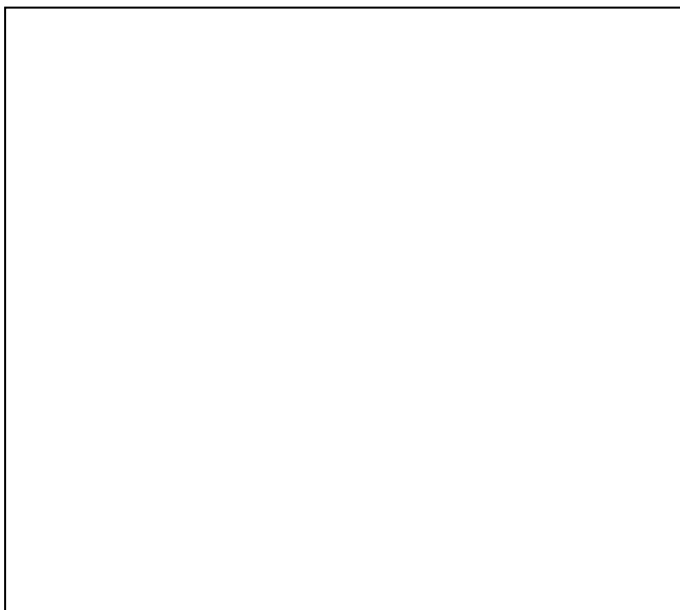


2.6. Stereoskopické vidění a měření

Stereoskopický vjem je základem prostorového rozlišování bodů – umožňuje určit vzájemnou polohu bodů v prostoru. Je nezávislý na našich zkušenostech se zákony perspektivy – zmenšováním předmětů se vzrůstající vzdáleností nebo zakrýváním vzdálenějších předmětů předměty bližšími, ubýváním kontrastu barev se vzdáleností a pozorováním stínů.

➤ přirozené stereoskopické vidění

Vzniká v mozku prostřednictvím dvou zdravých očí schopných *akomodace* (změny zakřivení) oční čočky a *konvergence* (stočení) očních os tak, aby byl pozorovaný bod zaostřený a oční osy se na něm protínaly.¹



b_0 – oční základna

(běžně v rozmezí 60 až 70 mm),

γ – konvergenční úhel,

d_γ – změna konvergenčního úhlu

(nejmenší hodnota, které jsou oči schopné),

y – vzdálenost předmětu

od pozorovatele,

d_y – přesnost stereoskopického pozorování,

Přesnost stereoskopického pozorování můžeme vysvětlit jako nejmenší možnou změnu vzdálenosti, kterou jsou lidské oči ve směru od pozorovatele ještě schopné rozpoznat. Jeho teoretickou hodnotu lze odvodit z následujících vztahů:

$$\gamma = \frac{b_0}{y} \cdot \rho, \quad \gamma_1 = \frac{b_0}{y_1} \cdot \rho \quad \text{a} \quad y = \frac{b_0}{\gamma} \cdot \rho, \quad y_1 = \frac{b_0}{\gamma_1} \cdot \rho, \quad \text{zároveň platí:}$$

$$\gamma < \gamma_1, \quad d_\gamma = \gamma_1 - \gamma \quad \text{a} \quad y > y_1, \quad d_y = y - y_1$$

¹ Pro pochopení stavby a funkce oka je třeba znát pojmy: rohovka, bělma, duhovka, zornička, oční čočka, sklivec, sítnice, tyčinky, čípky, žlutá skvrna, oční nerv, slepá skvrna.

$$d_y = y - y_1 = \frac{b_0}{\gamma} \cdot \rho - \frac{b_0}{\gamma_1} \cdot \rho = \frac{b_0 \cdot \gamma_1}{\gamma \cdot \gamma_1} \cdot \rho - \frac{b_0 \cdot \gamma}{\gamma_1 \cdot \gamma} \cdot \rho = \frac{b_0 \cdot (\gamma_1 - \gamma)}{\gamma_1 \cdot \gamma} \cdot \rho \quad \left| \begin{array}{l} \gamma_1 - \gamma = d_\gamma \\ \gamma_1 \doteq \gamma \rightarrow \gamma_1 \cdot \gamma \doteq \gamma^2 \end{array} \right.$$

$$d_y = \frac{b_0}{\gamma^2} \cdot d_\gamma \cdot \rho \quad \left| \quad \Leftrightarrow \gamma = \frac{b_0}{y} \cdot \rho \right.$$

$$d_y = \frac{b_0 \cdot d_\gamma \cdot \rho}{\frac{b_0^2}{y^2} \cdot \rho^2} = \frac{b_0 \cdot y^2 \cdot d_\gamma \cdot \rho}{b_0^2 \cdot \rho^2} = \frac{y^2 \cdot d_\gamma}{b_0 \cdot \rho} \quad \Rightarrow \quad \boxed{d_y = \frac{y^2}{b_0} \cdot \frac{d_\gamma''}{\rho''}}$$

