立体画像の画枠が輻輳眼球運動に与える影響

Influence of the Frame in Stereoscopic Images on Vergence Eye Movement

学生会員 石樽康雄[†,††], 張 青[†], 正会員 大塚作一[†††],
金子寛彦[††], 正会員 臼井支朗[†]

Yasuo Ishigure[†,††], Jing Zhang[†], Sakuichi Ohtsuka[†††], Hirohiko Kaneko[††] and Shiro Usui[†]

Abstract When a scene is represented in a binocular stereoscopic display, depth distortions are perceived at the edges of the images in front of the screen. In our previous research (Ishigure et al., ITE, 1996), we showed that adding a virtual frame with a crossed disparity relative to the objects in stereoscopic images can eliminate the distortion. In the present study, we investigated how the depth distortion affects vergence eye movements and whether a virtual frame plays a role. The experimental results show: (1) when subjects perceive a depth distortion, the eyes converge to a point closer to the disparity of the screen than that of the object, (2) when the shape of the distorted object changes, convergence also changes, and (3) when the virtual frame has a crossed disparity, the point of convergence is located at the position indicated by the disparity of the object. The results indicate that presenting a stereoscopic image with an accompanying virtual frame prevents an undesired shift in convergence.

キーワード：立体画像，画枠，画枠ひずみ，バーチャルフレーム，輻輳眼球運動

1. まえがき

3次元画像は従来の2次元画像に比べ奥行き情報をより的確に再現することができる．なかでも2眼式立体画像（以下，立体画像）は，立体テレビ放送，医療，宇宙開発，教育，娯楽等の次世代映像情報メディアとして期待され，すでに一部では実用化が進んでいる．その理由として左右眼に対応する2枚の画像を偏光メガネや液晶シャッタメガネ等を用いて左右眼独立に表示する単純な方法で実現できることや，現行のテレビ方式にも簡単に適用可能なことが挙げられる．しかし，現在の立体画像には観察時特有の眼精疲労[1]や動揺病，知覚ひずみ[2]など，人間の視覚系に与える影響が同時に指摘されている．また，立体画像とは直接関係ない例であるが，以前にテレビ放送で発生した「ポケモンショック（光の点滅による異常な生理反応）」は，心理的な視覚効果を優先した光刺激が予期せぬ重大な生理反応を引き起こす場合があることを示した[3]．したがって，今後，立体画像を普及させるためには，このような問題点を心理・生理両面に渡り定量的に評価・検討し，人間工学的に優れた表示を行わなければならない[4)~6)]．

こうした問題のひとつとして，立体画像の画面手前に表示された物体が画枠付近で画枠に引き込まれるように奥行き方向にひずんで知覚される現象がある[7)~9)]．以下，この現象を「画枠ひずみ」と呼ぶ．画枠ひずみは，偏光方式や時分割方式の立体画像だけでなく，レンチキュラ方式などにおいても，画枠が存在する両眼立体視を利用した立体表示方式であれば必ず生じる現象である．我々は両眼立体視の心理的な側面からこの発生原因を明らかにし（詳細は後述），対処法としてバーチャルフレーム（以下，VFM: Virtual FraMe）という人工の画枠を画面手前に表示する方法を提案した[8]．**図1**は画枠ひずみとVFMの模式図である．画面手前の画枠付近に表示された物体は，図1（a）のように，画面に対して手前に知覚されるべきである．しかし，現在の立体画像では，同図（b）に示すように，画枠付近で奥行き方向にひずんで知覚される．我々の提案したVFMは，同図（c）に示すように，その遮蔽の効果により，ひずんだ物体（図1（b））をあたかもVFMの影に隠れているかのように正しい奥行きに知覚させることができる（付録参照）．

1998年8月26日，European Conference on Visual Perceptionで発表
1999年3月1日受付，1999年6月10日再受付，1999年7月5日採録
†豊橋技術科学大学 情報工学系
（〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1, TEL 0532-44-6764）
††ATR人間情報通信研究所
（〒619-0288 京都府相楽郡木津町光台2-2, TEL 0774-95-1064）
†††NTTサイバースペース研究所
（〒239-0847 横須賀市光の丘1-1, TEL 0468-59-2865）
†Toyohashi University of Technology
(1-1, Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi-shi, Aichi 441-8580, Japan)
††ATR Human Information Processing Research Laboratories
(2-2, Hikaridai, Kizu-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0288, Japan)
†††NTT Cyber Space Laboratories
(1-1, Hikarino-oka, Yokosuka-shi, Kanagawa 239-0847, Japan)

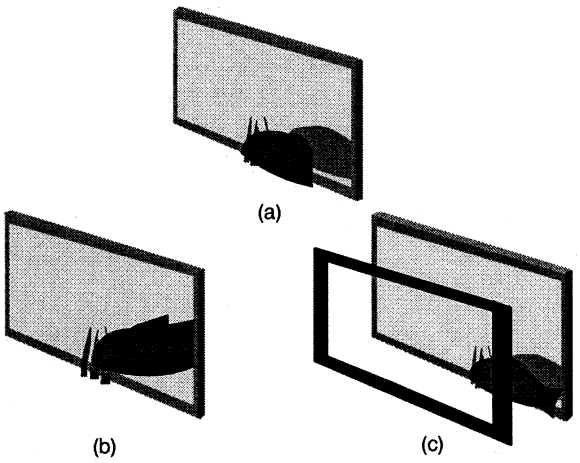


図 1　画枠ひずみと Virtual frame の模式図
A schematic diagram of a distorted image and the correction technique.

