

## 臨場遠隔制御の研究 (第 46 報)

### - 再帰性投影技術を用いた相互臨場遠隔制御装置の視覚系

#### Study on Telexistence (XLVI)

##### - Optical System for Mutual Telexistence Using Retro-reflective Projection Technology

南澤 孝太<sup>1,2</sup>, 神明前 方嗣<sup>1</sup>, 梶本 裕之<sup>1</sup>, 川上 直樹<sup>1</sup>, 舘 暲<sup>1</sup>

Kouta Minamizawa, Masatsugu Sinmeimae, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, Susumu Tachi

<sup>1</sup>: 東京大学大学院 情報理工学系研究科 (The Univ. of Tokyo)   <sup>2</sup>: E-mail kouta@star.t.u-tokyo.ac.jp

**Abstract:** In this paper, we introduce an optical system on the slave robot and the master cockpit of mutual telexistence system. Using RPT (Retro-reflective Projection Technology) and HMP (Head-Mounted Projector), this system provides presence of communication partner to both the operator and the observer. Moreover, visual and haptic sensations of operator's arm are integrated. The operator can recognize that the robot arm is virtually same as his arm. It makes high realistic sensation to the operator and improves operability.

**Keywords:** Retro-reflective Projection Technology, Head-mounted Projector, Master Cockpit, Mutual Telexistence

## 1. INTRODUCTION

我々は、あたかも Robot が存在する場所で直接作業しているかのような高度の臨場感を伴って Robot を遠隔操縦する、或いは Robot の周辺環境と相互作用的双方向 Communication を行える技術を、「相互臨場遠隔制御 (Mutual Telexistence/相互テレグジスタンス)」[1][2] と呼び、その実現に向けた研究を行っている。

相互臨場遠隔制御系に於いて自然な双方向交流 (Communication)を行うためには、操縦者に対して Robot と同化しているような没入感を与えるだけでなく、遠隔地における他者に対しても、恰も操縦者がその場に存在しているような臨場感を与えることが重要な要素となる。即ち、視覚についていえば、相互臨場遠隔制御に於ける視覚系の基本的な要求機能は下記の二点といえる。

- ① 操縦者に対して Robot と時間的・空間的に等価な立体視覚映像を提示する
- ② 遠隔地における他者に対して、操縦者の存在を視覚的に提示する。

しかし、[3]のような従来の Master Cockpit に於いて、これ等を両立するものは確立されていなかった。

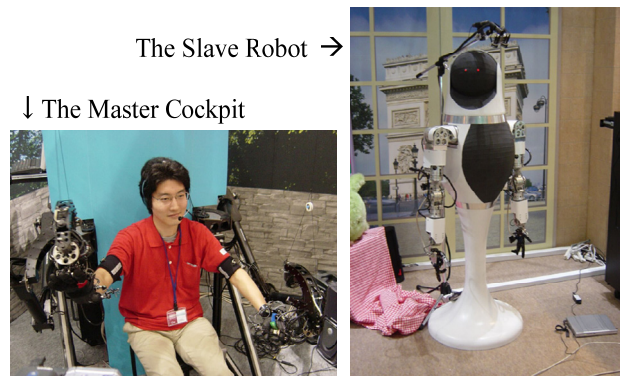


Fig.1: Mutual telexistence master-slave system "TELESAR II"

そこで本論文では、再帰性投影技術[4][5]を用い、Master-Slave System に於いてこれらの条件を満たすような視覚系を提案する。

我々は従来、再帰性投影技術を用いて人型 Slave Robot の体表に操縦者の姿を投影することを提案しており[7]-[8]、この概念を実証し左記②を実現するものとして、相互臨場遠隔制御装置「TELESAR II」[10] (Fig.1)の Slave Robot において、操縦者の姿を投影する手法を開発した。また、左記①も同時に満たすため、Slave Robot と同様に再帰性投影技術を用いた Master Cockpit の視覚系を試作した。

