

Katedra počítačov a informatiky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Technická univerzita v Košiciach

Branislav Sobota

## **Stereoskopia**

Pomocný učebný text  
(len pre interné použitie)



© 2002- 2011

# Obsah

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>ÚVOD</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>PRIESTOROVÉ VIDENIE</b> .....                           | <b>3</b>  |
| 2.1      | FYZIOLÓGIA A OPTICKÉ VLASTNOSTI OKA.....                   | 4         |
| 2.2      | FYZIOLÓGIA STEREOVIDENIA A SPRACOVANIE OBRAZU.....         | 6         |
| 2.3      | TECHNOLÓGIE PRIESTOROVÉHO ZOBRAZENIA.....                  | 7         |
| 2.3.1    | 2 1/2D projekcia.....                                      | 8         |
| 2.3.2    | Stereoskopia.....  | 9         |
| 2.3.3    | Anaglyf.....   | 10        |
| 2.3.4    | Autostereoskopia.....                                      | 11        |
| 2.3.5    | Real - Depth.....  | 13        |
| 2.3.6    | 3D LED displeje.....                                       | 13        |
| 2.3.7    | Volumetrické zobrazenie.....                               | 14        |
| 2.3.8    | Holografia.....  | 15        |
| <b>3</b> | <b>TEORETICKÉ ZÁKLADY STEREOKOPICKÉHO ZOBRAZENIA</b> ..... | <b>16</b> |
| 3.1      | VIRTUÁLNE PROSTREDIE.....                                  | 16        |
| 3.2      | PRILBY PRE VIRTUÁLNU REALITU (HEAD-MOUNTED DISPLAYS).....  | 18        |
| 3.3      | STEREOSKOPIA A HMD.....                                    | 18        |
| 3.3.1    | Hĺbkový vnem.....  | 19        |
| 3.3.2    | Chyby pri zobrazovaní.....                                 | 20        |
| 3.4      | STEREOSKOPICKÉ ZOBRAZENIE MIMO REÁLNEHO ČASU.....          | 24        |
| 3.5      | STEREOSKOPICKÉ ZOBRAZENIE V REÁLNOM ČASE.....              | 28        |
| <b>4</b> | <b>POUŽITÁ LITERATÚRA</b> .....                            | <b>30</b> |

*Tento učebný text je určený ako interný rozširujúci pomocný učebný text pre predmet Systémy virtuálnej reality. Text obsahuje základný opis problematiky stereoskopie a priestorového zobrazovania.*

Text neprešiel celkovou gramatickou, štylistickou a formátovacou úpravou

# 1 Úvod

Žijeme v dobe pomerne rýchleho vývoja nových technológií, materiálov a nových vedných a technických odborov. Jedným z nich je aj počítačová veda a s ňou spojená počítačová grafika. No myšlienka priestorového videnia pomocou techniky, presnejšie pomocou počítačovej techniky sa neobjavila len teraz nedávno. Bol to jeden zo snov fantastov a spisovateľov science-fiction počnúc H.G.Wellsom, E.E. Doc Smithom a I.Asimovom. Ich predstavy teleprezencie, holovízie či stretnutí na diaľku pomocou techniky boli motiváciou pre mnohých.

Súčasná počítačová veda a v rámci nej počítačová grafika, kladú už celkom slušné základy pre realizáciu týchto predstáv a snov. Pomerne výkonné počítače sú dostupné pre širokú sféru užívateľov. Výkon súčasných osobných počítačov umožňuje zobrazovanie priestorových objektov v reálnom čase. Výsledky z tejto oblasti sú už vo veľkej miere využívané v architektúre, strojárstve ale aj vo filmovom priemysle. Zobrazovanie priestorových objektov sa začalo rozvíjať so vznikom prvých grafických zobrazovacích jednotiek. Spočiatku to bolo zobrazovanie jednoduchých drôtových modelov telies. Po náraste výkonnosti počítačov sa prešlo na samotné zobrazenie povrchu telesa, avšak jednalo sa iba o vyplnenie povrchu telesa jednou farbou. Ďalším krokom boli algoritmy tzv. tieňovania, ktoré umožnili vernejšie zobraziť povrch telesa pomocou zmeny odtieňa farby vzhľadom na pozíciu svetelného zdroja. Tieto algoritmy už poskytovali pomerne vysokú vernosť zobrazenia. Boli vyvinuté algoritmy umožňujúce fotorealisticke zobrazenie priestorových objektov, umožňujúce zobrazenie tieňov a odleskov na povrchoch telies. Ale aj tak to všetko bola iba plošná informácia o trojrozmernom priestore, neumožňujúca alebo len z časti umožňujúca získať priestorové informácie z daného výstupu. Riešením, aj keď sa zdá, že opäť len čiastočným, je skúmanie a využitie samotného spôsobu, akým človek prijíma vizuálne informácie, t.j. skúmanie a využitie priestorového videnia .

## 2 Priestorové videnie

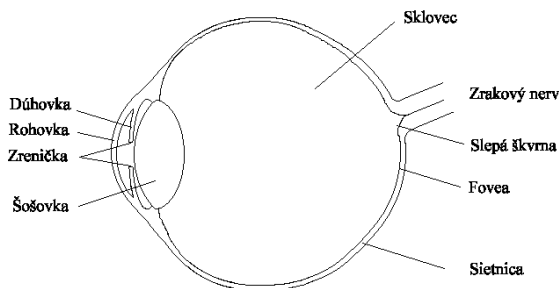
Stereoskopické videnie je jednou zo základných vlastností a schopností ľudí a tiež aj mnohých iných foriem života na Zemi. Nasledujúci text by chcel pomôcť pochopiť túto vlastnosť, pochopiť schopnosť toho, že môžeme pocítiť hĺbku objektov, obklopujúcich nás v každodennom živote.

Historicky stereoskopia zohrala veľmi dôležitú úlohu v evolúcii človeka. Od prehistorického človeka, ktorého život bol závislý na odhade vzdialeností, deliacej ho od predátorov, až po moderného človeka, využívajúceho túto schopnosť videnia k výrobe nástrojov, ktoré mu pomohli k ovládnutiu svojho okolia.

Pozrime sa však najskôr na fyziológiu stereoskopického videnia ľudí, aby sme mohli pochopiť princípy tohoto „zvláštneho javu“.

## 2.1 Fyziológia a optické vlastnosti oka

Aby sme porozumeli tomu, ako vnímame svetlo prichádzajúce do našich očí, sledujme jeho cestu jednotlivými časťami oka od rohovky až po sietnicu a od sietnice k mozgu.

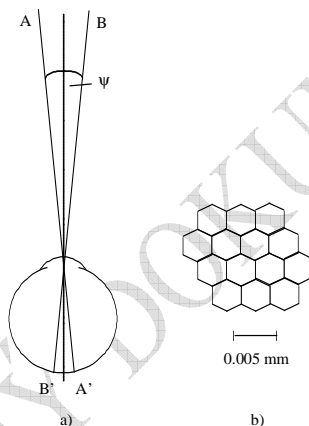


Obr. 1 Rez okom

- **Rohovka.** Pri vnímaní svetla, prichádzajúceho z okolitého sveta, prechádza svetlo najprv priehľadnou vrstvou nazývanou rohovka.
- **Dúhovka.** Po prechode rohovkou dopadajú svetelné lúče na jednu z najznámejších častí ľudského oka, na dúhovku. Tá je známa predovšetkým svojou farbou.
- **Zrenička.** Spolu s viečkami tvorí zrenička regulátor množstva svetla prichádzajúceho do oka. Je to malá čierna kruhová plocha, ktorú vidíme uprostred dúhovky. Pri zmenšení jej priemeru sa zväčší *hlbka ostrosti* - rozsah vzdialenosti, v ktorej vidíme predmety ostro. Hrá dôležitú úlohu pri mnohých aplikáciách priestorového videnia vo virtuálnej realite, presnejšie pri zisťovaní a sledovaní smeru natočenia oka.
- **Šošovka.** Umožňuje meniť zaostrenie na blízke alebo vzdialené predmety. Pôsobením akomodačného svalu na závesné vlákna šošovky sa jej tvar mení. Keď sa skrátia polomery krivosti šošovky, zväčší sa jej optická mohutnosť. Táto zmena tvaru šošovky umožňuje ostro vidieť vzdialené predmety na sietnici. Obrazy blízkeho predmetu by boli až za sietnicou a javili by sa neostro. Ak sa však zväčší vplyv šošovky na chod lúčov (väčším zakrivením jej plôch), potom aj obrazy blízkeho predmetu budú na sietnici ostré. Čím väčšia je vzdialenosť predmetov, tým menšie je zakrivenie plôch šošovky. Prispôbitosť šošovky na pozorovanie rozlične vzdialených predmetov sa nazýva *akomodácia*. Akomodačná schopnosť sa stráca s pribúdajúcim vekom.
- **Sietnica.** Nakoniec sa svetlu do cesty postaví sietnica, ktorá je naň veľmi citlivá. Predstavuje plošné rozvetvenie očného nervu. Má veľmi zložitú

vrstevnatú štruktúru a tu zároveň dochádza k prvému spracovaniu obrazu. Svetlo dopadá na množstvo svetlocitlivých prvkov, nazývaných fotoreceptory. Tie sú dvoch druhov, tyčinky a čapíky.

