

VR およびテレグジスタンスシステムにおける 視覚パラメータの整合性に関する一考察

柳田 康幸・舘 暲
(東京大学 大学院工学系研究科 計数工学専攻)

A Study on the Consistency of Visual Parameters in VR/Tele-existence Systems

Yasuyuki YANAGIDA, Susumu TACHI
School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656 Japan
E-mail: {yanagida, tachi}@star.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract: If the visual parameters of the remote system or the projection transform used to generate image of virtual environments are inconsistent with those of the display device, the operator recognizes the remote/virtual environment as a strange world. For the systems using HMD, field of view and the distance between two viewing points have to be considered as such parameters. In this paper, this strangeness, which have been reported as operator's subjective impression, is analyzed geometrically. Furthermore, a method to reduce the strangeness by controlling the scaling factor of the rotational motion of the head of the remote robot /virtual human is shown.

Keywords: tele-existence, virtual environment, head-mounted display (HMD), field of view, vestibulo-ocular reflex (VOR)

1 はじめに

VR およびテレグジスタンスシステムにおいて、視覚提示は極めて重要な役割を占めている。視覚提示を行う場合、リモートあるいは仮想世界側でカメラやコンピュータグラフィックスにより画像を生成し、操作者側で提示を行うが、操作者に対して良好な臨場感を与えるためには、画像生成系と提示系の対応づけを的確に行い、操作者に与える空間知覚手がかりに関して正確な提示を行うことが重要である。両眼立体視により視覚提示を行う場合、より高度な没入感を与えることが可能になるが、その反面、誤った両眼手がかりが提示されると、極めて臨場感を損なうだけでなく、疲労や不快を喚起する原因となりうるので、注意深い設計が必要となる。

人間が視覚的に空間を知覚する際に特に重要なのは輻輳、両眼視差、水晶体調節であるが、現在の一般的な両眼立体視による視覚提示デバイスでは、水晶体調節を除く手がかりを利用し、スクリーン上の像の位置と大き

さにより提示を行っている。立体画像提示の原理については数多くの研究[1][2]が行われており、HMD方式に関してはテレグジスタンスの研究を通して設計および評価が系統的に行われている[3][4]。

近年、HMDや液晶シャッターメガネなどの両眼立体視用デバイスが製品として市販され、さらに仮想環境の構築を容易にするソフトウェアの開発が進んだことにより、これらの組み合わせで簡単にVRシステムを構築することが可能になった。しかしながら、構築されたシステムの中には、残念ながら期待したほどの臨場感が得られていないものも存在する。例えば、表示されている物体がミニチュアのように見え、遠くにあるはずの物体が遠くに感じられなかったり、逆に遠近感が誇張され過ぎて疲れる、といった事例である。こういった現象は、多くの場合不適切な投影変換を用いて生成した画像を提示していることが原因であり、システム構築もしくはアプリケーション開発時の問題であると言える。

また、実環境へのトレイグジスタンスを考えた場合、リモート側と操作者側の視覚系パラメータの整合性が確保できない場合が想定される。例えば、アールキューブ構想[5]における利用形態のように異なる視覚系パラメータを持つ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したり、周囲の広い領域を見回すことが必要とされるタスクにおいて同時に広角の領域が視野内に入ってきた方が望ましい場合などである。

このように、画像生成系と提示系との対応関係が不的確であったり何らかの理由により理想的な条件を満たせない場合にどのような影響が生じるかについては、従来あまり議論されてこなかった。筆者らはこれまでに、HMDを使用したシステムについて、画像生成系と提示系との間の整合性が崩された場合に生じる影響を、視点間距離の相違、視野角の相違のそれぞれに関して仮想環境中での作業実験により評価してきた。現在までに、遠隔ロボットの腕の長さや視点間距離がそれぞれ操作者の側と一致している、もしくは完全に相似である場合に最も良い作業効率を得られることを確認する[6][7]とともに、視野角が異なる状況でも安定した作業を行うために、リモート/仮想環境側のロボット/仮想人間の頭部回転運動倍率を制御する手法を提案し、作業実験においてその有効性を確認した[8][9]。これらの実験においては、視点間距離の不一致は直感的に空間全体の拡大/縮小として認識されたが、視野角の不一致による空間の静的な歪みと、さらに頭部運動を行った場合に生じる動的な変形に関しては主観的報告しかなくされていない。