Je zřejmé, že přesnost stereoskopického pozorování d_y klesá se čtvercem (druhou mocninou) vzdálenosti a dále závisí na velikosti oční základny b_0 a na nejmenší možné změně konvergenčního úhlu d_γ , které jsou oči schopné. Tato hodnota se liší podle toho, jaké předměty pozorujeme: pro liniové prvky (soustavu svislých rovnoběžných čar) $d_\gamma = 10$ až $20''$, pro bodové prvky (samostatné body v prostoru) $d_\gamma = 30''$ při pozorování oběma očima a pro monokulárním pozorování (pouze jedním okem) $d_\gamma = 60''$.

Dosadíme-li do rovnice přesnosti stereoskopického pozorování průměrné hodnoty: $b_0 = 65 \text{ mm}$, $d_\gamma = 30''$, získáme následující údaje:

y [m]	0,25	1	10	100	450	1000
d_y	0,14 mm	2,2 mm	0,22 m	22 m	450 m	2240 m

Z toho vyplývá, že schopnost stereoskopického pozorování končí přibližně ve vzdálenosti 450 m od pozorovatele. V reálném prostředí (např. vlivem atmosférických podmínek) končí ještě na kratší vzdálenosti – 250 až 300 m .

➤ prostředky pro zlepšení přirozeného stereoskopického vjemu

a) rozšíření oční základny

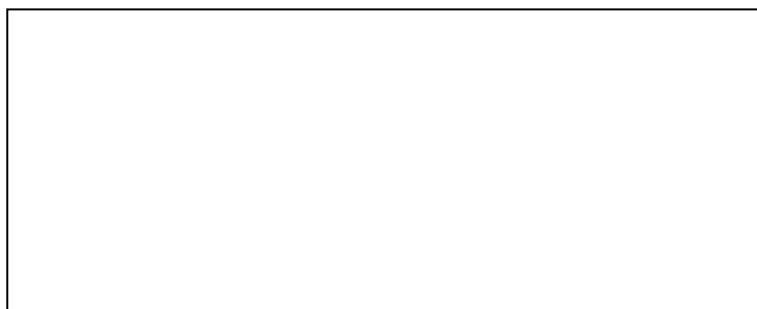
– provádí se pomocí zrcadel nebo hranolů a používá se u binokulárních dalekohledů (triedry) v turistice, lovectví nebo vojenství; extrémního rozšíření oční základny se využívá při pozorování objektů na moři v námořní plavbě (zlepšuje se odhad vzdálenosti a schopnost určit, zda se předměty vzdalují nebo přibližují).

Potom **specifická plastika** $n = \frac{b}{b_0}$ udává, kolikrát byla zvětšena oční základna a současně, kolikrát se zlepšil stereoskopický vjem.

b) zvětšení ostrosti vidění

– **optickým zvětšením** v dochází ke zlepšení rozlišovací schopnosti očí; nejmenší možné změně konvergenčního úhlu d_γ odpovídají menší vzdálenosti na pozorovaném objektu (předmět se přiblíží a zvětší).

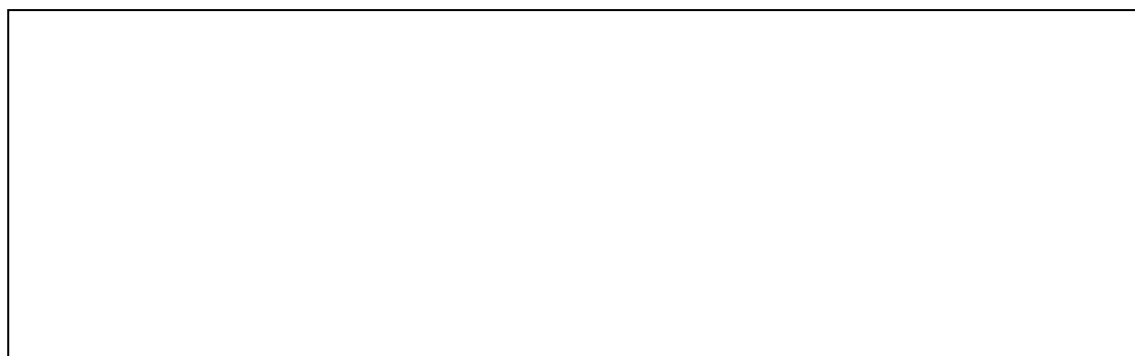
Totální plastika je součin specifické plastiky a optického zvětšení $n \cdot v$; udává, kolikrát se celkově zlepši přesnost stereoskopického pozorování při použití rozšíření oční základny i zlepšení ostroty vidění.



