

頭部運動に対応した固定スクリーン型 トレイグジスタンスシステムの構築

Fixed-Screen-Based Teleexistence System with Head Tracking

柳田康幸¹⁾, 齋藤慎太郎²⁾, 矢野誠一郎¹⁾, 前田太郎¹⁾, 舘 暁¹⁾

Yasuyuki YANAGIDA, Shintaro SAITO, Seiichiro YANO, Taro MAEDA, and Susumu TACHI

1) 東京大学 大学院情報理工学系研究科

(〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, yanagida@star.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 現在 日本アイ・ピー・エム株式会社

Abstract: We have proposed a method to realize lived-video-based real-time teleexistence visual system with fixed screen, and have designed elements to compose the system, i.e., a constant-orientation camera system and real-time 2D image shifting/resizing subsystem. In this paper, an overall system that can provide the user with exact 3D video image according to rotational and translational head motion is reported.

Key Words: *Teleexistence, Immersive Projection Technology, Fixed Screen, Motion Parallax*

1. はじめに

CAVE [1] や CABIN [2] などの、没入型投影ディスプレイシステム (Immersive Projection Technology: IPT) は、周囲の環境に対して固定されたスクリーンを利用しているが故に、ユーザの頭部運動に対して安定な環境提示を行うことが可能であり、これが IPT における良好な視覚提示効果を実現している要因の一つであると考えられる。従来、IPT はコンピュータグラフィックス(CG)により作成された画像提示のみに利用されてきたが、実写ビデオ画像を使用する実環境へのトレイグジスタンスに IPT を適用したいと考えるのは自然な流れである。

一方で、実環境へのトレイグジスタンスを行うシステムとしては、これまでロボット頭部に搭載したステレオカメラと頭部搭載型ディスプレイ (Head-Mounted Display: HMD) のみが利用されてきた。これは、通常のカメラで得られる画像が光軸に対して左右対称であり、ロボット頭部に搭載したステレオカメラと HMD との組み合わせがちょうど正確な実写立体画像提示を行う条件に合致していたことによる。IPT において正確な実写立体画像を提示しようとする、視点とスクリーンとの位置関係、すなわち時変非対称透視投影がネックとなり、実現されていなかったと考えられる。筆者らはこの問題に着目し、カメラの光軸をスクリーン面に対して一定に保つ撮像システムと画像の二次元的なシフト・拡大縮小により視点とスクリーンとの位置関係を再現し、もって正確な両眼立体視を実現する手法[3][4]を提案するとともに、そのための要素技術として姿勢保持機構を持つカメラシステムの設計試作[5]を

行ってきた。

本稿では、さらに人間の体幹運動に起因する並進運動への対応を組み込んだシステム全体の構築について報告する。

2. 設計指針

一般に人間の頭部運動を再現するためには並進3自由度、回転3自由度の合計6自由度が必要であるが、本システムではカメラの光軸方向が固定されるため、5自由度となる。別の見方をすると、左右のカメラの配置自由度はそれぞれ並進3自由度(姿勢保持のため回転自由度はなし)、併せて6自由度から、カメラ間距離が一定である拘束条件1自由度を差し引いて5自由度となる。

カメラの姿勢を保持しつつスクリーンに対する2つの視点の位置関係を制御する機構は roll 軸と yaw 軸の2自由度を持っているので、並進3自由度を有する台の上に本機構を搭載すれば完全なシステムとなる。今回のシステム構築では、並進3自由度のうち上下動を除いた2自由度を実装した。このため、頷きや背伸びのような運動には対応しないが、左右の首振り、首を傾げる動作、前後左右の体幹運動に対応して歪みのない三次元空間を提示することが可能になると期待される。

