

「視機能を満足させる(装用型)ディスプレイ」

東京工芸大学 (名誉教授) 畑田豊彦

仮想現実(VR)システムの新しい展開に伴い、据置型から装用型ディスプレイが出現し、より自然な空間再現に向けて、超高精細・広視野表示に加えて、装用型特有の両眼視機能との整合も要求されるようになった。ここでは次の観点から、これから期待されるディスプレイ条件とその効果について整理する。

- 1) 2D映像の精細度・鮮鋭度向上により、観視距離の制約を解除し、視機能を満足させるだけの超高精細・高画質映像によって、実物感、奥行き感を生み出す。
→情報受容特性(弁別閾値)の限界を探る!
- 2) 映像の魅力である空間融合・誘導効果を高め、見える範囲(視野)の制約を取り除く広視野映像によって、より強い没入感、臨場感を提供する。
→情報受容動作の拡張に向けての対応!
- 3) 空間視機能を満足させ、見る方向の制約を低減した3D映像によって、確度の高い操作性(インタラクティブ性)を可能にする。
→受動的情報受容から能動的情報利活用へ!

望ましい生活行動・環境を探し出す空間構成

[視機能が適正に作動できる生活行動・環境] ←生活必要情報の80%*は眼から！

- ・**安全性**(安全な作業・行動空間を作り出す)→作業、運転、スポーツなど
- ・**明視性**(見易く効率的な情報を提供する)→読書、情報端末利用など

- 1) 視力(静止・動体)、明暗・色、ちらつき
- 2) 視野・注視動作(調節含む)、空間視
- 3) 妨害・有害光の除去

感覚系の情報伝達処理量などから、視覚情報が最大限に利用可能な生活環境へ！

[多感覚機能が円滑・効果的に働く生活行動・環境] ←感覚・中枢系への適度な情報！

- ・**快適性**(自然で心地よい活動状態を作り出す)→娯楽、レジャーなど
- ・**演出性**(魅力的な環境を生み出す)→ファッション、イベントなど

- 4) 快・不快をもたらす刺激の制御
- 5) 感覚系から中枢への安定した情報提供
- 6) 円滑な生活リズム(活動－休息バランス)

生活に欠かせない環境情報を的確に選択・強調提示し、快適な生活環境へ？

＜現実空間＞

+ 付加情報

[拡張現実(AR)]

仮想＋現実空間の融合

[複合現実(MR)]

＜仮想空間＞

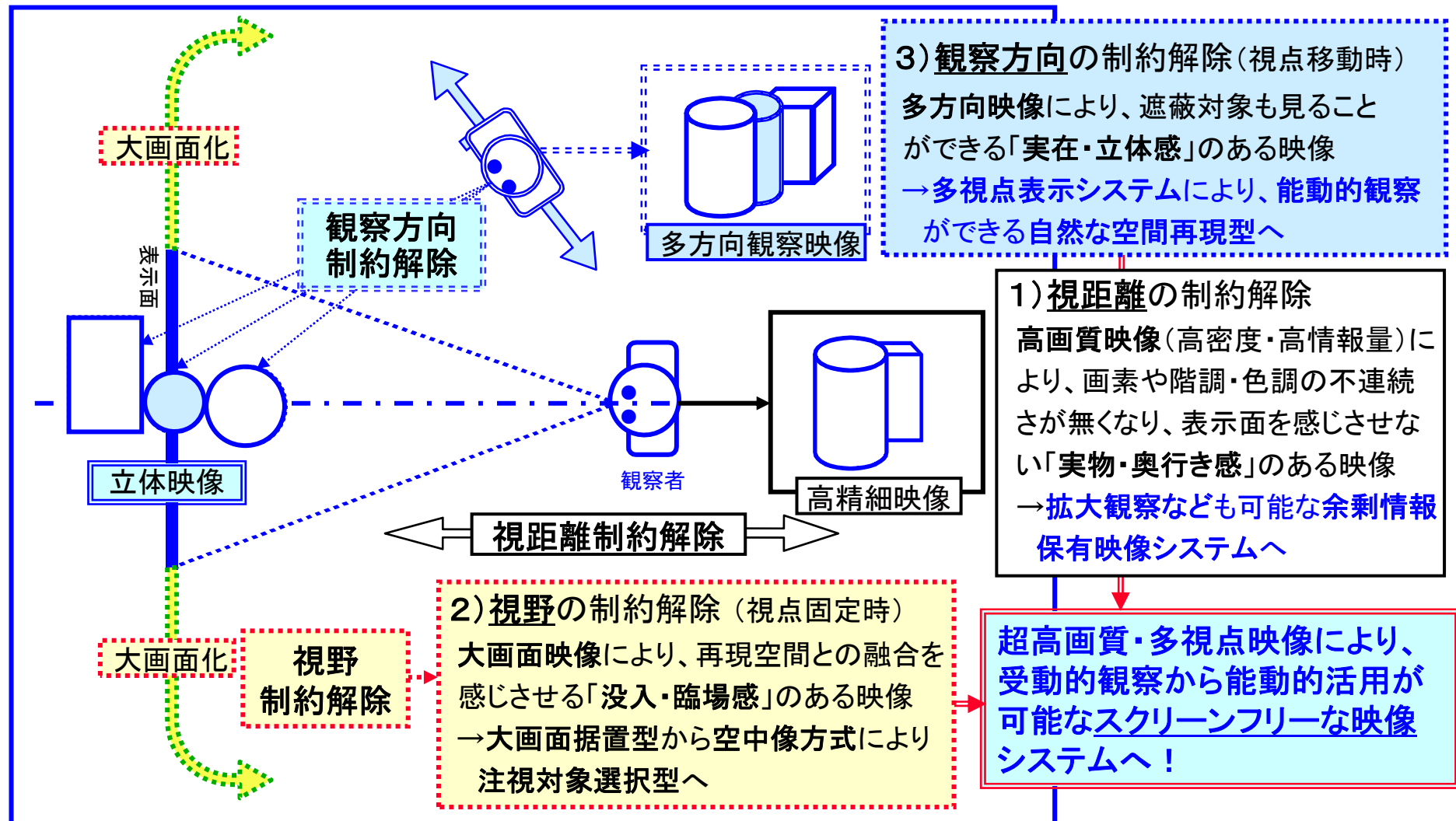
(人工的に作りだした空間)

[仮想現実(VR)]

より自然な空間再現ディスプレイ —観察時の制約解除—

これまでの映像は、受動的な観察環境(制約)で、見る人(視機能)の許容閾を満足させながら、画質改良が行われてきた。

これからの映像は、能動的な観察条件で、視機能限界を満足させ、観察時の制約を少なくする超画質・多機能表示へと向かう。



視機能を満足させるディスプレイ条件

1) 2D映像の高画質化 ⇒ 精細度・鮮鋭度 → 実物感・奥行き感
→ 視機能(視力、弁別能)を満足させる超高精細映像 (4K・8Kスーパーハイビジョン)

2) 大画面映像の魅力 ⇒ 空間融合・誘導効果 → 没入感・臨場感
→ 見える範囲(視野)を広げた高臨場感大型映像 (ドームスクリーン、HMD)

3) 3D映像による自然な空間再現 ⇒ 空間構成・操作性 → 立体感
→ 空間視機能(両眼視)に整合した多方向光線空間再現映像 (プレノプティック映像)

<2D映像の高画質化に関わる視機能>

1) 細部の見え方(精細さ) → 視力(2点分離閾) → 2線分離閾、ズレ識別閾(副尺視力)
→ 高解像度(超高精細(Ultra High Definition))

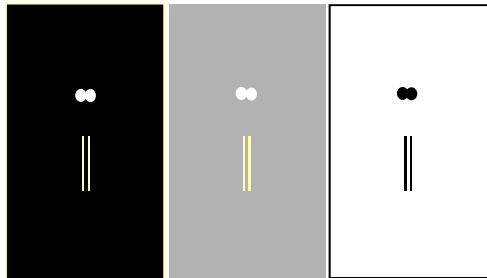
2) 輪郭の見え方(鮮鋭さ) → 階調・色調弁別、鮮鋭度(エッジ強調) → 順応対応、多色、高彩度
→ 高ダイナミックレンジ(High Dynamic Range)、広色域(Wide Color Gamut))再現

3) 画面の安定性(ちらつき、動きの滑らかさ) → 時空間特性(CFF) → SFF(安定融合周波数、閾値下刺激変動除去)
→ 高画面切り替え周波数(高フレームレート(High Frame Rate)) → 眼精疲労

4) 空間の見え方(奥行き感) → 単眼空間視(調節、像の大きさなど → 距離感、運動視差 → 前後感、視野 → 拡がり感)
→ 高忠実再現

忠実再現
(実物感 → 奥行き感)

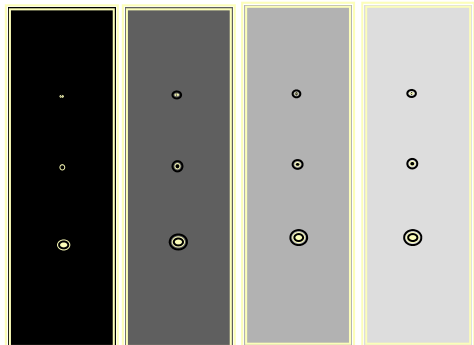
様々な視力 — 視標による見えの変化 —



・通常視力(2点、2線を分離できる最小分離閾の逆数)
分離閾は視角20~30秒=視力2.0~3.0になるが、実用上は視角1分=視力1.0を用い、画素構造が見えなくなる推奨観視距離などを決定してきた。

網膜錐体径 $1.5\sim 2\mu$ で、視角37~50秒=視力1.2~1.63になる。

・副尺視力(線分のずれを識別する能力)
識別閾は視角2~3秒=視力20.0~30.0で、映像の継ぎ目や斜線などの不連続部が識別でき、画質に影響する。



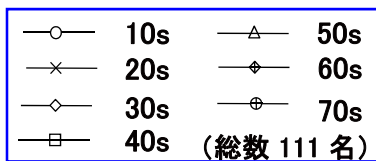
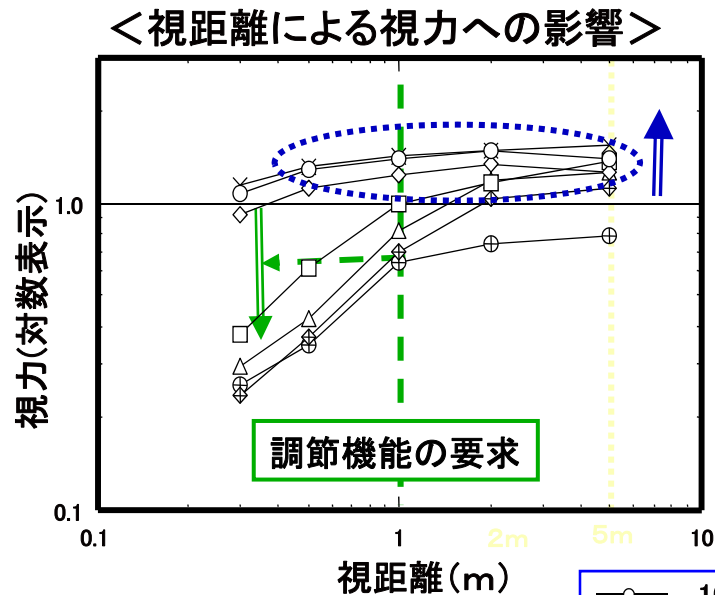
・最小視認閾(均一背景での点の検出能力)
視認域は視角約1秒=視力約60.0にもなり、夜空の星や均一面の小さな欠損などがよく見える。

実用的な見え最小可読閾(文字が判読できる能力)も示されているが、視角30~40秒=視力1.5~2.0になる。

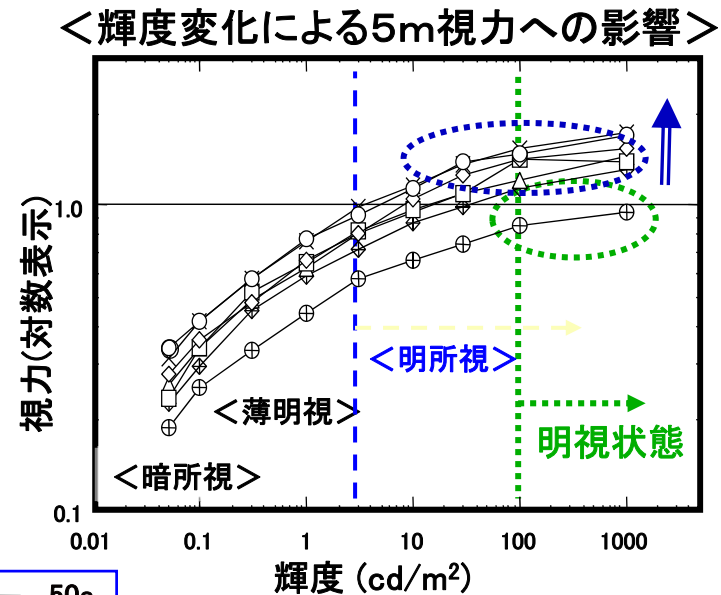
閾値は、中間輝度域(50~500cd/m²)、高コントラスト(ネガ>ポジ)で最も良く、注視時の固視微動(微分処理)+時間積分効果が弁別閾向上に寄与している。

