

HMD型トレイグジスタンスシステムの 頭部運動時における視野角不整合の影響

柳田 康幸*¹ 舘 暲*²

Dynamic Effects of Inconsistent Field of View in HMD-based Telexistence Systems

Yasuyuki Yanagida*¹ Susumu Tachi*²

Abstract – When using telexistence or virtual reality systems, the operator perceives the remote/virtual environment as a strange world, if the visual parameters of the remote camera or the projection used to generate the graphics images of virtual environments are inconsistent with those of the display device. For the systems using HMD, field of view of the HMD (camera) and the inter-pupillary (inter-camera) distance can be considered as elementary parameters to determine the appearance of the displayed world. In this paper, this strangeness, which has been reported as subjective impression, is analyzed geometrically as a dynamic distortion and deformation of the perceived world. Also, a method to reduce the strangeness is proposed, by controlling the scaling factor of the rotational motion of the robot head so that the optical flow nearby the gazed point could match with the mechanism of vestibulo-ocular reflex of human operators.

Keywords : telexistence, virtual environment, head-mounted display, field of view, vestibulo-ocular reflex

1. はじめに

トレイグジスタンスおよびバーチャルリアリティ (VR) 技術の特色は、人間が遠隔あるいはバーチャル環境に実際に存在しているような臨場感を与えることにより、人間の持つ高度な認識・判断能力やスキルを有効に利用することにある [1] [2]。このため、操作者に対して遠隔あるいは VR 環境を自然な三次元空間として視覚的に認識させることは極めて重要である。頭部搭載型視覚提示装置 (Head-Mounted Display: HMD) は 1968 年に Sutherland により開発 [3] されて以来、その後画像表示デバイスや光学系の進歩と小型化が進み、さらに頭部の三次元的な位置・姿勢を手軽に計測できる磁気センサの開発・商品化などと相まって、VR システムの一スタイルを形成するキーデバイスとしての地位を築いている。

HMD を利用して立体感を誇張しない自然な三次元空間の提示を実現するためには、無造作にステレオ画像を提示すればよい訳でなく、正確な視覚的空間知覚手がかりが操作者へ与えられるようにすることが必要である。実環境へのトレイグジスタンスにおいては人間が遠隔地に存在している状況と等価な網膜像を与え

ることが理想的であり、いくつかの近似条件を許容すれば [4]、工学的には操作者側 HMD と同一の視野角・眼間距離を持つステレオカメラ系をロボット頭部に搭載し、ロボットの頭部や作業を行うアームなどがそれぞれ操作者の頭部および上肢運動に対して連続的かつ同一の動作を行うよう制御した上で、ステレオカメラにより得られた映像を HMD 内に提示することにより実現される [4] [5] [6]。コンピュータグラフィックス (CG) 画像により VR 空間を提示する場合においても実カメラが CG 画像生成の透視変換に置き換わる点を除いて条件は全く同一であり、HMD の精密な光学系などを含むその他の様々な条件を考慮して正確な三次元空間を提示する方法が研究されている [7] [8] [9]。

ところが、こうした理想的な条件が完全に満足されない状況は、実は簡単に発生しうる。撮像系と提示系との間の光学的キャリブレーションが不十分だったり操作者の動きに対するロボットの追従性能が不足している場合はもちろんのこと、例えば、アールキューブ構想 [10] における利用形態では、配置や光学系の異なる撮像システムを搭載した複数のロボットを単一のコンソールから切り替えて制御することが想定される。このとき、操作者とは異なる眼間距離のステレオカメラを搭載したロボットを制御したり、周囲の広い領域を見回すことが必要とされるような種類のタスクにおいては、あえて同時に広角の領域が視野内に入ってきた

*1: 東京大学 大学院情報理工学系研究科, 現在 ATR メディア情報科学研究所

*2: 東京大学 大学院情報理工学系研究科

*1: The University of Tokyo;

currently at ATR Media Information Science Laboratories

*2: The University of Tokyo

方が望ましい場合も考えられる。眼間距離や視野角が異なるステレオカメラ系により得られた画像をそのまま操作者側のHMDに提示すると、自然な遠隔空間とは感じられないばかりか、頭を前後左右に動かしたり見回し動作を行うと強烈な違和感を覚え、場合によっては作業に耐えない。本論文の目的は、このような現象を主観的印象として放置せず理論的に解析して何が起きているのかを指摘するとともに、簡単な方法で不具合を緩和する方法を探ることにある。自然な三次元環境提示のための理想条件を規定するだけでなく、こうした不自然な視覚提示条件の下で操作者にとって世界がどのように観察されるかを明らかにしておくことは、システム全体としてのクオリティを確保する上で参考になるものと期待される。

2. 関連研究と本論文の位置づけ

HMDによる正確な立体画像提示に関しては、視野角と眼間距離の設定による影響の他にも、画像提示スクリーン像までの距離が固定であることに起因する焦点調節と輻輳の矛盾[11]、その影響を考慮したHMDの開発[12]、光学系の歪み[7]、設計パラメータに現れない製作時の誤差および装着位置のずれによる誤差[13]、瞳孔間距離の個人差[14]、瞳孔間距離の眼球運動(輻輳)による変化[15]など、立体画像提示を行うにあたっての様々な要因[9]についての分析と対策が行われている。しかしながら、これらはデバイス単体あるいは頭部を固定した状況(以後、静的と呼ぶ。本論文の中で、静的とは静止画の提示を意味するものではない)における解析と評価であって、HMDを利用した環境提示の特徴である操作者の頭部運動を伴う場合に生じる状況について取り扱ったものではない。HMDは本来、装着者が自由に頭部運動を行える状況にしておき、頭部トラッキングとそれに対応した実時間視覚情報提示を行うシステムを構築した上で使用されるべきものであって、頭部を固定した状況の枠の中ではどのように精密な議論を展開したところでHMDの持つ特徴のうちごく一部の側面しか捉えていない。

その一方で、VRシステムで頭部運動を行っている状況(以後、動的と呼ぶ)に関しては、頭部運動計測やCG画像生成による時間遅延[16]が存在する場合の影響と対策が報告されており[17][18][19]、この問題に関しては特に強調現実感(Augmented Reality)[20]、複合現実感(Mixed Reality)[21]の分野で活発に研究が行われている。しかし、これらの研究における興味の対象は時間遅れそのものであり、静的な立体視に関係する要素と動的な要素は個別に取り扱われてきた。

これらに対し、本論文では静的な立体視に関係するパラメータの不整合が、時間遅れの存在しない理想的

な状況下で頭部運動を行った場合にどのような影響を及ぼすかについて考察を行う。関連する分野としては、CRTなどの固定型スクリーン面を画像表示面とした装置について、立体テレビを想定して視点の平行移動により生じる不自然な運動視差の振る舞いが解析されている[22]。しかし、HMD利用時の見回し動作に伴う頭部回転による影響については、古くから定性的な現象が指摘されるのみで定量的な解析が行われて来なかった。この問題の定式化に際して、前述のような立体知覚および提示デバイスに関する数々の要因を一度に考慮して解析を行おうとすると、膨大な数のパラメータに左右される複雑な系を扱わねばならず、見通しのよい結果を得ることは困難である。

