

基礎論文

ロボットハンド操作システムのための 円筒型多点力ベクトル入力インタフェース

古明地 秀治^{*1}佐藤 克成^{*2*3}南澤 孝太^{*3}渡邊 孝一^{*3}新居 英明^{*3}館 暲^{*3}

Cylindrical Multi-touch Interface for Force based Teleoperation of Robotic Hand

Shuji Komeiji^{*1}, Katsunari Sato^{*2*3}, Kouta Minamizawa^{*3},Kouich Watanabe^{*3}, Hideaki Nii^{*3} and Susumu Tachi^{*3}

Abstract – This paper proposes a cylindrical multi-touch interface that enables teleoperation of robotic hand based on the force vector on each finger. The cylindrical interface measures the operator's grasping information as force vectors, and this information is reflected to movement of robotic fingers. This approach enables to make a compact and easy-to-use telexistence system for non-professional people. In this paper, the authors describe a design approach of the cylindrical interface and implementation of the prototype system. The evaluations of the cylindrical interface indicate that the interface could be used for teleoperation of a robotic hand.

Keywords : Multi-touch interface, Force distribution sensor, Teleoperation, Telexistence

1 はじめに

遠隔地の人型ロボットをあたかも自分の分身であるかのように操作し、ロボットを介することにより自分自身が遠隔地に移動したかのような感覚を提供する技術として Telexistence[1] が提案されている。Telexistence に基づくと、利用者は遠隔地の局所的な空間を自由に動くことができ、さらにモノやヒトとの物理的なインタラクションが可能になる。このことから、利用者の遠隔地での活動の幅を拡げ、また、遠隔地での存在感を高めることができるため、Telexistence は従来の電話やテレビ電話を超えるコミュニケーション手段となることが期待される。これまでに、Humanoid Robotics Project (HRP) の遠隔制御用コックピット [2] のような高臨場感の視聴覚・触覚を伝達するシステムなどが研究されてきた。さらに、近年 Telepresence ロボット「QB」 [3]、「Vgo」 [4] などが市販化され、ロボットを用いて職場や学校へ通うことも試みられている。簡単な視聴覚情報の伝達と自由な移動に限られているものの、遠隔地の他者とのコミュニケーションが実現されている。

一方、我々は TELEsarPHONE[5] において、手や腕を有する相互 Telexistence システムを提案している。これは、身体動作や触覚情報を伝達し、ジェスチャを行ったりモノを掴んだりというように、我々が普段何気なく行っている手を使った動作を遠隔地においても可能にする。しかしながら、従来の手や腕を有する Telexistence システムでは、操作者の手の動作を各指につき 3 自由度、腕の動作を 7 自由度で取得し、さらに力覚フィードバックを提示するために多自由度のリンク機構を必要とする。このため、高コストで、可搬性のないものとなっている。そこで、本論文では、利用者の幅を拡げるため、低コストで家庭内に設置できるような、ロボット操作システムを提案する (図 1)。これにより、提案システムでは一般人による日常的な利用が期待される。例えば足を怪我したり風邪を引いたり、通常なら外出困難な状況において、提案システムを用いることで、現在販売されている「QB」のようなシステムよりも多くのタスクをこなし、利用者の存在感を遠隔地に与えられると考えられる。

提案システムの構築において、低コストで家庭内に設置できることを考慮する。コミュニケーションへの応用を最大の目標とするため、卵を掴む、ネジを回すといった精密な動作は対象としない。一方で、遠隔地のモノを掴んで調べる、遠隔地の人にモノを手渡す、ジェスチャを提示するなどの動作は伝える必要がある。すなわち手の各指の屈伸及び内外転、手先の位置・姿勢といった情報を伝達できればよい。我々は、

^{*1}東京大学大学院情報理工学系研究科

^{*2}日本学術振興会／慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科

^{*3}慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

^{*1}Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

^{*2}Japan Society for the Promotion of Science / Graduate School of System Design and Management, Keio University

^{*3}Graduate School of Media Design, Keio University

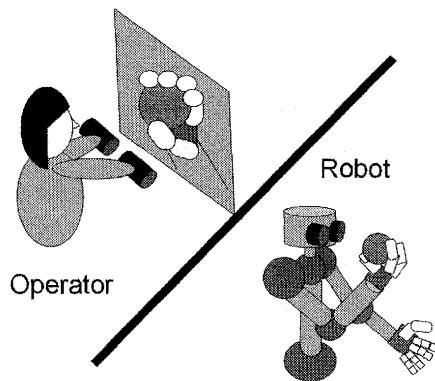


図1 本研究で提案するロボット操作システムの概念図
Fig.1 Conceptual drawing of proposed robot operation system

手の動作を取得するインタフェースとして、利用の手軽さから把持型インタフェースに着目した。例えば、Nakatsuruら[6]による球状のデバイスがある。これは、握る、投げる、転がす、振る動作を取得することを目的としている。しかし、把持や手先位置の計測はできるものの、各指からの入力を独立に取得することはできない。JUSTIN[7]では、2,3本の指に対応したボタンが配置され、各指の押しこみ具合に応じて、ロボットハンドの指を操作できる把持型インタフェースが採用されている。これらのボタンにはアクチュエータが内蔵されており、操作者に力覚を提示できる。しかしながら、ボタンの位置が物理的に固定されているため、操作者の手の大きさや把持姿勢が制限されてしまう。一方、林ら[8]の円筒型ユーザインタフェースの場合、デバイスのあらゆる位置が指の計測点となっている。力覚の提示を目的としたアクチュエータは有していないが、強く握ると強い反力を感じられる。このことから、ロボットが物体を把持するときの力と操作者の把持力が対応付けられるため、可制御でないものの、力覚フィードバックが存在するとみなすことができる。これら従来の把持型インタフェースでは、各指の1次元の力ベクトルを計測しており、指の屈伸は計測できるが、内外転は計測できない。Ohshimaら[9]の半球型インタフェースで提案されているように、3次元力ベクトルを計測できれば指の内外転の計測も可能である。しかし、普段我々が握って使用する機器の多くは、ハンドルや道具の柄のように形状が円筒であり、握る対象としては円筒型が慣れ親しんだ形状であると考えられる。そこで、本研究では把持型インタフェースの形状として円筒型に着目する。

以上を踏まえ、我々は、操作者の各指の力ベクトルを計測する円筒型多点力ベクトル入力インタフェース

(以下、円筒型インタフェースと記す)を提案する。本論文では、円筒型インタフェースの設計、プロトタイプを構築、計測精度を評価を行う。さらに、操作者が任意の力ベクトル情報を入力可能であることを確認し、円筒型インタフェースを用いたロボットハンド操作システムを構築する。

2 円筒型インタフェース

2.1 本論文で提案する円筒型インタフェース

本論文で提案するインタフェースは、操作者の手指の計測点が任意で、力覚フィードバックがあり、指の屈曲、内外転の情報も取得できるものであることが望まれる。また、ここでは、指先の力ベクトルを入力として考えているが、Pangら[10]の研究から、人が物体を把持した際に指先で弁別可能な力の強度の誤差は、目標とする把持力の7[%]程度とされている。そこで、強度分解能として、強度計測の誤差を7[%]以内に抑える必要があると考える。また、操作者の手指の計測点を任意にするために、操作者の指幅を10[mm]とすると、10[mm]以下の解像度を有する分布で力ベクトルが取得できることが望ましい。

