



トレイグジスタンスの研究 (第 89 報)

—トレイ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—

井上康之¹⁾, サライジ ムハマドヤメン³⁾, フェルナンド チャリス³⁾, 加藤史洋¹⁾, 山崎 喬輔¹⁾²⁾, 田島優輝¹⁾²⁾, 舘暁¹⁾

1) 東京大学 高齢社会総合研究機構 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, y-inoue@tachilab.org)

2) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒277-9561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

3) 慶應義塾大学 学大学院メディアデザイン研究科 (〒223-8526 神奈川県港北区日吉 4-1-1)

概要：実世界で人と相互作用するトレイグジスタンスロボットには操縦者の身体運動をリアルタイムで再現するマスタースレーブシステムが必要である。次世代のトレイグジスタンスプラットフォーム“TELESAR VI”の開発に向けて、本研究では操縦者の全身計測システムとロボットの制御システムを仲介するロボットシミュレーションシステムを構築した。このシステムを用いることで TELESAR VI の挙動をバーチャルに再現し、実機で使用するマスタースレーブシステムのプロトタイプ開発や CG モデルによる動作の検証を行うことが可能になる。

キーワード：トレイグジスタンス, TELESAR, ロボットシミュレーション, 運動学

1. はじめに

トレイグジスタンスは人が今いる場所とは異なる別の場所に実際にいるような知覚体験を生じさせる技術を指す概念として知られている[1]。実世界で人や物との自然な相互作用をトレイグジスタンスによって実現することを目的として、様々なコンセプトのトレイグジスタンスロボット“TELESAR (Telexistence Surrogate Anthropomorphic Robot)”がこれまでに開発されてきた[2][3][4][5][6]。

TELESAR V はマスタースレーブ式のヒト型代理ロボットである。ステレオカメラで得た映像を操縦者に HMD で提示しながら、操縦者の動きをロボットの動きとしてリアルタイムに反映する。また、ハンド先端部の触覚センサとその触覚を再現する触覚提示モジュールを使うことで遠隔地の触感を伝えることが可能である[6]。

TELESAR V の後継機となるトレイグジスタンスプラットフォーム“TELESAR VI”が現在開発されている。TELESAR V と同様に、ロボット頭部には人間と同じ両眼間距離を持つステレオカメラモジュールを、ハンド指先端には振動・力・温度をセンサして操縦者に伝送する触覚提示モジュールを搭載する。この TELESAR VI 開発に向けて、本研究では TELESAR VI の挙動をバーチャルに再現するロボットシミュレーションシステムを構築した。これと同

様の VR シミュレータは TELESAR V においても開発されており、その有用性が示されている[7]。

2. ハードウェア構成

TELESAR VI の機構要素は、本体部分のトルソ&ヘッド、左右 1 対のロボットアーム、5 指ロボットハンドからなる。各部位の機構的な自由度はトルソ 6、ヘッド 3、アーム 7×2、ハンド 16×2 で、合計 55 自由度ある (図 1)。各部位のサイズと可動範囲は人間と同程度であり、操縦者の身体の動きを正確に再現することができる。

2.1 トルソ部&ヘッド部

人間の胴体と頭に相当する TELESAR VI の本体部分である。ステレオカメラを搭載したヘッドはトルソの胸部上部に取り付けられる。トルソは腰 3 軸回転・脊柱 1 軸並進・胸 2 軸回転を、ヘッドは首 3 軸回転を行う。

2.2 アーム部

ロボットアームはトルソの胸部側面の左右に取り付けられる。人間の腕と同じ 7 自由度 (肩 3 軸回転・肘 1 軸回転・手首 3 軸回転) がある。

2.3 ハンド部

アーム先端のロボットハンドは人間の手と同じ 5 本指である。人の拇指に相当する第 1 指は 5 自由度あり他の指と対向できる。他の 4 指には各指関節の屈曲/伸展動作に関する 3 自由度 (第 2・第 3 指) または 2 自由度 (第 4・第 5 指) と指どうしの開閉動作に関する 1 自由度がある。