本論文では、対象とするパラメータを幾何学的因子、中でも視野角と眼間距離の2種類のみ絞り、これら以外の幾何学的因子や、他の空間知覚手がかり、例えば焦点調節による影響や、提示される画像の陰影やテクスチャなどによる空間知覚手がかりは対象外とする。そもそも、ステレオ方式のHMDが両眼手がかりによって立体提示を行っている以上、輻輳と視差に直接影響する幾何学的因子をまず押さえておくことは必要不可欠である。さらに、眼間距離と視野角を対象とするのは、システム構築の実用的な側面からの理由にもよる。例えば、市販のHMDを購入してきてシステム構築を行う場合、これら2つのパラメータは、カメラの配置とレンズの画角選択・調整、あるいはCG画像生成における視点の位置および透視変換行列の設定という形で、明示的に設定するプロセスが必要である。他の幾何学的要因、例えば光学的歪みに関しては、わざわざ補正をかける必要があり、もう一段階精密なレベルでの仕事である。このため、システム構築を行うほとんどの人間が設定の場面に遭遇するであろう眼間距離と視野角を対象として取り上げるものである。

以上の領域設定の下で、本論文ではまず、撮像系と提示系との間で眼間距離および視野角の設定が異なる状況を想定し、その場合に生じる静的な空間歪みを幾何学的に分析して、それぞれのパラメータ不整合が及ぼす影響を直感的に理解しやすい結果として整理する。その上で、視野角不整合が存在する場合に操作者が頭部回転運動を行うという状況にターゲットを絞り、操作者の空間知覚への動的な影響を解析する。この影響は頭部運動を行うVRやレイグジスタンスに特有の現象であり、静的な立体画像提示を行う場合は表面に現れない問題である。さらに、この問題が発生する状況においても、同時に頭部回転運動を拡大・縮小して制御することにより、頭部回転運動に対する注視点付近の画像の流れを適切に制御して、見回し動作に関する作業性の低下を緩和する方法を提案する。最後に、

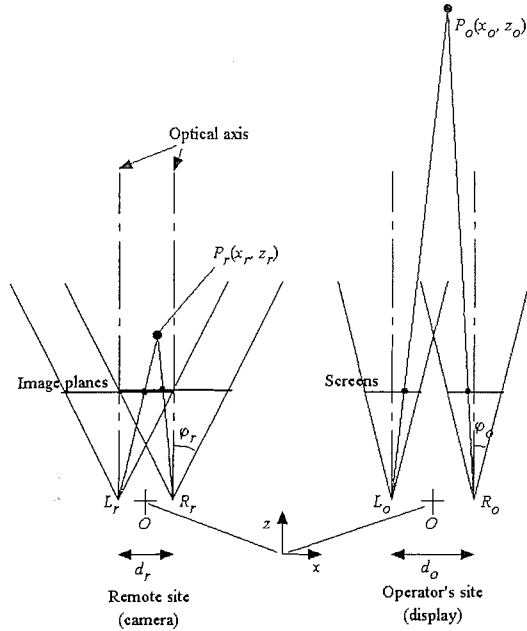


図1 HMD 型テレプレゼンスシステムの幾何学的パラメータ：眼間距離と視野角
 Fig.1 Geometric parameters for HMD-based telepresence system: inter pupillary distance (IPD) and field of view (FOV)

これらの解析結果をふまえて実験により検証を行う。

3. 視覚パラメータの整合性に関する幾何学的解析

3.1 HMD の幾何パラメータ

本論文で扱う HMD のパラメータを図1に示す。ここでは最も典型的な HMD、すなわち、スクリーン像が前額面に対して平行で、左右の光軸が平行、かつ左右の目からスクリーン像に下した垂線の足が画面中央となるように（無限遠点に対して100%オーバーラップ）設計されているものを対象とする。この場合、光軸に関して上下左右対称な透視投影を用いるのが適当であり、ここでは前章で述べたように左右の眼間距離と視野角の2つを設定パラメータとして扱う。なお、以下では便宜上遠隔環境におけるカメラ間距離、バーチャル環境における設定視点間距離についても併せて眼間距離という言葉を使用する。

図1では、遠隔側の方が眼間距離が小さく、視野角が大きい状況を示している。両サイトの区別に関しては、遠隔（撮像）側を r 、操作者（提示）側を o の添字で表し、左右に関しては右を R 、左を L として区別する。遠隔側、操作者側の片側視野角をそれぞれ φ_r 、 φ_o 、遠隔側、操作者側の眼間距離をそれぞれ d_r 、 d_o と表記する。操作者側に対する遠隔側の視野角倍率を β 、すなわち

$$\varphi_r = \beta \varphi_o \quad (1)$$

とし、また、片側視野角の正接の比を

$$\rho_\varphi = \frac{\tan \varphi_r}{\tan \varphi_o} = \frac{\tan \beta \varphi_o}{\tan \varphi_o} \quad (2)$$

と表しておく。また、操作者サイトに対する遠隔サイトの眼間距離の比を

$$\rho_d \equiv d_r/d_o \quad (3)$$

表記しておく。また、それぞれのサイトにおいて左右視点の中間点を原点 O とし、前額平行面右方向を x 軸に、前方方向を z 軸にとることにする。

3.2 パラメータ不整合による空間の静的歪み

遠隔側と操作者側との間で眼間距離あるいは視野角が異なる条件下で、画像生成系で作成された画像がそのまま提示系のデバイスに提示されている状況を考える。眼間距離が異なる場合はベースラインが異なるため、また視野角が違う場合には画像全体が光軸を中心に縮小・拡大されるため、知覚される物体までの距離が実際と異なるものとなる。以下、この状況を幾何学的に解析する。

遠隔サイトにおいて、点 $P_r(x_r, z_r)$ を右・左の視点から見た角度をそれぞれ ψ_{Rr} 、 ψ_{Lr} と表すと、

$$\tan \psi_{Rr} = \frac{-x_r + d_r/2}{z_r} \quad (4)$$

$$\tan \psi_{Lr} = \frac{-x_r - d_r/2}{z_r} \quad (5)$$

と記述される。この点は遠隔側カメラにより左右それぞれの画像上の点として記録され、操作者側の提示デバイスにおいて視野中心からの距離が $1/\rho_\varphi$ 倍となる点として表示される。このため、操作者側において左右の視点から提示デバイス上の点を見た直線と光軸のなす角度は

$$\tan \psi_{Ro} = \frac{1}{\rho_\varphi} \tan \psi_{Rr} = \frac{1}{\rho_\varphi} \cdot \frac{-x_r + d_r/2}{z_r} \quad (6)$$

$$\tan \psi_{Lo} = \frac{1}{\rho_\varphi} \tan \psi_{Lr} = \frac{1}{\rho_\varphi} \cdot \frac{-x_r - d_r/2}{z_r} \quad (7)$$