これらの要件を満たすよう構築可能なセンサとして、神山ら[11]が提案した光学式力ベクトル分布センサがある。本論文では光学式力ベクトル分布センサを円筒型インタフェースに応用する。

2.2 光学式力ベクトル分布センサ

光学式力ベクトル分布センサ(図2)は、内部に2層のマーカ群の敷かれた透明な直方弾性体と、これらのマーカ群を撮影するための1台のCCDカメラから構成される(図2.a)。センサに与えられた力によって生じる弾性体の変形の程度を、弾性体内部のマーカの変位としてカメラによって計測する(図2.b)。そして、弾性体理論[12]に基づいて、弾性体の変形情報より、弾性体に加わっている力ベクトル分布を推定する。

力ベクトル分布推定は、力ベクトル分布と弾性体変位ベクトル(マーカ群の移動)の間に成立する関係式を解くことによって行われる。この関係式は、直方弾性体を半無限弾性体、線形弾性体であるという仮定を置いたときに成立し、式(1)のように示される:

$$m = Hf \quad (1)$$

ここで、 $m(\in R^{2i})$ はカメラ画像中のマーカの2次元の変位を示し、 $f(\in R^{3j})$ はデカルト座標系における3次元の力ベクトル分布を示す。 $H(\in R^{2i \times 3j})$ は弾性体理論に基づいて作成される行列であり、ヤング率やポアソン比といった弾性体のパラメータをはじめとして、マーカ位置、力ベクトル計測点の位置及び、マーカを撮影するカメラの位置に依存する。ここで、 i は

弾性体内部の2層のマーカの合計の個数を示し、 j は弾性体表面のカベクトル計測点の個数を示す。使用するカメラの解像度・弾性体の特性・マーカの配置が、カベクトルの強度分解能や空間分解能といった計測精度を決定する。

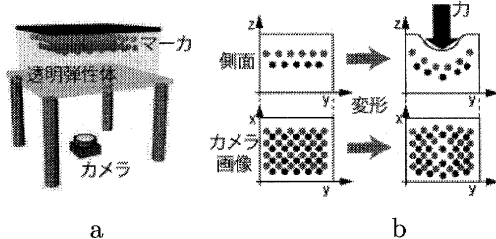


図2 a:光学式カベクトル分布センサの概念図, b:カメラから観測されるマーカの移動
Fig.2 a: Configuration of the vision based force distribution sensor, b: Marker movements captured by the camera

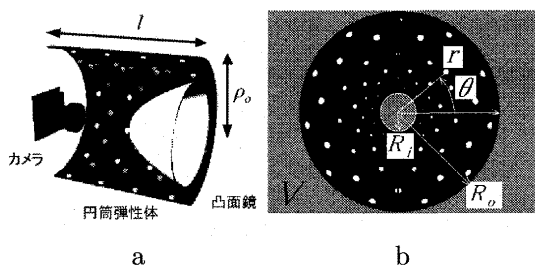


図3 a:円筒型インタフェース概念図, b:カメラから観測されるマーカ配置
Fig.3 a: Conceptual diagram of the cylindrical interface, b: Markers captured by the camera

2.3 円筒型インタフェースの構成

平面型の光学式カベクトル分布センサを円筒化して、把持型のインタフェースを構築する。円筒型インタフェースを構築する際、マーカ撮影用のカメラをどのように配置するか、が問題になる。カメラの配置方法としては、例えば、複数のカメラを円筒内部に放射状に並べ360°全周囲を撮影する方法と、一台のカメラを円筒の端部に、一つの凸面鏡を他端部におき、凸面鏡に反射して映る像を撮影する方法が考えられる。ここで複数のカメラを用いる方法では、撮像素子やレンズを円筒中心部に配置する必要があるため、握りやすい太さのデバイスを構築することは困難である。従って、本論文では一台のカメラと一つの凸面鏡を用いる方法(図3.a)を採用する。

2.4 カベクトル分布の算出法

円筒型インタフェースにおけるカベクトル分布の算出は、円筒側面である計測面を平面に近似し、平面型の算出式(1)を適用することで行う。このとき、円筒

弾性体内部のマーカの移動量を計測するために、カメラ画像(図3.b)で観測されるマーカの移動量から、図2.bのような、2次元平面上におけるマーカ移動量に変換する。その変換方法を以下に示す。まず、カメラ画像(図3.b)に対して、画像中心を原点とした極座標 $V = \{(r, \theta) | 0 \leq r, 0 \leq \theta \leq 2\pi\}$ を置く。そして、図2.bのカメラ画像に対して、画像中心を原点とする直交座標 $U = \{x, y\}$ を置く。このとき、 V 上の点と、 U 上の点との関係の関係は、以下の式により与えられる。

$$r = g_{\Gamma, \Lambda, z}(y) \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{2\pi(\rho_0 - z)}x$$

ここで、 g は平面型カベクトル分布センサのカメラ画像の U 上の y に関する、極座標 V 上の r についての関数である。この関数は、カメラのパラメータと、凸面鏡の形状に依存する。関数 g の添え字である Γ はカメラパラメータからなる集合を示し、 Λ は凸面鏡の形状を表す。そして、 z はセンサの計測面からのマーカの深さである。カメラパラメータ集合 Γ はレンズの焦点距離 f や、CCD 素子のサイズ τ などからなる。カメラ画像上で計測される各々のマーカ変位は、関係式(2)によって、円筒を平面弾性体に近似したときの各々のマーカ変位に変換が可能である。式(2)を解くことで、式(1)で必要とされる変位ベクトルを計測できる。

2.5 円筒型インタフェースの設計

前述のような一台のカメラと一つの凸面鏡を用いる方法では、デバイスの太さと計測精度を先に与えた場合、カメラの解像度の有限性からデバイスの長さ上限が発生してしまう。これは、有限の画素数のカメラでは、撮影できるマーカ数も有限であるためである。本論文で提案する設計法は、デバイスの太さと空間分解能を予め決めたあとに、デバイスの長さの上限を導く方法を取る。

この設計パラメータとしては、主に、デバイスのサイズ、弾性体のパラメータ、カメラパラメータ Γ 、凸面鏡の形状 Λ が挙げられる。デバイスのサイズとは円筒の半径 ρ_0 と長さ l を指し、弾性体のパラメータとは、変位ベクトル計測のためのマーカ間隔 λ 、マーカの大きさ μ を指す。マーカの大きさは $\mu = \kappa\lambda$ とする。弾性体の変位により、2層のマーカが重なってカメラに映ることを避けるため $\kappa < 1/2\sqrt{2}$ とする。弾性体の他のパラメータであるヤング率、厚みなどは、力の強度分解能の精度に影響を与える。また、カメラのパラメータとは、CCD 素子の大きさ、画素数、レンズの形状を指す。

