

# 固定スクリーン型視覚提示装置を用いた トレイグジスタンス視覚系の構築手法

柳田 康幸, 前田 太郎, 舘 暲

## Design of Fixed-screen-based Telexistence Visual System

Yasuyuki YANAGIDA, Taro MAEDA and Susumu TACHI

**Abstract:** Visual display systems based on Immersive Projection Technology, such as CAVE and CABIN, are considered to be effective platforms for VR applications. However, these kinds of visual displays, as well as conventional CRT displays and other kinds of Head-Tracked Displays, have not been utilized for exact telexistence in real environment, which requires appropriate stereoscopic image sequences reflecting the operator's head motion. In this paper, a method to provide the operator with natural three-dimensional sensation of presence using a fixed screen is presented, focusing on the consistency of the perspective transform performed at remote site and the operator's site.

**Keywords:** *telexistence, fixed screen, head-tracked display, immersive projection technology, perspective transform, projection*

### 1. はじめに

VRにおける視覚提示システムとして、CAVE[1]やCABIN[2]のような大型のスクリーンを利用した没入型投影技術 (Immersive Projection Technology, 以下 IPT) が注目を集めている。これらのシステムによる視覚提示効果は非常に良好であり、VRの視覚提示装置として様々なアプリケーションを実行するプラットフォームとしての展開が期待される。

しかしながら、これらのディスプレイの現在までの利用形態はコンピュータグラフィックス画像の提示や多面テレビとしてのビデオ再生などが主流であり、操作者の頭部運動による視点移動に実時間で対応した正確な実環境の立体表示、すなわち実空間へのトレイグジスタンスには利用されていない。このような利用形態は IPT に限ったことではなく、一面のスクリーンあるいは CRT を用いたシステムなどの、スクリーンが周囲の空間に対して固定された視覚提示システム(Head-Tracked Display: HTD)全体に共通の傾向である。実際、操作者に対して視覚的に正確な三次元環境提示を行うトレイグジスタンスシステム(TELESAR[3-6], TOPS[7]など)に利用されているのは頭部搭載型装置(Head-Mounted Display: HMD)のみであり、IPTをそのような用途に用いた事例は存在しない。

近年、複数の IPT を結んで実写画像をやりとりし、臨場感通信を行おうという試み[8]が行われるなど、IPTにおいて CG 画像だけでなく実写画像のコンテンツやアプリケーションが注目され始めている。このような背景からも、IPTにおいて実写画像による正確な三次元空間の実時間提示が求められている。現在活発に研究開発が行われている Image Based Rendering 技術 [9-11]を利用すれば、三次元現実世界を一旦記録した上で自由な視点からの画像を生成して提示することができ、この技術を用いれば記録された世界の中で立体視を行いつつ動き回することは可能である。しかし、この場合も実環境の中を実時間で行動し相互作用を及ぼすことはできない。

本論文では、CAVE, CABIN などの IPT やその他の HTD を含むスクリーン固定型視覚提示装置を用いてトレイグジスタンスシステムを構築する場合に、画像の生成系と提示系の間で透視変換の整合性を確保するという観点から解析を行い、操作者の頭部運動に対応した正確な立体画像表示を行うための手法を提案する。また、これに基づくカメラシステムの設計法について述べる。

### 2. 固定スクリーンを利用することの利点

IPT 型ディスプレイの利点の一つは、操作者の周囲を囲む大型スクリーンを利用することにより、システムが必要とする物理的空間の大規模化と引き替えに圧倒的な視

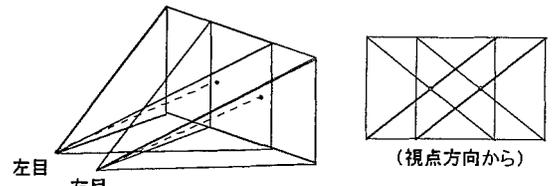
野角を実現したことである。この際、スクリーンや画像再生デバイスを頭部搭載とせず周囲の空間に固定することにより高性能のデバイスが利用可能となり、広視野化の際に必要な解像度や明るさを確保している。さらに、固定スクリーンの利用による特徴として、操作者が頭部回転運動を行ったときに必要な画像の変化が比較的小さくなり、見直し動作に対して安定した環境の提示が行えることも IPT の視覚提示効果を高めている要因であると指摘されている。

CAVE の設計者である Cruz-Neira らは、トラッキング誤差による提示画像への影響を、頭部並進運動と回転運動（頭部回転中心から目の位置までのずれにより生じる並進運動を含む）について、HMD, CRT および CAVE 方式それぞれにおいて、頭部運動のトラッキング誤差が存在する場合にスクリーン上に提示される画像の角度誤差を算出し、CAVE 方式の利点を主張している[1]。この解析において、頭部並進運動に対する CAVE と HMD との比較では、CAVE において視点と提示される仮想物体との距離がスクリーンまでの距離とほぼ等しい場合に誤差がほとんど生じなくなる点を除いては CAVE 方式の絶対的な優位性を見出すことはできない。むしろ、特徴的なのは頭部回転運動を伴う場合であり、この場合には HMD がトラッキング誤差を直接的に反映する一定の角度誤差を常に伴うのに対して CRT や CAVE ではその影響がなく、提示画像の角度誤差が小さく抑えられる結果が得られている。このように、IPT が高度な視覚提示品質を実現しているキーポイントの一つは、周囲の空間に対して固定されたスクリーンを用いていることにより、操作者の頭部運動に対して安定した画像を提示可能なことであると考えられる。