そこで本稿では、HMDを使用して両眼立体視を行うシステムにおいて、視点間距離および視野角の不一致が操作者の空間認識に及ぼす影響に関して幾何学的な解析を行い、空間の歪みと変形を定量的に記述する。また、視野角が異なる場合に頭部運動に伴う世界全体の不自然な動揺を抑えるための対策として、頭部回転運動倍率を制御する手法を幾何学的に導く。この導出に関しては、スクリーン上の点の流れに基づく解析と空間変形に基づく解析の2種類の方法により行い、同一の結果が導かれることを示す。

2 HMD使用時のパラメータ不整合による影響

2.1 HMDのパラメータ

HMDを使用する場合、操作者が運動しても目とスクリーンとの位置関係は変化せず、従って画像生成側の投影変換は常に一定である(図1)。仮想環境を提示する際は常に一定の透視変換を用いればよく、実環境へのトレイグジスタンスを行う場合は普通のカメラを用いてロボット頭部全体を操作者の運動に従って制御すれば

よい。典型的な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、パラメータは左右の視点間距離と視野角の2つである。

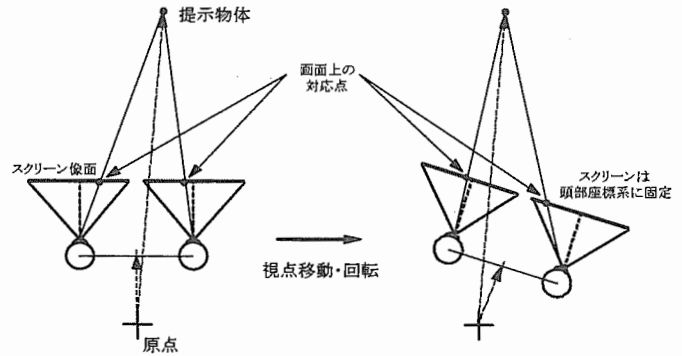


図1 HMDを用いたシステムにおける頭部運動と投影変換

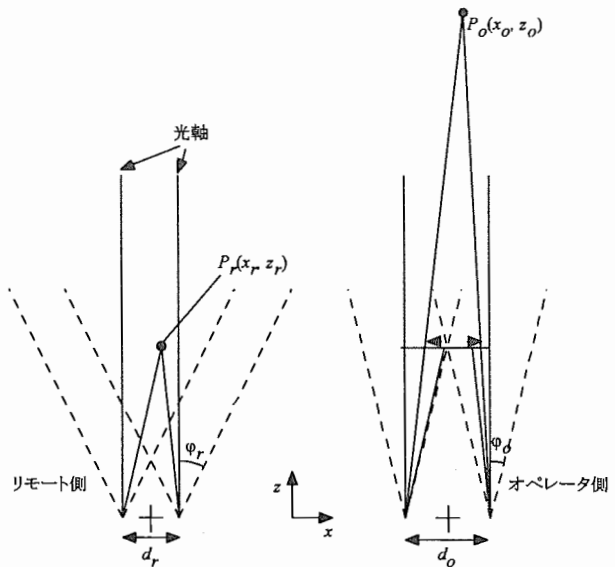


図2 視点間距離・視野角に関するパラメータ

ここで、リモート/仮想環境側(画像生成系)とオペレータ側(画像提示系)で視点間距離および視野角が異なる状況を考える。これらのパラメータを図2に示す。

両サイトの区別に関しては、リモート側を r 、オペレータ側を o で表し、左右に関しては右を R 、左を L と表す。リモート側、オペレータ側の片側視野角をそれぞれ φ_r, φ_o 、リモート側、オペレータ側の視点間距離をそれぞれ d_r, d_o と表記する。さらに、オペレータ側に対するリモート側の視野角倍率を β とすると、