円筒の長さの導出

まず、カメラ画像中にマーカを映すことのできる範

囲を定式化することから始める。カメラ画像である図 3.b に見られるように、凸面鏡から離れた点上のマーカほど、カメラ画像中の中心に小さく映ってしまう。カメラ画像上で最も小さく映るマーカの大きさを、カメラ画素に映り込むほどの大きさにしなければならない。ここで、カメラ画像の短辺の半分の大きさを R_o [pixel] とおく (カメラに映すことのできる円の半径の最大値)。このとき、カメラ画像上、画像中心を中心とするある円の周上 ($r = r_\alpha \leq R_o$ [pixel]) にマーカは $2\pi\rho_o/\lambda$ 個存在可能である。つまり、これら $2\pi\rho_o/\lambda$ 個のマーカは、長さ $2\pi r_\alpha$ [pixel] の円周上に並ぶ。この円周の長さは、 r_α が小さくなるほど短くなり、マーカは小さく映る。ここで、一つのマーカをカメラで捉えるとき、最低でも $\nu_r \times \nu_\theta$ [pixel²] 分の画素数を必要とすると、 r_α がある値 R_i 以下の半径をもつ円周上に映るマーカの大きさは $\nu_r \times \nu_\theta$ [pixel²] 以下となり、カメラで計測できなくなってしまう。なお、 R_i を、マーカをカメラで映すことのできる最小の半径とし、 ν_r は r 方向の画素数、 ν_θ は θ 方向の画素数を示す。また ν_r と ν_θ は、マーカを照らす照明環境などに依存する。例えば、照明環境が悪ければ、カメラ画像にノイズが乗りやすくなるため、これらを大きくする必要が生じる。 ν_θ を用いるとカメラ画像上でマーカを映すことのできる最小の半径 R_i は、

$$R_i = \frac{\rho_o(\nu_\theta/\kappa)}{\lambda} \quad (3)$$

のように導出される。このとき r 方向に並ぶマーカは $R_i \leq r \leq R_o$ の範囲で映すことができ、その長さは $R_o - R_i$ となる。ここで式 (2) の関数 $g_{\Gamma,\Lambda,z}(y)$ が y について直線を描く関数であると仮定し、さらに

$$\begin{aligned} g_{\Gamma,\Lambda}(l_2, 0) &= R_o, \\ g_{\Gamma,\Lambda}(l_1, 0) &= R_i \end{aligned} \quad (4)$$

を満たすとする。ここで、 l_1, l_2 は $l = l_1 - l_2$ をみたすものとする。すると、この範囲で r 方向に映すことのできるマーカの個数は、 $\kappa(R_o - R_i)/\nu_r$ 個となる。このとき、円筒弾性体の長さ l は、

$$l = \frac{\kappa(R_o - R_i)}{\nu_r} \lambda \quad (5)$$

によって与えられる。つまり、カメラ画像の有限性による円筒弾性体の長さの上限値は式 (5) で表現される。なお、この長さをより長くするためには、円筒の母線方向のマーカの密度を疎にする、もしくは複数台を連結させる方法がある。

光学系の設計

前節において、円筒の半径 ρ_o と長さ l とを設定する際、式 (2) の関数 $g_{\Gamma,\Lambda,z}(y)$ が y に対して直線を描くとし、さらに式 (5) を満たすものとした。ここで、

$l = l_1 - l_2$ で、 $r = g_{\Gamma,\Lambda,0}(y)$ に y についての逆関数を $y = g_{\Gamma,\Lambda,0}^{-1}(r)$ とすれば、結局式 (5) は

$$l = g_{\Gamma,\Lambda,0}^{-1}(R_i) - g_{\Gamma,\Lambda,0}^{-1}(R_o) \quad (6)$$

となる。つまり、前節の式 (5) で長さ l を導出した後、関数 $g_{\Gamma,\Lambda,z}(y)$ が y に対して直線を描き、かつ、式 (6) を満たすようにカメラパラメータ Γ 、凸面鏡 Λ を決定すればよい。

力の計測精度の設計

力の大きさの計測精度として、計測可能範囲と力の強度分解能が挙げられるが、これらは、弾性体のヤング率、厚みに依存するパラメータである。例えば、計測可能範囲を広げるためには、ヤング率の大きい弾性体を選べばよい。一方、力の強度分解能を向上させるためには、弾性体のヤング率を小さくし、カメラ解像度を増やす必要がある。カメラ解像度の有限性から、計測可能範囲と力の分解能の間には、ジレンマが存在する。なお、厳密な設計方法としては、カメラ解像度が与えられた上で、計測可能範囲または強度分解能を任意に決め、有限要素法など数値解析法を用いてヤング率、厚みを導出する方法が考えられる。

3 円筒型インタフェースの実装

3.1 パラメータ設計と構築

実装にあたり、円筒型インタフェースとして要求されるサイズ (円筒の太さ、長さ) を検討する。日本人の手長は、比較的短い人、具体的には身長 1450 [mm] 前後の女性で 160 [mm] 程度 [13] である。そのため、円筒半径が 50 [mm] 以下であれば、多くの使用者が円筒を把持できると考える。また、手幅は比較的広い人、すなわち身長 1800 [mm] 程度の男性で 84 [mm] 程度である。そのため円筒長さとしては 100 [mm] 以上が適切と考える。空間分解能は 10 [mm] に設定した。この空間分解能は、操作者の指幅を 10 [mm] とした場合、隣接し合う 2 本の指でそれぞれ計測される力ベクトル同士の干渉を防ぐためには十分である。

以上のような設計指針に基づいて作成した円筒型インタフェースを図 4 に示す。また設計パラメータを表 1 にまとめる。まず円筒型インタフェースの太さ、使用するマーカのサイズとカメラを選定し、適切な長さを算出した。円筒半径 ρ_o は、比較的短い人が握れる太さである 40 [mm] とした。マーカは、マーカの間隔が r 方向 θ 方向ともに 5 [mm] でマーカは直径 1.5 [mm] の円 ($\kappa = 0.3$) とした。また、2 層のマーカの深さ z は 1 [mm], 3 [mm] とし、それぞれのマーカに赤色、緑色を割り当てた。カメラパラメータ Γ は、焦点距離 f を 8 [mm], CCD サイズの短辺の長さ 2τ を 1/5 [inch], 画素数を 640 × 480 [pixel²] とした。ここで使用する力

メラは FireFly MV(Point Grey Research, Inc.) とした。カメラのフレームレートは最高で 60[fps] である。凸面鏡 A には、入手しやすい半球ミラーを用いた。以上のパラメータを式 (3) に代入すると、 R_i は 80[pxel] と計算される。さらに式 (5) より、長さは $l = 80[\text{mm}]$ と求めた。次に、凸面鏡を選定した。ここでは、入手の容易さから半径 15[mm] の半球ミラーを採用した。この場合、式 (6) から $l=78[\text{mm}]$ と求まり、理想的な l の値と同程度の結果が得られる。また、このとき、関数 $g_{\Gamma, \Lambda, z}(y)$ は図 5 より、ほぼ直線を描いている。ここで、 $l=78[\text{mm}]$ と導出されたが、手幅が大きい人でも握ることが可能のように、二つの円筒型インタフェースを、互いの凸面鏡側の端を向かい合わせてつなぎ合わせた (図 4)。弾性体とカメラは、アルミフレームに対してプラスチック樹脂製の治具で固定される。また、カメラ用の照明として、白色 LED アレイをデバイスの両端に配置した。