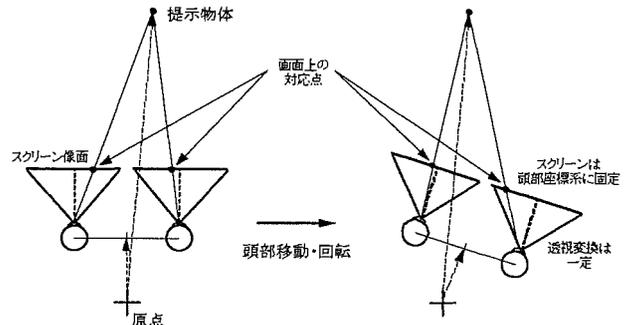
### 3. 固定スクリーンをトレイグジスタンスに利用する際の問題点

#### 3.1 問題の概要

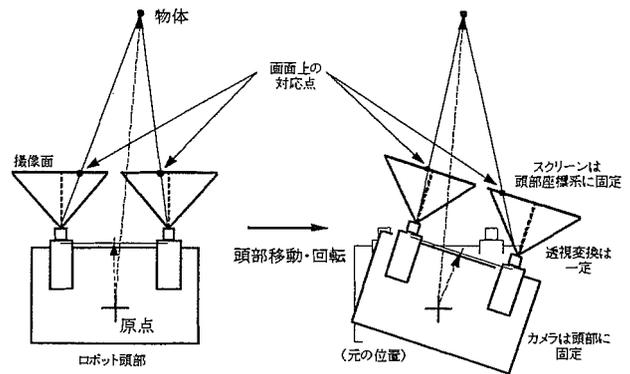
本研究の目的は、上記のような利点を持つスクリーン固定型ディスプレイを頭部運動追従型トレイグジスタンスシステムに適用することにより、操作者に対して負担が少ないシステムを構築することにある。しかしその一方で、このように固定されたスクリーンを用いた視覚提示システムにおいて操作者が頭部運動（体幹運動による並進も含む）を行った場合、視点から見たスクリーンの位置と大きさが実時間で変化するので、スクリーンに提示する画像を生成するための透視変換パラメータを実時間で調整することが必要になる。コンピュータグラフィックス画像を提示する場合は画像を一枚生成する度に透視変換を設定できるので何ら問題はないが、実写画像を



(a) ビューイングボリュームの形状



(b) 提示系における頭部運動への対応



(c) 撮像系における頭部運動への対応

図1 HMD を使用したシステムの透視変換

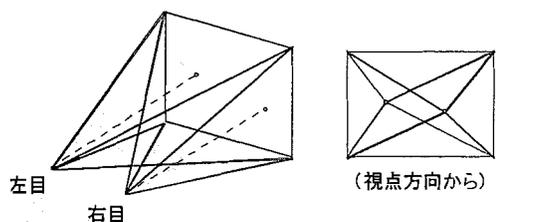
Fig.1 Projection for Systems Using HMD

カメラで撮影して実時間で提示する場合には、撮像系の透視変換がカメラの光学系により決定されているので調整が困難である。

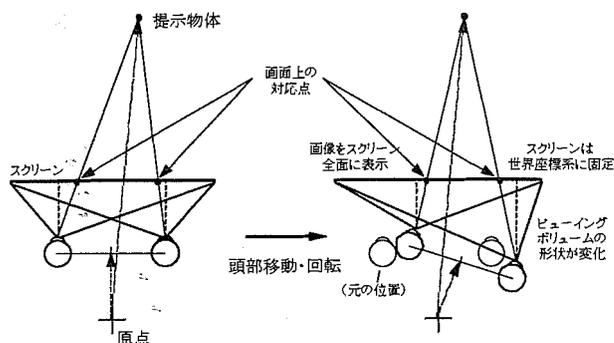
筆者らは、この問題の解決が IPT を実空間へのトレイグジスタンスに利用するための鍵であると考えている。以下、HMD を利用したシステムとスクリーン固定型システムとの具体的な対比を行うことにより上記の問題を明確にする。

#### 3.2 HMD と固定スクリーンの透視変換

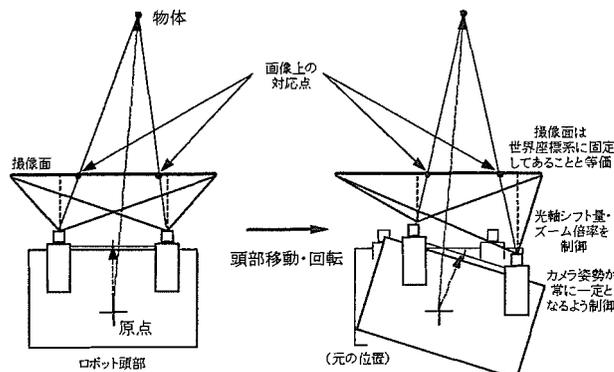
両眼輻輳角と視差を手がかりとして正確な立体視を行う場合、画像の生成系と提示系の対応付けを適切に行うことは重要である。すなわち、撮像系（画像生成系）と提示系は対にして設計・運用されるべきであり、撮像系と提示系においてそれぞれ視点と撮像面もしくは提示面とで構成される透視変換におけるビューイングボリューム（四角錐）の形状を一致させることが必要である。こ



(a) ビューイングボリュームの形状



(b) 提示系における頭部運動への対応



(c) 撮像系における頭部運動への対応

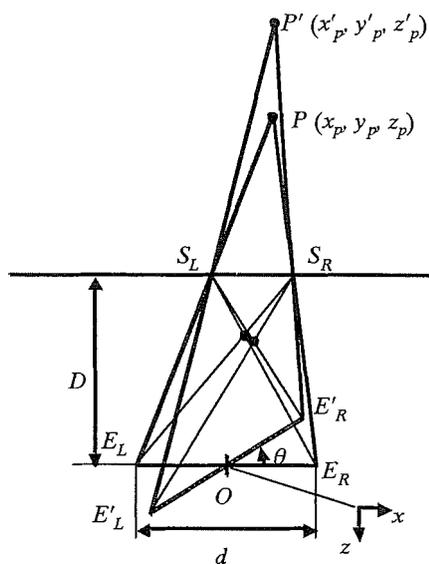
図2 スクリーン固定型システムの透視変換  
(Type A: 非対称可変四角錐、CG用/撮像側で対応)