## 2. Retro-reflective Projection Technology

まず、再帰性投影技術の基本原理について簡単に述べる。再帰性投影技術では、提示面として再帰性反射材(retro-reflector)を用い、提示面に対して観察者の目と光学的に共役な位置より映像を投影する(Fig.3)。再帰性反射材の高指向性反射(Fig.2)により、再帰性反射材が塗布可能であれば、任意の形状・材質の物体を提示面として利用可能な上、その映像は観察者当人にしか提示されず、複数の観察者が存在する際には同じ物体に於いても各人に対して異なる映像を提示することができる。また投影源の位置が観察者の目と光学的に等価であることから、提示面の形状による映像歪みや観察者との距離による輝度変化が生じないといった特徴を持つ。

これらの特徴を利用して、M. Inami らによる光学迷彩(Fig.4) [9][10]などの応用例が開発されており、再帰性投影技術が有用であることは既に実証されている。また、投影を行う装置として、T. Sonoda ら[11]は、小型軽量ながら両眼立体視が可能な映像提示装置である Head Mounted Projector (HMP)「X'tal Visor」(Fig.5)を開発した。「X'tal Visor」の装着者は、両手を用いて作業を行いながら立体映像を見ることができると、本論文で提案する Master Cockpit において利用するために必要な機能を満たしているといえる。

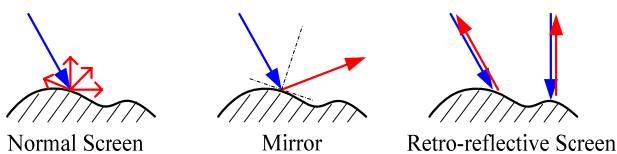


Fig.2: Reflection on retro-reflective screen

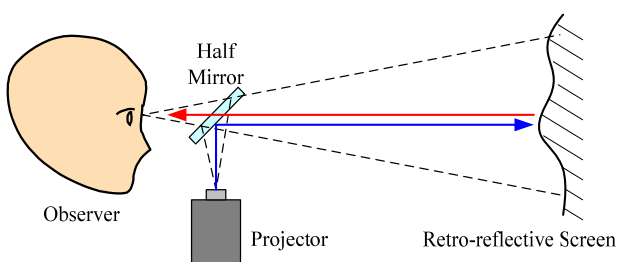


Fig.3: Principle of RPT system



Fig.4: The Optical Camouflage

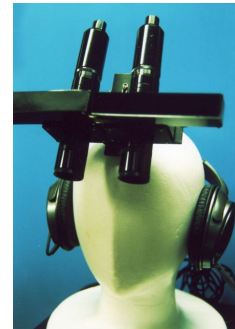


Fig.5: Head Mounted Projector (HMP): "X'tal Visor"

## 3. Optical System on TELESAR II

遠隔地の他者と高い臨場感の Communication を行うにあたって、相手の表情が見えることは非常に重要であると我々は考えている。そのため TELESAR II では、再帰性投影技術を応用し、操縦者の実時間映像を人型 Slave Robot に提示した。Slave 側環境における複数 RPT Projector の配置と、Master 側環境における撮像素子の配置を一致させることで、RPT Projector を通して人型 Slave Robot を見ている複数の観察者は、同じ提示面を見ているにも関わらず、Fig.6 のようにそれぞれの観察位置に適合した異なる方向からの操縦者の映像を見ることができると、Fig.7 に本視覚系の構成を示す。



Fig.6: Operator's aspects on the slave robot from various viewpoints

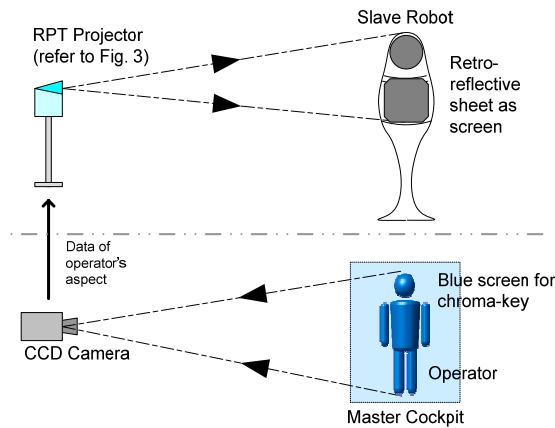


Fig.7: RPT system for TELESAR II slave robot

我々は2005年6月の日本国際博覧会(愛知万博)に於いて、TELESAR IIの展示を行い(Fig.8)、操縦者の表情が見える本手法が“自然な”遠隔地間Communicationの実現に対して有効であることを示すことができた。