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

である。また、片側視野角の正接の比を

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

と表しておく。それぞれのサイトにおいて左右視点の間点を原点とし、前額面右方向を x 軸に、光軸方向を z 軸にとることとする。

2.2 パラメータ不整合による空間の変形

リモート側の点 $P_r(x_r, z_r)$ を右、左の視点から見た角度をそれぞれ θ_{Rr} , θ_{Lr} と表すと、

$$\begin{aligned} \tan \theta_{Rr} &= \frac{-x_r + d_r/2}{z_r} \\ \tan \theta_{Lr} &= \frac{-x_r - d_r/2}{z_r} \end{aligned} \quad (3)$$

と記述される。オペレータ側の提示デバイスにおける画像上の対応点は、視野中心からの距離が ρ_φ 倍となる点にマッピングされる。すなわち、対応するオペレータ側の点 $P_o(x_o, z_o)$ は、左右それぞれの視点から光軸に対して

$$\begin{aligned} \tan \theta_{Ro} &= \frac{1}{\rho_\varphi} \tan \theta_{Rr} = \frac{1}{\rho_\varphi} \frac{-x_r + d_r/2}{z_r} \\ \tan \theta_{Lo} &= \frac{1}{\rho_\varphi} \tan \theta_{Lr} = \frac{1}{\rho_\varphi} \frac{-x_r - d_r/2}{z_r} \end{aligned} \quad (4)$$

なる角度をなす直線上に存在し、これらの直線の交点がオペレータ側の空間中に等価的に存在することになる。これらの直線の方程式は傾きと通る点の条件から

$$\begin{cases} z = -\frac{x - d_o/2}{\tan \theta_{Ro}} \\ z = -\frac{x + d_o/2}{\tan \theta_{Lo}} \end{cases} \quad (5)$$

と表されるので、連立させて解けば $P_o(x_o, z_o)$ が求められる。

$$\tan \theta_{Lo} \left(x - \frac{d_o}{2} \right) = \tan \theta_{Ro} \left(x + \frac{d_o}{2} \right) \quad (6)$$

より、

$$(\tan \theta_{Ro} - \tan \theta_{Lo})x = -\frac{d_o}{2} (\tan \theta_{Ro} + \tan \theta_{Lo}) \quad (7)$$

しかるに、(4)式より

$$\begin{aligned} \tan \theta_{Ro} - \tan \theta_{Lo} &= \frac{d_r}{\rho_\varphi z_r} \\ \tan \theta_{Ro} + \tan \theta_{Lo} &= -\frac{2x_r}{\rho_\varphi z_r} \end{aligned} \quad (8)$$

であるから、 P_o の x 座標は

$$x_o = \frac{d_o}{d_r} x_r \quad (9)$$

と求められる。オペレータサイトに対するリモートサイトの視点間距離の比を

$$\rho_d \equiv d_r / d_o \quad (10)$$

とおくと、 x 座標は単に

$$x_o = x_r / \rho_d \quad (11)$$

となる。これは、 x 軸方向の変形が視野角倍率に関係なく視点間距離倍率のみで決まることを示している。

これを直線の式(5)に代入して z 座標 (奥行き) を求めると、

$$z_o = -\frac{x_o - d_o/2}{\tan \theta_{Ro}} = -\frac{x_r / \rho_d - d_r/2 \rho_d}{\frac{1}{\rho_\varphi} \frac{-x_r + d_r/2}{z_r}} = \frac{\rho_\varphi}{\rho_d} z_r \quad (12)$$

と計算される。これは、 z 軸方向に関しては視点間倍率に従って拡大・縮小されるとともに、さらに視野角倍率に従って拡大・縮小されることを示している。

以上をまとめると、リモート側の点 $P_r(x_r, z_r)$ は、オペレータ側において点

$$P_o(x_o, z_o) = \left(\frac{x_r}{\rho_d}, \frac{\rho_\varphi z_r}{\rho_d} \right) = \frac{1}{\rho_d} (x_r, \rho_\varphi z_r) \quad (13)$$

