日本バーチャルリアリティ学会第 10 回大会論文集(2005 年 9 月)

テレイグジスタンスの研究（第 45 報）
ー相互テレイグジスタンスのための人型スレーブロボットの開発ー

Study on Telexistence (XLV)
-Development of Slave Humanoid Robot for Mutual Telexistence-

多田隈理一郎[1)]，宗玄清宏[2)]，南澤孝太[3)]，上田悠介[4)]，園田哲理[5)]，千種大雅[6)]，関口大陸[7)]，梶本裕之[8)]，川上直樹[9)]，舘暲[10)]
Riichiro Tadakuma, Kiyohiro Sogen, Kouta Minamizawa, Yusuke Ueda, Tetsuri Sonoda, Hiromasa Chigusa, Dairoku Sekiguchi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi

1)–5)，7)–10）東京大学 情報理工学系研究科 システム情報学専攻 舘・川上研究室
（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1，tadakuma@star.t.u-tokyo.ac.jp, {Kiyohiro_Sogen, kouta_minamizawa, yusuke_ueda}@ipc.i.u-tokyo.ac.jp, {tetsuri, dairoku, kaji, kawakami, tachi}@star.t.u-tokyo.ac.jp）
6）東京大学 情報理工学系研究科 システム情報学専攻 安藤・篠田(裕)研究室
（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, chigu@alab.t.u-tokyo.ac.jp）

Abstract: Mutual Telexistence is an advanced type of telecommunication system that enables an operator to perform remote manipulation tasks dexterously with the feeling that he or she exists in the remote environment where the robot is working in. Because the robot is painted with retro-reflective material and can act as screens for retro-reflective projector, it is seen as if it is the operator by the projection of real image of him or her on its surface with a high sensation of existence. The prototype robot for mutual telexistence, “TELESAR II”, was developed and exhibited in World Exposition 2005 Aichi, Japan.
Key Words: *Mutual Telexistence, Humanoid Robot, Retro-reflective Projection Technology, TELESAR II*

1. はじめに

1980 年に本研究室で提唱された「テレイグジスタンス」の概念を継承し拡張する新たな概念として「相互テレイグジスタンス[1]」の概念が 1999 年に生まれた。

それを実現するシステムとして「TELESAR II」という人型マスタ・スレーブロボットを開発したので報告する。

2. 相互テレイグジスタンス

1980 年に提唱された概念である「テレイグジスタンス」は、理論的な解析に加え、実際のハードウェアシステムである「TELESAR」が製作され、その工学的可能性が実証されてきた。ただ、このシステムにおいては、スレーブにあたる人型ロボットと対面している人にとっては、そこにあるのは、あくまで無機的なロボットであり、ロボットの操作者本人と相対しているとは感じがたく、円滑なコミュニケーションが取りにくいという問題が残されていた。

そこで今回、本研究室において研究・開発されたのが、人型スレーブロボットの体表面の一部をスクリーン化し、マスタコクピット側のカメラで撮影した操作者の映像をリアルタイムにそのスクリーン部分に投影するという方式を取り入れたロボット「TELESAR II」である。これは、本研究室で開発された「再帰性投影技術[1]」を用いることで、個々の観察者がそれぞれの視点からの映像を観察できるようになっており、これによりロボットの対話者のみならずロボットの周囲にいる観察者達にとっても、ロボットの操作者があたかもその場に実在しているかのように感じることが可能となった。本研究室では、この技術を「相互テレイグジスタンス」と名付けている。

3. TELESAR II 人型スレーブロボット

前節において説明した相互テレイグジスタンスの概念を実現するためのハードウェアとして、TELESAR II のスレーブロボットを開発した。その外観を図 1 に示す。

この図において、頭部と、胴体の胸の部分に、再帰性反射材を塗布することにより、その部分に操作者の映像を再帰性投影プロジェクタ(Retro-reflective projector)で投影し、あたかも宇宙服のように、ロボットの中に操作者が入っているかのように感じることが可能となる。この技術により、ロボットと相対している人が、実際にロボットの操作者と会っているかのような感覚を得ながら親密なコミュニケーションを取ることが可能となる。さらに、スレーブロボットの持つ 2 本の腕と 5 本指のハンド[2]を、

マスタコクピットからの指令で動かすことで、操作者の上半身全体のジェスチャも伝えることができ、単にディスプレイとして操作者の顔の表情を伝えるのみならず、非言語的情報や、物理的な作用も伝達することが可能である。