年齢による視力の変化 —視距離・輝度の影響—

視力1.0以上で見ている場合が意外に多い



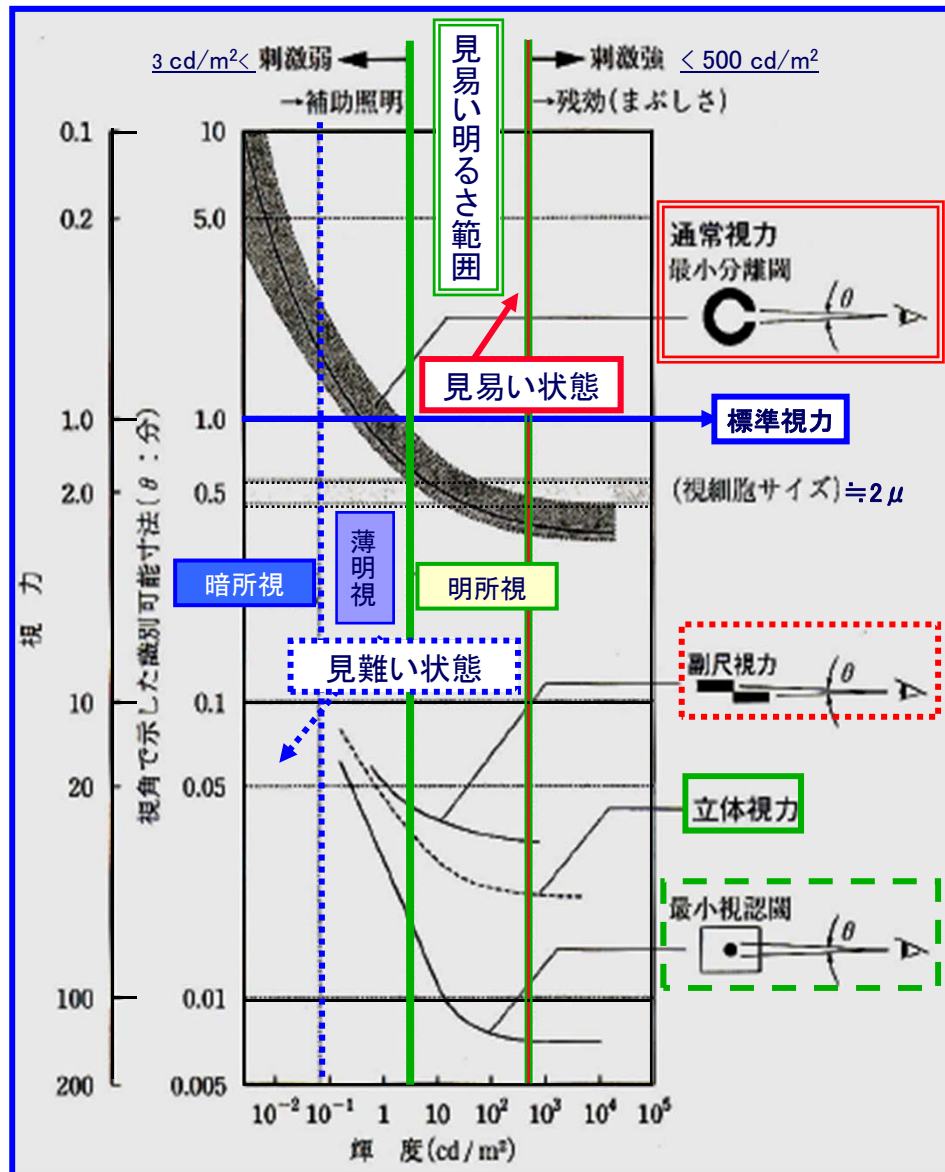
・視距離1m以内になると、調節機能が要求され、40代以上では、ピントが合い難くなり、視力が低下する。



・薄明視($3\text{cd}/\text{m}^2$)以下では視力低下が見られる。特に、高年齢層は、 $100\text{cd}/\text{m}^2$ 以上が要求される。

画質に関わる視力特性

— 表示指標と明るさの影響 —



横軸：視標の明るさ、縦軸：識別できる最小間隔を視角(分)・視力で表示

・通常視力(2点や2線を分離できる能力)
=1.0(視角1分)を標準とし、文字・図形の判別は1.5~2.0に良くなる。

→ **画素構造が目立たなくなる視距離**

・副尺視力(線分のずれを識別する能力)
=約20.0(視角3秒)に相当、継ぎ目や斜線の不連続が見える。→ **質感に影響**

・立体視力(両眼による奥行き弁別能力)
=約30.0(視角2秒)に相当、両眼網膜像のズレ(視差)から前後差を見分ける。

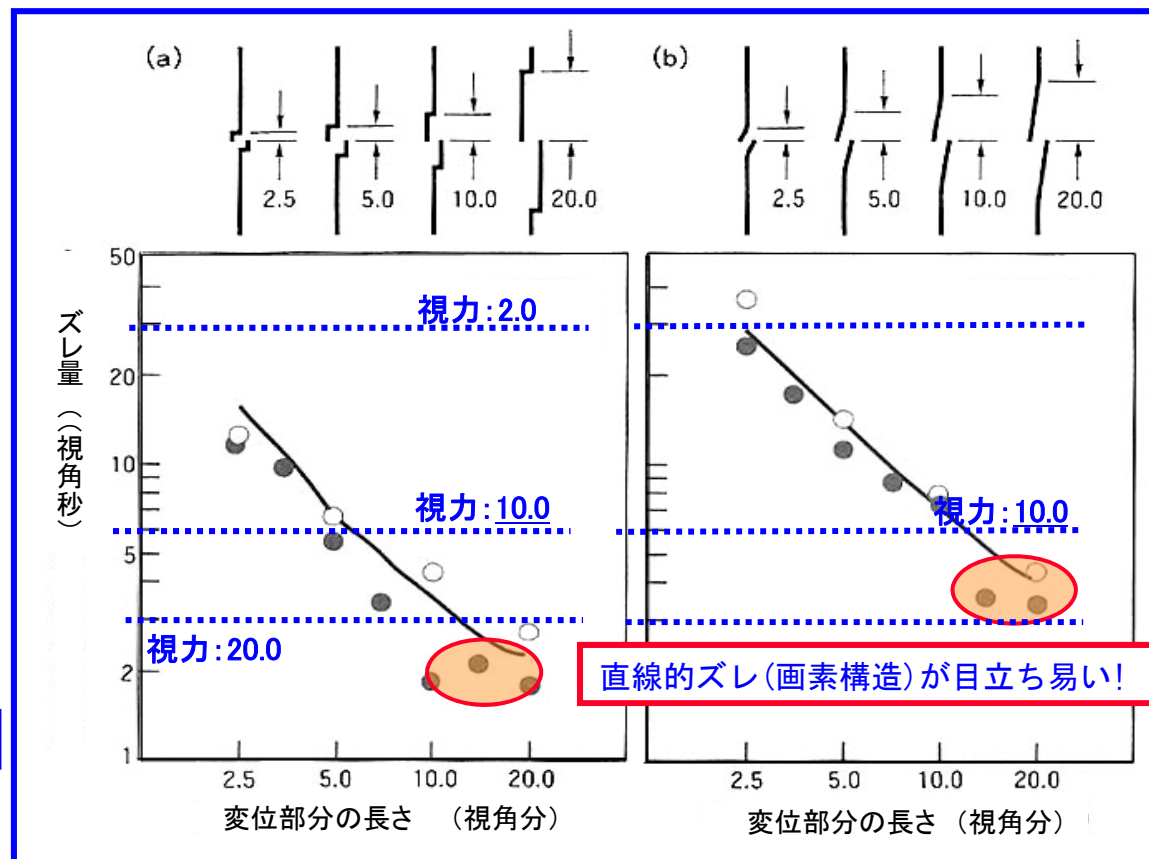
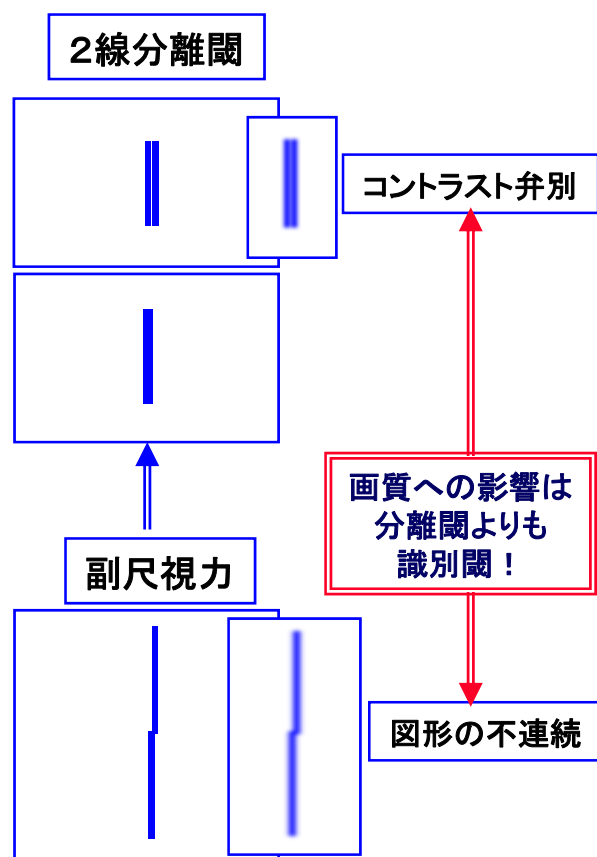
→ **前後・凹凸検出による実物感**

・最小視認閾(均一背景で点の検出能力)
=約120.0に相当、均一部の変動点を見出す。→ **ノイズ検出から質感へ影響**

↓
対象や環境の明るさ、コントラスト、配色などにより、視機能は変化する。

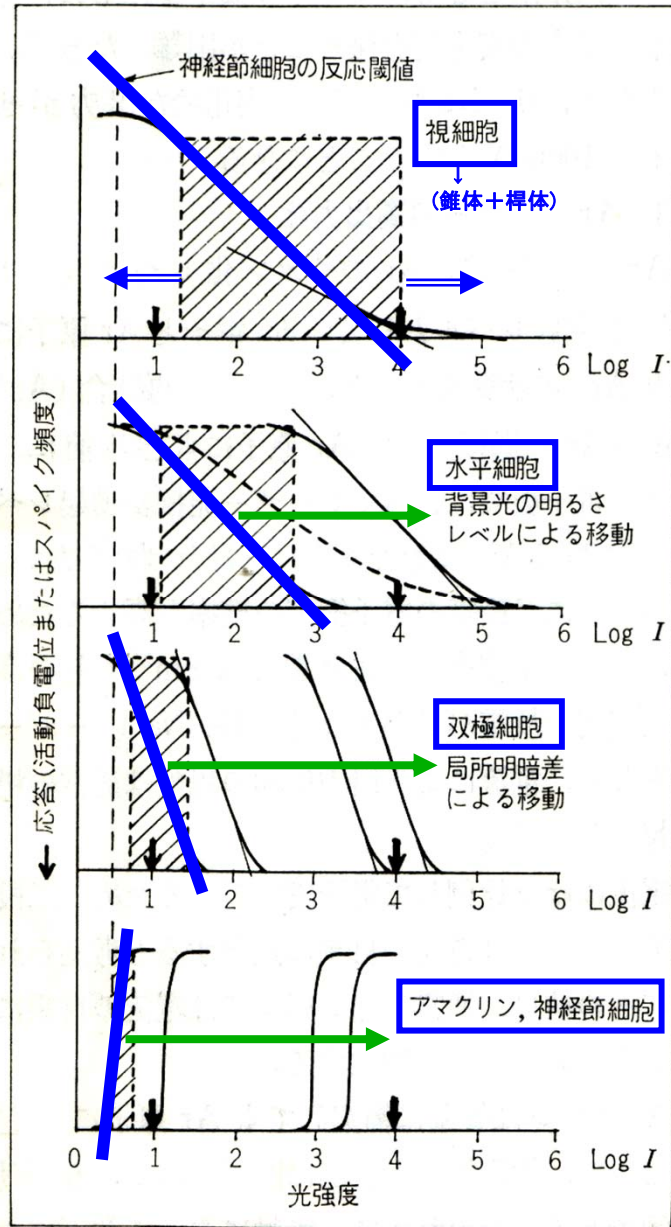
→ 薄明視以下の見難い環境や、残効が生じる眩しい条件での見えを改善する**環境機能型ディスプレイ**の条件を見出す！

形状による微妙な見え方への影響 —通常視力(分離閾)と副尺視力(識別閾)の差—



* 手作業距離(45cm)では、通常視力(分離閾視角1分 $\div$ 0.13mm)よりも、**副尺視力(ズレ識別 $\div$ 0.01mm)**による線やエッジの不連続部の見えが画質を左右する。
→美術印刷レベルの超高精細画像が要求される!

網膜内での明暗反応と 順応時の明るさ特性



[反応グラフ内の斜線部は細胞の作動範囲を示す]

[F.S.Werblin: J.Neurophysiol. 34,p.228,(1971) 改変]

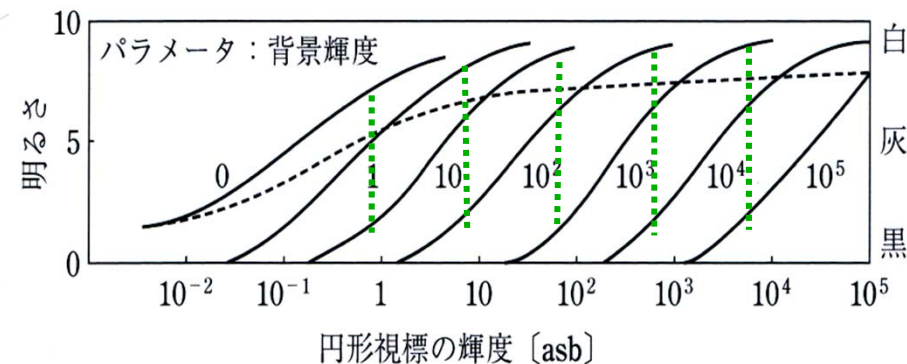
・視細胞は $10^3 \sim 10^4$ で反応 → 同時明暗知覚範囲
→ 錐体 + 桿体の分担で作動範囲(10^{10})が広がる

・水平細胞は $10^{1.5} \div 30$ ・双極細胞では $10^{0.7} \div 5$
・神経節細胞では $10^{0.25} \div 1.8$ と反応範囲は狭くなるが、
明暗弁別(勾配)は向上する

