

トレイグジスタンスの研究 (第 59 報)

FlexibleSensorTube を用いた空圧アームの遠隔操作

Teleoperation of Pneumatic Arm with Flexible Sensor Tube

竹下佳佑¹⁾, 佐藤克成¹⁾, 南澤孝太¹⁾, 渡邊孝一²⁾, 新居英明²⁾, 川上直樹¹⁾, 舘暲²⁾,
和田貴志³⁾, 田中徹³⁾, 上田明寿³⁾

Keisuke Tkaeshita, Katunari Sato, Kouta Minamizawa, Kouiti Watanabe, Hideaki Nii, Naoki Kawakami,
Susumu Tachi, Takashi Wada, Toru Tanaka and Meiji Ueda

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科
(〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

2) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
(〒 223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1)

3) 旭光電機 (株)
(〒 650-0022 神戸市中央区元町通 5-7-20)

Abstract : In teleexistence master-slave system, a master system is required not to limit operator's motion as much as possible and to be able to use easily. FST is proposed as the master system that meets requirements. FST is composed of the tube of the multiple joints with potentiometers. The proposed technique was possible to control 4 DOF robot arm. However, it was not possible to control 7 DOF robot arm. In this paper, we propose the method how to control 7 DOF robot arm with FST. Then, we construct the telemanipulation system using pneumatic arm via networks.

Key Words: *Master-Slave, Flexible Sensor Tube, Pneumatic Arm*

1. はじめに

ロボットの遠隔操作において、あたかもロボットの存在する環境に居るような高度な臨場感を操作者に与えることができる技術は、トレイグジスタンス [1] と呼ばれている。これを実現するための手法の一つとして、操作者が操るマスタシステムと遠隔地に存在するスレーブロボットから構成されるマスタスレーブシステムが挙げられる。マスタシステムとしては、操作者の動作を極力制限しないこと、操作者の体格に左右されずどのような人でも容易に操作することが可能等の条件を満たしていることが望ましい。

操作者の体格の違いを吸収することが可能なマスタシステムとして、多関節の Flexible Sensor Tube(以下 FST)[2] が研究されている。FST は小型の関節を多数配置したチューブ状のセンサによって構成されており、チューブの先端の 3 次元位置と回転角を算出することができる。このマスタシステムを用いて、操作者の手先の 3 次元座標を計測し、4 自由度ロボットアームをスレーブロボットとするマスタスレーブ [3] が行われている。このマスタスレーブシステムでは FST の先端を操作者の手先に配置することにより、ロボットアームの手先の位置を操作者の手先の位置に合わせるこ

とができる。しかし、ロボットアームに壁の向こう側のものに触らせるようなタスクでは、操作者が壁を回避するような動作をしても、ロボットアームは壁にぶつかる可能性がある。これは人の腕の 7 自由度に対して、ロボットアームの自由度が少ないことが原因であると考えられる。人の腕と同じ自由度である 7 自由度のロボットアームを用いればよいが、これまで FST で 7 自由度分の情報を得ることができなかった。

そこで、本稿ではマスタシステムとして FST を用いた場合における 7 自由度の操作者の腕姿勢を取得する手法として、操作者の手先の位置だけでなく、手先の姿勢、肘の位置を計測することを提案する。また、7 自由度空圧アームをスレーブとし、ネットワークを通じた遠隔操作システムを構築する。

2. システムの構成

2.1 システムの概要

遠隔操作システムの構成を図 1 に示す。FST によって操作者の手先の位置と姿勢、肘の位置を計測し、FST 用 PC でその情報を取得する。FST と空圧アームでは座標系が異

なるので、FST 用 PC で空圧アームの座標系に座標変換を行い、UDP 通信でアーム制御 PC に座標変換した位置、姿勢を送信する。アーム制御 PC は受信した情報を空圧アームの各関節の目標角へ変換し、その目標角に各関節角を追随させるよう空圧アームを制御する。

