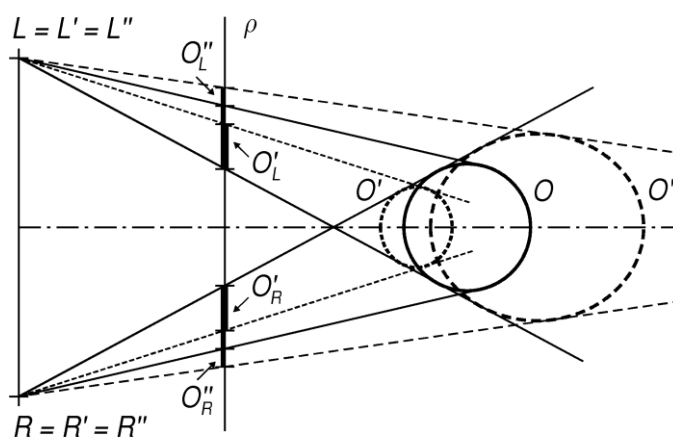


Obr. 44 Vliv zmenšení a zvětšení vzdálenosti sdružených průmětů O_L, O_R objektu O na výsledný obraz O' .

4.4.4 Změna velikosti sdružených průmětů objektu

Změnou velikosti sdružených průmětů objektu je v tomto případě míněno jejich zmenšení nebo zvětšení v určitém poměru vůči jejich původní velikosti. Jelikož se tato část kapitoly zabývá změnou vnímaného obrazu O' objektu O pouze v závislosti na změně velikosti a nikoliv vzdálenosti jeho sdružených průmětů O_L, O_R , je nutné, aby vzdálenost sdružených průmětů objektu zůstala zachována (obr. 45).

Jak je vidět na následujícím obrázku, dochází i v tomto případě k podobným změnám jako u výše zmíněných případů. Při zmenšení velikosti sdružených průmětů O_L, O_R objektu O je vnímaný obraz O' objektu menší, bližší a méně prostorový než při jejich původní velikosti. Zvětšení velikosti sdružených průmětů objektu vyvolá změny v opačném smyslu.



Obr. 45 Vliv zmenšení a zvětšení velikosti sdružených průmětů O_L, O_R objektu O na výsledný obraz O' .

5 Tvorba stereoskopické dvojice obrazů

Základním principem tvorby stereoskopického obrazu je vytvořit dvojici obrazů, z nichž jeden odpovídá pohledu levým a druhý pravým okem. Při pozorování takové dvojice obrazů některou z metod uvedených v kapitole 6 se tyto dva obrazy spojí v jeden, jenž působí prostorově.

Stereoskopickou dvojici obrazů můžeme získat dvěma způsoby – buď obrazy narýsujeme s využitím metod deskriptivní geometrie, nebo vytvoříme dva snímky pomocí fotoaparátu. Oba tyto způsoby se liší v postupu, jak dosáhnout požadovaných výsledků, proto je následující text rozdělen na dvě části – rýsování stereoskopické dvojice obrazů a tvorbu stereoskopické dvojice fotografií.

5.1 Rýsování stereoskopické dvojice obrazů

Při rýsování stereoskopické dvojice obrazů je možné postupovat různě – obrazy lze rýsovat v Mongeově promítání, ale k tvorbě sdružených průmětů je možné využít také lineární perspektivu, případně kombinaci obou předchozích promítání, tzv. průsečnou metodu. Stereoskopické dvojice lze rýsovat buď přímo na papír, nebo pomocí vhodného softwaru na počítači.

Rýsujeme-li stereoskopickou dvojici obrazů objektu ručně, je nutné použít papír dostatečných rozměrů. Vzhledem k hodnotě konvenční zrakové vzdálenosti 25 cm, jež je spodní mezí pro vzdálenost pozorovatele od objektu či průmětny, je běžně dostupný formát A4 pro zobrazení půdorysu a nárysu objektu, případně objektu samotného, ve skutečné velikosti spolu se středy a průmětnou stereoskopického promítání většinou nedostačující. V případě rýsování na tento formát je proto nutné veškeré údaje o velikostech a vzdálenostech v určitém měřítku zmenšit.

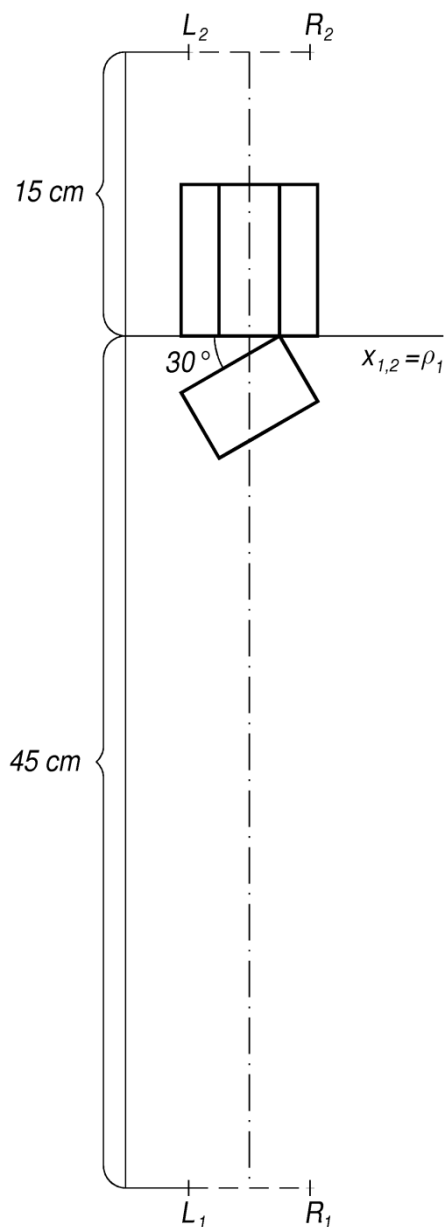
Jak vyplývá z vlastností stereoskopického promítání uvedených v podkapitole 4.4, taková změna parametrů stereoskopického promítání způsobí deformaci výsledného obrazu. Objekt se při pozorování získané stereoskopické dvojice průmětů s původní hodnotou stereoskopické báze a z původní vzdálenosti pozorovatele od průmětny zobrazí menší, méně hluboký a blíže k pozorovateli, tudíž neodpovídá skutečnému binokulárnímu vidění.

V případech, kdy je takové zkreslení nežádoucí¹⁶, je možné deformaci obrazu napravit zvětšením získané stereoskopické dvojice v měřítku o hodnotě převrácené k hodnotě původního měřítko. Konstrukce potřebné ke zvětšení obrazů stereoskopické dvojice jsou ale velmi náročné na přesnost, proto nelze tento postup tvorby stereoskopických dvojic obrazů jednoznačně doporučit. Rýsováním průmětů rovnou ve skutečné velikosti je možné se těmito konstrukcím vyhnout a minimalizovat tak nepřesnosti způsobené změnou velikosti průmětů. Avšak tento postup je omezen výše zmiňovanými rozměry papíru a rozsahem rýsovacích pomůcek. Proto doporučuji rýsovat stereoskopické dvojice v některém

¹⁶ Pokud bychom zobrazovali například krychli, vyvolávala by zmenšená stereoskopická dvojice jejich obrazů spíše dojem kvádrů.

z dostupných počítačových programů v reálných jednotkách a velikost výsledné stereoskopické dvojice poté pro tisk upravit podle aktuálních potřeb.

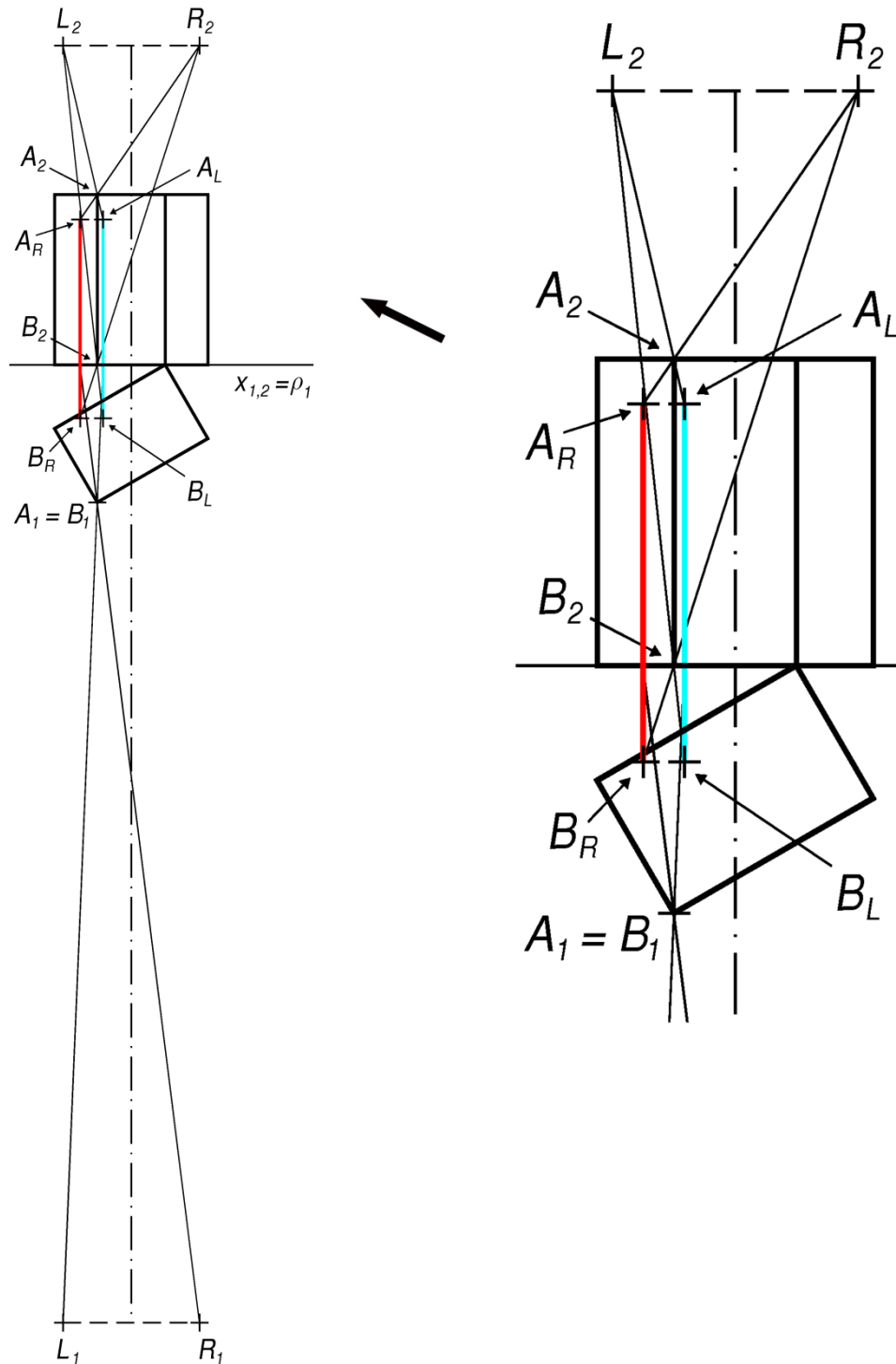
V následujícím příkladě je uveden možný postup, jak vytvořit stereoskopickou dvojici obrazů drátěného¹⁷ modelu tělesa pomocí Mongeova promítání. Jedná se o hranol o rozměrech stran 4 cm, 6 cm a 8 cm, stereoskopická báze $b = 6,4$ cm je umístěna ve výšce $v = 15$ cm nad rovinou podstavy hranolu a ve vzdálenosti $d = 45$ cm od svislé stereoskopické průmětny ρ . Průmětna ρ prochází zadní pobočnou hranou tělesa a svírá úhel 30° s jednou jeho boční stranou tak, jak je znázorněno v zadání příkladu (obr. 46).



Obr. 46 Zadání příkladu.

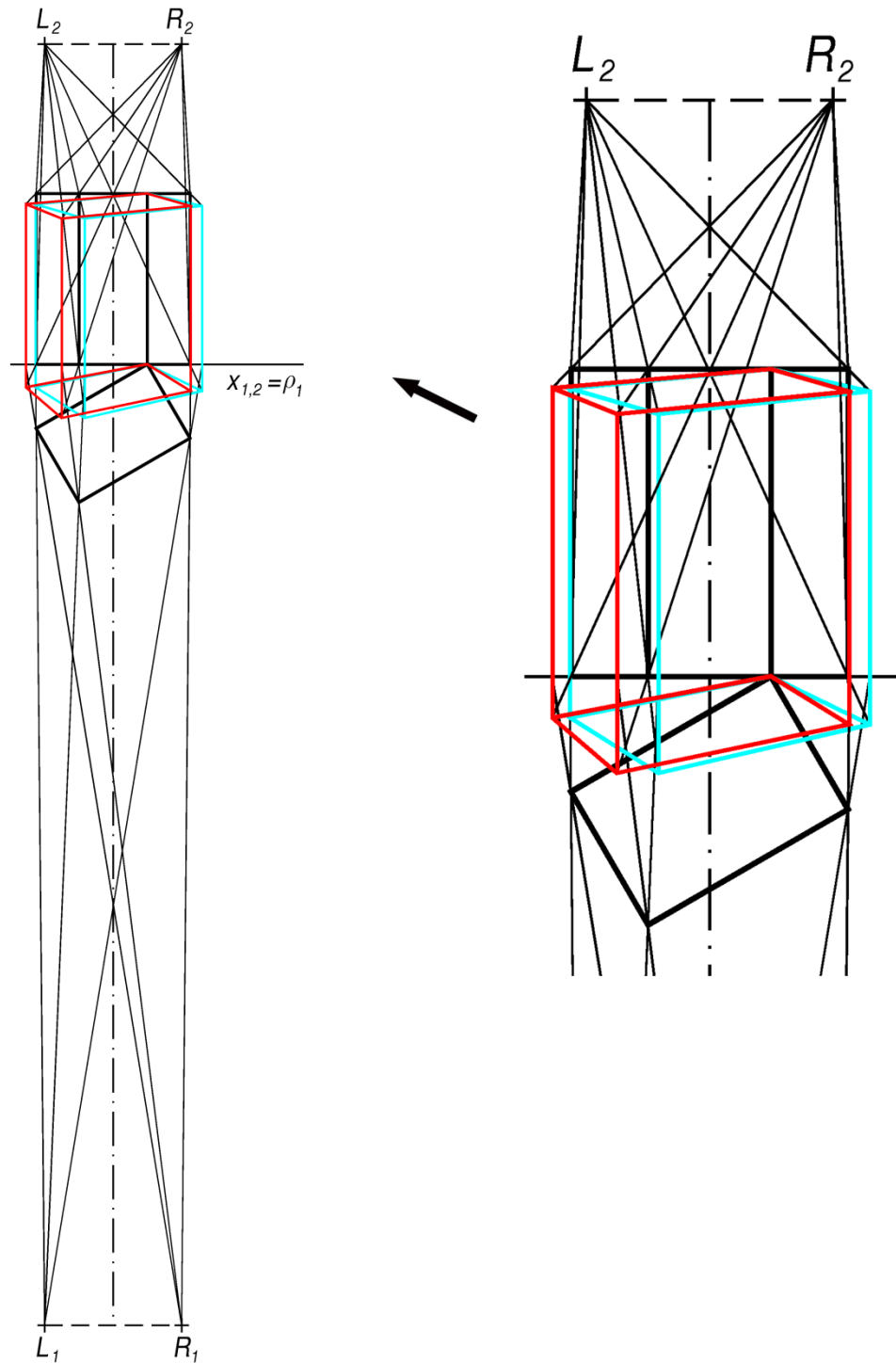
¹⁷ Při zobrazování plných těles se jejich hrany, jež nejsou z pohledu pozorovatele vidět, kreslí obvykle čárkovanou čarou. Při stereoskopickém promítání by si jednotlivé čárky každé takové čáry musely odpovídat ve sdružených průmětech. Opačný případ by vedl k nepříjemným pocitům při pozorování takovéto stereoskopické dvojice. Proto je výhodnější zobrazovat tělesa pouze jako drátěné modely.

Konstrukce sdužených průmětů hranolu je zajištěna dvojitým středovým promítáním ze středů L, R do průmětny ρ , která v tomto případě splývá s nárysnou v . Středové průměty vrcholů hranolu jsou proto zároveň nárysnými stopníky promítacích přímk těchto bodů. Levý, resp. pravý průmět $A_L B_L$, resp. $A_R B_R$ hrany AB sestojíme jako spojnicí levých, resp. pravých průmětů krajních bodů této úsečky (obr. 47). Pro přehlednost jsou jednotlivé průměty úsečky AB barevně odlišeny.



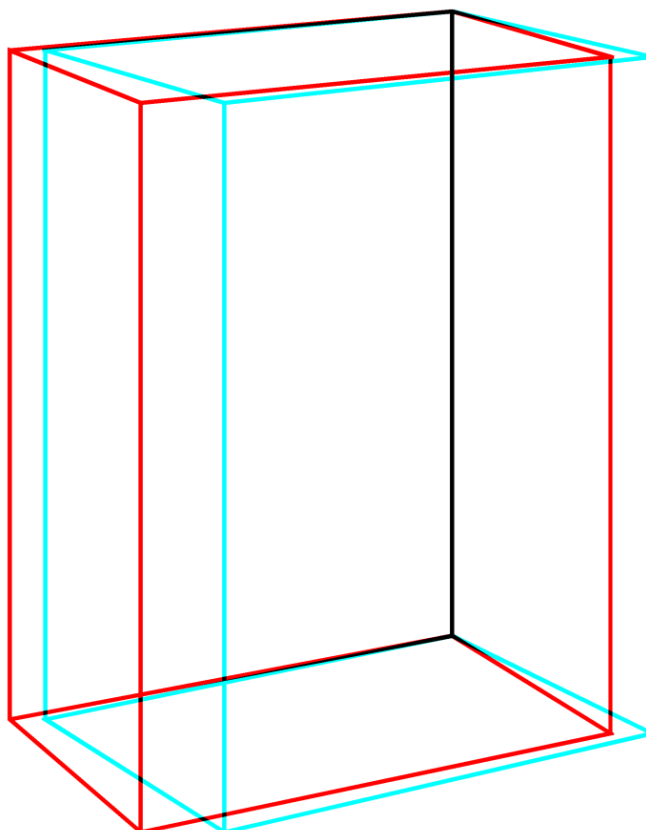
Obr. 47 Sdužené průměty hrany AB .

K sestavení výsledné stereoskopické dvojice obrazů drátěného modelu hranolu je nutné sestrojít průměty všech vrcholů hranolu ze středů L, R do roviny ρ a následně doplnit průměty jeho hran spojením průmětů příslušných vrcholů (obr. 48). Vzhledem k tomu, že se jedná o drátěný model tělesa, není nutné řešit viditelnost jednotlivých hran. Pro zvýraznění je levý průmět hranolu zobrazen azurovou a pravý červenou barvou.



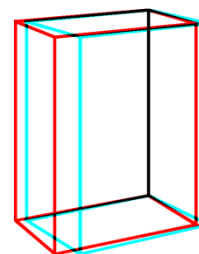
Obr. 48 Sdružené průměty hranolu.

Výsledná stereoskopická dvojice obrazů hranolu je ve skutečné velikosti zobrazena níže (obr. 49). Barvy, v nichž jsou obrazy narýsovány, nejsou vybrány zcela náhodně – dvojici lze díky tomu pozorovat brýlemi na anaglyf přiloženými v závěru práce. Při pozorování by měly být dodrženy původní podmínky, s nimiž byl anaglyf vytvořen. V tomto případě by vzdálenost pozorovatele od průmětny měla být přibližně 45 cm, výška očí pozorovatele přibližně 15 cm nad rovinou dolní podstavy hranolu, v obr. 49 to znamená 15 cm vertikálně nad rovinou dolního zadního rohu krychle.



Obr. 49 Stereoskopická dvojice ve skutečné velikosti.

Avšak díky vlastnostem stereoskopického promítání uvedeným v části 4.4 lze stereoskopický obraz získat i s pomocí stereoskopické dvojice ve velikosti, v jaké je zobrazena na levé části obr. 48. Výsledný stereoskopický obraz bude zmenšený a nebude tudíž poskytovat stejný prostorový vjem jako při skutečném binokulárním vidění. V případě, že nám záleží pouze na prostorovém efektu a nikoliv na zobrazení skutečné velikosti a přesného tvaru objektu, lze tuto skutečnost zanedbat a stereoskopický obraz pozorovat s pomocí zmenšené stereoskopické dvojice (obr. 50).

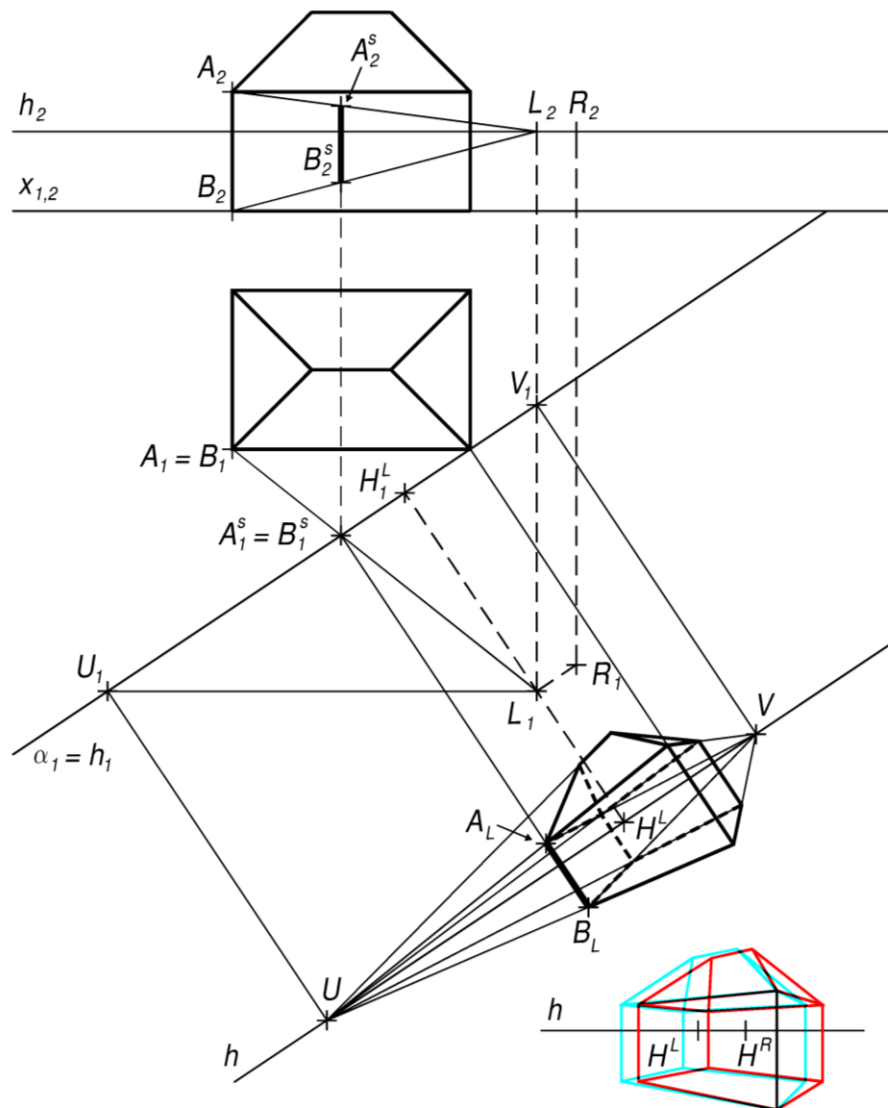


Obr. 50 Zmenšená stereoskopická dvojice.

Ke konstrukci stereoskopické dvojice obrazů zobrazovaného tělesa je možné využít znalostí lineární perspektivy, jakožto speciálního případu středového

promítání s podmínkami přizpůsobenými přirozenému lidskému vidění, avšak pro dva středy promítání nahrazující oči pozorovatele. Vzdálenost středů promítání odpovídá hodnotě standardní stereoskopické báze b . Distance d , čili vzdálenost očí od nákresny, je zdola omezena hodnotou konvenční zrakové vzdálenosti, tzn. $d \geq 25$ cm [29, s. 345].

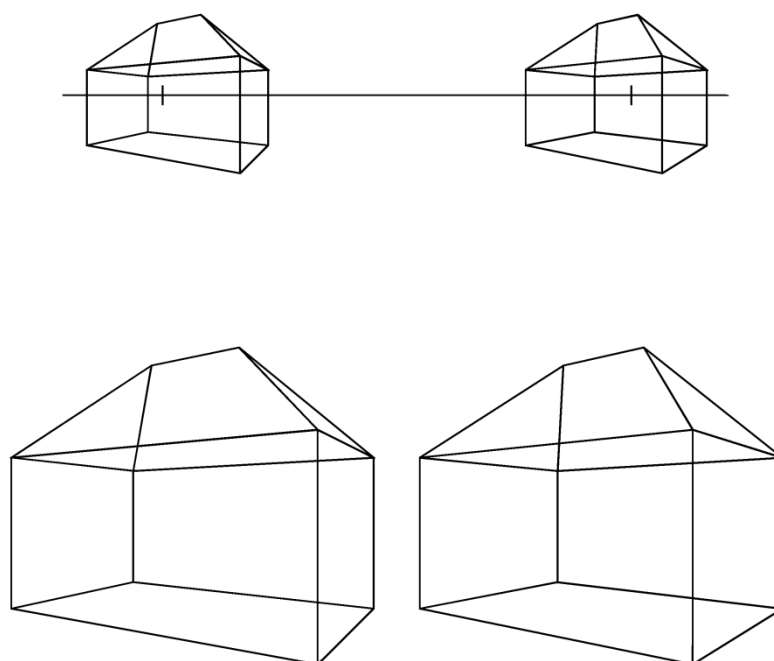
Složitějším konstrukcím lineární perspektivy je možné se vyhnout využitím tzv. průsečné metody (obr. 51), viz např. [29] či [32], kterou je třeba použít dvakrát, pro oba dva středy promítání zvlášť, viz [35], a výsledné obrazy dále upravit podle zamýšlené metody pozorování. Výhodou uvedené metody je snadná konstrukce těles v Mongeově promítání i jednoduchost ostatních konstrukcí potřebných k sestrojení sdružených průmětů stereoskopické dvojice. Daní za snadnost konstrukcí této metody je její velmi vysoká náročnost na přesnost, jelikož i drobné odchylky při přenášení vzdáleností v rámci konstrukce průmětů mohou způsobit značné problémy a nepřesnosti při pozorování výsledných stereoskopických obrazů.



Obr. 51 Náznak principu využití průsečné metody k sestrojení stereoskopické dvojice obrazů zobrazovaného objektu.