➤ **umělé stereoskopické vidění**

Pro získání *umělého stereoskopického vjemu*:

- a) Potřebujeme dva snímky pořízené za těchto podmínek:
- osy záběru musí být rovnoběžné
 - na snímcích je zjištělná **horizontální paralaxa** $p = x' - x'' \neq 0$; snímky jsou pořízeny ze dvou různých míst (tzn. z levého a pravého stanoviska fotogrammetrické základny)
 - nesmí nastat **vertikální paralaxa** $q = z' - z'' = 0$ resp. $q = y' - y'' = 0$; aby byla její velikost co nejmenší, musí být v případě pozemní fotogrammetrie objektivy na obou koncích základny přibližně ve stejné výšce.



Horizontální paralaxu při vyhodnocení snímků měříme a vertikální paralaxu pro zachování stereoskopického vjemu odstraňujeme.

- b) Snímky pozorujeme odděleně – levý snímek levým okem, pravý pravým.²
 c) Snímky musí být správně orientovány – během tzv. relativní orientace obnovujeme vzájemné postavení snímků, jaké bylo při jejich pořízení.³

² Všechny dále uváděné technologie pro získání umělého stereoskopického vidění řeší různým způsobem právě tuto podmínku.

³ Snímky pokládáme překrytovou částí k sobě. Správnou orientaci je možné kontrolovat také podle vržených stínů.

Po splnění těchto podmínek nastává v překrytovém území **normální stereoskopický vjem**.

Další možné stereoskopické vjemy:

- **pseudoskopický vjem** vznikne opačnou orientací snímků, tj. jejich otočením o 180° a záměnou levého a pravého snímku – prostorová souřadnice potom nabývá opačných hodnot. Využívá se v letecké fotogrammetrii pro kontrolu vyhodnocení výškopisu v rovinatém terénu, kde je jistota prostorového umístění měřické značky na terén menší,
- **nulový vjem** vznikne otočením snímků o 90° – z vertikální paralaxy se stává horizontální a může být měřena. Nenulové hodnoty ve směru vertikálních paralax ale způsobí, že nevidíme plasticky. Používá se při měření malých rozdílů ve vertikálním směru pro vědecké účely.

➤ prostředky pro získání umělého stereoskopického vjemu

Nejjednodušší způsob vyvolání stereoskopického vjemu (bez jakýchkoli pomůcek) je pozorování dvou snímků (obecně jakýchkoli dvou vhodných obrazů) ze vzdálenosti 25 cm od očí, kdy středy snímků jsou vzdáleny na délku oční základny. Přitom nejdlehlší body nesmí být vzdáleny více než 65 mm a maximální horizontální paralaxa je 40 až 50 mm .

Počáteční problémy činí potřeba docílit akomodace na blízký předmět a zároveň konvergence na předmět vzdálený (zaostření na blízko a téměř rovnoběžné oční osy).

Pozorujeme-li tyto řádky stereoskopicky, zdá se nám, že je každý jinak od nás vzdálen.	Pozorujeme-li tyto řádky stereoskopicky, zdá se nám, že je každý jinak od nás vzdálen.
--	--

Tyto obtíže odstraňují následující pomůcky:

– stereoskopy:

čočkový: před oči umístíme silné lupy (spojné čočky), přičemž středy snímků musí být na vzdálenost oční základny, která se nerozšiřuje;

zrcadlový: oční základna se rozšiřuje zrcadly a zároveň využíváme zvětšení obrazů pomocí čoček (rozšíření oční základny zároveň umožňuje pozorovat snímky větších formátů);

hranolový: oční základna se rozšiřuje pomocí optických hranolů; jsou součástí větších vyhodnocovacích přístrojů.

Čočko-zrcadlové stereoskopy se používají jako samostatná zařízení pro jednoduché metody vyhodnocení letecké fotogrammetrie (např. *Stereometr Zeiss*). Při pozorování snímků stereoskopem slouží k měření *stereomikrometr* (z měřených hodnot s odhadem na $0,01\text{ mm}$ lze vypočítat rozdíly horizontálních paralax a výškové poměry v území).