弾性体については、ウレタンゲル (ヒト肌ゲル透明タイプ 00-1000, 株式会社エクシールコーポレーション) を使用した。この弾性体は、硬化剤によりヤング率を調節することができる。ここでは、握り心地の良さやデバイス強度を考慮して、ヤング率を 50[kPa] 程度、厚みを 10[mm] とした。このとき、力を加えた時のマーカ変位がカメラで十分に計測できることを確認した。

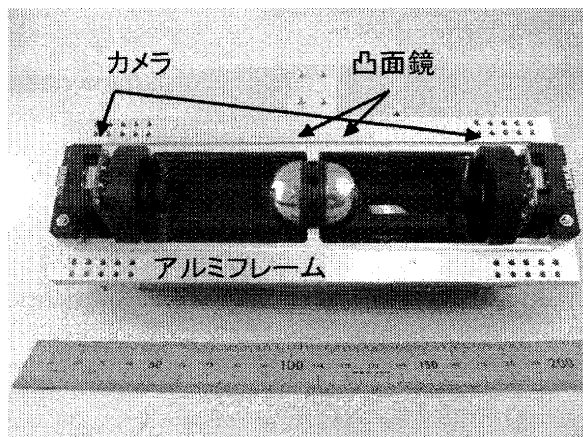


図 4 円筒型インタフェースの内部
Fig. 4 Internal structure of the cylindrical interface

3.2 多点力ベクトルの算出

従来力ベクトル分布センサにおいては、全てのマーカの移動量から、センサ表面の全ての計測点における力ベクトルを一括で計算している。しかし、ロボットハンド操作を実現するためには、各指の指先位置における力ベクトルだけを計測すれば十分と考える。そこで、構築する円筒型インタフェースにおいては、指

表 1 設定したパラメータ

Table 1 Parameters of the prototype device

	パラメータ名称	定義した文字	値
ハードウェアサイズ	半径	ρ_o	40[mm]
	半径 (内半径)	ρ_i	27[mm]
	長さ	l	78[mm]
マーカ間隔	x 方向	λ_x	5[mm]
	y 方向	λ_y	5[mm]
マーカ深さ	一層目 (赤色)	z_1	1[mm]
	二層目 (緑色)	z_2	3[mm]
カメラパラメータ	画素数 (短辺)	$2R_o$	480[pxel]
	CCD サイズ (短辺)	2τ	1/5[inch]
	レンズ焦点距離	f	8[mm]
凸面鏡 (半球)	半径	R_m	15[mm]

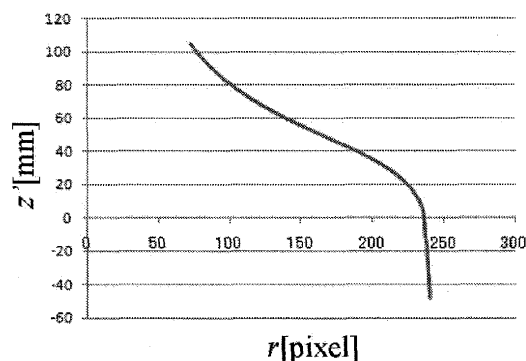


図 5 表 1 のパラメータの下での $z' = g_{\Gamma, \Lambda, 0}^{-1}(r)$
Fig. 5 $z' = g_{\Gamma, \Lambda, 0}^{-1}(r)$ under the parameters shown in Table 1

先位置 5 点のみを計測点と設定し、それぞれ独立に力ベクトル算出を行う。このとき、計測点から遠い位置にあるマーカの移動量は、力ベクトル算出に与える影響が少ないと考えられる。そのため、算出には計測点を中心とした一定の領域内のマーカ移動を利用する。これにより、式 (1) の変換行列のサイズを小さくし、行列計算の計算量を大幅に削減できる。今回の実装では、予備実験を基に、力ベクトル算出に使用するマーカ領域として、計測点を中心とした 1 辺 25[mm] の矩形領域を設定した。なお、指先位置の決定に関しては、使用者に応じて予め設定する、マーカ移動量を用いて動的に指位置を設定する [19]、などが考えられる。本稿においては、使用者に応じて予め設定する手法を採用した。

以上の手法を用いた力ベクトルの算出は、カメラの更新間隔よりも十分短い時間で完了する。そのため、円筒型インタフェースの更新レートはカメラの更新レートと同様に 60[Hz] である。なお、計算機の環境は、CPU が Pentium(R) D CPU 2.8GHz で、メモリが 1.00 GB RAM, OS が Windows XP Home Edition

SP3である。

4 カベクトル分布の計測精度

円筒型インタフェースにおけるカベクトル分布の計測精度を、力の強度分解能と空間分解能の2点から評価した。

4.1 カベクトル分布の計測精度の評価方法

Kamiyamaら[14]が行った光学式カベクトル分布センサの評価を参考に構築した評価環境を図6に示す。図中に示された xyz 軸はそれぞれ xyz ステージで制御する方向を示す。評価は、先端が直径5[mm]の球状のプローブを6軸力センサ(BL AUTOTEC, LTD.)に固定し、さらに6軸力センサを xyz ステージ(中央精機株式会社)に固定した。 xyz ステージを制御し、固定された円筒型インタフェースに対してプローブを押し付け、円筒型インタフェースと6軸力センサの出力をそれぞれ記録した。なお、本手法では凸面鏡からの距離によって、マーカ計測における解像度にバラツキがある。そのため、プローブを押し付ける位置を、このバラツキの中間的な精度であると考えられるセンサ中心から y 軸方向に35[mm]離れた位置とした。

4.2 力の強度分解能

まず、 z 軸方向の強度分解能を評価した。プローブを z 軸方向に移動させ、センサ表面に対して鉛直方向に、0~500[gf]の力を50[gf]ごとに付加した。

結果を図7に示す。横軸は6軸力センサの出力 Fz' を、縦軸は円筒型インタフェースの出力を表す。 x 軸、 y 軸方向の成分に関しては、円筒型インタフェースの出力 Fx と Fy から、6軸力センサの出力 Fx' と Fy' をそれぞれ引いた値をプロットしている。また、直線は横軸と縦軸が等しい値となる場合を示している。結果から、グラフは単調増加の傾向にあり、0~150[gf]の範囲では線形に計測できている。分解能は20[gf]程度であった。また、付加した力の増加に伴い x 軸と y 軸方向に計測される力の誤差が増加する傾向が見られた。

次に、 x 軸と y 軸方向の強度分解能をそれぞれ評価した。円筒型インタフェースに対して接線力のみを加えることは困難であるため、 z 軸方向に300[gf]の力を加えた後に、それぞれの方向へ50~200[gf]の力を50[gf]ごとに付加した。

