

## 4 面包囲型ディスプレイシステムの設計と実装

関口 大陸<sup>†</sup> 坂部 啓<sup>†</sup> 川上 直樹<sup>†</sup> 舘 暲<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京大学 工学部 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: <sup>†</sup> {dairoku, donadona, kawakami, tachi}@star.t.u-tokyo.ac.jp

**あらまし** 遠隔ロボットの操作を行うコックピットにおいて、遠隔のロボットが取得した視覚情報を提示するディスプレイシステムは、重要な構成要素の一つである。従来、遠隔操作型ロボットのコックピットでは、視覚情報提示装置として Immersive Projection Technology (IPT) によるシステムに比べて視野角や解像度の面で不利な HMD(Head Mounted Display) を利用もしくは併用することが多かった。本研究では、IPT によるシステムを遠隔ロボットの操作コックピットに適用する際に問題となる自己遮蔽を解決する方法を示し、コックピットで利用可能な小型で広視野かつ高解像度な 4 面包囲型ディスプレイシステムの設計と実装について述べる。

**キーワード** 2 足歩行ロボット, テレイグジスタンス, コックピット, 包囲型ディスプレイ

## The design of the compact immersive display system for a telexistence cockpit

Dairoku SEKIGUCHI<sup>†</sup> Kei SAKABE<sup>†</sup> Naoki KAWAKAMI<sup>†</sup> and Susumu TACHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Engineering, The University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {dairoku, donadona, kawakami, tachi}@star.t.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** Telexistence is the technical concept that enables to operate a remote robot dexterously as if he or she really exists in remote place. In the telexistence cockpit to operate a remote robot, the display device, which displays remote environment, is playing very important role. So far, because of the self-occluding problem in Immersive Projection Technology (IPT) system, Head Mounted Display (HMD) is generally used in a telexistence cockpit. In this paper, we will present the design of the compact immersive display system, which utilizes IPT and can be used in a telexistence cockpit. And we will also show the way to solve the self-occluding problem in IPT.

**Keyword** Humanoid Robot, Telexistence, Cockpit, Immersive display

### 1. はじめに

近年、ロボットの特に 2 足歩行において大きな技術的な進展が見られ、Humanoid Robotics Project[1]に代表されるように、人間型 2 足歩行ロボットを社会の中で実際に使用していこうとする試みが行われている。ロボットを普段我々が実際に生活している空間で使用するためにあたって、ロボットを遠隔より操縦するための技術が、ロボットを人間と自然な形で共存させ、そして協調して動作させるための重要な方法の一つとなっている。テレイグジスタンス[2]は、遠隔に存在するロボットを、あたかも操縦者がその場にいるかのような感覚を持って操縦可能にする技術であり、ロボットを遠隔より意のままに操縦することが出来るようになる。

遠隔ロボットを操縦するためのコックピットにおいて、テレイグジスタンスを実現するためには、遠隔にあるロボット周囲の視覚的な情報を操縦者に提示するためのディスプレイシステムの設計が特に重要となる。本研究では、遠隔ロボットの操作コックピットにおいて視覚情報提示装置として使用することを目的とした、4 面包囲型ディスプレイシステムに関してその設計と実装に関して述べる。

#### 1.1. テレイグジスタンスにおける視覚情報提示装置

従来、テレイグジスタンスにおいては、コックピット側の視覚情報提示装置として HMD(Head Mounted Display)、ロボット側の視覚情報取得装置として、2 台のカメラが平行に配置された頭部搭載の両眼カメラを利用するのが一般的であった[3]。HMD を使用したシステムでは、操縦者頭部の動きを頭部位置計測装置により取得し、ロボットの頭部を操縦者の頭部の動きに追従させている。従って、操縦者が横を向くと、それにあわせてロボットも横を向くように動き、HMD には操縦者が見ているのと同じ方向のロボット側での映像が常に映る。さらに、操縦者の動きにあわせてロボットの腕も動き、自分の腕がある位置にロボットの腕が視覚的に知覚されるため、操縦者は、あたかも遠隔のロボットの中に入り込んだような感覚で遠隔の状況を知覚しロボットを操縦することができる。このように、HMD は、視野が狭い、ある程度の大きさや重さを持った装置を装着しなければならないなどの欠点があるものの、操縦者の体勢感覚と、HMD に映し出されるロボット側で取得された 3 次元映像の正確な一致を図ることが比較的容易であるため、テレイグジスタンスを用