一方，視覚刺激に対する生理的な反応を調べる手段として眼球運動の測定が広く用いられており[12]，立体画像に関しては輻輳眼球運動（両眼の左右反対方向への動き）が有効な指標と考えられる．以下の例に示すように，画枠の存在や画枠ひずみと同様の現象に着目した生理的な研究が行われているが，画枠ひずみと輻輳眼球運動に直接関係する先行研究は見当たらない．まず，井上ら[13]は立体表示された刺激に対して画枠の存在と融合限界，輻輳眼球運動の関係について調べている．この研究では画枠の存在により融合限界は変化するが，輻輳眼球運動に大きな影響はないと結論付けている．この結果は，画枠ひずみが生じない刺激を用いて得られたものであり，画枠ひずみが生じる刺激を観察している時の輻輳眼球運動については検討されていない．また，大頭ら[14]は，凹面鏡ディスプレイについて画枠や実物体と焦点調節反応の関係を調べている．この研究は画枠の存在により焦点調節が引きずられることを指摘しているものの，画枠ひずみの生じない刺激が用いられており，画枠ひずみとの関係については言及されていない．桑原ら[15]は立体画像中に実物体を混在表示させ，画枠ひずみと同様な現象が生じた場合の融像特性を調べているが，実際に輻輳眼球運動などの視覚反応は測定されていない．他にも，円柱のリム（縁）注視時には画枠ひずみと同様に本来対応を取るべき点とは異なる対応点同士を融像する場合がある．これに対し，工藤ら[16]はリム注視時の両眼眼球運動を解析したが，リム注視時に重点を置いているため，面の内部や立体画像の画枠に関連した考察はなされていない．さらに，中田ら[17]は立体表示装置を用いた眼位記録装置の開発の際にも画枠が検査結果に影響を与えると報告している．

そこで，画枠ひずみの問題を心理的な側面と生理的な側面の両面から明らかにするために，本研究では，立体画像における画枠および画枠ひずみが輻輳眼球運動に与える影響を検討した[10][11]．以下，2章では画枠ひずみと実験計画について述べ，3章および4章では基本的な視覚特性を調べた実験について述べる．また，5章ではVFMの効果を調べた実験について述べる．

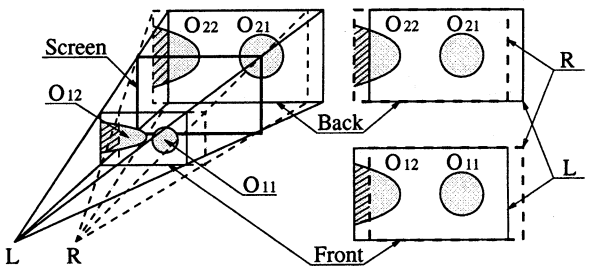


図 2　物体の奥行きと単眼領域
Relationship between object depth and monocular regions.

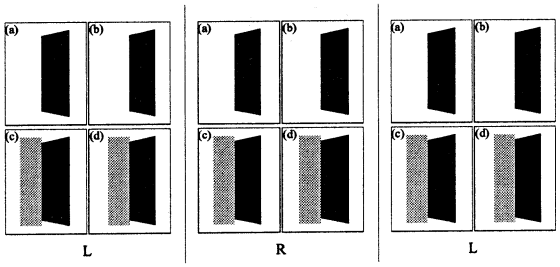


図 3　単眼領域と絵画的遮蔽の関係
Relationship between monocular regions and pictrial occlusion.

2. 画枠ひずみと実験計画

画枠ひずみを両眼立体視における対応問題の観点から捉えると，(1) 実世界の遮蔽条件[18][19]と画枠ひずみが生じる条件の単眼領域（視点の違いにより一方の眼には知覚される領域が他方の眼には知覚されない領域）は，異なる位置関係にある，このため，(2) 実世界とは異なる単眼領域の解釈を行うことができず，左右眼間で誤った対応を取るために画枠ひずみの知覚が生じると推定される[8]．

まず，**図2**に物体の奥行きと単眼領域の位置関係を示す．画面前後に提示される物体O_{11}やO_{21}は画枠に画像が切り取られておらず，左右画像の対応が取れるため単眼領域は生じない．しかし，これらの物体が画枠に切り取られる（O_{12}，O_{22}）と単眼領域が生じる．同図からわかるように，物体が画面奥に提示される場合（O_{22}）には右眼に単眼領域が生じる．この場合の遮蔽条件は実世界で起こる遮蔽条件と同じであり，被験者は単眼領域が存在しているにもかかわらず，物体を正しい奥行きに知覚できる．一方，物体が画面手前に提示される場合（O_{12}）には左眼に単眼領域が生じる．これは，実世界にはあり得ない現象であり，この場合，被験者は物体を正しい奥行きに知覚できず，傾いて知覚されたり，奥行きを特定できない場合もある．

次に，この理由を単眼領域と絵画的遮蔽の関係から説明する．**図3**のパネル（a）と（c）の台形は，左眼用画像の台形の左端に単眼領域が含まれている．また，パネル（b）と（d）の台形は，右眼用画像の台形の左端に単眼領域が

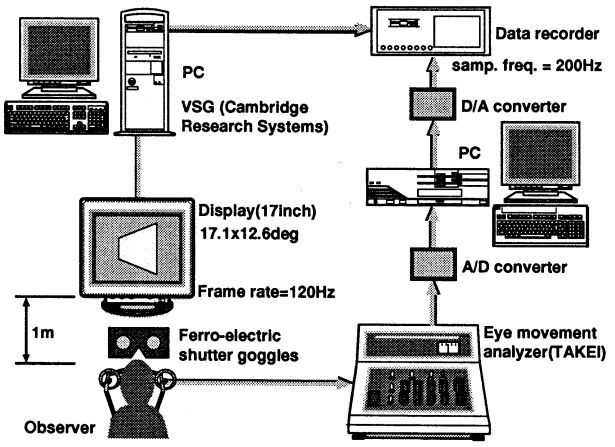


図 4　実験システム
Experimental apparatus.

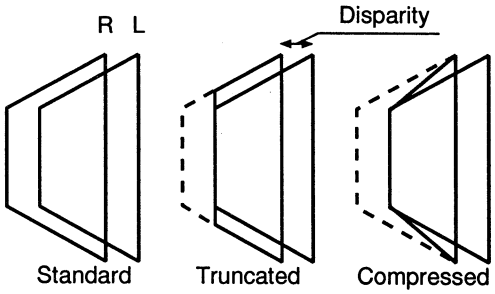


図 5　刺激条件の模式図
Comparison with truncated and compressed conditions.

