講座 誰にでもわかる3D 第1回

基礎1：空間立体視の手がかりとは？ ～2D映像から3D映像へ～

(正会員) 畑田豊彦†

1. ま え が き

平面に映し出される2D映像技術は、「…を見たい」という要望に応じて、その表示性能を向上させてきた。静止画から動画(映像)へと時間変化を再現し、濃淡から色彩がある映像、より実物感のある高精細映像、さらに、臨場感溢れる大画面映像へと展開してきている。その時々、見たい要望に関わる視機能(視力や明暗・色弁別など)を満足させることで、新しい魅力を提供してきた。しかし、高画質で臨場感のある2D映像が実現されても、奥行き方向の空間、特に表示面から飛び出す空間を再現することは難しく、両眼情報を提示する3D映像技術*¹を利用しようとする動きが出てきた。

このような3D映像は、大画面表示を実現する以前から、幾度となくチャレンジされてきた。しかし、初期のものは極端に飛び出すビックリ効果を強調した映像が多く、2D映像から3D映像への向上による魅力を定着できなかった。それに加えて、両眼視差による2眼式3D映像では、実空間を見ている状態と比べて、特定方向からの空間しか見えないことによる不自然さ、視機能のうち調節・輻輳間のアンバランスや再現立体効果の不安定さによる視覚への負荷が問題視されていた。そのため、長時間制約の少ない状態で見たい映画、テレビではしばらく忘れられた技術であった。

ところが、映像技術の急速な進歩により、人間の空間立体視に関わる映像情報を無理なく提示できるようになり、理想的な空間再現への各種方式(図1)も示されて、より自然な3D映像を提供するための再スタートがきられたのが

現状である^{1)~3)}。

本講座では、図1に示した各種方式の特徴に関して詳説されることになるが、初回では、2D映像から3D映像への拡張による空間再現効果と人間の空間立体視の機能との関係を示し、自然な3D映像表示技術と魅力ある映像表現内容を導き出す要求条件を整理してみる。

2. 生活行動から生まれる空間立体視

多くの動物は、視覚・聴覚・触覚などの感覚系から得た複合情報で、外界の状況を判断して生活している。高度な生活行動を行う動物では、視覚情報は重要で、ほとんどが両眼を備えている。その両眼による空間立体視は、左右眼の位置(瞳孔間距離)、両眼にできる微妙な物体像の違い(網膜像差)、両眼で同時に見える範囲(両眼共通視野)と眼の動き(注視運動と輻輳・開散運動)が主な機能である。しかし、空間立体視は両眼視だけに留まらず、身体の動き(観察位置移動)、手などによる操作動作と関連して発達するのが通常である。

さて、このうち両眼位置と視野について、ウサギとネコを例に比べてみると、図2のように、生活行動により空間情報の利用状況が大きく異なっていることがわかる⁴⁾。ウサギのように、生活行動が守備型の(草食)動物は見える範囲をパノラマ的に拡げて外敵から身を守っている。ネコのように、動的对象を獲得する積極的な動作を伴う攻撃型の(肉食)動物では、両眼立体視が効果的に利用できるように、両眼共通視野が広くなり、対象を注視する両眼運動や注視点前後の奥行き検出機構(注視位置の決定や両眼視差成分を検出する両眼性細胞)も形成される。

人間の場合は、さらに高度な手作業を行うために、手足などの行動器を巧妙に作動させる大脳(認識系)と小脳(運動系)による中枢制御機構も大型・高性能化しているが、生活行動は緩やかな動きで、手の届く近距離から歩行移動の範囲を中心に空間立体視が機能している。ただ、強い好奇心と素晴らしい創造力を持つ人間は、スピードのあるスポーツを楽しみ、鳥のように高速で地上から脱出できる乗

*1 3D映像：両眼視差による立体映像と、調節・多方向観察などの立体視要因も再現できる3次元映像は区別してきたが、この度の2眼式立体映像ブームでは、3D映像という総称的な表現が用いられている。厳密な空間再現状態を定義している訳ではないので、今後、新方式の実用が進むと、形容詞付きの3D映像が出現することになる。