なる角度 ψ_{Ro} 、 ψ_{Lo} となり、これらの直線の交点が操作者に知覚される点 $P_o(x_o, z_o)$ である。これらの直線の方程式は傾きと通る点の条件から

$$z = \frac{-x - d_o/2}{\tan \psi_{Ro}} \quad (8)$$

$$z = \frac{-x + d_o/2}{\tan \psi_{Lo}} \quad (9)$$

と表されるので、連立させて解けば点 P_o の x 座標は

$$x_o = \frac{d_o}{d_r} x_r = \frac{x_r}{\rho_d} \quad (10)$$

と求められる。これを (9) 式に代入して z 座標（奥行き）を求めると、

$$z_o = \frac{\rho_\varphi}{\rho_d} z_r \quad (11)$$

と計算される。

以上をまとめると、遠隔側の点 $P_r(x_r, z_r)$ は、操作者側において点

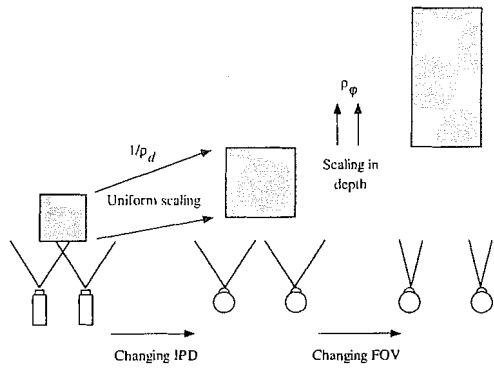


図2 眼間距離と視野角の不整合による静的歪み
Fig.2 Static distortion due to inconsistent IPD and FOV

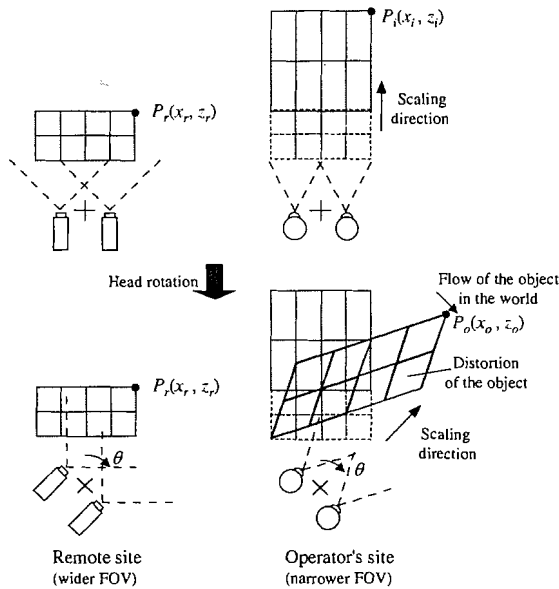


図3 視野角不整合時の頭部運動による世界の動的変形
Fig.3 Dynamic deformation of the world by head rotation when inconsistent field of view is applied

$$P_o(x_o, z_o) = \left(\begin{matrix} x_r \\ \rho_d \end{matrix}, \begin{matrix} \rho_\varphi z_r \\ \rho_d \end{matrix} \right) = \frac{1}{\rho_d} (x_r, \rho_\varphi z_r) \quad (12)$$

の位置に知覚されることになる。このように、平行光軸系HMDを利用したシステムにおいては、撮像系と提示系の眼間距離が異なると空間全体が一様に拡大・縮小され、視野角倍率が異なる場合にはさらに光軸方向に空間が拡大・縮小される。この様子を図2に示す。

3.3 頭部回転運動による動的変形と物体の移動

前節の結果より、眼間距離のみが異なる場合には、空間全体が拡大・縮小、あるいは逆に自分自身が縮小・拡大したものと見なせば、その解釈のもとで問題なく作業を遂行することができると考えられる。過去に筆者らが行った作業実験においても、眼間距離が異なる場合にその倍率に合わせて手先位置の移動を同様にスケールすれば問題なく作業できるという結果が得

られている[23]。このため、本論文では眼間距離不整合の影響についてはこれ以上深く立ち入らず、以後専ら視野角不整合の影響について探求する。

さて、視野角が異なる場合には、頭部を回転させた場合に空間の圧縮・伸張の軸が頭部の方向と共に変化するので、空間が動的に変形するように知覚される。この様子を図3に示す。上段左は広視野カメラを備えた遠隔サイトの様子であり、これを操作者側で視野角の狭いHMDを用いて提示すると、上段右のように世界全体が遠方に伸張されて知覚され、本来破線で示される物体が実線の物体のように知覚される。ここで、操作者が頭部を回転させ、それに追従して下段左のようにロボット頭部が回転した場合、操作者側では下段右のように回転した頭部に対して世界が前方へ伸張されるため、本来破線で示す物体が太実線のように知覚される。このとき、物体は細実線で示した回転前の状態と比べて変形し、特別な点を除いて位置もずれる。例えば、操作者の正面にあった物体は変形しながら頭部の回転と同方向に移動するように知覚される。逆に、遠隔側が狭視野（望遠系）の場合には、物体は奥行き方向に縮小され、正面にあった物体は変形しながら頭部回転とは逆方向に移動するように知覚される。このような動的な変形および不自然な画像の流れは頭部回転運動を行った場合にはじめて観察されるものであり、従来頭部運動を伴わない両眼立体視システムにおいては重要視されなかった現象である。

この現象を幾何学的に分析する。図3において、簡単のため頭部は両眼の中央を中心に回転するものとする。実際に人間が頭部回転を行うときは回転中心が両眼の中央とはならないが、その場合は本節の解析結果に原点の平行移動による世界全体のシフト分を加味すればよい。さて、遠隔サイトにおける点 $P_r(x_r, z_r)$ が、操作者側では頭部回転前には点 $P_i(x_i, z_i)$ の位置に、回転後には点 $P_o(x_o, z_o)$ の位置に知覚されるものとする。 P_r と P_i の関係は前節の結果より（眼間距離倍率 $\rho_d = 1$ とすると）

$$P_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \rho_\varphi \end{bmatrix} P_r \quad (13)$$

であり、 P_r に対応する P_o の位置を求めるには、

1. 頭部回転中心に関して $-\theta$ 回転
 2. 奥行き方向に ρ_φ 伸張
 3. 頭部回転中心に関して θ 回転を戻す
- という操作を行えばよい。つまり、

$$P_o = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \rho_\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} P_r \quad (14)$$