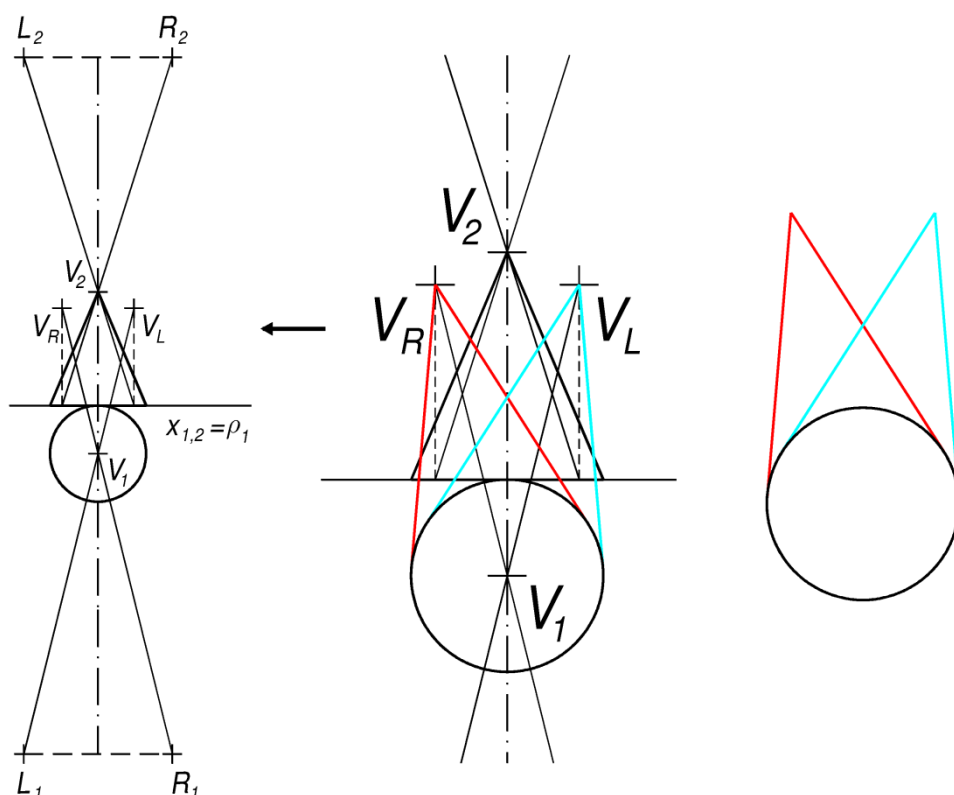
Na obr. 51 je v náznaku nastíněn postup konstrukce stereoskopického obrazu modelu domku s půdorysem o rozměrech 20 x 30 cm a výšce 25 cm, jenž je pozorován s očima se standardní stereoskopickou bází $b = 64$ mm umístěnými v bodech L, R ve výšce $v = 10$ cm nad půdorysnou π a vzdálenosti $d = 30$ cm od průmětny α , vše ve zmenšení. Na obrázku je zobrazena konstrukce středového průmětu úsečky AB ze středu L spolu s výsledným levým průmětem celého objektu. Pro větší přehlednost je tento průmět zobrazen i s viditelností hran objektu. Podobně je třeba doplnit pravý průmět objektu středovým promítáním ze středu R . Dále jsou na obr. 51 zobrazeny oba průměty v barvách anaglyfu vedle sebe tak, jako by byly promítnuty z obou středů L, R současně – tedy tak, že $|H^L H^R| = |L_1 R_1|$. Anaglyf v pravém dolním rohu obr. 51 je možné pozorovat brýlemi na anaglyf přiloženými v závěru práce.

Obr. 52 znázorňuje stereoskopické dvojice obrazů upravené k pozorování s pomocí čočkových brýlí přiložených v závěru této práce. První z obrazů je zobrazen ve stejné velikosti jako na obr. 51, a to spolu s naznačenými hlavními body H^L, H^R a přímkou horizontu. Tyto body by v ideálním případě měly splývat s průsečíky průmětny s očními osami ležícími v rovině kolmé k průmětně, proto musí platit $|H^L H^R| \leq b$. Při pozorování průmětů mohou zobrazené hlavní body působit rušivě, proto je druhá stereoskopická dvojice zobrazena již bez těchto bodů. Pro větší prostorový efekt byla velikost této stereoskopické dvojice oproti předchozí zdvojnásobena.



Obr. 52 Dvě stereoskopické dvojice k pozorování čočkovými brýlemi přiloženými v závěru práce.

V pracích věnovaných anaglyfu, např. [33], se také můžeme setkat s volbou průmětny ve vodorovné poloze – výslednými obrazy jsou tzv. phantogramy. Pro použití v tištěných materiálech je tento druh anaglyfu vhodnější, jelikož umožňuje pozorovat výsledný obraz z knihy či papíru umístěného vodorovně, např. položeného na stole. Princip tvorby phantogramů je podobný jako v prvním výše uvedeném případě, jen místo promítání do náryсны či jiné svislé roviny je třeba promítnout zobrazované objekty do půdoryсны. Úloha se z hledání náryсных stopníků promítacích přímek význačných bodů mění na nalezení jejich půdoryсных stopníků (obr. 53). Poloha stereoskopické báze je volena nejčastěji ve vzdálenosti $d = 25$ cm a výšce $v = 25$ cm, tedy úhel, jež svírá optická osa oka s rovinou obrazů, by při jejich pozorování měl být roven přibližně 45° .



Obr. 53 Princip tvorby phantogramů a velmi jednoduchý phantogram.

Stereoskopické dvojice obrazů různých prostorových objektů je možné vytvářet také v programech pro modelování těles – např. program Rhinoceros [36] umožňuje nejen modelaci zobrazovaného tělesa, ale také dvojí středové promítnutí modelu do zvolené roviny¹⁸. U výsledných obrazů stačí už jen upravit jejich vzájemnou polohu, velikost a barevnost v závislosti na zamýšlené metodě jejich pozorování (viz kap. 6).

¹⁸ Danou rovinu je v programu Rhinoceros možné zvolit nastavením pozice kamery a cíle perspektivního pohledu. Pozice kamery splývá se středem promítání, tj. s polohou oka pozorovatele. Cíl je totožný s hlavním bodem středového promítání, tj. s kolmým průmětem středu promítání do zamýšlené průmětny. Aplikováním funkce *Vytvoř 2D výkres* na vybraný objekt v perspektivním pohledu s nastavenými pozicemi kamery a cíle získáme středový průmět daného objektu.

5.2 Tvorba stereoskopické dvojice fotografií

Princip tvorby stereoskopické dvojice fotografií je stejný jako v předchozím případě – cílem je získat dva snímky, z nichž každý odpovídá pohledu jedním okem. K vytvoření takových snímků můžeme využít rozličných druhů fotoaparátů různých značek. Veškeré zde uvedené stereoskopické fotografie byly vytvořeny digitálním fotoaparátem Canon EOS 1100D a dále byly upraveny podle níže popsaných zásad v programu StereoPhoto Maker [37].

5.2.1 Stereoskopické fotoaparáty a tipy pro vytváření stereoskopických dvojic fotoaparátem s jedním objektivem

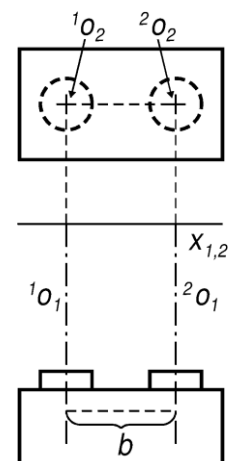
Jak bylo zmíněno výše, k vytvoření stereoskopické dvojice snímků můžeme využít různých fotoaparátů, ať už se jedná o fotoaparáty se dvěma objektivy nebo pouze s jedním objektivem.

Mezi první z uvedených lze zařadit zejména historické stereoskopické fotoaparáty různých výrobců – např. Belplasca, Sputnik, Meopta Stereo 35 či Stereo-Mikroma (obr. 54 – [38], [39], [40], [41]), ale také nejnovější hit v podobě digitálního stereoskopického fotoaparátu značky Fujifilm, jenž dokáže stereoskopický obraz zobrazit přímo na displeji.



Obr. 54 Historické stereoskopické fotoaparáty.

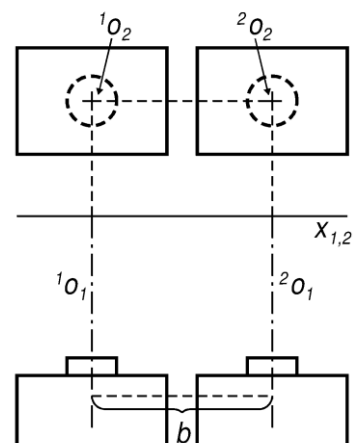
Jedná se o fotoaparáty, jejichž objektivy jsou umístěny horizontálně vedle sebe, optické osy těchto objektivů jsou vzájemně rovnoběžné¹⁹ a jejich vzdálenost odpovídá hodnotě stereoskopické báze b (obr. 55). Tato hodnota se ale napříč fotoaparáty liší a nebývá rovna dnes standardním 64 mm. Navíc u většiny stereoskopických fotoaparátů nelze vzdálenost objektivů změnit. Další nevýhodou starších stereoskopických fotoaparátů je finanční náročnost fotografických materiálů a nejen časová náročnost finální úpravy hotových snímků. Avšak výhodou, která se fotoaparátům se dvěma objektivy nedá upřít, je skutečnost, že oba snímky stereoskopické dvojice vzniknou současně, což umožňuje fotografovat i pohybující se objekty.



Obr. 55 Fotoaparát se dvěma objektivy.

¹⁹ Existují i stereoskopické fotoaparáty s objektivy, jejichž optické osy se mírně sbíhají.

Mohlo by se zdát, že tvorbou stereoskopických fotografií se může zabývat jen ten, kdo vlastní fotoaparát se dvěma objektivy, ale opak je pravdou. Stereoskopické fotografie může vytvářet i majitel obyčejného fotoaparátu s jedním objektivem. Stačí mezi jednotlivými snímky stereoskopické dvojice posunout fotoaparát horizontálně o vzdálenost rovnou stereoskopické bázi tak, aby optická osa objektivu v jedné poloze fotoaparátu byla rovnoběžná s optickou osou v jeho druhé poloze (obr. 56).



Obr. 56 Tvorba stereofotografií fotoaparátem s jedním objektivem.

Toho lze dosáhnout upevněním fotoaparátu na stativ se speciálním nástavcem, tzv. sáňkami, pomocí nichž je možné fotoaparát posunovat bez nežádoucích vertikálních posunů či rotace fotoaparátu.

Jinou možností je vyfotit oba snímky bez použití stativu, tzv. z ruky. Ověřeným a v praxi často používaným způsobem, jak přitom dosáhnout co nejmenších odchylek od požadovaného směru optické osy objektivu a správného umístění fotoaparátu, je držet se při fotografování následujících pokynů. S fotoaparátem v ruce si stoupneme mírně rozkročmo, přeneseme váhu těla na levou nohu, vyfotíme levý snímek, poté přeneseme váhu těla na pravou nohu a vyfotíme pravý snímek. U některých typů fotoaparátů je v hledáčku umístěna jedna nebo více značek pro přesnější zaměrování fotografovaných objektů. V tom případě lze jedné takové značky využít k minimalizování vertikálního posunu fotoaparátu mezi dvojicí snímků. Stačí při fotografování obou snímků zaměřit tuto značku na ten samý bod „v nekonečnu“, popř. postupně na dva vhodné body na horizontu. Nevýhodou tohoto způsobu získávání stereoskopické dvojice snímků je kromě uvedených odchylek také nepřesný odhad vzdálenosti, o níž je třeba fotoaparát posunout, což má za následek hloubkové zkreslení výsledného stereoskopického obrazu.

5.2.2 Pravidla pro snímání stereoskopických dvojic fotografií fotoaparátem s jedním objektivem

Při vytváření stereoskopických dvojic fotografií fotoaparátem s jedním objektivem je nutné zvláště dbát na dodržení několika základních pravidel vycházejících většinou z vlastností stereoskopického promítání.

Prvním z nich je dodržení odpovídající stereoskopické báze, tedy vzdálenosti poloh optických os objektivu mezi jednotlivými snímky. Pro navození dojmu přirozeného lidského vidění se jedná o standardních 64 mm.

Dále je nutné, aby body, které si na jednotlivých snímcích odpovídají, ležely na přímkách rovnoběžných se stereoskopickou bází, což přímo vyplývá z vlastností stereoskopického promítání uvedených v podkapitole 4.3 kapitoly 4.

Při vytváření stereoskopické dvojice snímků tudíž nesmí mezi jednotlivými snímky dojít k vertikálnímu posunu fotoaparátu (obr. 57 – s využitím [42]) ani k jeho rotaci kolem optické osy objektivu (obr. 58 – s využitím [42]).

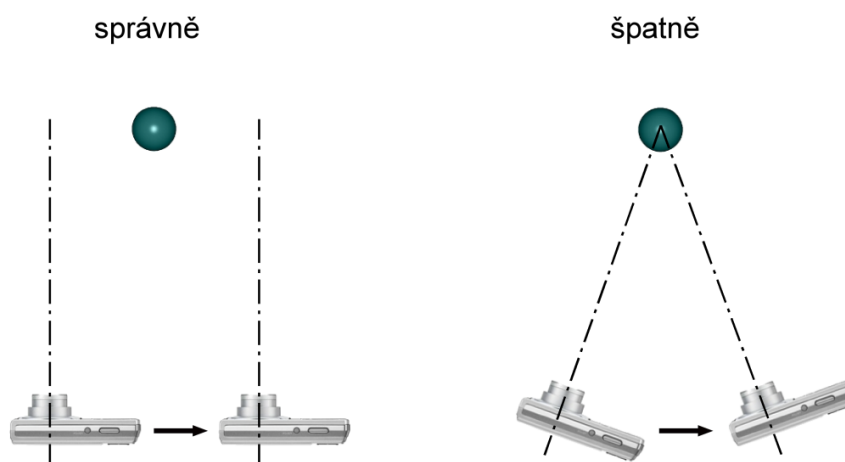


Obr. 57 Nežádoucí vertikální posun fotoaparátu mezi dvěma snímky.



Obr. 58 Nežádoucí rotace fotoaparátu mezi dvěma snímky.

Poslední, avšak neméně důležité pravidlo pro vytváření stereoskopických dvojic fotografií, vyplývá z vlastností stereoskopických fotoaparátů a skutečnosti, že fotografování „z ruky“ je jakousi náhradou pořizování snímků fotoaparátem se dvěma objektivy. Stereoskopické fotoaparáty mají dva objektivy, jejichž optické osy jsou vzájemně rovnoběžné. Při fotografování z ruky musíme rovnoběžnost jednotlivých poloh optické osy objektivu mezi dvěma snímky zachovat. To mimo jiné vylučuje nasměrování osy objektivu v jednotlivých polohách fotoaparátu na fotografovaný předmět, což je nejčastějším způsobem porušení tohoto pravidla (obr. 59 – s využitím [43]).



Obr. 59 Nedodržení rovnoběžnosti poloh optické osy fotoaparátu.

Odhadnutí správné vzdálenosti poloh fotoaparátu mezi jednotlivými snímky, zachování horizontálního směru posunutí a zabránění rotaci kolem optické osy objektivu mezi snímky, dodržení rovnoběžnosti jednotlivých poloh optické osy objektivu i odhadnutí jejich vzdálenosti mezi snímky stereoskopické dvojice je zejména při fotografování „z ruky“ dosti náročné. A tak se pravděpodobně i přes vynaložené úsilí nepodaří uvedené podmínky fotografování přesně dodržet. Tehdy je možné vzniklé drobné odchylky napravit v některém z počítačových programů, viz část 5.2.5 této podkapitoly.

5.2.3 Deviace stereoskopické fotografie

Při vytváření stereoskopické dvojice fotografií by mělo pokročilejšího stereofotografa zajímat, jak velkou část prostoru je schopen svým fotoaparátem zachytit, zda daný objekt bude na fotografii působit prostorově a zda se při pozorování stereoskopické fotografie nevyskytnou nepříjemné pocity či jiné efekty způsobené nevhodně zvolenými parametry snímání stereoskopické dvojice obrazů.

V části 3.3.5 kapitoly 3 zabývající se poloměrem binokulárního vidění byla stanovena maximální vzdálenost o přibližné hodnotě 200 m, na níž je průměrný pozorovatel schopen rozeznat hloubky pozorovaných objektů. Jako dolní mez binokulárního vidění byla v části 3.2.3 téže kapitoly určena konvenční zraková vzdálenost, tj. hodnota 25 cm. Avšak při pozorování stereoskopických fotografií obsahujících obrazy velmi blízkých objektů, které byly vytvořeny se standardní bází 64 mm, se objevují nepříjemné pocity napětí. Často také dochází k nežádoucímu efektu zdvojení obrazů objektů, které se nacházejí v popředí zobrazovaného prostoru.

Z toho důvodu je nutné odlišit binokulární vidění, tj. skutečné lidské vidění, od vidění stereoskopického, tj. prostorového vidění při pozorování stereoskopických dvojic obrazů. Jak bude odvozeno v závěru této části, dolní i horní mez stereoskopického vidění závisí na mnoha faktorech. Obecně lze ale říci, že se standardní bází není vhodné zobrazovat objekty nacházející se k pozorovateli blíže než 2 m.

V opačném případě může dojít k uvedeným nežádoucím efektům, jež jsou důsledkem překročení maximální přijatelné hodnoty tzv. deviace stereoskopické fotografie. Deviace stereoskopické fotografie je rovna rozdílu vzdáleností sdružených průmětů nejbližšího a nejbližšího bodu zobrazeného prostoru. Jak je uvedeno v [44], tuto hodnotu nelze jednoznačně určit, jelikož závisí na mnoha dalších podmínkách, jako je např. velikost stereoskopické báze či zkušenost pozorovatele v oblasti pozorování stereoskopických fotografií.

Uvažujme nyní podobně jako v [44], že vytváříme stereoskopickou dvojici fotografií se stereoskopickou bází b fotoaparátem s ohniskovou vzdáleností²⁰ f . Na zjednodušeném půdorysu situace níže (obr. 60 – podle [44]) jsou zobrazeny polohy

²⁰ Ohnisková vzdálenost fotoaparátu se rovná vzdálenosti optického středu objektivu od fotografického materiálu či snímacího senzoru neboli čipu fotoaparátu (podle toho, zda se jedná o klasický nebo digitální fotoaparát).

L, R optického středu objektivu fotoaparátu, rovina π fotografického materiálu či snímacího senzoru fotoaparátu, zobrazovaný bod X ve vzdálenosti x od roviny π' , která obsahuje optické středy L, R a je rovnoběžná s rovinou π . Stereoskopické průměty bodu X do roviny π označme X_L, X_R a položme $d_X = |X_L X_R| - b$.

Z podobnosti trojúhelníků XLR a $XX_L X_R$ jsou si poměry výšky k základně u každého z těchto trojúhelníků rovny, a tedy

$$\frac{x}{b} = \frac{x+f}{b+d_X}. \quad (10)$$

Úpravou rovnice (10) získáme rovnici

$$d_X = \frac{bf}{x} \quad (11)$$

pro tzv. deviaci bodu X .

Nyní uvažme obecnější případ a představme si, že fotografujeme stereoskopickou dvojici fotografií určité prostorové scény, jejímž nejbližším bodem je bod X o vzdálenosti x a nejvzdálenějším bodem je bod Y o vzdálenosti y od roviny optických středů fotoaparátu. Ostatní prvky necht' zůstanou beze změny (obr. 61 – podle [44]).

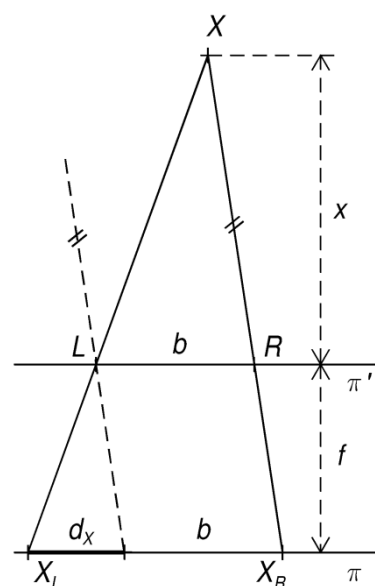
Z definice deviace, označme ji písmenem d , jako rozdíl vzdáleností sružených průmětů nejbližšího a nejvzdálenějšího bodu záběru je $d = ||X_L X_R| - |Y_L Y_R|| = |(d_X + b) - (d_Y + b)| = |d_X - d_Y| = d_X - d_Y$, jelikož $x < y$, a tedy $d_X > d_Y$.

S využitím dříve odvozených vztahů je

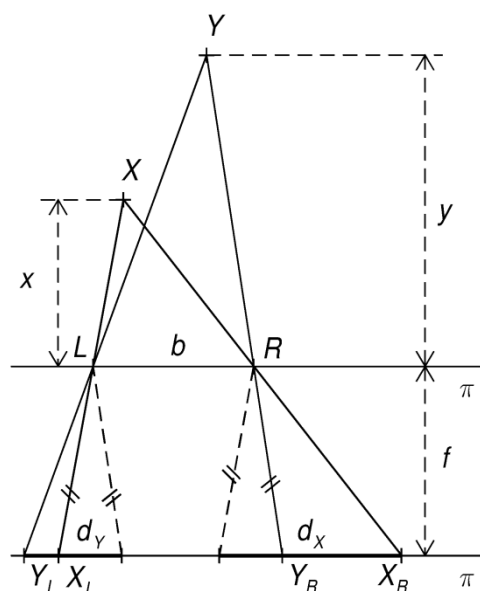
$$d = d_X - d_Y = \frac{bf}{x} - \frac{bf}{y} = bf \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{y} \right). \quad (12)$$

Speciálně pro $y \rightarrow \infty$ je deviace snímku $d = \lim_{y \rightarrow \infty} bf \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{y} \right) = \frac{bf}{x} = d_X$, tzn. blíží-li se vzdálenost nejvzdálenějšího bodu Y od roviny π k nekonečnu, je deviace snímku rovna přímo deviaci nejbližšího bodu X . Tudíž obr. 60 zároveň znázorňuje situaci, kdy nejvzdálenější bod záběru leží v nekonečnu, neboť pro $y \rightarrow \infty$ je $d_X = |X_L X_R| - b = |X_L X_R| - |Y_L Y_R|$. Praxí bylo zjištěno, že maximální hodnota deviace stereoskopické dvojice snímků je rovna přibližně $\frac{1}{25}$ až $\frac{1}{30}$ šířky jednoho ze snímků stereoskopické dvojice.

V případě, že bychom ke snímání stereoskopické dvojice fotografií použili fotoaparát na kinofilm, vychází pro běžně užívaný formát filmového políčka 36x24 mm maximální hodnota deviace $d = \frac{36}{30}$ mm = 1,2 mm. Zaměníme-li fotoaparát



Obr. 60 Deviace bodu X .

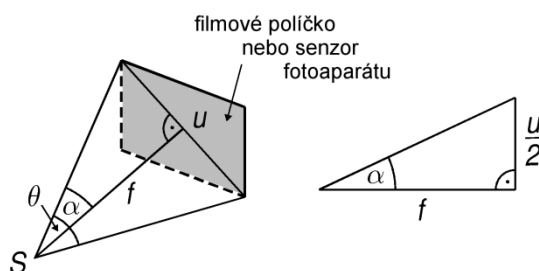


Obr. 61 Deviace jako rozdíl deviací nejbližšího a nejvzdálenějšího bodu.

na kinofilm za digitální fotoaparát, situace se mírně komplikuje. U digitálních fotoaparátů je fotografický materiál nahrazen snímacím senzorem, jehož rozměry ne vždy souhlasí s rozměry políčka kinofilmu, a tedy i formát výsledných snímků je odlišný. Například fotoaparát Canon EOS 1100D, jenž byl použit k tvorbě fotografií užitých v této práci, obsahuje čip velikosti 22,2x14,8 mm s odpovídající hodnotou deviace $d = \frac{22,2}{30}$ mm = 0,74 mm.

U historických stereofotoaparátů byla ohnisková vzdálenost pevně nastavena tak, aby byl zorný úhel objektivů fotoaparátu přibližně stejný jako zorný úhel lidského oka. Stereoskopická dvojice fotografií pořízená takovým stereoskopickým fotoaparátem pak díky tomu poskytovala prostorový vjem podobný přirozenému lidskému vidění. Hodnota zorného úhlu θ lidského oka byla v části 3.2.4 kapitoly 3 stanovena na 50° , tedy pro ohniskovou vzdálenost fotoaparátu a příslušný zorný úhel $\theta = 2\alpha$ (obr. 62) musí platit

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{u}{2}}{f}. \quad (13)$$



Obr. 62 Odvození poměru ohniskové vzdálenosti objektivu a úhlopříčky filmového políčka či senzoru fotoaparátu.

Po dosazení hodnoty $\alpha = 25^\circ$ do rovnice (13) získáme vztah

$$2 \cdot \operatorname{tg} 25^\circ = \frac{u}{f}, \quad (14)$$

a jeho úpravou pak poměr $u : f \doteq 0,9326 \doteq 1$. Z uvedeného vztahu vyplývá, že stereoskopická fotografie poskytuje prostorový vjem podobný přirozenému lidskému vidění, jestliže je ohnisková vzdálenost fotoaparátu přibližně stejná jako velikost úhlopříčky fotografického políčka či senzoru fotoaparátu.

Tedy při fotografování fotoaparátem na kinofilm s políčky o rozměrech 36x24 mm je nejvhodnější hodnota ohniskové vzdálenosti objektivu fotoaparátu $f = u = \sqrt{36^2 + 24^2}$ mm $\doteq 43$ mm. Vzhledem k tomu, že objektivy starších fotoaparátů měly často pevně danou a neměnnou hodnotu ohniskové vzdálenosti, bylo třeba vybrat vždy takový fotoaparát, jehož objektiv se ohniskovou vzdáleností alespoň blížil uvedené hodnotě, např. některý z fotoaparátů s objektivem o ohniskové vzdálenosti $f = 50$ mm.

