

■2群 (画像・音・言語) - 4編 (3次元画像)

5章 ヒューマンファクタ

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 5-1 立体/3次元画像とヒューマンファクタ
- 5-2 立体/3次元画像の視覚受容特性
 - 5-2-1 生理学的機能特性
 - 5-2-2 心理物理学的特性
- 5-3 立体/3次元画像表示の基本的所用特性
 - 5-3-1 表示システムと視覚機能
 - 5-3-2 視覚心理効果—臨場感と視覚疲労

■2群-4編-5章

5-1 立体/3次元画像とヒューマンファクタ

(執筆者：畑田豊彦) [2012年7月 受領]

5-1-1 画像表示とヒューマンファクタ

平面 (2D) 画像表示は「…(もっと細かな部分を見たい)」、「…(もっと迫力を感じたい)」という要望に応じて、高精細・高密度画像を実現し、迫力ある大画面画像へと発展し続けている。このような流れに対して、3次元空間を再現する目的で、2眼式を中心とした立体 (3D) 画像^{†1}が幾度となくチャレンジしてきたが、飛び出すビックリ画像から抜けきれず、新しい画像提供システムとしては定着しなかった。ところが、近年の表示技術と情報伝達技術の進歩により、人間の空間立体視機能を満足させるだけの画像情報が提示できるようになり、自然な3次元 (3D) 画像表示^{†1}の魅力を見出す試みが再び盛んになりつつある。ただ、3次元画像の効果的な活用策が見出せなかった過去の経緯を繰り返さないためにも、空間立体視機能を含むヒューマンファクタに適合した3次元画像表示条件を改めて検討することが欠かせない要件でもある。

ここでは、ヒューマンファクタから見た画像表示条件を踏まえて、自然な3次元画像表示に要求される条件を整理し、後に詳述されている各論の参考として頂きたい。

5-1-2 空間立体視要因と空間再現効果

画像から感じる空間感覚 (図 1・1) には、2D 画像でも体験できる (1)実物・自然感 (高精細度画像) と (2)融合・迫力感 (大画面画像) があり、3D 画像では (3)立体・操作感 (立体・多方向観察画像) が期待されている。このような空間感覚を引き起こす画像情報は、人間が日常生活で利用している空間立体視要因 (図 1・2) が関係し、単眼 (2D) 情報からの単眼視要因と、微妙な差がある両眼への情報を比較処理して空間を知覚する両眼視要因に分類される。

(1) 単眼視要因による空間再現効果

これまで慣れてきた2D画像では、単眼視要因を組み合わせ、実物のような質感がある超高精細画像、ちらつきのない滑らかな動きを再現する高リフレッシュレート画像、没入感と迫力を感じる大画面臨場感画像を作り出してきた。これらの効果をより効果的に表示する基本条件としては“表示面を感じさせない状態”を作り出し、人間の空間立体視機能による表示面の認識を低減させて、奥行き感のある空間を再現している。

(a) ピント調節+輻輳による表示位置の認識低下

スクリーンなどに表示された画像を見るとき、調節と輻輳が働き、画像の表示位置 (表示面) が認識される。空中に像を形成する表示方式 (鏡などの光学系による結像を観察する方式) では表示面を直視することなく、これらの機能による空間位置の確定を弱め、2D 画像でも奥行き感のある空間が再現できる。更に、表示像のぼけ、コントラスト、明るさや色、大きさの配

^{†1} 両眼視差情報だけを表示する立体画像と、輻輳・調節のバランスや多方向からの観察など空間立体視要因が自然に再現できる3次元画像とは区別されてきたが、最近の2眼式立体映画では3D映像という総称的な表現が用いられており、本稿でも、平面画像の2D画像に対して、立体から3次元画像を総称して3D画像を用いることがある。

置によって画像内に遠近感を生み出す効果（強い刺激が近くに見える効果）と併せて、より自然な空間を作り出している。

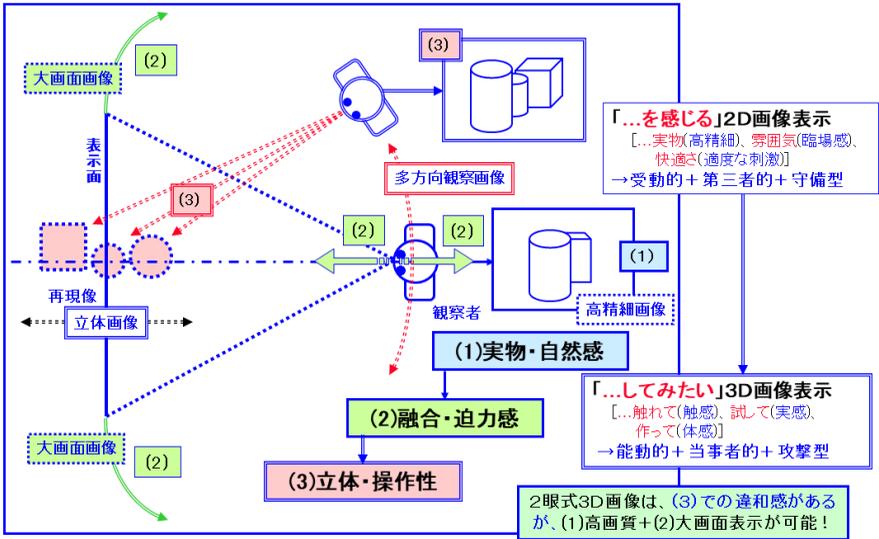


図 1・1 平面 (2D) 画像から立体 (3D) 画像による空間効果

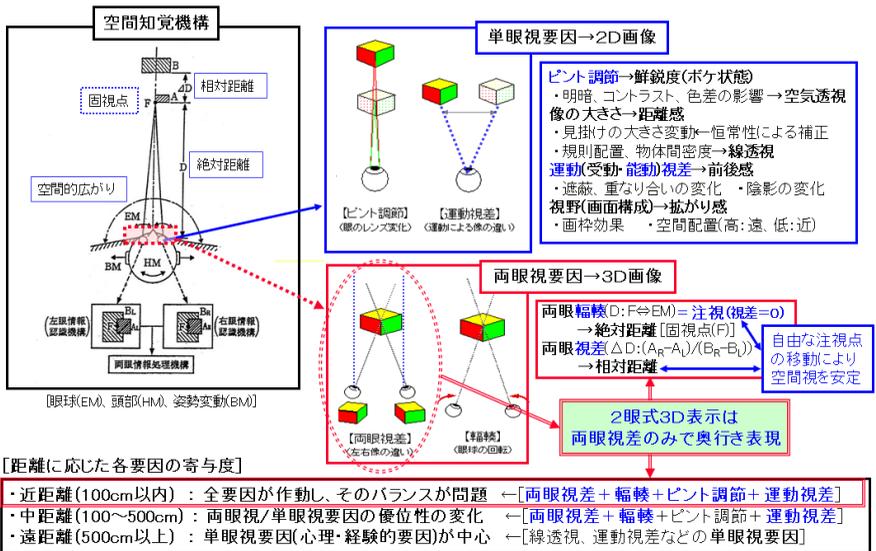


図 1・2 空間知覚機構と空間立体視（各要因が作動する距離範囲から見た寄与度）

(b) 視機能の弁別特性（解像度、明暗・色、点滅、動き）以上の画像情報提示

画像の構成画素や表示面の構造を弁別できないほどの微細にすることで、面に表示された画像であると認識しなくなる。弁別限界は、観察者の分解能力（2点（線）弁別閾の通常視力だけでなく、線分のずれを検出する副尺視力）を満足させるとともに、微妙な明暗・色弁別閾より高画質な画像で、実物（質感）と同等に見える表示条件が要求される。また、動画像表示でも、画像切り替え周波数が点滅弁別閾（CFF、通常の観察時では40～60 Hz）以上で動き再現の条件として設定されているが、自由な観察条件では、より高周波数（120～240 Hz）での表示が要求され、閾値特性の見直しが必要である。

(c) 視野（画枠）や観察位置の制限緩和

外の風景をパノラマ的に見る場合と窓枠で切り取られた風景を見る場合で、同じ風景でも印象が異なる。見る位置を変えたとき、見える範囲や物体相互の重なり具合の変化や動き（運動視差）から、表示画像でも実景に近い見えが感じられる。人間の視野は非常に広く、普段の生活では見る範囲に制約を感じることは殆どないため、画枠によって切り取られた画像表示では、実景に近い臨場感効果を生み出すために、様々な表示条件^{†2}が試みられている。更に、環境条件で生じる表示面を示す情報（周辺照明による表示面反射などの画像情報以外の妨害情報など）を低減させ、視機能の弁別閾を越えた表示性能を実現することで、2D画像による究極の臨場感空間が再現できる。

(2) 両眼視要因による空間再現効果

他の章でも詳細されている両眼での空間立体視要因は、左右眼で対象を注視したときに生じる眼球運動（輻輳・開散）と両眼網膜にできる物体像のズレ状態（視差）で、前者からは対象までの絶対距離を、後者は対象を中心に前後相対距離を判別している。ただ、これらの要因が効果的に働くのは、作業・歩行移動範囲（数10m程度）で、広い空間での奥行き認識には、先に述べた単眼要因もかなり関与し、距離に応じて役割分担している。

(a) 輻輳/開散と調節の作動バランス

近くを見るときには、輻輳が先行作動し、調節を誘起する。2眼式3D画像でも、表示面から離れた位置に視差による立体像を表示すると、輻輳と調節も像位置に移動するが、しばらくすると、網膜像のぼけが目立たない領域（被写界深度内）に調節が戻る。実空間での輻輳-調節位置がほぼ一致して作動するのと比べると、特に近距離に表示される立体像では、輻輳-調節のアンバランスによる眼への負荷が生じやすい。また、遠方視でも、両眼瞳孔間距離より大きな視差量を提示した場合（大画面への拡大表示や近接観察など）には、開散運動による両眼融像が要求されるが、眼球運動に無理が生じ、特に両眼間距離が狭い幼児や女性では注意する必要がある。

このような輻輳-開散状態を調べる眼位測定チャート（図1・3）を用い、各観察者の注視状態と立体像観察許容範囲を調べ、無理のない3D画像表示条件を見出す必要がある。実空間では自由に作動する輻輳・調節で、注視対象を基準とした奥行き距離を知覚しているが、画像表示では輻輳・調節を制限する要因（画枠、ぼけ、視差量など）の存在に注意する必要がある。