Zastavme sa trochu pri sietnici a zadefinujme si pojem *rozlišovacia schopnosť oka*. Je to najmenšia uhlová vzdialenosť  $\psi$  dvoch bodov, ktoré okom vidíme oddelene, t.j. oko tieto dva body ešte rozozná. Dva body, ktoré vidíme pod menším uhlom splývajú v jeden. Monokulárna rozlišovacia medza oka býva okolo  $60''$  [ 1], to znamená, že dva body A a B, pozorované v uhlovej vzdialenosti  $60''$ , na sietnici normálneho oka sa zobrazujú v bodoch A' a B', vzdialených od seba 0.005 mm (Obr. 2a).



Obr. 2 a) Rozlišovacia medza oka b) Priečný rez vrstvou čapíkov

Rozlišovacia medza oka súvisí so štruktúrou sietnice (Obr. 2b). Stredy jednotlivých čapíkov sú od seba vzdialené priemerne 0.003mm. Hodnota 0.005mm je blízka dvojnásobku tejto vzdialenosti, čo ukazuje, že na rozoznanie dvoch bodov treba, aby medzi ich obrazmi na sietnici bol aspoň jeden voľný zrakový element.

Vráťme sa teraz opäť k tyčinkám a čapíkom, pretože pochopenie funkcie receptorov umožní nielen pochopiť proces videnia, ale aj navrhnúť najlepší spôsob vytvorenia virtuálneho priestorového obrazu.

Predstavme si, že oko sa skladá z dvoch kamier. V jednej je vysokocitlivý čiernobiely film (tyčinky) a v druhej zase menej citlivý, ale veľmi jemnozrný farebný film (čapíky). Tyčinky dostávajú informácie o jase, nie však o farbe. Čapíky informujú o farbe a detailoch. Sú tri druhy čapíkov: prvé sú citlivé na modrú zložku svetla, druhé na zelenú a tretie na červenú. Rozloženie tyčiniek a čapíkov v oku nie je rovnomerné, čo má vplyv aj na náš spôsob videnia okolitého sveta. V stredovej sietnicovej jamke (*fovea*) nie sú nijaké tyčinky, ale smerom od nej postupne

pribúdajú tyčinky a ubúdajú čapíky. Tyčinky veľmi zle rozoznávajú podrobnosti a naopak čapíky sú menej citlivé na svetlo. Keď uprieme pohľad na určitý bod, svetlo sa sústreďí do fovey, kde je, ako som spomenul, najväčšia koncentrácia čapíkov a vtedy môžeme rozpoznať najviac detailov. Zároveň okolie, ktoré nie je centrom našej pozornosti sa nám javí menej detailnejšie. Tento jav umožňuje široké využitie v rôznych metódach priestorového videnia virtuálnej reality. Napríklad pri spôsobe, kde sa zisťuje smer pohľadu (infračerveným svetlom sa sníma poloha zreničky) môže byť oblasť centra pohľadu plne farebná a okolie odstupňované rôznou intenzitou šedej farby, čo by pri určitých technikách pomerne urýchlilo výpočty scén a pravdepodobne by aj umocnilo priestorový efekt.

Pozrime sa teraz na princípy spracovania obrazu jednotlivých očí, t.j. na princípy spracovania binokulárneho videnia mozgom.

## 2.2 Fyziológia stereovidenia a spracovanie obrazu

Pre človeka stereoskopické videnie bolo a je nevyhnutné. Navzdory storočiam evolúcie si človek uchránil túto schopnosť odhadu vzdialenosti a vnímania priestoru. Poukazuje to len na dôležitosť tohoto javu.

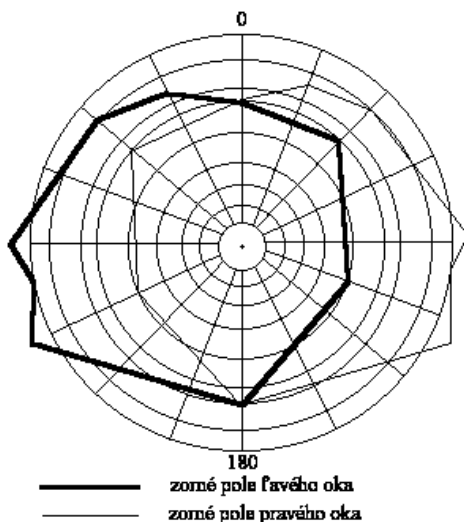
Aby bol človek schopný odhadnúť vzdialenosť, musí mozog urobiť komplexnú analýzu obrovského množstva údajov a informácií. Aj keď je súčasťou počítačová veda a počítačová grafika, a s nimi aj grafické počítačové systémy, na pomerne slušnej úrovni (ako bolo spomenuté v úvode), stále ešte nie sú schopné vykonať takúto komplexnú analýzu v reálnom čase. Aby sme získali lepší prehľad o tom, aké ohromné množstvo údajov musí mozog spracovať, pozrime sa ešte raz bližšie na štartovací bod ľudského vizuálneho systému. Týmto bodom je samozrejme oko, ktoré môže v zlomku sekundy vyprodukovať tok dát schopných zahltiť celosvetové počítačové zdroje. Niet divu, že zrakový nerv je považovaný za najväčšiu dátovú zbernicu známu človeku v celovesmírnom meradle.

Okrem masívnych informácií, ktoré každé oko posielajú do mozgu, musí mozog navyše urobiť obrazovú analýzu dvoch obrazov, aby našiel spoločné body, a tak daným obrazom porozumel. Zdá sa nám to triviálne, keďže si myslíme, že pozeráme na dva veľmi podobné obrazy tej istej scény. Avšak náš mozog musí uskutočniť ohromné množstvo výpočtov, aby nám poskytol interpretáciu, ktorá sa nám už na prvý pohľad zdá tak samozrejma.

Teraz, keď máme lepšiu predstavu o zložitosti úkonov, ktoré musí mozog vykonať, pozrime sa, ako sú tieto vizuálne informácie prenášané do výpočtového centra, do mozgu. Pre jednoduchú predstavu nám posluží obrázok 3.4. Zadefinujeme si však ešte niekoľko pojmov.

*Zornému poľu oka* zodpovedá priestor, ktorý môžeme okom zachytiť bez toho, aby sme zmenili smer pohľadu. Zo zorného poľa zachyteného okom vidíme ostro len malú časť, a to tú, ktorá sa zobrazí do fovey. Je to tzv. *priame videnie*. Ostatné zorné pole patrí do *nepriameho videnia*.

Na nasledujúcom obrázku je znázornené zorné pole obidvoch očí. Tam, kde sa obe zorné polia prekrývajú, je priestor, ktorý môžeme pozorovať obidvoma očami (*binokulárne*). Napriek tomu, aká je všeobecne vžitá predstava, nie je stereoskopická analýza vykonávaná tak, že každé oko posiela informácie do protiaľhlej hemisféry mozgu. Skutočnosť je taká, že iba časť obrazu získaného daným okom je posielaná do protiaľhlej hemisféry. Takže do protiaľhlej hemisféry nejde celý obraz, ale len časť zorného poľa oka. Lúče z jednej strany zorného poľa vzhľadom na stred pozorovateľovej tváre sú detekované oboma očami, ktoré následne rozdelia túto informáciu do príslušných protiaľhlých hemisfér.



Obr. 3 Zorné pole obidvoch očí

Tým, že obe hemisféry mozgu sú navzájom takmer izolované, nie je možné vykonať takúto stereoskopickú analýzu za predpokladu, že každá hemisféra má len monoskopickú informáciu.

## 2.3 Technológie priestorového zobrazenia

Pri pozorovaní sveta je vizuálny vnem človeka ovplyvňovaný mnohými faktormi. Zobrazovacie systémy sa potom tieto faktory snažia emulovať. Hovorí sa zvyčajne o týchto faktoroch [ 2]:

- **2D náznaky (2D cues) sú vizuálne efekty**, ktoré vytvárajú dojem vzdialenosti objektu od pozorovateľa. Vzdialenejšie objekty sú menšie, sú zobrazené vyššie, farby na ich povrchu majú znížený kontrast, jas a saturáciu. Medzi tieto techniky patrí aj **tieňovanie a prekrytie objektov**.