Zrcadlové stereoskopy se využívají i u malých digitálních fotogrammetrických stanic (např. DVP-Leica, VSD-UGH Krakow) pro stereoskopické pozorování dvojice snímků na monitoru počítače – v těchto případech se často nazývají sklopné stereoskopy.

Následující technologie a systémy pro získání umělého stereoskopického vjemu se liší způsoby oddělení obrazu pro levé a pravé oko:⁴

- **Anaglyfy** – snímky zobrazíme v doplňkových barvách (např. červené a azurové) a pozorujeme je brýlemi se stejně zbarvenými skly (barevnými filtry). Tímto způsobem je umožněno oddělené vnímání dvou vytištěných (v soutisku s mírným posunem), na monitoru počítače zobrazených nebo promítaných obrazů.⁵

Brýle jsou jednoduché a levné, ale stereovjem není příliš kvalitní (oddělení obou obrazů není dokonalé a nelze docílit dobrého barevného podání). Výhodou je možnost pozorování více osobami.



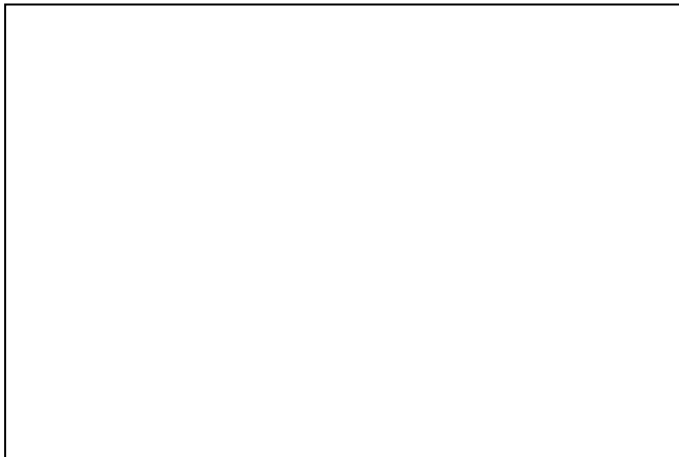
- **Krystalové brýle** – na monitoru je střídavě zobrazován levý a pravý snímek. Ve shodě s tím (pomocí infračerveného přenosu) je v brýlích se skly s tekutými krystaly střídavě cloněno levé a pravé oko a tím je umožněno oddělené pozorování obou snímků. Je-li frekvence střídání dostatečně vysoká

⁴ Levé oko vidí pouze levý snímek a pravé oko pouze pravý snímek.

⁵ Pro oba snímky v jednom obraze (barevně vytištěné nebo zobrazené na monitoru) se využívá princip *subtraktivního míchání barev* (barvy se odečítají od bílého podkladu) – např. levé sklo brýlí: červená, pravé sklo brýlí: azurová, levý obraz: azurový, pravý obraz: červený – komplementární barva se při ohledu brýlemi jeví jako černá. Pro dva snímky samostatně promítané pomocí světelných zdrojů přes barevné filtry (projekce na plátno) se využívá princip *aditivního míchání barev* (barvy se přičítají k neosvětlenému podkladu) – např. levé sklo brýlí: červená, pravé sklo brýlí: azurová, levý obraz: červený, pravý obraz: azurový – tmavou kresbu jednoho snímku osvětluje komplementární barva druhého snímku, takže se při pohledu brýlemi jeví jako černá.

(minimálně 25 Hz podobně jako u klasického filmu), dojde ke splynutí obou obrazů v jeden prostorový model. Moderní systémy používají zobrazování každého snímku $60x$ za sekundu, tzn. monitory s obnovovací frekvencí 120 Hz .⁶

Brýle jsou *aktivní* – drahé, větší a potřebují zdroj elektrické energie.⁷



- **Polarizační brýle a polarizační filtr** – na monitoru se opět s vysokou frekvencí střídavě zobrazují levý a pravý snímek. Ve shodě s tím se mění i polarizace filtru (modulátoru) umístěného před monitorem. Pro oddělení obrazů pro levé a pravé oko musejí být polarizační roviny na sebe kolmé – horizontálně a vertikálně polarizované světlo. Při dostatečné frekvenci střídání obrazů a pozorování brýlemi s horizontálně a vertikálně polarizujícími filtry pro oddělení obou obrazů vzniká stereoskopický vjem.⁸

Brýle jsou *pasivní* – levné, lehké a nepotřebují zdroj elektrické energie.



⁶ Nutná je vysoká obnovovací frekvence monitoru. Proto byly zpočátku používány pouze CRT (*Cathode Ray Tube*) monitory. V současné době tento požadavek splňují také některé LCD (*Liquid Crystal Display*) monitory (určené pro 3D zobrazování).