† 東京眼鏡専門学校

"3D That Everyone Understands (I): Cues of Stereoscopic Vision and Space Perception?; from 2D-image to 3D-display" by Toyohiko Hatada (Tokyo Optometric College, Tokyo)

図1 空間立体視要因から見た3D映像の各種表示方式

図2 両眼立体視と生活行動

両眼立体視は、両眼位置+中枢構造+生活行動(守備・攻撃型)によって変化し、両眼共通視野が広い動物では、両眼からの情報を処理する両眼性細胞(図右側)も多くなり、注視動作(眼球運動)・注視点前後分別・視差量検出を分担処理し、精度良い空間知覚を実現している。

図3 人間の空間知覚機構と空間立体視要因

空間知覚に関わる単眼・両眼要因、両眼に生じる視差情報の検出処理機構モデルと視差発生部近傍での情報処理、主要な空間立体視要因とその作動距離範囲を示す。

り物を作り出して、生活行動範囲を拡張してきた。これら早い動きや遠い距離の対象にも、訓練によって、視機能が対応できるようになることが知られている。

このような訓練や慣れによって、新しい空間立体視を形成して行く過程は、これまでの2D映像を楽しんでいた状態から、映像空間に入り込んだ印象を受ける大画面映像や、飛び出し効果のある3D映像空間を見るようになる過程とも関係してくる。

例えば、2D映像では対応できていた高速移動の映像表現が、3D映像では奥行き方向の動きに対する慣れが成立せず、違和感や不自然な印象を引き起こすことになる。自然で見易い3D映像を作り出すためには、映像を観察する構えが受動的か能動的か、安定して見える奥行き空間の歪み許容条件、動刺激に適応できる時間特性などを考慮して、人間の空間立体視に含まれる単眼・両眼要因の作動範囲、要因間の優位性や相互作用などを調べておくことが重要である。

3. 人間の空間立体視における各種要因

人間の空間立体視に寄与する要因(図3)には、片眼だけの視覚情報でも空間状態を知覚できる単眼要因と、両眼からの情報を必要とする両眼要因に分類される。ただ、ここでは、視覚情報の入口である眼球から空間知覚が成立する

中枢レベルまでの情報伝達路の概略を示し、高次中枢における空間情報処理機構(網膜から中枢視覚野への情報投射後に、特定情報の抽出処理、他感覚情報との統合、行動系への指令処理など)^{5), 6)}に関しては省略してある。

3.1 単眼による空間知覚要因

単眼要因には、次のような要因がある。映画やテレビなどの2D映像では、これらの要因を巧みに組合せて、奥行き感のあるシーンを作り出している。

- (1) 明るさ、大きさ・パターン(特徴点)密度 → 線透視
- (2) コントラスト・ボケ(調節変化) → 鮮鋭度 → 空気透視
- (3) 色 → 見掛けの大きさ、収差による見掛けの視差
- (4) 重なり合い → 遮蔽による前後判別 → 半遮蔽部分発生
- (5) 陰影 → 照明光源位置の習慣性
- (6) 画面構成(視野) → 空間の異方性(上下位置と遠近感)
- (7) 動き → 運動視差(時系列視差, 対象の動きと観察位置移動) → 移動状態の2D映像から視差成分を抽出して3D映像が作成できる条件

これらの要因のうち、調節、視野と注視動作、観察位置移動に伴う像変化(運動視差)には生体機能が関与するが、他の要因は視機能が発達する過程での体験などから形成されるため、各要因間の優位性は再現空間距離によって変わる。調節を除く単眼要因は、100m以上の遠距離範囲でも