- **pohybová paralaxa (motion parallax)** je možnosť pozorovať scénu z rôznych pohľadov. Posunutím pozorovacieho miesta hore, dole, doprava či doľava vidíme predtým skrytú časť pozorovaných objektov.
- **binokulárna disparita (binocular disparity)** poukazuje na skutočnosť, že svet pozorujeme prostredníctvom dvoch navzájom posunutých očí. Každé z očí vidí svet z mierne odlišnej perspektívy.
- **hlbková disparita (depth disparity)** označuje fakt, že priestorovú informáciu o umiestnení objektov získavame taktiež z fyzickej vzdialenosti pozorovaných objektov od miesta pozorovania. Mozog interpretuje natočenie očí (*konvergencia*), ktoré je závislé na vzdialenosti objektu, na ktorý je práve zameraná pozornosť. **Zaostrenie a natočenie očí na pozorovaný predmet je iné pre bližšie a iné pre vzdialenejšie predmety.**

**Technológie používané na vizuálne priestorové zobrazenie** sa líšia v množstve použitia uvedených faktorov. Čím viac faktorov rešpektujú, tým vernejšie je priestorové zobrazenie a bohužiaľ, tým náročnejšia je tiež technická realizácia. Pozrime sa teda na najčastejšie používané technológie v súčasnom svete.

### 2.3.1 2 1/2D projekcia

Táto technika priestorovej projekcie, nepatrí medzi skutočné techniky označované ako 3D. Táto technika býva označovaná ako 2 1/2D a je veľmi dobre známa z bežných 2D obrazov zachycujúcich 3D scénu. **Technika rešpektuje iba 2D cues.**

- **výhody:** možnosť zobrazenia obrazov na bežne dostupných zobrazovacích zariadeniach
- **nevýhody:** neposkytuje verný vizuálny priestorový vnem





### 2.3.2 Stereoskopia

Stereoskopická projekcia je založená na princípe zobrazovania iného obrázku do každého oka prostredníctvom nejakého špeciálneho zariadenia ako sú okuliare s rôzne farebnými sklami, prepínateľné okuliare, polarizačné okuliare, stereoskop, či prilby pre virtuálnu realitu.

Najjednoduchším a najlacnejším prostriedkom sú okuliare, ktoré majú jedno sklo červené a druhé zelené. Červené sklo z obrázku filtruje červeno vykreslené miesta, zelené sklo zelené miesta. Ak sa pozorovateľ pozrie týmito okuliarami na obraz zložený z dvoch rovnakých objektov navzájom posunutých, jeden nakreslený červenou a druhý zelenou farbou (*anaglyph*), uvidí daný objekt v priestorovom zobrazení. Nevýhodou je jednofarebnosť zobrazenia.

Farebný priestorový obraz môže pozorovateľ uvidieť cez prepínateľné okuliare. Na zobrazovacom zariadení sa premieta striedavo obraz pre ľavé a pravé oko a synchronne so striedaním obrazov sa pozorovateľovi zakrýva pravé, či ľavé oko. Farebný priestorový obraz môže pozorovateľ uvidieť takisto cez polarizačné okuliare. Na zobrazovacom zariadení sa súčasne premietajú obrazy pre ľavé aj pravé oko, avšak polarizované v navzájom kolmých rovinách.

V špeciálnych prilbách resp. okuliaroch používaných pre virtuálnu realitu (napr. Obr. 4) je pre každé oko miniatúrny LCD alebo CRT display, na ktorom sa premieta obraz pre príslušné oko. Nevýhodou týchto systémov je to, že nerešpektujú súvislosť akomodácie, konvergencie oka a vzdialenosti predmetu od pozorovateľa. Stereoskopické zobrazenie vytvára napríklad dojem vzdialeného objektu, ktorý je však fyzicky zobrazený stále v rovnakej vzdialenosti od pozorovateľa - na priemetni zobrazovacieho zariadenia. Oko je akomodované na stále rovnakú vzdialenosť, ale dojem vzdialenosti je vyvolávaný zmenou konvergencie oka. Rozdiel oproti pozorovaniu bežného sveta, keď zmeny akomodácie a konvergencie sú spolu zviazané, môže byť príčinami bolesti hlavy, očí, nevoľnosti a závratu.

- **výhody:** pomerne efektívne pri nízkych nákladoch
- **nevýhody:** vyžaduje pomôcky, okuliare alebo stereoskop spôsobuje bolesti očí, hlavy, nevoľnosť, závraty.



Obr. 4 Prilby pre virtuálnu realitu

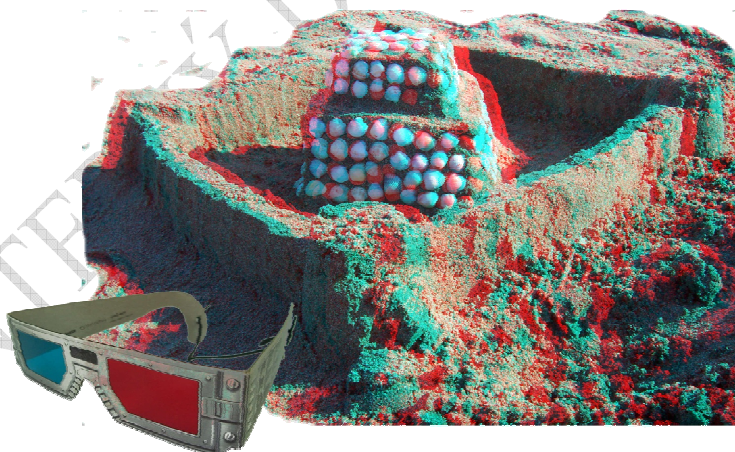
### 2.3.3 Anaglyf

Je založený na farebnej separácii v RGB farebnom priestore pre každé oko zvlášť.

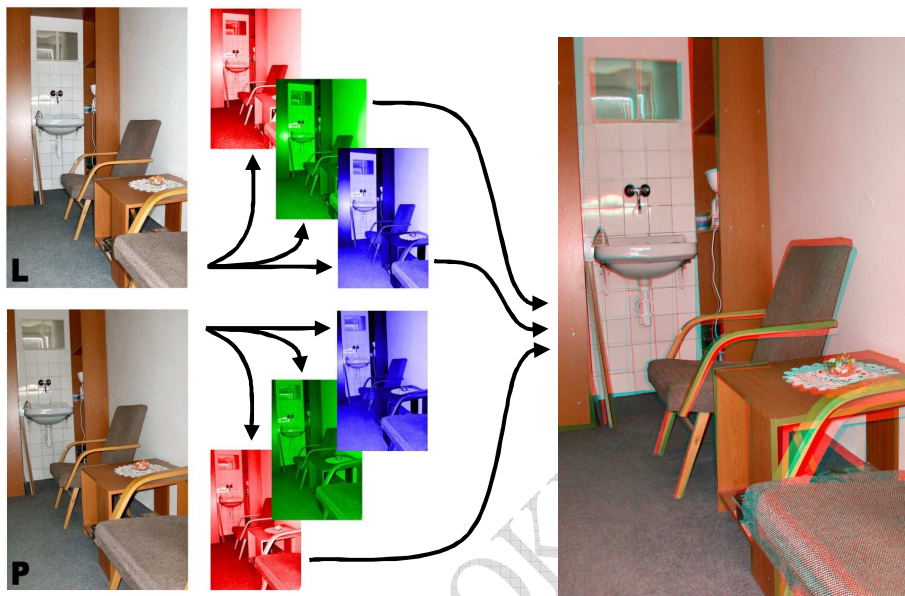
- **výhody:** pomerne efektívne pri nízkych nákladoch (elektronické aj printové zdroje)
- **nevýhody:** vyžaduje pomôcky, výrazne redukuje viditeľný farebný priestor, okuliare alebo stereoskop spôsobuje bolesti očí, hlavy, nevoľnosť, závraty. Nerešpektuje súvislosť akomodácie, konvergencie oka a vzdialenosti predmetu od pozorovateľa.