結果を図8に示す。横軸と縦軸はそれぞれ6軸力センサと円筒型インタフェースの出力を表す。 x 軸方向、 y 軸方向それぞれのグラフは単調増加の傾向にある。 x 軸方向では、150[gf]まで線形に力を計測できた。一方 y 軸方向では、線形性が保たれるのは100[gf]程度以下の範囲であった。それぞれ分解能は20[gf]程度であった。

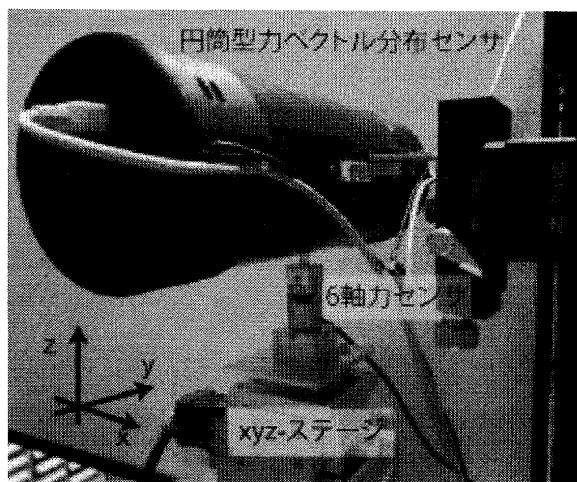


図6 実験環境
Fig. 6 Experimental Setup

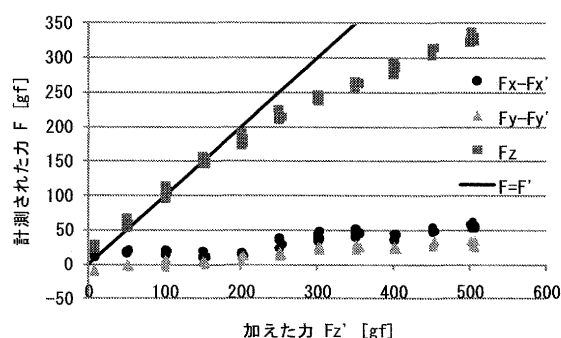


図7 力分解能の測定結果(z 軸方向)
Fig. 7 Result of evaluation for z -axis force vector estimation

4.3 空間分解能

空間分解能の評価においては、4.2の評価と同じ場所に200[gf]の力を付加し、力を付加した位置及びその周辺を計測位置と設定し、それぞれの位置における円筒型インタフェースの出力を記録した。これにより、力を付加した際にその力が周辺の計測点に及ぼす影響を調べた。

結果を図9に示す。横軸は力を付加した位置から計測点までの距離を表す。縦軸は、記録された力をプローブ位置の力で正規化した値を表す。従来のカベクトル分布センサと同様に、半値幅を空間分解能とすると、 x 軸方向で5[mm]程度、 y 軸方向で12[mm]程度であった。

5 多指によるカベクトルの入力

円筒型インタフェースにおいて、操作者は各指から任意の3次元カベクトルを入力し、ロボットハンドを操作する。本章では、円筒型インタフェースを用いた多指でのカベクトルの入力実験を行う。

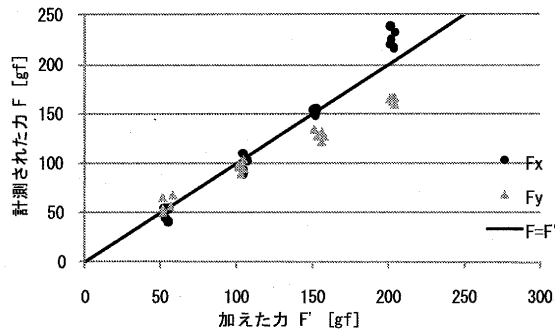


図8 力分解能の測定結果 (x , y 軸方向)
Fig.8 Result of evaluation for x -axis and y -axis force vector estimation

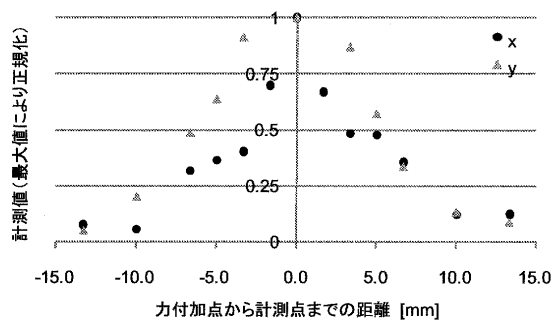


図9 空間分解能の測定結果
Fig.9 Result of evaluation for independence of grip force

5.1 実験方法

本節では、各指が加えるべき力ベクトルを被験者に指示し、指示した力ベクトルと同じ力をデバイスに加えさせるタスク実験を行う。ディスプレイの前にデバイスを置き、被験者にディスプレイを見せながらデバイスを握らせ、参照力ベクトルと同じ力を加えられるまでにかかる時間を計測した。デバイスに相当する円筒の上に参照力ベクトル及び、デバイス表面で推定された力ベクトルを矢印として表示した(図10)。

被験者に提示した参照力ベクトルのパターンを表2に示す。表2中の i, ii, iii は力の加え方を示す。これらの6パターンは、Elliottら[15]による人間の把持方法の分類に基づいて決定した。パターン1~3は大きいものを握っている状況を想定し、全ての指を駆使するタスクとした。なお、通常小指は薬指の動作に追従して動作するため、今回小指の評価は行わなかった。パターン4~6は小さいものをつまんだ状況を想定し、親指と人差し指を駆使するタスクとした。例えば、パターン3が被験者に提示された場合は、被験者に、全ての指で握り、デバイス表面に対して円筒周方向の前方にひねるような力を入れさせる。これら6種類のパターンにより、ロボットハンドの操作者が、ロボット

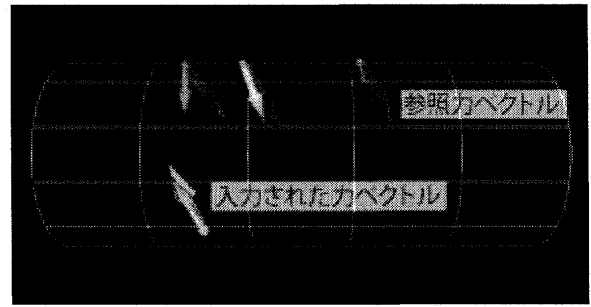


図10 入力インタフェースとしての評価において、被験者に提示した画像

Fig.10 Graphic that we showed to participants

ハンドを通して物体を意図した力で把持する・ひねるといった動作が可能かを検証する。参照力ベクトルの大きさは全て200[gf]で統一した。

まず、被験者にデバイスを右手で握らせたときのマーカー変位情報から被験者の指位置を推定し、力ベクトル計測点を決定した。そして6パターンの参照力ベクトルを、それぞれ1パターンに対して10回ずつランダムに被験者に提示した。被験者に対して参照力ベクトルパターンを提示した後、被験者が全ての力ベクトルを参照力ベクトルに同程度の方向、大きさに合わせた後、その状態を0.5[s]間維持するまでの時間を記録した。ここで、同程度の方向とは、参照力ベクトルと入力力ベクトルとの角度が 30° 以内、同程度の大きさとは参照力ベクトルと入力力ベクトルとの大きさの差が100[gf]以内とした。10[s]以内に参照力ベクトルに合わせるできない場合、その試行は失敗とした。なお、デバイスの力ベクトル計算周期は60[Hz]であるため計算時間は無視できると考えた。さらに、各試行に対して一度完全に力を抜かせたため、弾性体の形状復帰の時間も無視できる。被験者は年齢が22歳から26歳の男性4人で、熟練者(共著者)が2人、非熟練者が2人である。非熟練者には、実験前に入力パターンを10[s]以内に入力できるようになるまで、一通り練習させた。