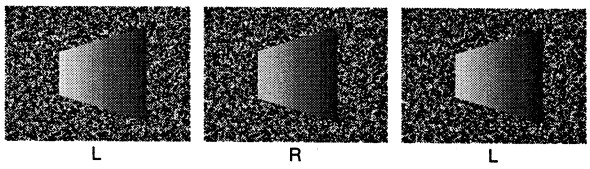


図 6　刺激の例（Truncated条件）
An example of stimuli (Truncated condition).

含まれている．上のパネル（a）と（b）には絵画的な遮蔽物（灰色の矩形）が含まれていないが，下のパネル（c）と（d）にはそれが含まれている．これらの図のうち（d）のみが実世界の遮蔽条件[18)19)]を満たしており，台形が前額平行面上に知覚される．しかし，実世界の遮蔽条件を満たしていない同図（a）（b）（c）の台形は奥行き方向に傾いて知覚される．

そこで，実験1では，このような画枠ひずみにより傾いて知覚される刺激と実在する故意に傾けた刺激を観察中の輻輳眼球運動を測定し比較することにより，画枠ひずみの輻輳眼球運動への影響を調べる．次に，実験2では，画枠ひずみが生じる刺激の形状を変化させた場合の影響を比較し，より一般的に画枠ひずみの輻輳眼球運動への影響を調べる．これらの結果を踏まえ，実験3ではVFMの効果を調べる．また，上記の実験1，2，3と同時に，輻輳眼球運動と知覚との対応関係を調べる．

3.　実験1 – 画枠ひずみの影響

3.1　目　的

実験1では，画枠ひずみにより傾いた面（Truncated条件）と幾何学的に正しい対応関係となる傾いた面（Compressed条件）を観察した場合の輻輳眼球運動を測定し，輻輳距離の比較を行うことを目的とした．

3.2　実験条件

図4に実験システムを示す．刺激は17inchのCRTディスプレイ（Iiyama社製，MT-8617E）にCambridge Research Systems（以下，CRS）社製のVisual Stimulus Generator（以下，VSG）を用いて表示された．ディスプレイのγ値は約2.56であり，画面の最高輝度（白色部分）は約117cd/m^{2}であった．被験者はCRS社製のFerro-electric shutter gogglesを通して視距離1mから画面上に表示された立体画像を観察した．有効画角は幅17.1deg，高さ12.6degであった．立体画像は，Ferro-electric shutter gogglesの左右眼用シャッタをフレームレート120Hzで切り替わる刺激提示画面と同期して開閉することにより，1台のディスプレイに時分割表示された．この時，左右眼各々のフレームレートは60Hzとなり，フリッカは観察されない[20)21)]．被験者は正常な立体視能力を有する（ランダムドットステレオグラムによる）ナイーブな2名（A，B）であり，被験者Aの瞳孔間距離は64mm，被験者Bは61mmであった．刺激観察中の被験者の眼球運動は強膜反射法（Sclera-reflection method）を用いた竹井機器製の両眼眼球運動測定装置（Talk eye）により測定された[22)]．両眼の水平垂直方向の眼球運動は同時に測定され，±3degの範囲でキャリブレーションすることにより，少なくとも0.15deg以上の眼球運動の検出を可能とした．測定された両眼眼球運動データとVSGからの刺激トリガはディジタルデータレコーダ（TEAC社製，DR-M3）により記録された．サンプリング周波数は200Hzであった．

3.3　提示刺激

図5に刺激の外形を示す[8)]．左のパネルは，画面手前（交差視差：右眼用画像が左眼用画像に比べ左方向に提示される）の前額平行面上に知覚されるように提示された台形（Standard条件）を示す．中央のパネルは，Standard条件の右眼用の台形の左端を切り取ったもの（Truncated条件）を示す．この条件では，画枠ひずみを模して右眼用画像のみを切り取ったため，左右画像の台形の左端の大きさが異なっている．この時，提示された物体は右端が手前，左端が奥に傾いて知覚される（図6参照）[8)]．右のパネルはStandard条件の右眼用画像を左右方向に圧縮した刺激（Compressed条件）を示す．Truncated条件と異なり，台形左端の大きさは左右画像間で等しくなっている．これは幾何学的に正しい立体画像であり，左端が奥に傾いて知覚される．主刺激には図6に示すような台形

(Truncated条件；幅6.7deg）を用い，視差0の面にはランダムドット（16.4deg×11.2deg）を配置した．台形を用いた理由は，上下の辺が平行（矩形）であるとTruncated条件とCompressed条件の図形が一致し，刺激として不適切になるためである．また，内部が1つの連続した面として知覚されるようにシェーディングを施した．この時，台形の輝度値（メモリ上の値）は左端約95.0cd/m^2（235/255），右端約12.0cd/m^2（90/255）へと変化させた．

左右眼用刺激のうち，左眼用を1種類に固定し，右眼用のみを変化させて各条件の刺激を作成した．また，台形刺激の右端の視差はTruncated条件，Compressed条件共に0.5deg（交差視差）に保たれた．また，左端の視差は0とした．

図7に刺激の提示順序を示す．まず，固視点と共にStandard条件の台形刺激が提示された．この時，固視点は台形面上で左端から1.5degの位置に表示された．これは，台形の切り取り量（または圧縮量）である0.5degと固視微動による注視位置のゆらぎ[23]を1deg分考慮して台形の内側へ設定したものである．被験者は各試行の初めにまずこの固視点を注視した．次に，実験者の合図に続けて固視点の残像を消すためのマスク刺激が約83ms間提示された．その後，Standard条件の刺激とTruncated条件またはCompressed条件の刺激が10秒毎交互に2分間（計6回）繰り返し提示された．被験者はこの間,「台形面上の固視点が表示されていた位置を注視」するように指示された．そのため，台形の面内部と上下右の辺の視差情報から輻輳点の奥行き位置が決定されると考えると，被験者はCompressed条件観察時には，Standard条件観察時に比べ画面に近い奥行き位置を注視すると予想される．また，Truncated条件観察時には，Standard条件観察時と同じ奥行き位置を注視すると予想される．実験では，台形左端を切り取ることにより画枠ひずみを模したTruncated条件観察時の輻輳距離がStandard条件やCompressed条件に比べ，どのように変化するかを調べた．