Yasuyuki INOUE, MHD Yamen SARAJI, Charith FERNANDO, Fumihito KATO, Kyosuke YAMAZAKI, Yuki TAJIMA and Susumu TACHI

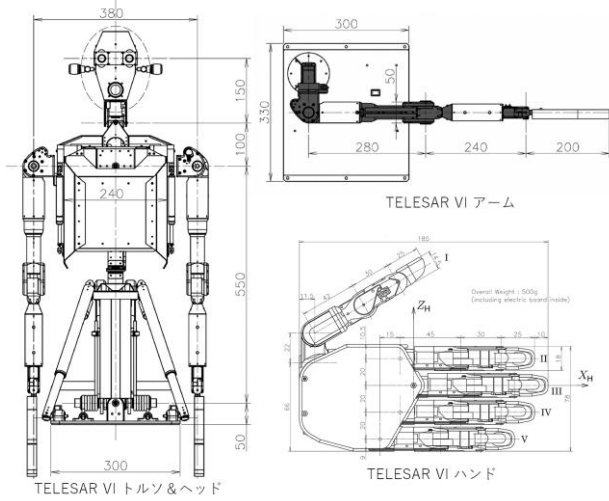


図 1: TELESAR VI のハードウェア構成

3. 運動学モデリング

TELESAR VI の構造を多関節リンク機構としてモデル化し、そのリンク機構の順運動学を解くことで、トルソ・ヘッド・アーム・ハンドの各部位の動きを定式化する。これにより、あるジョイント変数に対するカメラやハンドなど終端部の位置と方向を厳密に求めることができる。また、このリンクモデルに関する逆運動学問題を解くことで、操縦者の動きを代理ロボットに再現させるための具体的なジョイント変数が得られる。本稿では、ハンド以外のトルソ・ヘッド・アームに関する運動学の問題を取り扱う。

3.1 順運動学

3.1.1 トルソ&ヘッド部

ワールド座標系における TELESAR VI カメラの視点位置と方向を示す同次行列 ${}_{sl-eye}^WT$ は、以下の座標変換で求められる。

$$\begin{aligned} {}_{sl-eye}^WT &= {}_{sl-LO}^WT \cdot {}_{sl-chst}^{sl-LQT} \cdot {}_{sl-eye}^{sl-chst}T \\ {}_{sl-chst}^{sl-LQT} &= \mathbf{Torso}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, d_4, \theta_5, \theta_6) \\ {}_{sl-eye}^{sl-chst}T &= \mathbf{Head}(\theta_7, \theta_8, \theta_9) \end{aligned}$$

ここで ${}_{sl-LO}^WT$ はワールド座標系から見た TELESAR VI のローカル原点（腰の回転中心）である。 ${}_{sl-chst}^{sl-LQT}$ はローカル原点から見た胸の回転中心であり、トルソ部に関する順運動学から $\theta_1, \theta_2, \theta_3, d_4, \theta_5, \theta_6$ の関数として求まる。 ${}_{sl-eye}^{sl-chst}T$ は胸の回転中心から見たカメラであり、ヘッド部に関する順運動学から $\theta_7, \theta_8, \theta_9$ の関数で求まる。

3.1.2 アーム部

TELESAR VI のアームはトルソの胸部につながっている。ワールド座標系におけるアーム終端のハンドの3次元位置と方向を示す同次行列 ${}_{sl-hand}^WT$ は以下の座標変換で求められる。

$$\begin{aligned} {}_{sl-hand}^WT &= {}_{sl-LO}^WT \cdot {}_{sl-chst}^{sl-LQT} \cdot {}_{sl-hand}^{sl-chst}T \cdot {}_{sl-hand}^{sl-shld}T \\ {}_{sl-hand}^{sl-shld}T &= \mathbf{Arm}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5, \phi_6, \phi_7) \end{aligned}$$

