

テレイグジスタンスの研究(第57報)

-簡易型マスタシステム“MeisterGRIP”の設計

Study on Telexistence (LVII)-Design of Simplified Master System Called MeisterGRIP

古明地秀治, 佐藤克成, 南澤孝太, 新居英明, 川上直樹, 館暉

Shuji KOMEIJI, Katsunari SATO, Kouta MINAMIZAWA, Hideaki NII, Naoki KAWAKAMI and Susumu TACHI

東京大学 情報理工学系研究科

(〒113 東京都文京区本郷 7-3-1, {shuji_komeiji, katsunari_sato, kouta_minamizawa, hideaki_nii}@ipc.i.u-tokyo.ac.jp,
 {kawakami, tachi}@star.u.u-tokyo.ac.jp)

Abstract: In this study, we have developed a simplified master system called MeisterGRIP for Telexistence. To develop the master system, we propose a cylindrical interface that measures the user's grasping information as force vector distribution. Because the user can manipulate robot hand only by grasping the input device, the user can equip the device, this system doesn't need spacious area, and the individual difference of user's hand is irrelevant. In this paper, we describe the design of MeisterGRIP, and moreover, we introduce the way to manipulate robot hand and arm.

Key Words: Telexistence, Master system, Robotic hand

1. はじめに

近年、極地作業や遠隔コミュニケーション、エンターテイメントなどの目的で、ロボットの遠隔操作が実現されつつある。特に、遠隔地のものを掴んだり、持ち上げたりするようなインタラクションを可能するために、ロボットハンドやアームを円滑に操作できるマスタシステムが望まれている。これまでも、ロボットハンド、アームを操作するための様々なマスタシステムが開発してきた。例えば、数種のレバーやボタンを駆使してロボットハンドを操作するものがある。これらは手の大きさや、腕の長さの個人的な違いに捉われず、誰にでも扱うことが可能であるが、円滑な操作ができるようになるには、相当な練習を必要してしまう。その一方で、操作者の手、腕の姿勢をロボットハンド、アームの姿勢に反映させることで、あたかもロボットハンド、アームが自分のものであるような感覚で、それらを操作できるマスタシステムが開発されている。これらは、装着が煩雑で、操作者の手、腕の大きさが制限されてしまう等の欠点をもつ。

これまで実現してきたマスタシステムの多くは、限られた人間に向けて開発されてきている技術である。さらに今後は、遠隔コミュニケーションやエンターテイメントのように、誰にでも使える身近なマスタシステムが必要になってくると考えられる。そのような簡易型マスタシステムとしては、コンパクト、装着が容易、手腕の大きさなどの身体的な条件に拘束されない、といった要件が考えられる。

また、テレイグジスタンスのためのマスタシステムとしては、あたかもロボットアーム、ハンドが操作者の手、腕であるかのように感じながら操作できることが前提条件としてあげられる。

以上の要求を満たす簡易型マスタシステムとして、我々は“MeisterGRIP”を開発した。MeisterGRIPは、操作者がデバイスを握ったときの「握り具合」を取得し、その情報をロボットハンドやアームの動作に反映させる(図1)。これにより、操作者の指を動かそうという意志を直接ロボットハンドの指に伝えることができる。また、操作者が手を動かそうとする意志をロボットアームの先端位置に反映させられる。本稿では、MeisterGRIPによるロボットハンド操作原理及び、設計法を述べた上で、作成した実機を用いたロボットハンドの操作について述べる。

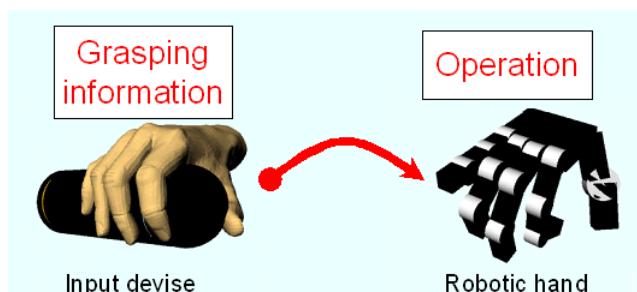


図1, MeisterGRIP の計測する「握り具合」を用いたロボットハンド操作

2. MeisterGRIP のロボットハンド操作原理

MeisterGRIP では、入力デバイスを握ることによるロボットハンド操作を可能とする。まず、MeisterGRIP は、操作者の「握り具合」を計測し、操作者の 5 本の指位置を入力ポイントとして認識する。そして、これら 5 つのポイントで計測される 3 軸の力ベクトル情報を基に、ロボットハンドの 5 指を操作する。