また，輻輳眼球運動と被験者の知覚を対応付けるための確認を行った．測定実験に影響を及ぼすことを避けるために，各実験においてすべての試行終了後に刺激を再提示し，奥行きや曲面形状がどのように知覚されるかを質問する手続きを取った．

3.4 データ処理

まず，両眼眼球運動のデータにカットオフ周波数20HzのFIRローパスフィルタを適用した．次に，眼球運動データ中の瞬目を眼球運動の速度と大きさに閾値（5deg/sec；±1deg以上）を設けて検出し，その間を直線で補間した．**図8**に瞬目除去の例を示す．瞬目除去後，左右眼の水平眼球運動データの差を取ることにより輻輳距離を計算した．

図9にStandard条件とTruncated条件の刺激を観察中の輻輳眼球運動の例を示す．横軸は刺激を繰り返し提示した際の1サイクル分の時間を示す．0から10秒の間に

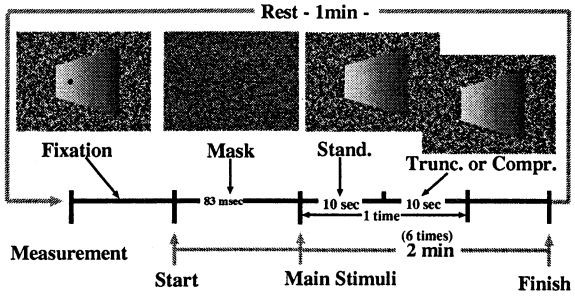


図7 刺激の提示順序
A sequence of stimulus presentation.

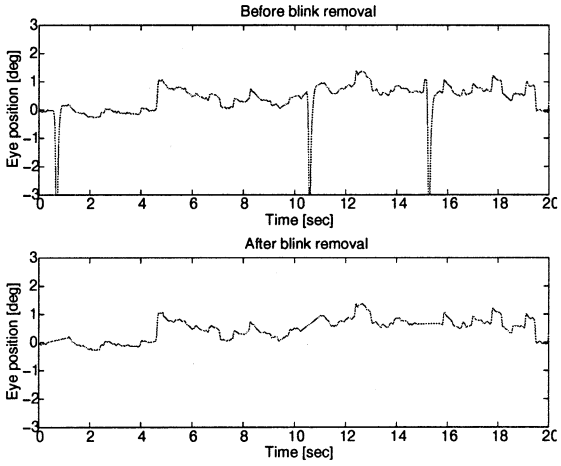


図8 瞬目除去の例
An example of blink removal.

Standard条件の刺激が提示され，10秒から20秒の間にTruncated条件の刺激が提示された．図中の点線は固視の条件（左右1deg以内）を満たした10回分のデータを示す．刺激の繰り返し提示中，Standard条件に変化した後4秒から9秒の間の輻輳距離を基準とするため，この区間の平均値を0とするように各波形をシフトさせた．また，実線はこの平均データを示す．縦軸の0は画面手前に表示される台形面上（Standard条件）を固視している時の輻輳距離を示し，負の値は台形の奥行き位置より画面の方向（被験者の前方；divergence）を固視していることを示す．図中の横線2本とこれらと垂直に交わる短い縦線は，各々刺激変化後4秒から9秒までの5秒間の平均値と標準偏差を表している．以後，結果のグラフはこのようにして求められた平均値と標準偏差だけを示す．同図から，横軸の10秒付近で輻輳点が画面方向へ移動していることがわかる．

3.5 結果と考察

図10と**図11**に被験者A，B各々の結果を示す．図10，図11の左部分はStandard条件とCompressed条件の刺激を観察中の輻輳距離の平均と標準偏差を示す．また，これらの右部分はStandard条件とTruncated条件の刺激を観察中の輻輳距離の平均と標準偏差を示す．図10，図11から，Compressed条件観察時と同様に，Truncated条件観察時も輻輳点が画面方向に移動している（$P < 0.001$）こ

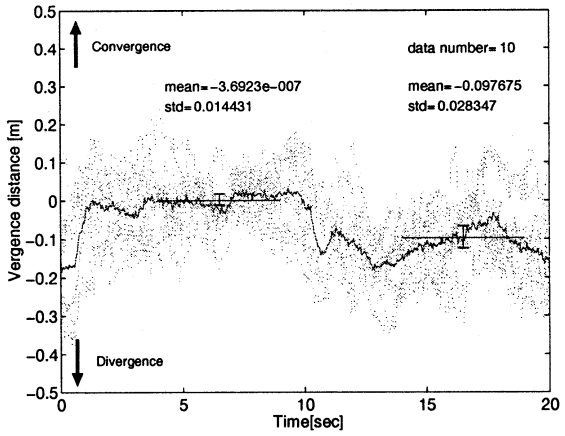


図 9　輻輳眼球運動の例
An example of vergence eye movements.

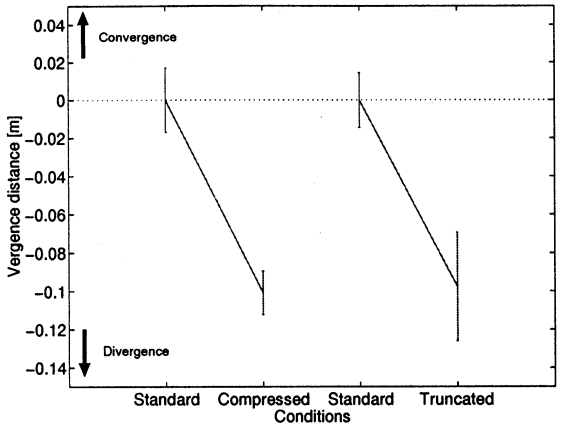


図 10　実験1の結果（被験者: A）
A result of exp. 1 (Sub: A).