#### Typy anaglyfického zobrazenia

- **podľa farebnosti výstupu:**
  - v odtieňoch šedej s využitím len separovaných farebných vrstiev (len hĺbkový vnem)
  - farebné
- **podľa použitých zložiek:**
  - R-C(GB)
  - R-G
  - R-B
  - Y(RG)-B



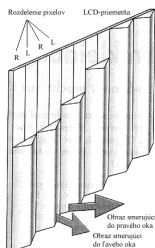
Obr. 5 Anaglyfické okuliare a anaglyfický obrázok



Obr. 6 Metóda skladnia anaglyfu

### 2.3.4 Autostereoskopia

Autostereoskopické zobrazenie je takisto založené na princípe premietania rôznych obrazov pre pravé a ľavé oko. Na rozdiel od stereoskopie však pozorovateľ nepotrebuje žiadne pomôcky, pretože o smerovaní obrázka pre príslušné oko sa stará zariadenie, umiestnené priamo na priemetni obrazovky. Na obrazovke je premietaná jedna, alebo aj viac obrazových dvojíc, zachycujúcich napr. pohyb, alebo obrazy z viacerých čiastočných snímok získaných z viacerých snímacích polôh. Získa sa tak obraz s plynulejšími prechodmi. Obraz pre príslušné oko je potom nasmerovaný pomocou pruhovej masky, ako ukazuje nasledujúci obrázok, alebo pomocou šoškového rastra. Nevýhodou je, že pozorovateľ musí sedieť v určitej vzdialenosti od obrazovky, v určitom mieste, do ktorého sú lúče pre každé oko nasmerované. Z toho vyplýva aj obmedzenie na malý počet divákov.



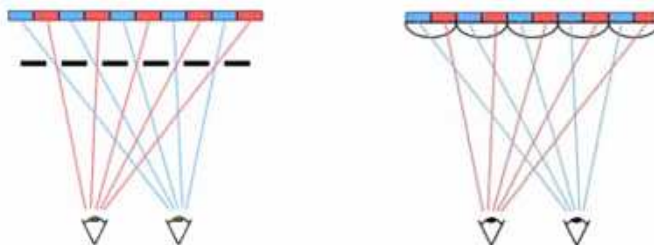
Obr. 7 Princíp autostereoskopie

Podobne ako stereoskopické premietanie, môže spôsobovať nevoľnosť.

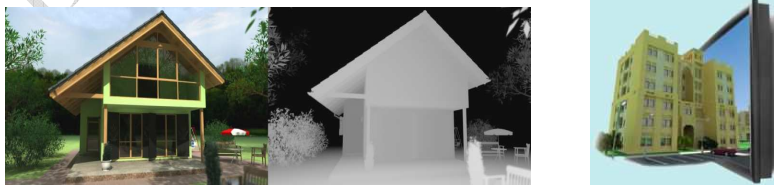
- výhody: nevyžaduje okuliare alebo iné pomôcky
- nevýhody: len pre 1,2 pozorovateľov, pre viac ako jedného pozorovateľa spôsobuje bolesti očí, hlavy, nevoľnosť, závraty.

### Autostereoskopické technológie

- pomocou prizmovej mriežky
- pomocou šošovkového (lentikulárneho) rastra
  - pomocou Fresnelových šošoviek (vertikálne aj horizontálne)
- pomocou riadenia s aktívnou maskou



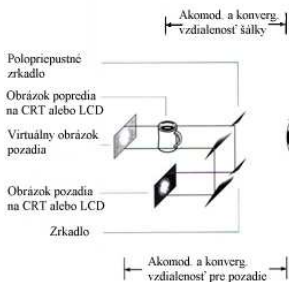
Obr. 8 Autostereoskopia: prizmová mriežka, lentikulárny raster



Obr. 9 Technológia: Philips wow

### 2.3.5 Real - Depth

Firma Floating Images prišla s jednoduchým a elegantným nápadom pre zabezpečenie verného priestorového zobrazenia.



Obr. 10 Princípy Real - Depth

Objekty na obrázku rozdelili na dve skupiny: na tie v popredí a druhé v pozadí. Objekty v pozadí sú premietané buď na zvláštnom LCD displeji alebo v spodnej časti obrazovky. Obraz pozadia je potom cez polopriepustné zrkadlá zobrazený cez obraz s objektmi z popredia. Táto technika zobrazenia automaticky podporuje hĺbkovú paralaxu a spoločne s využitím 2D cues vytvára solídne 3D obrazy. Technológia Real - Depth tvorí zaujímavý spojovací článok medzi štandardnými technikami používajúcimi len 2D cues a volumetrickými displejmi, kde je obraz premietaný vo viacerých vrstvách zároveň.

- **výhody:** lacné a pomerne efektívne, nevyžaduje pomôcky, nespôsobuje nevoľnosť
- **nevýhody:** len dve vrstvy, fyzické vzdialenosti predmetov od pozorovateľa

### 2.3.6 3D LED displeje

- **výhody:** pomerne efektívne, nevyžaduje pomôcky, nespôsobuje nevoľnosť
- **nevýhody:** vysoká cena, problém s viditeľnosťou niektorých bodov



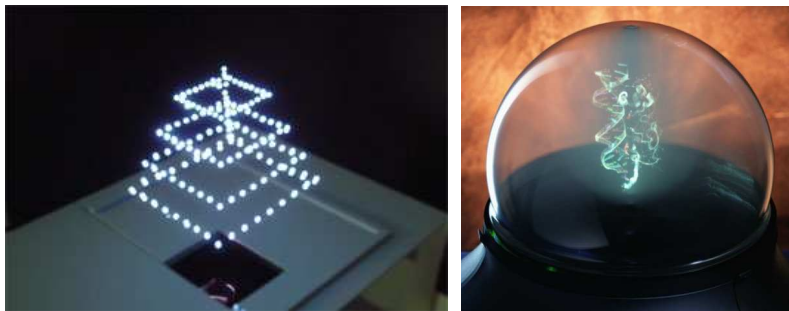
*Obr. 11 3D LED displej*

### **2.3.7 Volumetrické zobrazenie**

Pri volumetrickom zobrazení sa vytvára skutočný priestorový obraz. Body priestorového telesa slúžiace ako display, vytvárajú buď skutočné priestorové teleso, napr. kocka, alebo rýchlo rotujúca doska. Obraz je vytváraný rozsvietením príslušných bodov v priestore.

- výhody: obraz vytváraný rozsvietením bodov v 3D nevyžaduje pomôcky, nespôsobuje nevoľnosť
- nevýhody: z 2D cues nepodporuje prekrytie objektov, technicky veľmi náročné





Obr. 12 Volumetrické zobrazovače

### 2.3.8 Holografia

Teória holografického zobrazenia objektov v priestore je známa od roku 1947. Objavitel'ovi teórie, vedcovi maďarského pôvodu Dennisovi Gáborovi, však vtedy k realizácii zobrazovača hologramu chýbal zdroj koherentného svetla - laser. Objavenie laseru v roku 1960 bolo preto veľmi významným prínosom pre aplikáciu teórie holografie. Rovnako významným prínosom sa zdá byť technické zvládnutie generovania hologramov počítačom, t.j. digitálnou cestou.

- výhody: skutočný priestorový obraz, rešpektujúci všetky faktory pre verné 3D zobrazenie, nevyžaduje pomôcky, nespôsobuje nevoľnosť
- nevýhody: technicky veľmi náročné

Týmto sme sa dostali na koniec krátkeho prehľadu techník priestorového zobrazovania, ktoré je so samotným priestorovým zobrazovaním neodmysliteľne spojené.

## 3 Teoretické základy stereoskopického zobrazenia

V súčasných systémoch virtuálnej reality sú stereoskopické obrazy generované pomocou prilieb pre virtuálnu realitu (ďalej len HMD - Head-Mounted Display) do istej miery vzdialené skutočnosti, pretože ak chceme, aby sa v HMD zobrazil korektný stereoskopický obraz, musíme vziať do úvahy veľa parametrov.

### 3.1 Virtuálne prostredie

Niektorí ľudia sa držia názoru, že pocit toho, že sa niekde nachádzame, a že veci okolo nás skutočne existujú, je závislý výhradne na našom zmyslovom vneme. Naše oči vidia okolie, uši počujú zvuk a hmat nám signalizuje, že napríklad sedíme v kresle a takýchto príkladov by sme mohli napočítať na tisíce. Tieto vnemové informácie sa menia nepretržite v závislosti od našej činnosti. Ak by bolo možné nahradiť naše zmysly umelo vytváranými údajmi zodpovedajúcimi činnosti, ktorú len predpokladáme, vnímali by sme úplne iné prostredie. Nebolo by to už skutočné prostredie, ale tzv. virtuálne prostredie.

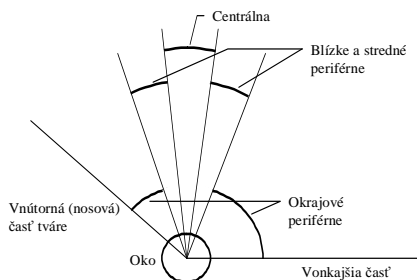
Virtuálne prostredie by sme mohli nazvať ako synonymum pre virtuálnu realitu, aj keď pri podrobnejšom rozbere by sme došli k záveru, že to nie je to isté, ale momentálne nám vystačí slovné spojenie *virtuálna realita*, keďže je to v širokej verejnosti dosť vžitá pomenovanie umelo vytvoreného prostredia, teda virtuálneho prostredia.

