

テレグジスタンスの研究 (第 97 報)

—5 指ロボットハンドとレッグ機構を含む 67 自由度テレグジスタンスロボットの全身マスタースレーブ制御—

Study on Telexistence XCVII: Full-body Master-slave Control of 67DoF Telexistence Robot including Five-finger Robot Hand and Leg Mechanism

井上康之¹⁾, 加藤史洋¹⁾, 舘暲¹⁾

Yasuyuki INOUE, Fumihiro KATO and Susumu TACHI

1) 東京大学 高齢社会総合研究機構

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, y-inoue@tachilab.org)

Abstract: A telexistence robot which has human-resemble body structure and works under master-slave control can reproduce human's complex body movements for performing many kinds of teleoperation like a real human. In this paper, a full-body robot control system for the latest model of the telexistence robot "TELESAR VI" is shown. One of the main features of this robot control system is that the five-finger robot hand is precisely controlled by using newly developed finger measurement system. Also, this control system manages a pair of 6-DoF leg mechanism which can copy the leg posture of the robot's operator sitting on a chair. Owing to these features, the operator can achieve fine manual operation as if the robot hand were own, and the appearance of robot's body such as arms, hands and legs synchronizing with own body is expected to bring whole-body transfer of bodily consciousness.

Key Words: Telexistence, robot hand, master-slave control, precise hand manipulation

1. はじめに

テレグジスタンスは人が今いる場所とは異なる別の空間に実際に存在しているような体験を生じさせる技術を指す概念である[1]. テレグジスタンスを実現させることを目的として, 人間と同等な運動機能や感覚機能を備えた人型代理ロボット TELESAR (Telexistence Surrogate Athropomorphic Robot) がこれまで開発されてきた[2-4]. その最新型となるテレグジスタンスロボット TELESAR VI は JST-ACCEL 身体性メディアプロジェクト[5]によって開発された. TELESAR VI の特徴として, 従来のテレグジスタンスロボット (TELESAR V[4]) の 52 自由度よりも多い 67 自由度の機構を有して操縦者の頭や腕・手指の動きに加えて脚の動きまでを再現することが可能であること, また, 触原色原理に基づく触覚センシング/提示システムを備えてロボットハンドで触れた触感を伝送・再現できることなどがある[6]. 本稿では, TELESAR VI の 67 自由度に関する全身マスタースレーブ制御について述べる.

2. 関連研究

従来の TELESAR V に関するマスタースレーブシステム

[4]は, 操縦者の身体運動を光学式モーションキャプチャと曲げ感知式センサグローブで計測し, その計測データに基づいてロボットのトルソ (5 自由度)・ヘッド (3 自由度)・アーム (7 自由度×2)・ハンド (15 自由度×2) の各関節を制御することで, ロボットに操縦者と同じ身体運動をリアルタイムで再現させるものであった. 特に, 頭部の視点 (目/カメラ) と腕の終端部 (手甲部) については, その 3 次元的位置と姿勢に関する 6 自由度をマスタースレーブ間で正確に一致させるための逆運動学が解かれている. これによってロボットに搭載されたステレオカメラ映像が操縦者の頭部運動に合わせて変化し, その映像を HMD などを通じて操縦者に提示することで, 操縦者の網膜上にロボットの視界が投影されることになる. さらに, 操縦者が操作するロボットハンドの空間座標は, 奥行方向も含めて操縦者が自分自身の手を見た時の場所と正確に一致する. これによって操縦者の身体に対する視覚情報と固有感覚情報が整合し, ロボットに対する強い没入感覚をもたらす.