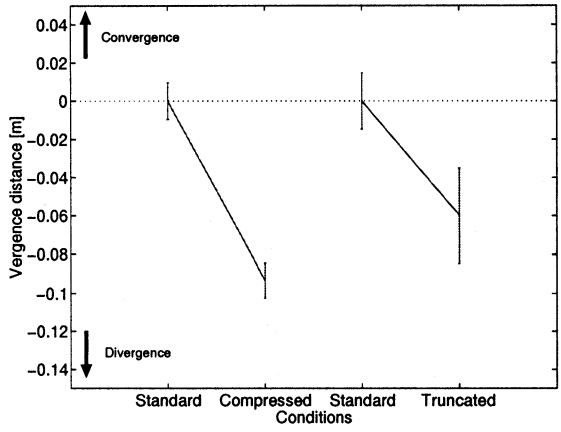


図 11　実験1の結果（被験者: B）
A result of exp. 1 (Sub: B).

とがわかる．これは本来輻輳点がStandard条件と同じ（縦軸0）になるべき条件（Truncated条件）を観察中でも，故意に傾けられた台形を観察した場合（Compressed条件）と同様に変化していることを表している．Truncated条件の刺激は画枠ひずみを模したものであることから，この結果は画枠ひずみにより明らかに輻輳点が画面方向へ移動したことを示す．

また，被験者2名は，Truncated条件では台形を前額平行面ではなく傾いた手前に凸の曲面として，Compressed条件では傾いた平面として知覚し，両条件間で台形の両端の奥行きを等しく知覚した．この結果は，輻輳距離の結果と定性的に一致する．

1章に述べたように，井上ら[13]は画枠の存在に関連して輻輳眼球運動を測定し，画枠の有無により大きな違いがないことを報告している．本実験の結果は，井上らの実験では行われなかった画枠ひずみを伴う刺激を観察中の輻輳眼球運動には，画枠の存在により刺激の視差が0となるエッジの影響が現れることを示唆する．

また，被験者間でCompressed条件に対するTruncated条件の輻輳距離を比較すると，被験者A（図10）では平均として両者が同じ程度変化しているのに対し，被験者B（図11）ではTruncated条件の輻輳点の移動量がCompressed条件の移動量に対して小さい（$P < 0.001$）．さらに，画枠ひずみ観察時には安定した奥行き知覚が得られない[8]ことと同様に，輻輳眼球運動もTruncated条件観察時の方がCompressed条件観察時に比べ不安定になっている可能性があると考えられる．今後，被験者を増やし，輻輳眼球運動に対してスペクトル解析を適用するなど，個人差も含めさらに詳細な解析が必要である．

4. 実験2 – 形状の影響

4.1 目　的

実験1では，画枠ひずみ観察時の輻輳点が画面方向へ移動することが，図6に示す1種類のみの台形刺激（3.3節参照）を用いて，客観的に示された．さらに，台形刺激の形状や内部の濃淡の変化など，両眼視差検出に必要と思われる特徴量の変化が，画枠ひずみを伴う台形の知覚[8]や輻輳眼球運動に影響を及ぼす可能性も考えられる．画枠ひずみが生じる刺激は，左右画像間で台形左端の大きさが異なっている（3.3節，図5参照）．このような垂直方向の大きさの差（以下，垂直大きさずれ）を含む刺激は，幾何学的に左右画像間で対応の取れないものとなっており，これが融合不完全の原因となる[24]．そこで，実験2では，こうした垂直大きさずれの量を変化させるように，紙面に対して上下の辺の傾斜角度をパラメータとして画枠ひずみを伴う刺激の「形状」を変化させた場合に，どのように輻輳眼球運動が変化するかを明らかにすることを目的とした．

4.2 提示刺激

実験条件は刺激の形状を除いて全て実験1と同じであった．図12に実験2で用いた刺激の模式図を示す．図12において，Truncated条件の刺激は実験1と同じである．Obtuse条件は台形の左端がTruncated条件よりも大きい台形となっており，Acute条件は台形の左端が小さい台形となっている．この時，台形上下の辺の傾斜角度は水平線に対し

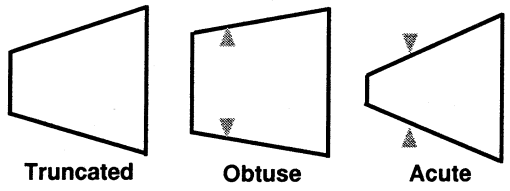


図 12　刺激の模式図（実験2）
A schematic diagram of stimuli for exp. 2.

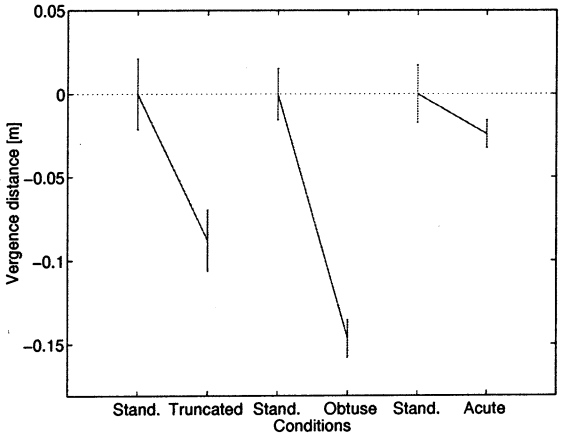


図 13　実験2の結果（被験者: A）
A result of exp. 2 (Sub: A).

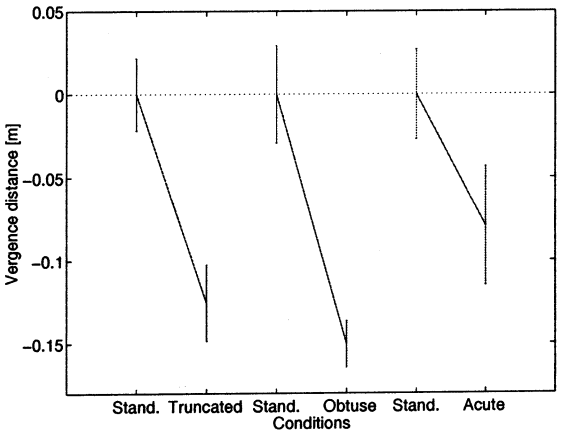


図 14　実験2の結果（被験者: B）
A result of exp. 2 (Sub: B).