Cieľom vo virtuálnej realite je prinútiť nás zabudnúť na skutočnú realitu, z ktorej sme do virtuálnej vstúpili. Ak by sme to chceli zhrnúť, tak virtuálne prostredie alebo virtuálna realita je simuláciou prostredia alebo reality, vytvorená zmyslovými vnemami rovnakým spôsobom ako skutočné prostredie, skutočná realita, za účelom vyvolania pocitu, že sa nachádzame v úplne inom prostredí.

Z piatich zmyslových orgánov oči poskytujú najviac informácií, v dôsledku čoho nás vedia najviac presvedčiť, že to čo vidíme je skutočné. Ak sa nám podarí „presvedčiť“ naše oči, sme na dobrej ceste k úspechu pri simulácii reality.

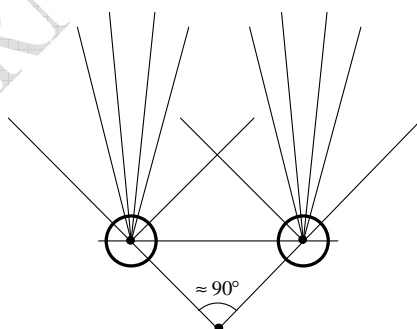
Veľmi dôležitým parametrom je veľkosť zorného poľa, ktoré by malo byť dostatočne veľké, aby pozorovateľ mal pocit „ponorenia sa“ do virtuálneho prostredia. Pri pohľade očí priamo vpred je veľkosť zorného poľa oboch očí približne 180° horizontálne a 135° vertikálne. Jedno oko má veľkosť zorného poľa v horizontálnom smere približne 150° [3]. Približne 20° centrálnej časti zorného poľa každého oka je premietnuté do fovey, najcitlivejšej časti sietnice.





Obr. 13 Jednotlivé časti zorného poľa oka

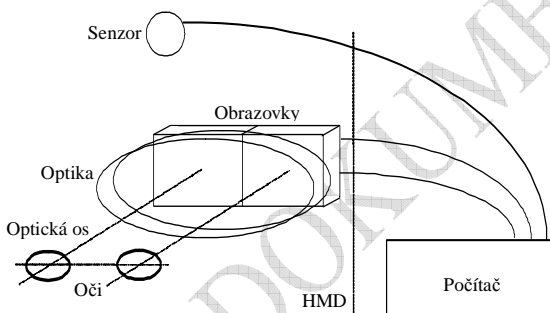
Blízke periférne videnie tvorí približne  $30^\circ$ , stredné periférne videnie okolo  $50^\circ$ . Zvyšných  $100^\circ$  zostáva pre okrajové periférne videnie, pozostávajúce z  $35^\circ$  na vnútornej (nosovej) časti tváre, a  $65^\circ$  na vonkajšej časti (Obr. 13). Tu je rozlíšenie oka najmenšie, avšak táto časť zorného poľa oka hrá významnú úlohu pri detekcii pohybu. Na základe takejto analýzy zorného poľa môžeme predpokladať, že na to, aby mal pozorovateľ aspoň nejaký pocit „ponorenia sa“ do virtuálneho prostredia, veľkosť zorného poľa oboch očí by mala byť minimálne okolo  $50^\circ$ , no ak chceme dosiahnuť vernejšieho zobrazenia, mali by sme vziať do úvahy aspoň časť okrajového periférneho videnia a tým by sa minimálna veľkosť zorného poľa posunula na hodnotu, takpovediac minimálneho optima, okolo  $90^\circ$  (Obr. 14, na porovnanie, veľkosť zorného poľa televízneho prijímača s uhlopriečkou 67 cm, sledovaného zo vzdialenosti 3 m je  $10^\circ$ ).



Obr. 14 Minimálna veľkosť zorného poľa oboch očí ( $90^\circ$ )

## 3.2 Prilby pre virtuálnu realitu (Head-Mounted Displays)

V súčasnosti najpoužívanejším zariadením pre vytváranie scén vyvolávajúcich pocit „ponorenia sa“ do virtuálneho prostredia je prilba so zabudovaným displejom (HMD). HMD pozostáva z dvoch malých obrazoviek (pre každé oko jedna obrazovka). Medzi okom a obrazovkou je umiestnený optický systém šošoviek, ktoré zväčšujú veľkosť obrazu a zároveň aj veľkosť zorného poľa. V HMD sú umiestnené senzory pre určenie pozície a orientácie HMD, ktoré nepretržite vysielajú údaje do počítača. Počítač spracuje údaje o pozorovateľovej polohe a smere pohľadu a vytvorí jednotlivé obrazy pre ľavé a pravé oko, ktoré sa následne zobrazia na obrazovkách v HMD.



Obr. 15 Princíp prilby pre virtuálnu realitu (HMD)

## 3.3 Stereoskopia a HMD

Pri pozorovaní určitého objektu v priestore hrá niekoľko faktorov veľmi dôležitú úlohu v tom, že vidíme ostrý a trojrozmerný obraz :

- *konvergencia* - natočenie očí priamo na objekt. Uhol medzi osou pohľadu jednotlivých očí sa nazýva *konvergenčný uhol*.
- *akomodácia* - zmena ohniskovej vzdialenosti šošovky oka pri pozorovaní rozlične vzdialených objektov.
- ľavé a pravé oko sú navzájom horizontálne posunuté, takže každé oko vidí objekt pod iným uhlom. Tento jav sa nazýva *binokulárna disparita*. Mozog skombinuje tieto obrazy a my takto môžeme pocítiť tretí rozmer, „hĺbku“ obrazu.

Pri generovaní obrazu na obrazovky prilby musíme tieto faktory vziať do úvahy, aby sme dosiahli *orthostereoskopiou*, čo je jav, kedy by sa obraz vytváraný 3D-obrazovkou mal meniť presne tak, ako by sa menil obraz skutočného objektu pri podobnom pohybe pozorovateľovej hlavy.

### 3.3.1 Hĺbkový vnem

Ako sme spomenuli, obrazy premietané na sietnicu každého oka sa navzájom líšia, čo znamená, že každé oko pozerá na objekt pod iným uhlom.

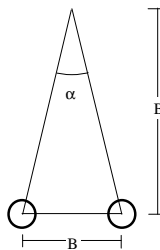
Keď sa zmení ohnisková vzdialenosť pri pozorovaní jedného objektu na inú ohniskovú vzdialenosť pri pozorovaní iného objektu, ktorý je napr. bližšie k nám, mení sa aj konvergenčný uhol, čo vyplýva zo vzájomného posunutia očí. Ak je zmena obrazov objektu v jednotlivých očiach postrehnuteľná, tento ďalší objekt sa nám javí bližšie ako ten predchádzajúci. Nazvime najmenší takto pozorovateľný rozdiel *stereoskopické rozlíšenie oka*.

Ak predpokladáme určitú hodnotu stereoskopického rozlíšenia oka  $\alpha$  (približne  $60''$ ) a určitú hodnotu vzájomnej vzdialenosti očí  $B$  (povedzme 65 mm), môžeme vypočítať najväčšiu vzdialenosť  $D$ , kedy je ešte význam hovoriť o stereoskopickom rozlíšení oka, alebo kedy ešte môžeme „pocítiť hĺbku“ objektu (Obr. 16):

$$D = \frac{B}{2 \cdot \tan(\alpha/2)} \quad (1)$$

Po dosadení dostaneme, že vzdialenosť, v ktorej už prestávame vidieť priestorovo je  $D \approx 223$  m. To znamená, že všetky objekty za touto vzdialenosťou sa nám javia plošne.

Na tomto mieste by sme si mohli zadať akúsi pseudojednotku stereoskopického zobrazenia, tzv. *hĺbkový krok* alebo *stereokrok*: Pohybujeme sa smerom ku objektu, ktorý sa nachádza vo vzdialenosti  $D$ , pokiaľ sa nepriblížime na vzdialenosť napríklad 25 cm. Pri každej zmene polohy vzhľadom na objekt, by sa mala veľkosť kroku voliť tak, aby zmena obrazu objektu v oku bola na hranici postrehnuteľnosti. Inak povedané, veľkosť konvergenčného uhla medzi jednotlivými zmenami polohy by sa mala líšiť práve o hodnotu stereoskopického rozlíšenia oka  $\alpha$ , t.j. pri pohybe sa budeme riadiť stereoskopickým rozlíšením oka a budeme počítať každý takýto krok, ktorý je práve tým našim hĺbkovým krokom alebo stereokrokom.