Objektivy digitálních fotoaparátů již mají nastavitelnou hodnotu ohniskové vzdálenosti, například u fotoaparátu Canon EOS 1100D se jedná o hodnoty ohniskové vzdálenosti v rozmezí od 18 do 55 mm. Aby se prostorový vjem vzniklý

při pozorování pořízené stereoskopické fotografie co nejvíce podobal přirozenému lidskému vidění, je třeba nastavit ohniskovou vzdálenost objektivu opět přibližně na hodnotu rovnou úhlopříčce senzoru fotoaparátu, tedy přibližně na hodnotu

$f = u = \sqrt{22,2^2 + 14,8^2} \text{ mm} \doteq 27 \text{ mm}$. Uvedené podmínky ale nijak neomezují kreativitu fotografa – pokud si to situace či fotografův umělecký záměr žádá, lze při pořizování stereoskopické dvojice fotografií použít libovolnou ohniskovou vzdálenost – za podmínky, že bude u obou snímků stereoskopické dvojice stejná. Výsledkem bude stereoskopická fotografie s větším či menším zorným úhlem ve srovnání se zorným úhlem přirozeného lidského vidění.

Uvažujme nyní, že stereoskopicky fotografujeme prostorovou scénu digitálním fotoaparátem s ohniskovou vzdáleností objektivu f posunutím o hodnotu stereoskopické báze b . Nejprve určíme nejbližší a nejdálší body X, Y záběru a odhadneme jejich vzdálenosti x, y od objektivu fotoaparátu. Poté můžeme pomocí výše uvedených vztahů například ověřit, zda nejbližší bod záběru není příliš blízko k objektivu a vyhnout se tak nežádoucím efektům projevujícím se při pozorování stereoskopických fotografií. Nebo lze pomocí uvedených vztahů odvodit maximální možnou hodnotu stereoskopické báze, kterou je možné při fotografování použít.

V případě použití fotoaparátu Canon EOS 1100D nastavíme ohniskovou vzdálenost objektivu f na hodnotu 27 mm, deviace d je rovna hodnotě 0,74 mm. V případě, že nejdálší bod záběru leží v nekonečnu, lze pro standardní hodnotu báze $b = 64 \text{ mm}$ odvodit minimální vzdálenost nejbližšího bodu X záběru z rovnice

$$x = \frac{bf}{d} = \frac{64 \cdot 27}{0,74} \text{ mm} \doteq 2335 \text{ mm} \doteq 2,3 \text{ m}. \quad (15)$$

Tato hodnota je dolní mezí stereoskopického zobrazování a stereoskopická fotografie vytvářená s uvedenými hodnotami b a f by neměla obsahovat objekty ve vzdálenosti od fotoaparátu menší než je hodnota vzdálenosti x .

Podobně lze pro danou vzdálenost x nejbližšího bodu X odvodit maximální hodnotu stereoskopické báze b , kterou lze k fotografování použít, čímž dojde k posunutí horní meze stereoskopického vidění. Například při fotografování hornaté krajiny s nejbližším bodem ve vzdálenosti $x = 500 \text{ m} = 500000 \text{ mm}$ fotoaparátem s ohniskovou vzdáleností $f = 27 \text{ mm}$ je

$$b = \frac{xd}{f} = \frac{500000 \cdot 0,74}{27} \text{ mm} \doteq 13704 \text{ mm} \doteq 13,7 \text{ m}. \quad (16)$$

V případě nejbližšího bodu X ve vzdálenosti $x = 1 \text{ m}$ může stereoskopická báze nabývat maximální hodnoty

$$b = \frac{xd}{f} = \frac{1000 \cdot 0,74}{27} \text{ mm} \doteq 27,4 \text{ mm} \doteq 2,7 \text{ cm}. \quad (17)$$

Obdobné výpočty je možné provést i v případě, že nejdálší bod neleží v nekonečnu – stačí z rovnice $d = bf\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{y}\right)$ vyjádřit neznámou b , tedy

$$b = \frac{d}{\frac{f}{x} - \frac{f}{y}}. \quad (18)$$

5.2.4 Hypostereoskopická a hyperstereoskopická fotografie

Stereoskopická fotografie, jež byla vytvořena se standardní stereoskopickou bází, se nazývá orthostereoskopická, případně krátce „orthostereo“ [45]. V předchozí kapitole bylo odvozeno, že rozsah stereoskopického vidění se standardní stereoskopickou bází je zdola i shora omezen. Současně však bylo v závěru této kapitoly naznačeno, že meze stereoskopického vidění lze posunout vhodnou změnou stereoskopické báze.

Stereoskopická fotografie pořízená s bází menší než standardních 64 mm se nazývá hypostereoskopická, krátce „hypostereo“ [45], a objekty na ní zobrazené se při pozorování stereoskopické dvojice snímků zdají větší než ve skutečnosti. Hypostereoskopii lze využít zejména k fotografování drobných blízkých objektů, jako je například hmyz či drobná flora, ale také při mikroskopické stereofotografii s hodnotami stereoskopické báze v řádech milimetrů.

Je-li stereoskopická fotografie pořízena se stereoskopickou bází větší než standardních 64 mm, nazývá se hyperstereoskopická, popř. jen „hyperstereo“ [45], a objekty zobrazené na takové stereoskopické fotografii působí jako zmenšené modely skutečných objektů. Hyperstereoskopii je možné využít pro fotografie velkých vzdálených objektů, například rozlehlé krajiny či vzdáleného pohoří, jejichž obrazy by při standardně zvolené bází neposkytovaly téměř žádný prostorový dojem. Stereoskopická báze o hodnotě až několika kilometrů se využívá k tvorbě leteckých stereoskopických snímků.

Představme si například, že budeme fotoaparátem Canon EOS 1100D s deviací $d = 0,74$ mm a ohniskovou vzdáleností $f = 50$ mm²¹ fotografovat skupinu květů, jejíž přibližná hloubka je 15 cm, ze vzdálenosti 30 cm k nejbližšímu bodu skupiny. Tedy vzdálenost nejbližšího bodu fotografovaného objektu je $x = 300$ mm a pro nejvzdálenější bod skupiny platí $y = (300 + 150) = 450$ mm. Úpravou vzorce (12) pro deviaci snímku získáme rovnici

$$b = \frac{d}{\frac{f}{x} - \frac{f}{y}}, \quad (19)$$

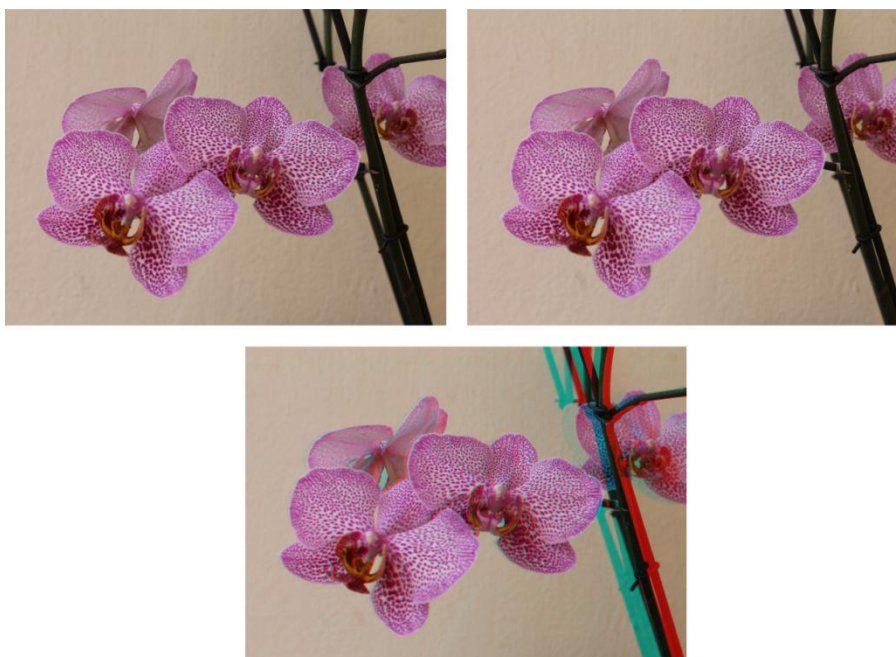
z níž po dosazení je

$$b = \frac{0,74}{\frac{50}{300} - \frac{50}{450}} \text{ mm} \doteq 13,32 \text{ mm} \doteq 1,3 \text{ cm}. \quad (20)$$

Získali jsme tak maximální použitelnou hodnotu stereoskopická báze 1,3 cm, se stereoskopickou bází vyšší hodnoty dojde při pozorování vytvořené stereoskopické dvojice fotografií k nežádoucím efektům, v krajním případě se dílčí obrazy pozorovateli v jeden prostorový obraz vůbec nepodaří spojit.

²¹ Vzhledem k tomu, že hodláme záměrně nedodržet podobnost stereoskopické fotografie se skutečným lidským viděním, lze ohniskovou vzdálenost volit libovolně podle aktuálních potřeb dané situace.

Na následujícím obrázku (obr. 63) je zobrazen levý a pravý snímek hypostereoskopické dvojice fotografií spolu s anaglyfem vytvořeným z těchto snímků, jenž je možné pozorovat brýlemi na anaglyf přiloženými v závěru práce.



Obr. 63 Levý a pravý snímek hypostereoskopické dvojice a anaglyfická stereoskopická fotografie.

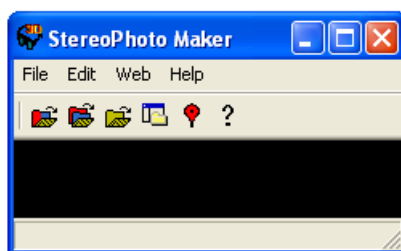
5.2.5 Úprava stereoskopické dvojice fotografií

Vzhledem k tomu, jak rozšířeny jsou digitální fotoaparáty, zabývá se tato podkapitola úpravou digitálních fotografických snímků v některém z počítačových programů, nikoli mechanickou úpravou snímků na kinofilmech či jiných fotografických materiálech. Současné programy nejen že umožňují zobrazit stereoskopickou dvojici pro pozorování některou z metod uvedených v kapitole 6, ale ty lepší z nich nabízejí také nepřehledné množství funkcí použitelných k nápravě možných nedostatků stereoskopické dvojice vyplývajících především z nedodržení pravidel uvedených v části 5.2.2 této kapitoly.

Veškeré takové chyby je třeba v zájmu co nejlepšího a nejpřirozenějšího prostorového dojmu odstranit, což je při fotografování digitálním fotoaparátem a užití vhodného počítačového programu možné, a někdy dokonce velmi snadné. Mezi programy použitelné k úpravě stereoskopické dvojice snímků patří již zmiňovaný StereoPhoto Maker, ale podobné možnosti nabízejí také jiné programy, jejichž rozsáhlý přehled je uveden například na internetových stránkách Stereoscopia.com [46]. U zdařilejších programů je samozřejmostí nejen zobrazení stereoskopické dvojice pro libovolnou pozorovací metodu, ale také široký výběr funkcí manuální i automatické opravy chyb objevujících se ve stereoskopických dvojicích snímků. Oproti některým jiným programům je StereoPhoto Maker obohacen funkcí zcela automatické opravy chyb obsažených ve stereoskopické dvojici fotografií.

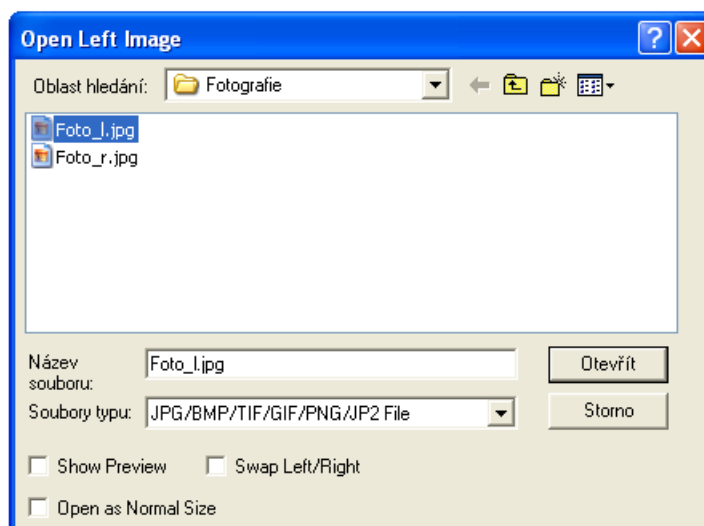
Na vyzkoušení tvorby anaglyfických fotografií některý ze základních programů zcela jistě postačí, avšak k tvorbě kvalitních stereoskopických obrazů doporučuji použít StereoPhoto Maker či jiný srovnatelný program s podobnými funkcemi.

Předpokládejme nyní, že jsme vytvořili stereoskopickou dvojici digitálních snímků fotografováním tzv. z ruky. I přes veškerou snahu vyhnout se odchylkám způsobeným nesprávným posunem či rotací fotoaparátu se některé z výše uvedených chyb u snímků pravděpodobně objeví. Následující text se zabývá jejich odstraněním v programu StereoPhoto Maker, jehož hlavní okno je zobrazeno na obr. 64.



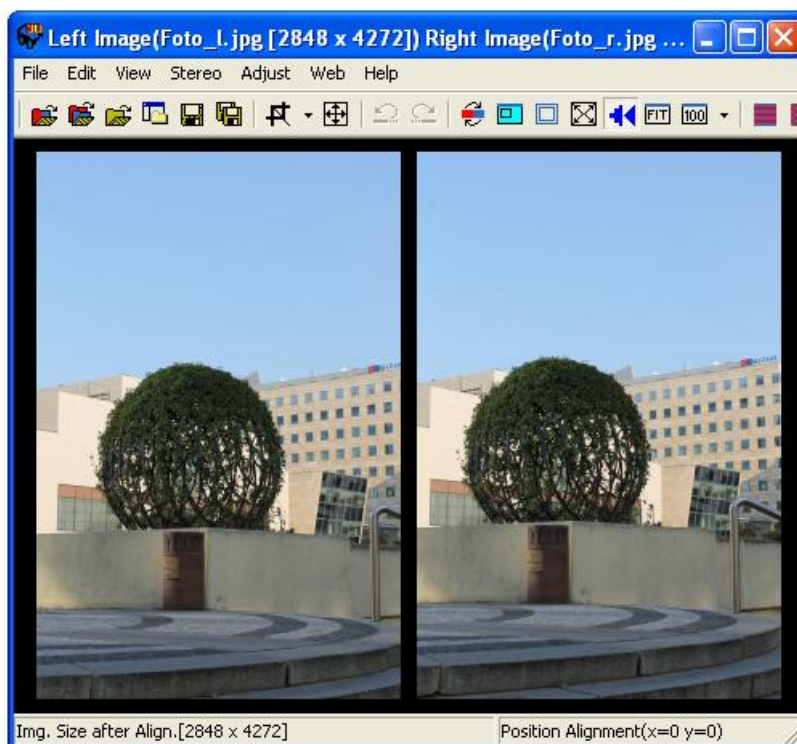
Obr. 64 Hlavní okno programu StereoPhoto Maker.

Po nahrání fotografií z digitálního fotoaparátu do počítače a spuštění programu StereoPhoto Maker je třeba načíst levý a pravý snímek příkazem *Open Left/Right Image* nacházejícím se v záložce *File* hlavního okna. Nejprve se otevře dialogové okno *Open Left Image* pro načtení fotografie odpovídající pohledu levým okem (obr. 65). Po výběru levého snímku se objeví dialogové okno *Open Right Image* pro analogické načtení pravého snímku.



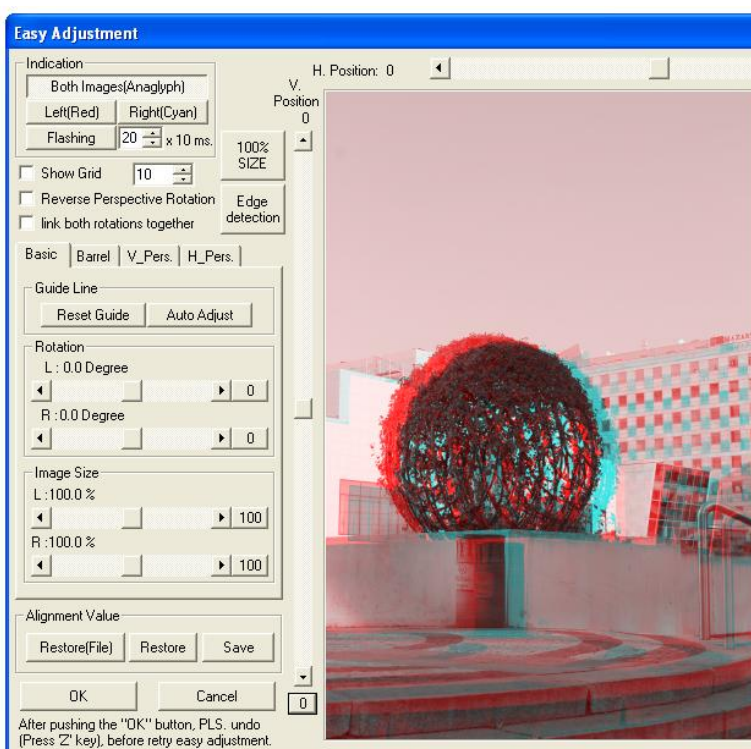
Obr. 65 Dialogové okno pro načtení levého snímku.

Následně se oba snímky zobrazí vedle sebe v hlavním okně programu (obr. 66) a je možné začít se věnovat opravě případných nedostatků.



Obr. 66 Vzhled hlavního okna po načtení obou snímků.

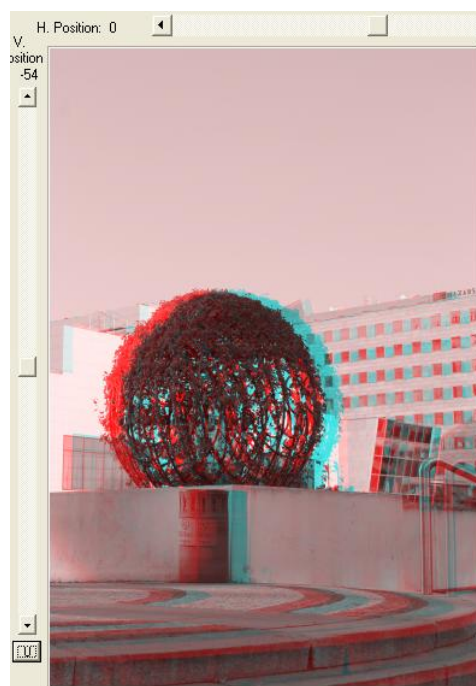
Pro zjednodušení porovnávání snímků je možné použít funkci *Easy Adjustment* v záložce *Adjust* hlavního okna. Tato funkce zobrazí oba snímky přes sebe v barvách anaglyfu v novém dialogovém okně, které obsahuje karty s funkcemi manuálních oprav a posuvnými lištami pro horizontální a vertikální posun snímků (obr. 67).



Obr. 67 Dialogové okno *Easy Adjustment*, jež usnadňuje opravu chyb ve snímcích.

Specifické zobrazení obou snímků umožňuje je snáze porovnat, a tak rozpoznat a napravit obsažené chyby. Karta *Basic* zahrnuje základní transformace, jako je rotace snímku a změna jeho velikosti, které napravit nežádoucí rotaci fotoaparátu kolem optické osy objektivu či použití „zoomu“ mezi jednotlivými snímky. Další dvě důležité funkce jsou obsaženy na kartách *V_Pers.* a *H_Pers.* Jedná se o funkce simulující otočení fotoaparátu kolem vertikální a horizontální osy odpovídajícím zkosením snímků.

Na fotografiích uvedených na obr. 67 je při pohledu pouhým okem patrný nežádoucí vertikální posun fotoaparátu mezi jednotlivými snímky. Na tuto odchylku ukazuje skutečnost, že sdružené obrazy bodů neleží na horizontálních přímkách – například vrchol keře na červeném snímku určeném pro pravé oko výrazně převyšuje odpovídající bod na snímku azurovém určeném pro levé oko. Tuto chybu je možné napravit úpravou vertikální pozice snímků nastavením posuvné lišty *V. Position* na vyhovující hodnotu – v tomto případě se jedná o hodnotu přibližně -54 pixelů (obr. 68).

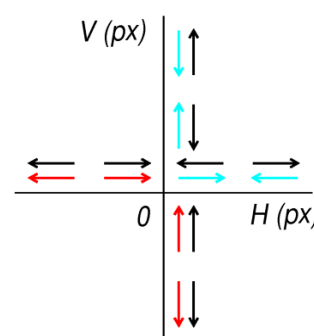


Obr. 68 Oprava vertikálního posunu snímků.

Zde je vhodné poznamenat, jak Stereo-Photo Maker posouvá snímky v závislosti na změně hodnot vertikální a horizontální pozice snímků (obr. 69).

Základem je posun azurového snímku při kladných hodnotách a červeného snímku při záporných hodnotách²². Například v našem případě dojde při snížení hodnoty vertikální pozice v záporných hodnotách k posunu červeného snímku směrem dolů, jejím zvýšením v záporných hodnotách by došlo k posunu červeného snímku opačným směrem.

V případě, že si přesto nejsme jisti odhalením všech obsažených chyb, je možné využít funkce *Auto Alignment* nacházející se v záložce *Adjust*. Tato funkce sesadí oba dva snímky tak, jako by byly vyfotografovány přesně podle dříve uvedených pravidel.

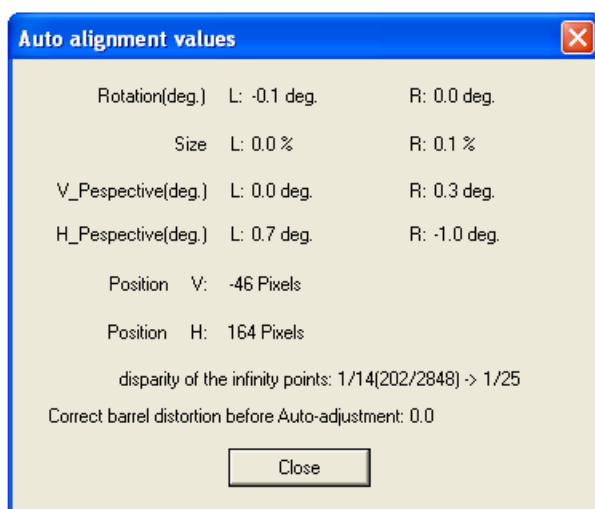


Obr. 69 Princip posunu snímků.

²² Při posunu jednoho ze snímků program ořezává výsledný obraz a zobrazuje tak pouze oblast, v níž se oba snímky překrývají. Může se proto zdát, že se při pohybu s jedním snímkem mírně posouvá i druhý snímek.

Po aplikaci funkce *Auto Alignment* se zobrazí dialogové okno *Auto Alignment Values* s hodnotami automatických oprav snímků (obr. 70). Pro možnost porovnání správnosti odhadů manuálních oprav s hodnotami automatické opravy odpovídá zde uvedené dialogové okno původním manuálně neupraveným fotografiím zobrazeným na obr. 66. V tomto případě u většiny parametrů StereoPhoto Maker mění hodnoty levého i pravého snímku zároveň tak, aby výsledná stereoskopická dvojice co nejpřesněji odpovídala správně vyfotografované stereoskopické dvojici snímků.

Z hodnot automatických oprav pro danou stereoskopickou dvojici snímků vyplývá, že při fotografování nedošlo k téměř žádné rotaci fotoaparátu kolem optické osy objektivu (*Rotation*) ani k přiblížení některého ze snímků (*Size*). Je vidět, že došlo k mírné rotaci kolem vertikální (*V_Perspective*) a horizontální (*H_Perspective*) optické osy objektivu fotoaparátu. Dále bylo v zájmu co nejlepšího výsledku třeba změnit pozici snímků, a to nejen vertikálně – posunem červeného snímku pro pravé oko o 46 pixelů směrem dolů, což jsme téměř odhadli již při manuálních opravách, ale také horizontálně – posunem azurového snímku o 164 pixelů směrem doprava. Hodnota deviace (*disparity of the infinity points*) snímku odpovídá přibližně 1/14 šířky snímku, což je o trochu více než požadovaná 1/25 či 1/30, a snímek se proto může jevit „příliš prostorový“.



Obr. 70 Dialogové okno *Auto Alignment Values* s hodnotami automatických oprav.



Obr. 71 Stereoskopická fotografie po automatické úpravě.

Anaglyfický snímek vytvořený z automaticky opravené stereoskopické dvojice fotografií je zobrazen na obr. 71.

Z vlastností sdružených průmětů uvedených v části 4.3 kapitoly 4 vyplývá, že se změnou vzdálenosti sdružených průmětů se mění i hloubka zobrazovaného bodu. Změna hodnot horizontální pozice snímků tudíž mění i vzdálenost, do níž se objekty zobrazí. Při pozorování manuálně opravené anaglyfické stereoskopické fotografie na obr. 68 brýlemi na anaglyf tak můžeme v očích pociťovat nepříjemné pocity napětí. Tato pocity pramení ze skutečnosti, že část prostoru obsaženého ve stereoskopické fotografii se zobrazuje před průmětů, v tomto případě rovinu papíru či obrazovky,

zatímco okraj fotografie leží právě v této rovině. Horizontálním posunem snímků dojde ke změně vzdáleností sdružených průmětů bodů a tudíž i ke změně hloubky zobrazovaných objektů. Na obr. 71 tak můžeme pozorovat prostorový obraz objektů, z nichž se všechny zobrazí za průmětnu. Fotografie pak působí jako bychom se na zobrazené objekty dívali z otevřeného okna.

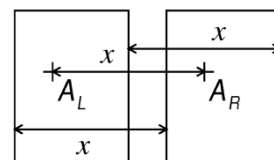
Z této podobnosti je také odvozen pojem tzv. stereoskopického okna, jenž je svázán s úpravami horizontální pozice snímků. Stereoskopické okno je rámeček ohraničující stereoskopickou fotografii, jenž má v prostoru na ní zachyceném také svou polohu [47]. Okraje fotografií tvořících stereoskopickou dvojici jsou vlastně sdruženými průměty stereoskopického okna. Jeho poloha je ovlivněna zmiňovanou horizontální pozicí snímků, a tak v prostoru zachyceném na stereoskopické fotografii na obr. 68 je stereoskopické okno umístěno jinde než na obr. 71. Jeho správným umístěním lze předejít nežádoucím nelogickým efektům a z nich pramenícím nepříjemným pocitům při pozorování stereoskopických fotografií. K těmto efektům dochází v případech, kdy stereoskopické okno protíná nějaký objekt, jenž ale leží k pozorovateli blíže než rovina tohoto okna [47].

Vyvarovat se takovým situacím znamená posunout a následně oříznout (tzv. sesadit) oba dva snímky tak, aby nejbližší bod zobrazovaného prostoru ležel v rovině stereoskopického okna nebo za ní. Jediné objekty, které mohou ze stereoskopického okna „vystupovat“, jsou ty, jež neprotínají okraje snímků. Jedná se tedy buď o objekty umístěné volně v prostoru (např. ptáci, letící míč, apod.) nebo objekty, které směřují k pozorovateli a navazují na objekt umístěný za rovinou stereoskopického okna, (např. větev stromu, hlava zvířete, přední lodi, apod.) [47].