てTruncated条件では16.5deg，Obtuse条件では10.0deg，Acute条件では23.0degとした．これらの台形刺激の左側が切り取られると，左右画像間で台形左端に垂直大きさずれが生じる．台形の左端を切り取った場合，Obtuse条件の台形左端の垂直大きさずれの量はTruncated条件のそれよりも少なくなり，反対に，Acute条件の台形左端の垂直大きさずれの量はTruncated条件のそれよりも多くなる．このように，左右画像間の台形左端の垂直大きさずれの量の違いが，画枠ひずみ観察時の輻輳眼球運動へどのような影響を与えるかを調べた．

4.3　結果と考察

図13と**図14**に被験者A，B各々の結果を示す．図13，図14はTruncated条件，Obtuse条件，Acute条件のStandard条件に対する輻輳距離の変化を示す．これらの図からAcute条件は，Truncated条件よりも輻輳距離の変化が小さく（被験者A: $P < 0.001$，被験者B: $P < 0.01$），Obtuse条件はTruncated条件よりも輻輳距離の変化が大きい（被験者A: $P < 0.001$，被験者B: $P < 0.05$）．これは，台形の上下の辺の角度に起因する左右画像間の台形左端の垂直大きさずれの量（台形形状）が輻輳眼球運動に影響を及ぼしたことを示している．

また，被験者2名は，Obtuse条件，Truncated条件，Acute条件の順に台形を手前により大きく湾曲しているように知覚した．この結果は，輻輳距離の結果と定性的に一致する．

一方，上記の結果が得られた別の要因として台形の持つ絵画的な奥行き感が影響[25)26)]している可能性も考えられるが，その場合には台形の上下の辺の角度が急になり左端が小さくなるほど輻輳点の位置が画面の奥方向へ移動するように変化すると予想される．しかし，実験の結果はその逆となっている．さらに，前額平行面上の台形刺激の形状のみを変化させた補足実験を行い，本実験の解析方法で輻輳距離への影響がないことも確認した．このことから左右画像間の台形左端の垂直大きさずれの量が主な原因となっていると考えられる．

5.　実験3 – バーチャルフレームの効果

5.1　目　的

実験1，2では，画枠ひずみにより輻輳点が画面に近い方向に移動し，刺激の形状によりその移動量が変化することが明らかとなった．ここでは，VFM（バーチャルフレーム）を適用することにより，画枠ひずみの知覚が改善されたように，画枠による輻輳眼球運動への影響が改善され得るか否かを確認することを目的とした．

5.2　提示刺激

実験条件は実験1のTruncated条件の刺激にVFMが加えられたことを除いてすべて実験1と同じであった．**図15**に実験3で用いた刺激の模式図を示す．ここでも，左眼用の刺激を1種類に固定し，右眼用の刺激のみを変化させた．VFMは画面手前に表示された台形刺激が絵画的に切り取られるように提示された．刺激は，台形の奥行き提示位置を画面手前の視差0.5deg（交差視差）に固定し，VFMを台形と同じ視差0.5deg（Standard条件）から（1）0deg（画面上，Back条件），または（2）1.0deg（台形より手前，Front条件）（図15参照）に変化するように提示された．同図中の矢印は右眼用画像中のVFMが台形に対して画面上で移動する方向を表している．この時，同図に示すように，台形はBack条件では右眼の台形の左端が0.5deg分切り取られ，Front条件では0.5deg分延長させることに

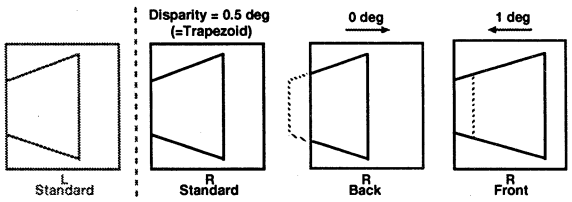


図 15　刺激の模式図（実験3）
A schematic diagram of stimuli for exp. 3.

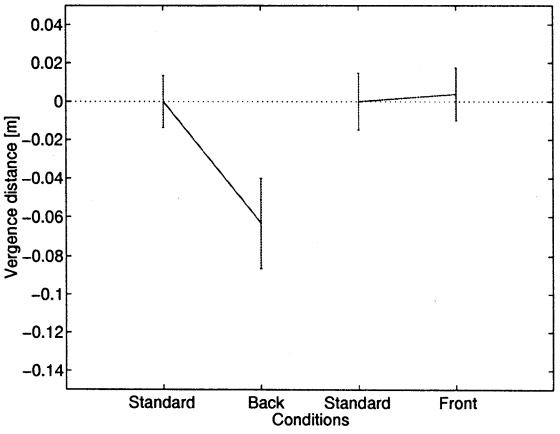


図 16　実験3の結果（被験者: A）
A result of exp. 3 (Sub: A).

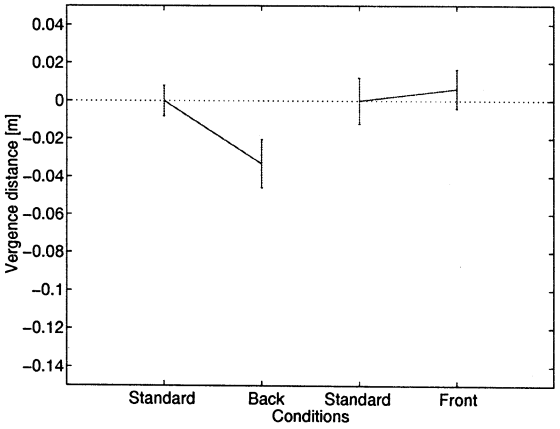


図 17　実験3の結果（被験者: B）
A result of exp. 3 (Sub: B).