図4 2眼式立体表示観察時での輻輳-調節応答

視差に応じて輻輳が発生し、調節も誘発される。時間経過により、調節位置は表示面の被写界深度内に戻すが、実空間観察時の輻輳-調節反応より、不安定な状態が続く。

効果的に働くが、単眼による近距離の立体感は、両眼視の再現空間と比べると、1/10程度しか得ることができない。

3.2 両眼による空間知覚要因

両眼立体視の要因は、前後配置された物体を注視する際に見られる眼球運動成分(輻輳/開散)と、両眼の網膜上にできる像の差成分(視差)で、このうち、左右眼から見る方向の差(parallax)と左右眼の網膜像の差(disparity)は、共に(両眼)視差として表現される場合が多い。両眼要因は単眼要因に比べ、数10m以内の中距離範囲で効果的に働き、前後差弁別も優れている。

(1) 輻輳/開散

両眼で物を注視する際、左右眼が連動して、内向き(輻輳)・外向き(開散)に動く状態から、対象までの絶対距離を知る要因となる。単眼要因の(2)を引き起こすピント調節と関係し、近くを見る時の輻輳によって調節を誘起する作用は強く、遠くを見る場合には少なくなる。一般に、調節と輻輳の相互作用は輻輳が優位で、反応も輻輳の方が調節よりも先行して生じる。実空間では、両機能は同じ距離を見るように作動するが、2眼式3D映像では、視差によって、輻輳と同時に、調節も誘発されて表示面から離れた位置にピント調節する。ただ、しばらくすると、網膜像のぼけが気にならない領域(被写界深度内)に調節が戻る様子⁷⁾(図4)が計測されており、輻輳-調節の不安定な状態が続くと、眼への負荷を生じさせることになる⁸⁾。

近見時の輻輳-調節の作動状態から20cm以内の近距離では眼への負荷が大きくなる。一方、遠見時には両眼間距離(日本人の平均は63mm、分布範囲は50~70mm)よ

りも大きな視差量を提示すると、開散運動では両眼情報が融合できない状態になる。大画面での2眼式3D映像観察時や両眼間距離が狭い幼児や女性では注意する必要がある。

(2) 両眼視差

左右眼の網膜にできる像のズレ(網膜像差)が物体相互の前後間距離を知る情報になる。この網膜像のズレを検出する場合、安定して知覚できる範囲が存在する(図5)。微妙な前後差を検出する立体視力は最小視差検出能力を示し、2D映像の適正観視距離を決める視力(1分視角)よりも、約1/50の高精度で両眼網膜像のズレを検出している。前後に離れた物体を同時に安定して見えるためには、両眼情報を融合して単一の像として見える両眼融像領域がある。網膜中心部では1°以下と狭く、周辺部になると数度に拡がり、脳でも、網膜からの像情報が投射される視覚野(V1)では±1度程度の範囲であるが、行動中枢系へ伝達する連合野(MT)では5°に拡がり、広い実空間での安定した空間立体視が確保できる機構⁹⁾になっている。この融像領域は、静止刺激より急激に変化する刺激では1/3~1/8に狭くなることから、3D映像では動きの早い奥行き変動は、2Dの場合よりも緩やかに変化させることが要求される。

この両眼視差に関連して、実空間を両眼で見る時、前方の物体で後方の物体を遮蔽(単眼要因の(4))する部分には、左右片眼だけから見える半遮蔽部分(図6(a))が発生する。また、物体間の視差の勾配が急になると、不安定な見え(図6(b))が生じる。このように、両眼視差発生部分近傍の非対応部分では、不安定な見え方^{10)~12)}が生じる筈であるが、実際には余り目立つことはなく、これは部分的な

図5 両眼網膜像差(視差)の検出・融像域と検査図形

両眼立体視が成立する条件として、微妙な視差検出(立体視力)と、単一立体像として融像できる視差量(融像域)を調べる必要がある。検査図形例を示すが、実際には複数図形内から浮き沈みを判別させ、その視差量から立体視機能を調べる。

