測定ノイズを考慮した力覚センサによる接触点位置の推定

長瀬 賢二^{*1} 吉永 光介^{*2} 中島 明^{*2} 早川 義一^{*2}

Estimation of Contact Point by Force Sensor with Measurement Noise

Kenji Nagase^{*1}, Kousuke Yoshinaga^{*2}, Akira Nakashima^{*2} and Yoshikazu Hayakawa^{*2}

This paper considers a method of estimating a contact point between a robot hand and an object by using a force sensor with measurement noise. The estimation problem is formulated as a problem of nonlinear constraint optimization, in which the cost function represents the estimation error against the measurement noise and the constraints require the contact point being on the fingertip surface and the fingertip force directing inward. Although problems of nonlinear constraint optimization can be only solved by numerical optimization in general, it is shown that the optimization problem for the estimation can be solved analytically in this case. Experimental results are shown to prove the efficiency of the proposed method.

Key Words: Estimation of Contact Point, Force Sensor, Measurement Noise, Optimization

1. 緒言

ロボットが環境との接触を伴う作業を行う場合、環境との接触点位置の情報は重要である。例えば、近年、多指ハンドロボットによる物体の把握・操りの制御に関する研究が盛んに行われているが、指先と対象物体の接触点位置の情報は、操り力や把握力の算出などに重要な役割を果たす[1]~[5]。特に指先と対象物間に転がり運動を伴う場合には、接触点は時間の経過とともに変化するため、その情報を実時間で求める必要があり、その推定法の確立は重要な研究課題である。

接触点位置の推定法としては、指先に取り付けられた力覚センサによる力覚情報や外部カメラによる視覚情報、また、特殊に開発した触覚センサなどを用いるものなどがあり、これらと、指先形状や対象物形状、指と対象物間の相対運動などの事前情報と組み合わせて接触点位置を求めることが多い[6]~[10]。このうち、特に力覚センサはロボットに広く用いられており、また、視覚情報を用いる場合に比べて計測時間が速く物体やカメラ配置などに依存せず適用できるので、他の手法に比べて汎用性が高い手法と考えられる。力覚センサを用いて接触点位置を推定する手法としては、測定ノイズがない場合に成立する力とモーメントの釣り合い式と接触点は指先表面上にあり、また引っ張り方向の指先力は働かないという事実を用いて接触点を計算

する方法が知られている[6][7]。しかしながら、力覚センサには通常比較的大きな測定ノイズが含まれるので、測定ノイズを考慮した推定法の確立が望まれる。

本研究では、ロボットの指先と物体との接触点位置の推定を想定し、指先に取り付けられた6軸力覚センサの情報から接触点位置を推定することを考える。なお、指先形状は既知とし、特に半球であるとする。本研究では、力覚センサの測定ノイズを考慮し、接触点位置の推定問題を、測定ノイズのもとで推定誤差の最小化を行う最適化問題として定式化する。その際、接触点が指先半球上にあるという事実と引っ張り方向の指先力は働かないという事実を制約条件として用いる。接触点が指先半球上にあるという制約は非線形の等式制約条件であり、通常、このような非線形の最適化問題は、数値最適化により解が求められるが、ロボットハンドの制御などに用いる場合、実時間での計算が求められるので、数値最適化による求解は好ましくない。本研究ではこのような状況を考慮し、上記最適化問題に対する解析解の導出を行う。解析解の導出には、ラグランジュの未定数法を用いる。提案手法は、指先形状のみを事前情報として用いており対象物形状を必要としないので、未知対象物を操る場合にも有用である。提案手法の有効性は、実験により検証を行う。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、対象モデルならびに接触点位置推定のための最適化問題について述べる。第3章では、最適化問題の解析解の導出を行う。第4章は実験、第5章はまとめと今後の課題である。