Fig.8: Observers of TELESAR II at World EXPO 2005

## 4. Optical System on Master Cockpit

### 4.1 Conventional System

遠隔制御における視覚系としては、古くから、Robotの頭部で撮影した両眼立体視映像を、頭部搭載型視覚提示器(HMD)を用いて提示するという手法が多くとられてきた。HMDを用いることで操縦者の視野がRobotの視野と一致し、撮像-提示間の画像処理も最低限で済むため実時間性も高く、相互臨場遠隔制御における視覚系の要件①を満たしているといえる。しかしながら、HMDの構造上、操縦者の顔面を覆うことが不可避であり、Fig.10bのように対話の相手に対して表情が隠されてしまうためCommunicationに不向きである。また、視野角が狭いため没入感が得られにくいという問題も存在する。

一方、広い視野角による高い没入感を得られる、CAVE [12] や HRP Super Cockpit[13]等のIPT(Immersive Projection Technology)を用いる視覚系も数多く提案されている。これらは多くの外部装置と膨大な費用を要するものの、装着する装置は偏光眼鏡程度の小さなもので済むため、Fig.11bのように、通信相手に提示する表情もHMDと比較すると自然である。しかし、この手法に於いても目の表情を捉えることができないため、TELESAR IIでは、眼鏡装着が不要な裸眼立体視液晶提示器を複数枚用いた視覚系(Fig.12a)が提案された。しかしこれらの視覚系に共通する問題点として、操縦者自身の身体が提示系の手前にあるために操縦者自身の腕が見えてしまい、Slave Robotの腕を自分の腕と同化して認識することができないという欠点があった。即ち、従来では、Master-Slave間における視野の一致と操縦者の表情の取得は二律背反の関係にあったといえる。

### 4.2 Proposed System

前項で示した問題を解決し、Master-Slave間での視野の一致と操縦者の表情の取得を両立することを目的として、頭部搭載型視覚投影器(HMP)と再帰性投影技術(RPT)を用いたMaster Cockpit System(Fig.9)を提案する。

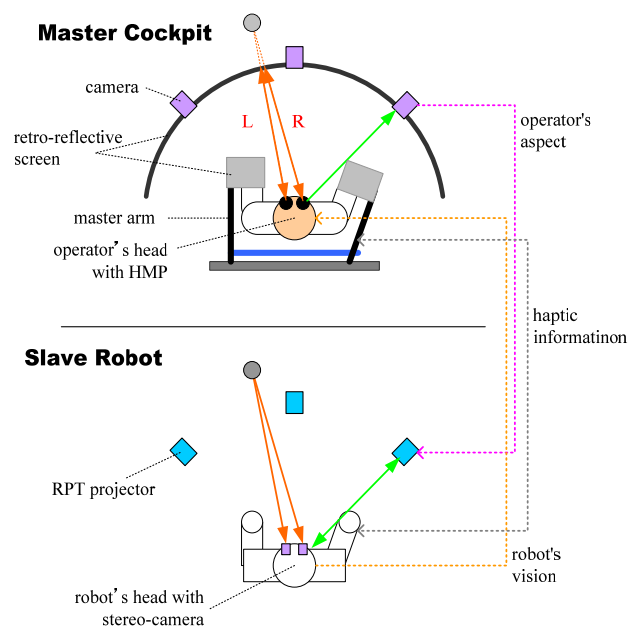
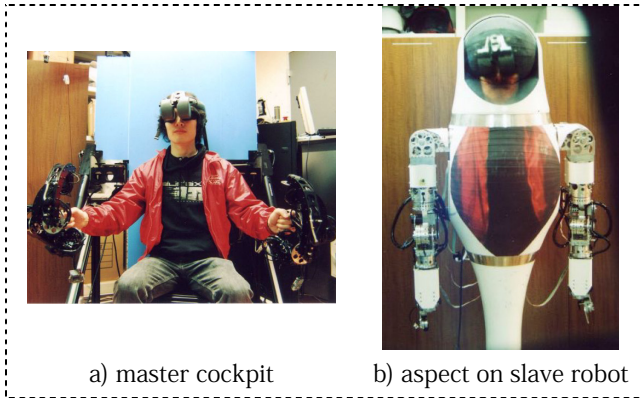