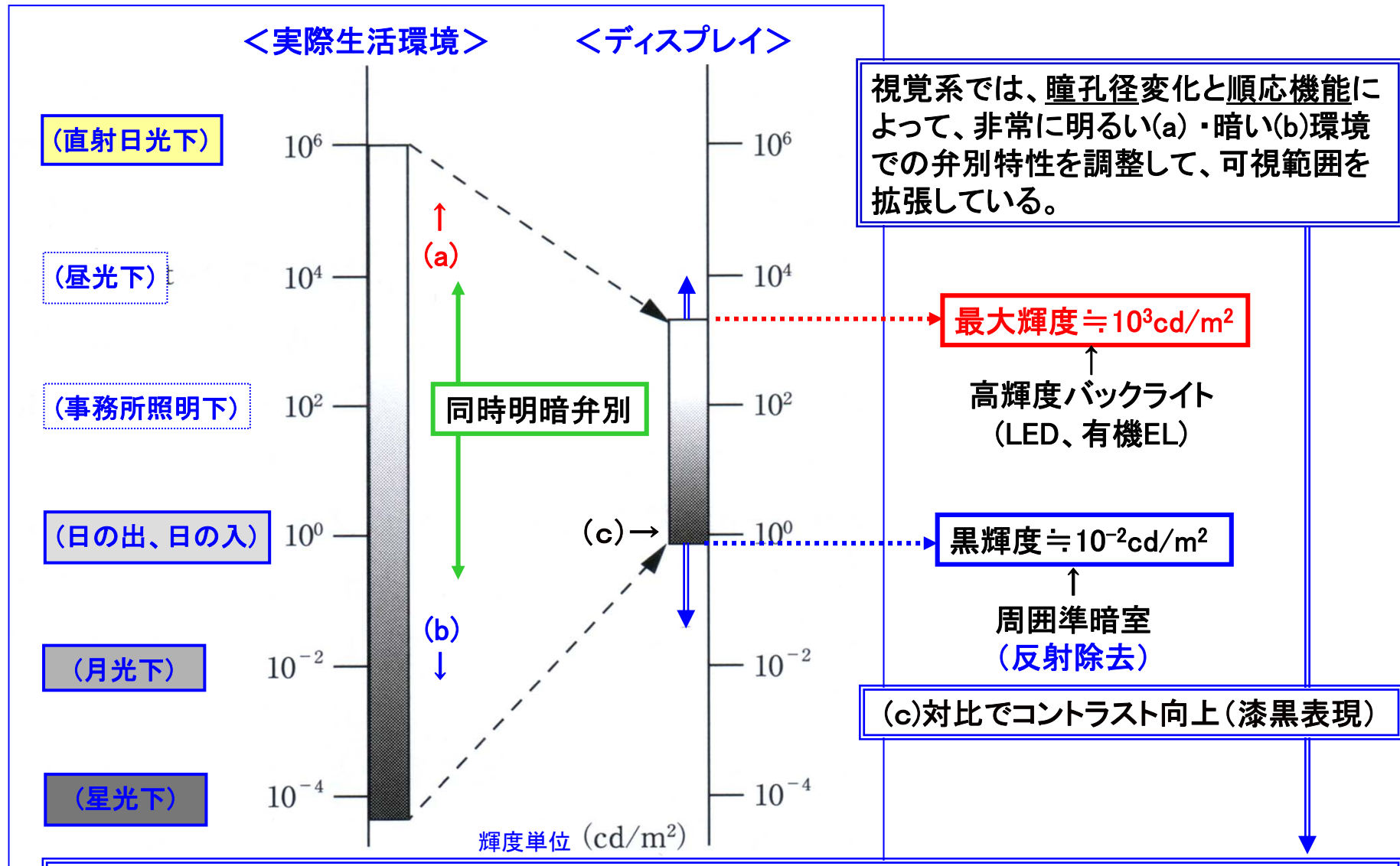
・刺激強度に応じて、水平細胞、双極細胞、神経節細胞
での反応範囲が移動する“順応”が発生
→ 視細胞 + ミューラ(グリア)細胞の感度調整信号で、
効果的に明暗情報を検出・弁別している

ミューラ細胞は網膜内の神経伝達に参与する物質(グルタミン酸)を制御し、栄養補充などで神経細胞への障害を保護する

心理物理的明るさ感覚特性曲線 $R=L^n/(L^n + L_0^n)$

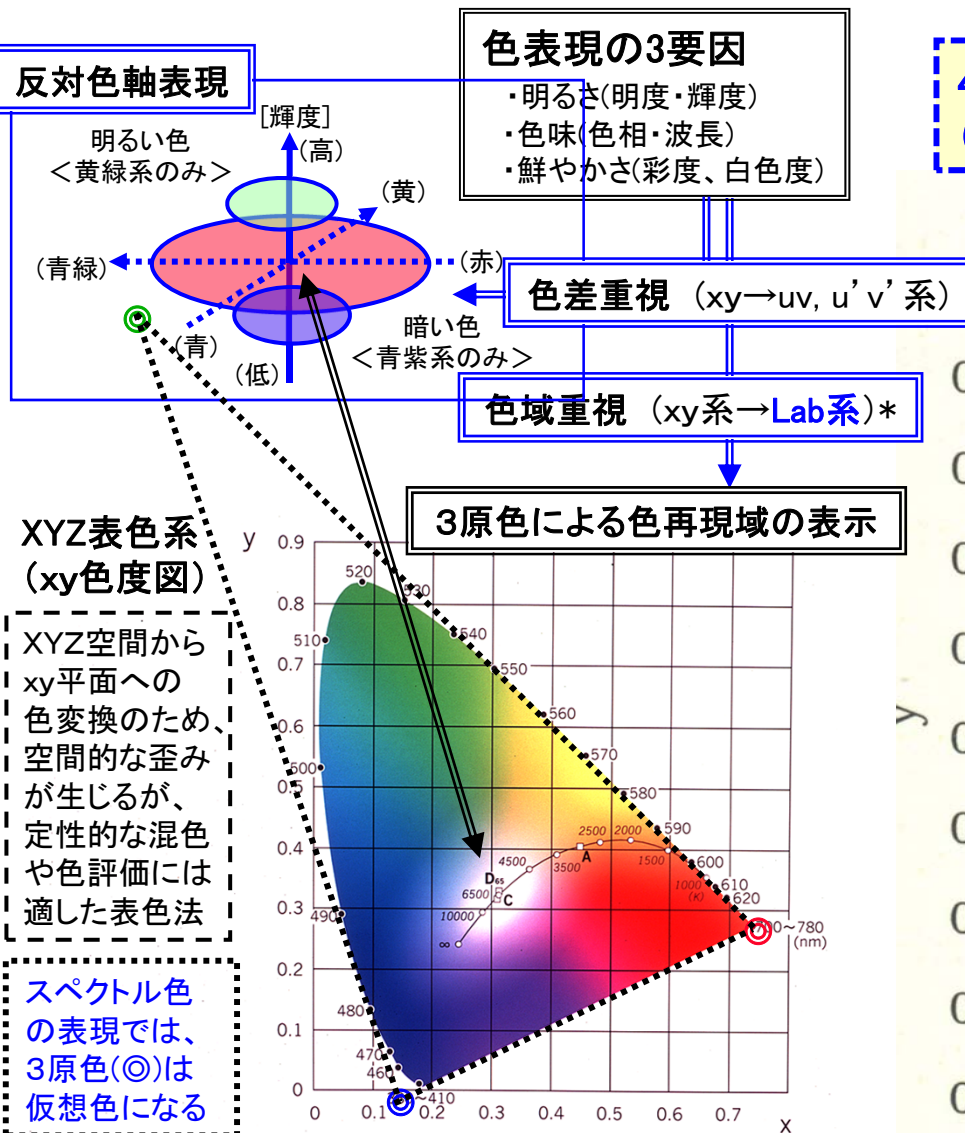


生活環境とディスプレイの明るさ再現範囲



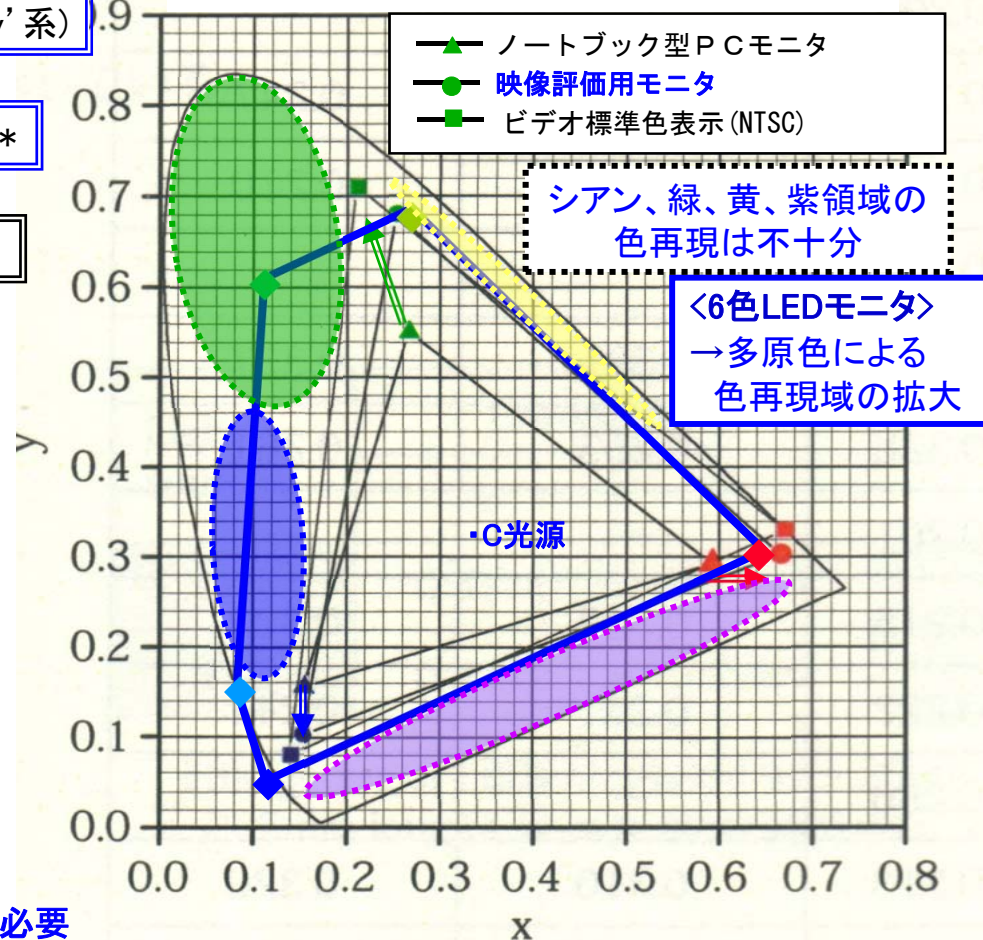
HLG(Hybrid Log-Gamma: 輝度を相対処理し表示側で調整、既存方式との互換)と、PQ(Perceptual Quantization: 表示最大輝度を設定し視覚特性に基づき入力側で調整)方式でHDR(High Dynamic Range)を実現し、日陰・日向の同時再現、鏡面反射や光沢なども再現できる。

3原色から多原色ディスプレイによる色再現の改善



4・8K映像では明暗・色再現も改善されている
(最明色 2K:35.9%→4K/8K:75.8% 再現可能)

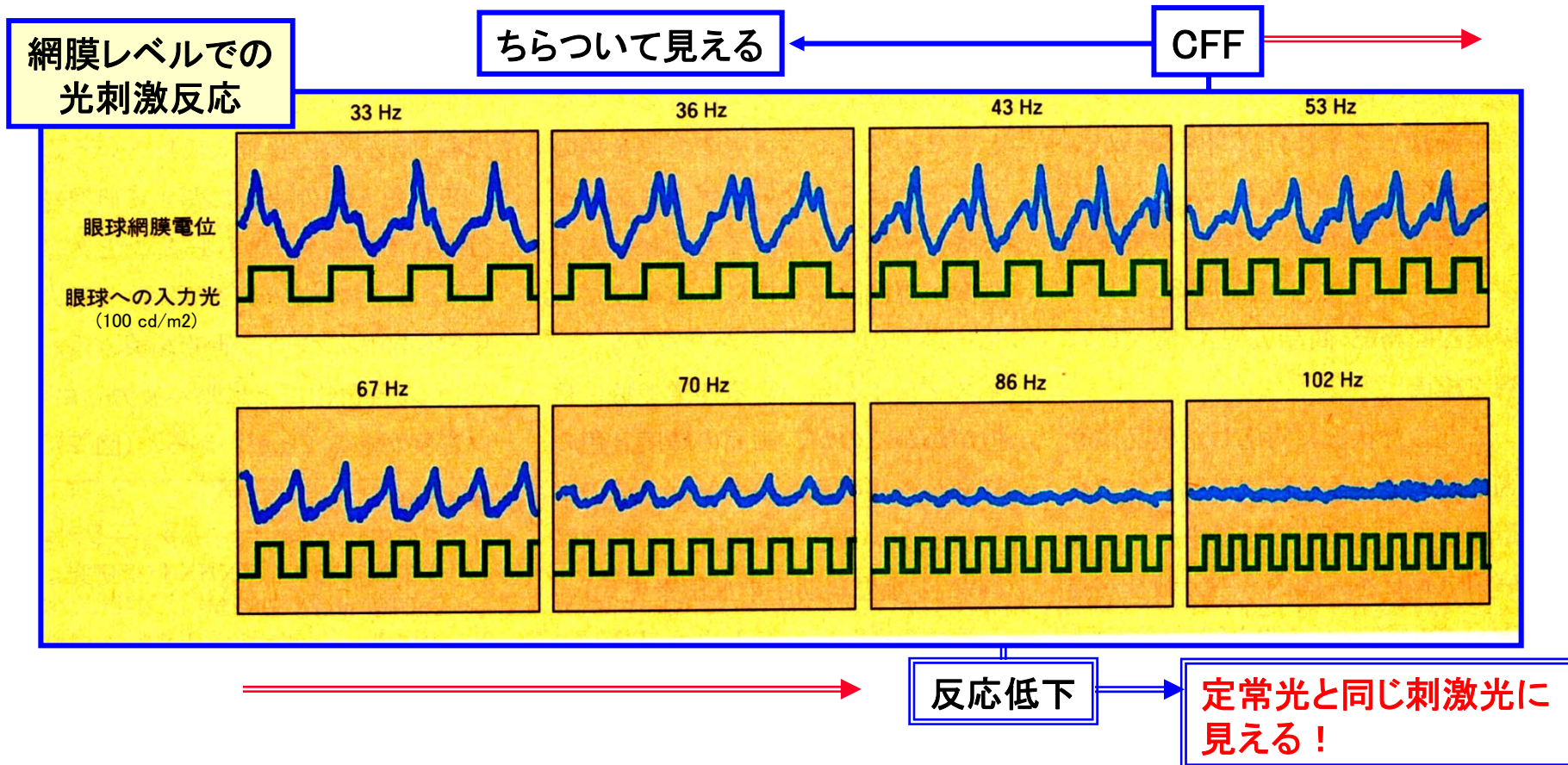
白色LED+カラーフィルタによる色再現域



*明るさを含む色再現評価にはCIELAB色空間での評価が必要

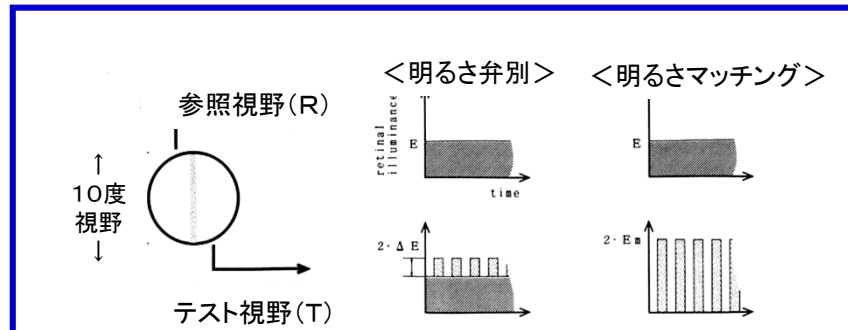
点滅光刺激の“ちらつき”感と生体反応

- ・CFF (ちらつき融合周波数、50Hz近辺) 以下の点滅光刺激ではちらついて見える。
- ・CFF以上では“ちらつき”は感じないが、視神経誘発電位にはまだ反応が見られる。
- ・生体電位反応も低下し、定常光とほぼ同じ見えになる点滅周波数は**90Hz以上**！