Program StereoPhoto Maker funkcí *Auto Alignment* automaticky upraví i stereoskopické okno tím, že nastaví správnou hodnotu horizontální pozice snímků. Z tabulky hodnot automatických oprav (obr. 70) je vidět, že pro naši stereoskopickou dvojici snímků (obr. 66) program vyhodnotil jako správnou hodnotu horizontální pozice *H. Position* hodnotu 164 pixelů a posunutý snímek ořízl v závislosti na tomto posunutí tak, aby zůstala zobrazena pouze oblast, v níž se oba snímky překrývají.

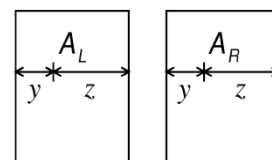
Při manuální úpravě stereoskopického okna je vhodné postupovat tak, jak je uvedeno níže. Nejprve najdeme nejbližší objekt prostoru, jenž protíná rovinu stereoskopického okna – pokud je takových bodů více, vybereme jeden z nich. Tento výběr umožňují vlastnosti bodů ležících v jedné rovině rovnoběžné se stereoskopickou bází, které jsou uvedeny v části 4.3 kapitoly 4. Takový bod musí ležet v rovině stereoskopického okna nebo za ní – zvolme nyní první z možností.

Dále uvažujme, že jsou obě fotografie umístěny vedle sebe tak, že levá fotografie se nachází vlevo a pravá vpravo – v opačném případě stačí pozice fotografií prohodit. Libovolný bod A leží v rovině stereoskopického okna právě tehdy, když vzdálenost jeho sdružených průmětů A_L, A_R je stejná jako vzdálenost sdružených průmětů bodů stereoskopického okna (viz část 4.3 kap. 4), tedy stejná jako např. vzdálenost sdružených průmětů jeho okrajů (obr. 72).



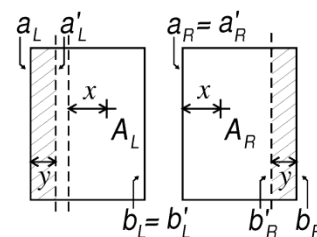
Obr. 72 Bod v rovině stereoskopického okna.

Z toho plyne, že bod A leží v této rovině právě tehdy, když vzdálenost průmětu A_L od levého průmětu jednoho z okrajů stereoskopického okna je stejná jako vzdálenost průmětu A_R od pravého průmětu stejného okraje (obr. 73). V okně manuálních úprav *Easy Adjustment* (obr. 67) se snímky zobrazí přes sebe a body, jejichž sdružené průměty splývají, jsou body ležící v rovině stereoskopického okna. Pro umístění libovolného bodu do roviny stereoskopického okna tedy stačí v dialogovém okně *Easy Adjustment* posunout fotografie tak, aby se průměty vybraného bodu překrývaly.



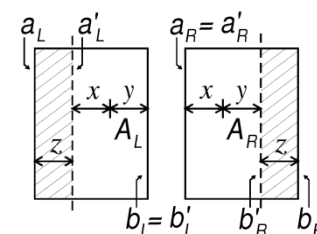
Obr. 73 Bod v rovině stereoskopického okna.

Pro úpravu fotografií přímo v hlavním okně (obr. 64) či v jiném programu, jenž neobsahuje obdobnou funkci, je nutné oříznout fotografie manuálně. Pro průměty vybraného nejbližšího bodu, označme ho opět písmenem A , a průměty okrajů stereoskopického okna, musí platit výše uvedené vztahy. Označme písmeny a, b levý a pravý okraj stereoskopického okna před oříznutím a písmeny a', b' levý a pravý okraj stereoskopického okna po oříznutí stereoskopické dvojice snímků. Zvolený bod A bude vyhovovat výše uvedeným podmínkám, pokud nejprve ořízneme levý snímek tak, aby $|a'_L A_L| = |a_R A_R|$ a $b'_L = b_L$, a poté ořízneme pravý snímek tak, aby $a'_R = a_R$ a $|b'_R b_R| = |a'_L A_L|$, což je ekvivalentní podmínce $|b'_R A_R| = |b'_L A_L|$ (obr. 74). Zjednodušeně lze říci, že stačí oříznout levý okraj levého snímku o vzdálenost průmětu A_R bodu A od pravého průmětu a_R levého okraje a stereoskopického okna a následně oříznout pravý okraj pravého snímku o stejnou vzdálenost²³. Pořadí snímků k ořezání lze prohodit.



Obr. 74 Ořez snímků.

V případě, že budeme chtít umístit vybraný bod A do prostoru za rovinou stereoskopického okna, stačí levý snímek oříznout tak aby $|a'_L A_L| > |a_R A_R|$ a $b'_L = b_L$ a pravý snímek tak, aby opět $a'_R = a_R$ a $|b'_R b_R| = |a'_L A_L|$ (obr. 75), čímž se zvětší jeho hloubka v zobrazovaném prostoru. V dialogovém okně *Easy Adjustment* to znamená umístit A_L, A_R tak, aby $A_L \neq A_R$ a současně aby průmět A_L ležel nalevo od A_R .

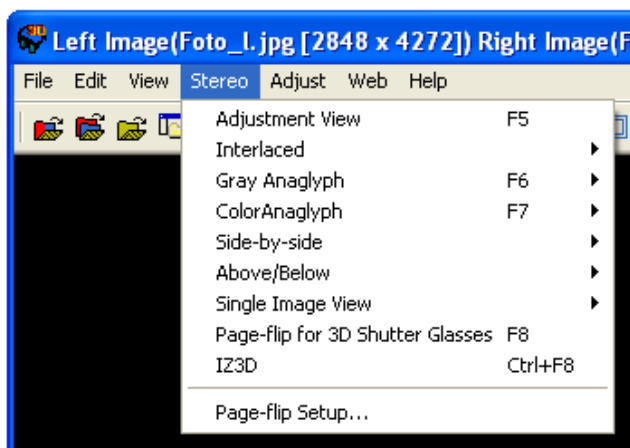


Obr. 75 Ořez snímků.

Polohu nejbližšího bodu vůči stereoskopickému oknu, a tím i umístění stereoskopického okna ale nelze volit zcela libovolně – příliš velká vzdálenost nejbližšího bodu zobrazovaného prostoru od roviny stereoskopického okna by opět vedla k nepříjemným pocitům při pozorování stereoskopické dvojice snímků. Bližší informace nejen k úpravám stereoskopické dvojice fotografií lze nalézt na internetových stránkách stereofotograf.eu v sekci návody a klub.stereofotograf.eu v sekci knihovna.

²³ Takové oříznutí je možné, pokud $|a_L A_L| > |a_R A_R|$, což platí pro každý bod A v případě, že jsou snímky správně umístěny, tj. levý snímek vlevo a pravý vpravo.

Po opravení veškerých chyb uvedenými postupy je možné stereoskopickou dvojici fotografií zobrazit pro pozorování některou z běžných i méně běžných metod. Ikony nejběžněji používaných metod se nacházejí přímo v horní liště hlavního okna, přičemž některé z nich lze dále specifikovat. Ostatní způsoby zobrazení stereoskopických dvojic pro méně běžné metody jejich pozorování nalezneme v záložce *Stereo* v horní liště hlavního okna (obr. 76).



Obr. 76 Obsah záložky *Stereo* se způsoby zobrazení stereoskopické dvojice snímků.

Například volbou *Color Anaglyph* a výběrem barevné kombinace brýlových filtrů *color (red/cyan)* je výsledkem níže uvedená stereoskopická fotografie (obr. 77), kterou lze pozorovat brýlemi na anaglyf přiloženými v závěru práce ze vzdálenosti blízké konvenční zrakové vzdálenosti o hodnotě $d = 25$ cm.



Obr. 77 Výsledná anaglyfická stereoskopická fotografie.

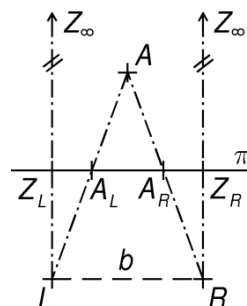
6 Metody pozorování stereoskopické dvojice obrazů

V předchozí kapitole byly popsány možné způsoby tvorby stereoskopické dvojice obrazů, kterou je možné pozorovat některou z metod uvedených v následujícím textu. Výsledný obraz vytvořený spojením dílčích obrazů stereoskopické dvojice vyvolává podobný prostorový vjem jako při skutečném binokulárním vidění. Mimo principů těchto metod jsou v této kapitole popsány také úpravy stereoskopické dvojice obrazů potřebné k tomu, aby ji bylo možné danou metodou pozorovat. Jedná se zejména o způsob umístění dílčích obrazů stereoskopické dvojice a případné změny jejich velikosti či barevnosti.

Mezi základní vlastnosti lidského vidění, které nám umožňují vnímat prostorový efekt, patří vzdálenost očí, jejich akomodace a konvergence očních os. Oddělení akomodace a konvergence, dvou úzce spjatých očních aktivit, se ke spojení dílčích obrazů stereoskopické dvojice využívá hned u dvou způsobů pozorovacích metod – metody rovnoběžných a metody zkřížených očních os. Jejich hlavní výhodou je absence jakýchkoliv pozorovacích pomůcek, avšak nevýhodou je nepřístupnost metod pro některé pozorovatele, kteří zkrátka nejsou schopni vlastními silami oddělit zmíněné dvě oční činnosti. Ostatní metody využívají k vytvoření prostorového obrazu rozličných optických pomůcek – zrcadel, hranolů a čoček, brýlí s barevnými či polarizovanými filtry a různých typů prohlížeček neboli stereoskopů.

6.1 Metoda rovnoběžných očních os

Chceme-li pozorovat stereoskopickou dvojici obrazů metodou rovnoběžných očních os²⁴, je třeba umístit jednotlivé obrazy stereoskopické dvojice vedle sebe tak, aby obraz určený pro levé oko ležel nalevo a pro pravé oko napravo. Zároveň je třeba upravit velikost obrazů tak, aby při pozorování sružených průmětů zobrazených bodů byly optické osy očí rovnoběžné nebo se za průmětnou sbíhaly²⁵. Výsledný prostorový obraz se tak zobrazí za rovinu, v níž leží obrazy stereoskopické dvojice, a jeví se větší v porovnání s původními obrazy stereoskopické dvojice. Z požadavku na rovnoběžnost, popř. sbíhavost očních os vyplývá, že hodnota maximální šířky s jednoho obrazu je menší nebo rovna hodnotě stereoskopické báze b (obr. 78). Důvodem je skutečnost, že čím vzdálenější je zobrazovaný, popř. pozorovaný bod, tím menší je konvergenční úhel sevřený optickými osami očí. Nulový konvergenční úhel odpovídá bodům v nekonečnu, optické osy očí jsou při pozorování takových bodů rovnoběžné a vzdálenost sružených průmětů takových bodů je rovna hodnotě stereoskopické báze b (obr. 78).

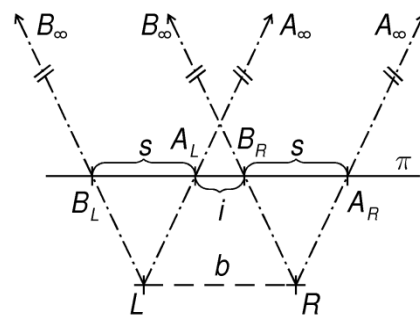


Obr. 78 Sružené průměty bodů.

²⁴ Její název je odvozen z anglického „parallel eyes“.

²⁵ Oči člověka nejsou uzpůsobeny k tomu, aby se jejich optické osy rozbíhaly.

Pro odvození předchozího tvrzení o maximální možné šířce s obrazů stereoskopické dvojice předpokládejme oči pozorovatele v bodech L, R a rovinu π obsahující stereoskopickou dvojici obrazů (obr. 79). Označme písmeny d pozorovací vzdálenost, tedy $d = |\overline{LR}|, \pi|$, a b stereoskopickou bází, tedy $b = |LR|$. Dále v prostoru uvažujme dva body A, B takové, že levý průmět A_L bodu A dopadne na pravý okraj levého obrazu a podobně pravý průmět B_R bodu B dopadne na levý okraj pravého obrazu. Navíc pro zachování obecnosti úvahy předpokládejme, že vnitřní okraje obrazů nejsou totožné, tedy že $|A_L B_R| = i \neq 0$. Maximálních možných vzdáleností $|A_L B_L|$ a $|A_R B_R|$ levých a pravých sdružených průmětů bodů A, B bude dosaženo, pokud body A, B budou ležet v nekonečnu. Sestrojíme-li zbývající průměty A_R, B_L takových bodů A, B , získáme vnější okraje obrazů stereoskopické dvojice. Pro šířku s obrazů stereoskopické dvojice a vzdálenost i jejich vnitřních okrajů platí $s + i = b$, kde $s = |A_L B_L| = |A_R B_R|$, $i = |A_L B_R|$, $b = |A_L A_R| = |B_L B_R|$. Tedy pro $i \neq 0$ je $s < b$, pro $i = 0$ lze volit $s \leq b$.

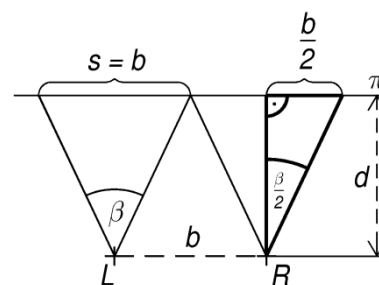


Obr. 79 Omezení šířky obrazů stereoskopické dvojice.

Předpokládejme nyní, že pozorovací vzdálenost d je rovna konvenční zrakové vzdálenosti, tedy $d = 25$ cm, a stereoskopická báze b je rovna standardní hodnotě 64 mm. Necht' navíc s nabývá největší možné hodnoty, tedy $s = b = 64$ mm.

Pak pro pozorovací úhel β , tj. úhel $\beta = \sphericalangle A_L L B_L = \sphericalangle A_R R B_R$ (obr. 80) platí rovnost

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{b}{2d} \quad (21)$$



Obr. 80 Výpočet maximální hodnoty pozorovacího úhlu β .

a po dosazení je $\beta \doteq 15^\circ \ll \varphi = 50^\circ$ (viz část 3.2.4 kap. 3). Pozorovací úhel je výrazně menší než zorný úhel lidského oka, tedy maximální hodnotu šířky s obrazů stereoskopické dvojice není závislá na zorném úhlu φ lidského oka.

Pro odvození nejmenší možné hodnoty pozorovací vzdálenosti d uvažujme maximální možnou šířku s obrazů stereoskopické dvojice, tedy $s = b = 64$ mm, a pozorovací úhel o maximální možné hodnotě, tedy $\beta = \varphi = 50^\circ$. Dosazením uvedených hodnot do rovnice (21) získáme minimální pozorovací vzdálenost o hodnotě $d \doteq 7$ cm. Pozorovací vzdálenost by se tedy v závislosti na pozorovacích podmínkách, aktuálních potřebách a schopnostech pozorovatele měla pohybovat v rozmezí přibližně od 7 do 25 cm.

Co se týče konkrétní volby hodnoty šířky s obrazů stereoskopické dvojice, je vhodné v rámci zachování co nejvyšší kvality výsledného stereoskopického obrazu volit spíše větší než menší hodnoty s . V případě standardní hodnoty stereoskopické báze $b = 64$ mm je možné zvolit šířku s obrazů například 62 mm se vzdáleností 2 mm mezi obrazy. Tím bude zajištěno, že nedojde k divergenci optických os očí a

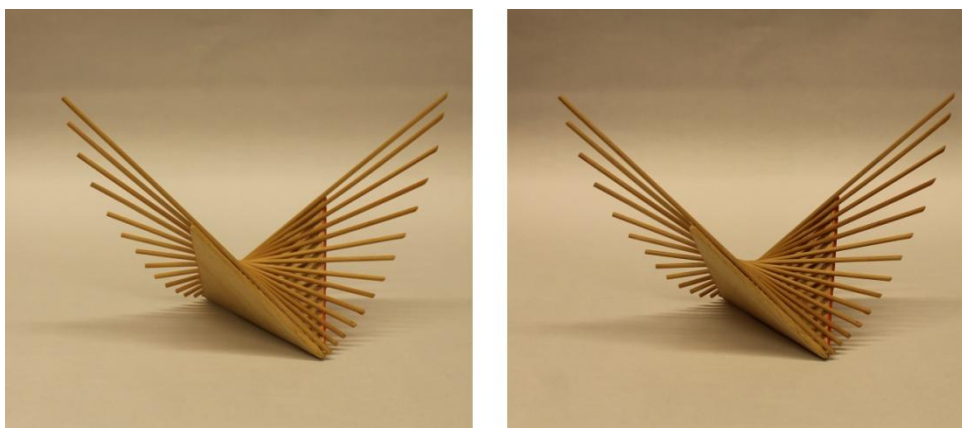
zároveň bude umožněn vznik co nejkvalitnějšího prostorového obrazu. V případě vynechání mezery mezi obrazy stereoskopické dvojice lze volit šířku s obrazů stereoskopické dvojice menší nebo rovnou hodnotě stereoskopické báze b , tedy pro standardní hodnotu stereoskopické báze jde o šířku $s = 64$ mm.

Při prohlížení obrazů stereoskopické dvojice je třeba zaměřit optické osy očí „do nekonečna“, avšak zaostřit na vzdálenost, v níž jsou obrazy umístěny. První z těchto kroků pravděpodobně nebude činit pozorovateli žádné obtíže, ale následné zaostření očí na jinou vzdálenost, než na kterou jsou jejich optické osy zaměřeny, může být pro necvičené oči náročné. Oddělení akomodace a konvergence je podle [27, s. 22] možné si nacvičit na následujícím příkladě. Na list papíru nakreslíme dva body představující stereoskopickou dvojici obrazů tak, aby vzdálenost těchto dvou bodů nebyla větší než stereoskopická báze b (obr. 81). Mezi oči vložíme neprůhlednou přepážku tak, aby každé oko vidělo jen jeden z těchto bodů. Zaměřením optických os očí tak, aby každá směřovala na příslušný bod, tyto body po chvíli pozorování splynou v jeden neostrý bod. Nyní je třeba zaostřit na rovinu papíru a zobrazený bod se stane ostrým. Získaný stereoskopický obraz je prostorový, ale vzhledem k jeho jednoduchosti tato prostorovost zaniká. Užitím neprůhledné přepážky oddělující stereoskopickou dvojici jsou eliminovány rušivé postranní obrazy, jež doprovázejí získaný stereoskopický obraz po jejím odstranění.



Obr. 81 Jednoduchá stereoskopická dvojice obrazů pro nácvik metody rovnoběžných očních os.

Následující stereoskopickou dvojici fotografií (obr. 82), jež byla upravena v programu StereoPhoto Maker a zobrazena příkazem *Side-by-side* v záložce *Stereo*, je možné pozorovat metodou rovnoběžných optických os.

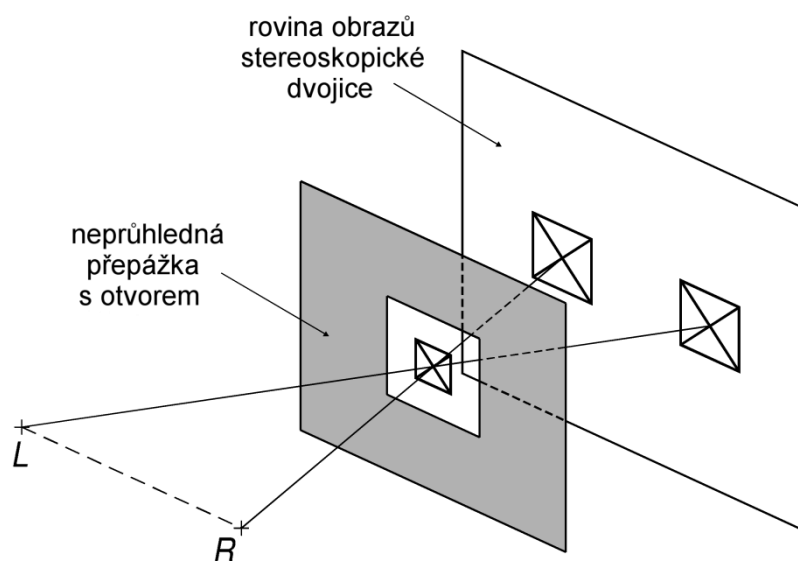


Obr. 82 Stereoskopická fotografie zborcené přímkové plochy k pozorování metodou rovnoběžných očních os.

6.2 Metoda zkřížených očních os

Metoda zkřížených očních os²⁶ je založena na podobném principu jako předchozí metoda, pouze s rozdílem v umístění dílčích obrazů stereoskopické dvojice vedle sebe tak, aby obraz určený pro levé oko ležel napravo a ten pro pravé oko nalevo. Pozorováním stereoskopické dvojice níže popsanou metodou dojde ke spojení obrazů, které vyvolá výsledný prostorový obraz. Ten se zobrazí před průmětnou a bude se zdát menší než dílčí obrazy stereoskopické dvojice.

Tato metoda je považována za snáze osvojitelnou, avšak po tom, co se pozorovatel naučí používat metodu zkřížených očních os, bývá osvojení metody rovnoběžných očních os často problematické [27, s. 25]. K nácvičku metody zkřížených očních lze použít papírovou pomůcku vlastní výroby [27, s. 23] – do tvrdšího papíru vystříhneme otvor (obr. 83) a papír následně umístíme před rovinu stereoskopické dvojice obrazů. Přesnou polohu pomocného papíru volíme tak, aby při pohledu jedním okem byl vidět jen ten obraz, jenž je pro dané oko určený – tedy při pohledu pravým okem jen obraz nalevo, při pohledu levým okem pouze obraz napravo. Výsledkem by mělo být spojení obou obrazů a vytvoření stereoskopického obrazu v místě, kde se optické paprsky obou očí protínají, tedy v prostoru otvoru v papírové pomůcce (obr. 83).

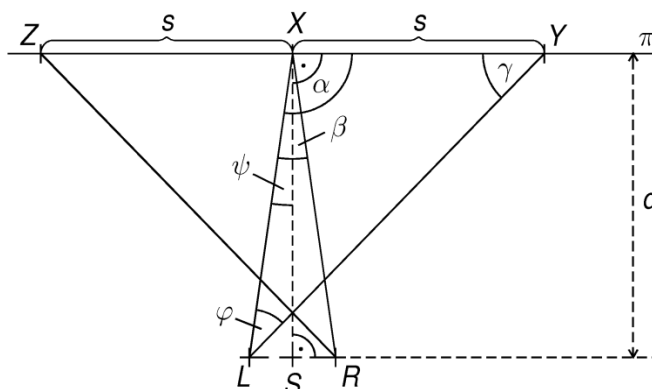


Obr. 83 Princip nácvičku pozorování stereoskopických obrazů metodou zkřížených očních os.

Výhodou pozorovací metody zkřížených očních os je absence závislosti šířky s dílčích obrazů stereoskopické dvojice na stereoskopické bázi b . Jak je odvozeno níže, veličina s je u této metody omezena pouze velikostí φ zorného pole lidského oka.

²⁶ Její název je odvozen z anglického „crossed eyes“.

Uvažujme, že pozorujeme dvojici stereoskopických obrazů metodou zkřížených očních os z konvenční zrakové vzdálenosti $d = 25$ cm. Zjednodušené zorné pole oka má tvar rotačního kužele s vrcholem v uzlovém bodě oka, osou rotace ve směru pohledu, tedy totožnou s optickou osou oka, a vrcholovým úhlem $\varphi = 50^\circ$ (viz část 3.2.4 kap. 3). Dále předpokládejme, že mezi obrazy není žádná mezera, tedy vnitřní okraj jednoho obrazu je zároveň vnitřním okrajem druhého obrazu (obr. 84). Ve skutečnosti takové polohy není možné dosáhnout, ale lze ji považovat za limitní polohu při zmenšování mezery mezi obrazy a odvodit s její pomocí maximální hodnotu šířky s obrazu stereoskopické dvojice.



Obr. 84 Maximální šířka obrazů stereoskopické dvojice pro metodu zkřížených očních os.

Hodnota konvergenčního úhlu β bodu X v konvenční zrakové vzdálenosti $d = 25$ cm je přibližně $14,6^\circ$ (viz část 3.3.3 kap. 3), tedy pro úhel ψ v $\triangle LXS$ platí $\psi = 7,3^\circ$. V $\triangle LXY$ je zorný úhel $\varphi = 50^\circ$, $\alpha = 90^\circ + \psi = 97,3^\circ$ a $\gamma = 180^\circ - \alpha - \varphi = 32,7^\circ$. Ze sinové věty pro $\triangle LXY$ vyplývá rovnost poměrů

$$\frac{s}{\sin \varphi} = \frac{|LX|}{\sin \gamma}, \text{ tedy } s = \frac{|LX|}{\sin \gamma} \cdot \sin \varphi. \quad (22)$$

Z Pythagorovy věty v pravoúhlém $\triangle LXS$ je

$$|LX| = \sqrt{|LS|^2 + |SX|^2} = \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + d^2} = \sqrt{3,2^2 + 25^2} \text{ cm} \doteq 25,2 \text{ cm}. \quad (23)$$

Pro šířku s obrazů stereoskopické dvojice pak platí

$$s = \frac{25,2 \text{ cm}}{\sin 32,7^\circ} \cdot \sin 50^\circ = 35,7 \text{ cm}. \quad (24)$$

Obrazy stereoskopické dvojice, které hodláme pozorovat metodou zkřížených očních os, tedy mohou nabývat mnohem větších rozměrů než u předchozí metody. Při přípravě stereoskopické dvojice tak můžeme využít například celé šířky papíru či monitoru počítače.

Na obr. 85 je zobrazena stereoskopická dvojice fotografií, která byla upravena v programu StereoPhoto Maker a zobrazena příkazem *Side-by-side* jako pro metodu rovnoběžných očních os. Následně byly pozice fotografií zaměněny klávesovou zkratkou X, a tak je lze pozorovat metodou zkřížených očních os.



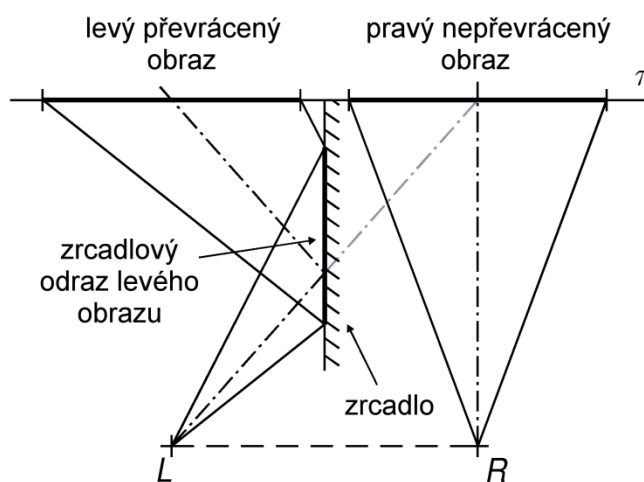
Obr. 85 Stereoskopická fotografie pražského kongresového centra, kterou je možné pozorovat metodou zkřížených očních os.