操作者の「握り具合」を取得するために、我々は MeisterGRIP に、神山ら[3]が開発した光学式力ベクトル分布センサを応用した。このセンサは、それぞれ異なる色のついた 2 層のマーカマトリクスが敷かれた透明弾性体と、CCD カメラにより構成される。透明弾性体の表面が計測面となっており、ここに力が加わると弾性体は変形する(図 2)。このときの変形情報は、弾性体内部のマーカの変位として、カメラにより計測される。このマーカ変位情報により、センサ表面に加わる力ベクトル分布情報を推定することが可能となる。

光学式力ベクトル分布センサによる 5 本の指位置認識には、カメラによって計測されるマーカの移動量を用いる。デバイス本体を握った際、マーカ移動の大きい部分が指位置だと推定される。そこで、マーカが配置される平面における移動量の重心位置を算出し、指位置、すなわち入力ポイントとして設定する。

認識された入力ポイント各点で、力ベクトルを算出する。力ベクトルの算出手法を以下に示す。まず、線形弾性体を仮定して、2 層のマーカの変位情報を $\mathbf{m} \in \mathbb{R}^{N \times 2M}$ 、弾性体表面に加わる力ベクトル分布を $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^{N \times 3M}$ とすると、

$$\mathbf{m} = \mathbf{H}\mathbf{f} \quad (1)$$

という関係式が成り立つ。式中の行列 $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{N \times 3M}$ は、弾性体の表面が平面のとき、弾性理論から解析的に導かれる[4]。ここで、 N はマーカの総数を、 M は測定点の数を示す。(1)式の逆問題を解くことで、センサ表面に加わっている 3 軸の力ベクトル分布を推定する。

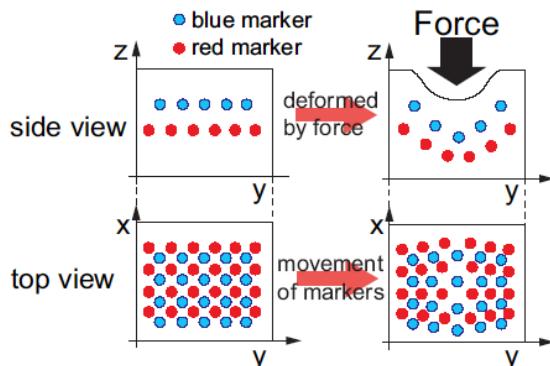


図 2. 弹性体内部のマーカ移動([1]から再構成)

3. MeisterGRIP の設計

「握り具合」を入力とする MeisterGRIP は、握り易いデバイスでなければならない。ここで、人間が物を掴むとき

の親指は、他の 4 指と対向している場合が多いことから、入力デバイスの形状は、円筒型であることが好ましいと考えられる。そこで、MeisterGRIP では、従来の平面型光学式力ベクトル分布センサを円筒型に応用する。

3.1 MeisterGRIP の構成

MeisterGRIP の構成を図 3 に示す。まず、2 層のマーカマトリクスの敷かれた透明弾性体の形状を円筒型にする。このとき弾性体には、ある程度の厚みを持たせ、円筒の内部は空洞とする。空洞部と弾性体部は、アクリルパイプにより仕切る。マーカ撮影に使用する CCD カメラは、円筒端部に置く。さらに、照明として白色 LED を設置し、外部の景色が映らないように、遮光用の黒色の薄膜で円筒表面を覆う。

次にマーカの撮影法である。端部に置いたカメラで、円筒側面のマーカを直接映すことは難しい。そのため円筒のカメラとは逆端部に、凸面鏡を置き、凸面鏡に映ったマーカをカメラで捉える(図 4)。このときカメラによって捉えられるマーカ画像は図 4(左)に示す。ここで、画像中に広がるマーカは凸面鏡に映るマーカである。画像中央付近に映るマーカは、円筒側面のカメラ側のマーカである。