点滅光刺激による明るさ知覚への影響

- ・見掛けの明るさや光覚閾などから、定常光刺激と同じ見えになる点滅条件を調べる！



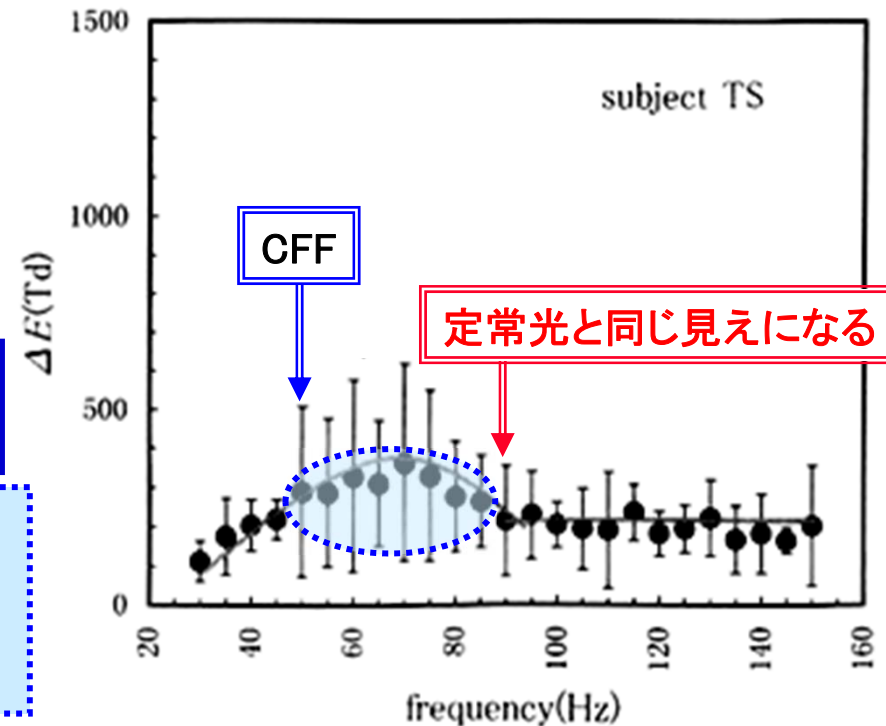
CFF以上の点滅光での光覚閾・明るさマッチング測定
明るさ知覚(弁別・マッチング)の刺激条件
(テスト・参照視野、定常光・重畳点滅光)

- ・CFF近傍の点滅光では弁別閾値が上昇し、不安定な見え方になる。
- ・CFF以上の点滅光で、“ちらつき”は感じなくても、定常光とは異なる閾値反応が見られる。

←--- 電位反応が定常光と同じになる点滅周波数も90Hz以上

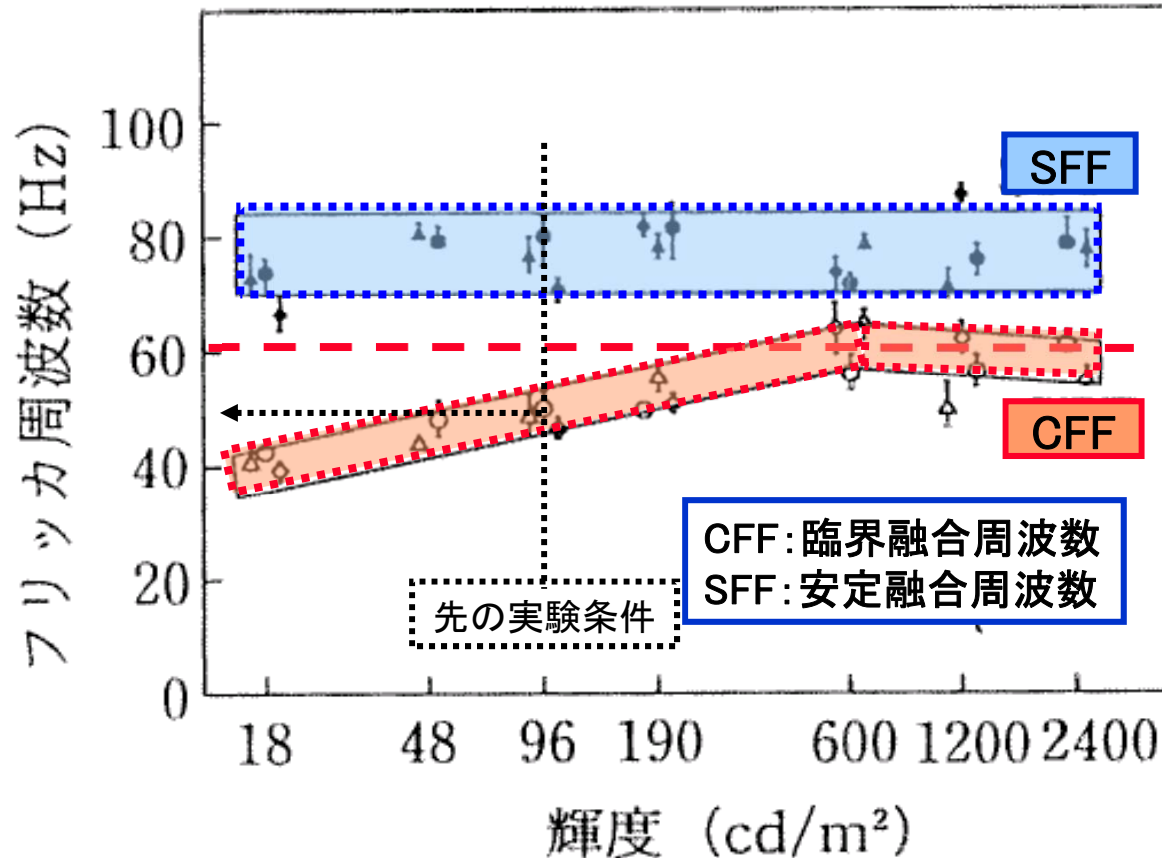
90Hz以上の点滅光になると、定常光と同じ明るさに感じ、閾値レベルも安定して見える。

定常光刺激と同じ見えになる動画条件として、知覚最大速度(約30度/秒)を滑らかに再現できるために、200~240Hzの画面切り替え周波数が必要！



明るさによる“ちらつき”感への影響

—主観的ちらつき(CFF)と生体反応(SFF)の差—



これまでの画面切り替え周波数は、“ちらつき”が見えなくなるCFF特性(約60Hzで飽和傾向)で決められていた。

網膜から中枢までの神経応答によるSFF特性(70~90Hzの範囲で反応が低減)を考慮すると、90Hz以上の画面切り替え周波数が要求される。

閾値下の刺激変動でも、生体への潜在的負荷を与え、不安定な見えや違和感を感じさせる。

刺激輝度の変化により、CFFは比例から飽和傾向になるが、SFFは高い一定値で影響を受けない。
→ 閾値(“ちらつき”と“見かけの明るさ”)を決定する要因？

視機能を満足させるディスプレイ条件

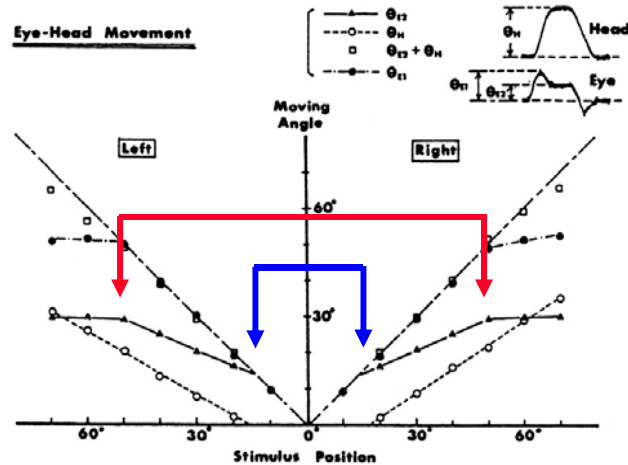
- 1) 2D映像の高画質化 ⇒ 精細度・鮮鋭度 → 実物感・奥行き感
→ 視機能(視力、弁別能)を満足させる超高精細映像 (4K・8Kスーパーハイビジョン)
- 2) 大画面映像の魅力 ⇒ 空間融合・誘導効果 → 没入感・臨場感
→ 見える範囲(視野)を拡げた高臨場感大型映像 (ドームスクリーン、HMD)
- 3) 3D映像による自然な空間再現 ⇒ 空間構成・操作性 → 立体感
→ 空間視機能(両眼視)に整合した多方向光線空間再現映像 (プレノプティック映像)

＜2D映像の大画面化に関わる視機能＞

- 1) 見える範囲 → 視野 (高性能な中心視と広い空間知覚を助ける周辺視)
→ 画枠による視野の制約から解放される大画面表示
- 2) 観ることができる範囲 → 眼球・頭部運動 (視線移動) + 運動視差 ⇒ 位置移動は多方向映像
→ 観察動作に応じた情報を再現するインタラクティブ表示

手作業や移動観察などの能動的な観視状態を満足させる空間情報を提供し、自然な空間視(臨場感)や再現空間に入り込んだ状態(没入感)を再現する表示面を感じさせない効果 (スクリーンフリー効果)を生み出す方式 (大画面、空中像・装用型)への展開！

視標注視時に生じる 眼球＋頭部運動



黒丸：眼球最大運動角 (θ_{E1})，黒三角：眼球安定運動角 (θ_{E2})，白丸：頭部運動角 (θ_H)，白四角：実質注視角 ($\theta_{E2} + \theta_H$)。

眼球－頭部運動による注視動作の計測

[視線移動(眼電位図:EOG)＋頭部回転(変位計)]

・視線移動のみの場合：

ステップ波形($\theta_{E1} = \theta_{E2}$)

・頭部運動が時間遅れで発生する場合：

オーバーシュート波形($\theta_{E1} > \theta_{E2}$)

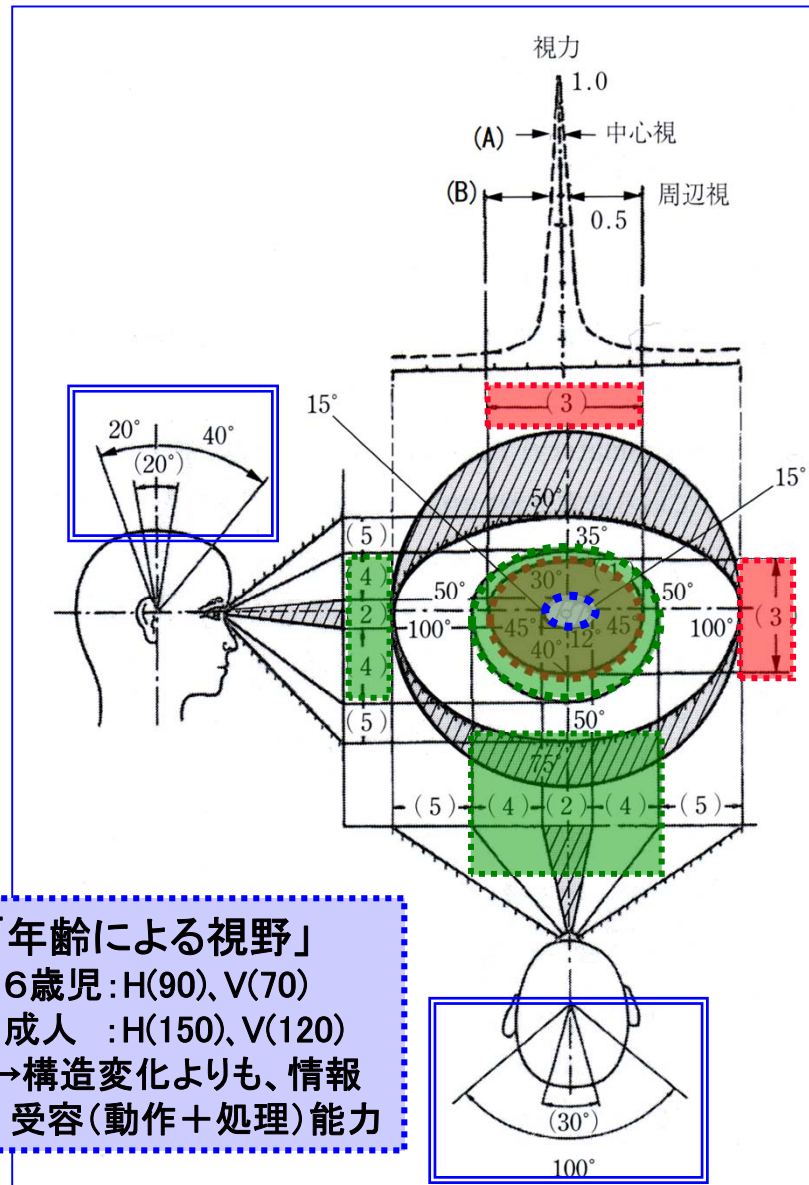
→視線移動のみで注視可能な範囲

・有効視野(水平30度、垂直20度)

・安定注視野(水平90度、垂直70度)

頭部＋体躯運動を許容した安定した自然視状態での情報受容・操作時の視野特性を計測し、作業効率向上・身体負荷低減に向け、適正な情報表示・空間再現条件を見出す！

視覚情報受容と視野の関係 ―中心・周辺視の機能差―



「年齢による視野」

- ・6歳児 : H(90)、V(70)
- ・成人 : H(150)、V(120)
- 構造変化よりも、情報受容(動作+処理)能力

視覚情報受容は、主に注視点(中心視)移動によるが、周辺視+頭部・体躯運動も加わり、広い空間認識を効果的に行っている

(A)中心視 (高性能な視認性)