Obr. 16 Najväčšia vzdialenosť pre stereoeфекt

Takto zadanú jednotku by sme mohli použiť na meranie hĺbky stereoobrazu. Počet hĺbkových krokov  $k$  medzi objektom, ktorý je vo vzdialenosti  $d$  a bodom  $D$  ( $d < D$ , vzhľadom na pozorovateľa) môžeme vypočítať zo vzťahu:

$$k = \frac{\varphi}{\alpha} \quad (2)$$

kde  $\varphi$  je veľkosť konvergenčného uhla pre vzdialenosť  $d$ :

$$\varphi = 2 \cdot \arctg\left(\frac{B}{2 \cdot d}\right) \quad (3)$$

S danou hodnotou stereoskopického rozlíšenia oka a pre vzdialenosť 25 cm dostaneme približne 888 hĺbkových krokov. Pri podrobnejšom rozbere zistíme, že takmer 92% z týchto hĺbkových krokov sa nachádza medzi vzdialenosťou 25 cm a 3 m, čo znamená, že tento priestor zohráva veľmi dôležitú úlohu pri „precítení hĺbky“.

Ak sa nám pri zobrazovacom zariadení podarí dosiahnuť stereoskopické rozlíšenie  $\alpha'$ , potom skutočná hĺbka objektu bude  $\alpha'/\alpha$  násobkom hĺbky obrazu objektu.

### 3.3.2 Chyby pri zobrazovaní

Väčšina stereoobrazov vo virtuálnej realite sa vytvára bez toho, aby sa zobrazi do úvahy niektoré faktory, ktoré majú podstatný vplyv na výsledný stereoefekt. Parametre sa väčšinou nastavujú experimentálne, takže výsledný efekt má niekedy dosť ďaleko do optimálnej hĺbky obrazu. Pokúsme sa teraz trochu bližšie analyzovať takýto postup a poukázať na niektoré takto vzniknuté chyby. Tieto chyby si môžeme rozdeliť do dvoch hlavných skupín:

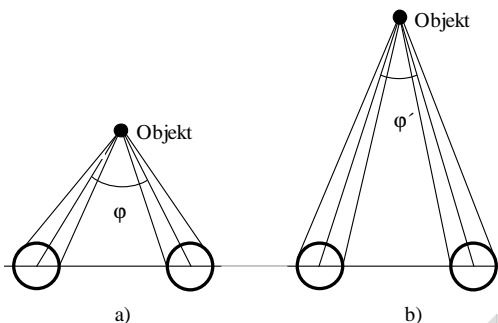
- všeobecné chyby (nezávislé na HMD)
- chyby závislé na HMD

Chyby prvej kategórie sú výsledkom nesprávneho simulovania reality, inými slovami, nesprávneho simulovania toho, čo by oči v skutočnosti mali vidieť. Chyby druhej kategórie vznikajú pri nesprávnom využití vlastností samotnej HMD vo fáze výpočtu scény.

#### 3.3.2.1 Všeobecné chyby (nezávislé na HMD)

##### • Akomodácia nezodpovedá konvergencii

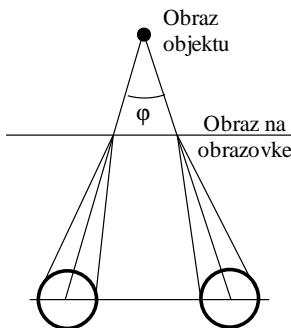
Oči sú prispôbené na to, že konvergencia a akomodácia spolu súvisia: určitej vzdialenosti zodpovedá príslušný konvergenčný uhol (keď sú oči upreté priamo na objekt v danej vzdialenosti) a akomodácia (zaostrenie očí na tento objekt).



Obr. 17 Konvergencia a príslušná akomodácia:

a) blízky objekt, veľký konvergenčný uhol a akomodácia b) vzdialený objekt, malá konvergencia a akomodácia

Obraz na obrazovke sa nachádza v pevnej vzdialenosti, čo znamená, že oči majú konštantnú akomodáciu. Na Obr. 18 oči konvergujú na obraze objektu, ale akomodujú na obraze na obrazovke. Tento fenomén sa nazýva **akomodačno-konvergenčný konflikt**. Valyus odporúča maximálnu prípustnú odchýlku  $1.6^\circ$  od príslušného konvergenčného uhla. Pri väčšej odchýlke sa môže objaviť zdvojenie: hoci je snaha, aby pozorovateľ videl napríklad len jeden pixel, dochádza k dojmu pozorovania dvoch rozličných bodov [ 3]. Aj pri tejto odchýlke dochádza k určitému skresleniu, keďže objekt, ktorý sa nachádza vo vzdialenosti  $d = 0.5 \text{ m}$ , sa nám môže zobraziť v intervale 41 - 63 cm. Akýmisi pseudoriešením je naučiť pozorovateľa **oddeliť navzájom konvergenciu a akomodáciu**.

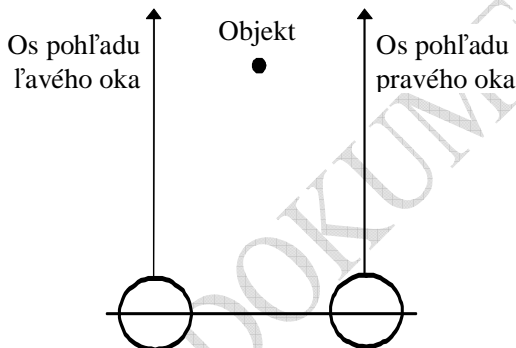


Obr. 18 Konštantná akomodácia na obraz na obrazovke

## • Nesprávna projekcia

### Projekcia pomocou paralelných osí pohľadu oboch očí

Použitím tejto metódy môžeme dosiahnuť celkom pôsobivý výsledok. Musíme si však zároveň všimnúť, že pri tejto metóde konvergenčný uhol nikdy nezodpovedá realite, okrem prípadu, keď sa pozeráme do „nekonečna“, lepšie povedané za už spomenutú vzdialenosť  $D = 223 \text{ m}$ , kedy konvergenčný uhol je už pod hranicou stereoskopického rozlíšenia oka, t.j.  $\varphi \approx 0^\circ$  (pozri nasledujúci obrázok).



Obr. 19 Paralelný smer pohľadu očí

### Projekcia na os pohľadu

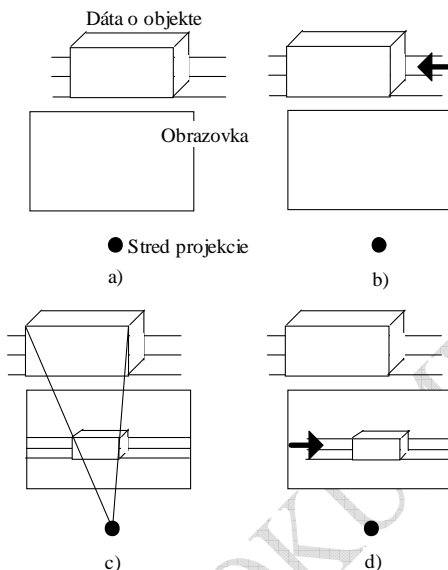
Vezmime do úvahy pri projekcii pomocou paralelných osí smeru pohľadu oboch očí aj konvergenčnú chybu: použijeme jeden stred projekcie a horizontálny presun údajov. Príslušný algoritmus by bol nasledovný (Obr. 20):

pre pravé oko:

1. prenes dáta o objekte doľava o  $B/2$
2. štandardná perspektívna projekcia
3. premietni výsledný obraz späť

a podobne aj pre ľavé oko.

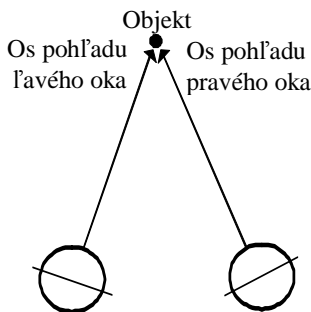
Veľkosť zorného poľa pri projekcii na os pohľadu je rovnaká, ako pri perspektívnej projekcii do jedného bodu.



Obr. 20 Projekcia na os pohľadu: a) počiatočná situácia b) situácia po presune c) perspektívna projekcia d) premietnutie výsledného obrazu späť

### Mimoosová projekcia

Mimoosová projekcia má trochu bližšie k realite, pretože sa snaží využívať konvergenciu namiesto paralelných osí pohľadu. Problémom je len určiť, na ktorý objekt sa pozorovateľ práve v tej chvíli pozerá, pretože podľa toho sa určí konvergenčný uhol (Obr. 21).