原稿受付 2004年5月27日

^{*1}和歌山大学システム工学部

^{*2}名古屋大学大学院工学研究科

^{*1}Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

^{*2}Graduate School of Engineering, Nagoya University

2. 問題設定

2.1 対象モデル

Fig. 1 のように、ロボットの指先が対象物と点接触している状況を考える。指先先端は半径 $r > 0 \in \mathbf{R}$ の半球で接触による変形はないものとし、また、接触点においては、力 $\mathbf{F}_c \in \mathbf{R}^3$ のみが働き、モーメントは働かないものとする。図中 Σ_s は、力覚センサの取り付け位置に固定されたセンサ座標系であり、本論文ではベクトルはすべてこの Σ_s で表現されているものとする。 $\mathbf{p}_c \in \mathbf{R}^3$, $\mathbf{p}_f \in \mathbf{R}^3$ は、それぞれ、 Σ_s 原点から接触点、ならびに、指先半球の中心（以降、指先中心と呼ぶ）までのベクトルであり、 $\mathbf{p}_{fc} \in \mathbf{R}^3$ は指先中心から接触点へのベクトルである。観測量は、力覚センサ原点に働く力 $\mathbf{F}_s \in \mathbf{R}^3$ ならびにモーメント $\mathbf{M}_s \in \mathbf{R}^3$ である。

まず、力覚センサに測定ノイズが存在しない場合を考える。このとき、力とモーメントの釣り合いより

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{F}_c \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_s = \mathbf{p}_c \times \mathbf{F}_c = (\mathbf{p}_{fc} + \mathbf{p}_f) \times \mathbf{F}_c \quad (2)$$

が成り立つ。式 (1) を式 (2) に代入すると

$$\mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_f = \mathbf{0} \quad (3)$$

ただし、

$$\mathbf{M}_f = (\mathbf{M}_s + \mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_f) \quad (4)$$

が成り立つ。 $\mathbf{p}_f$ を既知とすれば、 $\mathbf{M}_f$ は力覚センサから計測される観測量 $\mathbf{F}_s$, $\mathbf{M}_s$ から算出される既知のベクトルである。また、接触点は指先半球上にあるので

$$g(\mathbf{p}_{fc}) = \|\mathbf{p}_{fc}\|^2 - r^2 = 0 \quad (5)$$

が成り立つ。ここで、 $\|\cdot\|$ はユークリッドノルムを表し、 $\|\mathbf{p}_{fc}\|^2 = \mathbf{p}_{fc}^T \mathbf{p}_{fc}$ である。さらに、接触点において粘着性の力が発生しない、すなわち、引っ張り方向の指先力が発生しないものとする、

$$\mathbf{p}_{fc}^T \mathbf{F}_s \leq 0 \quad (6)$$

Fig. 1 Contact between a hemisphere fingertip and an object

が成立する。

以降では、 r と $\mathbf{p}_f$ を既知とし、 $\mathbf{F}_s$, $\mathbf{M}_s$ の観測により、接触点位置 $\mathbf{p}_{fc}$ を求めることを考える。なお、接触している状況を考えているので、 $\mathbf{F}_s \neq \mathbf{0}$ とする。

2.2 推定問題の定式化

力覚センサの測定ノイズを考慮し、式 (3) を以下のように書き直す。

$$\mathbf{e} = \mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_f \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{e}$ は測定ノイズに起因する力とモーメントの釣り合いの誤差を表しており、ノイズがない場合は $\mathbf{e} = \mathbf{0}$ である。センサの測定ノイズの力成分を $\Delta \mathbf{F}_s$ 、モーメント成分を $\Delta \mathbf{M}_s$ とすると、式 (1), (2) より、 $\mathbf{F}_s = \mathbf{F}_c + \Delta \mathbf{F}_s$, $\mathbf{M}_s = \mathbf{p}_c \times \mathbf{F}_c + \Delta \mathbf{M}_s$ であるので、式 (4) と位置ベクトルの幾何学的な関係より、

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= \mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_s + \mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_f \\ &= \mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + (\mathbf{p}_c \times (\mathbf{F}_s - \Delta \mathbf{F}_s) + \Delta \mathbf{M}_s) + \mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_f \\ &= \mathbf{F}_s \times (\mathbf{p}_f + \mathbf{p}_{fc} - \mathbf{p}_c) - \mathbf{p}_c \times \Delta \mathbf{F}_s + \Delta \mathbf{M}_s \\ &= -\mathbf{p}_c \times \Delta \mathbf{F}_s + \Delta \mathbf{M}_s \end{aligned} \quad (8)$$