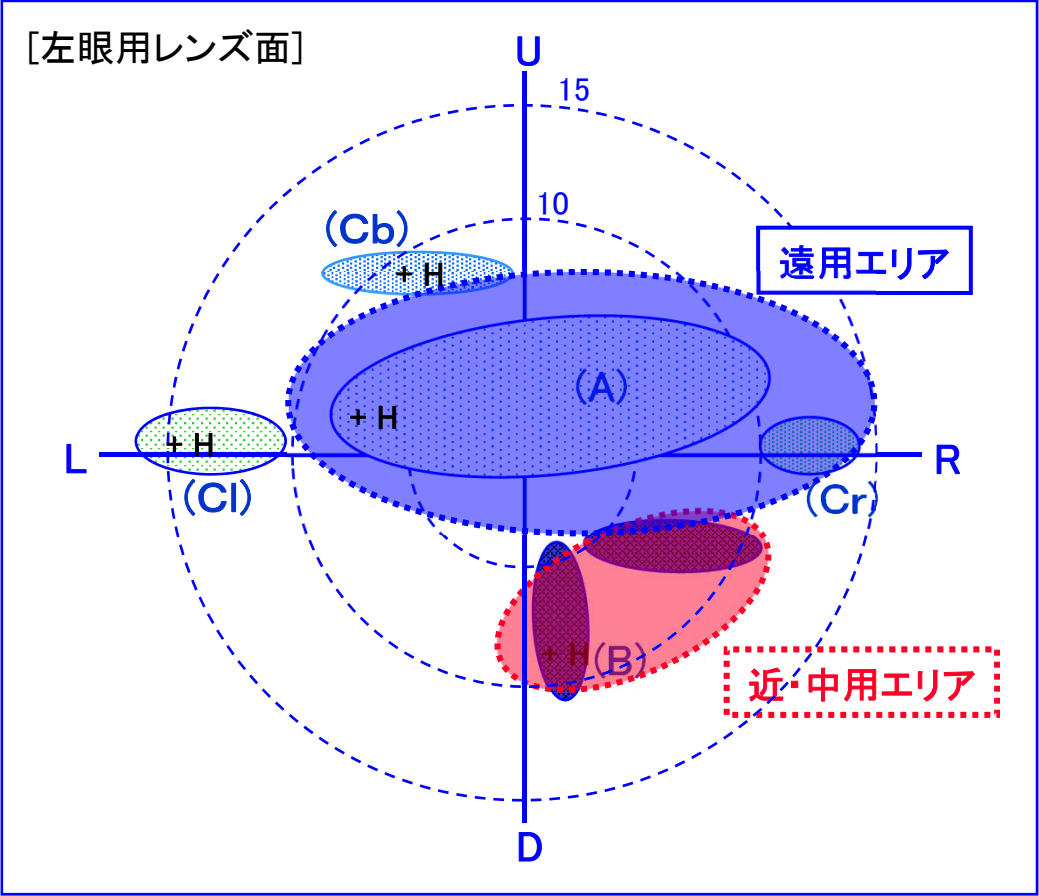
- ・弁別視野(1)+有効視野(2) → 水平30度、垂直20度
- 既存のテレビの標準観視画角

(B)周辺視 (空間感覚の形成)

- ・安定注視野(3) → 水平90度、垂直70度
- 情報(VDT)作業表示
- ・誘導視野((4)以上) → 水平100度、垂直85度以上
- 臨場感[Super High Vision TV]
- ・補助視野(5)

周辺視は探索動作や空間認識には欠かせない情報を提供する。⇒生活空間での能動的で効果的な情報受容ができるためには、固視での特性だけでなく、HMDなどを用いて動的な視野特性を調べる必要がある！

自動車運転時の視線移動の計測例



(A)走行路面を中心とした
前方視界観察（500cm以上）

(B)メータ、ナビなどの
車内表示(50-80cm)

(C)ミラーによる後方観察(500cm以上)

Cr: 右サイドミラー

Cl:左サイドミラー

Cb: ルームミラー

**+ H : 注目度で頭部運動の発生が変化し、
通常では頭部を動かして見る領域**

左右眼用レンズ面上での視線移動は対称分布にならない点に注意！
特に、ミラー観察は大きく左右眼で変化する。

視機能を満足させるディスプレイ条件

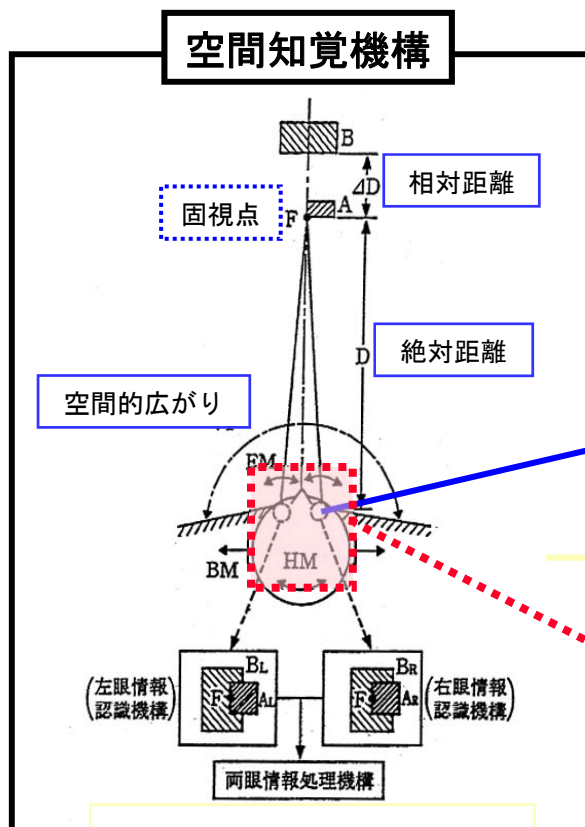
- 1) 2D映像の高画質化 ⇒ 精細度・鮮鋭度 → 実物感・奥行き感
→ 視機能(視力、弁別能)を満足させる超高精細映像(4K・8Kスーパーハイビジョン)
- 2) 大画面映像の魅力 ⇒ 空間融合・誘導効果 → 没入感・臨場感
→ 見える範囲(視野)を広げた高臨場感大型映像(ドームスクリーン、HMD)
- 3) 3D映像による自然な空間再現 ⇒ 空間構成・操作性 → 立体感
→ 空間視機能(両眼視)に整合した多方向光線空間再現映像(プレノプティック映像)

＜自然な空間再現に関わる視機能＞

- 1) 単眼空間視による空間再現効果に加えて、両眼空間視＋観察位置の自由度による自然な空間再現
 - (a) 輻輳→ピント調節(ボケ状態)との整合性を持った空間再現→光線方向情報を保持した再現方式
 - (b) 両眼視差→前後距離弁別→網膜上での融像領域や輻輳移動によって、複視発生を解除する
 - (c) 運動視差(受動・能動)→前後感→遮蔽、重なり合い、陰影分布の変化を再現することで実際の空間観察状態
- 2) 空間視・立体情報(単眼空間視要因、調節－輻輳による安定した融像域の拡張と動特性)を違和感なく再現
→ 超多眼式→光線方向制御型(ライトフィールド)、動画ホログラムの開発

利用者の視機能低下なども補正できる装用型ビデオシースルーディスプレイによって、受動的観察から能動的利活用機能を備えたシステムデバイスへと展開！

空間知覚機構と空間視要因



[眼球(EM)、頭部(HM)、姿勢変動(BM)]

瞳孔間距離(PD)

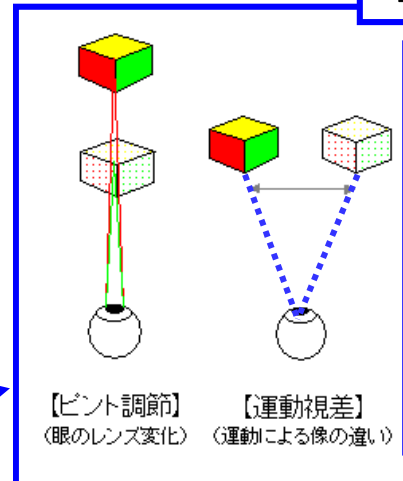
最小50mm(小児) ~ 55mm(女性)

~ 最大78mm(外人)]

→ 平均 63.5mm (65mm)

(* 25cm離れた位置での2cmの前後ずれ検出は、
PD60cmで約40秒視角、PD70cmで約46秒視角になる)

単眼視要因→2D画像



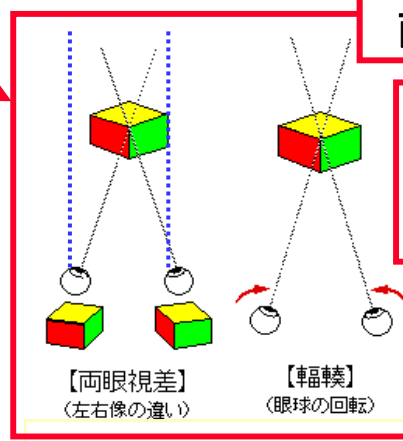
ピント調節→鮮鋭度(ボケ状態)

- ・明暗、コントラスト、色差の影響 → 空気透視像の大きさ → 距離感
- ・見掛けの大きさ変動 ← 恒常性による補正
- ・規則配置、物体間密度 → 線透視

運動視差(受動・能動) → 前後感

- ・遮蔽、重なり合いの変化
 - ・陰影の変化
- 視野(画面構成)** → 拡がり感
- ・画枠効果
 - ・空間配置(高:遠、低:近)

両眼視要因→3D画像



両眼輻輳(D: F ⇔ EM)

→ 絶対距離 [固視点(F)]

両眼視差($\Delta D: (A_R - A_L) / (B_R - B_L)$)

→ 相対距離

<視線移動による
安定した空間視>

注視(基準位置)

注視点移動で
視差量調整!

安定した両眼視条件

両眼情報(ぼけ、大きさ、明暗、色、回転、上下ずれ、時間ずれ)の提示差は、視野闘争を発生させない範囲内で、短時間提示時にも安定した融合が成立する。

距離による奥行き・立体知覚要因

<2D映像での奥行き要因>

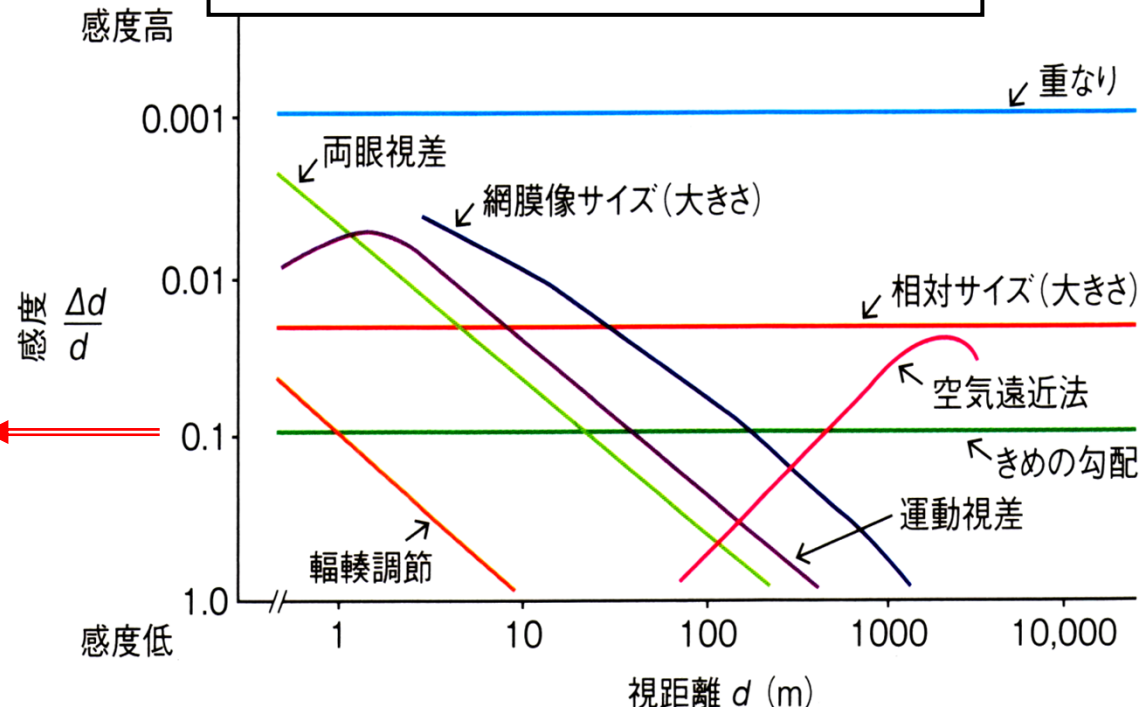
- 1) **ピント調節**→**鮮鋭度**
 - ・シャープ像(注視対象)-ボケ像(注視前後)
- 2) **像の大きさ**→**距離感**
 - ・規則的配置→線透視図法、模様密度勾配
 - ・明暗、コントラスト、色(進出・後退)
 - 空気透視(コントラスト低・青色)
- 3) **運動視差(受動・能動)**→**前後感**
 - ・遮蔽、重なり合い
 - 光源位置と陰影変化→**凹凸感**
- 4) **視野**→**拡がり感**(EM:眼球運動)
 - ・空間配置(高:遠、低:近)

・**輻輳(二重像)≥調節(ボケ像)**
 ⇒近見時の緊張系
 ・**運動視差**→**視点>対象移動量**
 ⇒能動的観察に欠かせない要因
 ・**サイズ効果**→**明るさ、色、ボケ**
 ⇒**既知物体を基準とした尺度形成**

<3D映像での立体要因>

- 1) **輻輳**→**注視対象の絶対距離再現**
 - ・注視対象への両眼寄せ角
- 2) **両眼視差**→**対象相互の相対距離再現**
 - ・両眼網膜像差の差分検出→局所視野闘争

距離による奥行き要因の感度特性

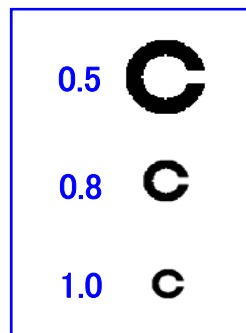


[Cutting & Vishton: PSM(1995), 長田: テレビ論文誌(1977)より改変]