いたシステムを構成するには、現状の技術では最適とされてきた。

しかし、近年、高輝度で高解像度なプロジェクトが次々に市場に出されており、特にバーチャルリアリティ(VR: Virtual Reality)の分野において、そういった高性能なプロジェクトを用いて没入型の視覚提示装置を構成する Immersive Projection Technology (IPT)と呼ばれる手法が、HMDの代わりに用いられるようになってきている。イリノイ大の CAVE(Cave Automation Virtual Environment)[4]に代表される IPT システムは、高輝度で高解像度のプロジェクトと大型のスクリーンを組み合わせることにより、現状の HMD では実現困難な、広視野で高精細な視覚提示装置を構成することに成功している。

## 1.2. テレイグジスタンスと IPT

遠隔ロボットの操作コックピットにおいても、HMDの代わりに IPT を用いる試みがなされ始めている。HRP プロジェクトにおいて構築されたスーパーコックピットの包囲型ディスプレイ[5,6]は、その一例である。包囲型ディスプレイは、9面の多面体スクリーンを球面の接平面近似となるように配置し、各スクリーンの中心を通る法線は一点で交わる構成になっている。このように、IPTの手法を取り入れ映像が投影されるスクリーンをタイル状に複数並べることにより、包囲型ディスプレイでは、提示映像の視野角が  $150^\circ$  (H)  $\times$   $117^\circ$  (V)、解像度が視力換算で 0.34 相当と、非常に広視野かつ高解像度な視覚情報提示を実現している。一方で、映像提示にスクリーンの背面側のプロジェクトから投影を行うリアプロジェクション方式を採用しているため、スクリーンの後方に映像投影のためのスペースが必要とされ、必然的に他の IPT システムにも見られるような非常に大型の装置となっている。

また、スーパーコックピットにおいて包囲型ディスプレイは、HMDの完全な代わりとはなっておらず、ロボットの移動時には包囲型ディスプレイを使うものの、ロボットの手腕を用いた手元作業を行う際は、従来通りヘッドトラッキング付き HMD を使用する。これは、まず、スーパーコックピットで用いている広視野カメラシステムと包囲型ディスプレイの組み合わせでは、ディスプレイへ映像を映すための処理が複雑になってしまい、ヘッドトラッキングの実現が難しいことがあげられる。さらに、包囲型ディスプレイでは、一般的な IPT システムと同じように、スクリーンと観察視点の間に操縦者の手腕部が入るような構成になっているため、操縦者自身の手腕部によって本来は観察したいロボットの手腕部の映像が隠されてしまう自己遮蔽の問題が発生する。

このように、スーパーコックピットの包囲型ディスプレイでは IPT の手法を導入することにより、非常に広視野かつ高解像度な映像提示を実現した一方で、装置の設置面積の大型化や、自己遮蔽の問題等により作業形態に応じて HMD との提示モードの切り替えが発生していた。そこで、本研究では、IPT の手法を用いながらも、これらの問題を解決しテレイグジスタンスを実現するコックピットに使用可能な、新たな包囲型ディスプレイシステムの設計方法を明らかにすることを目的とする。

## 2. 設計

### 2.1. 要求仕様

包囲型ディスプレイシステムを設計するにあたって、以下に示す要求仕様を満たすことを考えた。

#### ■ 装置の小型化

広視野と高解像度を確保するために IPT の手法を活用しつつも、同時に 3m 四方程度の設置面積におさまるものとする。

#### ■ 提示モードのモードレス化

IPT によるシステムにおいても自己遮蔽の問題が解決可能であることを示し、コックピットで視覚提示デバイスを使用する際に提示モード切り替えが必要とされとされない設計方法を明らかにする。

### 2.2. 装置の小型化

まず広視野を確保するために、IPT の手法を活用し複数のスクリーンからなる多面の包囲型ディスプレイとする。広視野を確保しつつも、装置を小型化するために、今回は映像の投影方法としてフロントプロジェクションを採用する。フロントプロジェクションは、操縦者とスクリーンの間の空間にプロジェクトによる映像投影の光学系を持ってくる事が出来、装置全体としてみるとスペースの利用効率が上がり、小型化を図ることが可能となる。一方で、同じ空間を共有するが為に、プロジェクトの映像投影系と操縦者の作業空間が干渉してしまうことが十分に考えられ、スクリーン・プロジェクト・作業空間をそれぞれ最適に配置する設計が求められる。

### 2.3. 提示モードのモードレス化

操縦者前面の下方方向に位置するスクリーンのみを操縦者の腕部の手前側に持つことにより、自己遮蔽の問題を解決し、提示モードのモードレス化をはかる。その概念を図 1 に示す。