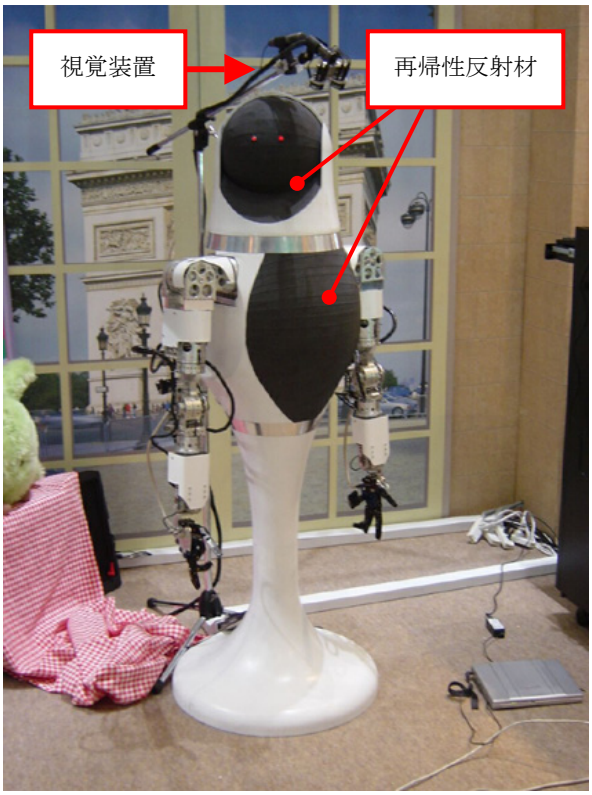

図 1 TELESAR II 人型スレーブロボット

人型スレーブロボットの頭部は、Pitch 軸、Yaw 軸の 2 自由度を持ち、マスタコクピット側の操作者の頭部に取り付けられた姿勢センサからの情報により制御されている。

人型スレーブロボットの腕は、人間と同様に 7 自由度を持ち、肩と手首の 3 自由度は 1 点で直交している。

人型スレーブロボットの胴体は、操作者の姿を自然に投影するために、平均的な日本人の成人の肩幅より大きい肩幅を持ち、胸や腹部を膨らませた形状にしている。また、頭部も、平均的な日本人の成人の頭部より大きく設計されている。

この胴体の細部の寸法を決定するにあたり、まず、東京工業大学精密工学研究所の長谷川晶一氏のグループにより開発された物理シミュレータ Springhead[3]により人型スレーブロボットのダイナミクスシミュレータを作成し、次に非接触型モーションキャプチャである㈱応用計測社の Quick MAG IV により、人の日常生活における片腕、あるいは両腕を用いたジェスチャや作業における動作を計測した上で、その動作データに基づき、シミュレータを動かすことで、胴体各部の寸法の妥当性を検討した。計測時のカラーマーカの取り付け位置を図 2 に示す。両肘・両手首の計 4 点に取り付けている。