6.3 Metoda s použitím zrcadla

Tato metoda pozorování stereoskopické dvojice obrazů je založena na pozorování jednoho z obrazů přímo a druhého odrazem v zrcadle. Pro kvalitní zobrazení prostorového vjemu bez nežádoucích efektů zdvojení odraženého obrazu je nejlepší použít pokovené zrcadlo, avšak pro vyzkoušení a osvojení této metody lze užít i snáze dostupné skleněné zrcadlo, například kosmetické zrcátko.

Obraz, který hodláme pozorovat odrazem v zrcadle, je nutné nejprve zrcadlově převrátit – počítačové zpracování obrazů je zde tudíž velkou výhodou, poté oba obrazy umístíme vedle sebe podobně jako v předchozích metodách. Mezi oči, kolmo k rovině obrazů, umístíme zrcadlo tak, aby jeho odrazová plocha směřovala k zrcadlově převrácenému obrazu. Jedno oko sleduje původní zrcadlově nepřevrácený obraz přímo, druhé pozoruje odraz zrcadlově převráceného obrazu v přiloženém zrcadle.

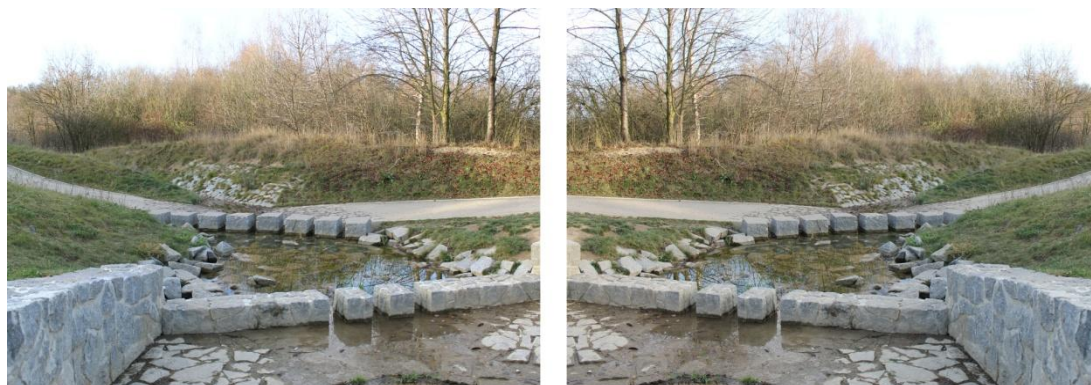
Na obr. 86 je v půdorysu zobrazeno nastavení zrcadla při pozorování stereoskopické dvojice obrazů například



Obr. 86 Metoda s použitím zrcadla.

na monitoru počítače. V tomto případě je levý obraz stereoskopické dvojice zrcadlově převrácen a umístěn nalevo, zatímco pravý, nepřevrácený obraz je umístěn napravo. Zrcadlo je třeba vložit mezi oči umístěné v bodech L, R kolmo k rovině obrazů π tak, aby jeho odrazová plocha směřovala k převrácenému levému obrazu. Oči poté nasměrujeme tak, jako bychom hleděli oběma očima na pravý obraz. Avšak díky použití zrcadla vidí levé oko odraz převráceného levého obrazu v zrcadle, zatímco pravé oko hledí přímo na pravý obraz.

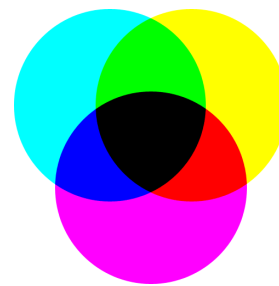
Následující stereoskopickou dvojici fotografií²⁷ (obr. 87), jež byly upraveny v programu StereoPhoto Maker a zobrazeny příkazem *Mirror Left* v nabídce *Side-by-side* záložky *Stereo*, je možné pozorovat s použitím zrcadla k odrazu levého snímku.



Obr. 87 Stereoskopická fotografie vodní stavby u potoka, kterou lze pozorovat s použitím zrcadla k odrazu levého snímku.

6.4 Anaglyf

K vytvoření prostorového dojmu touto metodou pozorování stereoskopické dvojice obrazů se využívá vlastnosti doplňkových barev, jejichž aditivním smísením vznikne barva černá. Na sousedním diagramu²⁸ (obr. 88 – [48]) jsou v „trojúhelnících“ zobrazeny barvy základní – červená, zelená, modrá, a v „půlkruzích“ barvy k nim doplňkové – azurová, purpurová, žlutá. Vzájemně doplňkové barvy, např. červená a azurová, jsou umístěny naproti sobě a jejich složením vznikne černá barva uprostřed diagramu.



Obr. 88 Diagram.

Každý z obrazů stereoskopické dvojice je nutné pomocí vhodného počítačového programu²⁹ převést do jedné ze vzájemně doplňkových barev – nejčastější barevnou

²⁷ Stereoskopickou dvojici je možné pozorovat i s odrazem pravého snímku, avšak výsledný obraz bude zrcadlově převrácený, což by v některých případech mohlo být nežádoucí.

²⁸ Diagram ve skutečnosti zobrazuje subtraktivní (odčítací) skládání barev světla, jež odpovídá aditivnímu (sčítacímu) skládání barev například při tisku.

²⁹ Pro úpravu fotografií mohu doporučit volně šiřitelný program GIMP dostupný na [49], popř. jiný obrázkový editor s podobnými funkcemi. Rýsované obrazy je vhodné převést do vhodných barev už při jejich tvorbě např. v programu DesignCAD či Rhinoceros.

kombinací je červená + azurová, ale lze se setkat i s jinými kombinacemi³⁰. Poté je třeba umístit oba obrazy přes sebe tak, aby sdružené průměty bodů, jež mají ležet v rovině stereoskopického okna, splývaly³¹. Výsledný obraz pozorujeme brýlemi s filtry v doplňkových barvách umístěnými tak, aby každé oko vidělo jen obraz pro něj určený – tedy s levým, resp. pravým filtrem v barvě doplňkové k barvě levého, resp. pravého obrazu. Pozorovací vzdálenost volíme blízkou konvenční zrakové vzdálenosti 25 cm, popř. ji lze podle aktuálních potřeb upravit.

Pokud se jedná o stereoskopickou dvojici fotografií, je třeba k její úpravě do barev anaglyfu použít vhodný počítačový program. Například program StereoPhoto Maker nabízí v záložce *Stereo* hned několik typů anaglyfu pro různé kombinace barevných brýlových filtrů – černobílý anaglyf v nabídce *Gray Anaglyph*, ale také různé druhy barevného anaglyfu v nabídce *Color Anaglyph*. Při úpravě stereoskopických dvojic fotografií je navíc nutné ohlídat, aby nebylo porušeno stereoskopické okno (viz část 5.2.5 kap. 5). Při rýsování stereoskopických dvojic obrazů porušení stereoskopického okna není příliš časté – zobrazení výsledného stereoskopického obrazu před průmětnu např. u modelů těles nemusí být na závadu (viz obr. 49 a 50 v části 5.1 kap. 5).

Následující dvě stereoskopické fotografie (obr. 89) byly upraveny v programu StereoPhoto Maker – levá, resp. pravá fotografie byla zobrazena příkazem *color(red/cyan)*, resp. *Dubois(red/cyan)* v nabídce *Color Anaglyph* záložky *Stereo* a obě lze pozorovat brýlemi na anaglyf přiloženými v závěru práce. Každý ze zvolených způsobů zobrazení jinak ovlivňuje výsledné barvy, proto je vhodné vyzkoušet více způsobů zobrazení a vybrat ten nejvhodnější.



Obr. 89 Anaglyfické fotografie, jejichž nedostatkem je změna barevnosti zobrazených objektů.

³⁰ Například kombinace barev červená + zelená, popř. žlutá + purpurová, které však nejsou doplňkové a jejich složením tudíž nevzniká přímo černá barva.

³¹ Při vkládání obou obrazů jako jednotlivých vrstev do jednoho výsledného obrazu je v užívaném programu nutné upravit vlastnosti obou vrstev tak, aby se překrývající se barvy „sčítaly“, a tedy v místech průniku např. červené a azurové čáry vznikla barva černá. V programu GIMP toho lze dosáhnout změnou režimu obou vrstev z „normální“ na „násobení“.

6.5 Použití stereoskopu

6.5.1 Historické vs. moderní stereoskopy

Jak bylo uvedeno v kapitole 2 týkající se historického vývoje stereoskopie, ke spojení obrazů stereoskopické dvojice se dříve používaly zrcadlové nebo čočkové stereoskopy jako například Wheatstoneův zrcadlový stereoskop nebo Brewsterův či Holmesův čočkový stereoskop (viz obr. 11 až 13 v kap. 2), které jsou dnes spíše sběratelskou záležitostí.



Obr. 90 Starší stereoskopy – vlevo Meoskop československé výroby, vpravo americký Red Button.

V současnosti můžeme k prohlížení stereoskopických obrazů využít rozličných druhů stereoskopů neboli prohlížeček, ať už se jedná o ty z počátku 2. poloviny 20. století (obr. 90 – s využitím [50], [51]) nebo o jejich modernější verze (obr. 91 – s využitím [52], [53], [54]). Některé ze stereoskopů jsou konstruovány pro prohlížení diapozitivů vložených v rámečcích či tzv. stereokotoučcích, jinými lze prohlížet vytištěné fotografie, některé lze využít pro obojí.



Obr. 91 Současné možnosti pozorování stereoskopické dvojice: prohlížečky firmy Loreo (vlevo a vpravo) a 3-D World (uprostřed).

Na trhu jsou dostupné dokonce i praktické skládací prohlížečky stereoskopických fotografií vyrobené z papíru či plastu, jež po složení plně nahrazují neskladný stereoskop (obr. 92 – s využitím [55], [56], [57]).



Obr. 92 Praktické papírové skládací prohlížečky k prohlížení diapozitivů (vlevo), vytištěných fotografií (vpravo) či fotografií zobrazených na monitoru (uprostřed).

6.5.2 Prohlížečka vlastní výroby

Jednoduchou čočkovou prohlížečku či brýle k prohlížení stereoskopických fotografií je možné si vyrobit vlastními silami pomocí běžně dostupných materiálů s výjimkou ploskovypuklých čoček, jež je možné zakoupit například v některém z internetových obchodů.

Zamýšlíme-li vyrobit si vlastní prohlížečku stereoskopických dvojic fotografií, jako první bychom se měli rozhodnout pro typ vyráběné prohlížečky – zda zvolíme nejjednodušší variantu v podobě brýlí, které se budou u očí držet rukou, případně brýlí s bočnicemi, které bude možné nasadit jako normální brýle, nebo složitější prohlížečku podobnou některé na obr. 92. Zvolenému typu prohlížečky je následně třeba přizpůsobit rozměry stereoskopické dvojice fotografií.

Brýle s čočkami jsou univerzálně použitelné, jelikož pozorovatel může „zaostřit“ změnou vzdálenosti nasazených brýlí od předlohy. Výměna stereoskopické dvojice fotografií pozorované těmito brýlemi je velmi snadná a lze pomocí nich pozorovat jak vytištěné fotografie, tak fotografie zobrazené na monitoru počítače³². Jediným úskalím pozorování stereoskopické dvojice obrazů takovými brýlemi je nutnost nastavit je do polohy, kdy je jejich báze, tedy spojnice středů brýlových čoček, rovnoběžná sází stereoskopické dvojice.

Výhodou složitějších prohlížeček s upevněnými stereoskopickými fotografiemi k pozorování je právě neměnná poloha spojnice středů použitých čoček a báze stereoskopické dvojice. Většina takových prohlížeček také umožňuje pozorovateli „zaostřit“ na pozorovanou stereoskopickou dvojici fotografií jejím různě realizovaným oddálením od pozorovatele. Nevýhodou některých těchto prohlížeček je nedostatečné osvětlení pozorované stereoskopické dvojice, jiné prohlížečky umožňují pozorování jen jednoho daného formátu stereoskopické dvojice, a tomu je třeba své fotografie přizpůsobit.

Podobně jako při tvorbě stereoskopických dvojic fotografií platí i při jejich pozorování, že prostorový dojem jimi vyvolaný je nejpřirozenější, pokud je úhlopříčka fotografie rovna ohniskové vzdálenosti čoček použité prohlížečky. Této podmínce vyhovuje mnoho různých rozměrů fotografie, přičemž některé z nich jsou běžnější než jiné, např. formát 4:3 či širokoúhlý záběr 16:9³³. Vzhledem k tomu, že změnit velikost fotografie je při jejich zpracování na počítači velmi snadné, a naopak čočky jsou dostupné pouze v omezeném výběru ohniskových vzdáleností, je vhodné volit velikost fotografie podle ohniskové vzdálenosti zvolených čoček.

Snímky stereoskopické dvojice lze umístit těsně vedle sebe, nebo mezi nimi ponechat mezeru. Ať už se rozhodneme pro jakoukoli variantu, rozteč těchto snímků, tj. vzdálenost levých, resp. pravých okrajů snímků po všech úpravách, musí být nejvýše rovna stereoskopické bázi, rozteč snímků by zároveň neměla být příliš malá. V praxi se často používá rozteč přibližně o 2 mm menší než stereoskopická báze b ,

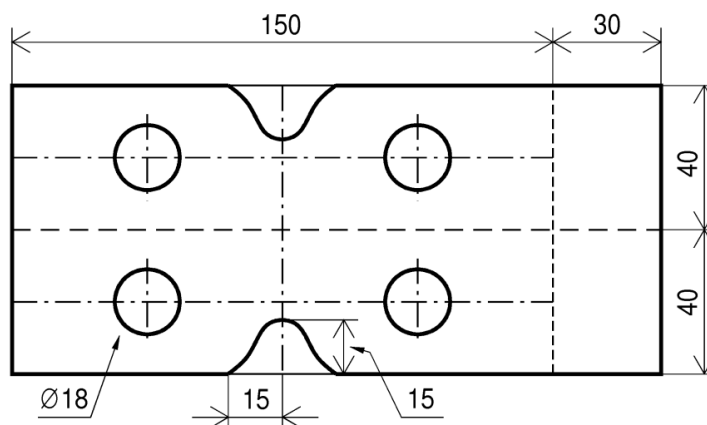
³² Stereoskopický obraz, jenž vzniká pozorováním stereoskopických dvojic fotografií na monitoru počítače, je ale vzhledem k omezení velikosti těchto fotografií velmi nekvalitní.

³³ Poměry vyjadřují šířku fotografie k její výšce.

jelikož spojení takto umístěných snímků bývá snadnější. Ohnisková vzdálenost čoček brýlí či prohlížečky hraje roli i při samotném pozorování stereoskopické fotografie – vzdálenost čoček od pozorované předlohy by měla být přibližně rovna právě jejich ohniskové vzdálenosti. Může být ale ovlivněna zrakovými vadami pozorovatele, proto je výhodné zvolit takovou prohlížečku, u níž je možné tuto vzdálenost v průběhu pozorování změnit a tím „zaostřit“ podle aktuálních potřeb pozorovatele.

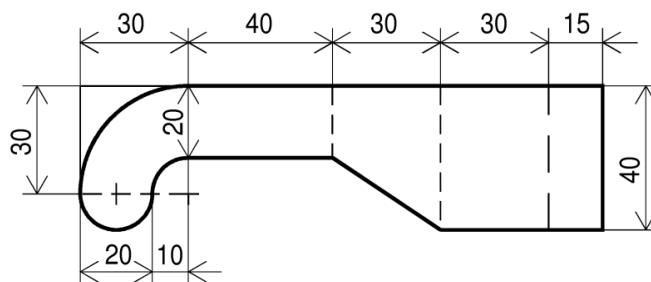
Jako příklad uvažujme, že hodláme vyrobit jednoduché čočkové brýle k prohlížení stereoskopických dvojic fotografií s párem plastových čoček ohniskové vzdálenosti 75 mm o průměru 18 mm s okrajem šířky 2 mm navíc pro jejich přilepení. Tyto čočky je možné zakoupit v e-shopu internetového portálu www.3dakt.cz.

Nejprve z tvrdšího papíru vystříhneme obdélník o rozměrech 180 x 80 mm (obr. 93), jenž je základem pro brýle o výsledných rozměrech 150 x 40 mm po straně s místem k uchopení o rozměrech 30 x 40 mm a výřezem pro nos uprostřed. Do obdélníku je dále třeba vystříhnout 4 kruhové otvory o průměru 18 mm pro vložení čoček tak, aby vzdálenost středů těchto čoček byla rovna standardní stereoskopické bázi 64 mm. Čočky pak dodatečně zafixujeme podélným přeložením obdélníku a slepením obou jeho stran. Otvor pro nos je možné do brýlí vystříhnout ještě před jejich slepením. V opačném případě je vhodné vyznačit křivku výřezu na lícovou stranu papíru, a podle ní otvor vystříhnout až po jeho slepení.



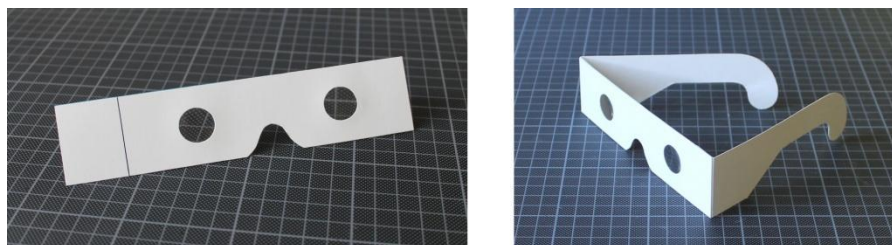
Obr. 93 Rozměry šablony pro vlastní výrobu čočkových brýlí.

Namísto postranního úchopu brýlí k nim můžeme připojit papírové bočnice (obr. 94) a používat je nasazené jako běžné brýle (obr. 95). Vypuklá strana čoček při pozorování musí směřovat směrem od pozorovatele.



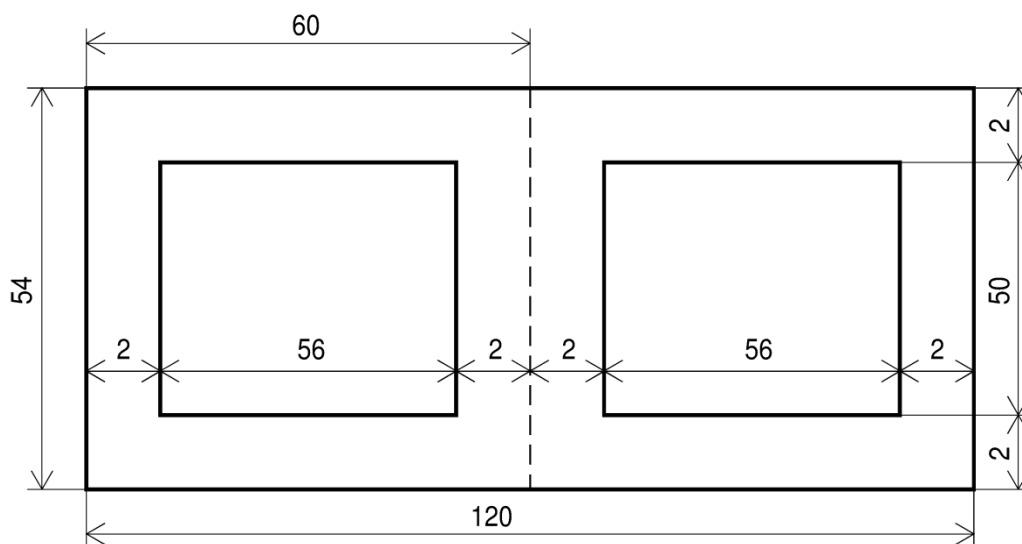
Obr. 94 Rozměry šablony pro výrobu brýlových bočnic.

Tímto postupem byly vyrobeny i čočkové brýle k prohlížení stereoskopických dvojic fotografií přiložené v závěru této práce. Šablony brýlí a bočnic ve skutečné velikosti, které je možné zkopírovat a brýle tak s jejich pomocí vyrobit velmi snadno, se nacházejí na str. 88 a 89 v přílohách č. 1 a 2 této práce.



Obr. 95 Čočkové brýle s místem k uchopení (vlevo) a s bočnicemi (vpravo).

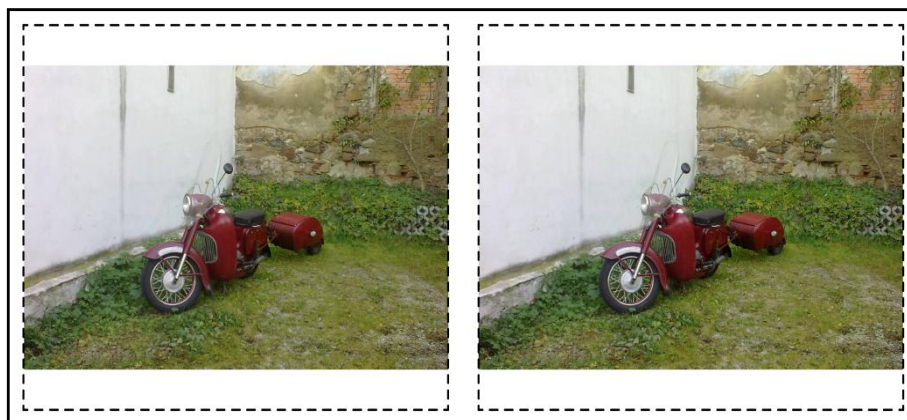
S těmito čočkovými brýlemi se stereoskopickou bází 64 mm je ideální pozorovat stereoskopickou dvojici obrazů s roztečí³⁴ přibližně o 2 mm menší než je hodnota stereoskopické báze, tedy s roztečí cca 62 mm. Pokud bychom hodlali vytvořit například sérii „kartiček“ s obrazy k pozorování, je v zájmu snazšího spojení obrazů a jejich příjemnějšího pozorování vhodné ponechat volné místo kolem dílčích obrazů stereoskopické dvojice jako „rámeček“ výsledného obrazu. Např. při zvolené šířce kartiček 120 mm (obr. 96) s okraji dílčích obrazů o šířce 2 mm vychází při požadované rozteči 62 mm šířka s dílčího obrazu stereoskopické dvojice o hodnotě 56 mm.



Obr. 96 Rozměry „kartičky“ pro umístění stereoskopické dvojice fotografií.

³⁴ Rozteč snímků = vzdálenost sdružených průmětů stereoskopického okna, tedy např. vzdálenost levých, popř. pravých okrajů snímků.

Úhlopříčku u snímků stereoskopické dvojice je třeba v zájmu co nejpřirozenějšího prostorového dojmu zvolit rovnou ohniskové vzdálenosti čoček použité prohlížečky (viz část 5.2.3), v tomto případě se jedná o hodnotu 75 mm. Pro maximální možnou hodnotu výšky v fotografií stereoskopické dvojice podle Pythagorovy věty platí $v = \sqrt{u^2 - s^2} = \sqrt{75^2 - 56^2} \text{ mm} \doteq 50 \text{ mm}$. V případě horního a dolního okraje stereoskopické dvojice o uvedené šířce 2 mm je tedy v zájmu zachování co největší plochy využitelné pro umístění fotografie vhodné zvolit výšku kartiček o hodnotě $(50 + 2 + 2) \text{ mm} = 54 \text{ mm}$. Fotografie na obr. 97 odpovídají výše uvedeným podmínkám, pro přehlednost je zde zobrazen i okrajový obdélník, jenž ohraničuje oblast výsledné kartičky po případném vystřížení. Čárkovaná čára naznačuje okraje oblasti pro vložení snímků. Stereoskopickou dvojici fotografií lze pozorovat čočkovými brýlemi přiloženými v závěru práce z přibližné vzdálenosti 75 mm v závislosti na zrakových vlastnostech a pozorovacích schopnostech pozorovatele.



Obr. 97 Stereoskopická dvojice fotografií vhodná k pozorování čočkovými brýlemi. Dvojici lze pozorovat také metodou rovnoběžných očních os.

6.6 Moderní technologie

Jedná se o technologie zobrazení a pozorování nejen stereoskopických dvojic fotografií, ale hlavně 3D filmu, které se dnes výrazně prosazují zejména v zábavním průmyslu – 3D kino je již běžně dostupným způsobem relaxace a 3D televizi lze zakoupit v téměř každém obchodě s elektronikou. Principy moderních postupů jak na ploše vykouzlit dojem třetího rozměru, jejich výhody a nevýhody jsou shrnuty v následujících několika odstavcích. Hlavní zásada je ale stále stejná – zajistit, aby každý z dvojice obrazů vidělo právě jen to oko, pro něž byl daný obraz vytvořen.

Nejstarší, ale dosud stále využívanou metodou zajišťující dodání správného obrazu každému z očí, je již zmiňovaný anaglyf. Jasnou výhodou, která anaglyf udržuje stále populární, je finanční nenákladnost jak tvorby anaglyfu a jeho prezentace (formou tištěných materiálů, zobrazení na PC a TV či projekcí), tak pomůcek k jeho pozorování – cena papírových brýlí s barevnými filtry se na

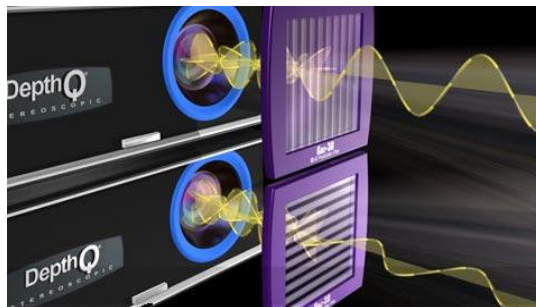
internetových obchodních portálech, např. www.3dakt.cz či www.nc.cz, pohybuje v rozmezí 15 až 20 Kč, plastové brýle na anaglyf jsou přibližně 3x dražší (obr. 98 – [58], [59]).



Obr. 98 Papírové a plastové brýle na anaglyf.

Mezi nevýhody anaglyfu patří jistá barevná odchylka od původního obrazu, jejímž viníkem jsou právě použité barevné filtry [60]. Navíc v případě nedodržení přesného odstínu filtrů nebo barev tisku, což je velmi častý a těžko odstranitelný problém, se mohou objevit obtíže se spojením obou dílčích obrazů – v krajním případě výsledný prostorový obraz nebude možné vůbec vytvořit. Někdy mohou být s delším pozorováním anaglyfických obrazů či filmů spojeny nepříjemné pocity, jež jsou podle [61] způsobeny snahou mozku o korekci poškozených barev.