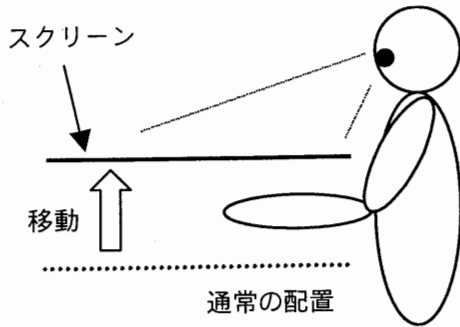


図1 スクリーン位置の移動

概念図にあるように、通常は操縦者から離して配置するスクリーンを、あえて操縦者の視点と腕部の間に位置させることにより、実際の腕が見えるべき所に映像を表示させることが可能になる。このように構成することにより、操作者自身の手によって本来見えるべき映像が隠されてしまう自己遮蔽の問題がなくなり、IPTを用いたシステムであっても、ロボットの遠隔操作コックピットの映像情報提示としてHMDと同じように扱うことが出来るようになる。この手法を用いると、スクリーンを操縦者の腕部の上部に配置することになるため、スクリーンより上には手を持ち上げることが出来ず、ある程度手を動かせる範囲が制限されることになる。しかし、人間型ロボットの遠隔操作においては、手元を見ながらの手を使用する作業は、基本的には卓上で行う作業がほとんどであり、卓上で作業を行うのに必要な腕の可動範囲をとることが出来れば、十分であると考えられる。

#### 2.4. 設計詳細

前述の手法を取り入れ、三次元CADを用いてプロジェクタやスクリーンなどの最適配置を行った設計を図2に示す。

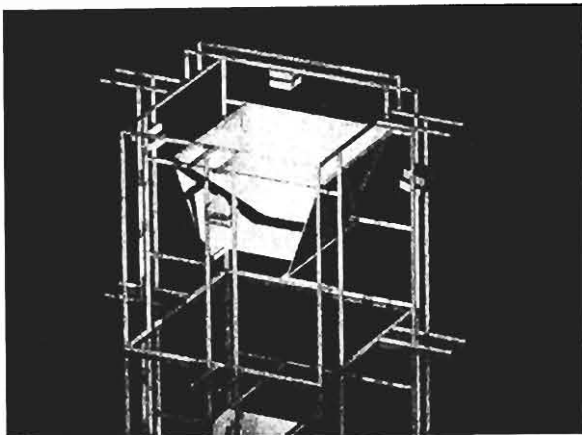


図2 スクリーンレイアウト

スクリーンは、操縦者を囲むように正面・左右面・底面と4面に配置し、広視野を確保するとともに、底面のスクリーンを操縦者腕部の手前に配置することにより、自己遮蔽の問題を解決している。各スクリーンへはすべてフロントプロジェクションを用いて映像を投影しているが、スクリーン設置角度の最適化、短焦点レンズのプロジェクタの採用などにより、観察者が座った状態で、特に観察者の頭部がプロジェクタの光路と干渉することなく上半身を自由に動かせる程度の作業領域を確保出来ている。また、装置の上部にミラーを配置し、プロジェクタをスクリーンのすぐ背後に位置させることにより設置面積のさらなる小型化を図っている。さらに、各プロジェクタはそれぞれのスクリーンに対してすべて正対するように配置されているため、投影された映像に対する台形補正等の必要はない。立体視を行うために、スクリーン毎に左右の眼に対応した2台のプロジェクタを縦に並べて配置しており、左右眼の映像の分離には円偏光を用いている。映像投影には、解像度がXGA(1024x768)のDMD(Digital Micromirror Device)素子を用いたプロジェクタ(NEC製LT260SJ)を使用している。

4面包囲型ディスプレイシステムの主要寸法および解像度と視野角を表1に示す。

表1 主要寸法および解像度と視野角

全体 [m]	2.8 (W)x 2.8(H) x 2.8(D)	
正面スクリーン [m]	1.8(W) x 1.2(H) (台形のため下端幅は 1.0)	
左右スクリーン [m]	1.8(W) x 1.2(H) (台形のため下端幅は 1.4)	
底面スクリーン [m]	1.0(W) x 1.0(H)	
底面スクリーン設置高さ	床面より 0.85m 座面より 0.2m	
提示面までの距離 (推奨観察位置より)	底面スクリーンから 0.60m 左右スクリーンから 0.67m 正面スクリーンから 1.24m	
解像度	正面	視力 0.2 相当
	側面	視力 0.1 相当
	底面中央	視力 0.2 相当
視野角	水平方向	210[deg.]
	正面垂直方向	102[deg.]