図6(a) 半遮蔽部分の見え

背景の半遮蔽部分に、周囲と異なった強い刺激があると、不安定に見える。実空間では、微妙な視点移動、前後位置によるボケや抑制などで目立たなくしている。

図6(b) 視差勾配による奥行き見え方

図左側の3枚の組図形は、平行・交差で裸眼立体視する図形で、視差分布状態が急激に変化する最下図(視差特徴点が近接する場合)では、両眼立体視が不安定になる。

抑制作用や観察位置移動による平滑化などで説明されている。ただ、2眼式3D映像では、半遮蔽部分に大きな情報差が存在する場合や急激な視差勾配部での不安定な見え方を防ぐ映像処理や、単眼要因と両眼視差とのバランスにも注意する必要がある

3.3 両眼立体視機能の発達と検査法

空間立体視の中心になる両眼視機能は、生後3ヵ月頃から発生し始め、対象を注視する動作や這い回りなどの移動動作から、触覚・体性感覚(皮膚感覚や運動・位置感覚など)と連動して、1歳中頃から5歳位までの間に完成される。

図7 2眼式立体表示での書き割り、箱庭効果の撮影時の発生条件

撮影時のカメラ方向が平行状態では空間非線形歪みは生じないが、カメラ間隔や画角の変化で再現空間が伸長/圧縮して見える。交差状態では、映像自体に台形歪みが生じるとともに、カメラ条件により、ある距離以上では距離が圧縮して再現される書き割り効果、背景と前景間が伸長して前景の大きさが小さく感じる箱庭効果が発生する。

この発達過程で、両眼の視力差や注視動作に異常が発生すると、斜位・斜視^{*2}になり易く、視線ズレが5度以上になると、両眼立体視も充分に働かなくなる場合が出てくる。

このように、両眼視差による立体視機能が正常に発達しないこともあり、2~4%の人が奥行き弁別ができない。さらに、ランダムドットステレオグラム^{*3}では10~15%の人が凹凸を知覚できず、20%近い人が見難いと訴える。ただ、両眼視機能の発達後も、単眼情報だけで空間配置や距離知覚能力が形成されるため、日常行動では気付かない人も多い。

しかし、主に両眼視差だけで立体を感じさせる2眼式3D映像では、空間立体視が充分に働かない人もいることに留意する必要がある。実際、自分の両眼立体視機能に関しては、普段チェックする機会が少ないため、両眼で同時・単一像に見えることを確認し、両眼視差の検出能力、両眼位置のバランス（眼位）を調べるテスト図形や立体映像効果が

比較できる標準立体映像を準備することは、3D映像に対する誤った印象を与えないためにも大切である。

4. 2D映像と3D映像(2眼式)による空間再現効果

映像を楽しむテレビ・映画では、これまで単眼情報だけで奥行き空間を感じさせる「2D映像の空間効果」から、両眼情報による「3D映像の空間効果」に向けて、高忠実映像技術の開発が進められている。

4.1 2D映像による空間再現効果と今後

視機能の弁別特性を満足させることで、「実物感」、「距離・奥行き感」、「拡がり感」を感じさせる空間再現効果を実現してきた2D映像は、これまでの通常視力の分離閾（1分視角）の5~10倍以上にもなる細かなズレも識別する副尺視力を満足させる超高精細映像、触感をも感じさせる質感のある高品質映像、ちらつきもなく自然で滑らかな動きが再現できる安定映像、より強い臨場感を感じさせる大画面映像の実現に向かって、更なる性能向上を目指している。これらの効果を高めるために共通している表示条件としては、映像の表示面を感じさせない状態を作り出すことであり、3D映像表示に際しても充分検討すべき条件である。

*2 斜位・斜視：注視時には正常であるが、片眼遮蔽時には左右眼の方向がずれる状態を斜位、注視時でも左右眼の方向がずれている状態を斜視と言い、ズレ角が大きいとプリズム補正か手術が必要になる。