Fig.2 Projection for Systems Using Fixed Screen

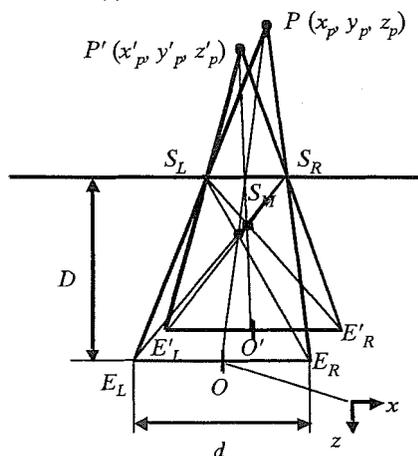
(Type A: off-axis variable-shaped projection used for CG)

のビューイングボリュームの形状およびその頭部運動に対する挙動は視覚提示装置の種類により異なる。

図1(a)に典型的なHMDを使用した場合のビューイングボリュームの形状、(b)にその頭部運動への対応を示す。最も一般的なHMDでは、スクリーン像が前額面に対して平行で、目からスクリーンに下した垂線の足がスクリーン中央となるように設計されている(無限遠点に対して100%オーバーラップ)。この場合、光軸に対して上下左右対称な透視変換を用いるのが適当であり、画像生成に必要なパラメータは左右の視点間距離と視野角のみである。HMDの場合はスクリーンが頭部に対して固定されているので、操作者が頭部運動を行ったとしても目とスクリーンとの位置関係は変化せず、従って撮像側の投影変換は常に一定でよい。このようなビューイングボリ



(a) 回転運動による影響



(b) 並進運動による影響

図3 頭部運動に追従しない画像提示を行った場合の影響

Fig.3 Effect of using non-head-tracked stereo images

ームの形状と頭部運動に対する性質を考えると、仮想環境を提示する場合には常に一定の上下左右対称な透視変換を用いればよく、また実環境へのトレイグジスタンスにおいては普通のカメラを用いることができる。さらに、頭部運動を行った時に左右それぞれの視点・スクリーンの組と遠隔/仮想環境との位置関係が等しく変化するので、図1(c)のように左右のカメラの位置関係を固定し(通常はロボット頭部に眼間距離分だけ離して平行に配置して)それを操作者の運動に追従するよう制御すればよい。

一方、IPTなどの固定スクリーン型システムにおいて、コンピュータグラフィックス画像の提示に用いられているビューイングボリュームの形状と頭部運動への対応をそれぞれ図2(a), (b)に示す。ビューイングボリュームは左右それぞれの視点を頂点としスクリーン面(あるいは画像表示ウィンドウ)を底面とする四角錐であり、この

場合は頂点から底面へ下した垂線の足は一般にスクリーンの中央ではない。言い換えれば、視点と視野中心とを結ぶ直線が投影面に対して斜めになっている状況である。また、操作者の頭部運動により目とスクリーンの位置関係が実時間で変化するため、上記の四角錐の形状を実時間で更新する必要がある。この操作をコンピュータグラフィックス画像の生成において行うことは容易であるが、こうしたシフト光学系はごく一部の特殊なレンズで実現されているのみであり、実環境の立体提示を行う際にビューイングボリューム制御が行えない通常のカメラをそのまま用いることはできない。

### 3.3 頭部運動追従の必要性

固定スクリーンの利用により比較的安定した画像提示が行えることは既に触れたが、それは頭部運動に追従した画像提示を行わなくてもよいことを意味するものではない。このことを明確にするため、仮に固定した通常のステレオカメラを用いて画像提示を行っている時に操作者が頭部運動を行った場合、どのような影響が生じるかについて解析を行う。通常のステレオカメラをスクリーン方向へ向けて固定し撮影した画像を提示したまま操作者が頭部を回転・並進運動させた場合、提示される物体位置に生じる影響を図3に示す。初期状態において操作者はスクリーン正面を向いており、図中で左右視点位置はそれぞれ  $E_R, E_L$  にあって、その状態で点  $P$  の映像がスクリーン上の点  $S_R, S_L$  に投影されているものとする。点  $P$  は操作者から見てスクリーンの遠方に位置するよう描かれているが、スクリーン上の右目、左目の対応を逆にすることにより手前側の点も全く同様の議論が成り立つ。操作者の眼間距離を  $d$ 、操作者の両眼中央  $O$  からスクリーンまでの距離を  $D$  と表記しておく。

図3(a)に示されるように、操作者が両眼の中心を中心に角度  $\theta$  だけ頭部を回転させた場合、視点の位置はそれぞれ  $E'_R, E'_L$  となるが、この状態でスクリーン上の画像が更新されない場合、点  $P(x_p, y_p, z_p)$  は点  $P'$  の位置に存在するよう見える。両眼中央  $O$  を原点にとり、 $x$  軸を右側、 $z$  軸をスクリーン手前側(図の下側)にとると、点  $P'$  の  $x$  座標、 $z$  座標はそれぞれ

$$x'_p = D \frac{\alpha \cos \theta + (\alpha^2 - \gamma^2 \beta^2) \sin \theta + \gamma^2 \beta \sin \theta \cos \theta}{\beta - (\cos \theta + \alpha \sin \theta)} \quad (1)$$

$$z'_p = D \frac{\cos \theta + \alpha \sin \theta - \gamma^2 \beta \sin^2 \theta}{\beta - (\cos \theta + \alpha \sin \theta)} \quad (2)$$