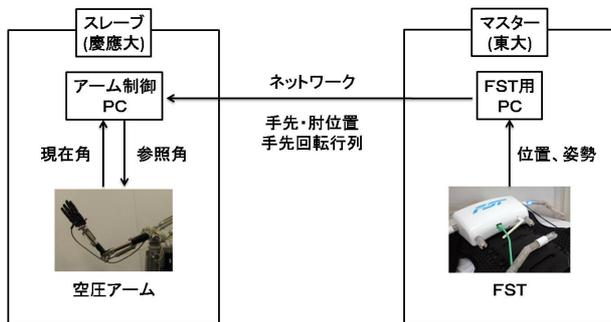


図 1: 遠隔操作システムの概要

2.2 FST

FST(図 2) は人体の四肢と頭部に対応したウェアラブルな位置姿勢計測システムであり、これをマスタシステムとして使用する。FST は背中に背負った FST 制御部と、それに接続された最大 6 本のセンサチューブから構成されている。センサチューブは多数の小型の関節で構成されており、操作者の体格、腕や足の長さに関わらず装着することができる。各関節には回転角度を計測するポテンシオメータが内蔵されている。このポテンシオメータの値を用いてセンサチューブの先端の FST 制御部に対する相対位置、姿勢を FST 制御部で計算し、LAN を通じて PC に出力する。また、原理的にはセンサチューブの先端だけでなく、FST の各関節ごとの位置姿勢の計測も各ポテンシオメータの値を用いて可能であるが、出力される情報量が多くなるため、現状では行われていない。



図 2: FST の概観

2.3 空圧アーム

空圧シリンダを利用して構築されたロボットアーム(図 3)をスレーブロボットとして用いる。以降において、スレーブ

アームと表記した場合には、基本的に空圧シリンダを利用したロボットアームをさすものとする。スレーブアームの自由度配置は肩に 3 自由度、肘に 2 自由度、手首に 2 自由度となっている(図 4)。スレーブアームの長さは標準的な人間の寸法に合わせて設計されており、上腕の長さが 0.30[m]、前腕の長さが 0.22[m] となっている。詳しい性能については文献 [4] に記載されている。



図 3: 空圧アームの概観 [5]

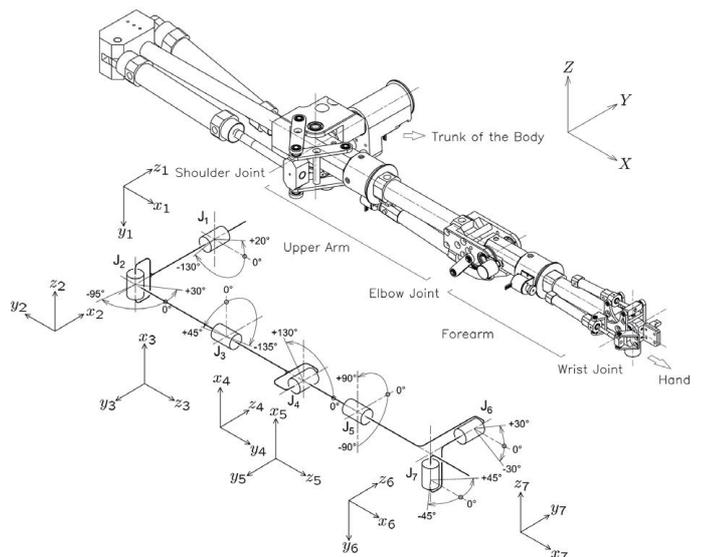


図 4: 空圧アームの自由度配置 [5]

3. マスタスレーブ間のマッピング

3.1 腕姿勢表現方式

操縦者の腕の位置姿勢をスレーブアームに反映する方式は大きく 2 つに分けられる。1 つは肩に対して手先の位置姿勢を合わせる方式である。この方式ではスレーブアームの肘位置は上腕・前腕の長さから決定される円周上に制限されるため、操作者の肘位置と一致するとは限らない。もう 1 つは単純に関節角度のみを一致させる方式である。操作者の手先の位置とスレーブアームの手先の位置は基本的に一致しないが、操作者の上腕・前腕の姿勢とスレーブアーム

ムの上腕・前腕の姿勢が一致するため、スレーブアームの周囲の環境との接触が避けやすくなるという利点がある。文献 [6] によれば、どちらの方式であっても作業タスクへの差は見られないため、一般的に用いられている肩に対する手先位置を一致させる方式を用いる。

3.2 FST による操作者の姿勢の取得

7 自由度空圧アームを操作するために、図 5 のように操作者の手の甲と肘にそれぞれ FST の先端を配置する。手の甲では、手の甲の姿勢に追従するように固定し、FST 制御部に対する手の甲の相対座標 P_m と図 4 の台座座標系 XYZ に対する回転行列 R を取得する。肘では、FST 制御部に対する肘の相対座標 E_m を取得する。