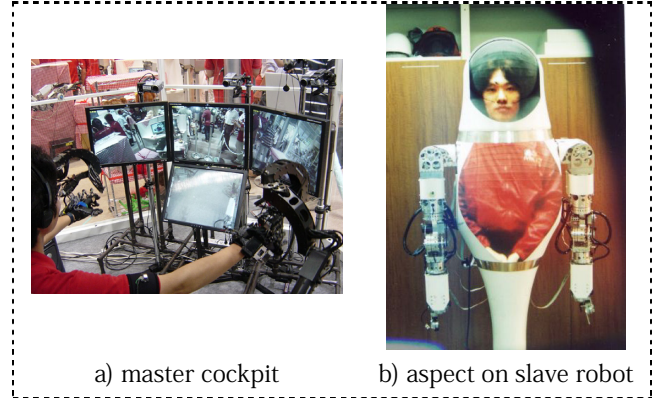
Fig.9: Proposed optical system for mutual teleexistence using RPT





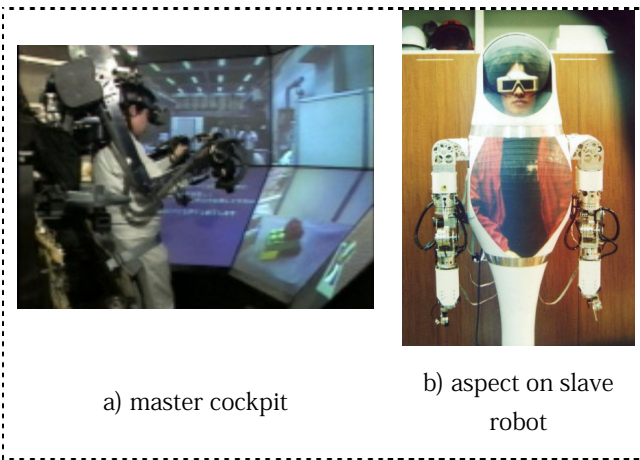
a) master cockpit      b) aspect on slave robot

**Fig.10:** Using HMD: Head Mounted Display



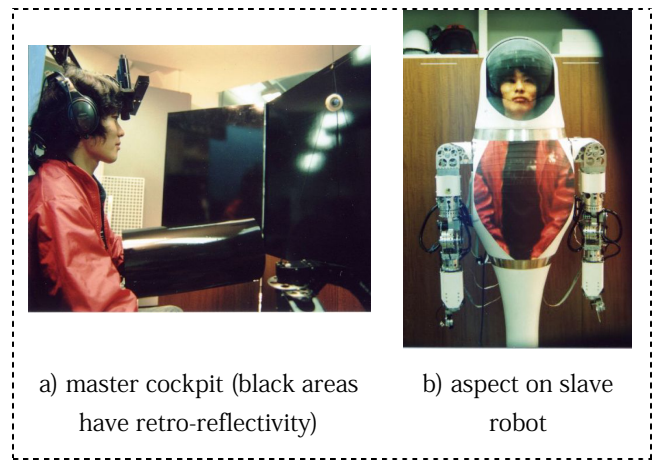
a) master cockpit      b) aspect on slave robot

**Fig.12:** Using auto-stereoscopic display



a) master cockpit      b) aspect on slave robot

**Fig.11:** Using IPT: Immersive Projection Technology



a) master cockpit (black areas have retro-reflectivity)      b) aspect on slave robot