ここで ${}_{sl-hand}^{sl-chst}T$ は胸の回転中心から見た肩の回転中心であり、リンク間の距離で求まる。 ${}_{sl-hand}^{sl-shld}T$ は肩の回転中心から見たハンドの根元（手首の回転中心）であり、アーム部に関する順運動学から $\phi_1 \dots \phi_7$ の関数で求まる。

3.2 逆運動学

3.2.1 トルソ&ヘッド部

トレイグジスタンスの実現において重要なことは操縦者の視点を代理ロボットの視点と正確に一致させることである。これによってロボットカメラの得た映像が操縦者自身の視覚体験として再現される。これを実現するには、トルソ部とヘッド部のジョイントを以下の等式が満たされるように制御しなければならない。

$${}_{ms-eye}^WT = {}_{sl-eye}^WT$$

ここで、 ${}_{ms-eye}^WT$ はワールド座標系における操縦者の視点位置・方向を示す同次行列である。

目標値として操縦者の視点位置と方向を設定するだけでは、合わせて9自由度あるトルソ部とヘッド部のジョイント変数の値は一意に決まらない。この冗長性を用いて操縦者の胸部の姿勢（上半身のひねり）をロボットに再現させることを考える。すなわち、操縦者の胸の向きを意味する同次行列 ${}_{ms-chst}^WT$ の回転成分を、トルソ胸部の向きを意味する同次行列 ${}_{sl-chst}^WT$ の回転成分と一致させる。

$${}_{ms-chst}^WT_{Rot} = {}_{sl-chst}^WT_{Rot}$$

ここで T_{Rot} は 4×4 の同次行列 T から回転成分を抜き出した 3×3 の回転行列を意味する。具体的な逆運動学計算は、解析解と反復計算を組み合わせた以下の手順で行う。

ステップ1: 腰から胸までの6変数に関する初期推定値を以下の式を用いて解析的に求める。ここで得られた推定値から用いてリンク機構の順運動学を解くことで操縦者と TELESAR VI の胸部の3次元位置・方向が一致する。

$$\begin{aligned} {}_{ms-chst}^WT &= {}_{sl-chst}^WT \\ &= {}_{sl-LO}^WT \cdot {}_{sl-chst}^{sl-LQT} \\ &= {}_{sl-LO}^WT \cdot \mathbf{Torso}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, d_4, \theta_5, \theta_6) \\ \rightarrow \mathbf{Torso}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, d_4, \theta_5, \theta_6) &= {}_{sl-LO}^WT^{-1} \cdot {}_{ms-chst}^WT \end{aligned}$$

ステップ2: ワールド座標系での操縦者の視点の回転成分 ${}_{ms-eye}^WT_{Rot}$ が、TELESAR VI カメラの回転成分 ${}_{sl-eye}^WT_{Rot}$ に一致するように首の3変数を解析的に求める。

$$\begin{aligned} {}_{ms-eye}^WT_{Rot} &= {}_{sl-eye}^WT_{Rot} \\ &= {}_{sl-LO}^WT_{Rot} \cdot {}_{sl-chst}^{sl-LQT}_{Rot} \cdot {}_{sl-eye}^{sl-chst}T_{Rot} \\ &= {}_{sl-chst}^WT_{Rot} \cdot \mathbf{Head}_{Rot}(\theta_7, \theta_8, \theta_9) \\ \rightarrow \mathbf{Head}_{Rot}(\theta_7, \theta_8, \theta_9) &= {}_{sl-chst}^WT_{Rot}^{-1} \cdot {}_{ms-eye}^WT_{Rot} \end{aligned}$$

ここで $\mathbf{Head}_{Rot}(\theta_7, \theta_8, \theta_9)$ は $\mathbf{Head}(\theta_7, \theta_8, \theta_9)$ から回転成

分に関する9つの関数を取り出したものを意味する。この推定値から順運動学を解くことで操縦者と TELESAR VI の頭部の姿勢（視点の方向）が一致する。しかし、操縦者とロボットの間形状やジョイント配置の違いによって視点の位置は一致しない。以後のステップでは反復計算によって両者を一致させていく。