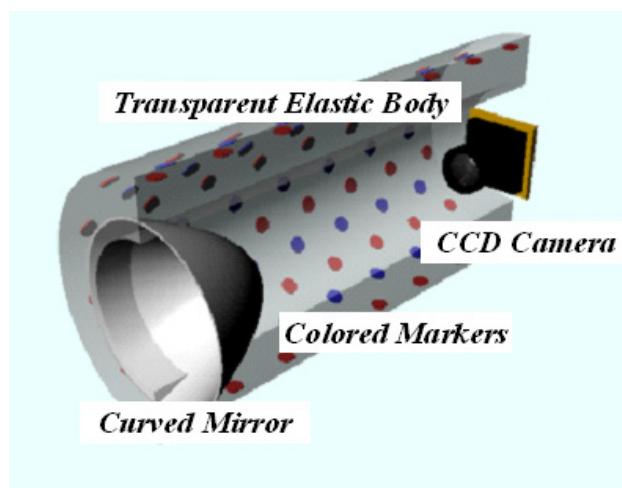


図 3. 円筒型力ベクトル分布センサのシステム構成図

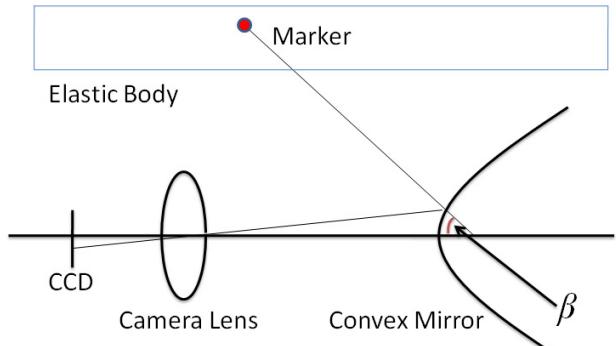


図 4. マーカから CCD カメラまでの光路

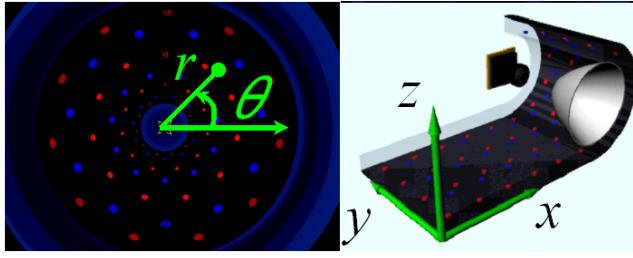


図 5. 凸面鏡に映るマーク(左), 近似平面弾性体(右)

3.2 MeisterGRIP のサイズ及びマークの間隔

MeisterGRIP は、操作者の「握り具合」を力ベクトル分布として計測できなければならない。このことを考慮して、MeisterGRIP のサイズ、マーク間隔を決定する。サイズに関しては、人間の手の大きさから、円筒の長さは、100mm以上、直径は、掴むことが可能な太さ、つまり、40mm~80mm程度の太さであることが望まれる。また、マークの間隔は、操作者の指からの力ベクトルを独立して計測可能な間隔でなければならぬ。そこで、人間の各指の中心軸間隔を10mmあるとすれば、サンプリング定理により、マーク間隔は、5mm以下であることが望まれる。

一方、凸面鏡に映るマークをカメラで捉えるため、円筒の長さが長くなるほど、図 5(左)に示すように、カメラ側のマークはより中心部に映ってしまう。マークがカメラ画像の中心部に映ると、マーク一つが持つ pixel 数が減少し、これらのマークの変位を取得することが困難になってしまふ。このことから、カメラの画素数の下で、円筒の長さと、マークの間隔はトレードオフの関係である。つまり、円筒の長さを長くすれば、マークの間隔を広げなければならぬし、マークの間隔を狭めれば、円筒の長さを短くしなければならない。そこで今回は、画素数 640×480pixel のカメラの下で、円筒の長さ 100mm 以上、マーク間隔 5mm 以下の目標を達成するために、図 6 に示すように 2 つのカメラと凸面鏡を用いる。