と表される。ただし

$$\alpha = x_p / z_p \quad (3)$$

$$\beta = 1 + \frac{D}{z_p} \quad (4)$$

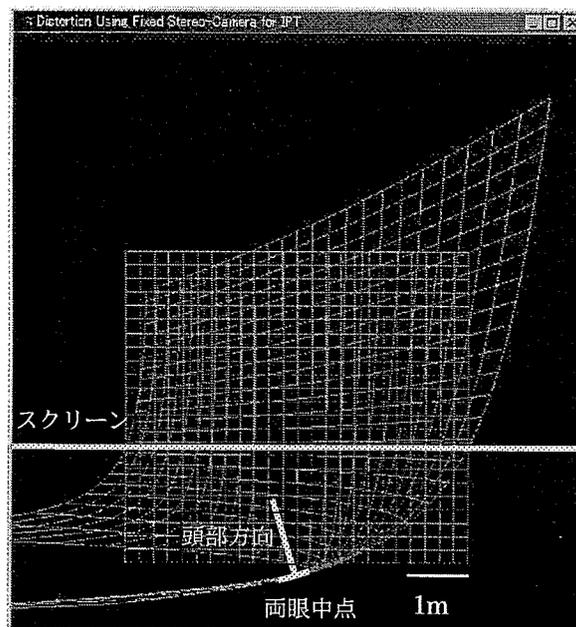


図4 頭部運動に追従しない画像提示時に頭部回転運動を行った場合の空間歪み

Fig.4 Distortion of the space using non-head-tracked images

$$\gamma = \frac{d}{2D} \quad (5)$$

である。この式の導出には、点  $P', S_L, E'_L$  および  $P', S_R, E'_R$  がそれぞれ一直線上にあるための条件を用いた。

計算された空間歪みの様子を図4に示す。ここで用いているパラメータ値は、眼間距離  $d$  が 6.5 [cm]、頭部回転角  $\theta$  が 16 [deg]、両眼の中央からスクリーンまでの距離  $D$  が 2.4 [m] である。計算に用いた格子点は奥行き方向が 0.25 [m] から 6 [m] まで、横方向が左右 3 [m] ずつの範囲内で、ともに 0.25 [m] 刻みである。スクリーン近傍を除いて、空間全体が大きく歪んだ形で操作者に提示される結果となることが示される。

次に、操作者頭部の平行移動による影響を図3(b)に示すが、こちらは単純である。操作者の両眼中点位置が原点  $O$  から  $O'(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  へ平行移動した場合、画像上の点は  $P$  から  $P'$  へ動いて観察される。スクリーン上に投影された点  $S_R, S_L$  の中点を  $S_M$  とすると、

$$\overrightarrow{OS_M} = -\frac{D}{z_p} \overrightarrow{OP} \quad (6)$$

である。直線  $OP, O'P'$  はともに点  $S_M$  を通るので

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OP'} &= \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'P'} = \overrightarrow{OO'} - \frac{z_p}{D} \overrightarrow{OS_M} \\ &= \overrightarrow{OO'} - \frac{z_p}{D} (\overrightarrow{OS_M} - \overrightarrow{OO'}) \\ &= \overrightarrow{OP} + \left(1 + \frac{z_p}{D}\right) \overrightarrow{OO'} \end{aligned} \quad (7)$$

となる。これは、点  $P$  がスクリーンより手前 ( $z_p > -D$ )

ならば操作者と同じ方向へ、遠方 ( $z_p < -D$ ) ならば操作者と逆方向へ、点  $S_M$  を中心として空間全体が圧縮・伸長しながら動くことを示している。スクリーンまでの距離と同じ位置にあるすべての点は頭部運動による影響を受けず、このような点およびスクリーン近傍の点は頭部運動による影響が小さくなっている。

人間が自然に頭部を動かした場合、視点の移動は両眼中点を中心とする回転成分と、首からのオフセットに伴う平行移動成分とを合成したものとなる。このため、操作者の頭部運動により世界全体が歪むことが示される。

### 3.4 カメラの光軸方向の問題

ビューイングボリューム形状制御の他に、もう一つの問題は、頭部回転運動を行ったときに前額面とスクリーンとの姿勢が変化し平行でなくなってしまうことである。提示面と平行でない撮像面に投影された画像は、二次元的な操作だけでは本来の画像を復元できず、バーチャルなスクリーンを想定してテキストチャマッピングなどにより三次元的な補正を行わない限りは正確な輻輳・視差情報を操作者に提示することができない。三次元グラフィックスハードウェアの性能向上が著しい現在ではテキストチャマッピングを普及価格帯のパーソナルコンピュータ上でほぼ実時間処理することが可能になっており、この要求はもはやコスト的にそれほど高くつくものではなくなっている。しかしながら、この処理を行うと画像取得から提示までの処理過程が一段階増えることになるので、頭部運動に追従した実時間提示という観点からは歓迎されることではない。さらに、HMD 利用システムで行われているようなロボット頭部に固定したカメラを用いると、光軸方向がスクリーンの端を向いてしまい、有効な画像提示領域が著しく小さくなってしまいう問題が残る。

従来、固定スクリーンを用いて実写画像の立体提示を行う場合は、あらかじめカメラの光軸をある注視点へ向けておき、その注視点近傍の視差をディスプレイ上に表示するという手法がよく用いられてきた。こうした立体画像撮影・提示方式はそもそも撮像系と提示系とでビューイングボリュームの形状や位置関係が異なっているので、輻輳と視差を手がかりとした正確な空間提示は行えない。しかしながら、こうした方式に従って立体画像を提示した場合の距離認識誤差に関する解析[12]などが行われており、提示スクリーンに対して傾いた撮像面により得られた画像を無造作にスクリーンへ表示することにより生じる悪影響を容易に推察することができる。