5.2 結果

10[s]以内に目的の力ベクトルを入力したタスク達成率は、全体で93[%]であった。熟練者では100[%]、非熟練者では86[%]となった。なお、分散分析によると、提示パターン別の平均達成時間には優位な差はなかった。また、非熟練者のタスク試行において、14[%]が10[s]以内に達成させることができなかった。この場合、被験者の指の位置が初期位置からずれており、各指から加える力が正確に計測されないという様子が観察された。

タスクを達成するまでにかかった時間の度数分布図

表2 提示した参照力ベクトルのパターン (Tは親指, Iは人差し指, Mは中指, Rは薬指を示す. i, ii, iiiはそれぞれ力ベクトルの向きを示している.)

Table 2 Patterns of the reference force vectors (T, I, M, and R represent the thumb, index finger, middle finger, and ring finger, respectively. Each i, ii, iii represent the direction of force vectors.)

	T	I	M	R
1.	i	i	i	i
2.	ii	ii	ii	ii
3.	iii	iii	iii	iii
4.	i	i	-	-
5.	ii	ii	-	-
6.	iii	iii	-	-

デバイス表面に対して
 i: 法線方向
 ii: 円筒母線方向右回転
 iii: 円筒周方向前回転

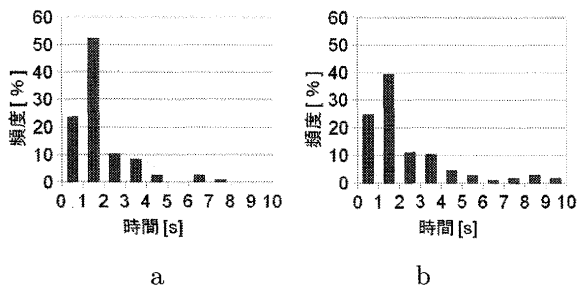


図11 熟練者, 非熟練者別のタスク達成時間の度数分布 a: 熟練者, b: 非熟練者
 Fig. 11 a: A histogram of time for skilled person, b: non skilled person

を図11に示す。図11は、熟練者と非熟練者で分けて作成したものである (a: 熟練者, b: 非熟練者)。これらの図によると、図11.aの熟練者のヒストグラムの方が、図11.bの非熟練者のヒストグラムよりも分散が小さい。そして、熟練者は、タスク達成率を100[%]とし、75[%]の試行を2[s]以内に達成した。平均達成時間は1.5[s]であった。非熟練者では、タスク達成率を86[%]とし、そのうちの65[%]の試行を2[s]以内に達成した。平均達成時間は2.7[s]であった。

5.3 ロボットハンドジェスチャ

ここでは、操作者の各指によって計測された力ベクトルでロボットハンドを実際に動かし、ジェスチャを試みた。ロボットハンドは、親指に3自由度、人差し指~小指に各指1自由度、さらにアブダクションに1自由度を有する。操作者の各指で計測される力ベクトルの垂直成分をロボットハンド各指の屈曲角度に、接線成分を各指の開閉角度に対応させた。なお、今回の円筒型インタフェースでは小指の力ベクトルを計測していないため、ロボットハンドの小指については薬指の動作に追従させた。図12.aは力を加えていない場合のジェスチャを示す。図12.bは親指と人差し指で

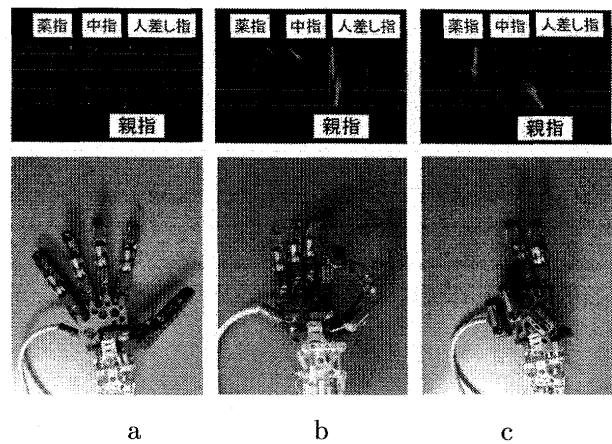


図12 計測された力ベクトルとロボットハンドの動作
 Fig. 12 Gesture of robotic hand based on the measured force

垂直方向に力を加え、中指と薬指で接線方向に力を加えた場合のジェスチャを示す。ロボットハンドの親指と人差し指は向かい合い、さらにアブダクションは閉じる。図12.cは親指と薬指で力を加えた場合のジェスチャを示す。ロボットハンドの親指は、図12.bと比較して、より内側に曲がる。これは、操作者の親指が加える力ベクトルの接線成分の違いによる。これらのジェスチャを、例えば圧力センサを円筒に巻いただけのデバイスで実現することは難しい。提案した円筒型インタフェースにより、これらのジェスチャを可能にしている。

6 円筒型インタフェースによるロボットの操縦

提案手法の実証実験として、円筒型インタフェースを用いたロボット操作システム“MeisterGRIP”を構築した(図13.c)。MeisterGRIPにより操作するロボットハンドとアームを図13.aに示す。ロボットハンドは5.3で用いたものと同じである。また、ロボットアームには人間の腕の自由度配置と同じ7自由度の空気圧アームを用いた。ロボットハンドとアームを操作する入力インタフェースを図13.bに示す。円筒型インタフェースを、上下左右2自由度を有するリンク機構の先端に装着した。リンク機構にはバネとポテンシオメータを搭載しており、操作者が円筒型インタフェースに与える外力を計測できる。本システムにおいて、操作者が各指で円筒型インタフェースに加える力ベクトルの大きさをロボットハンドの屈曲速度に対応させた。ただし、50[gf]程度の入力屈曲速度0に対応するよう、オフセットを設け、力を緩めるとロボットハンドが伸展するようにした。また、円筒型インタフェースに対して操作者が加える上下左右の外力を、ロボットアームの先端位置の上下左右への運動速度に対応させた。