という関係が成り立つ。これを展開すると、

$$\begin{bmatrix} x_o \\ z_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r(\cos^2 \theta + \rho_\varphi \sin^2 \theta) \\ + z_r(1 - \rho_\varphi) \sin \theta \cos \theta \\ x_r(1 - \rho_\varphi) \sin \theta \cos \theta \\ + z_r(\sin^2 \theta + \rho_\varphi \cos^2 \theta) \end{bmatrix} \quad (15)$$

となる。微小回転角，すなわち $\theta \rightarrow 0$ のとき，

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_o \\ z_o \end{bmatrix} &\approx \begin{bmatrix} x_r + z_r(1 - \rho_\varphi)\theta \\ x_r(1 - \rho_\varphi)\theta + \rho_\varphi z_r \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_r \\ \rho_\varphi z_r \end{bmatrix} + (1 - \rho_\varphi)\theta \begin{bmatrix} z_r \\ x_r \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_i \\ z_i \end{bmatrix} + (1 - \rho_\varphi)\theta \begin{bmatrix} z_i/\rho_\varphi \\ x_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

と計算される。右辺第1項は回転前に操作者が知覚している点 P_i そのもので，第2項が点の移動に関する成分であり，これより各点の速度ベクトル

$$\overrightarrow{OP}_o = (1 - \rho_\varphi) \begin{bmatrix} z_o/\rho_\varphi \\ x_o \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \quad (17)$$

が導かれる。ここでは，微小回転角を扱うため速度ベクトル計算に用いる点 P_i の座標値は P_o と等しいとし， P_o に関する再帰的形式で記述した。このベクトルの大きさは，カメラとHMDの視野角が異なる ($\rho_\varphi \neq 1$) の場合一般に零にならず，操作者の知覚上で点の移動が生じることが示される。速度ベクトルの挙動を調べるため距離方向成分を計算すると，

$$\overrightarrow{OP}_o \cdot \frac{\overrightarrow{OP}_o}{|\overrightarrow{OP}_o|} = \frac{1 - \rho_\varphi^2}{\rho_\varphi} \cdot \frac{x_o z_o}{\sqrt{x_o^2 + z_o^2}} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (18)$$

である。この結果は，正中面方向の点 ($x_o = 0$) が奥行き方向に変化しないことを示している。また，提示画像の横方向の流れとして現れる回転方向成分は $(-z_o, x_o)$ 方向の単位ベクトルとの内積をとることにより，

$$\frac{1 - \rho_\varphi}{\rho_\varphi} \cdot \frac{\rho_\varphi x_o^2 - z_o^2}{\sqrt{x_o^2 + z_o^2}} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (19)$$

と計算される。正中面付近，すなわち $|x_o| \ll |z_o|$ において(19)式の符号は $\rho_\varphi > 1$ のとき $d\theta/dt$ と同じであり，遠隔側視野角の方が大きい場合に正面付近の物体が頭部と同じ方向に流れることを意味する。逆に， $\rho_\varphi < 1$ のとき，(19)式の符号は $d\theta/dt$ と逆になり，頭部とは反対の方向に流れることを示している。

頭部運動により知覚される世界が動的に変形し，点の移動が生じる様子を図4に示す。図の左側は遠隔サイトにおけるロボット頭部の回転，右側は操作者側で知覚される世界の様子を表し，HMDに対するカメラの片側視野角の正接が $\rho_\varphi = 2$ の場合について計算したものである。上段は頭部がちょうど正面を向いた瞬間，下段は頭部正面に対して右30 [deg.] を向いた瞬間で，ともに右方向に頭部回転を行っている最中に知

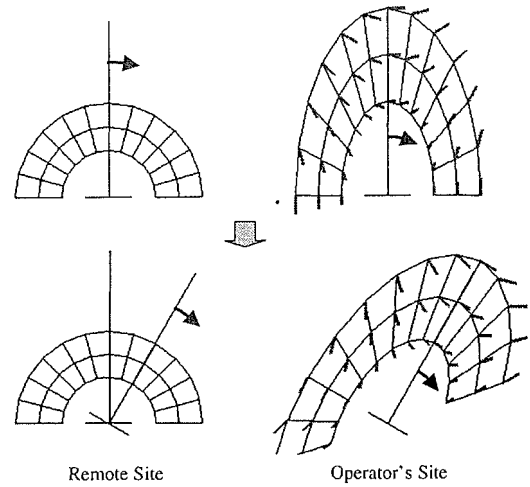


図4 世界の動的変形と各点における速度場の様子

Fig.4 Simulation result for dynamic deformation and flow of objects caused by inconsistent FOV

覚される世界の歪みを示している。各格子点に付加されている短い線分は，各点がその瞬間に移動する速度ベクトルの方向と相対的な大きさを示すものである。

4. 頭部回転運動の倍率制御による画像安定化

4.1 安定化の原理

理想的なHMDシステムの場合，すなわちロボットに搭載されたカメラの視野角がHMDと等しく，ロボット頭部が操作者の頭部運動に対して正確に時間遅れなく制御されるならば，表示される画像の流れはちょうど操作者の頭部運動を打ち消すものとなり，操作者がどのように頭部を回転させるかに関係なく世界全体は静止して見える。これは人間の前庭動眼反射 (VOR: vestibulo-ocular reflex) のメカニズムと矛盾しない視覚提示が行われることに相当する。しかしながら，これまでの議論で，撮像系と提示系で視野角が異なる場合には，空間の変形により提示物体の空間的な位置が不自然に移動することが示された。この現象は頭部運動による前庭感覚と提示される視覚との不一致を生み，いわゆる simulator sickness [24] の直接的な引き金となる。

本論文では，シンプルな方法で上記の不具合を緩和する手法を提案する。すなわち，遠隔ロボットあるいはVR空間中のバーチャル人間の頭部回転運動を適切な倍率で拡大・縮小することにより，提示される画像の流れが通常の状態，すなわち操作者側と遠隔側の視野角が等しく，頭部運動が一致するように制御される状態と等価にする方法である。

広角カメラを利用する場合を例にとって説明する。図5において，(a)はカメラとHMDの視野角が一致し

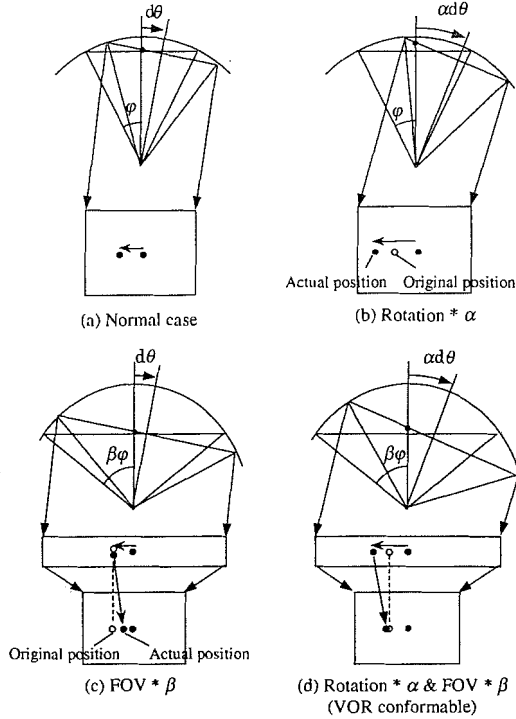


図5 頭部回転スケージングにおける画像上の点の流れ
 Fig.5 Flow of the image on the screen when FOV and/or head rotation scaled