V dalších moderních technologiích je od užití barevných brýlových filtrů upuštěno. Tzv. pasivní 3D technologie [62], která je velmi často používána při promítání filmů v kinosálech, využívá brýlí s polarizačními filtry. Obrazy pro levé a pravé oko jsou promítány dvěma projektory současně. Před každým z projektorů je umístěn speciální polarizační filtr, jenž usměrňuje světlo do určité roviny (obr. 99 – [63]). To se odráží od speciálního plátna, které nemění polarizaci dopadajícího světla, a zdánlivě se opět smísí. Avšak brýle s polarizačními filtry (obr. 100 – [64], [65]) světlo opět oddělí a do každého oka dopadne jen obraz pro něj určený.



Obr. 99 Dvojice pasivních projektorů.



Obr. 100 Papírové a plastové polarizační brýle.

Tato metoda se používá také u monitorů a televizorů v obměněné podobě – na displej je umístěna speciální polarizační maska tvořená střídajícími se polarizačními proužky, které vycházející světlo polarizují v odlišných rovinách. Výsledkem je prostorový efekt s nevýhodou polovičního rozlišení, a tedy poloviční kvality obrazu. U promítání filmů touto metodou je další nevýhodou finanční nákladnost zařízení potřebného k projekci – místo jednoho obyčejného projektoru jsou nutné dva speciální, naopak výhodou oproti předchozí technologii je zachovaná barevnost obrazu. V porovnání s následující aktivní 3D technologií je výhodou také snadná a finančně nenákladná údržba brýlí. Přehledná tabulka pořizovacích a provozních nákladů jednotlivých moderních stereoskopických technologií je uvedena na [66].

Aktivní 3D technologie [67] využívá brýlí, kterým je třeba dodávat energii bateriemi (obr. 101 – [68], [69]). Aktivní 3D projektor, popř. televizor či monitor, vysílá střídavě obrazy pro levé a pravé oko, které se odrážejí od promítací plochy. Aktivní 3D brýle ovládané na dálku infračerveným signálem pak střídavě³⁵ zatmívají sklo příslušného oka tak, aby se do každého oka dostal jen obraz pro něj určený. Výsledkem je opravdu kvalitní prostorový vjem, jenž není jedinou výhodou oproti předchozí metodě. Dalšími pluses je absence druhého projektoru a možnost promítat na libovolnou plochu – není třeba speciální projekční plátno. Jasným mínusem však zůstává výše prostředků vynaložená na nákup a hlavně údržbu brýlí, jejichž baterie je třeba pravidelně dobíjet, popř. měnit.



Obr. 101 Aktivní brýle se zabudovanou baterií (vlevo) a s externí baterií (vpravo).

Kombinací obou výše uvedených postupů vznikala tzv. aktivně-pasivní 3D technologie [71], která si z obou předchozích vybrala to nejlepší. Před speciálním 3D projektořem (obr. 102 – [72]), popř. displejem PC či TV, je umístěn tzv. polarizační modulátor. Projektor vysílá střídavě obrazy pro levé a pravé oko a modulátor synchronně mění polarizaci světla do jedné či druhé roviny. K pozorování obrazu pak stačí obyčejné polarizační brýle, které do každého oka propustí světlo v příslušné rovině. K projekci je tedy opět potřeba pouze jeden aktivní 3D projektor a pasivní 3D

³⁵ Standardní obnovovací frekvence monitorů a obrazovek je 60 Hz, aktivní stereoskopické monitory či projektory promítají snímky filmu s dvojnásobnou frekvencí 120 Hz. Aktivní 3D brýle jsou s frekvencí monitoru synchronizovány a na jedno oko tak vychází frekvence 60 Hz [70].

brýle, odtud název této technologie. Výsledkem je kvalitní obraz za náklady nižší náklady než u aktivní technologie a srovnatelné s náklady té pasivní.

K uvedeným technologiím je třeba doplnit následující, jejíž hlavní výhodou je absence brýlí potřebných k pozorování výsledného prostorového efektu. Jedná se o autostereoskopické displeje [73] užívané u monitorů a televizí. Tyto displeje jsou pokryty speciální fólií, která vychyluje směr světla procházejícího lichými sloupci pixelů na druhou stranu než směr světla procházejícího sudými sloupci. Obraz z lichých sloupců dopadá do jednoho oka, obraz ze sudých do druhého. Samozřejmě vyvstává otázka, jak je zaručeno, že obraz dopadne do správného oka a že tam vůbec dopadne. Odpovědí na ni je úzká oblast, ze které je možné obraz pozorovat. Ta má za následek nízký maximální počet možných diváků. Ač se na trhu již objevily tzv. aktivní autostereoskopické obrazovky, které vlastní funkci sledování polohy pozorovatele a následného upravení vlastností fólie tak, aby paprsky byly vysílány správným směrem, i zde je rozsah efektu třetího rozměru značně omezen.



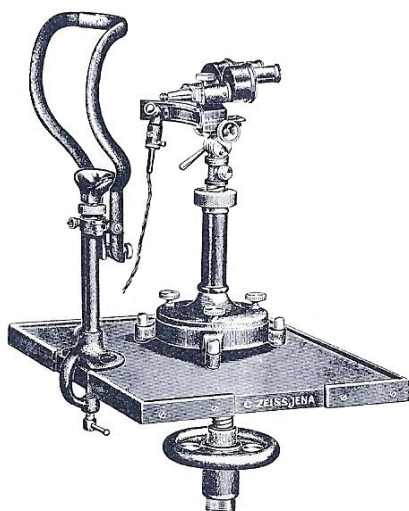
Obr. 102 Projektor s polarizačním modulátorem.

7 Využití stereoskopie

7.1 Využití stereoskopie v praxi

Výše uvedené způsoby aplikace stereoskopie v zábavním průmyslu nejsou zdaleka jedinými možnostmi, jak lze vlastnosti stereoskopického promítání využít. Existuje nepřehledný počet nástrojů i složitých zařízení, která stereoskopické vlastnosti buď přímo využívají, nebo při jejich vývoji využity byly, ač dnes již fungují na jiných principech. Bez stereoskopického promítání by se neobešly ani mnohé programátorské společnosti – ať už se jedná o tvorbu 3D počítačových her či o zpracování a 3D vizualizaci prostorových návrhů budov či jiných projektů.

Jedním z nástrojů, jehož vývoj byl stereoskopií značně ovlivněn, je stereomikroskop, jenž byl poprvé sestaven německým optikem Carlem Zeissem v druhé polovině 19. století (obr. 103 – 10, s. 335). Jeho tehdejší stereomikroskop sloužil k vyšetřování oční rohovky a výhodou oproti doposud užívaným stereofotografiím byla možnost přímého pozorování zvětšeného prostorového obrazu [10, s. 333 – 337]. Dnes jsou stereomikroskopy (obr. 104 – [74]) užívány nejen v biologickém a lékařském výzkumu, ale také při analyzování struktury různých průmyslových materiálů – kovů, keramiky, minerálů, papíru i textilních vláken [75]. Odhalováním skrytých výrobních vad kovů a slitin nejen pomocí stereomikroskopů, ale i jinými metodami se zabývá defektoskopie. Jejím cílem je odhalit poškození jako jsou jamky a praskliny v materiálu, vniknutí nežádoucích těles či plynové kapsy uvnitř materiálu.



Obr. 103 Zeissův stereomikroskop k pozorování očního pozadí.

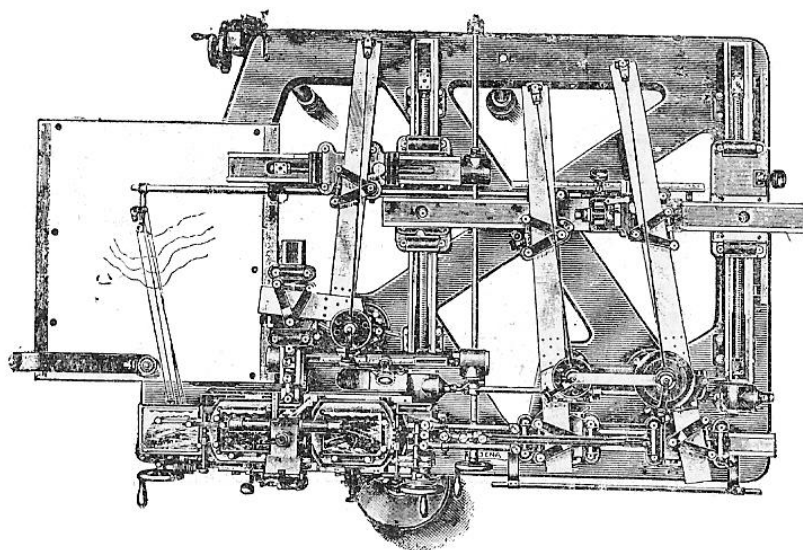


Obr. 104 Moderní stereomikroskop firmy Zeiss.

Další oblastí aplikace stereoskopického promítání je stereofotogrammetrie využívaná v kartografii. Fotogrammetrie se zabývá zjišťováním skutečných velikostí a tvarů objektů z fotografických snímků. Předpona stereo- napovídá, že v tomto typu fotogrammetrie je využíváno snímků stereoskopických.

Její počátky lze zařadit do období druhé světové války, kdy bylo třeba mapovat území nepřítele a mít dobrý přehled o jeho vojenských objektech [31, s. 12]. Během průzkumného letu, kdy letadlo letělo stálou rychlostí v konstantní nadmořské výšce, byla zhotovena série snímků s určitým časovým rozestupem, z nichž každé dva sousední se daly považovat za stereoskopickou dvojici obrazů. Pokud byla vzdálenost mezi snímky dost velká, došlo při pozorování této dvojice snímků stereoskopem k jevu, jenž je v [10, s. 387 – 390] nazýván přehnaným efektem prostorovosti – budova vysoká pár metrů se zdála výrazně vyšší. Bylo pak snadné rozeznat zákopy, bunkry a vojenské prostředky, které by byly na klasické fotografii lehce přehlédnutelné.

Letecká stereoskopická fotografie se po skončení války začala používat při tvorbě map. Byla sestrojena zařízení, která byla schopna z dvojice stereoskopických snímků odečíst nejen souřadnice daného útvaru, ale také jeho nadmořskou výšku, a tyto údaje pak zakreslit na kreslicí plátno. První takové zařízení sestrojil Rakušan Eduard von Orel – na stroji se nastavila určitá nadmořská výška a tento přístroj pak sám zakreslil odpovídající vrstevnice [10, s. 400 – 404]. Tento přístroj poté zautomatizoval Carl Zeiss a nazval ho stereoautografem (obr. 105 – [10, s. 404]). V dnešní době je vytváření map digitalizovanou záležitostí, ale způsob získávání dat ke zpracování je založen na stejném principu.



Obr. 105 Zeissův stereoautograf v pohledu shora.

Další sférou využití stereoskopie je mimo jiné konstrukce robotů a drobné elektroniky, které mohou pomáhat například v nebezpečných vojenských situacích, ale také v medicíně při operacích a rozličných vyšetřeních. Soubor oborů, které nějakým způsobem využívají principy stereoskopického promítání, tímto výčtem jistě není zcela vyčerpán. Neopomenutelnou funkci může mít stereoskopie také při výuce některých školních předmětů – tomuto nezanedbatelnému způsobu jejího využití se věnuje následující kapitola.

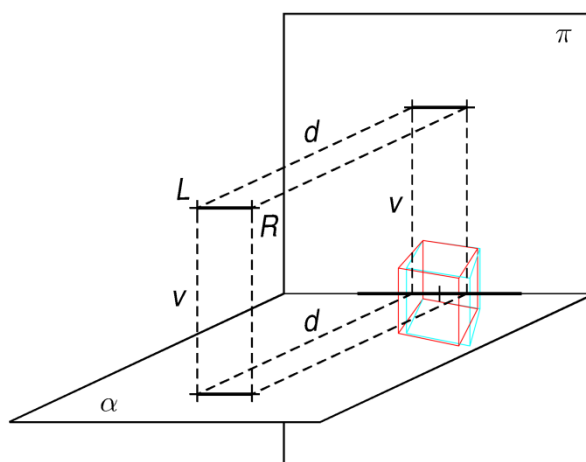
7.2 Využití stereoskopie ve výuce

Názornost stereoskopických obrazů a jejich schopnost vyvolat prostorový vjem podobný skutečnému vidění je jednoznačnou výhodou oproti jiným způsobům přibližování skutečnosti žákům a studentům. Mohlo by se zdát, že stereoskopické promítání lze využít pouze v samotné deskriptivní geometrii, popř. matematice např. k zobrazení těles, jejich průniků či řezů rovinami. Avšak stereoskopické obrazy je možné využít všude tam, kde je cílem objasnit studentům prostorové vztahy různých objektů – ať už se jedná např. o složité prostorové chemické vzorce či krystalové soustavy minerálů probírané v biologii. Konkrétní případy využití stereoskopie v jednotlivých předmětech již nechávám na případných čtenářích-odbornících na daný předmět.

Tato podkapitola ilustruje možnosti využití stereoskopie především ve výuce deskriptivní geometrie na střední i vysoké škole. Zároveň umožňuje čtenáři vyzkoušet si jednotlivé pozorovací metody, jež byly uvedeny v předchozí kapitole, na dalších stereoskopických dvojicích obrazů. Podkapitola obsahuje celkem 12 stereoskopických dvojic rýsovaných obrazů i fotografií, jež je možné pozorovat dohromady 5 pozorovacími metodami, přičemž k praktickému využití ve výuce lze doporučit především metodu anaglyfu, popř. metodu s použitím zrcadla. Vzhledem k tomu, že metoda anaglyfu je pro většinu pozorovatelů oproti ostatním metodám snáze osvojitelná, jsou všechny obrazy této kapitoly zobrazeny v příloze č. 3 na str. 90 až 95 ve formě anaglyfu.

Následující stereoskopické dvojice obrazů byly vytvořeny s využitím programů Rhinoceros a StereoPhoto Maker. Tam, kde je tomu potřeba – zejména u anaglyfu a phantogramu, je popsán způsob, jak danou stereoskopickou dvojici obrazů pozorovat. Jedná se především o umístění očí pozorovatele vzhledem k průmětně π , tj. rovině obrazů stereoskopické dvojice, a vzhledem k základní rovině α , tj. rovině, na níž byly zobrazované objekty umístěny.

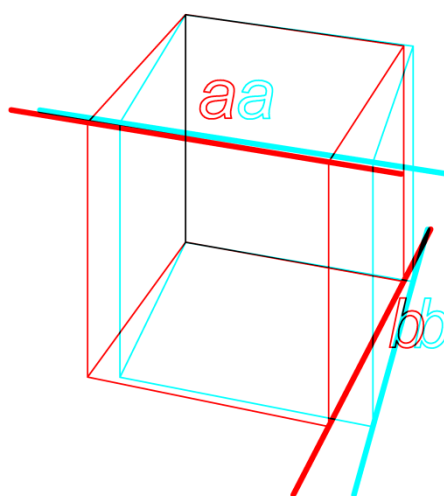
Teoreticky je možné určit přesnou pozici očí, kterou je třeba nastavit pro pozorování dané stereoskopické dvojice. Avšak v praxi se jedná pouze o odhad dané polohy, jenž má za následek větší či menší odchylky od správného umístění. Proto usuzuji, že nejlepším prakticky použitelným způsobem nastavení pozice očí, je odhadovat výšku a vzdálenost stereoskopické báze od příslušných rovin vzhledem k horizontální střední příčce pozorovaného obrazu (obr. 106). Případné deformace prostorového efektu lze korigovat při samotném pozorování další, již jen mírnou změnou pozice očí.



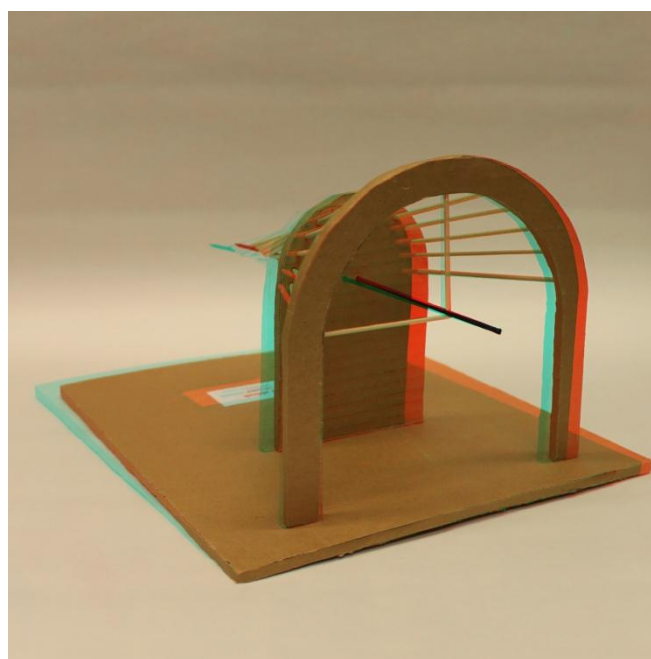
Obr. 106 Nastavení pozice očí.

7.2.1 Anaglyfické obrazy

Následující dva obrazy je třeba pozorovat s nasazenými brýlemi na anaglyf. Průmětnu je nutné umístit do svislé polohy, pro dosažení optimálního výsledku obrazy pozorujeme s očima v přibližné vzdálenosti $d = 45$ cm od této roviny a přibližné výšce $v = 25$ cm nad základní rovinou. Ta pomyslně protíná průmětnu ve vodorovné přímce, která u obr. 107 prochází levým zadním vrcholem dolní podstavky krychle, u obr. 108 naopak levým předním vrcholem horní podstavky podstavce přímkové plochy. Jak bylo naznačeno v předchozím textu, odhad polohy očí je velmi nepřesný a proto dle mého názoru postačí odhadovat pozici očí vzhledem k přibližnému středu pozorovaného obrazu. Získanou polohu pak lze v případně očividných nedostatků prostorového obrazu ještě upravit.



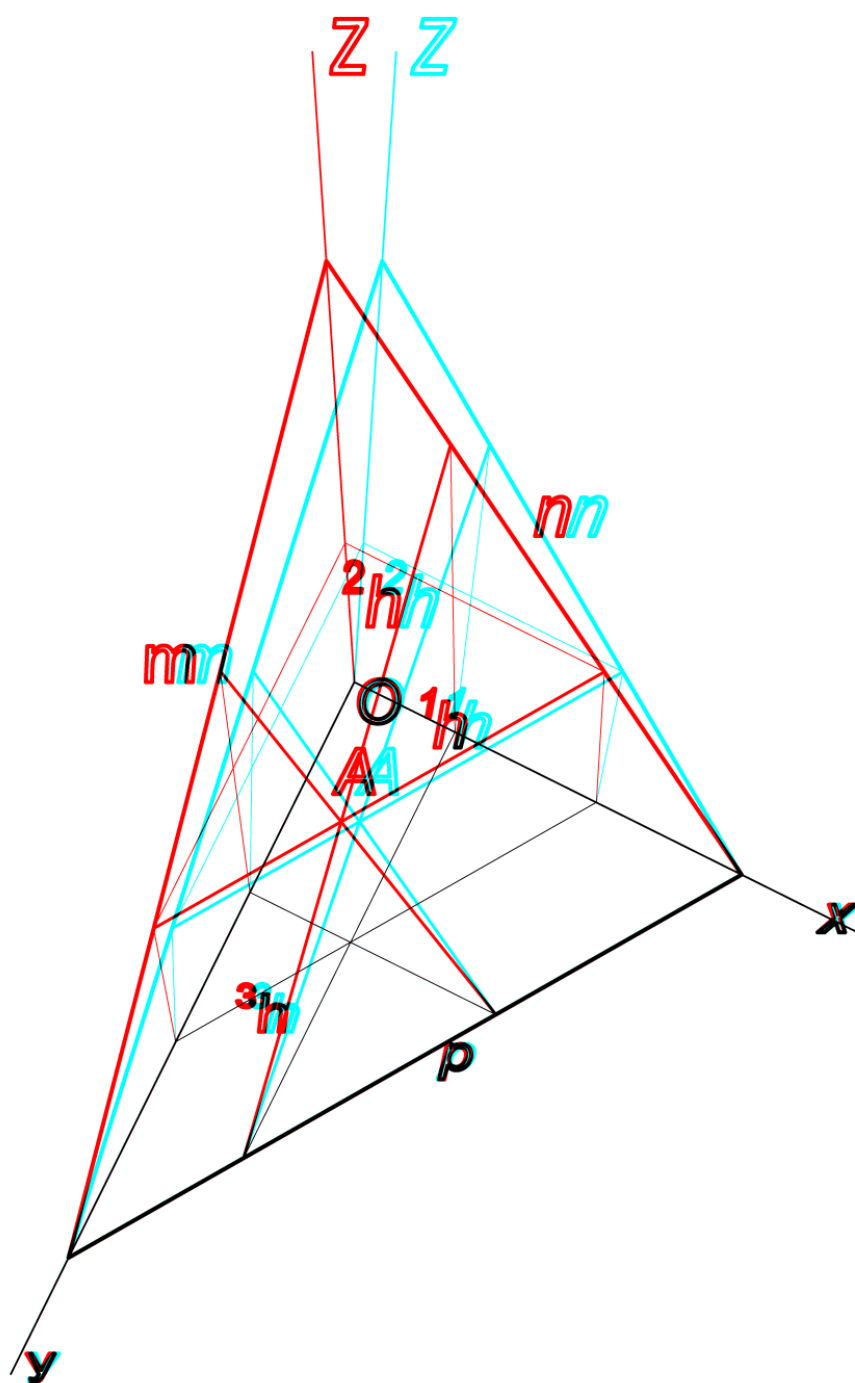
Obr. 107 Mimoběžky v krychli.



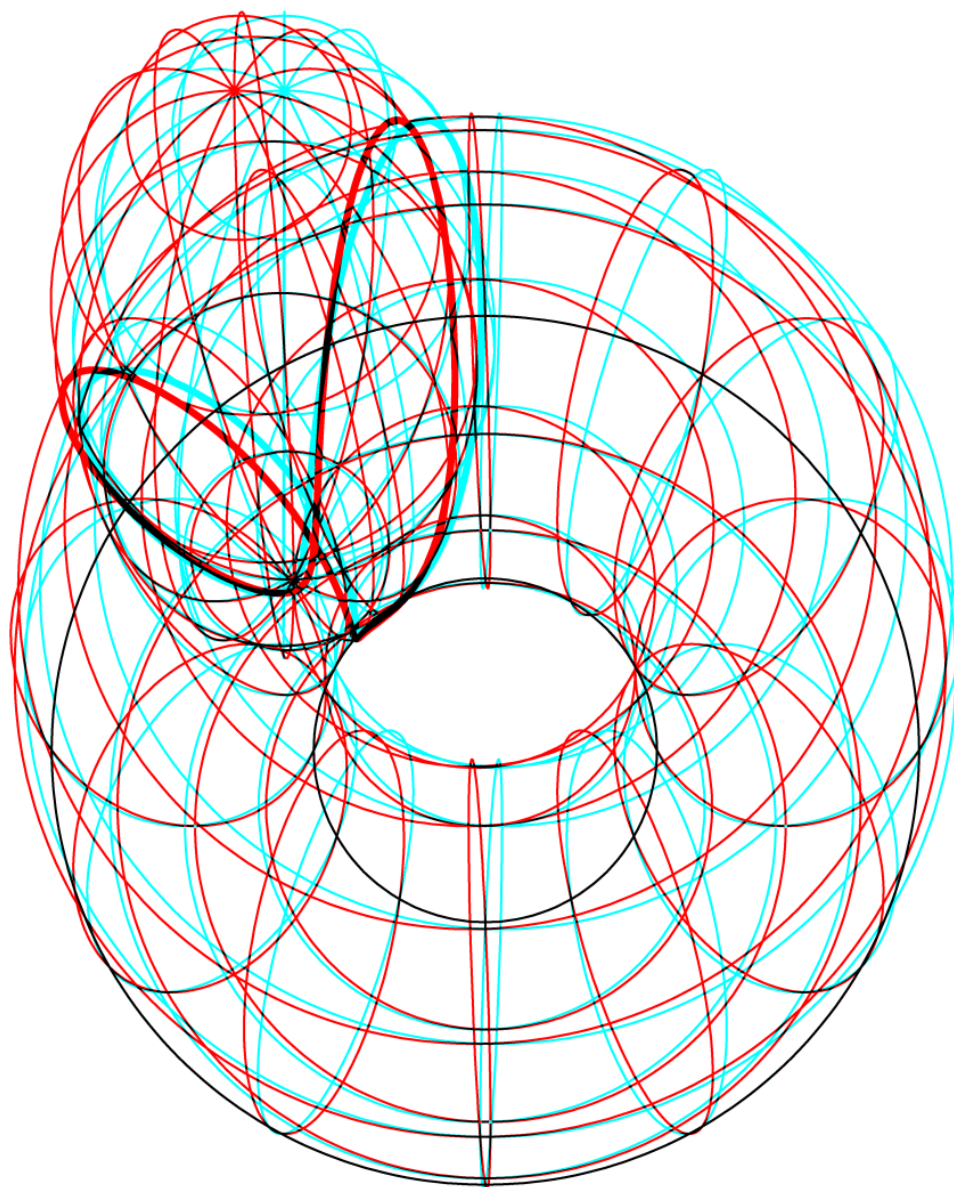
Obr. 108 Model přímkové plochy – tzv. Marseilleského oblouku.

7.2.2 Phantogramy

Následující dva obrazy je třeba pozorovat opět s nasazenými brýlemi na anaglyf. Průmětnu je nutné umístit do vodorovné polohy a obrazy pozorovat z přibližné vzdálenosti $d = 45$ cm a výšky $v = 45$ cm od přibližného středu obrazů. Obr. 109 znázorňuje hlavní přímky 1., 2. a 3. osovy zobrazené roviny, obr. 110 zobrazuje průnik anuloidu a kulové plochy spolu s křivkou průniku.