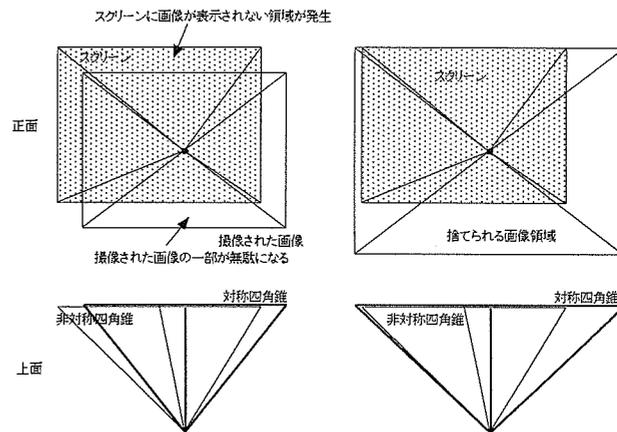


図5 非対称四角錐ビューイングボリュームの対称四角錐による代替

Fig.5 Substituting symmetric projection for off-axis projection

## 4. トレイグジスタンス視覚系の構築手法

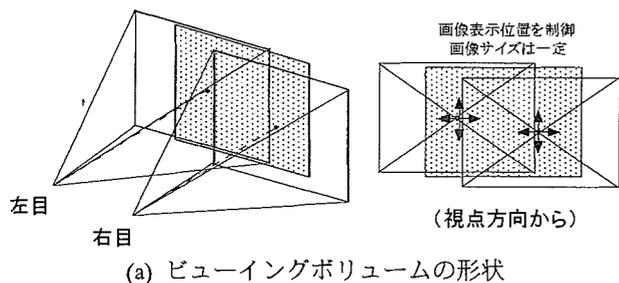
前章の議論より、スクリーン固定型視覚提示システムを用いてトレイグジスタンスシステムを構成する場合の課題は、以下のようにまとめられる。

1. 操作者の頭部運動をトラッキングして、視点とスクリーンの位置関係に対応したビューイングボリューム形状制御を行うこと。
2. カメラの撮像面が常にスクリーンと平行になるよう制御すること。この課題は、単純な二次元的画像処理（位置調整および拡大縮小）のみでシステムを構築可能とし、スクリーンの有効表示領域をなるべく損なわないことから来る要請である。

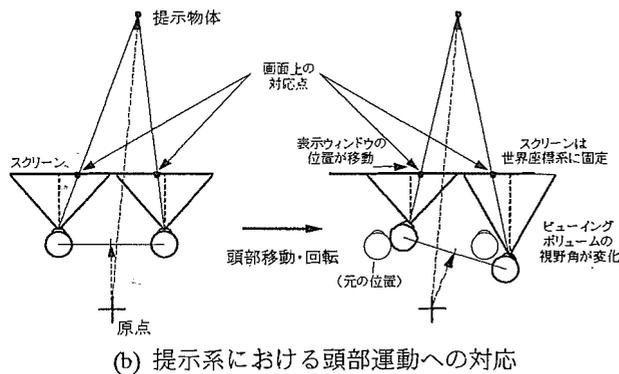
これらの課題に対して、操作者の視点とスクリーンとの位置関係変化に追従して実時間で適切な対応をとることができれば、スクリーン固定型提示装置を用いたトレイグジスタンス視覚系が実現できる。

上記のタスクをシステムへ実装するにあたって、撮像系と提示系のどちらにどの役割を分担させるかによっていくつかの選択肢が存在する。なお、ここではカメラにより2次元画像が生成されるまでを「撮像系」、それ以降最終的に操作者へ画像が提示されるまですべてを「提示系」と呼ぶ。最初に、コンピュータグラフィックス画像提示の場合と同様に、撮像（画像生成）系においてすべて対応する方法が考えられる。この場合、システムは以下の構成で実現される。

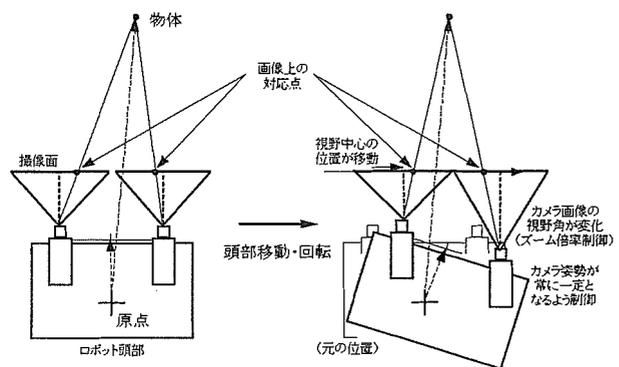
Type A: 撮像系における透視変換のビューイングボリューム形状（非対称四角錐）を実時間で制御するために、光軸方向とズーム倍率を実時間で制御可能な特殊なカメラを用いる。画像提示系はCG画像を提示する手法（図2）と全く同一である。



(a) ビューイングボリュームの形状



(b) 提示系における頭部運動への対応



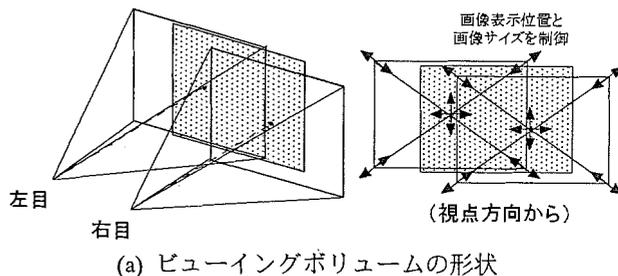
(c) 撮像系における頭部運動への対応

図6 スクリーン固定型システムの透視変換と撮像・提示系の役割  
(Type B: 対称視野角可変四角錐)