しかし, TELESAR V のロボットハンド制御は, マスター側の計測システムの制約から指先の位置や姿勢に関する

厳密な逆運動学が解かれておらず、代わりに、特定の手指姿勢をマスタースレーブ間で一致させるアドホックな調整[7]が適用されていた。そのため、ロボットハンドで再現された指の動きの正確性が担保されるのは限定的な範囲に留まる。また、TELESAR Vは円筒状の下半身が台座に固定される形であり、人間の下肢に相当するレッグ機構は備わっていない。そのため、トレイグジスタンス中の操縦者が下を向くと自らの足が存在しないように見えてしまい、全身的な没入感覚の維持が妨げられる。

これに対して、TELESAR VIでは操縦者の計測システムとロボットのメカニズムを改良し、これらの問題を解決した。具体的には、新規に開発された複合式センサグローブと16自由度ロボットハンドを用いることで、操縦者が行う手指運動のより厳密なマスタースレーブ制御が実現された。また、ロボットの下半身には6自由度レッグ機構を左右に搭載することで、操縦者の座位姿勢での両脚の動きが再現される。このレッグ機構の存在は、ロボットに対する操縦者の自己投射性を強めるだけでなく、代理ロボットの動きを通して伝わる操縦者の存在感も強化するため、ロボットを用いた身体性コミュニケーションに貢献することが期待される。次節では、TELESAR Vに対するこれらの改良点も含めて、全身マスタースレーブ制御システムの詳細を述べていく。

3. 操縦者の身体運動計測システム

3.1 光学式モーションキャプチャ

TELESAR Vの計測システムと同様、操縦者の大きな身体運動は光学式モーションキャプチャ (Acuity inc, OptiTrack, Prime 13/13W) で計測する。以前のシステムでは再帰性反射マーカの取付部位が頭部・両肩・両手首の5箇所だったのに対して、本システムでは更に左右の上腕と足先にもマーカを配置して、合計9箇所の身体部位の3次元的位置と姿勢を最大240Hzで計測する。この計測で得られた54自由度のデータを利用して、4節で述べるTELESAR VIの胴体(6自由度)・頭部(3自由度)・アーム(7自由度)×2およびレッグ(6自由度×2)の制御を行う。さらに、操縦者が両手に装着したグローブの先端には赤外LEDマーカが取り付けられており、左右合わせて10本の指先位置の動きを時分割によって最大30Hzで計測し、後述する慣性式センサグローブと組み合わせて操縦者の手指運動計測に利用する。

3.2 慣性式センサグローブ

TELESAR Vで操縦者の手指運動の計測システムに用いられた曲げ感知式センサグローブ(5DT, 5DT-14)は、各指節の間の平面的な屈曲角度は計測できるが3次元の指先の方向や位置を計測できず、ロボットハンド制御において指先に関する逆運動学が解けない課題があった。これに対してTELESAR VIの計測システムは慣性式センサグローブ(AiQ Synertial Ltd, IGS-CobraGlove16)を採用し、更にモーションキャプチャによる位置計測と組み合わせることで指先の位置と姿勢を30Hzで計測可能な複合センサ

グローブ(図1)を開発することでこの問題を解決した。この複合センサグローブは、2種類のセンサ情報を相互に利用した計算モデルを用いることで手指運動の計測精度と安定性の両方が確保されている[8]。この計測システムを通して得られた60自由度のデータを利用して、4節で述べるTELESAR VIのロボットハンド(16自由度×2)の制御を行う。

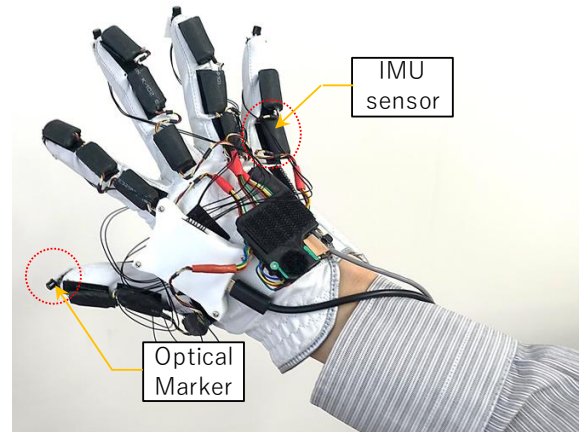


図1 手指運動計測用複合センサグローブ

4. TELESAR VIの運動制御システム

4.1 ロボットメカニズムの仕様

TELESAR VIの全身のメカニズムは、6自由度トルソと3自由度ヘッドから成る本体部(川渕機械技術研究所, UHB_01)と、その両肩に取り付けた7自由度アーム×2(川渕機械技術研究所, UHA_02)、腰部底板に取り付けた6自由度レッグ×2(川渕機械技術研究所, AHS_01)、さらに、左右のアーム先端に取り付けた16自由度ハンド×2(川渕機械技術研究所, Universal_Hand_05)という要素で構成される(図2, 3)。各関節には高出力のDCマイクロモータ(FAULHABER Drive Systems)が搭載され、人体の複雑な身体動作を再現するのに十分な広い可動範囲を持つ(表1-4)。