なる．被験者は実験1，2と同様に台形面上を注視するように指示された．

5.3　結果と考察

図16と図17に被験者A，B各々の結果を示す．図16，図17の左部分はStandard条件とBack条件を観察中の輻輳距離を示す．これらの結果から，Back条件観察中の輻輳点はStandard条件に比べ画面に近い位置へ移動していることがわかる（$P < 0.001$）．これは実験1で示された画枠ひずみ観察中の輻輳点の移動と同じものである．一方，これらの図の右部分はStandard条件とFront条件観察中の輻輳距離を示す．Front条件観察中の輻輳距離はStandard条件に対して殆んど変化がないことがわかる．この結果は，VFMの奥に表示された物体を注視している時の輻輳眼球運動は，画枠ひずみを模したBack条件を観察中のような影響を受けないことを意味する．

また，被験者2名は，Back条件では台形を実験1と同様に傾いた面として知覚したのに対し，Front条件では前額平行面上に知覚した．この結果は，輻輳距離の結果と定性的に一致する．

これまでの知見を総合すると，立体画像表示を行う際，画枠にかかる物体より手前にVFMを表示することにより，画枠ひずみの知覚を防ぐことに加え，画枠に引き付けられるような不自然な眼球運動である輻輳点の移動を防止できるといえる．

また，この方法は，2章に述べた実世界の遮蔽条件を満たすことができ，4章に述べた垂直大きさずれによる影響も回避できることから，融合不完全による眼精疲労[27]の原因除去にも寄与する可能性も考えられ，今後，人間の視覚特性に基づいた立体画像表示システムの設計に寄与するものと期待される．

6. むすび

本研究では，立体画像の画枠付近に生じる「画枠ひずみ」が輻輳眼球運動に与える影響を解析した．実験の結果，(1) 画枠ひずみを観察中の輻輳点は，本来画像が表示されている画面手前の奥行きではなく，より遠方の画面に近い位置に移動する，(2) 画枠ひずみを起こす刺激の形状により輻輳点の移動量が変化する，(3) 画面手前の画枠ひずみを起こす物体よりさらに手前にVFM（バーチャルフレーム）を表示することにより，被験者に正しい奥行き知覚を与えると共に，不自然な輻輳眼球運動を回避できることが明らかとなった．

このような立体画像観察時の画枠に起因する視覚反応の異常やVFMの効果は，すべての両眼立体視を利用した立体画像に当てはまるものである．

今後の課題として，画枠ひずみ観察時の視覚反応の不安定さや個人差，刺激のTextureや視差量，眼精疲労等に関連して，より詳細に解析することが挙げられる．

本論文は第一・第二筆者がATR人間情報通信研究所滞在中に行った実験を，豊橋技術科学大学においてまとめたものである．本実験の機会を与えて頂いたATR人間情報通信研究所 一ノ瀬 裕 社長，金次 保明 前第五研究室室長（現NHK）に感謝致します．また，本論文執筆の機会を与えて頂いた同研究所 藤井 真人 第五研究室室長，有益な議論をして頂いた愛知県立大学情報科学部 小濱 剛 氏，実験に協力して頂いた被験者の方々に感謝致します．

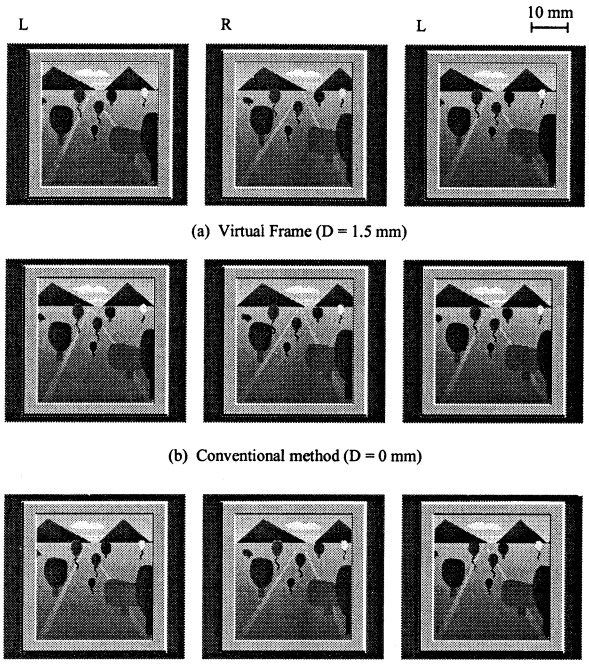
〔文　献〕

1) 畑田: “疲れない立体ディスプレイを探る”, NIKKEI ELECTRONICS, **444**, pp.205–223 (1988)
2) A. Woods, T. Docherty, R. Koch: “Image Distortions in Stereoscopic Video Systems”, Proc. SPIE, **1915**, pp.36–48 (1993)
3) 山田: “見えてきた映像の生体への影響”, Trigger, 9812, pp.110-113