^{†2} 画枠・表示面効果の手法として、①仮想画枠（表示面と画枠を異なった位置に提示）、②大画面（有効視野より広い画枠で存在感を低下）、③空中像（空中に結像させ、見掛けの像位置の拡張）、④空間像（多層表示面などで実像空間の形成）が見られ、2D画像の展開として、①、②が用いられている。

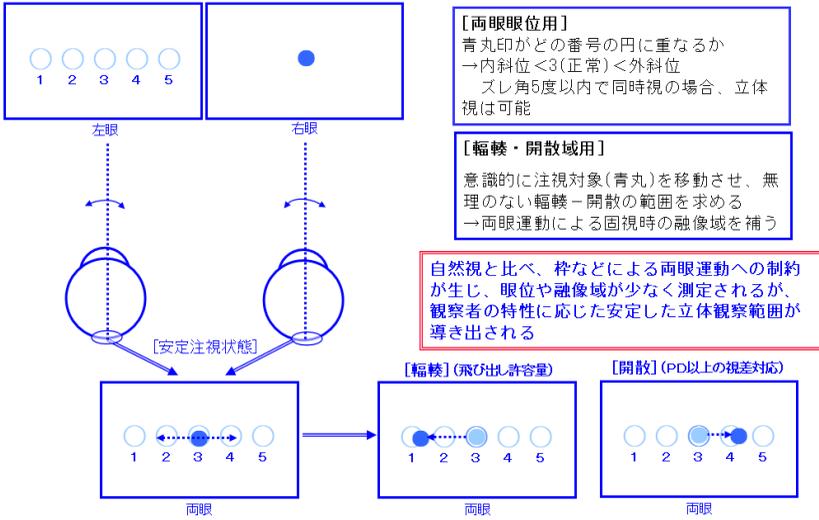


図 1・3 両眼融像状態の計測 (眼位と輻輳・開散)

(b) 両眼視差の許容条件

輻輳によって注視対象を両眼で見るとき、対象以外の左右眼像は、注視対象と各物体間の相対距離に応じたずれ量が生じる。この両眼網膜像の微妙な差を検出する立体視力は、2D 画像

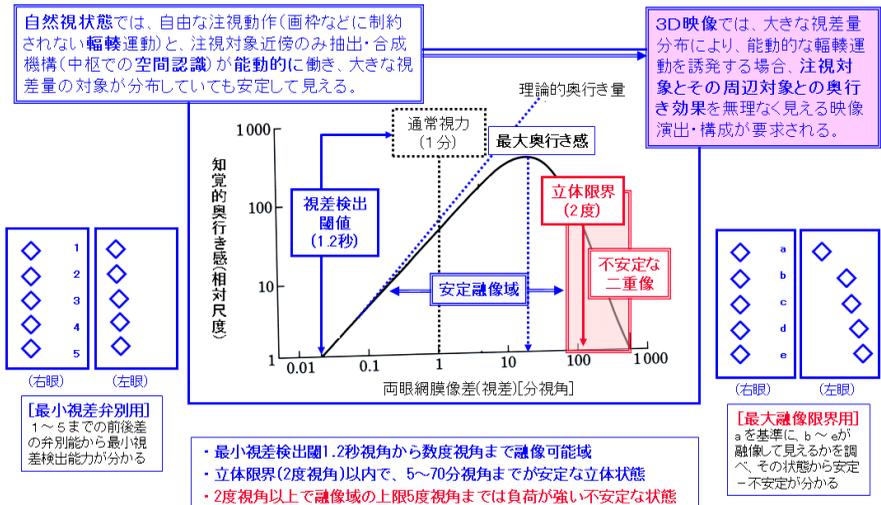


図 1・4 両眼網膜像差 (視差) の検出・融像限界 (最小弁別閾 (立体視力) と最大融像域から生じる安定した両眼融像条件)

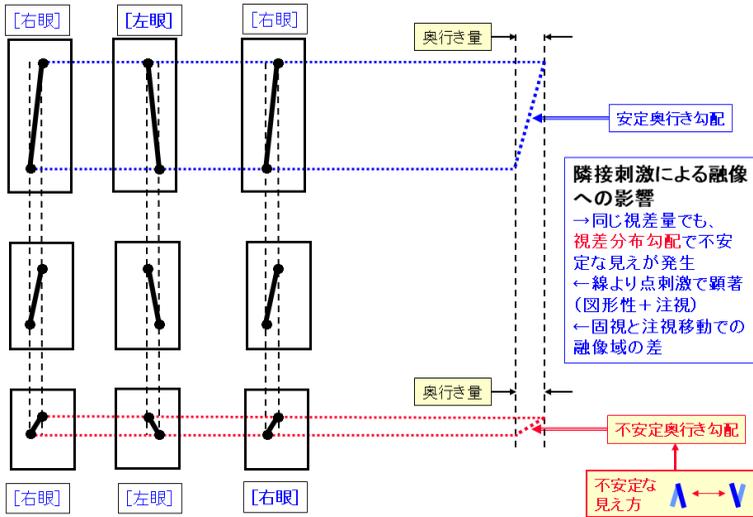


図 1・5 両眼視差分布（奥行き勾配）と立体視の安定状態

の適正観視距離を決める視力（1分視角分離）よりも約 1/50 の高精度であるが、前後に離れた物体間の視差量を融合して単一像として見える融像領域が存在する。その融像範囲（図 1・4）は、網膜中心部や大脳視覚野では狭く、網膜周辺部や行動中枢系へ情報伝達する連合野では拡がり、注視対象と広い空間での見えを安定させる機構になっている。ただ、同じ視差量でも分布状態（視差勾配）で見え方が不安定になる例（図 1・5）や、急激な移動刺激では融像領域が

(a)

(a) ネガ・ポジ図形を両眼で観察する時、両眼への輝度・色差が極端に異なり、面部分が不安定に輝いて見える（両眼光輝）→ 物体表面反射による光沢感*や質感*が生じる

- *質感: 空間周波数高域成分+輝度・色(コントラスト)分布の再現状態から物体の表面状態をつる、ざらざらなど認識する
- *光沢感: 再現細部の高輝度分布と視方向による変化(鏡面反射)

(b)

(c)

(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)≒10% (4)≒5%)

(c) ランダムドットステレオパターンによる立体抑制効果
 3本の半円柱が重なり合って配置されている
 → 最前部の半円柱は正しく見えるが、後部の半円柱は遮蔽効果により扁平化して見える

図 1・6 両眼情報差による不安定な見え方（視野闘争から光沢感・抑制作用）

狭くなるため、3D画像では2D画像よりも緩やかな表現が要求される。

以上のように、3D画像が安定して見えるために必要な人間の空間立体視機能は、両眼で見える視野の広さ、他感覚や行動系との連携によって、近距離での手作業が安定・高精度に行えるように発達してきた。特に、両眼立体視機能は、生後3か月頃から18か月までの這い回り、伝い歩きの移動動作と併せて、対象を注視する輻輳・調節機能、視覚と触覚・体性感覚とが協調して、6歳位までに完成される。この発達過程で、両眼の視力差や注視動作などに異常が発生すると、斜位・斜視などになり、両眼立体視機能が十分に働かなくなる場合が出てくる。それらの諸要因から、2~4%の人は奥行き弁別が難しく、視差情報だけのランダムドットステレオグラム(図1・6(c))の凹凸が判別できない人は10~15%にもなり、約20%の人が見難いと訴える。ただ、両眼視機能の発達・完成期が終了しても、日常生活の行動体験から、単眼情報だけで空間配置や距離を認識する能力が形成されるため、数値ほど多くの人が日常動作で支障が生じているわけではない。しかし、両眼視差だけで空間を再現する2眼式3D画像では、空間立体視機能の弱い人がいることに留意する必要がある。

5-1-3 2D画像から3D画像への展開

視機能を満足させながら進歩してきた2D画像に加えて、表示面の前後方向に空間を再現する3D画像は、その特有の魅力と利活用を見出すことが、新しい画像表示技術としての今後を左右する重要な要件になる。

(1) 3D画像による空間再現効果の魅力

3次元空間が再現できることで、2D画像で感じる奥行き感・臨場感を強めるとともに、観察者から見た空間距離情報(視差)が分かりやすくなり、再現空間内における作業や動作が安定し精度良く行えるとともに、画像が作り出す状況をただ見ているだけでなく、その状況を主体的・能動的に利用する姿勢が生み出される。

また、画像を両眼に独立提示することで、両眼情報処理による加算性や平滑化機能(NS比改善)により、両眼共通情報の見えが良くなり、画質が向上する。更に、両眼異質情報(視差・非対応部分)を効率良く処理する機能(差分・抑制)から、物体表面の光沢感(図1・6(a),(b))を生み出し、実物感(質感)を高める効果も見られる。

このような3D画像の魅力や新しい画像情報の利活用へと展開させるには、観察側の視機能を始めとした情報受容特性を考慮した次のような表示条件が要求される。

- (1) **表示性能**: 2D画像からの画質劣化を許容範囲内にとどめ、表示面・画枠からの開放感を生み出し、空間立体視をバランス良く満足させる画像表示性能を確保する。
- (2) **両眼提示**: 3D画像では両眼への画像情報に差成分が含まれるため、差検出機能への負荷を与えない表示条件が要求される。極端な情報差部分に対しては、両眼立体視が安定して働くレベルまで補正処理することが必要である。
- (3) **観察条件**: 2D画像に比べ、3D画像は観察条件に制約が強く、利用環境に適合した3D画像表示方式を選択する必要がある。自由な観察可能方式では、情報伝達系も含む高密度画像情報量提供システムの実現が要求される。
- (4) **生体負荷**: 画像を観察する人間の視機能(輻輳, 調節, 視線移動, 視差検出能など)を満足させる情報を提示し、特定情報の強調などによる観察者への違和感や機能への負荷を避ける対策が必要である。

(2) 2眼式 3D 画像の課題と対策

現時点での 3D 画像提供システムのうち、先の(1)の条件を満足させる方式としては、2眼式が最も実用可能であるが、違和感や負荷を与える効果¹³が生じるため、(2)～(4)の課題改善が急務である。