ステップ3: 操縦者の視点位置と TELESAR VI のカメラ位置の間の誤差が閾値より大きい場合、誤差が最小になる $\theta_1, \theta_2, \theta_3, d_4$ の変化量を数値的に求めて、ステップ4に進む。誤差が閾値以下であれば手続きを終了する。

ステップ4: 操縦者と TELESAR VI の胸部の姿勢に関する制約 ${}_{ms-chst}^W T_{Rot} = {}_{sl-chst}^W T_{Rot}$ を満足させるように、胸の2変数 θ_5, θ_6 を解析的に求める。

ステップ5: ステップ3, 4の誤差修正に起因して生じたヘッド部の姿勢変化を元に戻すため、ステップ2と同様に首の3変数 $\theta_7, \theta_8, \theta_9$ を解析的に求めてステップ3に戻る。

3.2.2 アーム部

レイグジスタンスにおいて重要なもう一つの点は、代理ロボットのカメラ視点からロボットハンドを見るとき視線ベクトルと、操縦者の視点から本人の手を見るとき視線ベクトルを一致させることである。こうすることで映像で見るロボットハンドの位置と深部感覚で感じる本当の手の位置のずれがなくなり、自然な操作感が得られる。これを実現するには、アーム部のジョイントを以下の等式が満たされるように制御すればよい。

$$\begin{matrix} sl-eye \\ sl-hand \end{matrix} T = \begin{matrix} ms-eye \\ ms-hand \end{matrix} T$$

スレーブ側の左辺は以下のように展開される。

$$\begin{aligned} \begin{matrix} sl-eye \\ sl-hand \end{matrix} T &= \begin{matrix} sl-eye \\ sl-eye \end{matrix}^W T^{-1} \cdot \begin{matrix} sl-hand \\ sl-hand \end{matrix}^W T \\ &= \begin{matrix} sl-shld \\ sl-eye \end{matrix} T^{-1} \cdot \begin{matrix} sl-shld \\ sl-hand \end{matrix} T \end{aligned}$$

また、マスター側の右辺はワールド座標系から見た操縦者の手先位置と方向を ${}_{ms-hand}^W T$ とすれば以下になる。

$$\begin{matrix} ms-eye \\ ms-hand \end{matrix} T = \begin{matrix} ms-eye \\ ms-eye \end{matrix}^W T^{-1} \cdot \begin{matrix} ms-hand \\ ms-hand \end{matrix}^W T$$

これらの関係式から、肩から見たハンドに関する同次行列 $\begin{matrix} sl-shld \\ sl-hand \end{matrix} T = \mathbf{Arm}(\phi_1 \dots \phi_7)$ は以下のように求まる。

$$\mathbf{Arm}(\phi_1 \dots \phi_7) = \begin{matrix} sl-eye \\ sl-shld \end{matrix} T^{-1} \cdot \begin{matrix} ms-eye \\ ms-eye \end{matrix}^W T^{-1} \cdot \begin{matrix} ms-hand \\ ms-hand \end{matrix}^W T$$

アーム部のジョイント変数は7つであり冗長性がある。この冗長性を用いて操縦者の上腕の姿勢（肩から肘に向かう射出ベクトル）を再現させることを考える。すなわち、操縦者の肩から肘に関する同次行列 ${}_{ms-elbw}^{ms-shld} T$ の回転成分を、TELESAR VI アームの肩から肘に関する同次行列 $\begin{matrix} sl-shld \\ sl-elbw \end{matrix} T$ の回転成分と可能な限り一致させる。

$$\begin{aligned} \begin{matrix} ms-shld \\ ms-elbw \end{matrix} T_{Rot} &= \begin{matrix} sl-shld \\ sl-elbw \end{matrix} T_{Rot} \\ \begin{matrix} sl-shld \\ sl-elbw \end{matrix} T_{Rot} &= \mathbf{UArm}_{Rot}(\phi_1, \phi_2, \phi_3) \end{aligned}$$