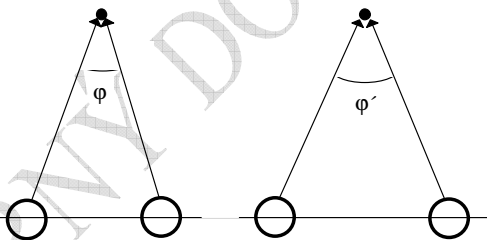
Obr. 21 Mimoosová projekcia

### Rotácia

Táto metóda, využívaná v niektorých prípadoch, funguje na princípe rotácie dát o objekte o určitý malý uhol zvlášť pre ľavé a zvlášť pre pravé oko. Pri výpočte obrazu pre ľavé oko sa rotuje proti smeru pohybu hodinových ručičiek a pre pravé oko v smere pohybu hodinových ručičiek. Pri tejto metóde sa však zvyčajne vo výslednom obraze prejaví *vertikálna paralaxa* (rozloženie), čo spôsobuje pomerne nepríjemné pocity až bolesť v očiach. Bolo odskúšané, že táto metóda dáva výsledky podobné mimoosovej projekcii.

#### • Nesprávne zvolenie vzájomnej vzdialenosti očí

Základňa rozostavenia očí určuje, ako veľmi musia pozorovateľove oči konvergovať, aby mohol správne zaostriť na objekt v určitej vzdialenosti. Na nasledujúcom obrázku (Obr. 22) môžeme vidieť príklad dvoch pozorovateľov s rozdielnym rozostavením očí, ktorí pozerajú na objekt v rovnakej vzdialenosti. Ak by sme pri výpočtoch zvolili konštantnú hodnotu, napr. štandardnú vzdialenosť 65 mm, pozorovateľ, ktorého oči sú od seba rozostavené na väčšiu vzdialenosť, by videl objekt v oveľa väčšej vzdialenosti ako by v skutočnosti bol a opačný výsledok by sme dosiahli pri pozorovateľovi s menším rozostúpením očí.

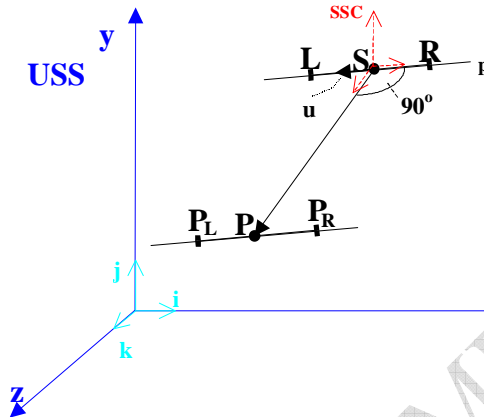


Obr. 22 Rozdielny konvergenčný uhol pri rozdielnom rozostavení očí

## 3.4 Stereoskopické zobrazenie mimo reálneho času

Na obrázku Obr. 23 je znázornená súradnicová sústava, s ktorou sa pracuje, takže ďalšie výpočty sa budú vzťahovať na túto súradnicovú sústavu. V prípade výpočtu mimo reálneho času sa najčastejšie používa fotorealistická metóda raytracing.





Obr. 23 Stereoskopická súradnicová sústava

Popíšme si jednotlivé body na predchádzajúcom obrázku:

$x, y, z$  - osi súradnicového systému virtuálneho sveta

$i, j, k$  - jednotkové vektory týchto osí

$S$  - stanovište (umiestnenie) pozorovateľa

$P$  - bod (smer), kam sa pozorovateľ pozerá

$L, R$  - polohy očí (miesta, z ktorých sa získavajú obrazy pre jednotlivé oči ...

left eye, right eye)

$p$  - priamka, na ktorej sú umiestnené oči

$u$  - normalizovaný smerový vektor priamky  $p$

Pri výpočte vektora  $u$  vychádzame z toho, že ak rovina  $R_{ZX}$  určuje rovinu, ktorá je rovnobežná s rovinou zeme (podlahy), tak priamka očí (priamka, na ktorej oči ležia), v našom prípade priamka  $p$ , je rovnobežná s touto rovinou. Zároveň táto priamka je kolmá na smer pohľadu:

$$p \perp k \Rightarrow u \perp k \quad \wedge \quad p \perp SP \Rightarrow u \perp SP \quad \wedge \quad |u| = 1$$

Ak vychádzame z týchto požiadaviek, tak pre  $u$  platí:

$$\vec{u} = \frac{\vec{j} \times \overline{SP}}{|\vec{j} \times \overline{SP}|} \quad (4)$$

Nech  $S = (S_x, S_y, S_z)$  a  $P = (P_x, P_y, P_z)$ , potom  $SP = (SP_x, SP_y, SP_z)$ , kde  $SP_x = P_x - S_x$ ,  $SP_y = P_y - S_y$ ,  $SP_z = P_z - S_z$ . Pre  $\vec{j}$  platí:  $\vec{j} = (0, 1, 0)$ ,  $|\vec{j}| = 1$ , môžeme teda napísať:

$$\vec{j} \times SP = (SP_z, 0, -SP_x), \quad d = |\vec{j} \times SP| = ((SP_z)^2 + (SP_x)^2) \quad (5)$$

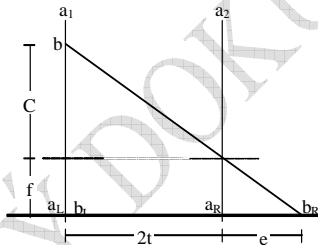
Takže výsledné súradnice vektora  $\mathbf{u}$  sú:  $\mathbf{u} = (SP_z / d, 0, -SP_x / d)$ .

Keď sme vypočítali  $\mathbf{u}$ , môžeme určiť aj súradnice bodov L, R:

$$\mathbf{L} = \mathbf{S} + t\mathbf{u}, \quad \mathbf{R} = \mathbf{S} - t\mathbf{u} \quad (6)$$

Ostáva nám určiť parameter  $t$ , no skôr ako pristúpime k jeho výpočtu, je potrebné určiť *stereoskopickú základňu*, t.j. vzájomnú vzdialenosť očí. Avšak obrazy objektov získavané pri základni  $B = 0.065\text{m}$  boli pre malé vzdialenosti príliš skreslené a pre veľké vzdialenosti sa skoro ničím nelíšili od plošných obrazov. Základná chyba bola vo voľbe konštantnej základne  $B = 0.065\text{ m}$ , preto veľkosť stereoskopickej základne pri získavaní obrazov musí byť premenlivá a musí závisieť od vzdialenosti objektov v popredí.

Pristúpme teraz ku samotnému výpočtu  $t$ . Vychádzame pritom Obr. 24 a zo samotného princípu generovania obrazov pomocou metódy raytracing.. Pri výpočte touto metódou sa správame ako kamera, pomocou ktorej získaváme potrebné statické obrazy. Keďže máme dva obrazy, pre ľavé a pravé oko, dostávame akúsi virtuálnu dvojicu kamier (Obr. 24).



Obr. 24 Princíp zobrazenia pomocou tzv. virtuálnych kamier

$f$  - ohnisková vzdialenosť (*FOC\_LENGTH*)

$2t$  - stereoskopická základňa pre získanie obrazov

$C$  - vzdialenosť najbližšej zobrazovanej roviny

$e$  - lineárna paralaxa nekonečna

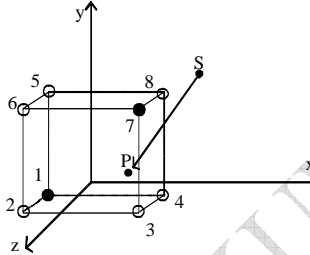
Ak čiary  $a_1-a_L$  a  $a_2-a_R$  určujú optické osi našich kamier (objektívov), tak môžeme povedať, že nejaký bod  $a$ , ležiaci v nekonečne, sa zobrazí v obrazových poliach v bodoch  $a_L$  a  $a_R$ , zatiaľ čo bod  $b$  v ľavom obrazovom poli splynie s  $a_L$  a v pravom obrazovom poli sa zobrazí do bodu  $b_R$ . Z podobností trojuholníkov môžeme odvodiť vzťah:

$$t = \frac{C \cdot e}{2 \cdot f} \quad (7)$$

*Lineárna paralaxa nekonečna*  $e$  určuje maximálne posunutie oboch obrazov, t.j. vzájomné posunutie objektov v jednom a druhom zobrazovacom poli bude menšie

alebo rovné  $e$ , a to tak, že s narastajúcou vzdialenosťou od objektívov kamier (očí) sa toto posunutie znižuje, čo zodpovedá aj skutočnosti.