**Fig.13:** Using HMP: Head Mounted Projector and RPT: Retro-reflective Projection Technology

本提案手法では, Fig.13a のように Master Cockpit の前面・側面を再帰性反射材で覆い, 操縦者は HMP を装着する. HMP を通して, Fig.3 に示した原理により Slave Robot の頭部に取り付けられた二眼撮像素子で取得された両眼立体視映像を投影する. HMP を用いることで, 操縦者の表情を覆うことなく操縦者への視覚提示が可能となるため, 本手法では, Fig.13b に示したように観察者から見た Slave Robot における操縦者の像において操縦者の表情が, 裸眼における投影映像 (Fig.12b) と同程度に視認できる. これにより操縦者と観察者の間での, 表情を含んだ Communication が実現可能となる.

## 5. EXAMINATION

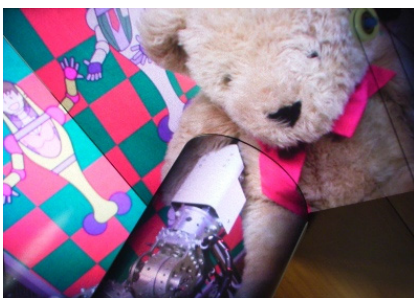
再帰性反射材による Screen のみでは, 従来の視覚系と同様, Master Arm および操縦者自身の腕が見えてしまうために操縦者の視覚が Slave Robot の視覚と異なってしまい, 没入感の欠如を招くという問題が生じる. そこで本提案手法では, 操縦者の手腕及び Master Arm を筒状の再帰性反射材で覆い, そこに Slave Robot が取得した Robot Arm の実時間映像を投影することで, この問題の解決を試みた. 本実験では遠隔地の人形を抱き上げる状況を仮定し, Fig.14 には Slave Robot の視覚, Fig.15 には再帰性反射材による壁面投影系のための Master Cockpit における HMP を装着した操縦者の視覚, Fig.16 には Master Arm 及び操縦者の腕部を筒状の再帰性反射材で覆った際の操縦者の視覚を示す.



**Fig.14:** View from a camera on slave robot's eye when holding a teddy bear



**Fig.15:** View from operator's eye using HMP without a retro-reflective cover on master arm



**Fig.16:** View from operator's eye using HMP with a retro-reflective cover on master arm

## 6. DISCUSSION

実際に本提案手法に於ける Slave Robot の視覚情報(Fig.14)と操縦者の視覚情報(Fig.16)を比較すると、色再現性も含め、高い精度で一致することが確認できる。以上より、Master Cockpit に於ける力覚提示と視覚提示の融合が実現され、操縦者に対して、自分自身の腕が Slave Robot の腕と視覚的にも体性感覚的にも本質的に等価である、高度な臨場感を提示することができた。

しかし Fig.16 を見ると投影映像に輝度のばらつきが生じてしまっていることが確認できる。これは、HMP の投影面に対する再帰性反射材の角度が投影部位によって異なるために、再帰性反射の反射率が変化してしまっているためである。壁面の投影面に関しては、投影面形状を、操縦者の頭部を中心とした半球形にすることで解決可能である。また、Master Arm を覆う筒状体に関しては、Master Arm の位置情報取得機構によって、その位置が正確に計測可能であるため、予め模擬的に算出された反射率分布から投影すべき輝度分布を導出可能である。

また、本手法における撮像系の利点として、操縦者の頭の動きに合わせて駆動される Slave Robot 頭部に搭載されているため、HMP による提示映像は Slave Robot の視野映像を操縦者にそのまま伝送すればよく、Slave Robot と操縦者の眼間距離及び視野角を一致させれば、一切の画像処理を施さずに直接 HMP で映像提示を行えるという点が挙げられる。即ち本手法は、視覚系の単純化と実時間性の向上が簡単に実現できるという長所を持つ。

さらに、本視覚系においては、映像投影を操縦系の内部から行うため、操縦系外部には一切の機構を必要としなく、低価格かつ省面積の視覚系を構築することが可能である。

## 7. CONCLUSION

相互臨場遠隔制御における対面 Communication の重要性に着目した Slave Robot 映像提示系を実装し、その知見に基づいて、操縦者に対して Robot と時間的・空間的に等価な両眼立体視覚を提示すること及び遠隔地における他者に対して操縦者の存在を視覚的に提示することを両立する Master Cockpit の視覚系を提案し、その試作を行った。本提案手法によって、遠隔地の通信相手に対する操縦者の存在感が高められ、さらに操縦者の視覚と体性感覚が完全に一致することによって操縦者に高い臨場感を提示することが可能となった。