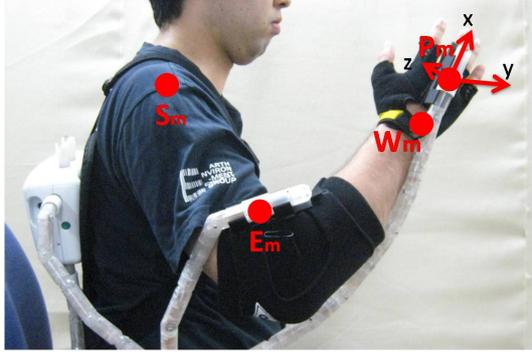


図 5: FST の先端の配置

逆運動学の準備として操作者の肩に対する手首の座標 $W_m = (W_x, W_y, W_z)$ 及び肩を起点とする肘の方向ベクトル $e = (e_x, e_y, e_z)$ を導出する。手首の座標 W_m は回転行列 R の成分 x を用いて

$$W_m = P_m - kx - S_m \quad (1)$$

となる。 k は手の甲と手首の長さであり、事前にキャリブレーションを行い求めておく。 S_m は FST 制御部に対する操作者の座標であり、事前に測定した値を使用する。腕の動作に対して肩の移動は僅かであるので、固定された値を用いても十分である。また、 e は以下の式で求められる。

$$e = \frac{1}{|E_m - S_m|} (E_m - S_m) \quad (2)$$

3.3 逆運動学による関節角の導出

スレーブアームの模式図を図 6 に示す。点 S はスレーブアームの肩、点 E は肘、点 W は手首、点 P は手の甲にあたる。スレーブアームの寸法は既知とし、上腕の長さを L_1 、前腕の長さを L_2 とする。 θ_i は図 4 における J_i の関節角度である。肩に対する手先位置を一致させる方式を用いるので、

$$S\vec{W} = W_m \quad (3)$$

とすると、幾何的な関係から θ_4 が求まる。

$$\cos \theta_4 = \frac{L_1^2 + L_2^2 - |S\vec{W}|^2}{2L_1L_2} \quad (4)$$

また、肩を起点とする肘の方向ベクトル e より、 θ_1 と θ_2 が求まる。

$$\tan \theta_1 = \frac{e_z}{e_x} \quad (5)$$

$$\cos \theta_2 = e_y \quad (6)$$

θ_3 を求めるために順運動学の式を変形する必要がある。順運動学は以下の式で表現される。ただし $C_i = \cos \theta_i, S_i = \sin \theta_i$ とする。

$$W_x = L_2(C_1C_2C_3S_4 + S_1S_3S_4 - C_1S_2C_4) - L_1C_1S_2 \quad (7)$$

$$W_y = L_2(S_2C_3S_4 + C_2C_4) + L_1C_2 \quad (8)$$

$$W_z = L_2(S_1C_2C_3S_4 - C_1S_3S_4 - C_1S_2C_4) - L_1S_1S_2 \quad (9)$$

上式より θ_3 は次のようになる。

$$\sin \theta_3 = \frac{W_x \sin \theta_1 - W_z \cos \theta_1}{L_2 \sin \theta_4} \quad (10)$$

$$\cos \theta_3 = \frac{W_y - (L_2 \cos \theta_4 + L_1) \cos \theta_2}{L_2 \sin \theta_2 \sin \theta_4} \quad (11)$$

これまで θ_1 から θ_4 までを求めたので、肩から θ_4 までの回転行列 0R_4 を求めることができる。 θ_4 から θ_7 までの回転行列を 4R_7 とすると

$${}^4R_7 = {}^0R_4^{-1}R \quad (12)$$

となるので、この方程式を解くことで θ_5 から θ_7 まで求めることができる。

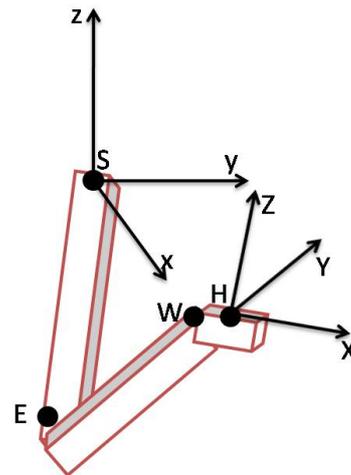


図 6: スレーブアームの模式図

4. 実装

遠隔操作を行うための予備実験として、操作者とスレーブアームを隣り合わせての動作確認を行った。その様子が図7である。スレーブアームの制御にはPID制御を用いている。図1におけるネットワークの部分にLANを用いている他は図1と同じシステム構成で行っている。操作者の動作に追従してスレーブアームが動作していることを確かめることができた。また、UDP通信により東大慶応大間の通信も行った。FSTで計測した操作者の腕姿勢が送られていることをシミュレータで確かめた。