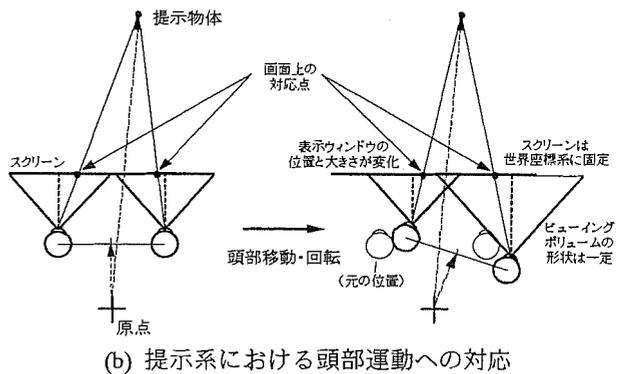
Fig.6 Projection transform for fixed-screen system  
(Type B: Symmetric projection with variable field of view)

このように特殊なカメラを設計することも問題解決の一つの方向であるが、本論文ではさらに光軸が撮像面に対して垂直で、光軸に関して上下左右対称な視野を持つ通常のカメラを利用してレイグジスタンスシステムを実現する方法を提案する。これはすなわち、ビューイングボリューム形状制御と等価な作業の全体または一部を画像提示系において行うことにより実現するというアプローチである。

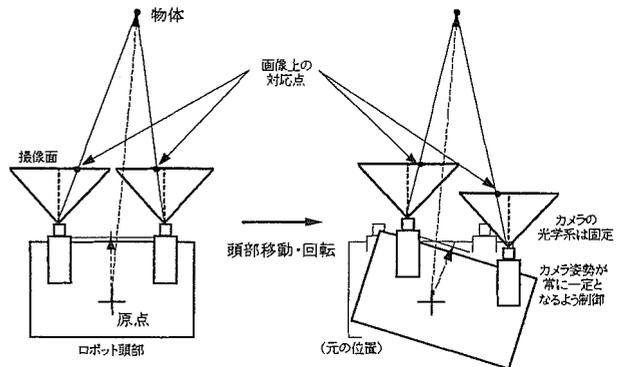
前述の課題 1 において、カメラにより撮影された画像全体が無駄なくスクリーン上に投影され、かつスクリーンの全領域に常に画像が表示されるためには、視点とスクリーンにより構成される非対称四角錐の形状を撮像系により実現する必要がある。しかしながら、カメラで撮



(a) ビューイングボリュームの形状



(b) 提示系における頭部運動への対応



(c) 撮像系における頭部運動への対応

図7 スクリーン固定型システムの透視変換と撮像・提示系の役割  
(Type C: 対称視野角固定四角錐)

Fig.7 Projection transform for fixed-screen system  
(Type C: Symmetric projection with fixed field of view)

影された画像の端が無駄になる、あるいは必ずしもスクリーン全体に画像が表示されていなくてもよいという状況を許せば、この問題は撮像系における視野角（ズーム倍率）制御か、あるいは提示系におけるスクリーン上画像の表示位置制御および拡大縮小という問題に帰着する。

非対称四角錐形状のビューイングボリュームにより得られる画像を、対称四角錐形状のビューイングボリュームを用いて等価的に実現する方法を図 5 に示す。図 5 上半分は視点からスクリーン方向を見たもの、下半分はスクリーン上方から見た図である。視点からスクリーン面へ下した垂線の足が提示される画像の中央となるように、対称四角錐形状のビューイングボリュームにより生成（撮像）された画像を提示する。この際、非対称四角錐の場合と対称四角錐の場合とでスクリーン上に表示され

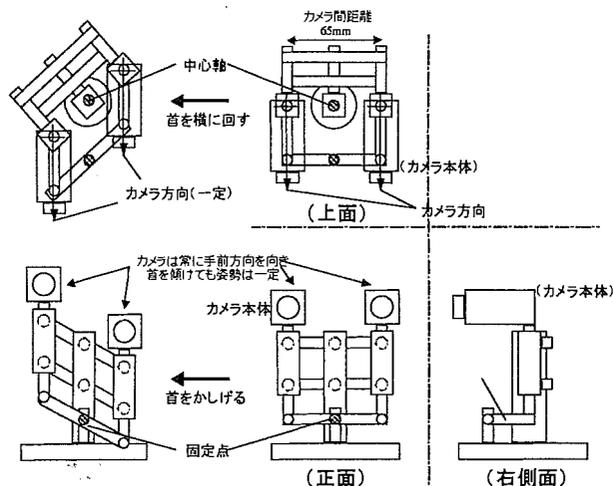


図8 姿勢保持機構のコンセプト

Fig.8 Concept sketch of constant-orientation link

場合と対称四角錐の場合とでスクリーン上に表示される画像が一致するようにしておけば、画像が表示されている部分に関しては全く等価である。図5左に示すように一般的には画像が表示されないスクリーン上の領域が生じたり、撮像された画像が有効に利用されないなどの損失が生じる。ここで図5右に示すように撮像系として広角のカメラを用いると、有効に利用されない画像領域の割合が大きくなるため画像解像度の面では不利であるが、操作者のある程度の動きに対してスクリーン全体をカバーしスクリーン上全ての領域に画像を表示することは可能である。なお、この操作において、生じる損失はこうしたスクリーンや画像の領域の問題のみであり、このことにより新たな画像歪みが生じるものではない。

光軸が撮像面と垂直な通常のカメラを用いる場合、撮像系と提示系の役割分担に応じて以下の2通りの方法が考えられる。

**Type B:** 画像提示系において、画像中央が視点からスクリーンへ下した垂線の足に一致するよう画像表示位置を制御し、表示画像サイズはスクリーン上で一定とする。この場合、頭部運動により視点のスクリーンからの距離が変化し画像を見込む視野角が変化するので、カメラのズーム倍率を実時間で制御する(図6)。