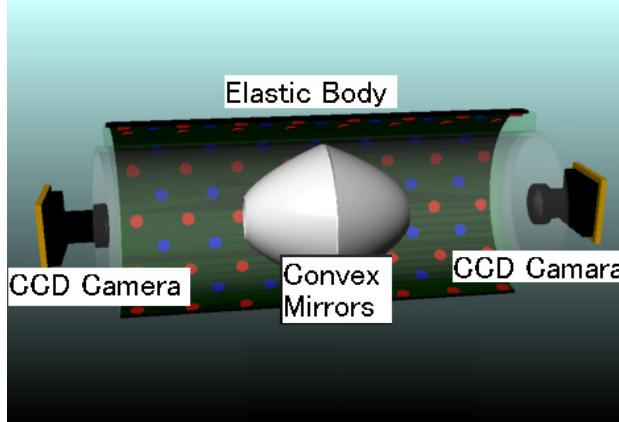


図 6. 2 つのカメラとミラーを用いた構成

3.3 力ベクトル分布計測手法

3.3.1 マーク移動の平面近似

ここでは、凸面鏡に映るマークの変位情報から円筒弾性体表面に加わる力ベクトル分布を推定する方法を述べる。

力ベクトル分布は、式(1)の逆問題を解くことによって推定されるが、式中の行列 \mathbf{H} が平面であるときのものを用いる。そのため、円筒弾性体を、展開してできる平面弾性体(図 5. 右)に近似する(以後これを近似平面弾性体と呼ぶ)。そして、この近似平面弾性体中のマーク変位を式(1)に代入して、力ベクトル分布を推定する。ここで、カメラ画像上に、凸面鏡の中心を原点とする極座標 $V=\{(r, \theta) | r\in[0, R], \theta\in[0, 2\pi_c] \text{ (pixel)}\}$ を、近似平面弾性体に、直交座標 $U=\{(x, y, z) | x\in[0, 2\pi R_c], y\in[0, L] \text{ (mm)}, z\in R\}$ を設定する。このとき、近似平面弾性体中の $(x_i, y_i, z_i)^T$ に存在する $i=1, 2, \dots, N$ 番目のマークは、カメラ画像上のマーク位置 (r_i, θ_i) を用いて

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_C \theta_i \\ f(r_i, z_m) \\ z_m \end{pmatrix} \quad (2)$$

により求めることができる。ここで、 f は、凸面鏡の形状と、カメラのレンズに依存する関数であり、 z_m は弾性体表面からのマークマトリクスの深さを示す。これより求められる近似平面上のマーク変位情報から力ベクトル分布を推定する。なお、凸面鏡と、カメラレンズの選定は、関数 f が r に関して線形になることが好ましい。

また、近似平面弾性体内の $(x_i, y_i, z_i)^T$ 上のマーク変位 $\mathbf{m}_i = (\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)^T$ はカメラ画像上の変位 $(\Delta r, \Delta \theta)$ を用いて、

$$\mathbf{m}_i = \mathbf{m}'_i + s \mathbf{p}_i \quad (3)$$

ここで、

$$\mathbf{m}'_i = \begin{pmatrix} R_C \Delta \theta_i \\ f(r_i + \Delta r_i, z_m) - f(r_i, z_m) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_i = \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos \beta_i \\ \sin \beta_i \end{pmatrix} \quad (5)$$

また、 β_i は図 4 に示すように、 i 番目のマークから、凸面鏡までの光路と、レンズ軸のなす角を示す。 s は未知数であり、つまりこれはカメラ画像の二次元情報 (r_i, θ_i) から、 \mathbf{u}_i 方向のマーク移動を計測できないことを意味している。ここで、 β_i の、マークの変位に対する変化は、微小であるとして無視している。

3.3.2 力ベクトル分布の推定

式(3)におけるマーク変位は、ベクトル \mathbf{u}_i 方向に未知数を含んでいるため、式(1)に当てはめただけでは、力ベクトル分布を推定することができない。この未知数を消去ために、式(1)の変換行列の各要素に対して、ベクトル \mathbf{u}_i に沿った 2×3 の射影行列

$$\mathbf{U}_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \beta_i & \cos \beta_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

をかける。すなわち、MeisterGRIP の力ベクトル分布は、

$$\mathbf{m}' = \mathbf{V} \hat{\mathbf{H}} \mathbf{f} \quad (9)$$

から算出することができる。ここで、

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_1 & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \ddots & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{U}_{2N} \end{pmatrix}, \quad \hat{\mathbf{H}} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{11} & \cdots & \mathbf{H}_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_{(2N)1} & \cdots & \mathbf{H}_{(2N)M} \end{pmatrix} \quad (10)$$