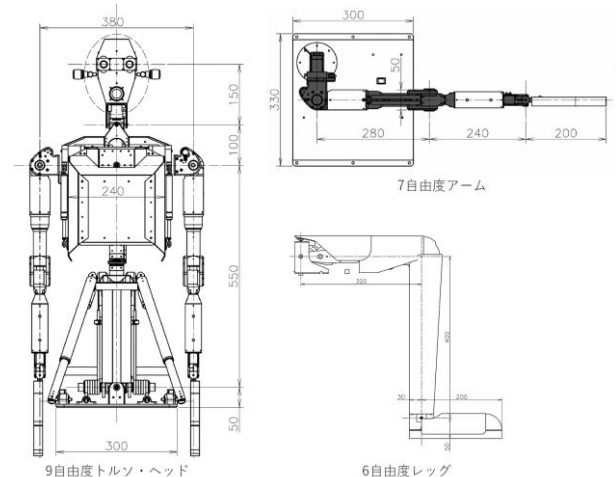


図2 TELESAR VIの外形寸法(ボディ)

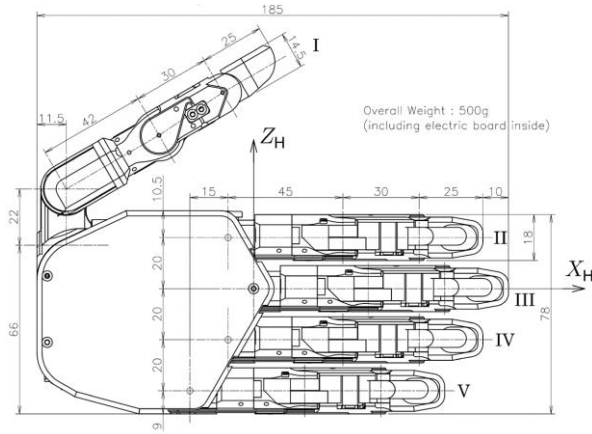


図3 TELESAR VI の外形寸法 (ハンド)

表1 TELESAR VI ボディ関節の可動性

	有用可動範囲	可動部位	可動方向
JB1	-18° ~ +18°	腰3軸回転	X軸
JB2	-10° ~ +35°		Y軸
JB3	-90° ~ +90°		Z軸
JB4	0mm ~ +100mm	脊柱1軸並進	Z軸
JB5	-26° ~ +8°	胸2軸回転	Y軸
JB6	-16° ~ +16°		X軸
JH1	-30° ~ +30°	首3軸回転	X軸
JH2	-30° ~ +45°		Y軸
JH3	-60° ~ +60°		Z軸

表2 TELESAR VI アーム関節の可動性

	有用可動範囲	可動部位	可動方向
JA1	-35° ~ +115°	肩3軸回転	Y軸
JA2	-100° ~ +15°		Z軸
JA3	-150° ~ +30°		X軸
JA4	-130° ~ 0°	肘1軸回転	Y軸
JA5	-90° ~ +90°	手首3軸回転	X軸
JA6	-12° ~ +42°		Y軸
JA7	-42° ~ +57°		Z軸

表3 TELESAR VI レッグ関節の可動性

	有用可動範囲	可動部位	可動方向
JL1	-8° ~ +8°	大腿3軸回転	Z軸
JL2	-25° ~ +5°		Y軸
JL3	-25° ~ +60°		X軸
JL4	0° ~ +115°	膝1軸回転	Y軸
JL5	-15° ~ +15°	足首2軸回転	X軸
JL6	-25° ~ +25°		Y軸