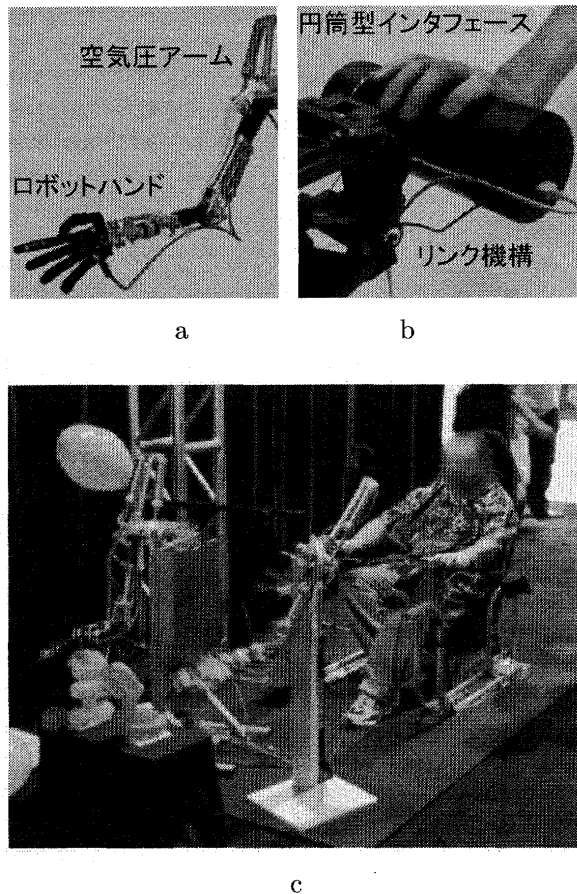


図13 MeisterGRIP のシステム外観, a: ロボットハンド・アーム, b: 円筒型インタフェースとリンク機構, c: 利用風景

Fig. 13 MeisterGRIP, a: robotic hand and arm, b: cylindrical interface and linkage mechanism, c: a scene of operating

さらに、円筒上の全ての計測点における力ベクトルの接線方向成分の和を、操作者が円筒型インタフェースに加える回転方向の力として導出し、ロボットアームの手首の回転速度に対応させた。

構築したシステムを Siggraph2008[16] や i-tokyo2008 [17] で展示し、来場者にロボットハンド及びアームの操作を体験して頂いた。体験内容は、ロボットを介して、風船で作った人形を掴んで持ち上げたり、移動させたりするものであった。なお、今回のシステムでは、円筒型インタフェースを把持することによる受動的な力覚以外の力触覚フィードバックを有していない。そのため、体験者は視覚を頼りにロボットハンドと風船との接触を判断した。5歳程度の子供から大人まで917人が体験し、約半数が2分程度の時間で風船を持ち上げることに成功した。失敗した体験者については、学齢前と見られる子供が多かった。

7 考察

本章では、提案する円筒型インタフェースによる、ロボットハンド操作の可能性について考察する。

7.1 カベクトル分布の計測精度

4.2における計測結果(図7, 8)は単調増加の傾向にあり、 x , z 軸方向において150[gf]以下、 y 軸方向において100[gf]以下の範囲では線形性も見られる。これらの結果から、円筒型インタフェースは指先から加わる力を連続的に計測できていることが確認できる。ここで、2.1で述べた強度分解能の実装要件は、測定強度の7[%]以内である。一方、4.3において計測された分解能は20[gf]であり、今回の結果から、特に200[gf]以下の範囲における分解能の改善が必要である。この誤差はカメラ画像に加わる定常的なノイズによる影響が大きいと考えられ、カメラ解像度の向上により解決可能である。

空間解像度については、マーカ配置を θ 方向と r 方向でそれぞれ5[mm]で揃えたが、実験では空間解像度が x 軸方向(θ 方向)が5[mm]、 y 軸方向(r 方向)が12[mm]と、双方で異なる値が得られた。これは、弾性体が円筒型であるために生じると考えられる。つまり、円筒上の一点に力が加わったとき、曲率が0の y 方向よりも曲率を持つ x 軸方向の近傍における弾性体の変形はしにくくなる。従って、今回の設計では x 軸方向と、 y 軸方向で空間解像度が異なるものとなった。空間分解能を所望の値に設定するためには、今後のマーカ配置の際にこの知見を考慮する必要がある。

以上から、今後の改善により、より精密にロボットを操縦できるようになると考えられる。

7.2 多指による力ベクトルの入力

人間が提示された視覚情報に反応し運動を達成するまでに要する時間は、平均で約0.4[s]と言われている[18]。5章の実験では、この0.4[s]に加え、達成した動作を0.5[s]維持する必要があるため、最短でも反応時間は0.9[s]程度を要する。これに対し、熟練者の平均達成時間は1.5[s]であり、上記の最短反応時間に加えて、平均0.6[s]で目的の入力に到達している。さらに図11が示すように、熟練者・非熟練者共に25%の割合で1[s]以内にタスクを達成しており、本インタフェースが、人間の反応速度に十分追従できていることがわかる。このことから、円筒型インタフェースを用いて、物体を任意の力で把持する、把持した物体をひねるなど動作を素早く行うことが可能といえる。

熟練者と非熟練者の間には、タスク達成率や達成時間に差が見られた。非熟練者に関しては、実験前に練習の機会を与えたが、熟練者に対してタスク達成時間が遅い傾向にある。非熟練者がタスクを短時間で達成させることができなかつた理由は、試行の間に、指が、

試行開始時に被験者毎に設定した力ベクトル計測点からずれることである。これを解決するためには、城ら[19]の提案した力ベクトル計測点の動的推定手法の適用が有効である。

7.3 円筒型インタフェースによるロボットハンドの操縦

6章の実証実験では、917人の体験者の約半数がロボットを2分程度で使うことができることがわかった反面、学齢前の子供による失敗の例が見受けられた。これは、インタフェースのサイズを成人男性及び成人女性に合わせて設計していたためであると考えられる。高橋らの研究[20]では、握りやすい円筒の太さは直径35[mm]であると示されている。これは成人だけでなく、子供でも十分に握れる太さである。この知見を参考にし、パラメータ設計を行うことで、子供から成人まで幅広い年齢層に対応した円筒型インタフェースを実現できると考える。

8 結論

本論文では、ロボットハンドの遠隔操作のための、操作者の各指の力ベクトルを計測する円筒型多点力ベクトル入力インタフェースを提案し、実証実験として、ロボットハンドの操作システムを構築した。開発した円筒型インタフェースの力の分解能や空間分解能に対しては、ロボットハンドの操作に最低限必要な精度を達成した。より精密な操作のためには、カメラの高解像度化やサイズの直径の修正、接触感のフィードバックなど、さらなる改善が必要である。また、より使いやすい入力インタフェースとするためには、計測点の動的な推定を行うことで、使用中の把持姿勢の変化に対応することが求められている。なお、今回は、アームの操作において接地型のリンク機構を用いたが、家庭内における可搬性を考えると、円筒型インタフェース単体を用いたポータブルなシステムも有用であると考えられる。