ており遠隔側のロボット頭部回転角が操作者のそれと等しくなるよう制御した場合、すなわち理想的な条件である。ここで、操作者が頭部を右へ回転させると提示される画像の中の点は左へ移動する。撮像系と提示系の視野角が等しい条件のままで (b) のようにロボットの頭部回転角が操作者の頭部回転角の α 倍になるように制御すると、 $\alpha > 1$ の場合は画像中の点の移動量は通常の場合より大きくなる。(c) のように遠隔側の視野角が HMD の β 倍の時は、 $\beta > 1$ ならばカメラによって得られる画像は縮小されて HMD に表示され、その結果頭部運動に伴う画像の流れは通常の場合より小さくなる。(d) では頭部運動角と視野角が両方スケージングされている。この場合、頭部運動角倍率 α による画像の流れの拡大・縮小と視野角倍率 β による画像の流れの縮小・拡大がちょうどキャンセルするように倍率を決定すれば、頭部運動に起因する画像の流れは通常の場合と等しくなり、一点注視時における VOR 適合の条件が満たされることになる。

ここで提案する頭部回転運動の倍率制御を行ったとしても、視野角の不整合が存在する限り提示される世界全体が歪んで見え、頭部運動に従って変形することには変わりないため、違和感を完全に除去することはできない。しかし、特定の注視点近傍における画像の流れの振る舞いを正常な場合と等価になるよう制御することにより、注視点近傍が動かず静止しているよ

うに感じさせることができ、少なくとも世界が自分の頭部にくっついて回ったり、逆方向に揺れたりするような現象を抑制する効果を持つと考えられる。

4.2 頭部回転倍率の導出

以下、3.3 節で導いた空間変形解析の結果に基づいて注視点近傍の画像の流れを安定化する手法を図6に示す。この図では、遠隔側の視野角が操作者側の視野角よりも大きい場合 (視野角倍率 $\beta > 1$) を示している。遠隔側と操作者側の視野角が異なるため、世界が奥行き方向に伸長されて知覚されることに関しては図3と同じであるが、操作者の頭部回転運動と比べて遠隔側の頭部を大きく回転させているところが異なる。

ここで、注目している点の方向が一定となるための条件を考える。操作者の頭部が θ 回転し、遠隔側のロボット頭部が $\alpha\theta$ 回転するものとする。すると、3.3 節の (14) 式における最初の $-\theta$ 回転操作 (右側の行列) が $-\alpha\theta$ 回転に置き換えられるので、回転後の点の位置は

$$P_o = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \rho_\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha\theta & \sin \alpha\theta \\ -\sin \alpha\theta & \cos \alpha\theta \end{bmatrix} P_r \quad (20)$$

により計算される。3.3 節と同様にこれを展開すると、

$$\begin{bmatrix} x_o \\ z_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r (\cos \theta \cos \alpha\theta + \rho_\varphi \sin \theta \sin \alpha\theta) \\ + z_r (\cos \theta \sin \alpha\theta - \rho_\varphi \sin \theta \cos \alpha\theta) \\ x_r (\sin \theta \cos \alpha\theta - \rho_\varphi \cos \theta \sin \alpha\theta) \\ + z_r (\sin \theta \sin \alpha\theta + \rho_\varphi \cos \theta \cos \alpha\theta) \end{bmatrix} \quad (21)$$

となる。微小回転角、すなわち $\theta \rightarrow 0$ のとき、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_o \\ z_o \end{bmatrix} &\approx \begin{bmatrix} x_r + z_r (\alpha - \rho_\varphi) \theta \\ x_r (1 - \alpha \rho_\varphi) \theta + \rho_\varphi z_r \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_r \\ \rho_\varphi z_r \end{bmatrix} + \theta \begin{bmatrix} (\alpha - \rho_\varphi) z_r \\ (1 - \alpha \rho_\varphi) x_r \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_i \\ z_i \end{bmatrix} + \theta \begin{bmatrix} (\alpha / \rho_\varphi - 1) z_i \\ (1 - \alpha \rho_\varphi) x_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

と計算され、速度ベクトル

$$\dot{OP}_o = \begin{bmatrix} (\alpha / \rho_\varphi - 1) z_o \\ (1 - \alpha \rho_\varphi) x_o \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \quad (23)$$

の形に整理される。ここでも、3.3 節と同様に微小回転角であることを利用して点 P_o に関する再帰的記述形式とした。

頭部回転による変形によって空間中の点の方向が変化しないためには、速度ベクトルの方向が直線 OP_o と一致しなければならないので、

$$\frac{(\alpha / \rho_\varphi - 1) z_o}{(1 - \alpha \rho_\varphi) x_o} = \frac{x_o}{z_o} \quad (24)$$

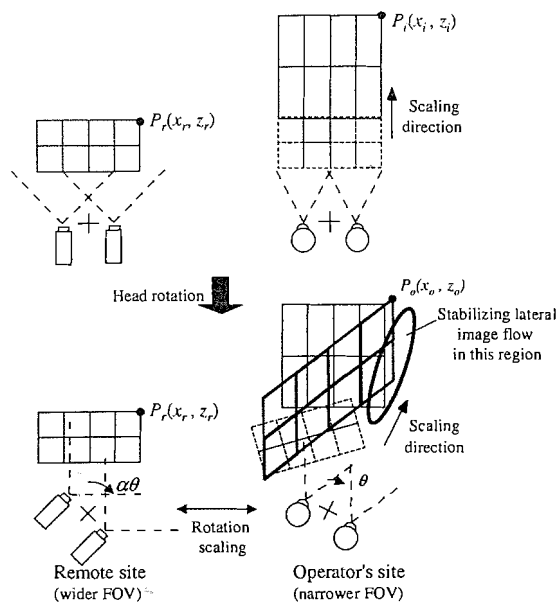


図6 頭部回転運動の倍率制御による画像安定化
Fig.6 Stabilization of the image by scaling rotational motion

であり、 $\eta_o \equiv x_o/z_o$ とおくと、

$$\frac{\alpha/\rho_\varphi - 1}{1 - \alpha\rho_\varphi} = \eta_o^2 \quad (25)$$

より

$$\alpha = \rho_\varphi \frac{1 + \eta_o^2}{1 + \rho_\varphi^2 \eta_o^2} \quad (26)$$