## 8. FUTURE WORK

再帰性投影技術における今後の課題としては、HMPのさらなる小型軽量化と無線化、および再帰性提示面の角度による輝度の変化への対処手法の確立が挙げられる。また、Master Cockpitの複数の撮像素子で取得する操縦者映像からSlave Robot周辺の任意の位置における正しい投影映像を生成する手法の確立も急務といえる。また、Master Cockpit内の天井部や床部にも再帰性投影材を設置することで全周囲提示系を構築し、没入感を向上させMaster Cockpitの応用範囲を拡張することを検討している。

本論文ではMaster-Slave SystemにおけるMaster Cockpitとしての提案を行ったが、Robotの操縦、Robotからの力覚帰還、そして本提案手法による視覚系という3つの大きな要素を持つ本操縦系は、汎用的な高臨場感Human Interfaceとして、人工現実空間(Virtual Reality Space)への没入装置、あるいは娯楽・遊戯における操縦装置として等、様々な応用が期待できる。

## REFERENCES

- [1] S. Tachi: "Toward next generation telexistence" in Proc. IMEKO-XV World Congress, Vol. X (TC-17 & ISMCR '99), pp. 173-178, Tokyo / Osaka, Japan, 1999.6
- [2] S. Tachi: "Toward the telexistence next generation", in Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. Artificial Reality and Telexistence (ICAT2001), pp. 1-8, Tokyo, Japan, 2001.12
- [3] S. Tachi, K. Komoriya, K. Sawada, T. Nishiyama, T. Itoko, M. Kobayashi, and K. Inoue, "Telexistence cockpit for humanoid robot control", *Advanced Robotics*, Vol. 17, No. 3, pp.199 – 217, 2003.6
- [4] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, and S. Tachi: "Head-Mounted Projector", *ACM SIGGRAPH '99 Conference Abstracts and Applications*, p. 179 (Emerging Technologies), 1999.8
- [5] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, and S. Tachi: "Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector", in Proc. of IEEE Virtual Reality 2000, pp. 233-240, 2000.
- [6] S. Tachi: "Telexistence and Retro-reflective Projection Technology (RPT)", in Proc. of VRIC 2003, pp.69/1-69/9, Laval Virtual, France, 2003.5
- [7] S. Tachi: "Recent Advance in Telexistence – Retro-reflective Projection Technology Based Mutual Telexistence – ", *ISMCR2003 – Toward Advanced Robotics: Design, Sensors, Control and Applications –*, Madrid, Spain, 2003.12
- [8] S. Tachi, N. Kawakami, M. Inami, and Y. Zaitzu: "Mutual Telexistence System Using Retro-Reflective Projection Technology", *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 1, No. 1, pp. 45-64, 2004.3
- [9] R. Tadakuma, K. Sogen, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi: "Development of Multi-DOF Master-Slave Arm with Bilateral Impedance Control for Telexistence", in Proc. of ISMCR2004, pp. D21/1-D21/4, NASA Johnson Space Center, Houston, USA, 2004.9
- [10] M. Inami, N. Kawakami, and S. Tachi: "Optical Camouflage Using Retro-reflective Projection Technology", in Proc. of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 348-349, 2003.10
- [11] M. Inami, N. Kawakami, and S. Tachi: "Optical Camouflage", *International VR, Media Art and Technology 2004 Proceedings*, p. 19, 2004.12
- [12] T. Sonoda, T. Endo, Y. Suzuki, N. Kawakami, and S. Tachi: "X'tal Visor", *ACM SIGGRAPH 2005 (Emerging Technologies)*, 2005.8
- [13] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, and T. A. Defanti: "Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE", in Proc. of SIGGRAPH '98, pp. 179-188, 1998.