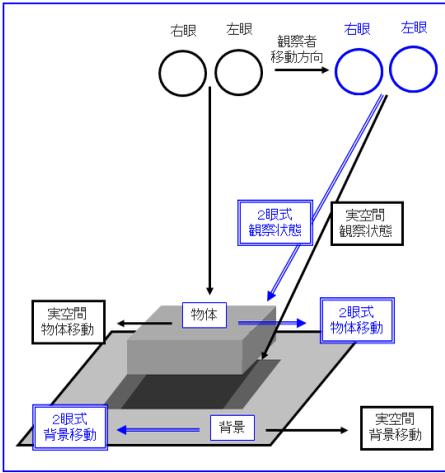
- (1) 両眼視差による適正な立体表示条件 (図 1・4) は、安定融像域 (最小視差弁別閾から無理のない融合視差量) での空間再現と、急激な視差分布による不安定さ (図 1・5) を除去する必要がある。
- (2) 輻輳-調節機能のバランスを保持し、動的刺激に対する融像域の狭小と輻輳・調節の時間応答特性を考慮した 3D 表示条件にすることが要求される。
- (3) 観察位置移動に伴う視差情報の欠落を補う表示方式として、2眼式では観察者の移動に追従する表示システム、多方向情報を提示する多眼式への改善が必要となる。
- (4) 両眼情報差による視野闘争の発生を低減する画像処理 (ぼけ、コントラスト低下、消去など) が必要である。ただ、光沢感 (図 1・6) や物体表面の質感を生み出す情報差の場合もあり、効果的な 3D 画像表現を行うための高度な処理方式が必要なる。

5-1-4 3D 画像がもたらす生体への影響

新しい情報端末 (VDT) が出現したとき、紙での情報表示に比べて、視機能・中枢への影響度 (VDT 症候群) が問題になり、生体への悪影響を取り除く表示性能の改良が続けられ、現状では殆ど問題にされていない。3D 画像の場合も、飛び出し効果を強調した 3D 映画からの生体影響が懸念され、視機能を中心とした負荷や疲労に対する対策が検討されている。視覚情報を受容する際に生じる生体への影響には、次のような状態が想定され、影響度を(1)レベルにとどめ、(2)～(3)に至らない自然で快適な 3D 画像の観察条件を見出すことが重要である。

- (1) **不自然な違和感**: 両眼視差だけで再現される画像空間の不自然な見えから、日常生活では体験しない違和感が生じるが、刺激停止とともに消失する負荷状態。→書き割り・箱庭効果など
- (2) **不快・負荷による疲労**: 視機能へのアンバランスや不安定な見えから、「目が疲れる」、「眼が重い」などの訴えが生じ、刺激停止後もしばらく持続性するが、休息などによって回復する負荷状態 (視覚疲労/眼疲労)。→輻輳-調節への負荷、視野闘争 (半遮蔽)

¹³ (a)箱庭効果, (b)書き割り効果→両効果は、撮影条件 (カメラ間隔, 画角, カメラ方向 (平行/交差) など) と観察条件 (観視距離, 表示拡大率など) による再現空間の歪みが原因とされ、平行法撮影では、空間全体に距離の伸長-圧縮が生じ、交差法では距離に応じた歪み率が変化することを考慮した表現が要求される。(c)輻輳-調節機能へのアンバランスな像提示, (d)回り込み効果の欠落 (図 1・7(a), 移動しながら観察するとき, 実空間では移動方向から見た部分が見えるが, 2眼式では移動しても同じ部分が見え, 対象物体と遠景の間に不自然な揺れや歪みを感じる), (e)張り付き (額縁) 効果 (図 1・7(b)), 対象が画枠などで見切られると, 左右眼への画像に非対応 (半遮蔽) 部分が生じ, 画枠に張り付いたように見える), (f)動き追従 (3D 画像では高速移動物体での融像特性が低下することから, 不安定な見え方になる), (g)クロストーク+左右眼への映像差 (両眼への画像情報を分離提示する性能低下して, 左右眼への画像情報差が大きくなった部分では視野闘争 (図 1・6) が生じ, 不安定な立体に見える) →このような効果は, 実空間でも発生するが, 能動的な情報受容で補正しているが, 提示画像のような受動的状況では人間の機能に整合した表示が要求される。



<多方向情報の欠落による見え方>

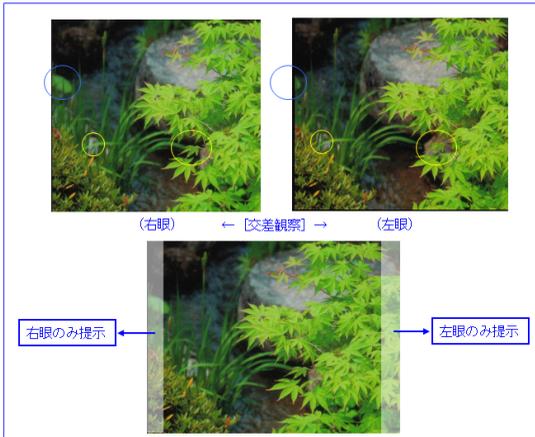
- ・実空間では、観察者の移動に伴い、物体の側面や背景の遮蔽されていた部分が見え、前後空間配置が自然に感じる。
- ・2眼式では移動位置からの情報が欠落しているため、最初の観察状態と同じ見えのまま、物体は移動方向に追従し、背景は逆方向に動いて見え、不自然な空間配置に感じる。

→2眼式では、不自然な違和感を感じるが、視覚負荷や疲労のレベルまでには至らない。

改善策

・観察者移動追従方式や多眼式により、実空間と同じ、多方向観察が可能な状況を作り出す。

(a) 特定方向からの観察による回り込み効果の欠落



<両眼非対応情報による見え方>

- ・前後物体による遮蔽、画枠による張り付き効果(額縁効果)は、両眼非対応部分が発生し、違和感が生じる。
- ・両眼情報に異質と判別される部分が生じると、視野闘争が生じ、違和感から視覚負荷を引き起こす。

・画枠近傍の草木、石などが、片眼だけにしか見えないため、不安定に見える。

・左右眼での見えに大きな差がある部分(円で指示した部分や背景の水跡など)で、視野闘争による不安定な見えになる。ただ、水跡などは水面反射の差からその質感を表現している。

改善策

- ・画枠と再現空間の分離 → 表示面を感じない再現状態 → 仮想画枠(枠ずらし)方式
- ・両眼情報を差許容範囲に抑える → コントラスト、ボケなどの画像処理による表示(光沢面は処理対象外)

(b) 非対応部分の発生

図 1・7 2眼式で違和感のある空間再現例

(3) 過度負荷による機能異常：機能的に対応不可能な画像刺激により、視覚系から中枢・行動系での異常状態が生じ、「ピントが合わない」、「眼が痛い」、「涙が出る」、「眩しい」、「充血する」などの眼の症状だけでなく、「頭が重い」、「肩がこる」などの身体的負荷、「物事の処理が遅れる」などの中枢への負荷も生じ、刺激停止後も持続性のある負荷状態(眼精疲労)。→融像不可に至る過度な両眼情報提示(視差量、動きなど)

以上のような3D画像による生体への影響も、主観評価(段階・連続評価尺度を用いるSSM, VAS, 映像酔いの評価法SSQなど)と客観評価(作業能率, 機能変動や生体反応など, 図1・8)の両面から調べられている。その結果, 2D画像に比べて3D画像による迫力や立体感, 臨場感などの心理効果は強く, 客観評価でも, 視力やちらつき検出などに加えて, 大脳中枢レベルでの血流状態を測定する光トポグラフィで, 3D画像観察時の脳内血流状態が2D画像より増加する傾向が報告されている。これまでも, 3D画像観察時の調節・輻輳や瞳孔径変動などの測定から, 視覚系への負荷を示す眼(精)疲労が引き起こされる例が見られる。このような報告の多くは, 2眼式で立体を強調し過ぎた3D画像で, 空間知覚要因の視差成分と運動成分のバランスや慣れが成立しない状況を作り出し, 違和感から不自然な印象を引き起こし負荷レベルに至った結果である。

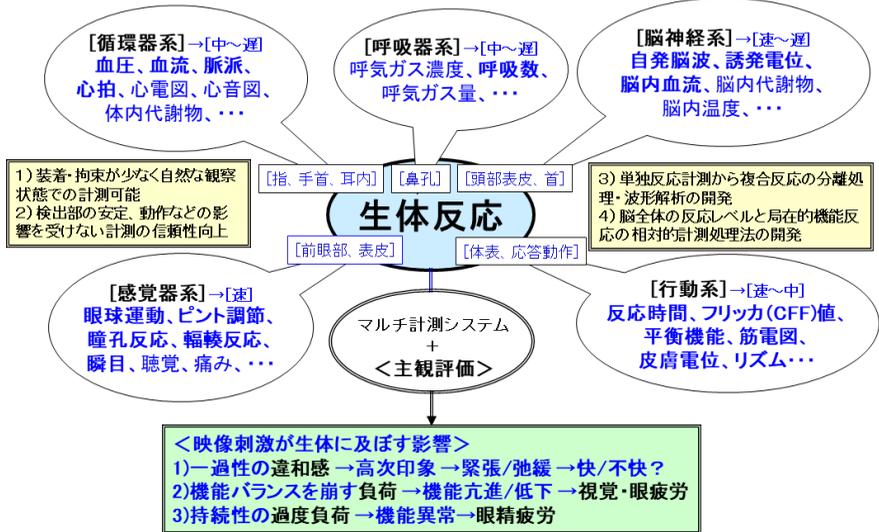


図1・8 生体反応と主観評価による生体への影響測定

それに対して, 無理のない3D画像表示による生体への影響度を活かし, 「活動・積極性」や「体感・理解度」などを引き出す教育・訓練・創造分野での効果に関する具体例は少ないが, 人間の空間立体視を発達させる過程に見られる生活環境への対応能力の向上は, 3D画像での観察時の構えと同じ効果と見られる。3D画像によって再現される空間に慣れることと, 見る人が主体になって再現空間での活動ができる双方向型3D画像システムによって, 個々人の空間立体視特性に適合した表示条件に設定でき, より効果的な空間学習システムが実現できる。

5-1-5 むすび

ディスプレイ関連の技術向上で, これまでの各種3D画像表示方式も, その性能は以前とは比べものにならないレベルにまで進歩し, 見やすい3D画像が再現できるようになった。ただ, 2D画像にない3D画像特有の魅力を最大限に表現する手法を生み出すには, 利用環境に応じた