ここで $\begin{matrix} sl-shld \\ sl-elbw \end{matrix} T$ はアーム上腕部分に関する順運動学から ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 の関数で求まる。

具体的な逆運動学計算は、解析解と反復計算を組み合わせた以下の手順で実施する。

ステップ1: 肩3軸回転の3変数 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 に関する初期推定値を以下の式を用いて解析的に求める。

$$\begin{aligned} \begin{matrix} sl-shld \\ sl-elbw \end{matrix} T_{Rot} &= \begin{matrix} ms-shld \\ ms-elbw \end{matrix} T_{Rot} \\ \rightarrow \mathbf{UArm}_{Rot}(\phi_1, \phi_2, \phi_3) &= \begin{matrix} ms-shld \\ ms-shld \end{matrix}^W T_{Rot}^{-1} \cdot \begin{matrix} ms-elbw \\ ms-elbw \end{matrix}^W T_{Rot} \end{aligned}$$

この推定値を適用することで、操縦者の上腕の姿勢方向は TELESAR VI アームの上腕部と一致する。なお、TELESAR VI アームのジョイント配置から、手先位置の決定には肩と肘の4変数 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ が、手先方向の決定には手首の3変数 ϕ_5, ϕ_6, ϕ_7 が寄与する。以後は反復計算によって手先位置を一致させていく。

ステップ2: 視点ローカル座標系から見た操縦者の手の位置と TELESAR VI のハンドの位置の間の誤差を最小化させる ϕ_1, ϕ_2 と ϕ_4 の変化量を数値的に求める。この手先位置の誤差最小化と同時に、ステップ1で実現した上腕の姿勢の一致をできるだけ維持する ϕ_3 を数値的に求める。数値計算の結果、手先の位置誤差が閾値以上の間はステップ2を繰り返し、閾値未満になればステップ3に進む。

ステップ3: 操縦者の手の方向と TELESAR VI のハンドの方向を一致させるために ϕ_5, ϕ_6, ϕ_7 を以下の式より解析的に求めて手続きを終了する。

$$\begin{aligned} \begin{matrix} sl-shld \\ sl-hand \end{matrix} T &= \begin{matrix} sl-eye \\ sl-shld \end{matrix} T^{-1} \cdot \begin{matrix} ms-eye \\ ms-hand \end{matrix} T \\ \begin{matrix} sl-shld \\ sl-wrst \end{matrix} T \cdot \begin{matrix} sl-wrst \\ sl-hand \end{matrix} T &= \begin{matrix} sl-eye \\ sl-shld \end{matrix} T^{-1} \cdot \begin{matrix} ms-eye \\ ms-hand \end{matrix} T \\ \begin{matrix} sl-wrst \\ sl-hand \end{matrix} T &= \mathbf{FArm}(\phi_5, \phi_6, \phi_7) \end{aligned}$$

$$\rightarrow \mathbf{FArm}_{Rot}(\phi_5, \phi_6, \phi_7) = \begin{matrix} sl-eye \\ sl-shld \end{matrix} T_{Rot}^{-1} \cdot \begin{matrix} ms-eye \\ ms-hand \end{matrix} T_{Rot}$$

ここで、 $\begin{matrix} sl-wrst \\ sl-hand \end{matrix} T$ はアーム前腕部分に関する順運動学から ϕ_5, ϕ_6, ϕ_7 の関数として求まる。

4. シミュレーションシステム

3節で示した TELESAR VI の運動学に基づいたロボットシミュレーションシステムを構築した。これは、計測した操縦者の姿勢から逆運動学を解くことによって操縦者の動きを再現するジョイント変数を求め、それを VR で作られた3Dモデルに反映することで TELESAR VI の挙動をシミュレーションするものである。このシステムは3次元計測システム、逆運動学 (IK) 計算システム、VR表示システムの3つのサブシステムから構成される (図2)。以下に本システムの概要とその用途・応用例を述べる。