**Type C:** 通常のカメラを用い、ズーム倍率も一定とする。すなわち、ビューイングボリューム形状は常に一定である。スクリーンと視点の位置関係変化を吸収するため、画像提示系において Type B と同様に画像表示位置を制御するとともに、スクリーン上の表示画像サイズを制御して視野角を一定に保つ(図7)。

Type B の場合、画像提示系の処理は画像提示位置のソフトだけなので単純である。その反面、画像生成側でカメラのズーム倍率を操作者の頭部運動にあわせて実時間で制御することが必要であり、カメラのズーム倍率制御性能が所望のレベルを達成できるかどうかの実現の鍵となる。Type C の場合、カメラの光学系は固定であり、撮像系の構築が最も簡単となる。この場合、画像の拡大縮小操作が実時間で遅れを伴うことなく行われることが要求される。なお、提示系における画像の位置制御や拡大縮小は、電子的な操作および提示デバイスレベルの電気的/光学的操作などいくつかの選択肢が考えられる。市販のプロジェクタなどを利用する提示システムの場合、デバイスレベルでの操作は困難であり、電子的な画像処理装置を利用する方が妥当である。汎用的な PC もこのような画像処理装置として利用することが十分可能である。

以上、撮像系と提示系の役割分担に応じて3種類の方法を示した。

## 5. カメラシステムの設計

### 5.1 姿勢保持機構の設計

前章で述べた3種類の方法でシステムを構築する際に共通して必要なのは、図2(c)、図6(c)、図7(c)のように、操作者の頭部運動に関わらずカメラの姿勢を常に一定に保つことである。すなわち、操作者サイトの視点とスクリーンの位置関係を遠隔サイトにコピーした状況を想定して、スクリーンとカメラの撮像面が常に平行となるようにする。光軸が撮像面と垂直な通常のカメラを利用する場合は、光軸が常にスクリーンと垂直な関係を保つようにする。

この機能を実現するにあたって、カメラの姿勢を頭部に対して独立に制御する方法も考えられるが、姿勢を一定に保つという目的のためには、いたずらに制御自由度を増やさず、カメラが体幹に対して常に同じ姿勢をとるようなリンク機構を利用することが得策であると考えられる。

図8に姿勢保持機構のコンセプトを示す。必要な機能は、首を傾ける動作(rolling)と左右回転動作(yawing)の2自由度に対してカメラの姿勢を一定に保つことである。傾きのようなpitching動作に関しては、左右の視点の位置変化が等しくなるので、機構全体を平行移動させればよい。最終的に、本機構全体を3自由度平行移動可能なステージの上に乗せて頭部運動に追従させれば、スクリーン固定型視覚提示装置を用いて頭部運動に対応したトレイグジスタンス視覚システムを構築できる。

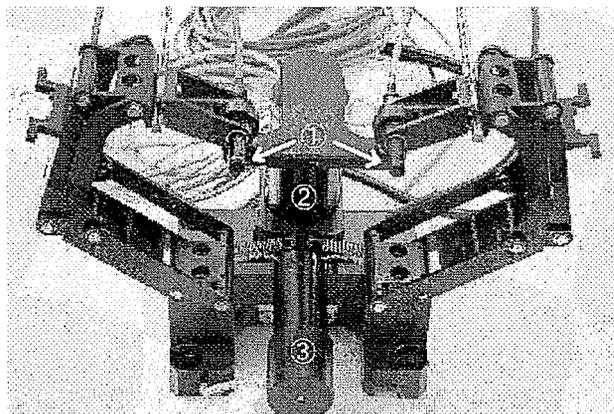


図9 試作した姿勢保持リンク機構：

① カメラ、②yaw 軸モータ、③ roll 軸モータ

Fig.9 Prototype of the constant-orientation link:

① cameras, ② motor for yaw axis, ③ motor for roll axis

このコンセプトモデルに基づいて、姿勢保持機構の設計・試作を行った。試作した機構を図9に示す。機構は、カメラ位置制御用の2自由度シリアルリンクと、姿勢保持用の平行リンクおよびスライド機構の組み合わせで構成されている。本機構は、人間の首の運動がyaw方向の回転に対して高速である特性を考慮し、yaw方向の慣性モーメントが小さくなるよう設計した。シリアルリンクはroll方向回転軸の先にyaw方向回転軸を備えており、両側の平行リンク機構とその先の前後方向スライド機構により、シリアルリンクの先に取り付けられたカメラの姿勢を一定に保つようになっている。また、本機構だけで人間の首の運動にある程度対応できるように、シリアルリンクにオフセットを持たせることにより、純粋な回転自由度だけでなく人間の頭部回転に伴い発生する自然な並進運動が生じるようになっている。リンクのオフセットは上下方向125[mm]、前後方向50[mm]であり、普通の成人のサイズと比べてやや小さいが、オフセット値を大きくすると慣性モーメントの増加が生じるので、運動性能とのバランスを考えてこのようなサイズとした。

制御に必要な性能を決定するにあたり、人間のyaw方向の頭部回転運動に関しては最高速で動かした場合120[deg]の範囲を0.4[s]で往復することを実測により概算し、これに単純な等加速度加減速プロファイルを当てはめて、最大角加速度を $1.2 \times 10^4$  [deg/s<sup>2</sup>]と算出した。可動範囲はyaw方向70[deg]、roll方向30[deg]とする。カメラ耐荷重は、接続ケーブルなどの影響を考慮して200[g]としている。

本機構の2自由度の関節をDCモータ(Maxon社製、roll方向RE025-055: 20[W]、yaw方向RE036-072: 70[W])により駆動し、ロータリーエンコーダ(多摩川精機製OIH35、3000[ppr]、逡倍なし)により角度を読み出す。姿勢保持