表4 TELESAR VI ハンド関節の可動性

	有用可動範囲	可動部位	可動方向
JT1	-120° ~ 0°	母指 基節3軸 回転	X軸
JT2	-60° ~ 0°		Y軸
JT3	0° ~ +45°		X軸
JT4	0° ~ +112°	中節1軸回転	Y軸
JT5	-30° ~ +80°	末節1軸回転	Y軸
JAb	0° ~ 15°	アブダクション	Y軸
JF1	0° ~ +78°	対向指 3リンク平面 回転	Z軸
JF2	0° ~ +112°		Z軸
JF3	-30° ~ +80°		Z軸

4.2 TELESAR VI のマスタースレーブ制御

トレイグジスタンスの実現において重要な点は、視点から指先や足先などの終端部位に向かうベクトルをマスタースレーブ間で一致させることであり、これは以下の2式の制約として表現される[4].

$${}^{sl_eye}w\mathbf{T} = {}^{ms_eye}w\mathbf{T} \quad (1)$$

$${}^{sl_eye}{}_{sl_endpoint}\mathbf{T} = {}^{ms_eye}{}_{ms_endpoint}\mathbf{T} \quad (2)$$

この2つの式が満たされることで、操縦者はあたかも自分の身体がロボットと重なっているような感覚を作り出し、操縦者自身の身体スキルを利用した直観的なマスタースレーブ操作が可能になる。TELESAR VI ではまず、(1)式に基づいてボディの制御を行う。計測された操縦者の頭部位置と姿勢 (6 自由度) および胸部姿勢 (3 自由度) を用いて(1)式を満足させる JB1~JB6 および JH1~JH3 の値を求める逆運動学を解く[9]. 次に、(2)式に基づいてアームを制御する。計測された操縦者の手首位置と姿勢 (6 自由度) および上腕の方向 (1 自由度) を用いて(2)式を満足させる JA1~JA7 の値を求める逆運動学を解く[9]. なお、従来の TELESAR V では、手首以降の逆運動学が解かれていなかったのに対して、TELESAR VI では手指計測システムの更新とロボットハンドの自由度の増加 (15→16) によって、ロボットハンドの5本の指すべてに対して可能な限りマスタースレーブ間で位置や姿勢を一致させる逆運動学を適用する。まず、ヒト側での可動範囲が最も広い親指は、それに対応するロボット側の自由度も多いため、計測された指先の位置 (3 自由度) と姿勢 (3 自由度) から(2)式をできるだけ満足させる JT1~JT5 の値を求める。その後、可動範囲が親指よりも広くない対向4指については、それに対応するロボット側の自由度も少ないため、姿勢に関する制御を妥協し、計測された指先位置 (3 自由度) から以下の(3)式を満足させる JF1~JF3 および JAb の値を求める[10].

$${}^{sl_thumb}p_{sl_finger} = {}^{ms_thumb}p_{ms_finger} \quad (3)$$

この制御の結果、指の各節の曲がりにはマスタースレーブ間で異なるが、その指先どうしの空間的な配置関係は両者で同一になり、人間の手指作業の遂行に重要な「摘まむ」指

の形がロボットハンドで再現されるようになる (図 4)。

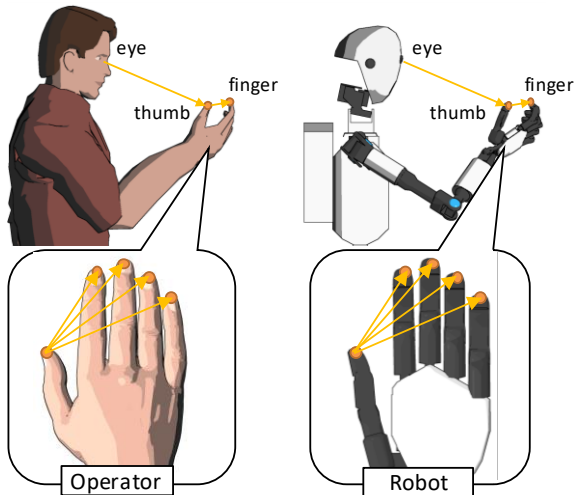


図 4 視点から母指・対向指に向かうベクトルの一致

また、レッグに関しては、アームの制御と同様、(2)式を満足させるように計測された操縦者の足首の位置・姿勢 (6 自由度) を用いて JL1~JL6 の値を求め、視点からのベクトルをマスタースレーブ間で一致させる制御を行う (図 5)。