*3 ランダムドットステレオグラム：図形成分が知覚できないランダムなドットパターン内に両眼視差情報が含まれた領域を作り、両眼情報の相関だけから視差成分が検出できる機能を調べる。

4.2 3D映像(2眼式)による空間再現効果と改善策

現在の3D映像ブームでの主要な表示システムである2眼式3D映像では、これまで繰り返された苦い経験から、3D映像の魅力を引き起こす表示内容だけでなく、次に示すマイナス面に対する改善策が検討されている。

- (1) 箱庭効果(再現される対象の見かけの大きさが矮小化して見え、箱庭・盆栽、人形劇のように感じる効果)
- (2) 書き割り効果(再現空間内の物体の立体感が扁平化して見え、舞台背景などの書き割りやトランプカードのように見えることから、カードボード効果とも言う)

(1)、(2)の効果は、2眼式撮影(カメラ間隔、画角、カメラ方向平行-交差)や表示拡大率条件等によって、再現空間の距離歪みが発生すること(図7)¹³⁾が報告されている。平行法での撮影では、空間全体に距離の伸長-圧縮が生じるが、交差法では対象距離によって歪みの状態が変化することから違和感のある見え方になる。ただ、微妙な視差再現(解像度)不足や前後物体の相互作用(視差勾配)による書き割り効果の発生や、観察位置移動による歪み補正効果¹⁴⁾なども検討する必要がある。

- (3) 回り込み効果の欠落(対象物を移動しながら観察する時、実際空間では移動方向に応じた部分が見えるが、2眼式3D映像では特定位置からの映像しか再現できないため、観察者の移動方向に追従して逆向きの動きや不自然な揺れを感じる)

立体観察できる領域を拡張するために、多方向からの映像情報を提示する多眼方式が要求される。

- (4) 張り付き効果(額縁効果とも言われ、立体再現される対象が画枠などで見切られると、左右眼への映像に違う部分(半遮蔽状態)が生じ、不安定な見え方(視野闘争)や、対象が画枠に張り付いて立体感が抑えられて変形したように見える効果)

画枠と立体再現空間を分離した状態や表示面を感じさせない状態にするために、仮想画枠(表示面と画面制限枠を異なった位置に見せる状態)の設定、大画面表示(枠の存在を弱め、表示面位置を不確定な状態にする)、空中像(表示像を空中に形成させ、再現空間が表示面に固定されなくなる)や体積表示方式(多層表示面や像面移動などで実像空間を形成する)などによって改善される。

- (5) 調節-輻輳矛盾(両眼視差量を大きくして、表示面位置より極端に離れた奥行き位置に立体像を表示すると、図4のように、輻輳とそれに誘発されたピント調節の位置が表示面位置よりずれ、実際空間を観察する場合の輻輳-調節位置と比べると、両機能のバランスが不安定で、長時間の観察では眼への負荷が生じる)

この不安定さを解決するためには、表示面からの奥行き表示位置を被写界深度内になる視差量に調整するか、微妙

な観察位置移動や眼のピント調節にも対応できる超多眼方式(瞳孔径内に微小視差の複数映像)、空中像方式が効果的である。

- (6) クロストーク+左右映像の差(両眼への映像提示の分離度が良くなく、薄い二重像が見える場合と、撮影条件・表示性能などで左右映像に差が生じる部分が不安定な立体に見える状態)

映像差が大きい部分では、両眼映像が入れ替わって見える視野闘争が発生するが、その状態に至らない提示条件の許容値が調べられて、安定した3D映像製作条件の目標値(ガイドライン)¹⁵⁾になっている。ただ、この目標値は表示条件で変動するため、適用条件に注意する必要がある。

5. 3D映像(2眼式)による生体への影響

2眼式3D映像技術は、人間の持つ空間知覚要因のごく一部しか再現できていない上に、その立体空間効果を強調し過ぎた映像内容が過去において多用されたため、「不自然さ」や「違和感」、「眼への負荷(眼精疲労)」というマイナス面が目立ち、3D映像による「活動・積極性」や「体感・理解度」などの教育・訓練・創造分野でのプラス面を十分に引き出すことができなかった。