という結果が導かれる。ここで、 η_o は正面と注視点方向とのなす角度の正接であり、どれだけ正面から離れたところを注視しているかを示す変数である。正中面方向の場合、 $\eta_o = 0$ であるから、回転角倍率は単純に

$$\alpha = \rho_\varphi \quad (27)$$

となる。

(27) 式に従って、常に正中面方向の点を横方向に静止させるように頭部回転運動の倍率を制御する場合、空間中の点の速度ベクトルは (23) 式より、

$$\vec{OP}_o = \begin{bmatrix} 0 \\ (1 - \rho_\varphi^2)x_o \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \quad (28)$$

となるので、空間中のすべての点がそれぞれの瞬時に於いて左右 (x 軸) 方向には動かないことがわかる。特に、正中面上の点においては $x_o = 0$ であるから、速度の z 成分も 0 となり、左右、奥行き方向ともに静止しているように観察される。これにより、常時正中面方向付近を注視するタスクの場合、遠隔ロボットの頭部回転運動を視野角倍率に従って拡大/縮小して制御すればよいことが示唆される。この様子を図7に示

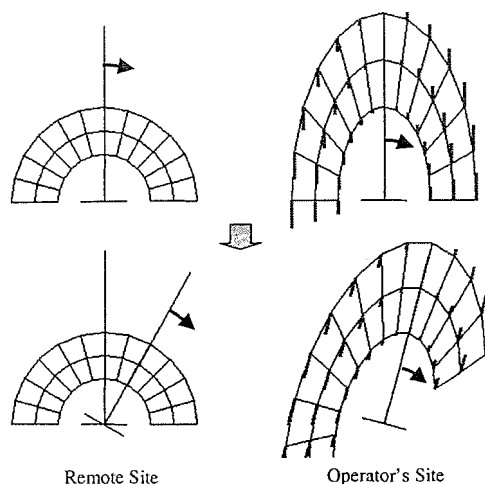


図7 頭部回転運動の倍率制御による画像安定化 (シミュレーション結果)
Fig.7 Stabilized world by rotation scaling (simulation result).

す。視野角倍率は図4と同じく $\rho_\varphi = 2$ である。頭部を右方向に回転中にちょうど正面を向いた状態 (上段)、ロボット頭部の回転角が右 30 [deg.]、操作者側はの回転角は 15 [deg.] (= 30/ ρ_φ) となった瞬間 (下段) を捉えたものである。頭部回転を行うと、正中面以外に位置する点はそれぞれの瞬時に於いて奥行き方向に移動するため物体は変形するが、正中面付近の点のフローが抑えられている様子が確認される。

5. 評価実験

5.1 実験システム

視野角不整合による影響と安定化の効果を検証するための実験を行った。このようなパラメータ変化による影響を実験的に検証する場合、バーチャル環境を用いるとパラメータの制御が容易であるため、本論文ではこのアプローチを用いる。しかしながら、本論文の目的でバーチャル環境を利用するにあたっては、極力時間遅れの影響を排除することが要求される。このため、システム全体の時間遅れを最小化するようにシステムの構築を行った。

運動計測部

操作者の頭部および上肢運動の計測には、トレイグジスタンスマスタ装置 [5] を使用した (図8)。本装置はリンク機構に取り付けられたロータリエンコーダにより頭部並進・回転運動 (6 自由度) の計測を行っている。運動計測の分解能は頭部運動の回転角に関しては 0.025 [deg.]、位置に関しては 1 [mm] の分解能を確保している。同時に上肢 7 自由度、ジョイスティック値などの計測も行っているが、本実験では使用されない。計測用リンク機構の関節角はパーソナルコンピュータ (NEC PC-9801BX, CPU i486SX 20MHz + ODP) に

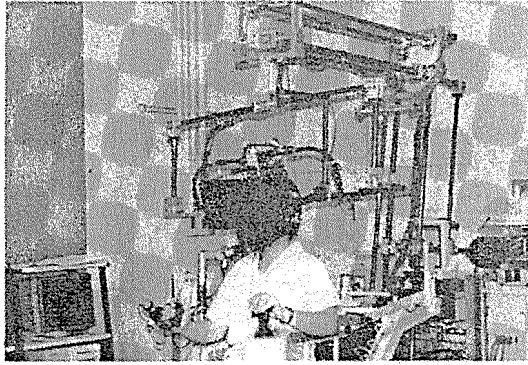


図8 実験システムで使用したテレグジスタンスマスタ装置

Fig.8 Telexistence master system used for experiment

装着したアップダウンカウンタボードにより計測され、数値として読み込まれる。計測値は共有メモリボード（インターフェース社製メモリバンク、ボード間伝送速度2 [Mbps]）を通して画像生成用グラフィックスワークステーションに転送される。運動計測のデータ更新レートは2 [kHz]である。

VR 環境管理・画像生成部

Silicon Graphics 社製 Indigo2 High IMPACT (CPU MIPS R4400 200MHz) を使用した。このコンピュータに複数の画像信号を同時に出力可能なボード (IMPACT Channel Option) を付加し、両眼提示用画像を1台で生成・出力する。また、計測用 PC との通信用に共有メモリボード (同上, ISA バス) を装着し、複雑なプロトコルを経由することなく特定のメモリアドレスを参照するだけで計測データを読み込めるようにしている。

操作者へ提示する画像の生成は、OpenGL を用いたプログラムにより行った。この際、オーバーヘッドを抑えつつバーチャル環境記述を容易に行うため、シンプルなシーングラフ管理と描画実行を行うクラスライブラリ [25] を利用した。グラフィックス画像生成のフレームレートは NTSC 信号のフィールドレート、60 [Hz] を確保している。以上の構成により、システム全体の遅延時間はほぼ純粋にグラフィックス画像生成による遅延のみに抑えることができ、本実験の場合は NTSC タイミングの RGB 信号 2 フレーム分の 1/30 [s] 程度であると見積もられる。

画像提示部

マスタ装置のヘルメットに固定された HMD [5] を使用した。視野角は水平 40 [deg.] で、解像度 720 × 240 のカラー TFT 液晶パネルを使用している。

5.2 実験方法

頭部回転運動に関するパラメータの整合性を評価するため、ターゲット追従実験を行った。作業性を評価

するにはテレグジスタンスを適用する場面を考慮した具体的な作業を行わせることが望ましいが、本論文では上肢の位置制御に関係する問題を切り離し、視覚提示と頭部運動の範囲で純粋に視覚による空間知覚と頭部運動との関連を調べるため、あえて単純な追従実験を適用する。