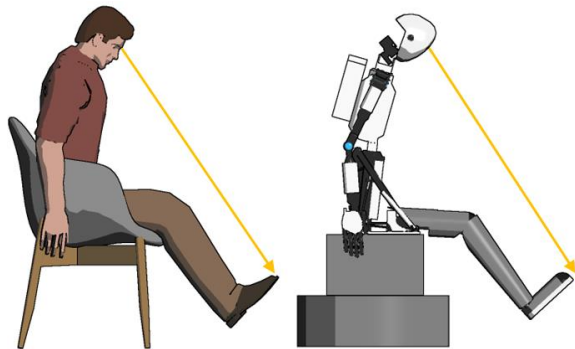


図 5 視点から足先に向かうベクトルの一致

5. まとめ

本稿では、新規に開発されたテレグジスタンスロボット TELESAR VI の合計 67 自由度を用いた全身マスタースレーブ制御の概要をまとめた。基本的な構成は従来までのシステムを踏襲しつつ、操縦者側の運動計測システムとロボット側のメカニズムを更新することによって、これまで困難であったロボットハンドの指先の正確な運動制御や、レッグ機構を用いたより人間らしい身体表現の再現が可能になった。

謝辞 本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (ACCEL) 「触原色に立脚した身体性メディア技術の基盤構築と応用展開」の支援によって行われた。

参考文献

- [1] S. Tachi, *Telexistence* (2nd Edition). World Scientific, 2015.
- [2] S. Tachi, H. Arai and T. Maeda, “Tel-existence master-slave system for remote manipulation”, *Proceedings of IROS '90. IEEE International Workshop*, pp. 343–348, 1990.
- [3] S. Tachi, K. Watanabe, K. Takeshita and K. Minamizawa, “Mutual Telexistence Surrogate System: TELESAR4 - telexistence in real environments using autostereoscopic immersive display -”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 25 – 30, 2011.
- [4] C. L. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, S. Kamuro, K. Sato, K. Minamizawa and S. Tachi, “Design of TELESAR V for Transferring Bodily Consciousness in Telexistence”, *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.5112 – 5118, 2012.
- [5] http://www.jst.go.jp/kisoken/accel/en/research_project/ongoing/h26_05.html
- [6] 舘暲, 井上康之, 加藤史洋, C. L. Fernando, M. Y. Saraiji : テレグジスタンスの研究 (第 96 報) —TELESAR VI: 67 自由度を有するテレグジスタンス AVATAR システム—, 第 15 回テレグジスタンス研究会予稿集, pp.1 – 6, 2020 年 2 月.
- [7] C. L. Fernando, M. Furukawa, K. Minamizawa, S. Tachi, “Experiencing ones own Hand in Telexistence Manipulation with a 15 DOF Anthropomorphic Robot Hand and a Flexible Master Glove”, *Proceedings of the 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT)*, pp.20 – 27, 2013.
- [8] Y. Inoue, F. Kato, and S. Tachi, “Finger Motion Measurement System for Telexistence Hand Manipulation”, *Proceedings of the 22nd International Symposium on Measurement and Control in Robotics(ISMCR-2019)*, 2019.
- [9] 井上康之, M. Y. Saraiji, C. L. Fernando, 加藤史洋, 山崎喬輔, 田島優輝, 舘暲: テレグジスタンスの研究 (第 89 報) —テレグジスタンスのためのロボットシミュレーションシステム—, 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2017 年 9 月.
- [10] Y. Inoue, F. Kato, and S. Tachi, “Master-Slave Robot Hand Control Method based on Congruence of Vectors for Telexistence Hand Manipulation”, *Proceedings of the 22nd International Symposium on Measurement and Control in Robotics(ISMCR-2019)*, 2019.