画像作成から表示までを総合的に吟味した 3D 画像構成が必要である。

現状では、高画質で大画面が実現できる 2 眼式 3D 画像によって、更なる 3D 画像の魅力を作り出す努力が進められているが、画像観察時のヒューマンファクタから、ソフト・ハード面からの改善条件を明確に定めることが大切である。身近で体験できる情報端末にも、安定した 3D 画像表示を実現し、人間の空間立体視要因を可能な限り提供できる新しい「3D 画像」方式によって、3D 画像のプラス面を提供する生活行動空間を拡張した環境参加型の利活用が期待される。

■参考文献

- 1) B. Javidi, F. Okano ed. : “Three-dimensional television, video and display technology,” Springer, 2002.
- 2) 三橋哲雄, 畑田豊彦, 矢野澄男 : “画像と視覚情報科学,” コロナ社, 2009.
- 3) 河合隆史, 盛川浩志, 太田啓路, 阿部信明 : “3D 立体映像表現の基礎,” オーム社, 2010.
- 4) 水科晴樹, 根岸一平, 安藤広志, 河内山隆紀, 正木信夫 : “実視標と二眼式立体ディスプレイで呈示された視標を観察した場合の調節・輻輳測定,” 映情学技報, vol.34, no.12, pp.35-38, 2010.
- 5) Y. Liu, A.C. Bovik, L.K. Cormack : “Disparity statistics in natural scenes,” J. Vision, 8(11):19, pp.1-14, 2008.
- 6) 山之上裕一, 奥井誠人, 岡野文男, 湯山一郎 : “2 眼式立体像における箱庭・書き割り効果の幾何学的考察,” 映情学誌, vol.56, no.4, pp.575-582, 2002.
- 7) 名手久貴, 須佐見憲史, 畑田豊彦 : “多視点画像が提示可能な立体ディスプレイにおける運動視差の効果—運動視差による書き割り効果の改善—,” 映情学誌, vol.57, pp.270-286, 2003.
- 8) 矢野澄男, 江本正喜, 三橋哲雄 : “両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因,” 映情学誌, vol.57, no.9, pp.1187-1193, 2003.
- 9) 江本正喜, 正岡顕一郎, 山之上裕一, 菅原正幸, 野尻裕司 : “ステレオディスプレイ観視時の水平両眼視差と視覚疲労,” VISION, vol.17, no.2, pp.101-112, 2005.
- 10) 不二門尚 : “眼精疲労に対する対処法,” あたらしい眼科, 27(6) pp.763-769, 2010.

■2群-4編-5章

5-2 立体/3次元画像の視覚受容特性

5-2-1 生理学的機能特性

(執筆者：不二門尚) [2011年8月受領]

3D映像視聴時には輻湊と調節の関係が通常と異なるので、眼精疲労を来しやすく、特に輻湊不全のある人は、注意が必要である。両眼視機能が発達過程にある小児においては、3D映像視聴後に急性内斜視が発症したケースもあり、慎重な対応が望まれる。一方、立体視の弱い内斜視治療後の症例においては、通常の立体視検査で立体視(-)であっても大きな指標、大きな視差の飛び出しの3D映像が立体的に見える場合がある。

(1) 3D映像と輻湊・調節

3D映像は、偏光フィルタまたは液晶シャッタを用いて、左右眼に映像を分離して投影する方式をとっている。左右眼に対する像には視差がついており、同側性の視差の場合はスクリーンに対して引っ込んだ立体映像となるのに対して、交差性の視差の場合はスクリーンに対して飛び出した立体映像となる(図2・1)。日常視における輻湊角と調節の関係は通常比例関係にあるが、3D映像を見る場合は、調節はスクリーン上に保たれているのに対して、輻湊角は様々に変わる点が異なっており、これが眼精疲労を来しやすい理由として考えられている¹⁾。

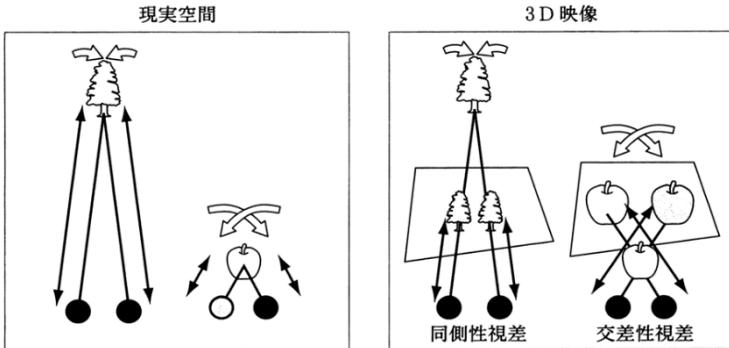


図2・1 現実空間と3D映像視聴時の、調節と輻湊の関係の違い

3D映像を見ているときの輻湊と調節の関係は、両眼同時に測定できる波面センサを用いることにより、実時間で測定することが可能になった²⁾。本装置を用いて正常者に対して眼前60cmに置かれた画面から、最大視差6.7△まで2秒間かけて視標を飛び出させて停止させた場合(図2・2(A))、及び、連続的に視標を前後に動かした場合(図2・2(B))の調節と輻湊の関係を検討した。視標が飛び出して停止した場合は、調節は一過的に近視化した後、また画面上に戻ることを示された。これは輻湊と調節の相互作用に関するSchorの模式図³⁾(図2・3)における一過性の調節と持続性調節に相当するものと考えられる。同様の一過性の調節変化は、渡辺らにより報告されている⁴⁾。一方、連続的に視標を動かす場合は、調節も輻湊に連動して動き、一過性の調節が連続的に起こった状態と考えられる。同様の連続的な調節変化は、宮尾らによ

り報告されている⁵⁾。

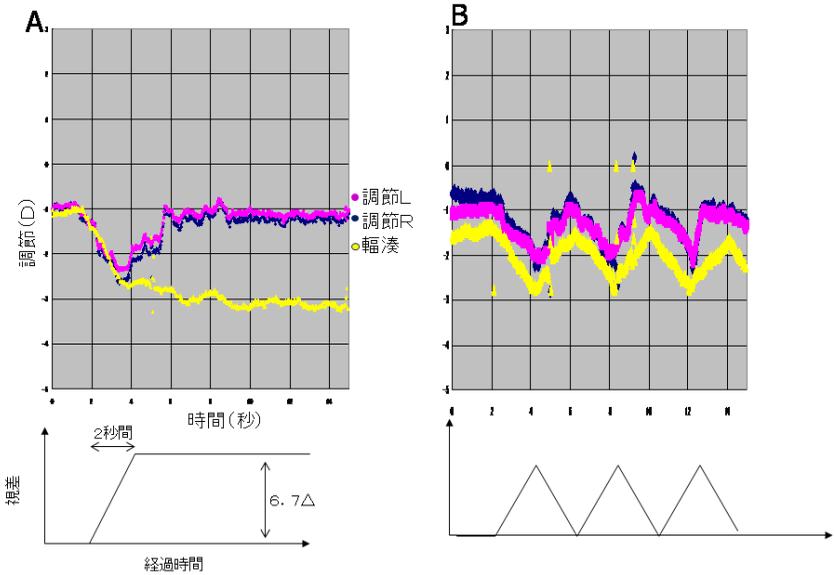


図 2・2 3D 映像が画面上から手前に Step 状に表示された場合 (A) 及び連続的表示された場合 (B) の調節と輻湊の関係

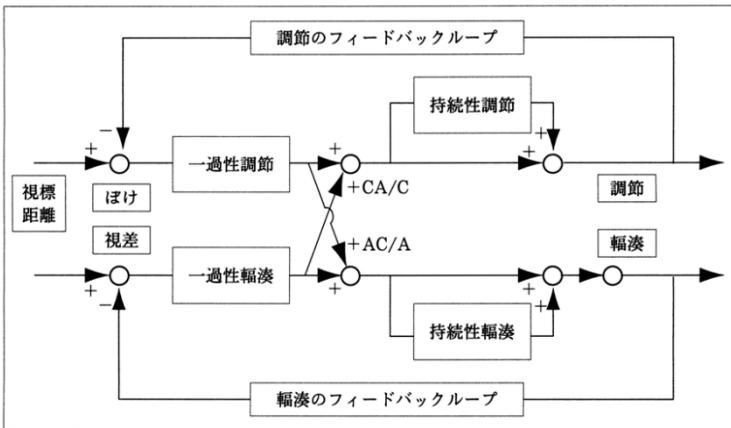


図 2・3 中枢神経系における調節と輻湊の相互作用

飛び出しの 3D 映像 (停止した状態) を見た場合の屈折変化をシミュレーションする目的で、プリズム (Δ) を基底を外側にして眼前に置き、小児用赤外線オプトメータ (PR1100, Topcon) を用いて検査距離 1.4 m で屈折を測定した。その結果、 10Δ 基底外方負荷までは、全員が融像

可能で、屈折も軽度の近視化にとどまった(↑)。更に強い輻湊付加をすると、屈折は近視化し、融像できない人も出た。一方、大角度の輻湊負荷でも、あまり近視化しない人も2名存在し(*), 彼らは3D映像鑑賞を趣味としていた(図2・4)⁶⁾。

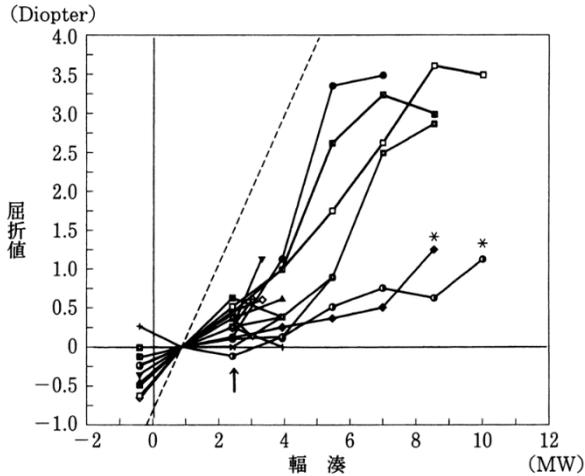


図2・4 プリズムを基底外側に負荷した場合の輻湊と調節の関係

このように、正常人でも、飛び出し画像への許容度には個人差があることは注意する必要がある。1.4 mの位置にあるスクリーンに対して10△基底外方負荷は、眼前42 cmの飛び出し映像を見る状態に相当し、この程度の飛び出しが許容限度と考えられた。また、これは3D映像の安全な視差範囲と考えられている、視差1°に対して大きな値である。