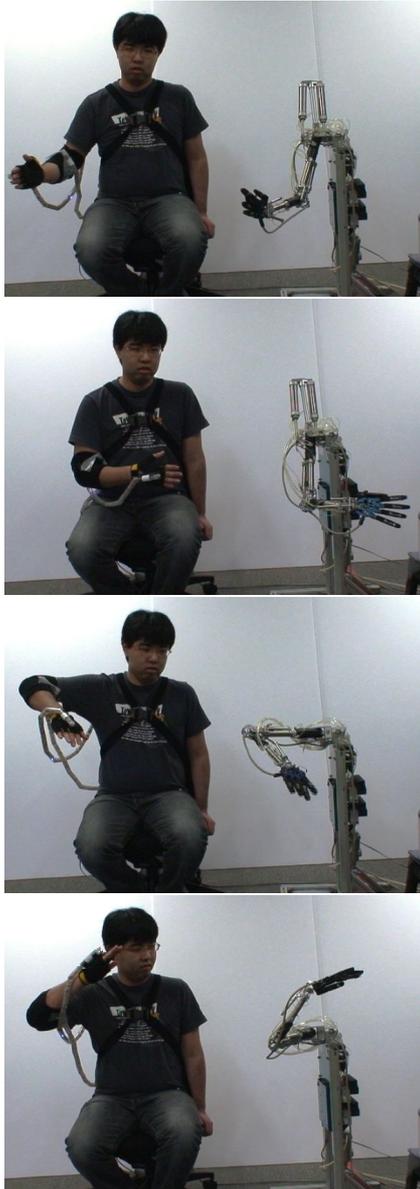


図7: 実装の様子

本稿では2本のFSTの先端をそれぞれ操作者の手の甲と肘に配置した。ただ、2.2節にあるように原理的にはFSTの先端だけでなく、FSTの途中の位置姿勢も計測できる。FSTの先端を手の甲に配置し、FSTの適当な位置を肘に固定することによって、1本のFSTで7自由度のアームの制

御が可能であり、1本のFSTで制御を行う方が、操作者の動作の制限が少なくなると考えられる。

また、腕の動作に対して肩の移動は僅かであるとして、事前にFST制御部に対する操作者の肩の位置を測定し、固定された値を制御に用いている。肩の移動が大きい腕の動作も行ったが、スレーブアームの動作は不自然に感じられなかったため、肩の位置として固定値を用いる手法に問題ないと言える。しかし、操作者が変わった場合の肩の位置の変化に関しては考慮していないため、これに関する検証が必要である。

5. まとめ

本稿では、FSTをマスタシステムとして用いる場合の操作者の7自由度の腕姿勢の取得を提案し、7自由度空圧アームをスレーブロボットとする遠隔操作システムの構成した。また、操作者とスレーブアームを隣り合わせてのFSTを用いた空圧アームの操作の動作実験を行い、提案手法がスレーブアームの制御に有効であることを確認した。本稿の段階では、操作者の腕姿勢を2本のチューブを用いて取得したが、今後は、1本のチューブで腕姿勢を取得し、7自由度のスレーブアームの制御を行いたいと考えている。また、本稿で提案した姿勢の取得方法は、腕だけでなく足や頭でも有効であると考えられるので、手や頭、足を含めたマスタスレーブシステムを構築したい。

謝辞 本研究の一部は総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)の委託研究として実施された。

参考文献

- [1] 館暲, 阿部稔. テレイグジスタンスの研究第1報, 第21回SICE学術講演会予稿集, pp.167-168, 1982.
- [2] 大須賀公一, 原口林太郎, 升川純司, 和田貴志, 北田安輝, 楠健志. フレキシブルセンサチューブ:FSTの開発, 第6回システムインテグレーション部門学術講演会, pp.327-328, 2005.
- [3] 岩田哲也, 大須賀公一. FSTを用いた双腕ロボットのマスタスレーブ制御, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomec2007), 2P1-J06, 2007.
- [4] Kiyoshi Hoshino and Ichiro Kawabuchi. Mechanism of humanoid robot arm with 7 dofs having pneumatic actuators. IEICE Trans. on Fundamentals, Vol.E89-A, No.11, pp.3290-3297, 2006.
- [5] Kouichi Watanabe, Hisashi Nagayasu, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Mechanical compliance control system for a pneumatic robot arm. In SICE Annual Conference 2008, pp.2789-2794, 2008.
- [6] 渡邊孝一, 川上直樹, 館暲. マスタスレーブシステムにおける腕寸法ずれ許容範囲の評価, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 (Robomec2008), 1A1-I17, 2008.