Pri výpočte vzdialenosti najbližšej zobrazovanej roviny (najbližšieho objektu scény) budeme opäť vychádzať z princípov fotorealistického zobrazovania metódou raytracing. Využijeme jednu z metód urýchlenia výpočtu scény, presnejšie metódu ohraničujúcich telies, ktorá spočíva na uzavretí scény do ohraničujúceho telesa [6] (napr. kváder), ktorého hranice sú reprezentované dvojicou bodov. Jedná sa o ľavý - dolný - zadný a pravý - horný - predný bod kvádra (Obr. 25).



Obr. 25 Ohraničujúce teleso scény

Keď máme tieto dva body, môžeme si vypočítať aj všetky ostatné nasledovne:

Vrchol 1:  $V_1 = (x_1, y_1, z_1)$  ... ľavý - dolný - zadný

Vrchol 2:  $V_2 = (x_1, y_1, z_2)$

Vrchol 3:  $V_3 = (x_2, y_1, z_2)$

Vrchol 4:  $V_4 = (x_2, y_1, z_1)$

Vrchol 5:  $V_5 = (x_1, y_2, z_1)$

Vrchol 6:  $V_6 = (x_1, y_2, z_2)$

Vrchol 7:  $V_7 = (x_2, y_2, z_2)$  ... pravý - horný - predný

Vrchol 8:  $V_8 = (x_2, y_2, z_1)$

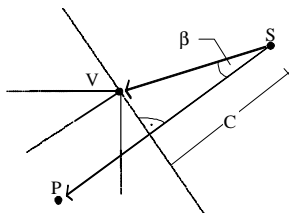
Následne pre  $\forall i, i = \{1, \dots, 8\}$  určíme  $SV = \min(|SV_i|)$ .

Nech v našom prípade platí, že  $SV = SV_8$  (Obr. 26), potom vzdialenosť  $C$  môžeme určiť nasledovne:

$$SP \cdot SV = |SP| |SV| \cos \beta \quad \wedge \quad \cos \beta = C / |SV| \quad (8)$$

Z čoho dostávame pre  $C$  výsledný vzťah:

$$C = \frac{\overline{SP \cdot SV}}{|\overline{SP}|} \quad (9)$$

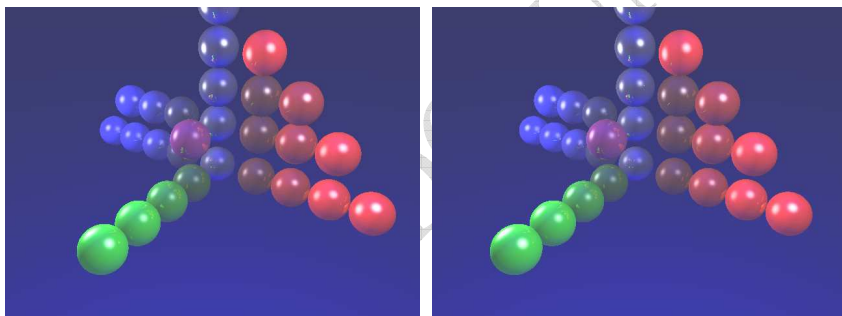


Obr. 26 Vzďalenosť najbližšej zobrazovanej roviny

Keďže celá scéna je uzavretá ohraničujúcim telesom, môžeme mať istotu, že žiaden objekt nebude bližšie ako na vzdialenosť  $C$ .

Takto vypočítané hodnoty môžeme dosadiť do rovnice (6). Tým istým spôsobom (6) vypočítame aj súradnice bodov  $P_L$  a  $P_R$ , t.j. body, kam sa pozorovateľ pozerá:

$$\mathbf{P}_L = \mathbf{P} + \mathbf{t}u, \quad \mathbf{P}_R = \mathbf{P} - \mathbf{t}u \quad (10)$$



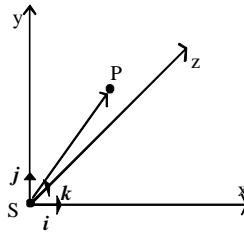
Obr. 27 Príklad ľavého a pravého obrazu získaného metódou raytracing

### 3.5 Stereoskopické zobrazenie v reálnom čase

Tak isto ako pri stereoskopickom zobrazení mimo reálneho času, aj pri stereoskopickom zobrazení v reálnom čase musíme vziať do úvahy hodnoty uvedené v predošlom.

Na generovanie obrazov budeme v tomto prípade používať vizualizačné jadro VR systému KPI, preto musíme opäť urobiť určité korekcie.

Na obrázku Obr. 28 je znázornená súradnicová sústava, s ktorou vizualizačné jadro pracuje a aj ďalšie výpočty sa budú vzťahovať na túto súradnicovú sústavu.



Obr. 28 Súradnicová sústava vizualizačného jadra

Popis jednotlivých bodov zodpovedá popisu pri obrázku Obr. 23.

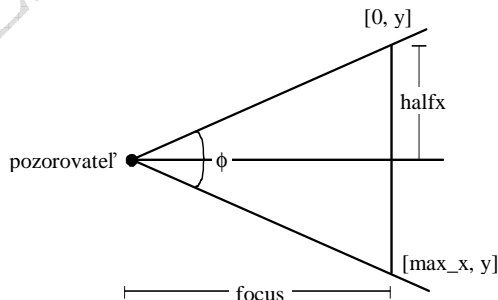
Keďže súradnicová sústava vizualizačného jadra sa od súradnicovej sústavy raytracera líši len v orientácii osi  $z$  (navzájom opačné), východzie podmienky pre priamku očí (priamka, na ktorej oči ležia) ostávajú zachované:

$$p \perp k \Rightarrow u \perp k \quad \wedge \quad p \perp SP \Rightarrow u \perp SP \quad \wedge \quad |u| = 1$$

Následne toho rovnice (4), (5), (6), (7) a (10) ostávajú v pôvodnom stave, t.j. v nasledujúcom texte ich využijeme pre výpočet potrebných bodov a rozdiel oproti predchádzajúcej kapitole bude hlavne vo výpočte parametra  $C$ . Pristúpme teda ku samotnému určeniu  $C$ .

Budeme vychádzať zo základných princípov riešenia kolízie pri BSP stromoch, kde sa využíva určitá tolerancia pre vzdialenosť od objektu. Ak uvážime, že  $k$  žiadnemu objektu alebo stene sa nemôžeme priblížiť na vzdialenosť menšiu ako daná tolerancia, logicky nám vychádza, že najmenšia vzdialenosť zobrazovacej roviny je práve táto tolerancia, takže tým pádom máme určený parameter  $C$ .

Ako ohniskovú vzdialenosť použijeme hodnotu, ktorú využíva samotné vizualizačné jadro, a ktorá sa určuje z veľkosti zorného poľa (Obr. 29):



Obr. 29 Určenie ohniskovej vzdialenosti

Na základe Obr. 29 je závislosť ohniskovej vzdialenosti a veľkosti zorného uhla nasledovná:

$$focus = \frac{halfx}{tg(\phi/2)} \quad (11)$$

Potom na základe vzťahov (6) a (10) dostávame súradnice bodov, z ktorých sa získavajú obrazy objektov pre jednotlivé oči (súradnice akýchsi pseudopozorovateľov a súradnice bodov, kam sa pozerajú).



Obr. 30 Príklad stereoskopického zobrazenia scény (vizualizačné jadro KPI)

## 4 Použitá literatúra

- [ 1 ] Vrba, M. - Kajuch, L. : Stereoskopia a stereoskopická fotografia, Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, Bratislava, 1963.
- [ 2 ] Chládek, J. : Nejen 3D, i 4D! CHIP, 2, február 1998, str. 164-165.
- [ 3 ] Valyus, N.A. : Stereoscapy. Focal Press, London, 1966.
- [ 4 ] Robinett, W. - Rolland, J. P. : A computational model for the stereoscopic optics of a head-mounted display. In Proc. SPIE vol.1457, 1991, str. 140-160.
- [ 5 ] VFX1 HEADGEAR - User's Manual, FORTE Technologies, Inc., 1995.
- [ 6 ] Diplomová práca: Janošo, R. : Raytracing pomocou oktantového stromu, KPI FEI TU Košice, 1996
- [ 7 ] Diplomová práca: Ngwala, B. : Textúrovanie v systémoch virtuálnej reality, KPI FEI TU Košice, 1998
- [ 8 ] Bernatchez, M. : Resolution analysis for HMD helmets, Internet, 1997.
- [ 9 ] Ontkanin, J. - Ngwala, B. : Stereoskopia - semestrálne zadanie, KPI FEI TU Košice, 1996