(2) 3D映像視聴後の視機能の変化

2D-3D変換方式で一般のテレビ放送を立体映像とした3D映像を視聴させた場合の視機能の変化を検討した。2D-3D変換方式は水平方向に動きのある画像を、時間をずらして液晶シャッターで分離して左右の眼に提示する方法をとっており、視差量はコンピュータで制御された。眼精疲労に関係する客観的パラメータの候補として屈折、調節力、瞳孔径、眼位を取り上げ検討した。

対象は正常の成人118名(平均27歳)で、視聴時間は4時間(間に10分休憩)とし、負荷前、負荷直後、負荷30、60分後の瞳孔径、屈折、調節を、赤外線オプトメータAA2200(Nidek社)を用いて測定した。眼位はトータルビジョンテスタVT-5000(Tomey)を用いて測定した。屈折度は視聴直後、軽度(-0.2 D)ではあるが有意に近視化した。この変化は視聴30分後には認められなくなった。また、調節反応量も視聴直後、有意に低下したが30分後には回復した。一方、瞳孔径も視聴直後、有意に低下したが30分後には回復した。5 m眼位は視聴直後に有意に内斜した⁷⁾。これらの結果から、3D映像を見ると、屈折系は近視化し、調節反応量の低下、瞳孔系は縮瞳、輻湊系は輻湊過多(内斜傾向)という形で視覚系に影響が出ることが示された。これらの視覚系の変化は、眼球に対する自律神経系の支配が副交感神経系優位になっていることを示唆しており、3D映像視聴に伴う疲労の他覚的所見と考えられた。また、これらの変化

は視聴 30 分後には回復していることから、この測定に用いた条件では視覚系への影響は可逆的であると考えられた。

(3) 両眼視機能の発達と 3D 映像

立体視の発達に関する電気生理学的研究及び心理物理学的研究から、おおまかな立体視は生後 3~4 月頃より急速に発達し、6~8 月にはほぼ完成すると考えられている。これに関係して、乳児内斜視では、立体視の感受性期は 2 歳位までであるのに対して、1 歳以降発症する調節性内斜視では、立体視の感受性期は、7 歳くらいまでであると報告されている⁸⁾ (図 2・5)。

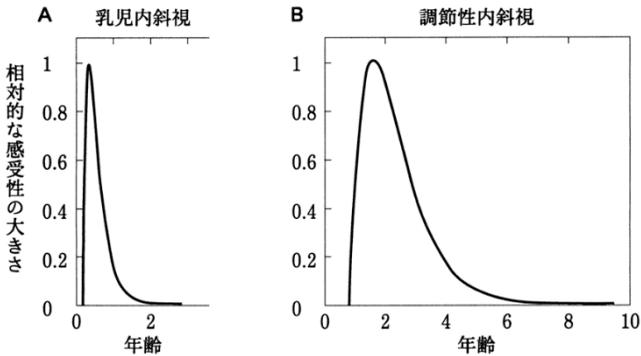


図 2・5 内斜視の発症時期と立体視の感受性期

3D 映像の視聴は、正常の小児の発達に対しては問題ないと考えられるが、両眼視機能が不安定な可能性のある、就学前の小児に対しては、注意が必要である。3D 映像視聴後、急性内斜視が生じた小児の症例(発症 4 歳 8 か月)⁹⁾は斜視手術を必要とした。これまで報告された 3D 視聴後に複視を生じた成人例は、可逆的であったことを踏まえると、両眼視機能の発達期にある小児の 3D 映像視聴は、成人より注意を要すると考えられる。

これまでの 3D 映像は、アトラクション系のものが中心で、飛び出し映像が強調されているものが多かった。これに対し、近年眼精疲労を起こしにくいように配慮された、奥行方向中心の 3D 映像が増えている。立体視の機能が弱い、内斜視術後長期フォローしている 10 症例に対して、3D 映像視聴の感想を聞いたところ、アトラクション系の 3D 映像は 6 名が立体的に見えたが、このうち 4 名は奥行方向中心の 3D 映像は立体的に見えなかった。

眼精疲労を起こしやすい、輻湊不全の人にとっては奥行方向中心の 3D 映像が望ましいが、立体視の弱い人にとっては飛び出し映像が強調された 3D 映像でないと立体的に見えないという問題点がある。また、今後教育の現場で 3D 映像が使われる可能性があるが、立体視が弱い人が一定の割合でいることを考慮する必要がある。

■参考文献

- 1) 不二門尚：“3D 映像と両眼視,” 日本の眼科, vol.81, pp.1414-1418, 2010.
- 2) 三橋敏文, 小林真理子, 広原陽子, 不二門尚：“両眼波面センサーによる調節の測定—神経系の評価を目的としたハルトマンシャック波面センサー,” 信学技報, vol.112, pp.61-65, 2007.
- 3) C.M. Schor：“A dynamic model of cross-coupling between accommodation and convergence: simulating of step

- and frequency responses,” *Optom. Vis. Sci.*, vol.69, pp.258-269, 1992.
- 4) 渡辺 勲, 吉田辰雄: “眼の調節—輻湊の制御機構,” *NHK 技術研究*, vol.23, pp.58-76, 1971.
 - 5) 堀 弘樹, 塩見友樹, 宮尾克, 他: “立体映像注視時における調節と輻輳の同時計測,” 第15回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2010.
 - 6) 松下賢治, 細島淳, 近江源次郎, 不二門尚: “融像性輻湊と調節の関係—プリズム負荷試験による検討—,” *視覚の科学*, vol.18, pp.80-83, 1998.
 - 7) 細島 淳, 近江源次郎, 不二門尚, 他: “3D 映像の瞳孔に与える影響—眼位との関係—,” *あたらしい眼科*, vol.14, pp.947-952, 1997.
 - 8) S.L. Fawcett, Y.Z. Wang, E.E. Birch: “The critical period for susceptibility of human stereopsis,” *Invest Ophthalmol Vis. Sci.*, vol.46, pp.521-525, 2005.
 - 9) 筑田昌一, 村井保一: “立体映画を見て顕性になった内斜視の一例,” *日本視能訓練士協会誌*, vol.16, pp.69-71, 1988.

5-2-2 心理物理学の特性

(執筆者: 名手久貴) [2011年7月 受領]

本稿では、3次元画像を観察時の心理物理学の視覚特性及び主観的歪みとその原因、回避方法について概説する。

(1) 書き割り効果

書き割り効果とは、3次元画像観察時に表示対象の一部に奥行き感がなくなり、まるで舞台上で用いられる書き割りのように薄っぺらく知覚される現象のことである。書き割り効果の発生する条件として、対象内の視差量が小さいこと、観察距離が近いこと、対象と背景の間に不連続な視差が存在すること¹⁾が挙げられている。幾何学的考察を行うと、平行法による映像において撮影時の画角が表示時の画角よりも小さくしたり、交差法による映像においてカメラ間隔を狭く、光軸交点までの距離を長くしたりすると書き割り効果が表れる²⁾。書き割り効果による見かけの奥行き圧縮を低減させるためには、被写体の配置に気を配ることや撮影時のカメラ間隔や光軸交点までの距離に気を配ることが必要である²⁾。また、運動視差を利用できるような映像を用いることや多眼立体表示など表示装置の工夫も考えられる³⁾。

(2) 箱庭効果

箱庭効果とは、3次元画像観察時に表示対象が箱庭のように不自然に小さく知覚される現象のことである。観察者に近い位置に知覚されるにも関わらず見かけの大きさが小さく表示された場合に発生する。箱庭効果は、被写体とカメラの距離が変化すると再生倍率も変化することにより発生する²⁾。つまり、遠近法による奥行情報と両眼視差による奥行情報にリニアな関係が見られないことにより発生する。箱庭効果を低減させるためには、平行法で撮影すること²⁾、交差法で撮影する場合でも遠近法による奥行情報と両眼視差による奥行き情報がほぼ線形に対応する範囲で撮影を行うこと⁴⁾、焦点距離の長いレンズを用いること、被写体のスクリーン上のサイズを大きくすること⁵⁾などが有効である。

(3) 半遮蔽

図2・6のように前方と後方に対象がある場合、片眼には見えるがもう片眼には遮蔽され見えない領域が発生する場合がある。このような状態のことを半遮蔽という。半遮蔽は、日常生活の中だけではなく、3次元画像中でも発生する。半遮蔽が発生した場合、理論的には左右の画像の対応点が存在しないために、両眼視差による奥行き視が正常に行えていないことが考えられる。しかし、半遮蔽は奥行きの変化を特定するために貢献している⁶⁾など奥行き知覚を促進

している側面もある。このような促進効果が見られる原因として眼球運動が挙げられている⁷⁾。

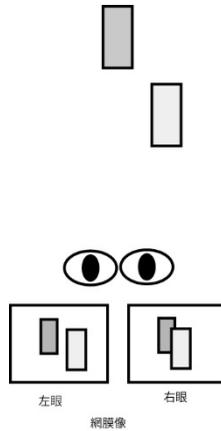


図 2・6 右眼の網膜像では、前方の対象により後方の対象の一部が遮蔽されている。

(4) 画枠効果

3次元画像では水平方向に視差のある画像を用いるため、画枠付近の表示対象は画枠により見切れる場合がある(図 2・7)。このとき、見切れた表示対象には対応点が存在しない部分が発生するため、奥行き視を正常に行えないことが考えられる。ただし、立体像が画枠よりも奥の場合には、半遮蔽の状態にあたるため奥行き視への影響が少ないことが考えられる。しかし、図 2・8 のように立体像を画枠より手前に表示させようとした場合に画枠効果が発生すると問題である。遮蔽物である画枠よりも手前に表示された対象が見切れるという事態は日常生活では発生しないために、図 2・8 のような3次元画像を見続けると視覚疲労の発生原因となりうる⁸⁾。画枠効果を避けるためには、撮影時に画枠で見切れる位置にスクリーンよりも手前と知覚される被写体を配置しない工夫が必要である。画枠効果を低減させる手法として、仮想画枠の画像(バーチャルフレームもしくはフローティングウィンドウ)をあらかじめ画面に重畳させて、仮想画枠を飛び出させることが提案されている^{9),10)}。