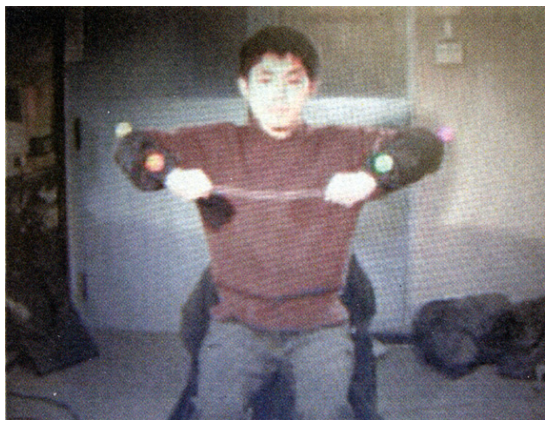

図 2 Quick MAG IV 用のカラーマーカの取り付け位置

まず「ジェスチャ」としては、1 人の成人男性を計測対象とし、

1. 片手を上げて対話者に挨拶をする動作
2. 片手を小さく振って「違う」という意思表示をする動作
3. 片手を大きく振って「別れ」の挨拶をする動作

の 3 種類のジェスチャを計測した。

次に、「作業」としては、同じく 1 人の成人男性を計測対象とし、

1. 片手で物を受け取る動作
2. 両手で物を受け取る動作
3. 片手で机の上の物を取る動作
4. 両手で机の上の物を取り、下へ降ろす動作

の 4 種類の作業を計測した。

そしてそれらの動作データに基づき、スレーブロボットの腕と胴体とが干渉しないという条件を満たすよう、胴体の外形を図 3 のように設計した[4]。

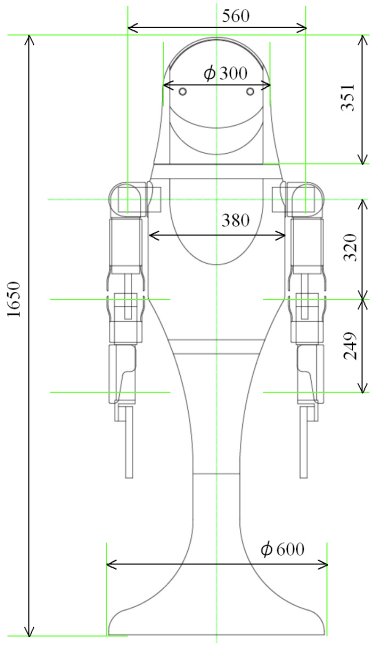

図 3 スレーブロボットの胴体の外形寸法［単位:mm］

また、スレーブロボットの各関節のモータ出力とギヤの減速比は表１のようになっている。両腕のギヤにはハーモニックドライブを、首のギヤにはモータ専用の遊星歯車ギヤヘッドを用いている。

表１　スレーブ各関節のモータ出力とギヤの減速比

関節	モータ出力［W］	ギヤの減速比
左右肩 Pitch 軸	150	50
左右肩 Roll 軸	150	50
左右肩 Yaw 軸	90	50
左右肘軸	90	50
左右手首 Yaw 軸	17.5	50
左右手首 Roll 軸	17.5	50
左右手首 Pitch 軸	17.5	50
首 Yaw 軸	20	66
首 Pitch 軸	20	66

スレーブロボットの手先の位置は、操作者の手先の位置と同じになるように制御されており、操作者が自然な感覚と共にジェスチャや作業を行うことが可能になっている。スレーブロボットの腕は、PD 制御及びインピーダンス制御[5]によりマスタコクピットからマスタ・スレーブ方式で制御することが可能で、またスレーブロボットのハンドは、同じくマスタコクピットから市販の計測装置であるエグゾス(Exos Dextrous Hand Master)あるいは本研究室で開発された力覚提示が可能なマスタハンド[6]で制御することが可能である。

スレーブロボットの頭部の上方には、８個の CCD カメラで構成された視覚装置が固定されており、スレーブロボットの視野を広い範囲で操作者に提示できるようになっている。

スレーブアームの制御PCにはPCIバックプレーン（IPC-610BP-30XFB：Advantech社製）を用いており、多くのインターフェイスボードを増設できる。スレーブアーム各関節の最終段の軸にはポテンショメータ(RDC506：ALPS社製)もしくはフォトインタラプタ(RPI-131：ROHM社製)が取り付けられており、ソフトウェア起動時のスレーブアーム各関節の初期姿勢はこれらで読み取っている。

ポテンショメータとフォトインタラプタからの出力は、ADボード（PCI-3177：インターフェイス社製、分解能:12[bit]、入力チャンネル数:64[チャンネル]、変換時間:10[μs]）で読み取っている。このADボードは、6軸力センサ（ビー・エル・オートテック株式会社製 MINIセンサ、精度:1.5%以下、分解能:力12[gf]、トルク10[gf・cm]）からの出力信号も読み取っており、これによりスレーブアーム手先の受ける外力を計測している。

各関節を駆動するDCモータには磁気式エンコーダが取り付けられており、このエンコーダのA相、B相からのパルスをエンコーダカウンタボード（PCI-6205C：インターフェイス社製、入力チャンネル数：8[チャンネル]、最大入力周波数：2[MHz]）により4逓倍モードでカウントすることで、スレーブアームが動作しているときの姿勢を高い分解能で計測している。

演算処理は2.4[GHz]のPentium4（Intel社製）を搭載したCPUボード（PCA-6186：Advantech社製）で行っている。OSはWindows2000 Professionalで、プログラミング言語はVisual C++ 6.0である。

制御PCは、DAボード（PCI-3346A：インターフェイス社製、分解能:12[bit]、出力チャンネル数:16[チャンネル]、セトリングタイム:10[μs]）を介してモータドライバに指令電圧を送ることで、DCモータを電流制御（トルク制御）している。

モータドライバには、最大で10[A]出力できるμSB-4Aと、最大で30[A]出力できるμSB-10Aの2種類があり、駆動するモータの出力に応じて使い分けられている。モータドライバは電源（PR series 30[V]、 40[A]、松定プレシジョン社製）から24[V]の電圧を供給されている。