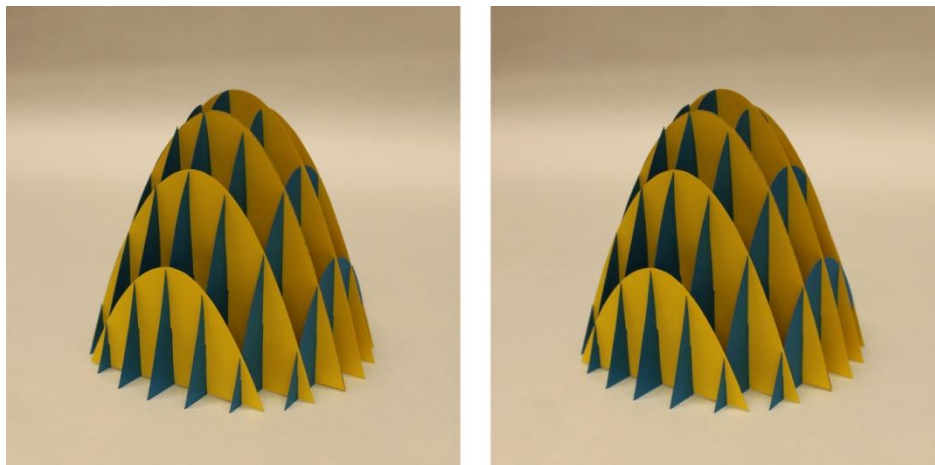
Obr. 109 Hlavní přímky roviny.



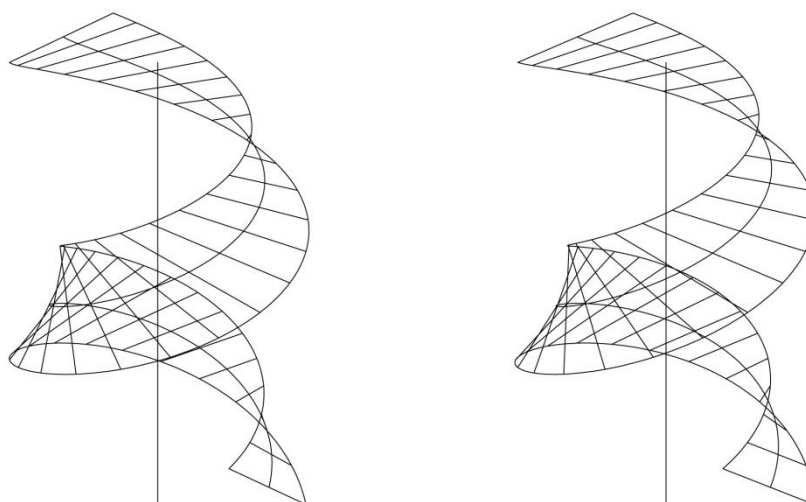
Obr. 110 Průnik rotačních těles – anuloidu a kulové plochy.

7.2.3 Obrazy k pozorování metodou rovnoběžných os

Následující dva obrazy, které znázorňují rotační paraboloid (obr. 111) a otevřenou kosoúhlou šroubovou plochu (obr. 112), je třeba pozorovat metodou rovnoběžných očních os ze vzdálenosti blízké konvenční zrakové vzdálenosti $d = 25$ cm, pro optimální prostorový efekt z mírného nadhledu.



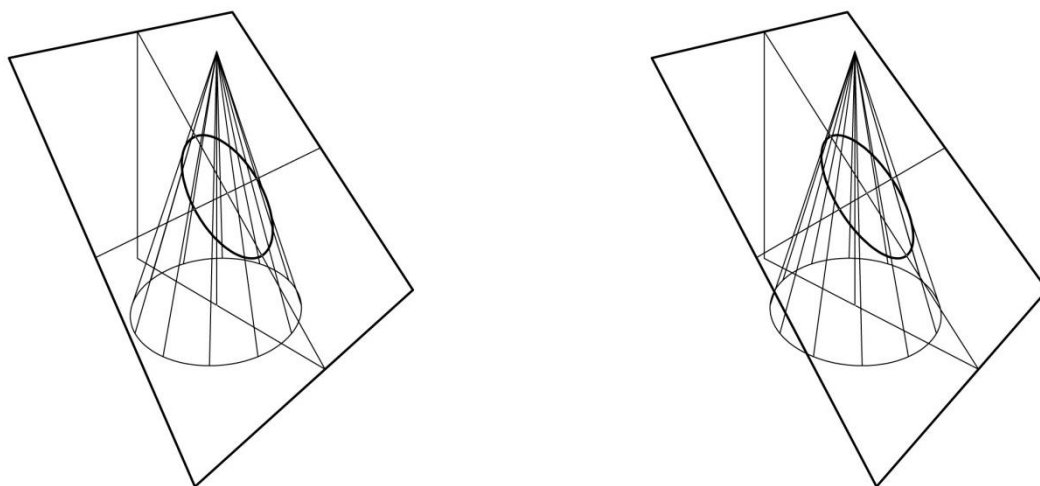
Obr. 111 Papírový model rotačního paraboloidu.



Obr. 112 Otevřená kosoúhlá šroubová plocha.

7.2.4 Obrazy k pozorování metodou zkřížených očních os

Následující dva obrazy, které zobrazují eliptický řez kužele rovinou (obr. 113) a cyklickou plochu (obr. 114), jsou určeny k pozorování metodou zkřížených očních os ze vzdálenosti blízké konvenční zrakové vzdálenosti $d = 25$ cm. Pro optimální prostorový dojem je vhodné pozorovat je opět z mírného nadhledu.



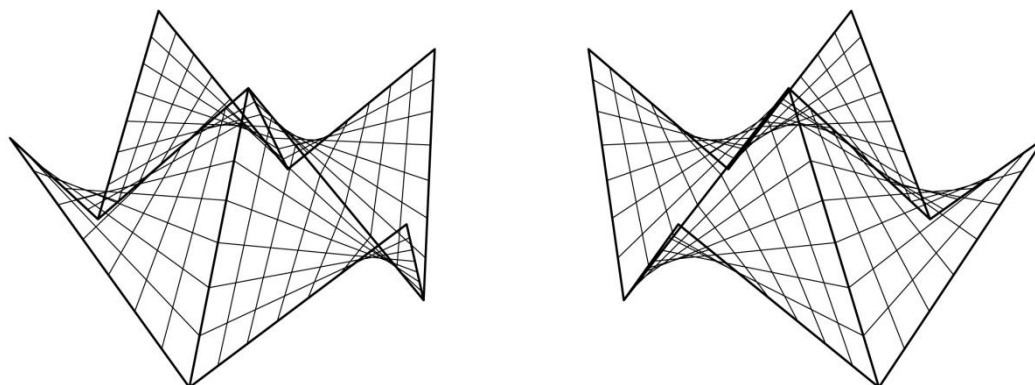
Obr. 113 Eliptický řez kužele rovinou.



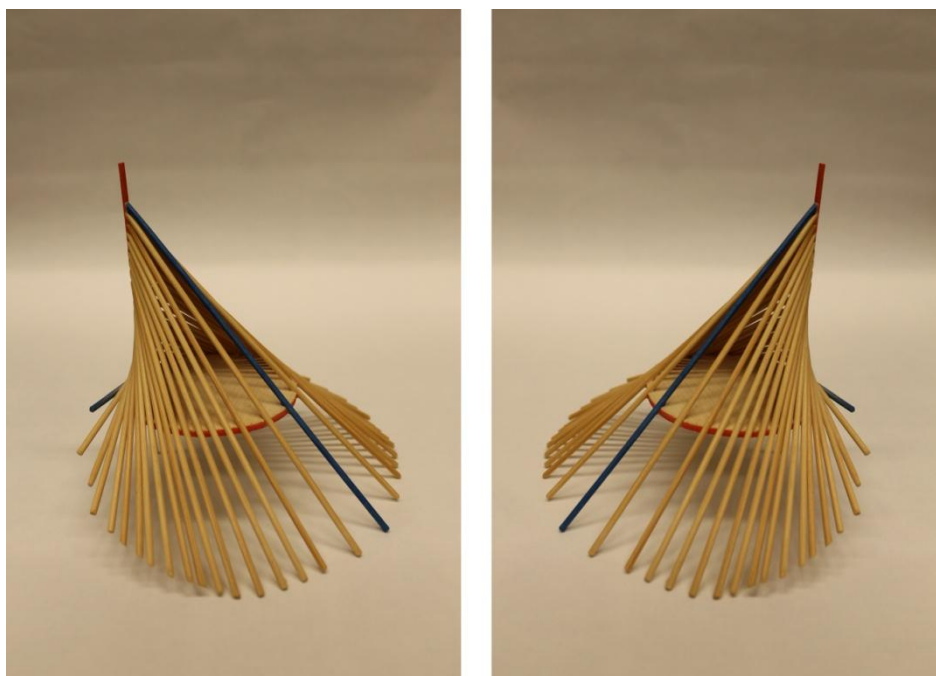
Obr. 114 Otevřená kosoúhlá šroubová plocha.

7.2.5 Obrazy k pozorování metodou s použitím zrcadla

Následující dva obrazy jsou určeny k pozorování metodou s použitím zrcadla, a to k odrazu pravého obrazu dané stereoskopické dvojice. Obr. 115 zachycuje přímkovou plochu složenou ze 4 zborcených čtyřúhelníků, jež je užívána ve stavební praxi k zaklenutí různých prostor. Na obr. 116 je zobrazena jiná přímková plocha – tzv. Küpperův konoid.



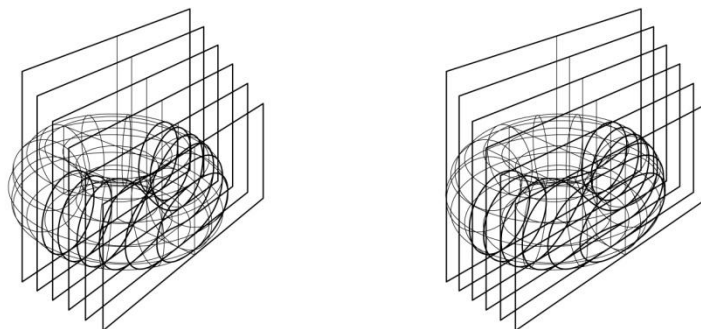
Obr. 115 Přímková plocha složená ze 4 zborcených čtyřúhelníků.



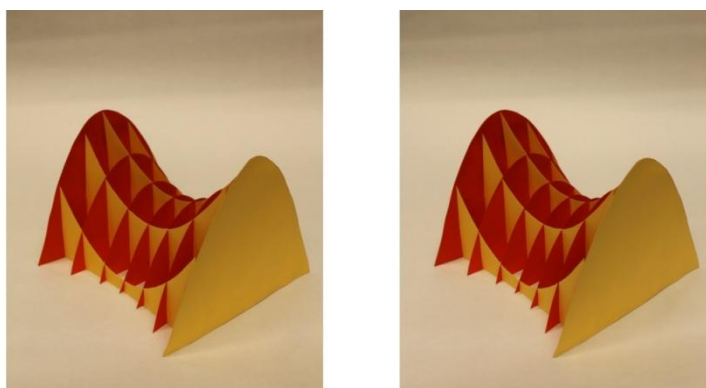
Obr. 116 Model přímkové plochy – tzv. Küpperova konoidu.

7.2.6 Obrazy k pozorování čočkovými brýlemi

Poslední dva obrazy jsou určeny k pozorování čočkovými brýlemi přiloženými v závěru této práce ze vzdálenosti blízké ohniskové vzdálenosti použitých čoček. V tomto případě se jedná o vzdálenost přibližně 75 mm, ale pozorovací vzdálenost je vhodné přizpůsobit podle aktuálních zrakových vlastností pozorovatele. Obr. 117 zobrazuje tzv. Cassiniho křivky, jež vzniknou jako řezy anuloidu rovinami rovnoběžnými s jeho osou. Obr. 118 zachycuje model hyperbolického paraboloidu.



Obr. 117 Cassiniho křivky na anuloidu.



Obr. 118 Model parabolického hyperboloidu.

Veškeré modely ploch zobrazené na fotografiích této kapitoly byly zapůjčeny z Katedry didaktiky matematiky Matematicko-fyzikální fakulty UK. Autoři modelů ploch zobrazených na fotografiích jsou uvedeni v příloze č. 4 na str. 96.

Závěr

V průběhu řešení této diplomové práce jsem se setkala s problémem nedostačující literatury týkající se stereoskopického promítání – většina zdrojů byla velmi neaktuální nebo nedostupná nebo obojí. Proto jsem se snažila práci koncipovat jako souhrn veškerých znalostí o stereoskopickém promítání z pohledu historického, geometrického i praktického.

Ale ani tak není téma stereoskopického promítání zcela vyčerpáno – rozšíření by si jistě zasloužilo např. praktické využití stereoskopie i její aplikace ve výuce nejen deskriptivní geometrie. Učitelé ostatních předmětů by jistě navrhli nespočet případů, kdy by prostorové znázornění dané situace umožnilo studentům snáze pochopit probíranou látku. A právě v této oblasti vidím značný potenciál případného rozšíření tématu stereoskopického promítání.

Seznam použité literatury a dalších zdrojů informací

1. PIJOAN, José. *Dějiny umění 1*. Vyd. 4. Praha: Knižní klub a Balios, 1998. ISBN 80-7176-765-4.
2. KADERÁVEK, František. *Geometrie a umění v dobách minulých*. Praha: Jan Štenc, 1935.
3. PIJOAN, José. *Dějiny umění 2*. Vyd. 4. Praha: Knižní klub a Balios, 1998. ISBN 80-7176-839-1.
4. HYKŠ, Oldřich. *Server aplikované matematiky* [online]. 7.7.2009 [cit. 2011-11-04]. Předrenesenční zobrazování prostoru. Dostupné z: http://euler.fd.cvut.cz/predmety/geometrie/lp_malirstvi/Predrenesanc.pdf
5. *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. 2002 [cit. 2011-11-16]. Kodex vyšehradský. Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Kodex_vy%C5%A1ehradsk%C3%BD2.jpg
6. *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. 2002 [cit. 2011-11-16]. Mistr třeboňského oltáře . Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/Meister_des_Wittingauer_Altars_002.jpg
7. *Rajče.net* [online]. 2005 [cit. 2011-11-04]. Tři knihy O malbě a pojednání O soše. Dostupné z: http://edition-d-v-u.rajce.idnes.cz/Tri_knihy_O_Malbe_a_pojednani_O_SOSE_-_Leon_Battista_Alberti/#img215.jpg
8. *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. 2002 [cit. 2011-11-16]. Marcus Vitruvius Pollio. Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/22/Da_Vinci_Vitruve_Luc_Viatour.jpg
9. KADERÁVEK , František. *Úvod do dějin rýsování a zobrazovacích nauk*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1954.
10. JUDGE, Arthur W. *Stereoscopic Photography; Its Application to Science, Industry and Education*. London: Chapman & Hall Ltd., 1950.
11. Tom's Hardware Guide [online]. c1996 – 2005 [cit. 2011-11-16]. Przyjemność dla oka: Obrazy stereo 3D. Dostupné z: http://www.tomshardware.pl/display/20040304/images/daempoli_erstestereo-tuschezeichnung.jpg
12. *IPhotoCentral : the ultimate source for photography collecting* [online]. c1999-2011 [cit. 2011-11-04]. Stereoview: Three-Dimensional Photography. Dostupné z: <http://www.iphotocentral.com/showcase/showcasedescrip.php/32/1/1/0>
13. *Early Visual Media* [online]. c2003 [cit. 2011-11-04]. The Stereoscope and Stereo-photography. Dostupné z: <http://users.telenet.be/thomasweynants/images/stereoscope/Weathstone1.jpg>
14. *Early Visual Media* [online]. c2003 [cit. 2011-11-04]. The Stereoscope and Stereo-photography. Dostupné z: <http://users.telenet.be/thomasweynants/images/stereoscope/BrewsterPrint.jpg>
15. *Stereograf. eu* [online]. 2005 [cit. 2011-11-17]. Začátek. Dostupné z: http://stereofotograf.eu/technika/kukatko_holmes_n.jpg

16. *Early Visual Media* [online]. c2003 [cit. 2011-11-17]. The Stereoscope and Stereo-photography. Dostupné z: <http://users.telenet.be/thomasweynants/images/stereoscope/Stereoscope-Duboscq.jpg>
17. *Ingomini* [online]. c2011 [cit. 2011-11-04]. Cabinet stereoscopes. Dostupné z: <http://ignomini.com/photographica/stereoviewers/taxiphoteoptical.jpg>
18. *Early Visual Media* [online]. c2003 [cit. 2011-11-17]. The Stereoscope and Stereo-photography. Dostupné z: <http://users.telenet.be/thomasweynants/images/stereoscope/Stereodrome.jpg>
19. *TV Freak* [online]. c1998 – 2011 [cit. 2011-11-18]. Dlouhá cesta k 3D televizi. Dostupné z: <http://www.tvfreak.cz/tvf/media.nsf/0c97cd6cabb1398ec1256cc50082f4bf/64c7fa6d83175c69c12577eb004569ab/Body/6.2CF2?OpenElement&FieldElemFormat=jpg>
20. FUKA, Josef a HAVELKA, Bedřich. *Optika a atomová fyzika. Část 1. Optika*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
21. *Česká astronomická společnost* [online]. Radiometrické a fotometrické veličiny v astronomii – Díl třetí. 4.12.2009 [cit. 2012-2-24]. Dostupné z: http://www.astro.cz/_data/images/news/2009/11/27/oko_rez.jpg
22. *Čočky-kontaktní.cz* [online]. [cit. 2012-2-23]. Slovník pojmů. Dostupné z: <http://www.cocky-kontaktni.cz/slovník>
23. POLÁŠEK, Jaroslav, ed. *Technický sborník oční optiky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1974.
24. KUCHYNKA, Pavel a kol. *Oční lékařství*. Praha: Grada, 2007. ISBN 978-80-247-1163-8.
25. *SVĚTLO: časopis pro světelnou techniku a osvětlování* [online]. 2004, č. 4. [cit. 2012-02-23]. Zrak a vidění. Vybrané kapitoly z fyziologie zraku. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23169
26. ANTON, Milan. *Refrakční vady a jejich vyšetřovací metody*. Vyd. 3. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2004. ISBN 80-7013-402-X.
27. VRBA, Mikuláš a Ladislav KAJUCH. *Stereoskopia a stereoskopická fotografie*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1963.
28. *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. 2002 [cit. 2011-12-8]. Zorné pole: Zorný úhel. Dostupné z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Zorn%C3%A9_pole
29. KADEŘÁVEK, František; KLÍMA, Josef; KOUNOVSKÝ, Josef. *Deskriptivní geometrie I*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1954.
30. REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *Encyklopedie fyziky* [online]. c2006-2012 [cit. 2012-2-17]. Oko: Zorné pole. Dostupné z WWW: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/488-zorne-pole>
31. IVANOV, Sergej Pavlovič. *Barevná stereoskopická fotografie*. Praha: SNTL, 1953.
32. URBAN, Alois. *Deskriptivní geometrie I*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1967.

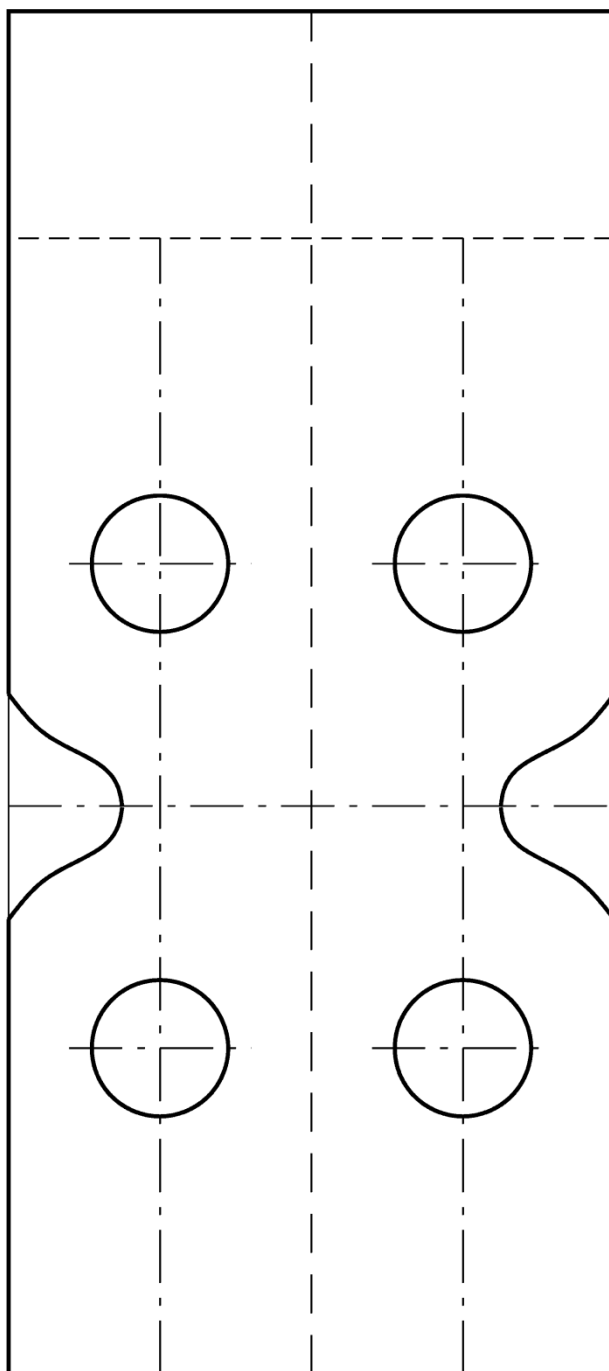
33. PÁL, Imre. *Deskriptívna geometria videná priestorove*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatury, 1964.
34. WATTS, Earle F.; RULE, John T. *Descriptive Geometry*. New York: Prentice-Hall, Inc., 1947.
35. MATĚKOVÁ, Radka. *Anaglyfy a jejich využití ve výuce stereometrie*. Praha, 2012. Brzy dostupné z WWW: <http://www.karlin.mff.cuni.cz/katedry/kdm/diplomky/index.php>. Bakalářská práce. Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta, Katedra didaktiky matematiky.
36. *Rhinoceros* [online]. c2012 [cit. 2012-7-22]. Download. Dostupné z WWW: <http://www.rhino3d.com/download.htm>
37. *Muttyan's home page* [online]. 2003 [cit. 2011-11-10]. StereoPhoto Maker. Dostupné z WWW: <http://stereo.jpn.org/eng/stphmkr/index.html>
38. *Dresdner-kameras.de* [online]. c2000-2012 [cit. 2012-2-8]. Firmengeschichte. Dostupné z WWW: http://www.dresdner-kameras.de/firmengeschichte/firmen/belplasca_03992_64.jpg
39. *DVDTechnik* [online]. c2002 [cit. 2012-2-8]. Stereo Cameras & nobles. Dostupné z WWW: <http://www.dvdtechcameras.com/cameras/stereo/2/1.jpg>
40. *Fotogalerie Michala Kudláka* [online]. 2006 [cit. 2012-2-8]. O technice. Dostupné z WWW: <http://www.michalfoto.net/technika/stereo.jpg>
41. *Stereokotoučky* [online]. 2006 [cit. 2012-2-8]. Dostupné z WWW: <http://www.stereokotoucky.cz/images/devices/stereomikroma2.jpg>
42. *LevnéFotoaparáty.cz* [online].c2006 [cit. 8.2.2012]. Dostupné z WWW: <http://www.levnefotoaparaty.cz/upload/samsung-digimax-173-d958.jpg>
43. *AkcniCeny.cz* [online]. c2000-2012 [cit. 8.2.2012]. Dostupné z WWW: <http://static.akcniceny.cz/foto/vyrobky/527000/526888.jpg>
44. *Klub stereoskopické fotografie* [online]. [cit. 2012-3-23]. Výpočet maximální deviace. Dostupné z WWW: http://klub.stereofotograf.eu/deviace_1.php a http://klub.stereofotograf.eu/deviace_2.php
45. *Klub stereoskopické fotografie* [online]. [cit. 2012-3-23]. Orthostereo, hyperstereo, hypostereo. Dostupné z WWW: http://klub.stereofotograf.eu/ortho_hyper_hypo.php
46. *Stereoscopy.com – The Worlf of 3D-Imagining!*[online]. [cit. 2012-3-25]. Downloads. Dostupné z WWW: <http://www.stereoscopy.com/downloads/index.html>
47. *Klub stereoskopické fotografie* [online]. [cit. 2012-3-25]. Stereoskopické okno. Dostupné z WWW: <http://klub.stereofotograf.eu/okno.php>
48. *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. 2002 [cit. 2012-4-2]. Subtraktivní míchání barev. Dostupné z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Subtraktivn%C3%AD_m%C3%ADch%C3%A1n%C3%AD_barev
49. *GIMP* [online]. c2001-2012 [cit. 2012-7-22]. Downloads. Dostupné z WWW: <http://www.gimp.org/downloads/>

50. *Stereokotoučky* [online]. 2010 [cit. 2012-4-5]. Prohlížečky československé výroby. Dostupné z WWW: http://www.stereokotoucky.cz/images/devices/meoskop1_1.jpg
51. *Klub stereoskopické fotografie* [online]. [cit. 2012-4-5]. Stereofotografie na kinofilm. Dostupné z WWW: http://klub.stereofotograf.eu/images/red_button_01.jpg
52. *TRIDAKT studio* [online]. c2006-2012 [cit. 2012-4-5]. Stereofotoparát LOREO 321 + stereoprohlížečka. Dostupné z WWW: <http://www.tridakt.cz/loreo/stereoskop-loreo321.jpg>
53. *Tridakt* [online]. c2009 [cit. 2012-4-5]. Stereoprohlížečka 3-D World. Dostupné z WWW: <http://www.3dakt.cz/internetovy-obchod/stereo-prohlizecka-3d-world>
54. *TRIDAKT studio* [online]. c2006-2012 [cit. 2012-4-5]. Stereoprohlížečka LOREO DELUXE. Dostupné z WWW: <http://www.tridakt.cz/loreo/loreo-stereoprohlizecka-deluxe.jpg>
55. *Tridakt* [online]. c2009 [cit. 2012-4-5]. Stereoprohlížečka RBT. Dostupné z WWW: <http://www.3dakt.cz/internetovy-obchod/stereo-prohlizecka-rbt.jpg>
56. *TRIDAKT studio* [online]. c2006-2012 [cit. 2012-4-5]. Stereoprohlížečka LOREO. Dostupné z WWW: <http://www.tridakt.cz/loreo/stereo-pap4.jpg>
57. *TRIDAKT studio* [online]. c2006-2012 [cit. 2012-4-5]. Papírová stereoprohlížečka. Dostupné z WWW: <http://www.tridakt.cz/loreo/stereo-prohlizecka-vklad.jpg>
58. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-7-13]. 3D brýle Anaglyf – Red-Cyan papírové. Dostupné z WWW: http://shop.gali-3d.com/katalog_detail/katalog_detail.php?id=7
59. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-7-13]. 3D brýle Anaglyf - plastové. Dostupné z WWW: http://shop.gali-3d.com/katalog_detail/katalog_detail.php?id=1
60. *Stereofotograf.eu* [online]. 2010 [cit. 2012-4-5]. Anaglyf aneb barevná separace obrazů. Dostupné z WWW: <http://stereofotograf.eu/navody/anaglyf/>
61. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-4-8]. 3D technologická knihovna – anaglyf (červenomodré 3D brýle). Dostupné z WWW: <http://cs.gali-3d.com/stereoskopie-anaglyf-3d/>
62. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-4-8]. 3D technologická knihovna – pasivní 3D stereoskopie. Dostupné z WWW: <http://cs.gali-3d.com/stereoskopie-pasivni-3d/>
63. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-7-13]. 3D technologická knihovna – pasivní 3D stereoskopie. Dostupné z WWW: <http://cs.gali-3d.com/img/techno/pasivni-sm.jpg>
64. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-7-13]. Polarizační 3D brýle - papírové. Dostupné z WWW: <http://shop.gali-3d.com/foto-produkty/BRAP003-1.jpg>
65. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-7-13]. Polarizační 3D brýle Professional Style. Dostupné z WWW: <http://shop.gali-3d.com/foto-produkty/BRAP002-1.jpg>

66. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-7-13]. Co je 3D stereoskopie? Dostupné z WWW: <http://cs.gali-3d.com/stereoskopie-princip-3d/>
67. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-4-8]. Aktivní 3D stereoskopická technologie. Dostupné z WWW: <http://cs.gali-3d.com/stereoskopie-aktivni-3d/>
68. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-7-13]. Aktivní 3D brýle GX4000 (pouze brýle). Dostupné z WWW: <http://shop.gali-3d.com/foto-produkty/BRIA002-1.jpg>
69. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-7-13]. Aktivní 3D brýle DepthQ (pouze brýle). Dostupné z WWW: <http://shop.gali-3d.com/foto-produkty/BRLS001-1.jpg>
70. *Technet.cz* [online]. c1999-2012 [cit. 2012-6-30]. Zaklínadlo nových herních notebooků: 3D displeje pro fantastický obraz. Dostupné z WWW: http://notebooky.idnes.cz/zaklínadlo-novych-hernich-notebooku-3D-displeje-pro-fantasticky-obraz-1zf-/vyrobci.aspx?c=A091111_124333_vyrobci_jza
71. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-4-8]. 3D polarizační modulátor (aktivně-pasivní projekce). Dostupné z WWW: <http://cs.gali-3d.com/stereoskopie-3d-modulator/>
72. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-7-13]. DepthQ Polarizační Modulátor. Dostupné z WWW: <http://shop.gali-3d.com/foto-produkty/MOLS001-1.jpg>
73. *Gali-3D* [online]. c2005-2011 [cit. 2012-4-8]. 3D auto-stereoskopické monitory (3D bez brýlí). Dostupné z WWW: <http://cs.gali-3d.com/autostereoskopie-3d/>
74. *Zeiss* [online]. [cit. 2012-7-13]. SteREO Discovery.V20. Dostupné z WWW: [http://www.zeiss.de/C12567BE00472A5C/GraphikTitelIntern/SteREODiscoveryV20-Start/\\$File/DiscoveryV20_start.jpg](http://www.zeiss.de/C12567BE00472A5C/GraphikTitelIntern/SteREODiscoveryV20-Start/$File/DiscoveryV20_start.jpg)
75. *Zeiss* [online]. [cit. 2012-6-30]. Materials. Dostupné z WWW: http://www.zeiss.com/industry/index_materials.html

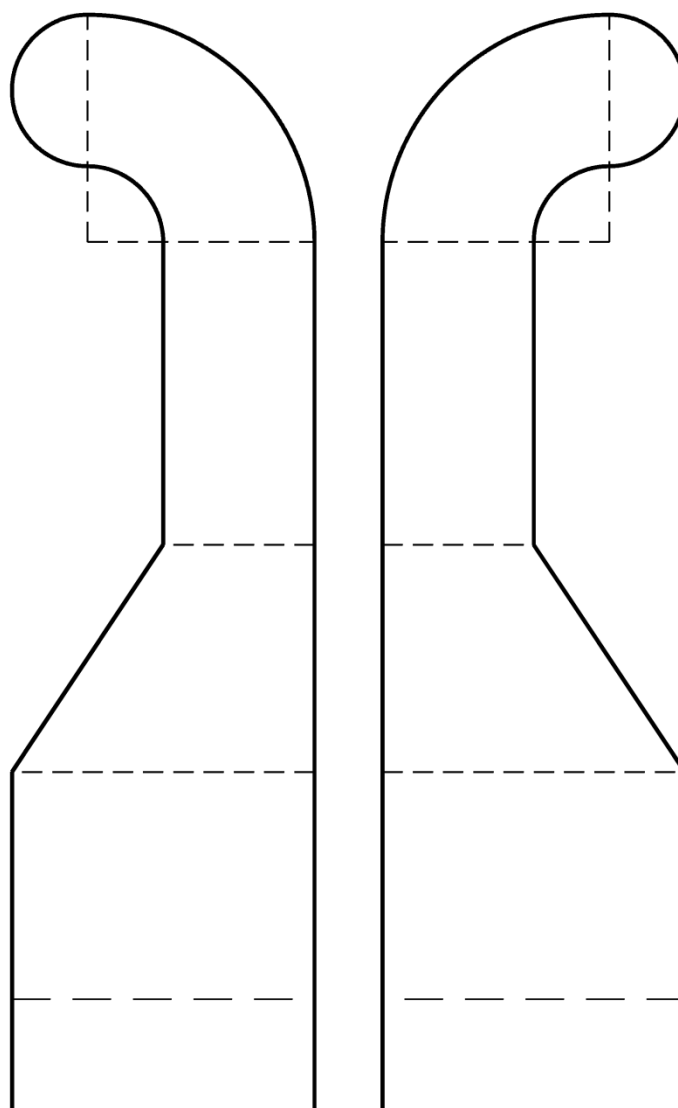
Příloha č. 1

Šablona pro výrobu přední části čočkových brýlí:



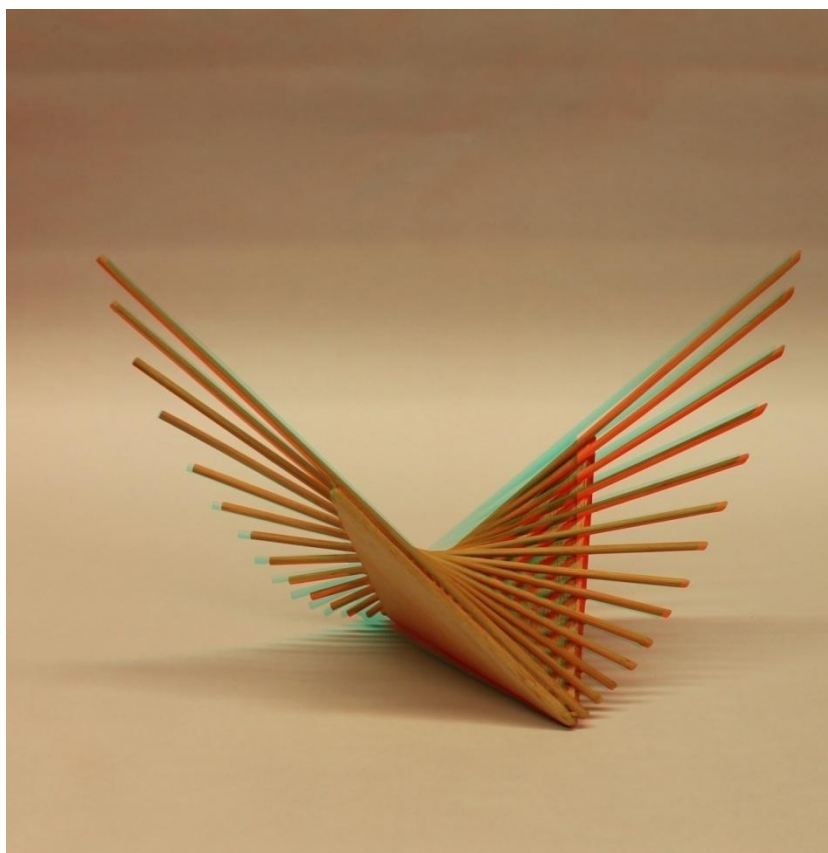
Příloha č. 2

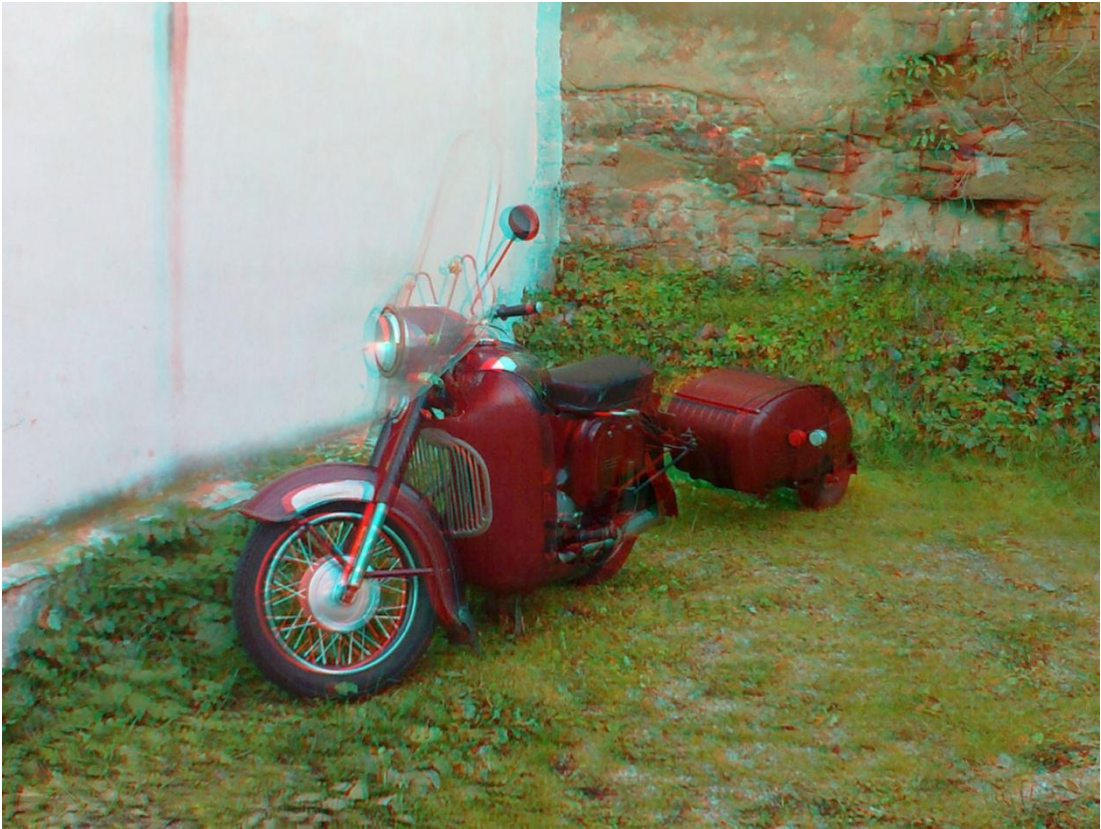
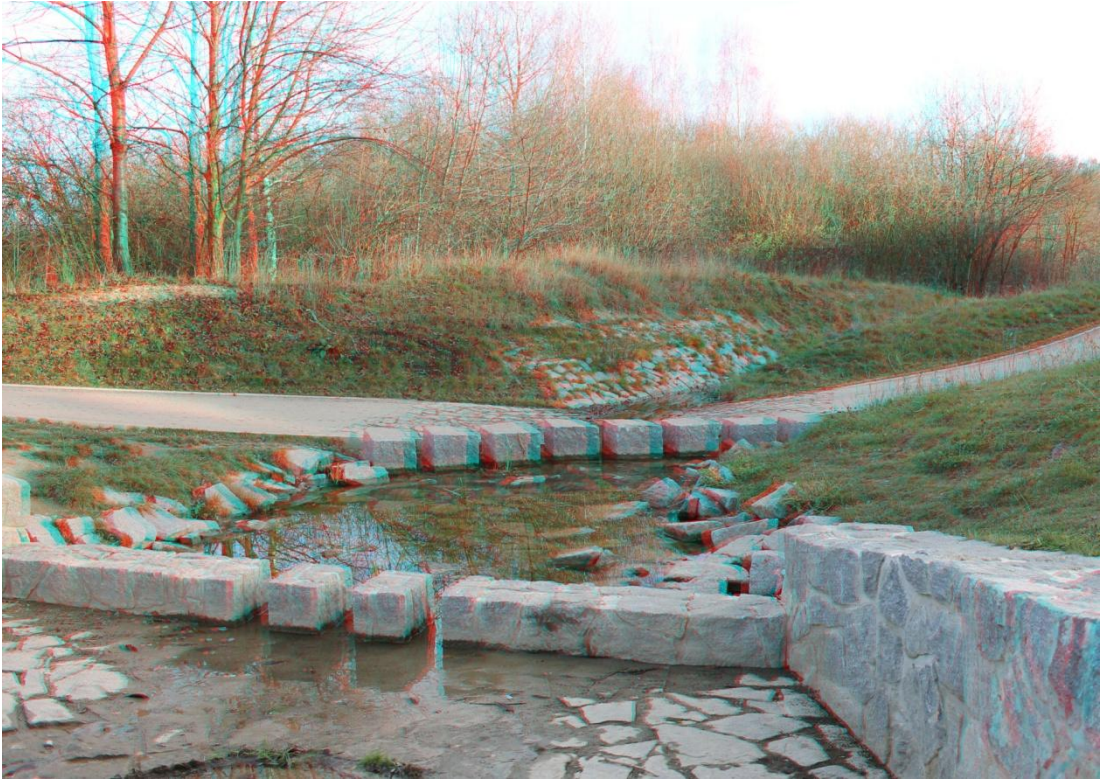
Šablona pro výrobu brýlových bočnic:

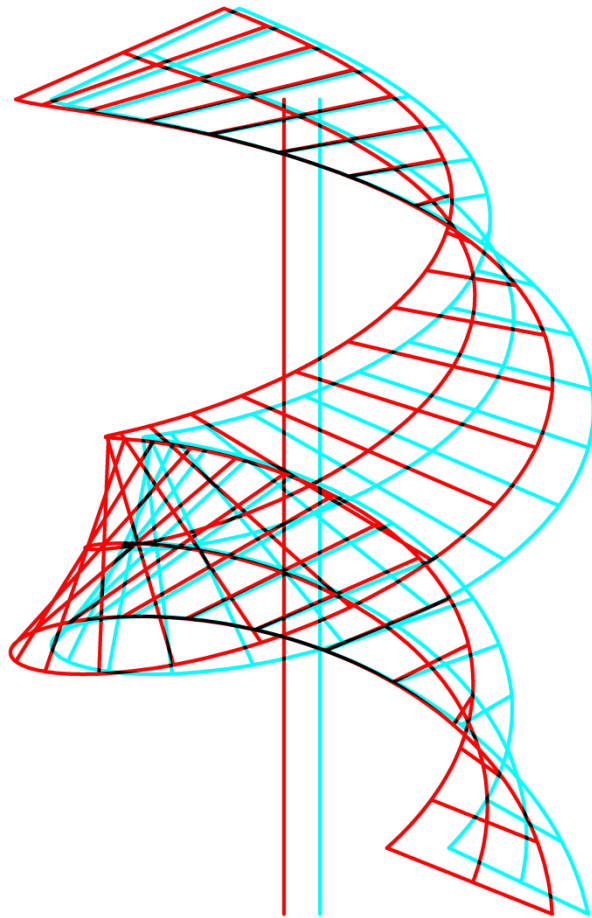
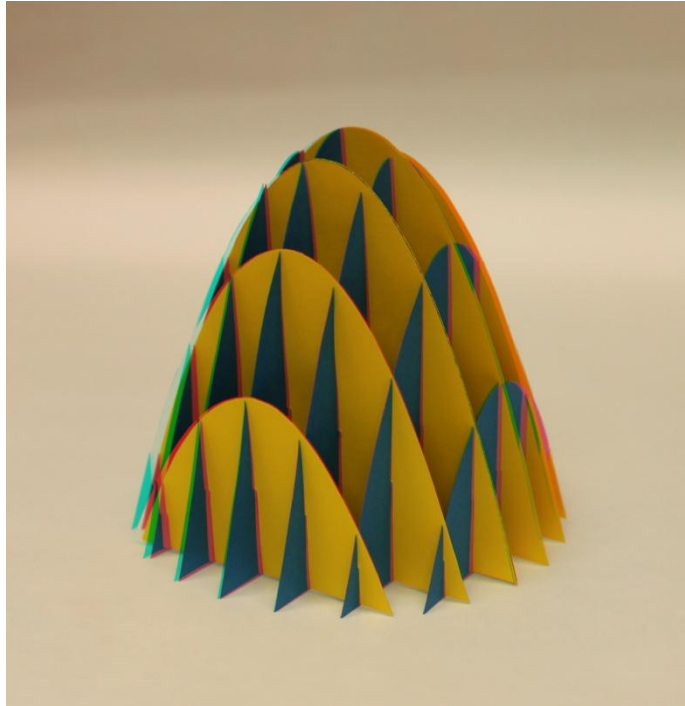


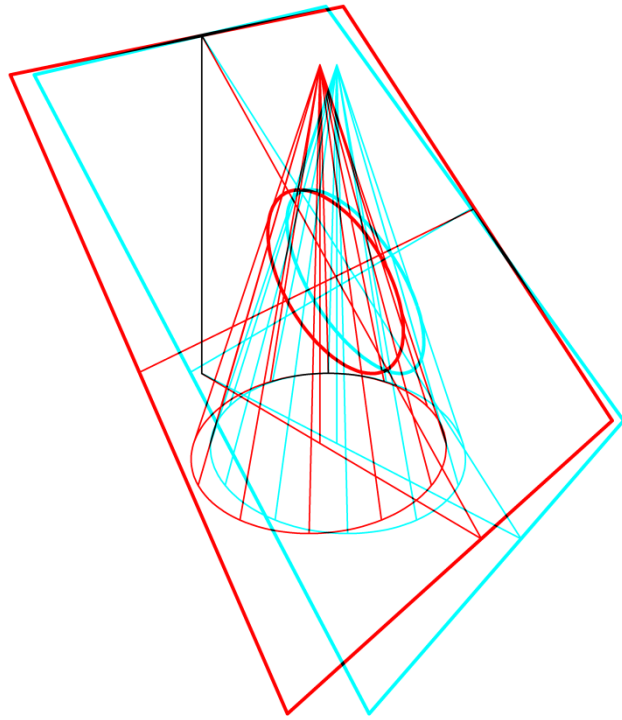
Příloha č. 3

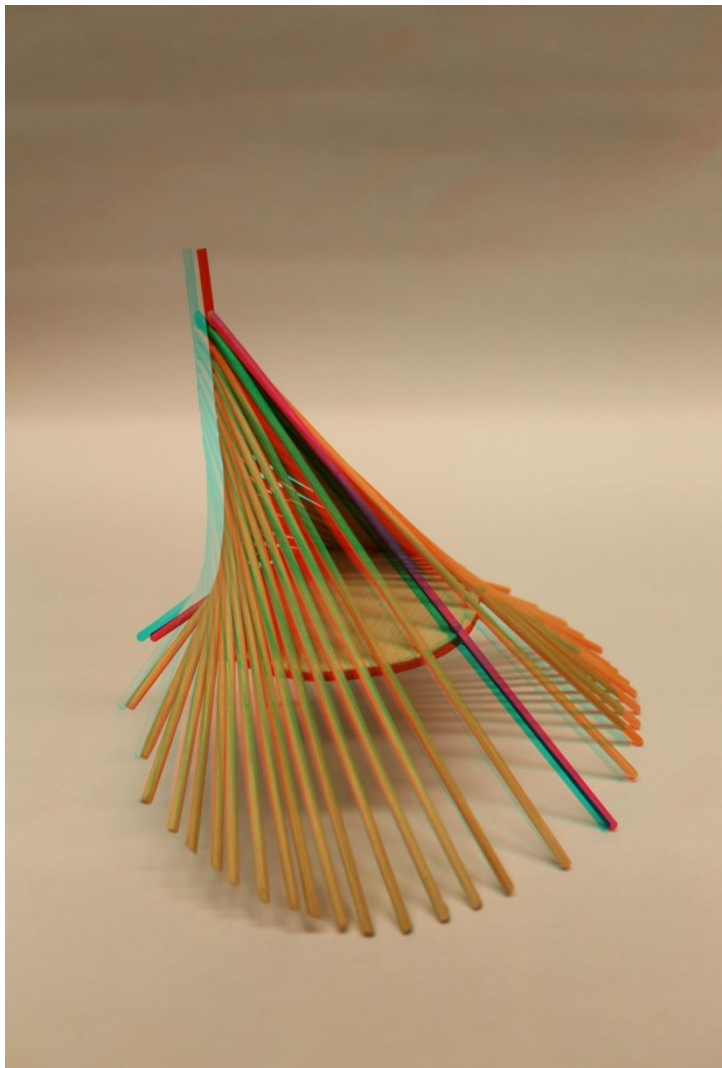
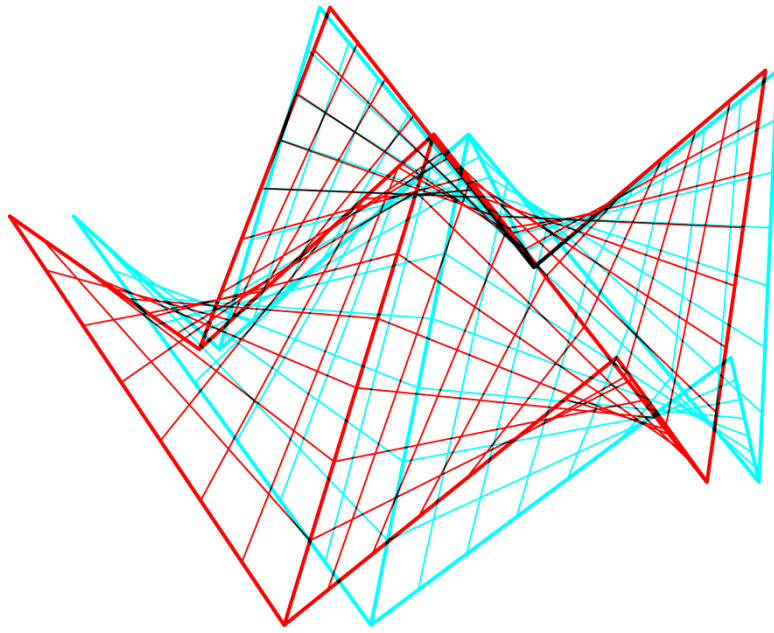
Stereoskopické obrazy ve formě anaglyfu:

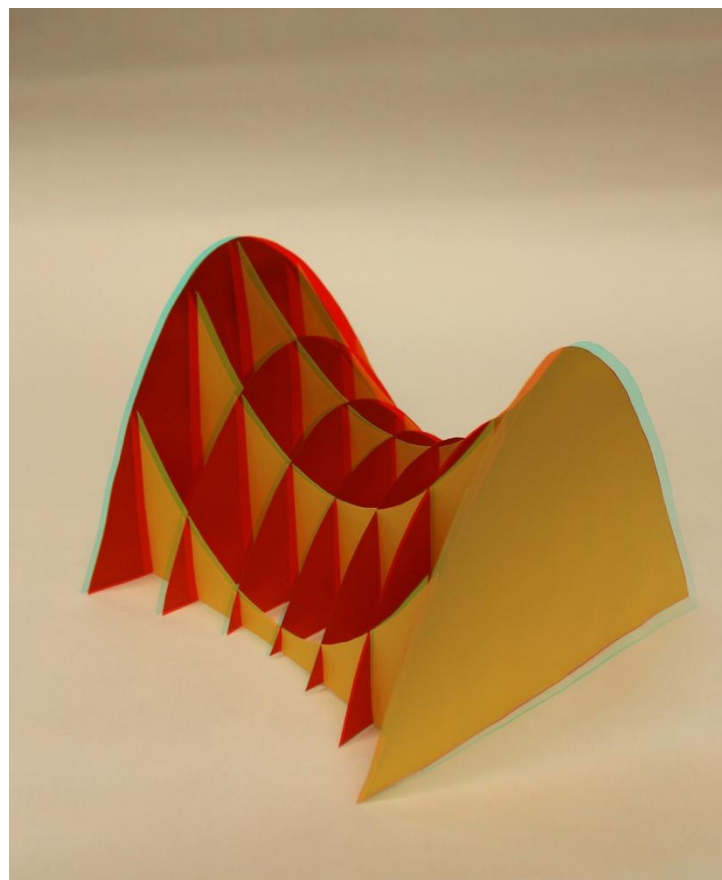
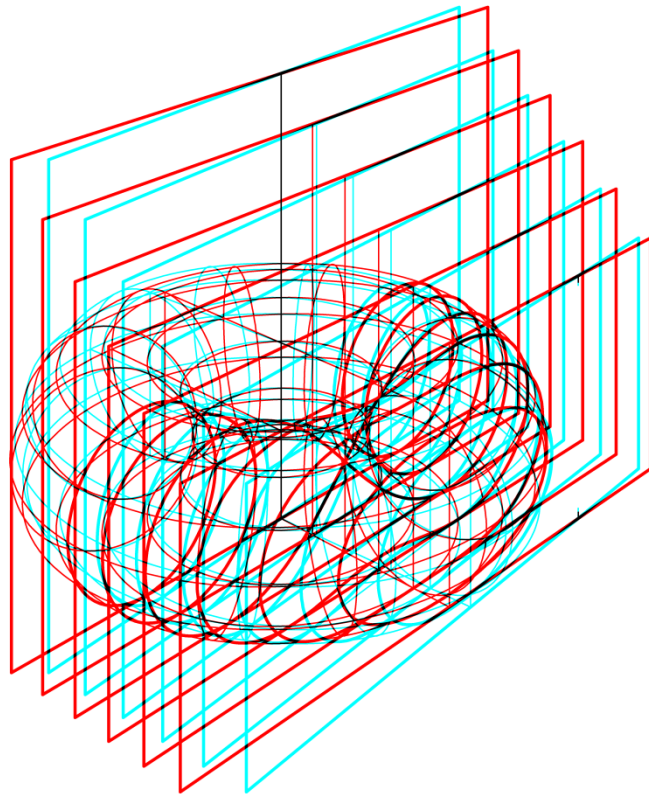












Příloha č. 4

Seznam autorů použitých modelů ploch:

Obr. 82	Ing. Jaroslav Ryšavý, CSc.
Obr. 108	Bc. Kristýna Podhajská
Obr. 111	Bc. Radka Matěková
Obr. 114	Mgr. Hana Štruncová
Obr. 116	Ing. Jaroslav Ryšavý, CSc.
Obr. 118	Bc. Tereza Dvořáková