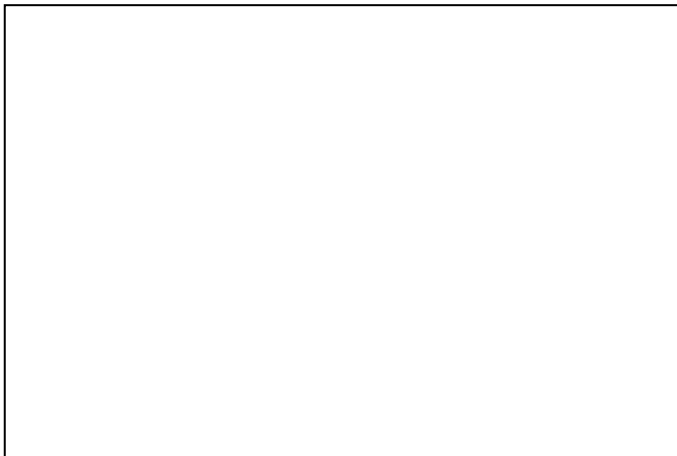
⁷ Na podobném principu pracoval starší typ brýlí s mechanickými rotačními clonami, které ale byly dosti těžké a jejich použití problematické.

⁸ Podobného principu se využívá při současném (bez modulátoru) nebo odděleném (s modulátorem) promítání obou obrazů přes polarizační filtry v kinematografii – tzv. 3D kina (pozn. povrch plátna nesmí měnit polarizaci odraženého světla).

Obdobná je technologie, kdy filtr před monitorem nemění svojí polarizaci, ale všechny liché, resp. sudé sloupce obrazu jsou filtrem trvale polarizovány v horizontálním, resp. vertikálním směru. Není třeba vysoká frekvence obnovování obrazu (současně se promítají oba obrazy rozdělené do lichých, resp. sudých sloupců). Rozlišení obrazu v jednom rozměru se ovšem snižuje na polovinu.

- **Polarizační brýle a polopropustné polarizační zrcadlo** – dva ploché monitory jsou umístěny nad sebou v úhlu cca 110° . V jejich ose je vloženo polopropustné zrcadlo, které zároveň působí jako vertikálně polarizující filtr. Na horním monitoru se neustále zobrazuje pravý snímek a jeho obraz se při odrazu od zrcadla horizontálně polarizuje. Na spodním monitoru se neustále zobrazuje levý snímek, jehož obraz se při průchodu zrcadlem polarizuje vertikálně.

Používají se pasivní *brýle s polarizačními filtry* jako v předchozím případě (na pravém oku s horizontální polarizací, na levém oku s vertikální polarizací). Stereoskopický vjem je kvalitní, přitom odpadá potřeba vysoké obnovovací frekvence použitých monitorů (tj. střídání dvou obrazů na jednom monitoru). Pořizovací náklady jsou ovšem vysoké.



- **Autostereoskopické prostředky** – tzv. *lentikulární obrazy* umožňují vznik stereoskopického vjemu bez potřeby jakýchkoli brýlí. Využívají fólie s lineárními čočkami, která se umísťuje na vytištěný obraz, monitor nebo display (např. u mobilních telefonů). Současně se zobrazují levý i pravý snímek, které jsou rozřezány na tenké proužky (sloupce) a opět složeny do jednoho obrazu tak, že se střídají proužky z levého a pravého snímku. Lineární čočky odklánějí všechny proužky z levého snímku do levého oka a všechny proužky z pravého snímku do pravého oka, a tím je opět docíleno odděleného pozorování obou snímků. Nevýhodou je snížení rozlišení obrazu na polovinu nebo i méně, pokud se má docílit širšího pozorovacího úhlu.

Existují i další technologie pro prostorové zobrazování bez brýlí (např. *holografie*), které se ale ve fotogrammetrii nepoužívají.

Současné digitální fotogrammetrické systémy pro stereoskopické vyhodnocení umožňují po provedení orientace snímků průběžně odstraňovat vertikální paralaxy pomocí **epipolární transformace** a tím neustále udržovat stereoskopický vjem. Pozemní i letecké snímky potom mohou být obecně orientované, ale musejí mít překrytovou část a alespoň přibližně rovnoběžné osy záběru. Během vyhodnocení jsou epipolární transformací převáděny na případ normální. Toto řešení je založeno na **podmínce komplanarity**, která bude splněna, pokud odpovídající si paprsky stereodvojice leží v jedné rovině se základnou, tzn. v této rovině leží také oba středy vstupních pupil, pozorovaný bod a jeho obrazy na snímcích.