3. システム構成

3.1 全体構成

システムは、頭部運動計測系、撮像系、画像処理系、および提示系で構成される。全体構成を図1に示す。

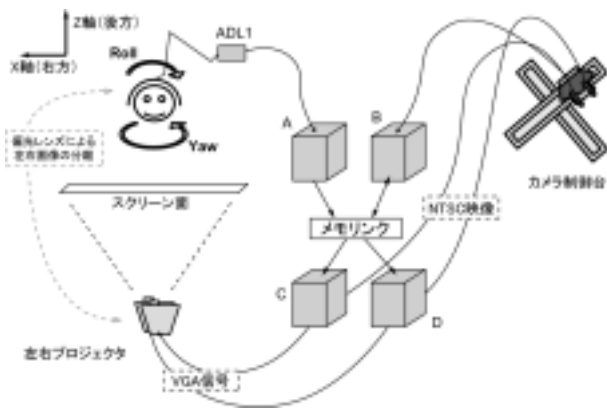


図 1 システム構成

3.2 頭部運動計測系

頭部運動計測には、ShootingStar社製 ADL-1 を用いた。ADL-1 が出力するデータは、シリアル回線(RS-232C, 115.2kbps)を通して計測用 PC (Pentium-II 266MHz, MS-DOS 6.2) に取り込まれる。その際、ADL-1 本体のキネマティクス計算を使用せず、関節の角度データをそのまま出力し、PC 側で頭部(両眼中央)位置・姿勢の順キネマティクス計算を行った。この計算で基準座標系から頭部座標系への座標変換行列が得られるが、さらに本システムに適合する構成の姿勢回転角を計算し(後述)、メモリ共有型インタフェースボード(Interface社 PCI-4914)を通して撮像へ送られる。これら一連の処理を行い、計測データの更新レートは約 680Hz である。

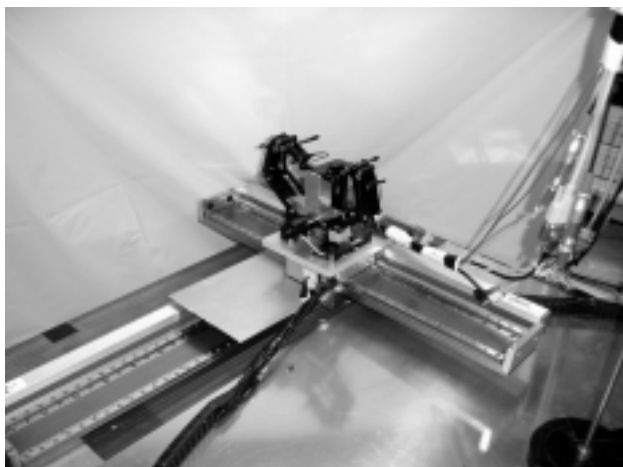


図 2 撮像系の全景

3.3 撮像系

撮像系の全景を図 2 に示す。本システムでは、Roll-Yaw の 2 自由度に関して人間の頭部運動と同様に左右の視点位置関係を制御しつつカメラの姿勢を一定に保つ、姿勢保持機構付きカメラシステム[5](図 3)を使用する。この機構は主に人間の首の運動による頭部回転成分を再現するものであり、Roll 軸は首を傾げる動作によりスクリーン上の対応点が上下にずれ映像が成立しなくなることを防ぎ、Yaw 軸は首を左右に回した時に視差量の不整合もしくは

見かけ上の眼間距離変動が生じて距離方向の知覚に歪みが生じることを防ぐという効果を持つ。併せて、回転軸から上方・前方にオフセットを持たせることにより、本機構単体で首の運動による視点の並進をある程度カバーするよう設計されている。本機構には直径 7mm の小型カメラ(東芝製 IK-SM43H, 1/4 インチ 41 万画素)を搭載しており、使用レンズ(同 JK-L04S, 焦点距離 $f = 4\text{mm}$)との組み合わせにより水平視野角 51 度、垂直視野角 39 度となっている。

今回、新たに体幹運動に起因する頭部全体の並進に対応するため、姿勢保持機構全体が水平面内の 2 自由度を移動できるようシステムを構成した。並進運動用にリニアスライダ(横河プレジジョン製、モータ部 LM110, ドライバ部 TM110)を 2 本組み合わせて使用し、前述の姿勢保持機構付きカメラシステムをこの上に載せた。可動範囲は、左右方向 500mm、前後方向 700mm である。