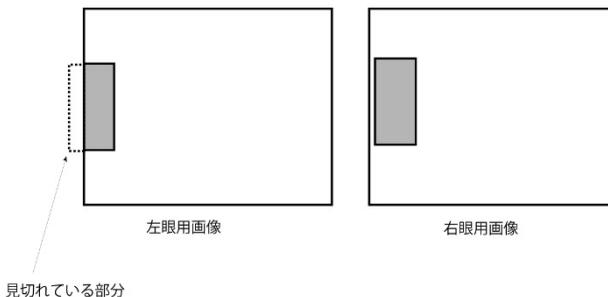


図 2・7 3次元画像では、被写体を画枠付近に配置すると片方の画像が見切れることがある

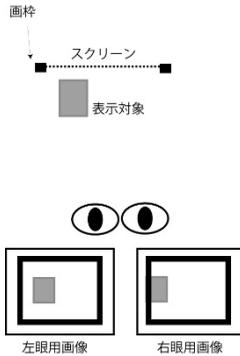


図 2・8 スクリーンよりも手前に表示させた対象に画枠効果が発生し、右眼用画像の一部が見切れている。

(5) 視野闘争

3次元画像では水平方向に視差のある画像を左右の眼に独立して提示している。左右の眼に全く異なる画像を提示すると、3次元画像のように脳内で一つの画像に統合されて知覚されず、どちらかの画像だけが知覚される。そして、不定期に認知される画像が交替する。このような状況を視野闘争と呼ぶ。3次元画像観察時における両眼視差による奥行き視は脳内で1つに統合されるのに対して、視野闘争は排他的である。このことから、視野闘争と両眼視差による奥行き視は、一見、関係のないように思われる。しかし、脳内における両者の処理は共存しうるとする研究が複数存在する^{7),11),12)}。視野闘争の知覚モデルである二重信号理論¹²⁾では、両眼視差による立体視と視野闘争とは1つの処理メカニズムによるものであり、両眼融合に失敗した際に視野闘争が発生すると考える。

(6) 空間周波数特性

3次元画像の輝度の空間周波数に対する両眼視差の特性は、バンドパス型である。これは、あまりにもぼやかった画像や、あまりに細かな縞模様の画像では、両眼立体視が妨げられることを示している。そして、特定の空間周波数に対して処理を行うチャンネルが複数持ち、低い空間周波数に対する荒い処理から高い空間周波数に対する精緻な処理へと進み¹³⁾、両眼視差による奥行き知覚が成立していくと考えられている。

■参考文献

- 1) 繁増博昭, 佐藤隆夫: “書き割り効果のメカニズム,” 日本バーチャリアリティ学会論文誌, vol.10, no.2, pp.249-256, 2005.
- 2) 山之祐一, 奥井誠人, 岡野文男, 湯山一郎: “2眼立体画像における箱庭・書き割り効果の幾何学的考察,” 映情学誌, vol.56, no.4, pp.575-582, 2002.
- 3) 名手久貴, 須佐見憲史, 畑田豊彦: “多眼式立体ディスプレイにおける運動視差の効果について—運動視差による書き割り効果の改善—,” 映像学誌, vol.57, no.2, pp.279-286, 2003.
- 4) 江本正喜: “撮影・観察条件 内容: ひずみの要因と対応,” 平成21年度デジタルコンテンツの保護・活用に関する調査研究等補助事業 デジタル技術を駆使した映像制作・表示に関する調査研究報告書, 財団法人 JFK, pp.19-22, 2010.
- 5) 山之祐一, 湯山一郎: “立体映像における撮像条件と箱庭効果,” 信学技報, IE93-70, pp.51-58, 1993.

- 6) B. Gillam and E. Borsting : “The role of monocular regions in stereoscopic displays,” *Perception*, vol.17, no.5, pp.603-608, 1988.
- 7) 鈴木雅洋 : “両眼視における半遮蔽部分での両眼視野闘争の回避に眼球運動が及ぼす影響,” *心理学研究*, vol.73, no.3, pp.270-274, 2002.
- 8) “人に優しい 3D 普及のための 3DC 安全ガイドライン 2010 年 4 月 20 日改訂,” 3D コンソーシアム, 2010.
- 9) 石 康雄, 大塚作一, 金次保明, 吉田辰夫, 白井支朗 : “ステレオ表示における奥行き知覚ひずみとその防止法,” *テレビ誌*, vol.50, no.9, pp.1256-1267, 1996.
- 10) Neuman, R. : “Bolt 3D: a case study,” *Proc. SPIE, Stereoscopic Displays and Applications XX*, 7237, pp.72370F-1-72370F-10, 2009.
- 11) 松宮一道 : “両眼視野闘争研究の進展,” *VISION*, vol.14, no.4, pp.151-164, 2002.
- 12) 江本正喜, 三橋哲雄 : “立体画像における半遮蔽領域の知覚,” *テレビ学技報*, vol.20, no.7, pp.1-6, 1996.
- 13) C.M. Schor and I. Wood : “Disparity range for local stereopsis as a function of luminance spatial frequency,” vol.23, no.12, pp.1649-1654, 1983.

■2群-4編-5章

5-3 立体/3次元画像表示の基本的所用特性

5-3-1 表示システムと視覚機能

(執筆著者：矢野澄男) [2013年4月 受領]

(1) 立体視

奥行き知覚を与える要因は、よく知られているように絵画的な要因と生理学的な要因に大別される。絵画的な要因では、空気透視、線遠近法、肌理、色情報、陰影、重なりなどが挙げられる。しかしながら、これらを直接的に立体画像表示装置へ適用することは困難と思われる。一方、立体画像表示装置では、生理学的な要因が主に奥行き知覚を与えるために利用されている。そのなかでも単眼情報と両眼情報による場合に大別され、単眼情報では、ピント調節、運動視差が代表的で、両眼情報では、眼球輻輳開散運動、両眼視差、ブルフリッヒの振り子に代表されるような左右両眼に対応する画像の濃度差などが主要な要因となる。そのなかでも、特に、両眼視差が最もよく利用されていると言ってよい¹⁾。

奥行き知覚を得るためには、両眼視差に関しては、両眼融合が必要となり、奥行きが知覚される最小の両眼視差の値、あるいは、両眼単一視が成り立ち、二重像となる前の両眼視差の値、すなわち、両眼融合限界などは明らかにされている。融合限界は、いわゆる MTF (Modulation Transfer Function) を検討するような繰り返しパターンを用いた場合、時・空間周波数領域での融合限界は、空間周波数で 3 cpd、時間周波数で 30 Hz 程度である^{2),3)}。加えて、表示画像の物理パラメータ、例えば、表示面積、空間周波数などによっても両眼融合範囲は異なる⁴⁾。

一方、両眼視差に関わる両眼融合範囲内では、輻輳位置とピント調節位置が必ずしも一致するとは限らない。この現象は後述するが、このため、両眼融合立体画像では視覚疲労が生じると長く指摘されてきた。しかしながら、視覚疲労に関しては、実際には、左右両眼に対応する画像間の幾何学的、あるいは、電気的な特性の差異なども影響し、その要因の特定は、容易ではない^{5),6)}。

(2) 立体/3次元表示画像と視覚機能

表 3・1 に、立体/3次元画像と視覚機能の関わりを示す。表 3・1 では、表示方式と視覚機能のか関わりで、画質的要因、心理的要因、生理的要因に分類し、現在、ほぼ満たされている、あ

表 3・1 立体/3次元画像と視覚機能の関わり

像再生	Several Image Sources (複数像再生)		Light Field Reproduction (光線場再生)		Weve Front Reproduction (波面再生)
表示方式	両眼融合 立体画像	多眼立体 画像	超多眼立体画像 インテグラルフोटोगラフィ (水平視差)	インテグラル フोटोगラフィ (水平&垂直視差)	電子 ホログラフィ
画質的 要因	空間解像度	運動視差	垂直視差	視域	
心理的 要因	光沢感	視覚疲労			
生理的 要因	輻輳・調節				

るいは、満たされると思われる部分に関して、「黒太の線」で示した。以下、表示方法と要因種別の分類に従い概説を行う。

(a) 両眼融合立体画像

左右両眼に対応する画像を用いて、表示画像が奥行きを有する画像として受容されるためには、左右両眼の網膜に投影された画像が単一視される必要がある。この単一視の状態を前述したように両眼融合と呼んでいる。立体画像では、この両眼融合がなされて奥行きが知覚される。

両眼融合による立体画像の表示方法は2つに大別される。一つは、左右両眼に対応する画像の分離を光の性質を用いる方法であり、古くは赤と青の補色によるアナグリフ、偏光フィルタ、RGB 波長域内の分割フィルタ、液晶シャッタ（遮蔽/通過）などが用いられている。ほかのもう一つの方法は、左右画像の分離を光路による方法である。この方法では、画像表示パネルに加えて光学素子を用い、光学素子としては、レンチキュラーレンズ、あるいは、バラクスバリアが代表的である。前者では、比較的、高画質な立体画像を得ることができ、かつ、視域も広い範囲にわたって確保することが可能である。一方、後者では、光学系の設計にもよるが、高画質な立体画像を得るために高い技術レベルを要求され、前者に比べて装置自体も複雑となる。また、画像表示に1枚の表示パネルを用いると水平解像度は1/2に低下する⁷⁾。

左右両眼に対応する画像を光の性質で分離することによって供される立体画像は、高画質で視域の制限も少ないことから、各種の方式が考案され、既に映画産業では実用化されている。しかしながら、両眼融合可能な範囲にすべてにわたって、奥行き画像が表示されているわけではない。一般に、この種の立体画像を観視する場合は、輻輳位置はスクリーン前後にあるが、ピント調節の位置は、被写界深度を含むスクリーン前後にある。本来、輻輳位置とピント調節位置は、クロスリンクもあり、同位置にあることが望ましく、乖離は視覚疲労になる可能性が高い。したがって、視覚疲労を避けるためには奥行き表示範囲は、輻輳位置とピント調節位置が乖離しない範囲にとどめることが望ましく、比較的小さな両眼視差が供されている。その視差の値は、HDTVを立体画像に適用すれば、1度、3%（表示画面幅に対して）、0.3D（D：Diopter）と言われている⁸⁾。

また、当然であるが、左右両眼に対応する2枚の画像のみによる表示のために、視点位置の移動に伴い、新たな位置からの画像が観視されるわけではなく、むしろ、表示画像の歪みとなって知覚される。これは、広義には、運動視差の再現がないと言える。加えて、撮像・表示の幾何学的な不一致によって表示画像が書き割り・箱庭効果というように不自然に知覚されることが多い。