### 3. 実装

図3に4面包囲型ディスプレイの外観を示す。図4で、底面スクリーン下に作業空間が確保されている様子を示す。フロントプロジェクションを採用したため、スクリーンの外側の空間をたとえば他の装置の設置スペースとしても使用することが可能である。図5は、底面スクリーンの下に、着座式の着座式入出力装置を設置したときの様子である。

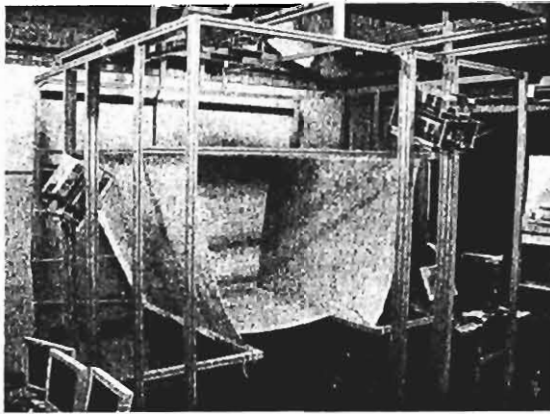


図3 ディスプレイシステム外観



図4 手元作業空間の確保

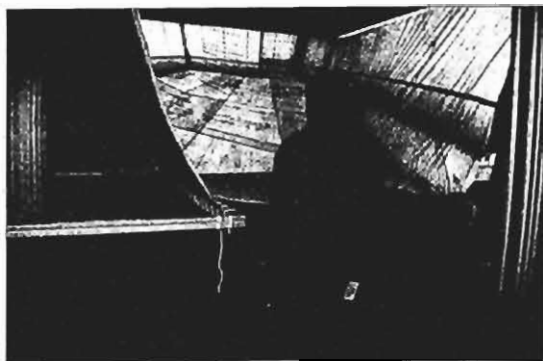


図5 着座式入出力装置との連動

#### 4. 考察

IPT や HMD などのデバイスを用いて立体視を行う際に観察位置とスクリーン面との距離が近い場合、輻輳と調節のずれにより立体視が可能な領域を表す融像範囲が限られてしまうことが知られている。今回、設計を行った4面包囲型ディスプレイシステムでは、特に底面スクリーンが観察者の視点から近い位置にあるため、ここで考察を行うこととする。

過去の知見より明らかになっているデータ[7]を元に、4面包囲型ディスプレイシステムにおいて画像提示後 0.5 秒以内に融像可能な範囲を推定した。図 6-8 に、スクリーンより外側方向の融像限界の範囲を示す。