にマッピングされる。

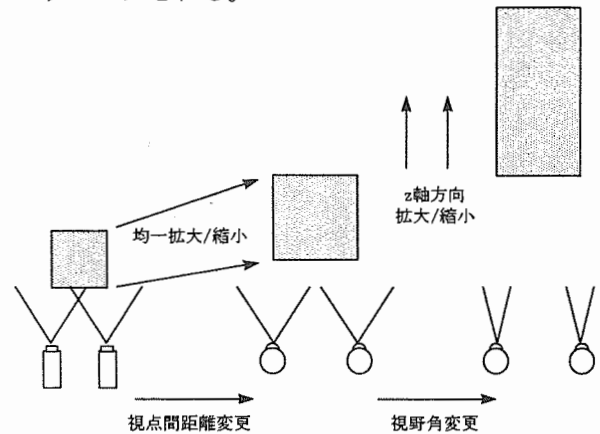


図3 視点間距離と視野角の相違による空間の変形

このように、画像生成系と提示系で視点間距離および視野角が異なるシステムにおいては、空間は単純な変形を伴って操作者に提示されることが示された。視点間距離が異なる場合は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・縮小されることがわかる。この様子を図3に示す。

2.3 頭部回転運動による動的変形と物体の移動

視点間距離のみが異なる場合には空間全体あるいは拡大・縮小あるいは逆に自分自身が縮小・拡大したものとみなして作業を行えば違和感を生じないが、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、空間が変形するよう感じられる。この様子を図4に示す。

上段左は広視野カメラを備えたリモートサイトの様

子であり、これをオペレータ側で視野角の狭い HMD を用いて提示すると、下段左のように世界全体が遠方に伸張されて知覚される。上段右のようにロボット頭部が回転した場合、オペレータ側では下段中央のように世界は回転した頭部の光軸方向へ伸張されるため、物体は細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。この場合、オペレータの正面にあった物体が頭部運動にくっついて変形しながら移動するように感じられる。逆に、リモート側が狭視野（望遠など）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頭部回転とは逆方向に移動するように感じられる。

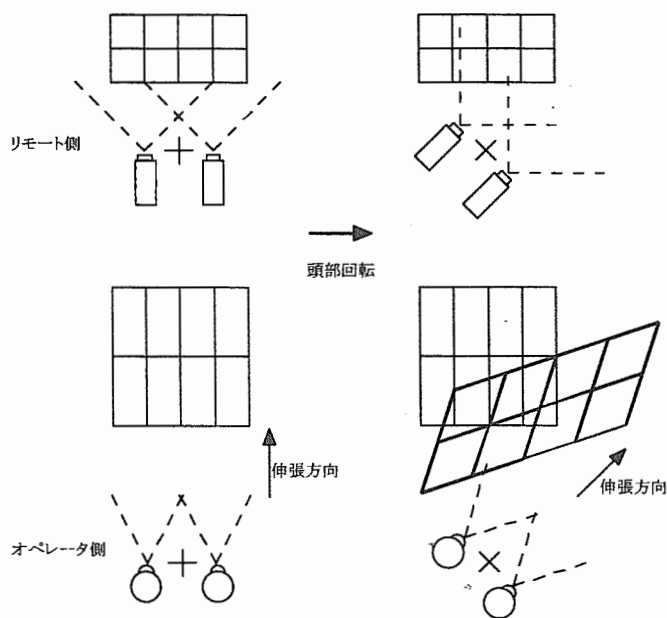


図4 視野角変換と頭部運動による世界の変形

3 頭部回転運動の倍率制御による画像の安定化

3.1 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あるいは使用する透視変換の視野角が HMD と等しく、(仮想) カメラの回転が操作者の頭部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。これは操作者の前庭動眼反射(VOR: vestibulo-ocular reflex)と矛盾しない視覚提示が行われていることを意味する。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、simulator sickness の直接的な引き金となる。

画面全域にわたり提示物体の安定化を行うことは困難であるが、視野角が異なる場合にリモート側の頭部回転運動倍率を制御することにより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同様のものにすることは可能である。以下、このための条件を2通りの観点から導出する。

3.2 スクリーン上の点の流れに基づく解析

視野角倍率が β の時に静止している物体が静止して見えるための頭部回転角倍率 α の値を求める。

以下、次の記号を用いる。

- D : 視点とスクリーンの距離
- x : スクリーン中心から注視点までの距離
- W : スクリーン中心からスクリーンの端までの距離 (スクリーン幅の半分)
- ξ : x と W の比