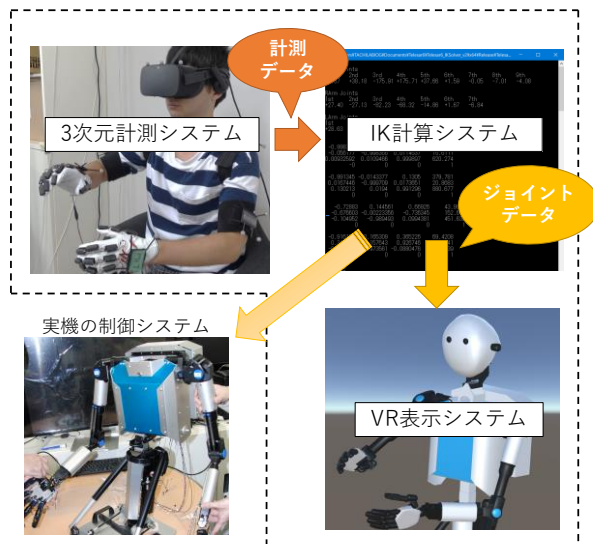


図 2: ロボットシミュレーションシステム

4.1 システム概要

4.1.1 3次元計測システム

光学式モーションキャプチャ (OptiTrack, Prime13/13W) を用いて操縦者の身体運動を計測するシステムである。身体の一部 (頭・肩・肘・手首) に取り付けられたマーカーを通じてそれらの部位の 3 次元位置と姿勢をサンプリング周波数 240Hz で計測する。計測データは IK 計算システムに送られる。

4.1.2 IK 計算システム

3次元計測システムで得られた操縦者の身体動作に基づいて TELESAR VI の逆運動学問題をリアルタイムで計算するシステムである。計算結果のジョイント変数は VR 表示システムに送られる。

4.1.3 VR 表示システム

IK 計算システムで得られたジョイント変数を実際の TELESAR VI と同じサイズ・リンク構造を持つ 3DCG モデルに適用することで、操縦者の動きに対するロボットの挙動を VR 空間に表示するシステムである。周囲からロボットの動きを確認できるだけでなく、HMD を用いることで実際に TELESAR VI に搭乗した時と同じ 1 人称視点の映像を見ることができる。

4.2 システムの用途

本システムのデータ通信の仕様は実際の TELESAR VI の実機の制御システムに使われるものと同じものである。そのため、このシステムを使って TELESAR VI の実機のためのマスタースレーブシステムの開発と動作検証を行うことができる。また、このシステムを使うことで実機とほぼ同じ見えの VR 映像によるテレグジスタンスロボットの操縦訓練や、テレグジスタンス環境における操縦者の心理特性を調査する VR 実験などに利用することができる。

5. むすび

本研究ではヒト型代理ロボットによるテレグジスタンスを実現するための運動学的な定式化と、その定式化に基づくロボットシミュレーションシステムの構築を行った。このシステムを利用することで、現在開発中の次世代テレグジスタンスプラットフォーム TELESAR VI の挙動をバーチャルに再現し、各種の動作検証や VR 実験を行うことができる。

今後の課題としては、本稿で取り扱わなかったロボットハンド部の運動学的な定式化を行いシミュレーションシステム内に組み入れることが挙げられる。

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] N. Kawakami and D. Sekiguchi, "TelesarPHONE - Communication Robot based on Next Generation Telexistence Technologies -", International Symposium on Robotics, pp. 1 - 4, 2005.
- [4] K. Watanabe, I. Kawabuchi, N. Kawakami, T. Maeda and S. Tachi, "Torso: completion of egocentric telegnosis system", ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies, 2007.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] M. Y. Saraiji, C. L. Fernando, M. Furukawa, K. Minamizawa and S. Tachi, "Virtual telesar - designing and implementation of a modular based immersive virtual telexistence platform", IEEE/SICE, pp. 595 - 598, 2012.