実験ではバーチャル空間において十字カーソルを被験者の頭部正面 1 [m] に固定し、被験者は頭部を回転させて移動するターゲットにカーソルを追従させる。ターゲットは被験者の頭部を中心とする半径 1 [m] の球の表面上を移動する。ターゲットの運動は、ランダム信号をローパスフィルタに通した波形により制御される。視野角不整合が存在する場合の空間歪みがわかるよう、背景として一辺が 1 [m] の市松模様からなるサイズ 5 [m] 四方の床を表示した。ターゲットおよび被験者の頭部運動回転角を記録し、角度波形の比較を行った。実験では、次の 4 通りの場合について比較を行った。

- (a) 通常の場合：バーチャルカメラの視野角を HMD の視野角と等しく設定し ($\beta = 1$)、バーチャルロボット頭部回転運動角が被験者の頭部回転運動角と等しくなるよう制御する ($\alpha = 1$)。
- (b) 回転運動のみをスケールリング：バーチャルカメラの視野角は HMD と等しく設定し ($\beta = 1$)、頭部回転運動角倍率のみを 2.3 倍とする ($\alpha = 2.3$)。この 2.3 という値は、使用している HMD の水平視野角が 40 [deg.] で、バーチャルカメラの水平視野角が 80 [deg.] である場合 ($\beta = 2$) を想定して (27) 式により計算されたものである。
- (c) 視野角のみをスケールリング：バーチャルカメラの視野角を HMD の 2 倍に設定し ($\beta = 2$)、頭部回転運動角は被験者の頭部回転運動角と等しいままにする ($\alpha = 1$)。
- (d) VOR に適合する場合：視野角と頭部回転運動角をともにスケールリングする。すなわち、バーチャルカメラの水平視野角を 80 [deg.] とし ($\beta = 2$)、頭部回転運動角倍率を 2.3 倍に設定する ($\alpha = 2.3$)。ターゲットとカーソルのみを提示し (d) の視野角倍率制御を行った場合、被験者がターゲットを視野のほぼ中央に捉え続けていれば通常の場合 (a) とほぼ等価な提示が行われていることになる。むしろ視野角倍率を設定しただけ被験者の頭部回転振幅が少なくて済むが、背景として提示した床の動的変形が外乱要素となる。

5.3 実験結果

図 9 にそれぞれの場合のターゲットと被験者の頭部運動の運動波形 (yaw 角) を示す。各々のグラフにおいて、細実線はターゲット、印付きの線は頭部の運動を示す。通常の場合と比較して、回転運動のみをスケール

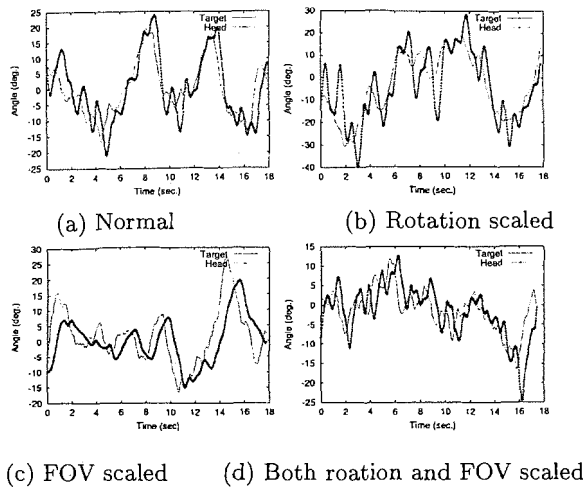


図9 頭部回転追従運動の波形
Fig.9 Head motion for target tracking.

リングした場合 (b) はオーバーシュートが大きくなっている。これは被験者がターゲットに追従するため頭部を回転させるとバーチャルロボットの頭部が必要以上に大きく回転し、その結果行き過ぎてしまうと解釈される。視野角のみをスケールした場合 (c) ではアンダーシュートあるいは時間遅れが大きくなっていることが確認される。これは、被験者がターゲットの移動 (提示画像内では縮小されて見える) に対して普通に頭部を回転させても必要な回転量が得られず、さらに余分に回転させなければならない状況が生じていると解釈される。これらに対し、視野角および回転運動の両方をスケールし VOR に適合する条件 (d) では、通常の場合と比較して被験者の挙動に大きな差異は認められない。

各々の条件での被験者の挙動を評価するため、ターゲットと被験者頭部の回転運動角の相互相関関数を算出した。すなわち、ターゲットの角度を $x(t)$ 、被験者の頭部回転角を $y(t)$ として、

$$\phi_{xy}(\tau) = \frac{x(t)y(t+\tau)}{\sqrt{x^2(t)}\sqrt{y^2(t)}} \quad (29)$$

の値をヨー角成分、ピッチ角成分のそれぞれについて計算した。結果を図 10 に示す。各々のグラフで、+印は通常の場合、×印は回転角のみをスケールした場合、*印は視野角のみをスケールした場合、□印は視野角と回転角の両方をスケールした場合 (VOR 適合条件) である。相互相関関数の特徴量として、以下の 2 種類の値について比較を行う。

- 極大値：追従タスクの正確さ
 - 極大値をとる時間遅れ：被験者の応答の時間遅れ
- これらの値を表 1 に示す。通常の場合と比較して、回転角もしくは視野角のどちらか一方のみをスケールした場合はそれぞれ極大値、時間遅れに被験者応

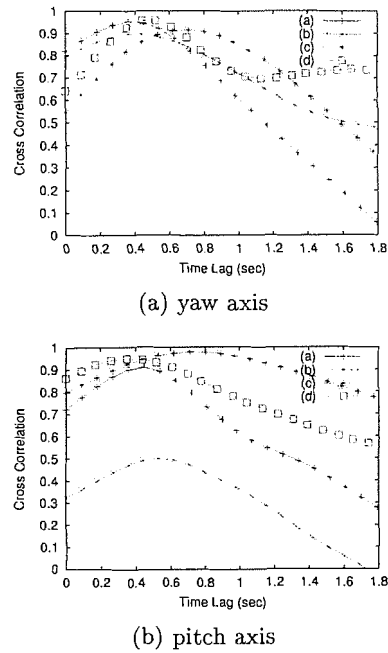


図 10 頭部回転追従運動の相互相関
Fig.10 Cross-correlation between target and head motion

表 1 頭部回転追従実験の相互相関極大値 (Max) と時間遅れ (Lag)

Table 1 Maximal value (Max) and its time lag (Lag) of cross correlation.