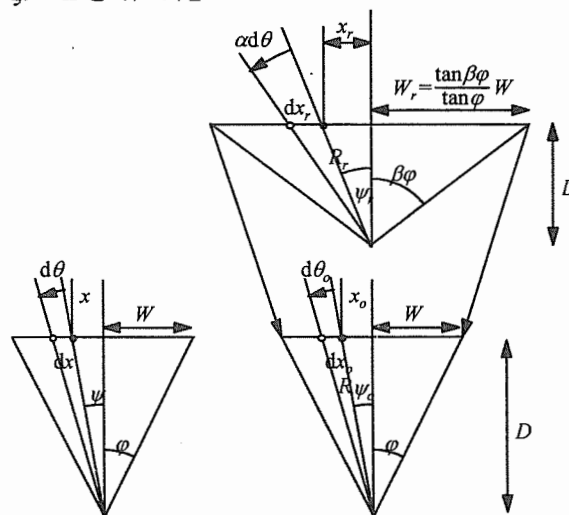


図5 視点を中心とした回転運動による物体像の移動と視野角変換

図5左(通常の場合)において、操作者は光軸方向となす角が ψ であるスクリーン上の点 x を注視しているものとする。頭部が視点を中心に $d\theta$ 回転すると、スクリーン上の点の位置は

$$dx = R d\theta / \cos \psi \quad (14)$$

だけ移動する。ここで、 R は視点と点 x との距離であり、

$$R = \sqrt{D^2 + x^2} = D / \cos \psi \quad (15)$$

であるから、

$$dx = \frac{D d\theta}{\cos^2 \psi} \quad (16)$$

と計算される。

リモートサイト(図5右上)での頭部回転角倍率を α とすると、頭部は $\alpha d\theta$ だけ回転するので、スクリーン上の点は

$$dx_r = R_r \alpha d\theta / \cos \psi_r \quad (17)$$

だけ移動する。通常の場合と同様に

$$R_r = \sqrt{D^2 + x_r^2} = D / \cos \psi_r \quad (18)$$

であるから、

$$dx_r = \frac{D \alpha d\theta}{\cos^2 \psi_r} \quad (19)$$

リモート側の画像は視野角倍率 β に従って圧縮/伸張されるので、オペレータ側画面(図5右下)上でのシフト量は

$$dx_o = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta \varphi} dx_r = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta \varphi} \cdot \frac{D \alpha d\theta}{\cos^2 \psi_r} \quad (20)$$

となる。これが元の dx に等しいという条件を満たすには、

$$\frac{\tan \varphi}{\tan \beta \varphi} \cdot \frac{D \alpha d\theta}{\cos^2 \psi_r} = \frac{D d\theta}{\cos^2 \psi} \quad (21)$$

よって頭回転角倍率は

$$\alpha = \frac{\tan \beta \varphi}{\tan \varphi} \cdot \frac{\cos^2 \psi_r}{\cos^2 \psi} \quad (22)$$

である。ここで、

$$\frac{x}{W} = \frac{x_r}{W_r} = \xi \quad (23)$$

であることを用いると、

$$\cos^2 \psi = \frac{D^2}{D^2 + x^2} = \frac{1}{1 + (x/D)^2} = \frac{1}{1 + \xi^2 \tan^2 \varphi} \quad (24)$$

$$\cos^2 \psi_r = \frac{D^2}{D^2 + x_r^2} = \frac{1}{1 + (x_r/D)^2} = \frac{1}{1 + \xi^2 \tan^2 \beta \varphi} \quad (25)$$

と表される。よって

$$\alpha = \frac{\tan \beta \varphi}{\tan \varphi} \cdot \frac{1 + \xi^2 \tan^2 \varphi}{1 + \xi^2 \tan^2 \beta \varphi} = \rho_\varphi \frac{1 + \xi^2 \tan^2 \varphi}{1 + \xi^2 \tan^2 \beta \varphi} \quad (26)$$