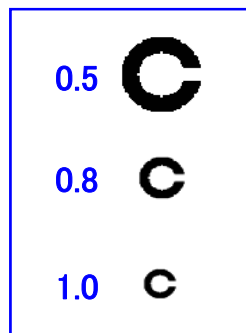
[距離に応じた 各要因の寄与度]

- ・近距離 (100cm以内) : 全要因が作動し、そのバランスが問題 ←[**両眼視差**+**輻輳**+**ピント調節**+**運動視差**]
- ・中距離 (100~500cm) : 両眼視/単眼視要因の優位性の変化 ←[**両眼視差**+**輻輳**+**ピント調節**+**運動視差**]
- ・遠距離 (500cm以上) : 単眼視要因(心理・経験的要因)が中心 ←[線透視、運動視差などの**単眼視要因**]

両眼視機能検査 — 視力、単一・同時・等同視 —



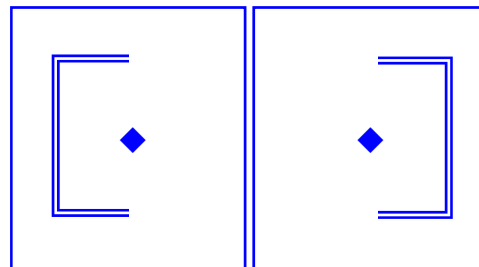
左眼



右眼

[両眼視力用]

両眼の視力差が少なく、左右眼共 0.8(1.25分視角) 以上が望ましい。各眼が 0.5(2分視角) 以下では補正が必要。

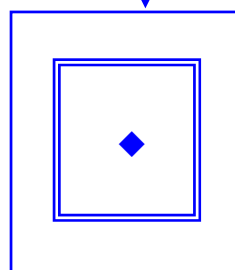


左眼

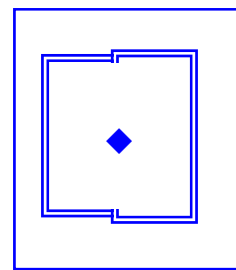
右眼

[不等像視用] (眼位測定可)

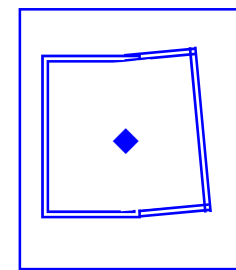
左右眼での像の大きさや位置ズレが生じると、融像が不安定になる→大きさ5%以上で不安定、7%以上で融像出来なくなる。回転/上下ズレ検出量近辺で不安定になる。



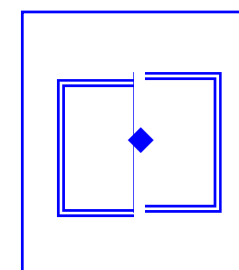
両眼正常



右眼拡大



右眼回転



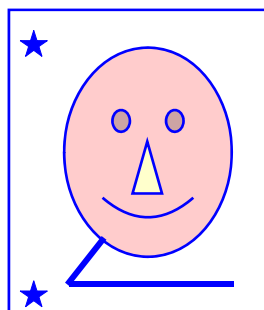
右眼上方ズレ

大きさ<103%

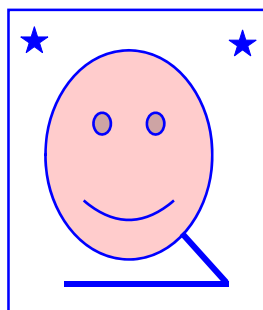
回転<1.5°

垂直ズレ<10分

・サイズ不同視(2D以上)は屈折補正、固視ずれや上下ずれはプリズム補正で行うが、回旋などは光学的補正では難しい



右眼



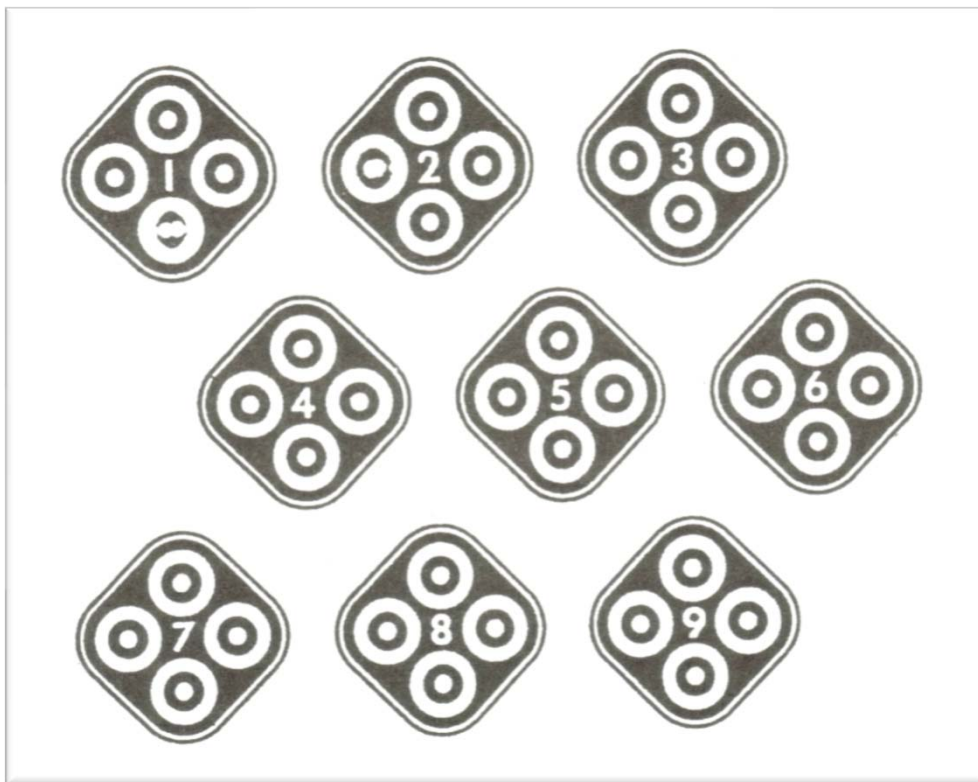
左眼

[単一・同時視用]

両眼共通部分の融像が成立しても、片眼の欠落部(右上の星、鼻、襟)で視野闘争が生じる。視認性を低下する場合は要注意。

両眼視差検出能、視差調整動特性の検査用パターンも準備されている

両眼視機能検査用パターン — 両眼視差の検出能 —



＜チトマスステレオテストの視差量＞

(瞳孔間距離65mm, 観察距離40cmの場合での奥行き量mm)

1: 800" (10), 2: 400" (5), 3: 200" (2.5),

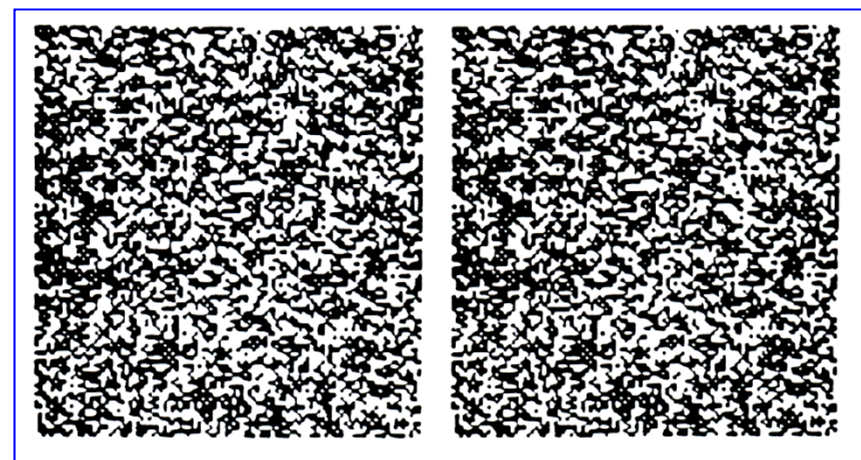
4: 140" (1.8), 5: 100" (1.3), 6: 80" (1),

7: 60" (0.8), 8: 50" (0.6), 9: 40" (0.5)

四円環の一つに視差があり、重ねて表示すると、7 まではずれが識別できるが、視差検出能は更に高精度である

→ PD(65mm) VD(40cm) では **前後弁別の限界は0.5mm、0.8mm**

以上で安定検出可能になる



＜ランダムドットステレオグラム＞

ランダムドットパターンの中央部に、面が浮き上がって見える → 浮き上がり面は、構成ドットサイズに関係なく、連続的な直線状輪郭に見えるのは、ドット毎ではなく、**小領域での視差を検出する図形性**が寄与している！

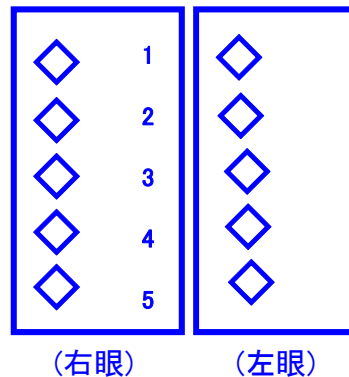
← 両眼対応情報(枠など)をボカしても、**局所相関で視差を検出する機構**が存在する

(* 首を傾けると、中央部の視差検出が壊れる)

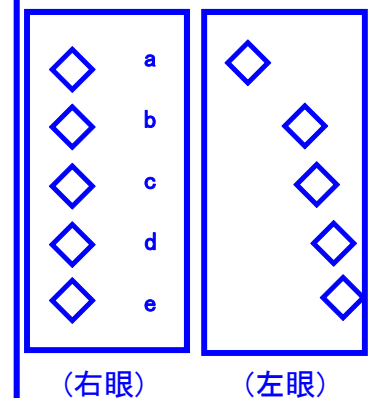
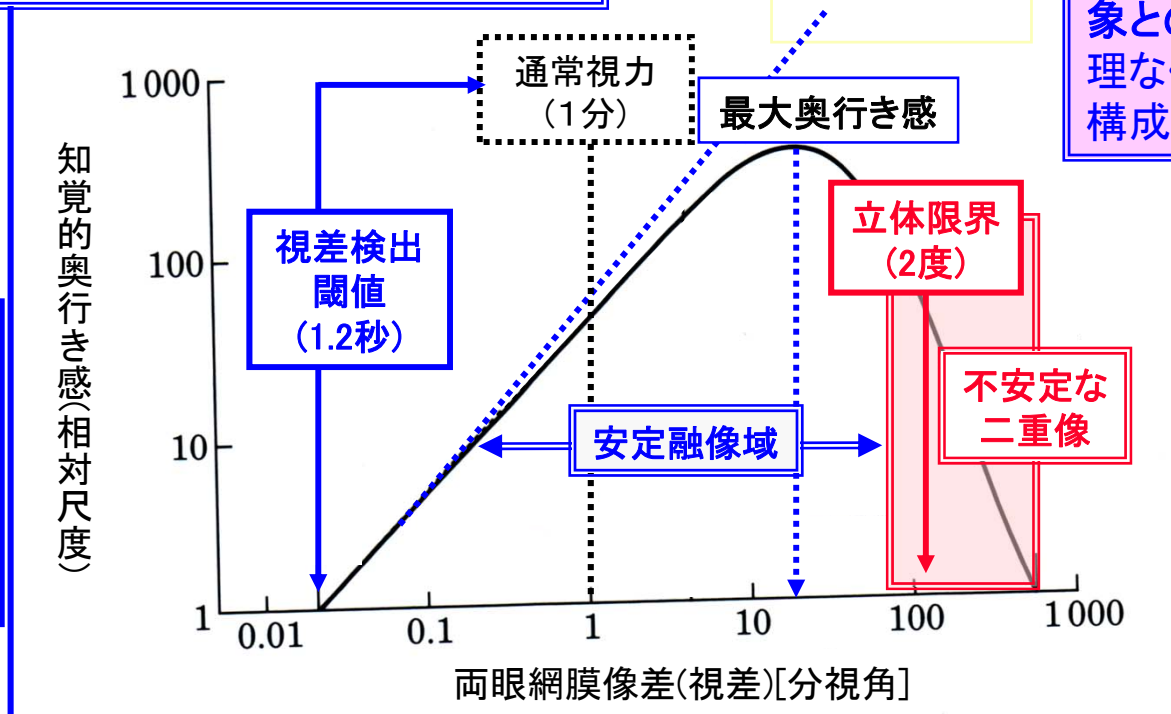
両眼網膜像差(視差)の検出・融像限界

自然視状態では、自由な注視動作(画枠などに制約されない輻輳運動)と注視対象近傍情報の抽出・合成機構(中枢での情報認識)によって、大きな視差量が存在しても安定して見えている。

3D映像では、大きな視差量分布で、能動的な輻輳運動を誘発するが、注視対象とその周辺対象との奥行き効果を無理なく見える映像演出・構成が重要になる。



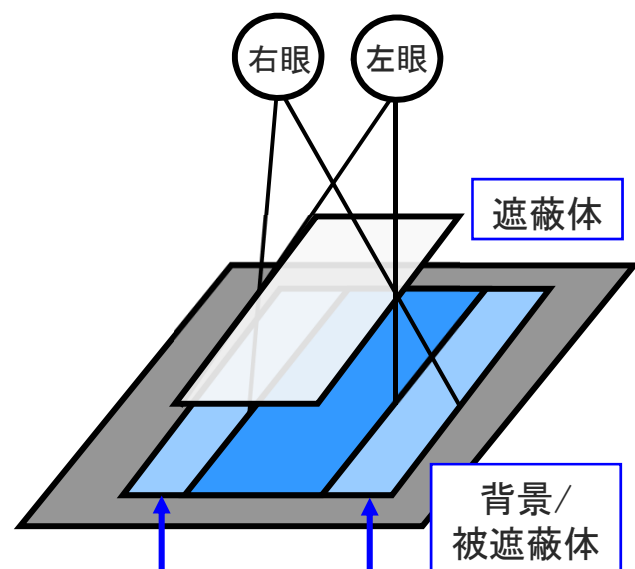
[最小視差弁別用]
1～5までの前後差の弁別能から最小視差検出能力が分かる



[最大融像限界用]
aを基準に、b～eが融像して見えるかを調べ、その状態から安定→不安定が分かる

- ・最小視差検出閾1.2秒視角から数度視角まで融像可能域
- ・立体限界(2度視角)以内で、5～70分視角までが安定な立体状態
- 融像限界の2～5度視角までは不安定な見え方になり、負荷が強い