2眼式3D映像による生体への影響は、主観評価^{16) 17)}と客観評価(生体反応)により調べられている。2D映像に比べて3D映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、頭部中枢レベルでの血流状態を測定する光トポグラフィにおいて、3D映像観察時の脳内血流状態が、2D映像より増加する傾向が見られる。ただ、不適切なシーン構成の3D映像観察時の視覚反応から、視覚系への負荷を示す眼(精)疲労が引き起こされることも報告されている¹⁸⁾。

このように、生体への影響が強い3D映像のプラス効果を活かすためには、2眼式から多眼式3D映像への展開によって、マイナス面を改良するとともに、人間本来の行動特性と整合した双方向性情報システムによる、育成・訓練分野や、創造性を高める分野での実用化が今後期待される。

6. おすび

次回以降の講座で紹介される各種3D映像方式では、表示映像性能や微細加工技術の向上で、以前とは比べものにならない程、見易い3D映像が再現できるようになった。ただ、2D映像にない3D映像特有の表現内容や手法を生み出すことはかなり難しい課題ではある。

現状では、高画質・大画面が実現可能な2眼式3D映像により、これまで過大視され過ぎたマイナス面をソフト・ハード面から改善し、身近で体験できる情報端末を利用して、プラス面への展開が期待されている。

さらに、人間の生活活動を拡張させる環境参加型の映像

利用が進み、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映像」方式によって、実空間では経験できなかった生活行動空間が再現できるのも、それ程遠い夢物語ではないように思われる。

(2010年9月30日受付)

〔文 献〕

- 1) 高木康博：“将来の3次元ディスプレイと人のビジョン”，映情学誌，60，10，pp.1566-1573（2006）
- 2) B. Javidi, F. Okano ed.: "Three-dimensional television, video and display technology", Springer（2002）
- 3) 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）
- 4) 山内昭雄，鯉川武二：“感覚の地図帳”，講談社（2001）
- 5) 日本視覚学会編：“視覚情報処理ハンドブック”，朝倉書店（2000）
- 6) G.F. Poggio, T. Poggio: "The analysis of stereopsis", Ann. Rev. Neurosci., 7, pp.379-412（1984）
- 7) 渡部 勲，吉田辰夫：“立体表示視標に対する輻輳および調節応答”，NHK技術研究，23，pp.378-396（1971）
- 8) 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，34，12，pp.35-38（2010）
- 9) Y. Liu, A.C. Bovik, L.K. Cormack: "Disparity statistics in natural scenes", J. Vision, 8, 11, 19, pp.1-14（2008）
- 10) P. Burt, B. Julesz: "Modification of the classical notion of Panum's fusional area", Perception, 9, pp.671-682（1980）
- 11) L. Liu, S.B. Stevenson, C.M. Schor: "Quantitative stereoscopic depth without binocular correspondence", Nature, 367, pp.66-69（1994）
- 12) 鈴木雅洋：“両眼視における半遮蔽部分の消失と奥行き知覚の関係”，心理学研究，71-6，pp.486-492（2001）
- 13) 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，56，4，pp.575-582（2002）
- 14) 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，57，pp.270-286（2003）
- 15) 3Dコンソーシアム安全ガイドライン部会編：“3DC安全ガイドライン”（2010.4.20）
- 16) 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，57，9，pp.1187-1193（2003）
- 17) 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，17，2，pp.101-112（2005）
- 18) 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）

畑田 豊彦 1970年，早稲田大学大学院理工学研究科応用物理学専攻修了後，同大助手。1971年，NHK放送科学基礎研究所にて，ハイビジョンによる臨場感効果の研究。1981年より，東京工芸大学工学部教授に移り，眼光学系の像特性や両眼視機能の研究に従事。現在，東京眼鏡専門学校長，博士（工学），正会員。