機構の制御は、汎用のパーソナルコンピュータを用いて行っている。搭載カメラは直径7[mm]の小型カメラ(東芝製IK-SM43H: 1/4インチ41万画素)および同カメラ用レンズ(東芝製JK-L04S: 焦点距離 $f = 4$  [mm]、水平視野角51[deg]、垂直視野角39[deg])を使用している。

## 5.2 提示用画像操作部の構築

本姿勢保持リンク機構を用いて、Type C方式による画像提示システムの実装を行った。画像の二次元的なシフトと拡大・縮小は、パーソナルコンピュータ(CPU Pentium-II 450MHz、メモリ128MB)用のビデオ出力機能付きグラフィックスボード(カノーブス社製Spectra2500および同社製VideoPort 600)により行った。本システムでは、画像入力をMicrosoft DirectX(バージョン5以降)の機能の一部であるDirectDraw Video Port Extensionを利用して行い、画像のシフトおよび拡大縮小をDirectDrawにおけるブロック転送時の転送先バッファ領域指定により行った。この構成は、システムバスを経由することなくグラフィックスボード上で画像の入力・操作・出力を行うことを意図したものである。この結果、1/60秒ごとに画像表示位置とサイズを制御できることを確認した。

## 6. むすび

IPTディスプレイを含むスクリーン固定型視覚提示装置を使って頭部運動に追従した実写画像による正確な三次元空間提示を実時間で行おうとした場合、操作者の頭部運動に従ってビューイングボリュームの形状が変化することと、カメラ撮像面とスクリーンとの平行が保てないことに問題があることを明らかにした。この解析に基づいて、スクリーン固定型装置を用いて三次元実空間を正確に提示するための原理を示した。すなわち、操作者が頭部運動を行っても視点間距離を一定に保ったままカメラの光軸をスクリーンと垂直な姿勢に保持する仕組みを導入し、かつビューイングボリュームの形状を制御するという方法である。ここで行われるビューイングボリューム形状制御は、非対称四角錐の形状を撮像系で制御するような光学系を実現する方法以外に、対称四角錐形状のビューイングボリュームを用いて生成された画像を用い、提示画像の位置とサイズを制御することにより等価的に実現可能であることを示した。最後に、このようなシステムを構築する際に必要な技術要素である、カメラ姿勢保持機構の設計と試作、および画像の実時間操作を行うサブシステムの構築を行い、本手法が工学的に実現可能であることを示した。

本論文で提示した手法は、固定スクリーン型視覚提示システムにおいて、頭部運動に対応したコンピュータグ

ラフィックス画像の立体提示と同等の機能を実写画像に対して実現するものであり、理想的な光学系の下では近似のない正確な輻輳と視差の手がかりを操作者に提示できる。その意味で、CAVEにおける頭部回転運動に対する良好な特性[1]は全て本手法を適用したトレイグジスタンスシステムに受け継がれる。

以上の結果により、操作者の頭部回転運動に対して安定した画像提示が可能なスクリーン固定型画像提示システムを用いてトレイグジスタンスを行うための筋道が開かれたと考える。本手法は固定スクリーンを利用する視覚提示システムに対して汎用的な技術であり、IPTのような大規模な装置以外にも、通常のHTDシステム、例えば一面スクリーンシステム、CRTや液晶ディスプレイのように比較的簡易なトレイグジスタンス視覚システムにも適用可能である。今後の展開としては、操作者の周囲全体の見回し動作を必要としないが高精度で安定した画像提示が要求されるような用途、例えば遠隔手術システムなどへの応用が考えられる。また、引き続き、複数スクリーンで構成されるIPTに対して本手法を適用する際の問題解析と解決を行うことを予定している。

#### 謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会による未来開拓学術研究推進事業 No. 97I00401 の一環として行われた。プロジェクトリーダーの東京大学国際・産学共同研究センター 満淵 邦彦 教授に感謝する。

#### 参 考 文 献

- [1] C. Cruz-Neira et al.: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, Proc. of SIGGRAPH '93, pp.135-142 (1993)
- [2] 廣瀬, 小木, 石綿, 山田: 没入型多面ディスプレイ (CABIN) の開発, 日本バーチャルリアリティ学会第 2 回大会論文集, pp.137-140 (1997)

- 回大会論文集, pp.137-140 (1997)
- [3] 館, 阿部: テレイグジスタンスの研究 第 1 報 - 視覚ディスプレイの設計 -, 第 21 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.167-168 (1982)
- [4] 館, 荒井: 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.1, pp.314-326 (1989)
- [5] 前田, 荒井, 館: 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, 安田: 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, 電気学会論文誌 C 編, Vol.115-C, No.2, pp.172-181 (1995)
- [7] M.S. Shimamoto: TeleOperator/telePresence System (TOPS) Concept Verification Model (CVM) Development, Recent Advances in Marine Science and Technology '92, HI, USA, pp. 97-104 (1992)
- [8] 廣瀬, 小木, 山田, 玉川, 金: CABIN 間通信におけるビデオアバタの生成, 第 9 回「人工現実感」研究会予稿集, pp.43-46 (1999)
- [9] 苗村, 金子, 原島: 実空間光線情報に基づくリアルな仮想空間の生成, 日本バーチャルリアリティ学会第 1 回大会論文集, pp.35-38 (1996)
- [10] 廣瀬, 宮田, 谷川: 二次元実写画像を用いた三次元仮想空間の生成, Human Interface News & Report, Vol.11, No.2, pp.209-214 (1996)
- [11] W. Mark, G. Bishop, L. McMillan: "Post-Rendering 3D Warping," Proceedings of 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics, pp.7-16 (1997)
- [12] 高野: 見やすさと距離認識誤差を考慮した仮想物体表示法の評価について, 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.5, pp.347-352 (1998)

(1999 年 7 月 2 日受付)