が導かれる。

あるいは、光軸方向となる角度の正接を

$$\eta = \tan \psi = \frac{x}{D} \quad (27)$$

と表し、これを用いて記述すると、リモート側の対応する量は

$$\eta_r = \tan \psi_r = \frac{x_r}{D} = \frac{\tan \beta \varphi}{\tan \varphi} \cdot \frac{x}{D} = \frac{\tan \beta \varphi}{\tan \varphi} \eta \quad (28)$$

であるから、

$$\cos^2 \psi = \frac{D^2}{D^2 + x^2} = \frac{1}{1 + (x/D)^2} = \frac{1}{1 + \eta^2} \quad (29)$$

$$\cos^2 \psi_r = \frac{D^2}{D^2 + x_r^2} = \frac{1}{1 + (x_r/D)^2} = \frac{1}{1 + \rho_\varphi^2 \eta^2} \quad (30)$$

と表される。よって回転角倍率は

$$\alpha = \rho_\varphi \frac{1 + \eta^2}{1 + \rho_\varphi^2 \eta^2} \quad (31)$$

と導かれる。

視野中心の場合、 $\xi = \eta = 0$ であるから、単純に

$$\alpha = \frac{\tan \beta \varphi}{\tan \varphi} = \rho_\varphi \quad (32)$$

となる。

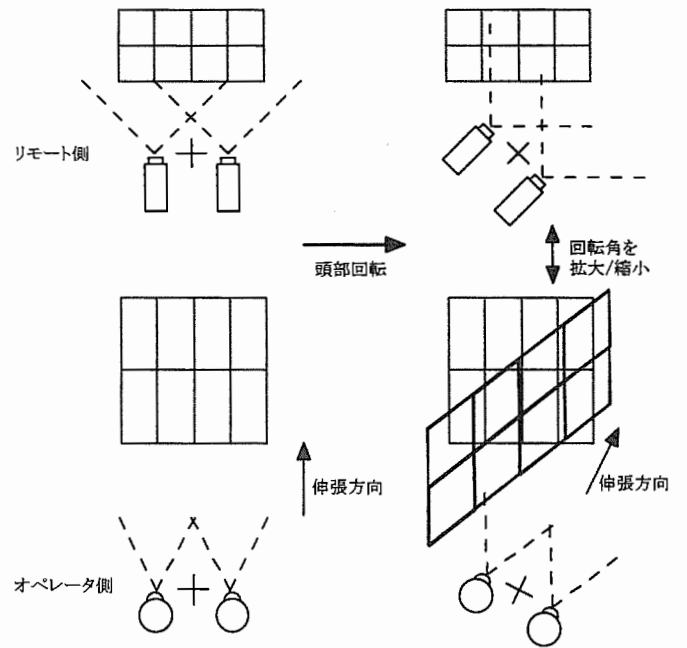


図6 頭部回転運動の倍率制御による画像安定化

3.3 両眼立体視時の空間変形に基づく解析

空間変形の解析に基づいた注視点近傍の画像安定化の原理を図6に示す。この図では、リモート側の視野角がオペレータ側の視野角よりも大きい場合を示している。リモート側とオペレータ側の視野角が異なり、(視野角倍率 β が1より大きいので)世界が横方向に圧縮されて表示され、光軸方向に伸張されて知覚されることに関しては図4と同じであるが、操作者の頭部回転運動と比べてリモート側の頭部を大きく回転させているところが異なる。

以下、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。オペレータの頭部が θ 回転し、リモート側のロボット頭部が $\alpha\theta$ 回転するものとする。すると、 θ 回転後のリモート側の点は視点中央を中心に $-\alpha\theta$ ほど回転しているので、オペレータ側に提示される点 $P_o(x_o, z_o)$ の頭部回転後の位置は以下のように計算される。まず、z軸方向の伸張・圧縮を元に戻してリモート側の位置を求めると、

$$P_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_o \\ z_o / \rho_\phi \end{bmatrix} \quad (33)$$

これを $-\alpha\theta$ だけ回転させると

$$P_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha\theta & \sin \alpha\theta \\ -\sin \alpha\theta & \cos \alpha\theta \end{bmatrix} P_1 \quad (34)$$

z 軸方向に伸長/圧縮して、

$$P_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \rho_\phi z_2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