図 3 姿勢保持機構付きカメラシステム

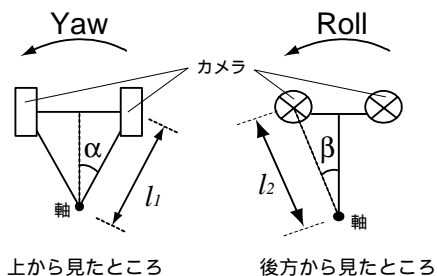


図 4 姿勢保持機構のサイズパラメータ

制御用に PC (Celeron 333MHz, MS-DOS 6.2) 1 台を用い、頭部運動計測系からメモリ共有型インタフェース(前述, PCI-4913)を経由して制御目標値としてのデータを受け取る。このデータは、順キネマティクス計算により得られる座標変換行列を元に、本システムの構成に適合するようあらかじめ姿勢回転角の変換を行っている。すなわち、本システムはカメラ姿勢が一定であり Pitch 角を使用しないので、座標変換行列の回転行列部分 (3×3) を Roll-Yaw-Pitch の順番の Euler 角へ計算し直し、最後の Pitch 角を無視することで対応できる。Pitch 角は首の回転中心から視点までのオフセットによって視点の上下動に反映されるべきものであるが、今回実装したシステムでは

上下方向の並進自由度を実装していないため、この自由度に関しては固定カメラと同等である。

並進運動量に関しては、計測・算出された頭部位置から、姿勢保持機構のオフセットによる成分を除いた値をリニアスライダへ与えている。すなわち、姿勢保持機構の左右カメラの中央は図 4 に示すように回転軸中心から上方へ 12cm、前方へ 5cm のオフセットを持っており、頭部姿勢変化に従って生じる両眼中央と機構のベースとの並進位置差分を補償する形となる。なお、並進運動に関しても制御自由度の存在しない上下方向成分は無視している。

姿勢保持機構およびリニアスライダにはエンコーダが装備されており、パルス値はカウンタボード (Interface 社 PCI-6201E) により読みとられる。パルス値は各軸の回転角・位置に変換され、制御に使用されるとともに共有メモリインタフェースを経由して画像処理用 PC へ送られる。制御出力は D/A ボード (Interface 社 PCI-3329) からアナログ電圧で行い、モータドライバを経由してモータトルク指令として与えられる。これらの入出力を利用し、各軸を PID 制御して頭部運動に追従させた。制御ループの速度としては 3.5kHz ~ 4.0kHz という値が得られている。

3.4 画像処理系

左右それぞれの画像用に PC (Pentium-III 600MHz, Windows 2000) を使用した。それぞれにビデオ入力機能を備えたグラフィックスボード (ASUSTeK AGP-V3800) を装着しており、画像データが PC の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処理が行われる。ここで行われる処理はビデオ画像を実時間で位置制御および拡大縮小処理することであり、Microsoft DirectX 7.0a DirectDraw API を用いて開発を行った。カメラから得られる NTSC 信号は DirectDraw VideoPort を利用してグラフィックスボード上に取り込まれ、オーバーレイ機能を利用して表示位置やサイズを実時間で調整しつつ直接画面に出力される。ただし、ボードメーカーから提供されるドライバだけでは画像入力信号の ON/OFF や画像のコントラストなどを制御できなかったため、使用したボード上に実装されていた画像入力チップ (Philips 社 SAA7111A: Enhanced Video Input Processor) 上の I2C と呼ばれるバス[6]の protocols を用いてチップを直接制御し、目的を達成した。このような構成により、NTSC のフィールドレートと同じ 60Hz で画像位置・サイズ制御が可能になった。

ここで制御する量は画像のシフト量と拡大率であり、計測された頭部位置の左右 (x 軸)、前後 (z 軸、後方が正)、Roll 角、Yaw 角をそれぞれ r_x, r_z, θ, ϕ とし、原点位置 (両眼中央の初期位置) からスクリーンまでの距離を L とすると、左右それぞれの提示画像のスクリーン平面 (x, y) 上でのシフト量 (S_x, S_y) および拡大率 k は

$$\begin{aligned} S_x &= r_x \mp l_1 \sin(\alpha \pm \theta) \\ S_y &= -l_1 (\cos \theta - \cos(\alpha \pm \theta)) \\ k &= 1 + \frac{r_z + l_2 (\cos \beta \pm \phi)}{L} \end{aligned}$$

と計算される。ただし、式中の複号は左眼が上、右目が下に対応し、 l_1, l_2, α, β は図 4 中の記号である。処理された画像は、そのままコンピュータディスプレイの画面として出力される。出力画像解像度は VGA (640 × 480) である。

3.5 提示系

左右用画像は、それぞれ独立のプロジェクタを用いてスクリーンへ投影される。使用したプロジェクタは DLP 方式の NEC 製 LT150J であり、スクリーン上では左右画像が重畳して表示されるが、円偏光を利用して分離することにより立体画像が観察される。この様子を図 5 に示す。