(b) 多眼立体画像

多眼立体画像の表示は、基本的には n 視点からの画像を用意し、表示パネルに n 視点の画像を表示し、光学系により表示スクリーン前に n 視点の結像点を置き、表示された n 視点内の2点对応して左右の瞳孔を置くことによって奥行き画像を観視する。光学素子としては、レンチキュラーレンズ、バラクスバリアなどが用いられることが多い。このため、水平解像度は1枚の表示パネルであれば、 $1/n$ に低下する。このことを防ぐため、プロジェクタ1台に対して1視点とする画像を用意し、すなわち、 n 視点では n 台のプロジェクタレイによる画像投影を行えば、解像度の低下はない。また、視域、特に水平方向は視点数に依拠することになり、視点数が多いほど、定性的には視域の拡大が見込まれる⁹⁾。

一方、視点数が少ない場合、視点移動に伴い、所用の視点数での繰り返しで像が再生される

が、所用視点数の両端では、左右画像の左右が逆に左右両眼に投影されることになり、偽立体像と呼ばれる現象が生じる。視点数の増大は、視域の拡大のみならず、偽立体が知覚される割合を減ずることにもなる。

多眼立体画像では、視点移動に伴い、新たな視点位置からの画像の観視が可能となり、立体画像のような表示空間の歪みを知覚することなく、運動視差の再現が可能である。しかしながら、視点間隔が広いと画像の滑らかな変化を知覚できなく、視点移動に伴い像が不連続に変化し、フリッピングと呼ばれる現象が生じる。フリッピングを防止するためには、瞳孔間隔程度に視点を配すればよいが、実験的な検討に基づけば、視点間隔は数ミリ程度が必要と言われている。ただし、視点間のクロストークを許容すれば更に低下する可能性が指摘されている^{10),11)}。

また、両眼融合による立体画像では、見かけの解像度の向上が明らかにされているが、多眼立体画像では、同様に解像度の向上が指摘され、より積極的に光沢感など評価が行われ、その優位性が確認されている¹²⁾。

多眼立体画像は、両眼融合立体画像に比べて、視点数の配置に留意すれば、運動視差の再現が可能となり、魅力的な画像表示方法ではある。しかしながら、視点位置を固定して観視する場合は、両眼融合立体画像の知覚そのものであり、前述した輻輳・調節の乖離が視差の大きい奥行き再現の場合生じることになる。ところで、この視点数を極端に多くし、少なくとも瞳孔内に2つ以上の視点を配する画像再生方法を超多眼立体画像と呼んでいる。この場合は、輻輳・調節の乖離が生じないか、あるいは、少なくとも被写界深度の増大が見込まれることは確認されている。加えて、高い視点密度からも良好な運動視差の再生が可能であると推測される¹³⁾。

(c) 3次元画像

実世界では、物体の一点からは、あらゆる方向に光が放出されている。しかしながら、3次元画像の表示に際しては、視域に相当することになるが、このあらゆる方向をある一定の範囲に限り、更に、この一定の範囲を光線で離散的に分割するような画像再生方法が3次元画像表示の原理となり、**Light Field Reproduction** と呼ばれる。この場合、ある一定の範囲内を分割光線数で除した角度は角解像度と呼ばれ、3次元画像の解像度を規定する重要な値である¹⁴⁾。

このような3次元画像の具現化方法としては、インテグラルフォトグラフィがよく知られている。インテグラルフォトグラフィは、光学系として、凸レンズアレイを用い、表示パネルに各々の凸レンズに対応して n 水平方向、 n 垂直方向から見た画像である要素画像を配する方式が代表的である。このため、水平、及び、垂直視差による画像再生が可能となる。しかしながら、水平、垂直が n 方向となることから、再生画像の解像度は表示パネルの解像度の $1/(n*n)$ となる。また、最大の水平解像度はレンズの水平方向の個数となり、垂直方向も同様である。一般には、要素画像からの画素からの光線の交点で再生画像を表示するために、角解像度の性質から光学面から離れるに従い、指数関数的に解像度の低下が生じる^{15),16)}。

一方、水平方向のみに視差を与える方法も提案されており、この場合は、光学系に水平方向のみに光を直進させ、垂直方向には拡散させればよいことから、代表的な光学素子にはレンチキュラーレンズが挙げられる。この場合の水平解像度は n 方向とすれば、解像度は $1/n$ の低下となる。また、表示画面から離れるに従い、解像度の低下の傾向は同様である。したがって、いずれの場合も光学素子と表示パネルの構成であり、多眼立体画像とは異なり、原理的には、アフォーカル光学系を構成していると言える¹⁷⁾。

インテグラルフォトグラフィの視域は、ある一定の範囲に限って再生すると考えると述べた

が、基本的には、これは光学系の射出角で決められる。このため、焦点距離の長い凸レンズを用いると、視域は狭いが、光学系から離れるに従い低下する解像度の低下は免れる。逆に、焦点距離が短いと視域は広いが、解像度の低下は速い。

Light Field Reproduction を原理とする 3 次元画像では、その原理から、輻輳・調節の乖離は少ないとされるが、まだ、多くは検証されていない¹⁸⁾。また、水平方向の視差のみの場合では、数は多くはないが測定例もあり、少なくとも、両眼融合立体画像よりは広い被写界深度があることが確認されている¹⁹⁾。当然ではあるが、この画像表示系では垂直方向からは、この特性は消失する。また、結像系による画像表示でないことから、良好な運動視差は、それぞれの再生方法に依拠しながらも、確保されている。ただし、現状では、両眼融合立体画像のように実用に供する画質には達していない。

以上、立体/3 次元画像の代表的な例をあげ、その装置の概略とそれに関わる視覚機能との関わりを概説した。基本的には、立体/3 次元ディスプレイは奥行きのある実在の世界を表示するための努力が続けられているが、視点をかえれば、これらは、表示、撮像装置に関して奥行き知覚を中心とする人間の視覚機能への高い整合性を求める画像システムの研究開発と捉えることも可能である。

なお、本稿では、最も理想的と言われる 3 次元ディスプレイであるホログラフィ、あるいは、3 次元画像が表示可能なボクセル型ディスプレイや関連する表示装置には言及していないので、これらに関しては他書を参考願いたい。

■参考文献

- 1) 原島博(監修)：“3次元画像と人間の科学,” オーム社, 2000.
- 2) 矢野澄男, 鈴木健一：“動視標に対する両眼融合特性—両眼融合可能な最大域と眼球運動—,” 電子通信学会論文誌 D-II, vol.J74-D-II, no.3, pp.303-310, 1991.
- 3) 矢野澄男, 三橋哲雄：“両眼融合視での奥行き運動知覚と時間周波数特性,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J76-A, no.6, pp.887-897, 1993.
- 4) 矢野澄男：“両眼融合可能な視差の範囲—視標の大きさと空間周波数の変化に対する検討—,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol.J-75-D-II, no.10, pp.1720-1728, 1992.
- 5) 比留間伸行, 福田忠彦：“調節応答から見た両眼融合式立体画像の観視条件,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J73-D2, no.12, pp.2047-2054, 1990.
- 6) S. Yano, M. Eomoto, and T. Mitsuhashi：“Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images,” DISPLAYS, vol.25, no.4, pp.141-150, 2004.
- 7) 泉 武博(監修)：“3次元映像の基礎,” オーム社, 1995.
- 8) W.J. Tam, F. Speranza, S. Yano, K. Shimono, and H. Ono：“3D-TV and Visual Comfort,” IEEE Trans. on Broadcasting, vol.57, no.2, Part 2, pp.335-346, 2011.
- 9) S. Iwasawa, M. Kawakita, S. Yano, and H. Ando：“Implementation of autostereoscopic HD projection display with dense horizontal parallax, Paper 7863-27, IST/SPIE Electronic Imaging 2011, Stereoscopic Displays and Applications XXII, 2011.
- 10) S. Pastoor and K. Schenke：“Subjective Assessments of the resolution of viewing directions in a multi-viewpoint 3D TV system,” Proceedings of the SID, vol.30/3, pp.217-222, 1989.
- 11) F. Speranza, W.J. Tam, T. Martin, and L. Stelmach：“Perceived Smoothness of Viewpoint Transition in Multi-Viewpoint Stereoscopic Displays,” SPIE, vol.5664, pp.72-82, 2005.
- 12) 坂野雄一, 安藤広志：“多眼立体ディスプレイにおける光沢感の心理物理学的評価,” 聴覚研究会資料, vol.40, no.2, pp.91-95, 2010.
- 13) 梶木善裕, 吉川 弘, 本田捷夫：“集束化光源列 (FLA) による超多眼立体ディスプレイ,” 3次元画像コンファレンス講演論文集, vol.1996, pp.108-113

- 14) T. Balogh, P.T. Kovacs, Z. Dobranyi, A. Barsi, Z. Megyesi, Z. Gaal, and G. Balogh : “The holovizio system - new oppatunity offered by 3D displays,” Proceedings of the TMCE 2008, pp.1-11, 2008.
- 15) H. Hoshino, F. Okano, H. Isono, and I. Yuama : “Analysis of resolution limitation of integral photography,” J. Opt. Soc. Am. A, vol.15, no.8, pp.2059-2065, 1998.
- 16) 矢野澄男 : “最新の 3 次元ディスプレイ技術,” 視覚の科学, vol.31, no.1, pp.3-11, 2010.
- 17) K. Kudo and Y Takaki : “Three-dimensional interactive processor which processes 64 directional images,” Proc. SPIE, vol.5599, pp.16-23, 2004.
- 18) 日浦人誌, 矢野澄男, 江本正喜, 三科智之, 洗井 淳, 久富健介, 岩館祐一 : “インテグラル立体映像観察時の調節応答に関する一検討,” 映像情報メディア学会技術報告, vol.37, no.11, 3DIT2013-3, pp.3-6, 2013.
- 19) 福富史史, 名手久貴, 高木康博 : “高密度指向性画像で表示した 3 次元画像における調節応答,” 映像情報メディア学会誌, vol.58, no.1, pp.69-74, 2004.