と表現できる。

接触点位置 $\mathbf{p}_{fc}$ の推定値としては、 $\|\mathbf{e}\|$ を最小化するものが好ましいと考えられる。本研究では、制約条件式 (5), (6) のもとで、 $\|\mathbf{e}\|^2$ を最小化する問題、すなわち、

$$\begin{cases} \text{目的関数: } \|\mathbf{e}\|^2 = \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_f\|^2 \rightarrow \text{最小} \\ \text{制約条件 1: } g(\mathbf{p}_{fc}) = \|\mathbf{p}_{fc}\|^2 - r^2 = 0 \\ \text{制約条件 2: } \mathbf{p}_{fc}^T \mathbf{F}_s \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

により接触点位置の推定値 $\mathbf{p}_{fc}$ を求めることを考える。

最適化問題式 (9) は、目的関数については $\mathbf{p}_{fc}$ に関して通常の最小二乗の問題であるが、 $\mathbf{p}_{fc}$ に関して非線形の等式制約 (制約条件 1) をもつので、解析解を求める一般的な手法はなく、通常は数値最適化により解を求めることになる。しかしながら、幸いにも、式 (9) は解析的に解くことができる。次章ではこのことを示す。

3. 最適化問題の解

初めに結論を述べる。式 (9) の最適化問題の解は、

● $0 \leq \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| \leq r \|\mathbf{F}_s\|^2$ の場合：

$$\mathbf{p}_{fc} = \frac{\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f}{\|\mathbf{F}_s\|^2} - \frac{\mathbf{F}_s}{\|\mathbf{F}_s\|} \sqrt{r^2 - \frac{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|^2}{\|\mathbf{F}_s\|^4}} \quad (10)$$

● $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| > r \|\mathbf{F}_s\|^2$ の場合：

$$\mathbf{p}_{fc} = r \frac{\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f}{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|} \quad (11)$$

で与えられる。

[注1] ベクトル三重積の性質（後述の式 (24)）より、 $\mathbf{F}_s \times (\mathbf{p}_{fc} \times \mathbf{F}_s) = \|\mathbf{F}_s\|^2 \mathbf{p}_{fc} - (\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc}) \mathbf{F}_s$ であり、また、

$\|\mathbf{F}_s \times (\mathbf{p}_{fc} \times \mathbf{F}_s)\|^2 = (r^2 \|\mathbf{F}_s\|^2 - (\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc})^2) \|\mathbf{F}_s\|^2$ である。式 (7) より $\mathbf{M}_f = \mathbf{p}_{fc} \times \mathbf{F}_s + \mathbf{e}$ であるので、スカラー三重積の性質（後述式 (23)）に注意すれば、

$$\begin{aligned} \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|^2 &= \|\mathbf{F}_s \times (\mathbf{p}_{fc} \times \mathbf{F}_s + \mathbf{e})\|^2 \\ &= (r^2 \|\mathbf{F}_s\|^2 - (\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc})^2) \|\mathbf{F}_s\|^2 \\ &\quad + 2 \left(\|\mathbf{F}_s\|^2 \mathbf{p}_{fc} - (\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc}) \mathbf{F}_s \right)^T (\mathbf{F}_s \times \mathbf{e}) \\ &\quad + \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{e}\|^2 \\ &= r^2 \|\mathbf{F}_s\|^4 - (\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc})^2 \|\mathbf{F}_s\|^2 \\ &\quad + 2(\mathbf{p}_{fc}^T \mathbf{F}_s \times \mathbf{e}) \|\mathbf{F}_s\|^2 + \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{e}\|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

を得る。

式 (12) より、測定ノイズが存在しない場合、すなわち、 $\mathbf{e} = \mathbf{0}$ の場合、 $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| \leq r \|\mathbf{F}_s\|^2$ が常に成立するので、その場合の推定値は、式 (10) で与えられる。実際、式 (10) は測定ノイズがない場合において式 (3), (5), (6) より導かれる従来結果 [6] [7] に一致する。一方、式 (12) より、 $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| > r \|\mathbf{F}_s\|^2$ の条件は、

$$2(\mathbf{p}_{fc}^T \mathbf{F}_s \times \mathbf{e}) \|\mathbf{F}_s\|^2 + \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{e}\|^2 > (\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc})^2 \|\mathbf{F}_s\|^2 \quad (13)$$