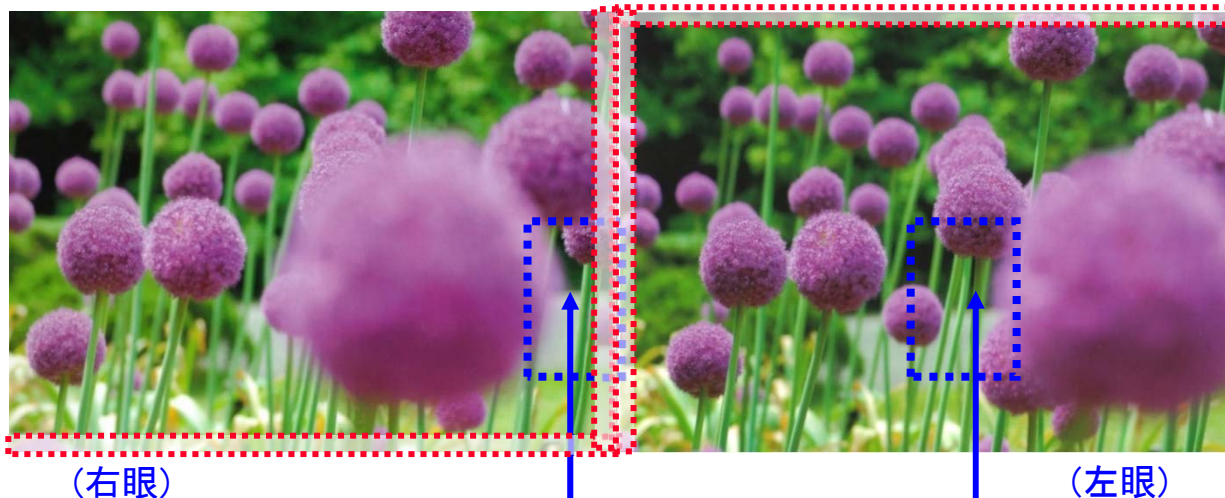
両眼情報差による不安定な見え方 ー半遮蔽・非対応ー



(右眼のみ) (左眼のみ)
半遮蔽部分

実空間では、注視点・観察位置移動、ボケ(視差大の手前の花)、図形の連続性、抑制などで不安定な見えを回避している。

[・・・越しの撮影例] (アリウム畑)



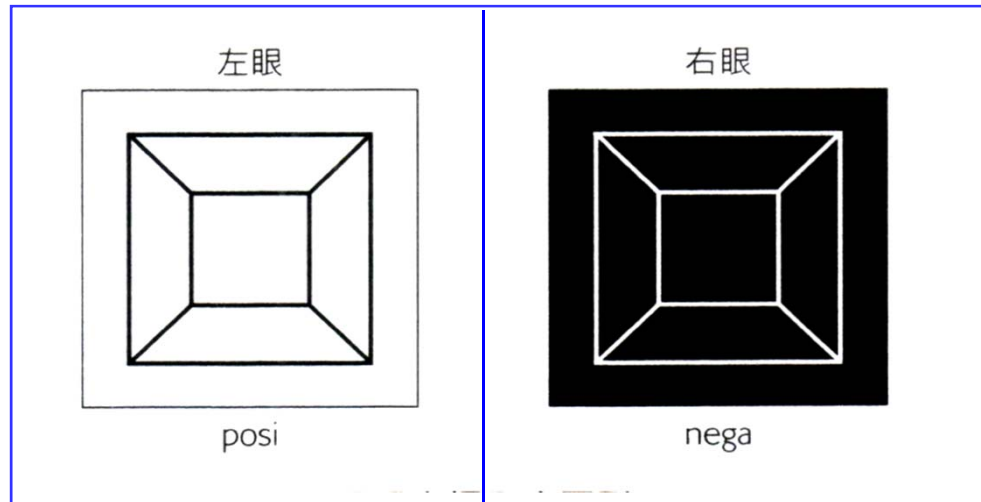
[枠による非対応部分]
枠による飛び出し抑制と共に、不安定な見え(額縁効果) →フレームインでは目立難い

(右眼のみ) (左眼のみ)
[半遮蔽部分]
他の単眼情報により空間位置補正し、安定状態を保持するが、極端に異なる映像の場合は不安定な見えになる。

[局所視野闘争]
2眼式の違和感

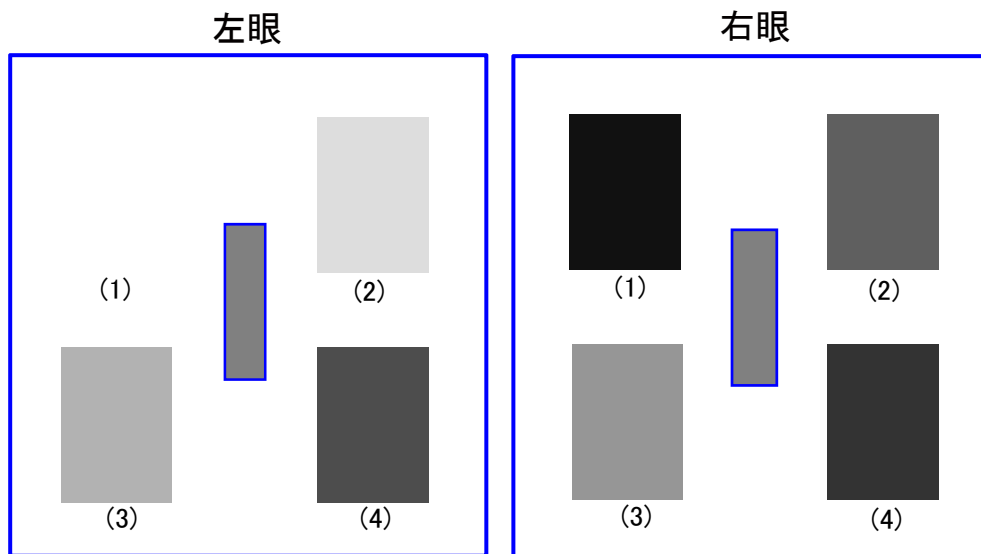
* 普段、窓枠による左右眼の差が気にならないのは、見たい対象は窓枠より外(奥)にあり、3D映像のように、注視対象が画枠に掛かりながら飛び出す場合はない。ただ、画枠より奥でのフレームアウトや観察者の後方からのフレームインでは、画枠による制限が少なくなる。

両眼情報差による不安定な見え方 —視野闘争—



(a)

(a) ネガ・ポジ図形を左右眼へ別々に提示した時、両眼への輝度が極端に異なっていると、面部分が輝いて見える（両眼光輝）
→物体表面の光沢感*や質感*を感じる要因



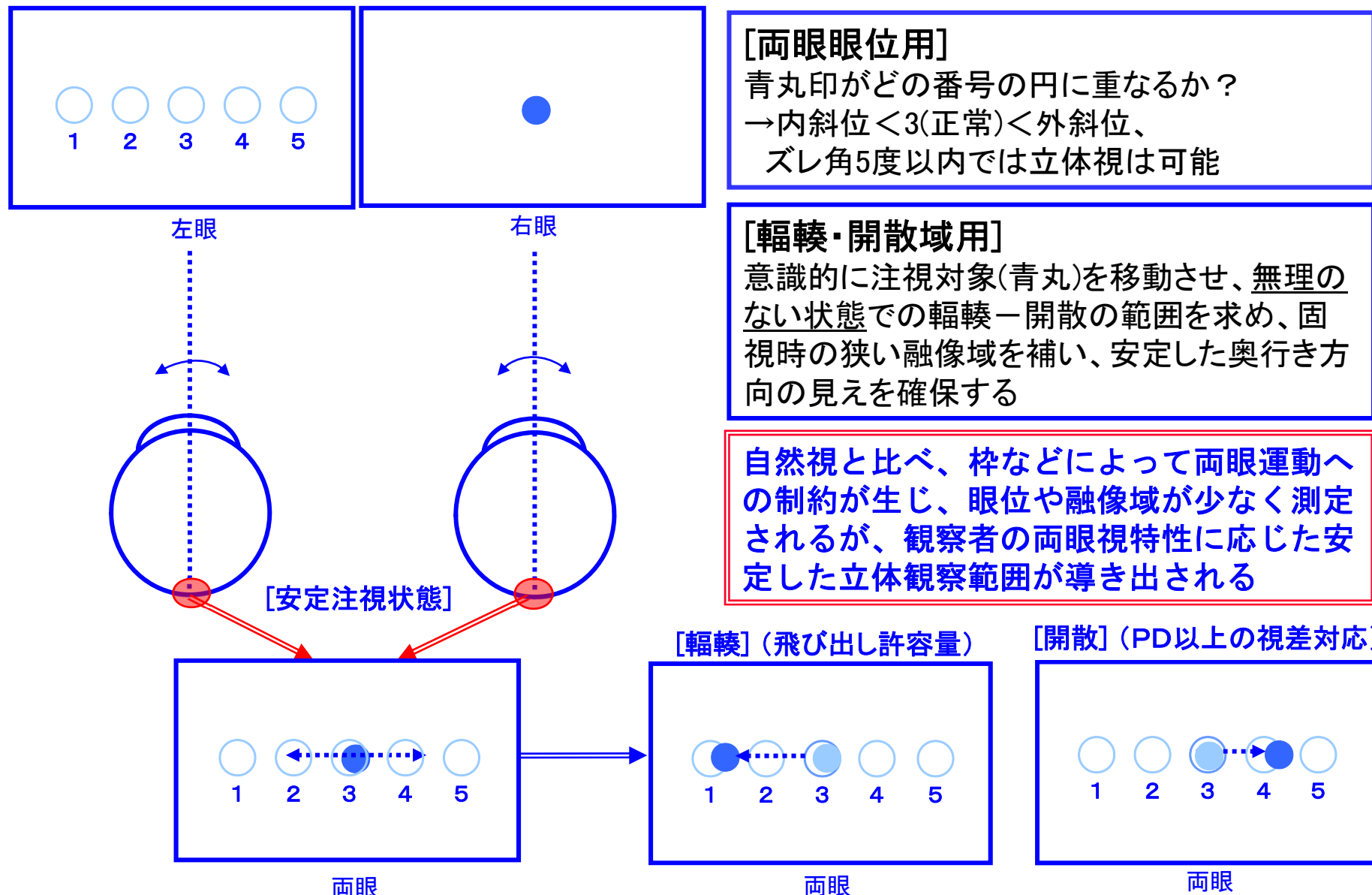
(b)

* 質感: [空間周波数高域成分 + 輝度・色(コントラスト)分布など]の再現により、物体の表面状態(つるつる、ざらざらなど)が感じられる
* 光沢感: 高輝度分布状態が視方向によって、鏡面のように変化して見える

[Y. Sakano and H. Ando : J. Vision, 15, 9, pp. 1-14 (2010)]

(b) 両眼への明暗差による光沢感の発生条件
(1)~(2): 両眼光輝発生 (コントラスト > 0.6)
(3)~(4): 不安定な見え減少
(輝度差(3) $\div$ 10% (4) $\div$ 5%)

両眼融像状態の計測 —眼位と輻輳・開散—



[両眼眼位用]

青丸印がどの番号の円に重なるか？

→内斜位<3(正常)<外斜位、
ズレ角5度以内では立体視は可能

[輻輳・開散域用]

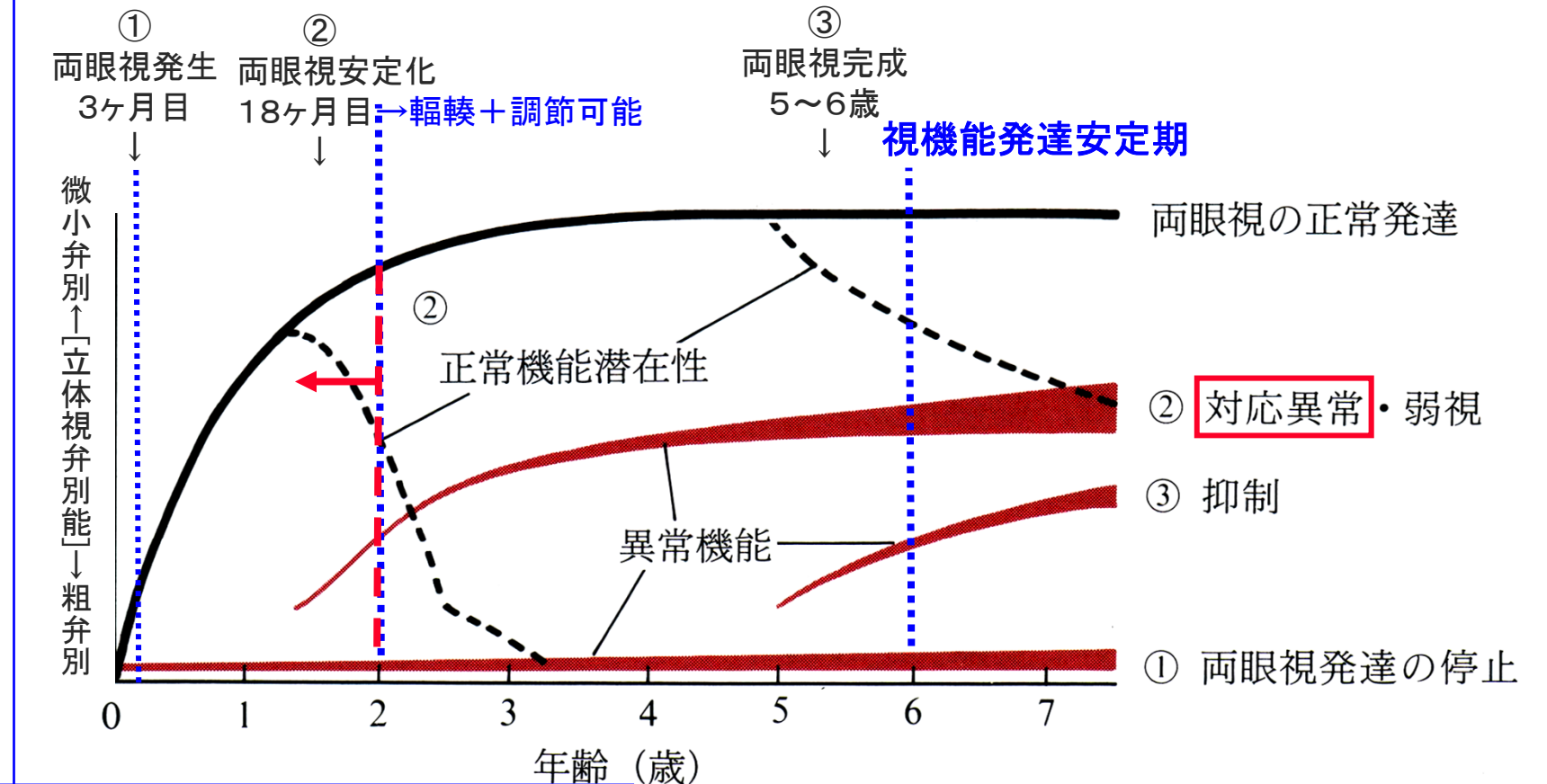
意識的に注視対象(青丸)を移動させ、無理のない状態での輻輳—開散の範囲を求め、固視時の狭い融像域を補い、安定した奥行き方向の見えを確保する

自然視と比べ、枠などによって両眼運動への制約が生じ、眼位や融像域が少なく測定されるが、観察者の両眼視特性に応じた安定した立体観察範囲が導き出される

輻輳・開散の破綻限界範囲は $15^{\circ} \sim -5^{\circ}$ 、融像成立は $12^{\circ} \sim -4^{\circ}$ 、安定視は更に1/3程狭くなる

両眼立体視の発達過程

両眼立体視HMD使用年齢制限の根拠は？



両眼視の要件

- 1) 両眼視力0.5以上 → 左右眼視力差小
- 2) 中心固視 → 両眼対応点 + 融像領域
- 3) 視差検出 → 安定視のための抑制
- 4) 広い両眼視野 → 眼球運動正常

両眼視差での奥行き弁別ができない人: 2~4 %
 ランダムドット立体パターンが見えない人: 10~15 %
 見え難く疲れやすい人: 20 % ?