謝辞

本研究はJST-CREST「さわられる情報環境」プロジェクトの支援により実施した。

参考文献

- [1] S. Tachi and K. Yasuda: Evaluation Experiments of a Telexistence Manipulation System; Presence, Vol.3, No.1, pp.35-44, 1994.
- [2] T. Nishiyama, H. Hoshino, K. Suzuki, R. Nakajima, K. Sawada and S. Tachi: Development of surrounded audio-visual display system for humanoid robot control; Proceedings of ICAT '99, pp.60-67, 1999.
- [3] Anybots Inc., QBTM

- [4] VGo Communications, Inc., VgoTM
- [5] S. Tachi, N. Kawakami, H. Nii, K. Watanabe and K. Minamizawa: TELESARPHONE: Mutual Telexistence Master Slave Communication System based on Retroreflective Projection Technology; SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.1, No.5, pp.335-344, 2008.
- [6] Y. Nakatsuru, R. Hiramatsu, H. Mori, J. Hoshino: A SoftBody Controller that can be Thrown and Grasped; IEEE International Symposium of Virtual Reality Innovation 2011, 2011 IEEE, pp 337-338, 2011.
- [7] P. Kremer, T. Wimbock, J. Artigas, S. Schatzle, K. Johl, F. Schmidt, C. Preusche and G. Hirzinger: Multimodal telepresent control of DLR's Rollin' JUSTIN; ICRA 2009, pp.1601-1602, 2009.
- [8] 林豊, 間下以大, 小川剛史, 清川清, 竹村治雄: 全方位視覚センサを用いた指先動作検出による円筒型ユーザインタフェース; 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 107, No. 554, pp. 43-48, 2008.
- [9] T. Ohshima, T. Serizawa, and Y. Yanagida: KHAKI: A Hemispherical, Multi-function Input Device for 3D Operation; Proceedings of IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2010, pp. 141-142, 2010.
- [10] X.D. Pang, H.Z. Tan, and N.I. Dublach: Manual discrimination of force using active finger motion; Perception & Psychophysics, Vol. 49, No. 6, pp. 531-540, 1991.
- [11] 神山和人, 梶本裕之, 稲見昌彦, 川上直樹, 館暲: 触覚カメラ弾性を持った光学式3次元触覚センサの作成一; 電気学会論文誌E, Vol.123, No.1, pp.16-22, 2003.
- [12] L.D.Landau and E.M.Lifshitz: Theory of Elasticity; BUTTERWORTHHEINEMANN, 1985.
- [13] 河内まき子, 持丸正明, 岩崎洋, 三谷誠二: 日本人人体寸法データベース 1997-98; 通商産業省工業技術院くらしとJISセンター, 2000.
- [14] K. Kamiyama, V. Kevin, T. Mizota, H. Kajimoto, N. Kawakami and S. Tachi: Vision-Based Sensor for Real-Time Measuring of Surface Traction Fields; IEEE Computer Graphics & Applications Magazine, Vol.25, No.1, pp.68-75, 2005.
- [15] J.M. Elliott and K.J. Connolly: A Classification of Manipulative Hand Movements; Development Medicine and Child Neurology, No. 25, pp. 283-296, 1984.
- [16] S. Komeiji, K. Sato, K. Minamizawa, H. Nii, N. Kawakami and S. Tachi: MeisterGRIP: cylindrical interface for intuitive robot manipulation; ACM SIGGRAPH 2008 New Tech Demos, 2008.
- [17] 古明地秀治, 佐藤克成, 立藺真里, 南澤孝太, 新居英明, 川上直樹, 館暲: MeisterGRIP: ロボット操作のための円筒型インタフェース; interactive-tokyo 2008, 2008.
- [18] S. K. Card, T. P. Moran and A. Newell: The model human processor- An engineering model of human performance; Handbook of Perception and Human Performance, chapter 45. John Wiley and Sons, 1986.
- [19] 城堅誠, 寛康明, 南澤孝太, 新居英明, 川上直樹, 館暲: ARForce: Augmented Reality のための光学式多点力ベクトルセンサ; 情報処理学会論文誌, Vol.50, No.12, pp.2831-2840, 2009.
- [20] 高橋勝美, 山本圭治郎, 八高隆雄, 兵頭和人: 円筒物体の握りやすさの感性評価に与える握り方の影響と指の力発揮特性; 日本機械学会論文集. C 編, Vol.63,

古明地・佐藤・南澤・渡邊・新居・館：ロボットハンド操作システムのための円筒型多点力ベクトル入力インタフェース

No.612, pp. 2794-2800, 1997.

(2011年3月8日受付)

[著者紹介]

古明地 秀治



2007年農工大・工・電気電子卒業。同年より東大大学院・情報理工学系研究科・システム情報学科所属。トレイグジスタンスの研究に従事。2009年修士(情報理工学)。同年日本電気株式会社入社。

佐藤 克成 (正会員)



2006年東北大・工学部・情報学科卒業。同年より東大大学院・情報理工学系研究科・システム情報学科所属。2008年より学振特別研究員(DC1)。2011年より慶應大学大学院・メディアデザイン研究科リサーチャー。2011年博士(情報理工学)。同年より学振特別研究員(PD)として慶應大学大学院・システムデザイン・マネジメント研究科所属。トレイグジスタンスにおける力触覚情報の計測と提示に関する研究に従事。情報理工学系研究科研究科長賞、日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞受賞。

南澤 孝太 (正会員)



2005年東京大学工学部計数工学科卒業。2010年同大大学院情報理工学系研究科博士課程修了。博士(情報理工学)。2007年より日本学術振興会特別研究員(DC1)。2010年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科特別研究助教(JST-CREST さわれる情報環境プロジェクト)。2011年同研究科特任講師。ハプティックインタフェース、3Dディスプレイ、トレイグジスタンスの研究に従事。

渡邊 孝一 (正会員)



2004年千葉大・工・情報画像工学科卒。2006年東大院・情報理工・システム情報学専攻修士課程修了。2009年同大博士課程修了。博士(情報理工学)。同年慶應大・メディアデザイン研究科助教。2011年慶應大・メディアデザイン研究科リサーチャー。木更津高専・情報工学科非常勤講師。トレイグジスタンスマスターズレベルシステムの研究に従事。

新居 英明 (正会員)



2003年から2006年まで電通大・電気通信学・機械制御博士課程在籍。2006年から2009年まで東大・情報理工学・システム情報学専攻助教。2008年博士(工学)取得。2009年より慶大メディアデザイン研究科講師。2010年よりシンガポール国立大学研究員。

館 暉 (正会員)



1968年東大・工学部・計数工学科卒。1973年同大大学院博士課程修了。工学博士。東大工学部助手、通産省機械技研・主任研究官・バイオロボティクス課長、MIT客員研究員、東大・先端研・教授などを経て、1994年同大・工学部・計数工学科教授、2001年同大大学院・情報理工学系研究科教授、2009年慶應大学大学院・メディアデザイン研究科教授。東京大学名誉教授。トレイグジスタンス、人工現実感などの研究を行う。IEEE/EMBS論文賞、通産大臣表彰、国際計測連合(IMEKO)特別勲功賞、IEEE-VR Career Award、文部科学大臣賞など受賞。IMEKOロボティクス会議議長、計測自動制御学会第46期会長、日本バーチャルリアリティ学会初代会長。