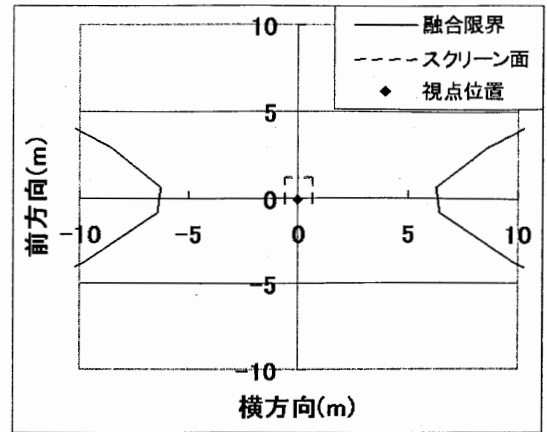


図6 水平面上における融像範囲

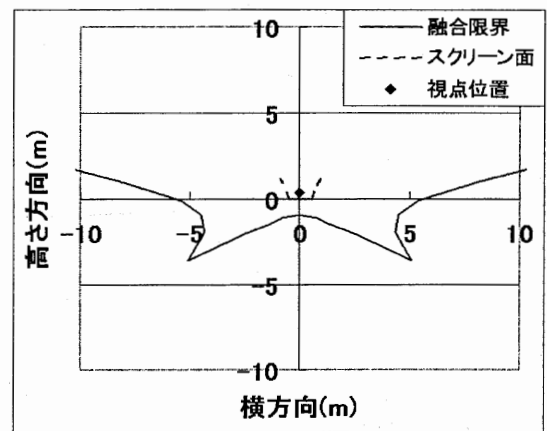


図7 垂直面横方向の融像範囲

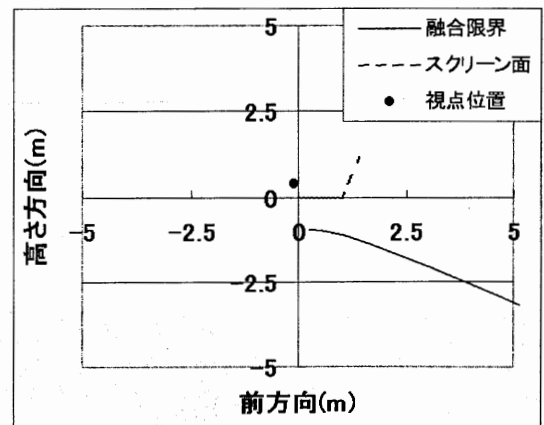


図8 垂直面前方向の融像範囲

図6より、正面方向に関しては、無限遠まで融像可能であることがわかる。一方、図7-8より、左右方向では6.5mに、底面に関しては1.0mの位置に融像限界が存在することがわかる。左右方向のスクリーンは、本ディスプレイシステムが主に対象とするアプリケーションに即して考えると、遠隔ロボットの移動時などに操縦者が正面方向を向いた状況において、視野角を広げる目的で使われることが多いと言うことが出来る。

さらに、正面を向いているときには立体視能力が低い周辺視野の領域にあたるため、融像可能範囲が 6.5m と比較的近いことは、あまり大きな問題とはならないだろうと考える。

左右面に比べてさらに融像可能範囲が狭い底面のスクリーンは、遠隔ロボットがハンドを用いた卓上の作業をする際に主に使用される。従って、卓上での作業を対象とした場合は、融像限界が 1m の近距離に位置していたとしても、底面スクリーンに映る物体はすべて融像限界の範囲内に収まると思われる。

このように、4 面包囲型ディスプレイシステムにおける立体視の融像限界は、一部のスクリーン面において近くに位置しているが、想定しているアプリケーションの使用範囲内では、特に問題がないであろうことを確認することが出来た。今後は、実際のシステムを用いて融像可能範囲を実測し、想定している立体視性能をシステムが有しているか確認を行う予定である。

## 5. まとめ

本研究では、遠隔ロボットのコックピットで視覚情報提示装置として使用することを目的とした 4 面包囲型ディスプレイシステムの設計と実装を行った。従来は、HMD を単体で用いるかもしくは併用することが多かった遠隔操作コックピットの視覚情報提示装置に、IPT を用いたシステムで問題となっていた自己遮蔽の問題を解決し、IPT によるディスプレイシステムを単独で使用できうることを示した。さらに、デバイスの設計において、プロジェクタやスクリーンなどの最適配置を行い、装置設置面積の小型化を図るとともに、操縦者に対して移動可能な空間を確保可能な設計を示すことが出来た。

また、行った設計に基づきシステムの実装をし、設計の検証を行った。さらに、過去の知見に基づいて融像範囲に関する考察を行い、本ディスプレイシステムが対象とするコックピットへの応用においては、特に融像範囲に関しては問題がないことを確認した。

今後は、遠隔ロボット操作コックピットの視覚情報提示装置として、特に本ディスプレイシステムの特徴となる手元作業空間をいかして、実際のロボットを使用して卓上でのハンドリングタスクを行ってみたいと考えている。

## 文 献

- [1] 井上博允, 比留川博久, “人間協調・共存型ロボットシステム,” 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.8, pp1089-1092, 2000
- [2] S. Tachi, K. Tanie, K. Komoriya and Kaneto, Tele-Existence (I): Design and Evaluation of a Visual Display with Sensation of Presence, Proc. of the 5<sup>th</sup> Symposium on Theory and Practice of Robots

and Practice of Robots and Manipulators, pp. 245-254, 1984.

- [3] 館, 安田, “トレイグジスタンス・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, vol.115-C, no.2, pp. 172-181, 1995.
- [4] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, T. A. DeFanti, Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, Proc. of Siggraph '93, pp. 135-142, 1993.
- [5] 館暉, 小森谷清, 澤田一哉, 井床利之, 井上幸三, “HRP 遠隔操作プラットフォーム,” 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1, pp16-27, 2001
- [6] T. Nishiyama, H. Hoshino, K. Suzuki, R. Nakajima, K. Sawada and S. Tachi, Development of Surrounded Audio Visual Display System for Humanoid Robot Control, Proc. 9th International Conference on Artificial Reality and Telexistence '99, pp.60-67, Dec. 16, 1999.
- [7] 3次元画像と人間の科学, 原島博(監修), 元木紀雄, 矢野澄男(共編), オーム社, 東京, 2000