← 単眼奥行き感は両眼奥行きよりも弁別能は低い、
 行動などに連動し、安定した空間視を生み出す

頭部搭載型ディスプレイーHMDー

<装用型ディスプレイ>

- * 可搬支持型→頭部搭載型→眼鏡型
- * 手袋(掌・手甲)・前腕型→腕時計型
- ⇒視点追従型プロジェクションシステム

空中像表示

表示面位置の自由度

像形成選択

観察制約を軽減し空間効果を高める

実景同時視

作業補助情報表示

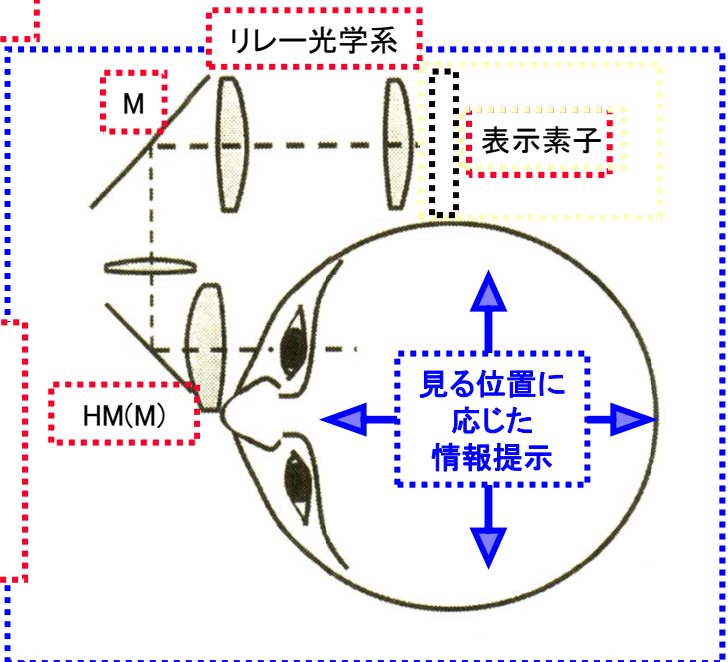
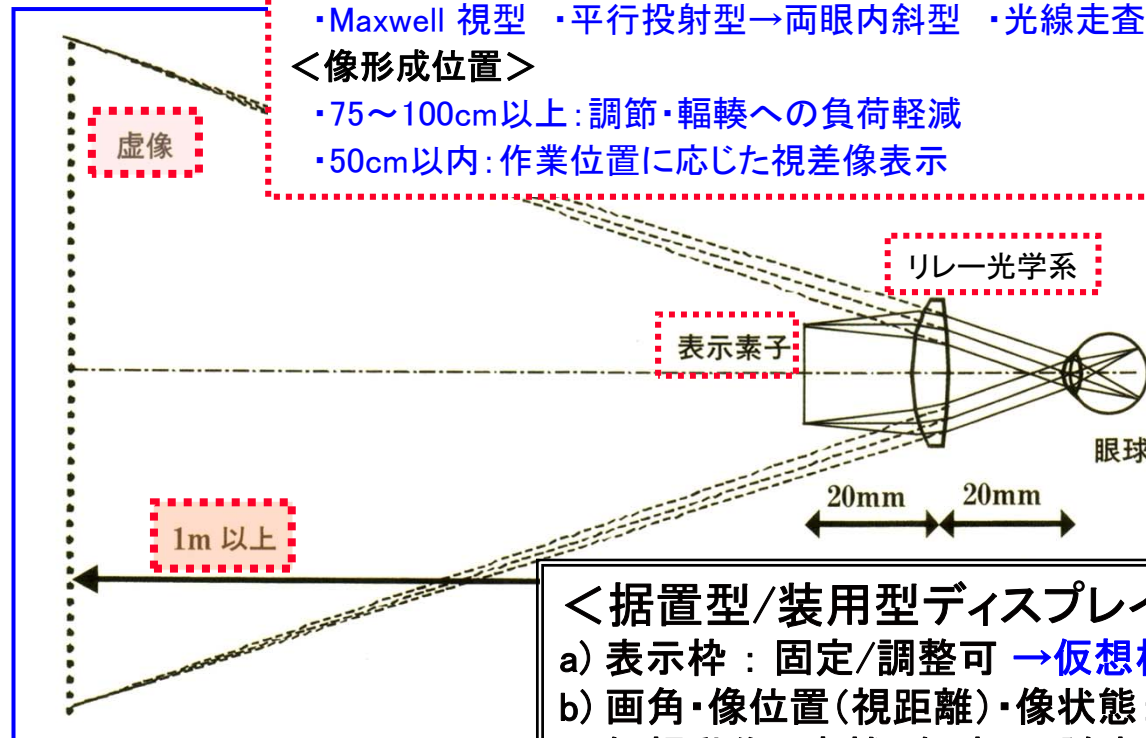
ハンドフリーな作業環境の形成

<像投射方式>

・Maxwell 視型 ・平行投射型→両眼内斜型 ・光線走査型

<像形成位置>

- ・75~100cm以上: 調節・輻輳への負荷軽減
- ・50cm以内: 作業位置に応じた視差像表示

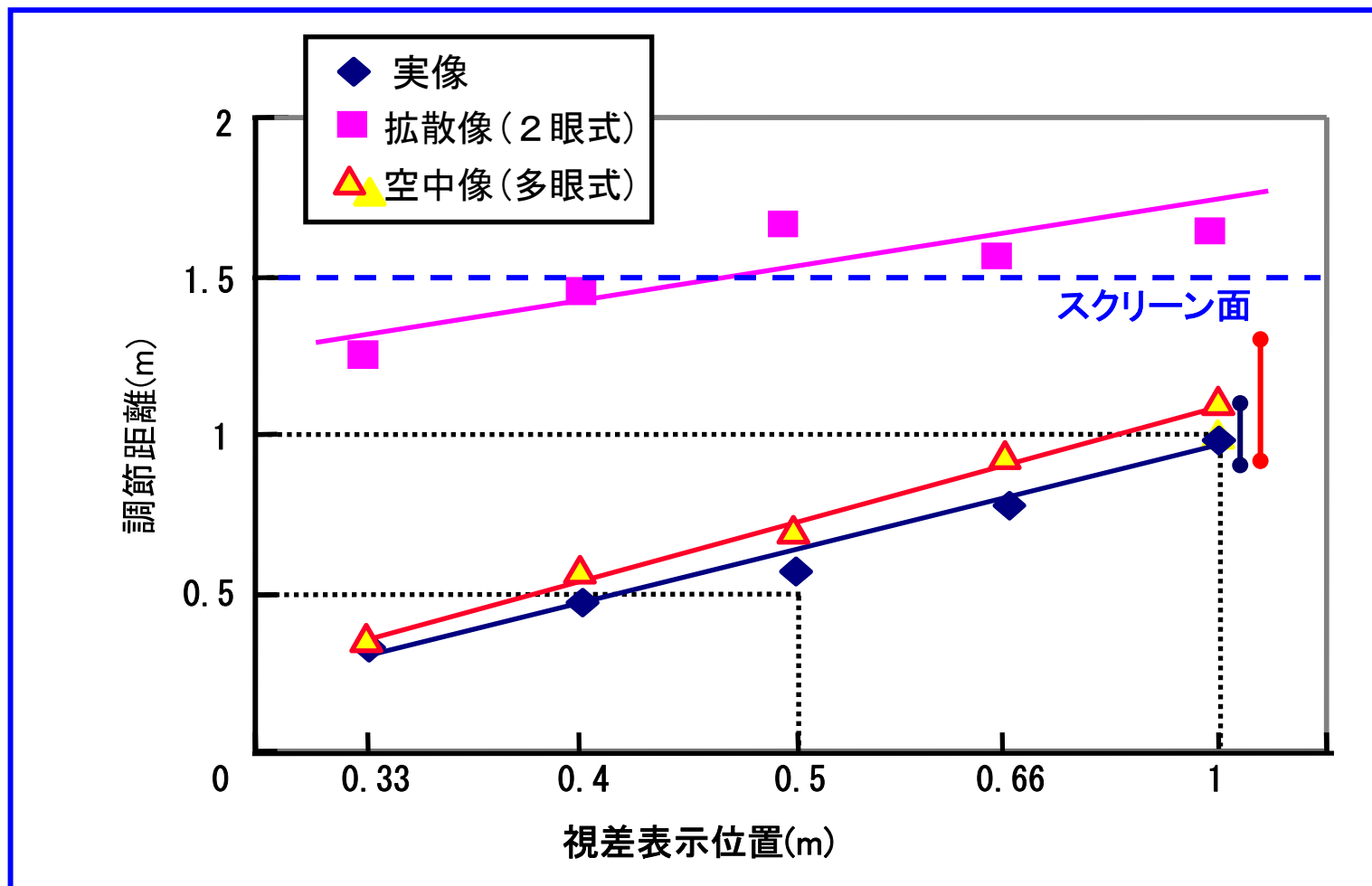


調節への負荷が少なく、効果的な情報受容ができる表示像、眼鏡レベルの装用感が要求される

<据置型/装用型ディスプレイの比較>

- 表示枠: 固定/調整可 → 仮想枠などによる空間座標系の安定化
- 画角・像位置(視距離)・像状態: 半固定/調整可 → 調節・輻輳負荷の低減
- 観視動作: 窓越し観察/不随意動発生 → 安定観察

各種立体表示方式での観察像(調節)位置



各種立体像に対する調節応答は、実像と空中像ではほぼ表示位置にくるが、2眼式拡散像ではスクリーン面近傍で変動する傾向が見られる。

→実像と空中像を比較すると、調節の安定性には差ある。

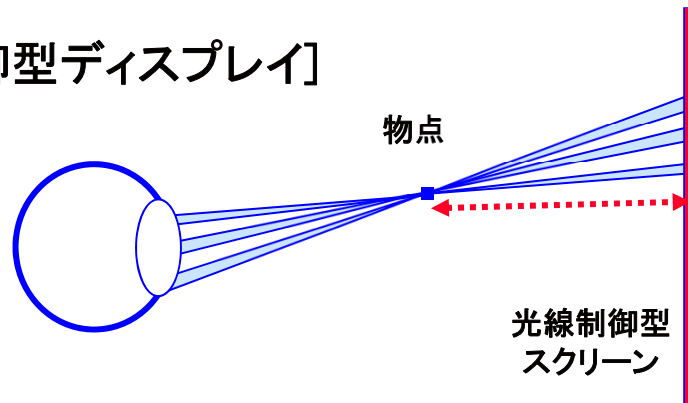
⇐ビューアー式虚像では若年層で器械近視的反応が見られる(石尾:福山市大)。

光線制御型ディスプレイ — 指向性スクリーン —

多人数観察用ディスプレイは視域の広い光拡散型ディスプレイが中心となるが、観察時の負荷が少ない3D空間を再現するには光制御型ディスプレイが期待される。

→観察者の視点(瞳孔)に映像が投射される視点追従型と、眼前特定位置に映像が表示される据置型(指向性スクリーン)、装着型(頭部装着型、ゴーグル(眼鏡)型)などで検討され、高密度表示素子と観察者へのリレー光学系がポイントになる。

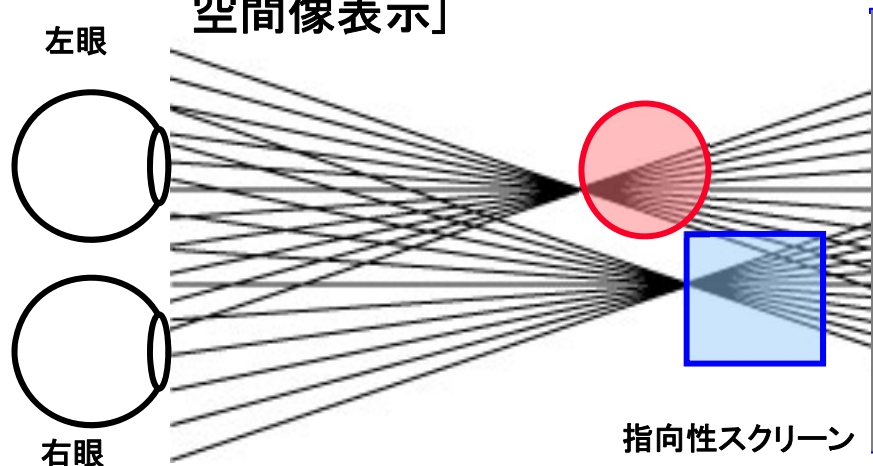
[光線制御型ディスプレイ]



スクリーン面から指向性のある光線群で物点を形成し、瞳孔内に複数光線が入ることで、物体の奥行きと調節位置が合致したディスプレイを作り出す。

両眼視差による立体映像では、再現像と表示像(スクリーン面上)の位置がずれ、不自然な見え方になる。

[高密度指向性ディスプレイによる空間像表示]



奥行き量に応じた視差画像を表示するのではなく、スクリーン面からの光線を制御して、物体からの光線状態を再現する。

4K・8Kの超高精細映像と微小光学系を用いて実現可能な段階に！