	Yaw		Pitch	
	Max	Lag [s]	Max	Lag [s]
(a)	0.95	0.36	0.91	0.45
(b)	0.90	0.36	0.50	0.53
(c)	0.91	0.71	0.98	0.80
(d)	0.96	0.52	0.95	0.35

答特性の悪化が見られるが、両方を VOR に適合するようスケールした場合は極大値、時間遅れともに通常の場合と遜色ない結果が得られた。

6. むすび

HMD を利用したトレイグジスタンスおよびバーチャルリアリティシステムにおいて、遠隔/バーチャル環境側と操作者側の眼間距離および視野角が異なる場合の空間知覚への影響を幾何学的に分析し、眼間距離の不整合は世界全体の拡大・縮小として、視野角の不整合は奥行き方向の拡大・縮小として知覚されることを整理した。この結果から、視野角の不整合が存在するシステムにおいて頭部運動を行った場合、世界が動的に歪んで観察されるとともに、不自然な提示画像のフローによりいわゆる simulator sickness を起こしやすい状況が生じることを指摘した。さらに、この状況が避けられないような場合にもある程度の操作性を維持するため、頭部回転運動倍率を制御することにより人間の前庭動眼反射のメカニズムに適合する自然な画像の流れを実現する方法を考案した。以上の解析を検証

するため、極めて単純ではあるが頭部回転運動に関する追従実験を行い、視野角不整合が存在する場合は追従性に悪影響が出るが回転運動倍率を適切に制御するとこの影響が緩和されることを確認した。

画像提示デバイスを用いて正確な立体画像提示を実現することと、操作者の運動に起因する動的な振る舞いは従来別々に取り扱われてきたが、本論文で示したように、立体画像提示の整合性が満たされていない場合は、たとえ時間遅れが皆無という理想的なシステムにおいても不自然な画像の流れにより不都合が生じる。本論文における解析は立体画像提示において空間知覚に影響する数々の要因のうち、幾何学的、かつ視野角と眼間距離という極めて限られた要素について扱ったものでしかないが、HMDが固定された立体ディスプレイとしてではなく実際に使用される状況で生じている現象を説明し問題の解決を探るための第一歩として位置づけるものである。

参考文献

- [1] 館 暉, 廣瀬通孝 編: バーチャルテックラボ, 日刊工業新聞社, 1992.
- [2] 館 暉: 人工現実感, 日刊工業新聞社, 1992.
- [3] I. E. Sutherland: A Head-Mounted Three-Dimensional Display, Proc. Fall Joint Computer Conference, AFIPS Conf. Proc., Vol. 33, pp. 757-764, 1968.
- [4] 館 暉, 荒井裕彦: テレイグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 4, pp. 314-326, 1989.
- [5] 前田太郎, 荒井裕彦, 館 暉: 頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 655-665, 1992.
- [6] 館 暉, 安田賢一: テレイグジスタンス・マニピュレーション・システムの設計と評価, 日本電気学会論文誌, Vol. 115-C, No. 2, pp. 172-181, 1995.
- [7] W. Robinett and J. P. Rolland: A Computational Model for the Stereoscopic Optics of a Head-Mounted Display, Presence, Vol. 1, No. 1, pp. 45-62, 1992.
- [8] L. F. Hodges and E. T. Davis: Geometric Considerations for Stereoscopic Virtual Environments, Presence, Vol. 2, No. 1, pp. 34-43, 1993.
- [9] J. P. Rolland and W. Gibson: Towards Quantifying Depth and Size Perception in Virtual Environments, Presence, Vol. 4, No. 1, pp. 24-49, 1995.
- [10] 通産省アールキューブ研究会編: アールキューブ, 日刊工業新聞社, 1996.
- [11] 畑田豊彦: 疲れのない立体ディスプレイを探る, 日経エレクトロニクス, Vol. 444, pp. 205-223, 1988.
- [12] 杉原敏昭, 宮里 勉, 中津良平: 焦点調節補償機能を有するHMD: 3DDAC Mk. 4, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 4, No. 1, pp. 261-268, 1999.
- [13] 大石峰士, 館 暉: シースルー型HMDにおける視覚パラメータの較正法, 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 911-918, 1994.
- [14] 大倉典子, 大石峰士, 館 暉: シースルー型HMDにおける視覚パラメータの距離に関する較正法, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 580-582, 1995.
- [15] 内海 章, Paul Milgram, 竹村治雄, 岸野文郎: 仮想空間表示における奥行き知覚誤差の要因について, 計測自動制御学会 Human Interface News & Report, Vol. 9, No. 3, pp. 295-302, 1994.
- [16] M. R. Mine: Characterization of End-to-End Delays in Head-Mounted Display Systems, Tech. Rep. TR93-001, Dept. of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, 1993.
- [17] 廣瀬通孝, 木島竜吾, 佐藤洋一, 石井威望: シースルー型HMDを用いた仮想空間による実空間の修飾の研究, 第6回ヒューマン・インターフェイス・シンポジウム論文集, pp. 1-8, 1990.
- [18] 江村 暁, 館 暉: センサフュージョンによる実時間頭部運動計測法, 日本電気学会論文誌, Vol. 115-C, No. 2, pp. 302-310, 1995.
- [19] 横小路泰義, 菅原嘉彦, 吉川恒夫: 画像と加速度計を用いたHMD上での映像の正確な重ね合わせ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 589-598, 1999.
- [20] R. Azuma: A Survey of Augmented Reality, Presence, Vol. 6, No. 4, pp. 355-385, 1997.
- [21] Y. Ohta and H. Tamura ed.: Mixed Reality—Merging Real and Virtual Worlds, Ohmsha, 1999.
- [22] D. B. Diner and D. H. Fender: Human Engineering in Stereoscopic Viewing Devices, Plenum Publishing Corporation, 1993.
- [23] 柳田康幸, 館 暉: 運動感覚と視覚の融合の仮想環境へ及ぼす効果, 計測自動制御学会 Human Interface News & Report, Vol. 9, No. 4, pp. 467-472, 1994.
- [24] 中川千鶴, 大須賀美恵子: VE酔い研究および関連分野における研究の現状, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 3, No. 2, pp. 31-39, 1998.
- [25] 柳田康幸, 館 暉: クラスを用いた仮想環境の構成法, 日本電気学会論文誌, Vol. 115-C, No. 2, pp. 236-244, 1995.

(2001年12月6日受付)

[著者紹介]

柳田 康幸 (正会員)



1990年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了, 同大学先端科学技術研究センター助手。1997年同大学院工学系研究科助手, 2001年同大学院情報理工学系研究科助手, 同年(株)エイ・ティー・アール知能映像通信研究所客員研究員を経て(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)客員研究員, 現在に至る。博士(工学)。日本音響学会, 計測自動制御学会, 日本ロボット学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本視覚学会などの会員。

館 暉 (正会員)



1973年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻博士課程修了, 工学博士。同年東京大学工学部助手。1975年通産省機械技術研究所所員, その後主任研究官, 遠隔制御課長, バイオロボティクス課長。その間1979年から1980年, マサチューセッツ工科大学客員研究員。1989年東京大学先端科学技術研究センター助教授, 1992年同教授, 1994年同大学院工学系研究科教授, 2001年同大学院情報理工学系研究科教授, 現在に至る。