5-3-2 視覚心理効果—臨場感と視覚疲労

(執筆者：清水俊宏) [2011 年 7 月 受領]

本節では、立体/3 次元画像によってもたらされる視覚心理効果と視覚疲労について概説する。立体/3 次元画像は、平面/2 次元画像に比べて奥行き情報が付加されたことから、より実世界に近い視覚情報が実物感や臨場感といった視覚心理効果を与える。一方、実体視と立体/3 次元画像との視覚情報の差異が視覚疲労の新たな要因ともなっている。なお、高臨場感映像によって生じる動揺病などの不快感については、平面/2 次元広視野画像でも生じることから本節では扱わず、立体/3 次元画像に特有の視覚疲労に限定して述べることにする。

(1) 広視野画像と臨場感

自分が移動しているときと同様な視野全体に及ぶような動きの画像によって生じる身体の移動感覚は、自己運動感覚 (Vection) といわれ、視野による自己運動感覚への影響に関する多くの研究がある^{1)~7)}。これらの実験で用いられている視覚刺激は、2 次元画像ではあるが、3 次元空間上での運動感覚を生じさせている。周辺視野と中心視野への視覚提示の比較による自己運動感覚の差異について調べた研究では、内側に縦縞模様の描かれた円筒状のドラムの中心に観察者を座らせ、ドラムを回転させることで観察者に椅子に座って自転しているような運動感覚 (自己回転運動感覚 : Circular Vection) を生じさせている⁶⁾。このとき、観察者の視野を制限して自己運動感覚の強さを主観評価によって測定した結果、視野周辺部の運動刺激が中心部の運動刺激よりも自己運動感覚には支配的であることを示した。

一方、視野中心部のみでの刺激では自己の運動ではなく、対象物体の動きとして知覚される傾向にあることも明らかにしている。また、身体が前進もしくは後進運動したときと同様の広視野動画像を提示することで自己直線運動感覚 (Linear Vection) を生じさせ、これを観察者の姿勢変化によって定量化することで自己運動感覚を他覚的に測定した研究がある⁷⁾。自己運動感覚に関するこれらの実験結果は、観察者が広視野画像の中の空間を実空間 (自身の存在している実際の空間) と認識 (空間認知) し、自己の姿勢を画像空間の座標軸に適応させようとしたことを示すものである。このときに観察者が感じている感覚を臨場感や没入感の一つと解釈することができる。

臨場感を定量化する試みとしては、傾けた 2 次元広視野画像を提示したときの観察者の主観的な垂直方向と実際の垂直軸とのずれを測定した心理物理学的な研究がある⁸⁾。立体画像を対象としたものとしては、身体重心位置の時間変動である重心動揺を姿勢制御系の反応として測定することで視野と空間認知との関係について調べた研究がある⁹⁾。この実験では、前額平行

面上で提示画像の中心を回転軸として反復回転運動させ、観察者の姿勢制御を誘導し、重心動揺をフォースプレートで測定した。視覚刺激として奥行き方向の飛び出しによる縦のラインの動きとともにランダムドットのオプティカルフローが知覚されるランダムドットステレオグラムと、ランダムドットのオプティカルフローのみが知覚される2次元画像刺激を用い、表示画角を変えて半球ドームスクリーン上に提示した。

図5・1に、立体画像提示と平面画像提示の場合の左右方向の重心動揺パワースペクトルを示す。両画像刺激共、広視野では視覚刺激の反復回転周波数と同じ周波数成分にローカルピークが生じている。表示画角110°になると、ローカルピークの鋭さが増加し、広視野立体画像が観察者の姿勢制御に強い影響を与えていることを示している。広視野での立体画像と平面画像を比較すると、立体画像の方が平面画像よりもローカルピークが鋭くなっている。単眼の情報としては両刺激共同じものであることから、上述の実験結果は両眼視差による3次元情報が観察者の空間認知の過程で強い影響を与えたことを示唆している。

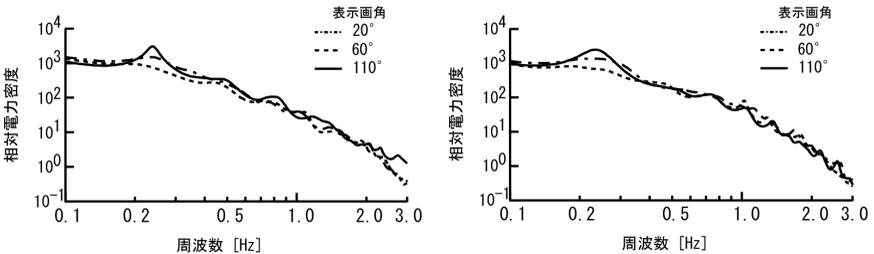


図5・1 反復回転する視覚刺激を提示したときの提示画角による重心動揺への影響⁹⁾

また、上述と同様の反復回転運動する広視野ランダムドットステレオグラムと、同期して音像の位置が半球ドームスクリーンの上周縁部を往復移動する聴覚刺激とを同時提示する実験を行った結果では、音像位置が視覚刺激と同相で移動する方が逆相で移動させた場合に比べて顕著な重心動揺への影響が確認されている¹⁰⁾。しかし、音像位置を移動させた聴覚刺激単独の提示では重心動揺への影響がほとんど見られず、更に視覚刺激単独による影響よりもはるかに優位であったことから、上記の実験結果は視覚と聴覚による効果が相乗的に重心動揺に影響を与えたことを示唆している。このことは、広視野立体画像と立体音響などを組み合わせた映像システムが臨場感に相乗効果を与えることを裏付ける一つの結果と考える。

(2) 両眼融合立体画像システムにおける視覚疲労

本来、立体/3次元画像視聴時や視聴後の視覚情報に起因する不快感と疲労感とを区別し、健康被害への影響の可能性と快適性に関する問題とを分けて議論する必要がある。しかし、両者を明確に区別できるほど解明が進んでいないため、本項では不快感と疲労感とを特に区別せずに扱うこととする。また、立体/3次元画像の視覚疲労で問題となるのは主に両眼融合立体画像であるため、いわゆる2眼式の両眼融合立体画像システムによって生じる視覚疲労について述べる。

両眼融合立体画像システムによって生じる視覚疲労としては、画像システムの特長差に起因するハード的な要因と両眼立体視そのものによって生じる生理学的な要因とに大別される。ハ

ード的な要因としては、左右眼に相当する2台の撮像系ならびに表示系から構成されるシステム特性に差がある場合、融像しにくくなることで視覚疲労につながると考えられる。左右画像の差としては、サイズ(画角)の違いや垂直方向もしくは回転方向のずれなどの左右画像の幾何学的な差¹¹⁾のほかに、輝度コントラストや色度などの画像信号の差がある。これらの特性差が極端に大きいと融像せずに二重像として知覚される。上記のハード的な左右画像の特性差については、3Dコンソーシアムから快適な視聴のためのガイドラインが示されている¹²⁾。

両眼立体視そのものによって生じる視覚疲労としては、立体画像観察時と実体視での視覚系の状態とが異なることに起因するものがある。一般的に知られている要因としては、輻輳と調節の不一致が挙げられる。実体視では、両眼の輻輳点の位置とピント調節の焦点の位置とが一致しており、視覚系では両者がリンクして制御されている。両眼融合立体画像システムを視聴しているときは、例えばディスプレイから飛び出した像を注視している場合、像の仮想的な位置に両眼の輻輳を合わせるが、焦点をこの仮想的な位置に合わせると網膜像がぼやけてしまうため、注視位置とは異なるディスプレイ面に焦点を合わせる必要がある。この輻輳点と調節点の位置の差が大きいと上述の輻輳系と調節系とのリンクに過度の負担となって視覚疲労につながると考えられている。輻輳と調節が不一致の状態でも快適に視聴することが可能な範囲(快適視域: Area of Comfort)についての報告がある¹³⁾。また、輻輳と調節の不一致が時間変化を伴うことで、より視覚疲労を増大させることが報告されている¹⁴⁾。このほかにも視差分布による影響、視差の時間変化(カット切り替えなど)などが視覚疲労につながると考えられている¹⁵⁾。

■参考文献

- 1) 近江：“多層の座標系構造に基づく空間知覚—視覚誘導運動を例として—,” VISION, vol.3, no.4, pp.185-193, 1991.
- 2) A. Berthoz, B. Pavard, and L.R. Young: “Perception of Linear Horizontal Self-Motion Induced by Peripheral Visual-Vestibular Interactions,” Exp. Brain Res., vol.23, pp.471-489, 1975.
- 3) G.J. Andersen and M.L. Braunstein: “Induced Self-Motion in Central Vision,” J. Exp. Psychology, vol.11, no.2, pp.122-132, 1985.
- 4) M. Ohmi, I.P. Howard, and J.P. Landolt: “Circular Vection as a Function of Foreground-Background Relationships,” Perception, vol.16, pp.17-22, 1987.
- 5) I. P. Howard and T. Heckmann: “Circular Vection as a Function of the Relative Size, Distances, and Positions of Two Competing Visual Displays,” Perception, vol.18, no.5, pp.657-665, 1989.
- 6) T. Brandt, J. Dichgans and E. Koenig: “Differential Effects of Central Versus Peripheral Vision on Egocentric and Exocentric Motion Perception,” Exp. Brain. Res., vol.16, pp.476-494, 1973.
- 7) F. Lestienne, J. Soechting, and A. Berthoz: “Postural Readjustments Induced by Linear Motion of Visual Scenes,” Exp. Brain. Res., vol.28, pp.363-384, 1977.
- 8) T. Hatada, H. Sakata and H. Kusaka: “Psychophysical Analysis of the “Sensation of Reality, Induced by a Visual Wide-Field Display,” SMPTE J., vol.89, pp.560-569, 1980.
- 9) 清水, 三橋: “広視野立体画像の提示画角と姿勢制御系における空間認知機構の関係,” 信学論(A), vol.J80-A, no.6, pp.1014-1021, 1997.
- 10) 清水, 矢野: “広視野視覚刺激と聴覚刺激の同期提示による重心動揺への誘導効果,” 信学論(A), vol.J83-A, no.7, pp.912-919, 2000.
- 11) 山之上, 永山, 尾藤, 棚田, 元木, 三橋, 羽鳥: “立体ハイビジョン撮像における左右像間の幾何学的ひずみの検知限・許容限の検討,” 信学論(D-II), vol.J80-D-II, no.9, pp.2522-2531, 1997.
- 12) 安全ガイドライン部会: “人に優しい3D普及のための3DC安全ガイドライン,” 3Dコンソーシアム(3DC), 2010.

- 13) A. Percival : “the Relation of Convergence to Accommodation and its Practical Bearing,” *Ophthalmology Rev.*, vol.11, pp.313-328, 1892.
- 14) M. Emoto, T. Niida and F. Okano : “Repeated Vergence Adaptation Causes the Decline of Visual Functions in Watching Stereoscopic Television,” *J. Display Tech.*, vol.1, no.2, pp.328-340, 2005.
- 15) 野尻, 山之上, 花里, 岡野 : “位相相関法を用いた立体ハイビジョン映像の視差量測定と見やすさについて,” *映情学誌*, vol.57, no.9, pp.1125-1134, 2003.