であり、 \mathbf{H}_{ij} ($i=1, 2, \dots, 2N, j=1, 2, \dots, M$) は、 j 番目の入力ポイントでの力ベクトルと、このときの i 番目のマーカ変位ベクトルを関係づける 3×3 の行列である。また、 \mathbf{m}' は \mathbf{m}'_i を縦に並べたベクトルである。

4. MeisterGRIP 実機の作成

作成した MeisterGRIP の実機を図 7 に示す。サイズは、長さが 140mm、太さが半径 38mm とした。また、マーカは 5mm 間隔で敷き、C C D カメラの画素数は 640 × 480pixel のものを使用した。カメラレンズは焦点距離が 6 mm、凸面鏡には直径が 30mm の半球ミラーを用いた。こうして、力ベクトル分布の計測が可能となった。

こうして得られた力ベクトルをもとに、ロボットハンドを操作した。このときの操作法は、計測された力ベクトルをロボットハンドの各指の関節角速度に対応させるものとした。MeisterGRIP の計測する「握り具合」から、ロボットハンドの各指を独立に動かすことができた。さらに、図 8 に示すように MeisterGRIP をジョイスティックに装着することで、ロボットアームの操作も可能なシステムを構築した。

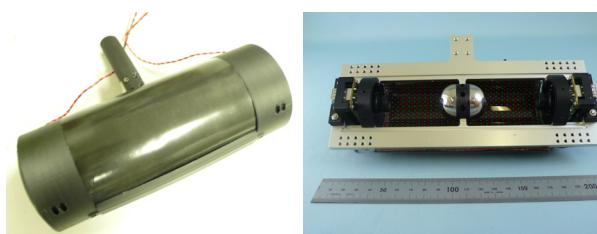


図 7、作成した MeisterGRIP(左)、MeisterGRIP の内部(右)

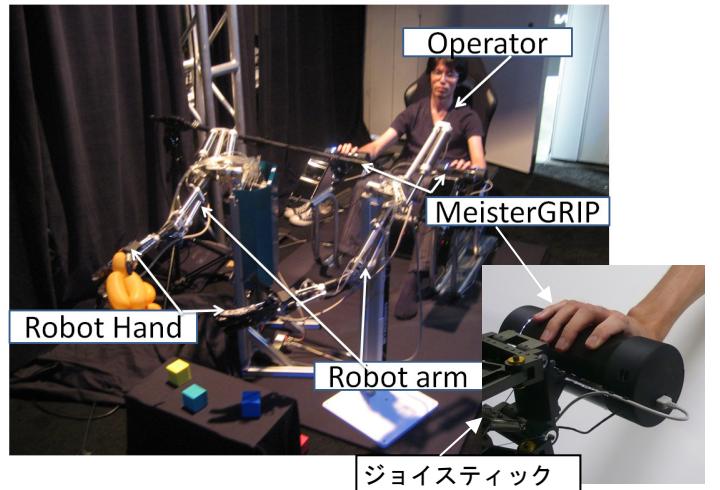


図 8、MeisterGRIP を用いたロボットハンド・アームの制御

5.まとめ

本稿では、簡易型マスタシステム MeisterGRIP の設計及び、ロボットハンド操作について述べた。さらに実機を作成し、実際にロボットハンド、さらには、ロボットアームを操作することが可能であることを示した。今後は、MeisterGRIP の操作性など、マスタシステムとしての有効性を評価する。

参考文献

- [1] J.M. Hollerbach, W.B. Thompson, and P. Shirley: The Convergence of Robotics, Vision, and Computer Graphics for User Interaction. The International Journal of Robotic Research, Vol. 18, No. 11, pp. 1088–1100, 1999.
- [2] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu, R. Boian: The Rutgers Master II – New Design Force-Feedback Glove. Proc. IEEE/AMSE Transactions on Mechatronics, Vol. 7, No. 2, pp. 256–263, 2002.
- [3] Kazuto Kamiyama, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, Susumu Tachi: Evaluation of a Vision-based Tactile Sensor. ICRA 2004: 1542-1547
- [4] L. D. Landau, E. M. Lifshitz : “Theory of Elasticity”, BUTTERWORTHHEINEMANN, (1985)