(1998)
4) NHK放送技術研究所 編: "3次元映像の基礎", オーム社 (1995)
5) 放送文化基金: "「立体視研究」準備プロジェクト報告書～立体画像が人間の感性に与える影響と研究課題～" (1998)
6) 3次元映像に関する調査研究開発委員会 (日本電子機械工業会): "「3次元映像の生体影響総合評価システムの開発に関するフィージビリティスタディ」報告書" (1998)
7) 湯山: "ソフト製作とイベント応用", テレビ誌, **45**, 4, pp.487–493 (1991)
8) 石榑, 大塚, 金次, 吉田, 臼井: "ステレオ表示における奥行き知覚ひずみとその防止方法", テレビ誌, **50**, 9, pp.1256–1267 (1996)
9) S. Ohtsuka, Y. Ishigure, Y. Kanatsugu, T. Yoshida, S. Usui: "Virtual Window: A Technique for Correcting Depth-Perception Distortion in Stereoscopic Displays", Proc. SID'96, pp.893–896 (1996)
10) Y. Ishigure, J. Zhang, S. Ohtsuka, H. Kaneko, S. Usui: "Influence of the Frame in Stereoscopic Images on Vergence Eye Movement", Perception (Supplement), ECVP'98, **27**, pp.101–102 (1998)
11) 石榑, 張, 大塚, 金子, 臼井: "ステレオ表示における画枠ひずみと輻輳眼球運動", 信学技報, **NC98-167**, pp.107-114 (1999)
12) 苧阪, 中溝, 古賀: "眼球運動の実験心理学", 名古屋大学出版会 (1993)
13) 井上, 大頭: "立体テレビ観測時の眼球運動と調節 (I)", 日本眼光学学会誌, pp.208–212 (1989)
14) 大頭, 小松, 鵜飼, 奥山: "空中像ディスプレイ観察時の視覚機能解析", 放送文化基金研究報告, pp.24–29 (1980)
15) 桑原, 鉄谷, 岸野: "実物と混在表示における2眼式立体画像の融合特性", テレビ誌, **48**, 10, pp.1276–1283 (1994)
16) 工藤, 魚森, 山田, 大西, 杉江: "リムオクルージョンに誘発される両眼の注視位置の変化", テレビ誌, **47**, 8, pp.1115–1122 (1993)
17) 中田, 細畠, 近江, 不二門, 山田: "イメージスプリッタを用いた眼位記録装置の開発", 視覚の科学, **18**, 4, pp.118–124 (1998).
18) K. Nakayama, S. Shimojo: "Da Vince Stereopsis: Depth and Subjective Occluding Contours from Unpaired Image Points", Vision Res., **30**, 11, pp.1811–1825 (1990)
19) S. Shimojo, K. Nakayama: "Real World Occlusion Constraints and Binocular Rivalry", Vision Res., **30**, 1, pp.69–80 (1990)
20) 磯野, 安田: "立体画像と視覚", 信学技報, **IE88-94**, pp.23–30 (1989)
21) 畑田: "3次元画像の画質評価", *JOERA* 技術資料, **12**, 9 (1992)
22) 魚森, 山田: "時分割立体画像融合時の片眼運動刺激に対する両眼眼球運動測定", テレビ誌, **46**, 8, pp.1025–1035 (1992)
23) 山田, 福田: "画像における注視点の定義と画像分析への応用", 信学論, **J69-D**, 9, pp.1335–1341 (1986)
24) 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画像間の幾何学的ひずみの検知限・許容限の検討", 信学誌, **J80-D-II**, 9, pp.2522–2531 (1997)
25) 武田, 飯田, 福井: "視対象の見かけの位置に対する眼の調節応答特性", 人間工学, **25**, 4, pp.217–224 (1989)
26) J.T.Enright: "Art and the oculomotor system (perspective illustrations evoke vergence changes)", Perception, **16**, pp.731–746 (1987)
27) 鈴村: "目の疲労検査", 人間工学, **17**, 3, pp.115–121 (1981)

〈付　　録〉

付·図1に画枠ひずみとVFM (バーチャルフレーム) のステレオグラムの例を示す. 付·図1 (a) はVFMの適用例, (b) は現行の立体表示方式の例, (c) は画面の奥にのみ画像が表示される例である. 平行法の場合は左と中央の画像を, 交差法の場合は中央と右の画像を各々片眼で観察することにより, 立体像が知覚できる. これらの図中の一番右の木やまっすぐ奥に伸びる道 (帯) の奥行き方向への形状に注目して付·図1 (a) (b) を比較すると, (a) では木が前額平行面上に知覚され, 道は紙面の手前にまで伸びているように知覚されるのに対して, (b) では木が画枠に引き込まれるように奥行き方向に傾いて知覚され, 道は画枠の奥行き, つまり, 紙面上までに留まっているように知覚される. これが「画枠ひずみ」である. ただし, (c) に示すように画面の奥にのみ画像が表示される場合は, 画枠ひずみは知覚されない.



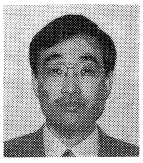
付·図1　画枠ひずみとVirtual frameの例
Examples of stereogram with virtual frame.



石榑 康雄 (いしぐれ やすお) 1995年, 豊橋技術科学大学工学部知識情報工学課程卒業. 1997年, 豊橋技術科学大学大学院工学研究科修士課程知識情報工学専攻修了. 現在, 同大学大学院工学研究科博士後期課程電子・情報工学専攻に在学中. 1998年3月まで, ATR人間情報通信研究所研修研究員. 視覚特性に基づいた立体画像表示に関する研究に従事. 学生会員.



張 菁 (ちょう せい) 1998年, 豊橋技術科学大学工学部情報工学課程卒業. 現在, 同大学大学院工学研究科修士課程情報工学専攻に在学中. 1998年2月まで, ATR人間情報通信研究所実習生. 視覚特性に基づいた画像表示に関する研究に従事.



大塚 作一 (おおつか さくいち) 1978年, 金沢大学工学部電子工学科卒業. 1980年, 同大学大学院工学研究科修士課程修了. 同年, NTTに入社. 以来, 画像通信, 画像処理の研究開発と画質評価・視覚情報処理の研究に従事. 1993年, (株) ATR人間情報通信研究所出向. 1996年3月, NTT復帰. 現在, NTTサイバースペース研究所メディア処理プロジェクト所属. 工学博士. 正会員.



金子 寛彦 (かねこ ひろひこ) 1987年, 東京工業大学理学部卒業. 1989年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了. 1992年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了. 同年, York大学 (カナダ) 研究員. 1995年6月, ATR人間情報通信研究所研究員 (現在に至る). 人間の三次元空間認識に関する研究に従事. 工学博士.



臼井 支朗 (うすい しろう) 1974年, カリフォルニア大学大学院博士後期課程 (電気工学計算機学科) 修了. 同年, 名古屋大学工学部助手. 1979年, 豊橋技術科学大学講師, 助教授を経て, 1986年, 教授. 生体情報工学, 生理工学などの研究に従事. Ph.D. 正会員.