さらに θ だけ回転を戻すと

$$P_4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} P_3 \quad (36)$$

xz 平面上で正面方向となす角について考えると、回転前は

$$\tan \psi_o = -\frac{x_o}{z_o} \quad (37)$$

であり、回転後は(33)式から(36)式を順次代入して

$$\begin{aligned} \tan \psi_4 &= -\frac{x_4}{z_4} \\ &= -\frac{\tan \psi_o (\rho_\phi + \rho_\phi^2 \tan \theta \tan \alpha\theta) - (\tan \alpha\theta - \rho_\phi \tan \theta)}{\tan \psi_o (\rho_\phi \tan \theta - \rho_\phi^2 \tan \alpha\theta) - (\tan \theta \tan \alpha\theta + \rho_\phi)} \end{aligned} \quad (38)$$

と計算される。回転後の点の見込み角が回転前の見込み角と一致する、すなわち

$$\tan \psi_4 = \tan \psi_o$$

となるためには、 $\eta = \tan \psi_o$ において、

$$\eta = -\frac{\eta(\rho_\phi + \rho_\phi^2 \tan \theta \tan \alpha\theta) - (\tan \alpha\theta - \rho_\phi \tan \theta)}{\eta(\rho_\phi \tan \theta - \rho_\phi^2 \tan \alpha\theta) - (\tan \theta \tan \alpha\theta + \rho_\phi)} \quad (39)$$

より、

$$(\rho_\phi^2 \eta^2 + (1 - \rho_\phi^2) \eta \tan \theta + 1) \tan \alpha\theta = \rho_\phi (1 + \eta^2) \tan \theta \quad (40)$$

であるから、微小回転角、すなわち $\theta \rightarrow 0$ の場合、

$$(1 + \rho_\phi^2 \eta^2) \alpha\theta = \rho_\phi (1 + \eta^2) \theta \quad (41)$$

よって

$$\alpha = \rho_\phi \frac{1 + \eta^2}{1 + \rho_\phi^2 \eta^2} \quad (42)$$

と計算される。この結果は、スクリーン上の点の流れに基づく解析結果 ((31)式) と一致する。

正中面上、すなわち $\eta = 0$ の場合、

$$\alpha = \rho_\phi \quad (43)$$

と求められる。これは、常時正中面方向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を意味している。

4 むすび

画像生成系と提示系の視点間距離と視野角が異なる場合の影響について、両者の影響を統合した形で幾何学的解析を行い、空間が変形する様子を明らかにした。その結果、視点間距離の不整合は空間全体の拡大・縮小に帰着するので手先などの他の運動学パラメータを同じ倍率で拡大・縮小すればよいが、視野角の不整合は奥行き方向のみの拡大・縮小をもたらすと同時に頭部回転運動により不自然な物体の変形と移動が生じることが幾何学的に確認された。このことは、これまでの作業実験における操作者の主観的な報告を裏付けるものである。また、この状況において、注視点における画像を安定させるための条件を幾何学的に導出した。

参考文献

- [1] 大越：三次元画像工学，朝倉書店 (1991)
- [2] 泉 (監修)：3次元映像の基礎，オーム社 (1995)
- [3] 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. 4, pp. 314-326 (1989)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 柳田，館：運動感覚と視覚の融合の仮想環境へ及ぼす効果，Human Interface News and Report, Vol.9, No.4, pp. 467-472 (1994)
- [7] Y. Yanagida and S. Tachi: Coherency of Kinesthetic and Visual Sensation in Virtual Reality, Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (IEEE-MFI '94), Las Vegas, Nevada, USA, pp.455-462 (1994)
- [8] Y. Yanagida and S. Tachi: A Method for Smooth Task Execution Under Different Master/Slave Visual Parameters, Proceedings of the ICAT'96, Makuhari, Chiba, Japan, pp.65-72 (1996)
- [9] 柳田，館：視覚パラメータの異なるテレイグジスタンスシステムにおける作業性改善の一手法，ロボティクス・メカトロニクス講演会 '97 講演論文集，Vol. B, pp.789-792 (1997)