図 5 スクリーン上のステレオ画像

4. 結果と考察

従来、制御を行わない固定ステレオカメラを用いた場合、頭部回転運動によりスクリーンと左右カメラとの位置関係が変化する場合に融像の不成立や距離感の歪みが生じ、体幹運動により頭部全体が移動すると、前後移動の場合はちょうどスクリーンと同じ距離にある点 (画像上視差ゼロ) を中心に世界が伸縮し、左右移動の場合は世界全体が剪断変形するよう観察されていた。これに対して、今回構築したシステムを用い、ユーザの体幹運動を含む頭部運動に対してカメラシステムの制御と画像処理を実時間で行うことにより、体感として静止した世界が静止して観察されるようになった。

簡単な検証として、被験者 8 人 (眼鏡やコンタクトレンズにより視力矯正を行った 20 代の男性 8 名) に対して、以下のような条件で頭部を動かした際に空間の歪みが知覚されるかどうか質問を行った。

- (1) 試作したシステムの制御を行わず、単なる固定式ステレオカメラと立体視スクリーンの組み合わせとして使用する。

(2) (1)と同様制御を行わず、頭部運動を行っている間は眼を閉じるよう指示し、運動前後の静的な状態で比較する。

(3) システムをフルに稼働した状態。

その結果、条件(1)ではすべての被験者が空間の歪みを知覚し、条件(2)では移動量が小さい場合にはほとんどの被験者が歪みを知覚せず、移動量が多い場合に歪みを知覚する被験者が存在した。しかし、条件(1)のように運動中にも画像を観察している場合と比較して(2)では顕著に知覚される訳ではなかった。条件(3)の場合、全ての被験者が歪みを知覚することはなかったが、運動時の空間の変化に違和感を覚える被験者が存在した。



図 6 頭部運動追従実験の様子

条件(1)と(2)の結果を見ると、固定スクリーンを用いたシステムは本質的に空間の安定性が確保されており、従来のシステムの問題点は頭部運動に伴う動的な空間の変形であることが指摘される。条件(3)の結果は、本システムの有効性に関する根拠となる。理想的には運動中も実際の環境を直視する場合と等価な画像が提示され、違和感が存在しないことが望まれるが、今回の実験では制御パラメータの調整不足によるオーバーシュート、アンダーシュート、追従遅れなどが存在したため、違和感の原因になったと推察される。運動時のみに違和感が発生したことは、本システム全体の静的な誤差は条件(2)で示唆された歪みを知覚可能な移動量閾値の範囲に収まっていたことを示している。

運動時に発生する違和感を除去するためには、制御系のパラメータチューニング、システム各部の幾何的パラメータのキャリブレーションなどに改善の余地があると考えられる。

5. むすび

安定な視覚環境提示が可能な固定スクリーンを用いて、ユーザの体幹運動による寄与も含む頭部運動に対応した、実写画像による正確な三次元空間提示を行うシステムの構築を行い、定性的ながらその効果を確認した。今後は、試作システムのチューニング、定量的な評価を行うとともに、本手法の遠隔手術システムなどへの応用を展開していく予定である。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会による未来開拓研究推進事業 No. 97I00401 の一環として行われた。

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]廣瀬通孝, 小木哲朗, 石綿昌平, 山田俊郎: 多面型全天周ディスプレイ (CABIN) の開発とその特性評価, 電子情報通信学会誌 D-II, Vol. J81-D-II, No. 5, pp. 888–896, 1998.
- [3]柳田康幸, 前田太郎, 舘 暁: CAVE-CABIN 型視覚提示装置用カメラシステムの設計, 日本バーチャルリアリティ学会第 3 回大会論文集, pp. 149–152, 1998.
- [4]柳田康幸, 前田太郎, 舘 暁: 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, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 3, pp. 539–547, 1999.
- [5]三津橋晃丈, 柳田康幸, 前田太郎, 舘 暁: IPT 用カメラシステムの実装と評価, 日本バーチャルリアリティ学会第 4 回大会論文集, pp. 161–164, 1999.
- [6]PHILIPS: Data Sheet I2C Bus, SAA7111A Enhanced Video Input Processor (EVIP), 1998.