安全確保のため、モータドライバ用の電源には緊急停止スイッチを取り付けて、スレーブアームが暴走したときに、すぐに電源を切れるようにした。

マスタアーム制御系との間の位置・力の情報伝送は、シェアドメモリ（PCI-4911C：インターフェイス社製メモリ共有ボード）を通じて行っている。これにより、スレーブアームとマスタアームそれぞれの制御PCは、自らのメモリにアクセスするのと全く同じ方式で、相手方との情報伝送が可能となる。マスタアームの制御システムの構成もこれと同様であり、ハンド及び頭部のマスタ・スレーブ系も、アームのマスタ・スレーブ系と同様に構成されている。

4. TELESAR II マスタコクピット

作成した人型スレーブロボットを操作するためのマスタコクピットの全体図を、図４に示す。

このマスタコクピットのアームの機構的な自由度は 6 自由度であり、力提示に特化した形状となっているが、操作者の上腕に加速度センサを取り付け、それにより操作者の腕の冗長自由度を計測することで、計測においては７自由度のアームとなっており、この情報を用いて７自由度の人型スレーブアームを制御することが可能となっている。

図４ TELESAR II マスタコクピット

操作者の背後にはブルーバックに相当する板を固定し、図 5 に示す立体ディスプレイの上部のカメラ（SONY 株式会社製の HANDYCAM を使用）で撮影した映像の中から、操作者の姿のみを切り出すことを容易にし、さらにその操作者の姿を、スレーブロボット側の背景画像に重ね合わせることで、スレーブロボットの体表面の再帰性反射材が塗布されている部分において、操作者の姿が映っていない部分は図 6 のように透明に見えるように画像処理されている[7]。また、立体ディスプレイの画像は、操作者の頭部の位置で立体に見えるように調整されている。

図 5 立体ディスプレイと撮像用カメラ

図 6 ロボットに投影された操作者の姿

再帰性投影プロジェクタの前方に人型スレーブロボットを配置し、前述の画像処理を施した映像を、愛・地球博における「プロトタイプロボット展」の来場者に図 7 のように再帰性投影プロジェクタを介して観察してもらい、スレーブロボットの動作と合わせて、ロボットの操作者の高い存在感を提示することに成功した。

図 7 再帰性投影プロジェクタを覗く来場者

5. まとめ

相互テレイグジスタンスのための人型スレーブロボットを作成し、それをマスタコクピットで操作して、操作者の存在感を提示する基礎実験を愛・地球博で行い、相互テレイグジスタンスの概念の有効性を実証した。今後は、観察者との物理的なインタラクションも含めた高度なコミュニケーションの実験を行ってゆく予定である。

謝辞　本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO 技術開発機構）の「次世代ロボット実用化プロジェクト（プロトタイプ開発支援事業)」の一環として実施されました。

また、TELESAR II の外装のデザインは、T-D-F(T. Sonoyama Design Factory)代表の園山 隆輔氏によるものです。この場をお借りして感謝致します。

参考文献

[1]Susumu Tachi: “Telexistence: Next-Generation Networked Robotics,” Ohmsha, Telecommunication, Teleimmersion and Telexistence II, pp. 3-38, 2005.

[2]星野, 城間, 川渕, “アブダクション可能な小形ヒト型ロボットハンドの制御,” 電子情報通信学会信学技報.

[3]長谷川, 藤井, 赤羽, 小池, 佐藤, “力覚インタラクションのための多面体の接触体積に基く実時間剛体運動シミュレーション,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 2, 2004.

[4]千種 大雅, “テレイグジスタンスのためのモーションキャプチャ手法の研究”, 東京大学工学部計数工学科　システム情報工学コース 2004 年度卒業論文.

[5]R. Tadakuma, Y. Asahara, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi: “Development of Anthropomorphic Multi-D.O.F. Master-Slave Arm for Mutual Telexistence,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, November/December Issue of 2005.

[6]S. Nakagawara, I. Kawabuchi, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi: “An Encounter-Type Multi-Fingered Master Hand Using Circuitous Joints,” Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’05), Barcelona, Spain, 2005.

[7]伊藤 崇仁, 篠原 亮, 梶本 裕之, 川上 直樹, 舘 暲, “再帰性投影技術を用いた遠隔情報の融合提示,” 第 34 回ヒューマンインタフェース学会研究会「人工現実感」, 2005.