と表すことができる。式 (13) より、大きさに関しては、 $\mathbf{F}_s$ については、左辺がせいぜい $\|\mathbf{F}_s\|$ の 3 乗の項を持つのにに対し、右辺は 4 乗の項を持っている。一方、 $\mathbf{F}_s$ と $\mathbf{e}$ の積の項を考えると、左辺、右辺ともに 4 乗の項を持つことになる。また、向きに関しては、まず、左辺第一項のスカラー三重積 $\mathbf{p}_{fc}^T \mathbf{F}_s \times \mathbf{e}$ が正、すなわち、 $\mathbf{p}_{fc}$ と $\mathbf{F}_s \times \mathbf{e}$ の内積が正となる状況を考える（通常 $\mathbf{e}$ の向きは指定されていないと考えらるので、このことはいつでも可能である）。このとき、スカラー三重積と外積の性質より、左辺は $\mathbf{e}$ 、 $\mathbf{F}_s$ および $\mathbf{p}_{fc}$ のなす角それぞれが垂直に近いほど大きくなる。一方、右辺は $\mathbf{F}_s$ と $\mathbf{p}_{fc}$ のなす角が垂直に近いほど小さくなる。このことから、式 (10) が用いられる状況としては、 $\mathbf{e}$ が $\mathbf{F}_s$ に対して比較的大きく、 $\mathbf{p}_{fc}^T \mathbf{F}_s \times \mathbf{e}$ が正、かつ、 $\mathbf{e}$ 、 $\mathbf{F}_s$ および $\mathbf{p}_{fc}$ のなす角それぞれが垂直に近くなる場合が想定される。なお、 $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| > r \|\mathbf{F}_s\|^2$ の場合、式 (10) 右辺の平方根の内部は、

$$\begin{aligned} r^2 - \frac{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|^2}{\|\mathbf{F}_s\|^4} &= \frac{1}{\|\mathbf{F}_s\|^4} (r \|\mathbf{F}_s\|^2 + \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|) \\ &\quad \times (r \|\mathbf{F}_s\|^2 - \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|) < 0 \end{aligned}$$

であるので、この場合、式 (10) を用いて解を求めることはできないことに注意する。

本論文の結果は、ノイズのない場合を想定した従来結果に、 $0 \leq \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| \leq r \|\mathbf{F}_s\|^2$ の条件下において式 (9) の意味での最適性という新しい解釈を与えるとともに、測定ノイズの影響により $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| > r \|\mathbf{F}_s\|^2$ となる場合の推定値の計算法を新たに与えている。

本章の以降では、上記推定値の導出の詳細を述べる。

3.1 準備

式 (9) の最適化問題を解くに当たり、目的関数と制約条件 1 のみからなる部分問題

$$\begin{cases} \text{目的関数: } \|\mathbf{e}\|^2 = \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_f\|^2 \rightarrow \text{最小} \\ \text{制約条件 1: } g(\mathbf{p}_{fc}) = \|\mathbf{p}_{fc}\|^2 - r^2 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

を考え、ラグランジュ関数として

$$L = \frac{1}{2} \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_f\|^2 + \frac{1}{2} \lambda (\|\mathbf{p}_{fc}\|^2 - r^2) \quad (15)$$

を考える。ここで、 λ はラグランジュ乗数であり、 $[\cdot]_{\times} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ は外積と等価な演算を与える歪対称行列である。本研究では、式 (9) の最適化問題の解を、部分問題式 (14) の解に制約条件 2 を課すことにより求める。

$\mathbf{p}_{fc}$ が式 (14) の最適化問題の解であるための 1 次の必要条件は $\partial L / \partial \mathbf{p}_{fc} = \mathbf{0}$ 、 $\partial L / \partial \lambda = 0$ で与えられる [11]。式 (15) を $\mathbf{p}_{fc}$ で微分すると、 $\partial L / \partial \mathbf{p}_{fc} = \mathbf{0}$ は

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{p}_{fc}} &= [\mathbf{F}_s \times]_T (\mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_f) + \lambda \mathbf{p}_{fc} \quad (16) \\ &= -\mathbf{F}_s \times (\mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_f) + \lambda \mathbf{p}_{fc} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (17)$$

であり、 $\partial L / \partial \lambda = 0$ は式 (5) である。次に、式 (16) をさらに $\mathbf{p}_{fc}$ で微分すると

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \mathbf{p}_{fc}^2} = [\mathbf{F}_s \times]_T [\mathbf{F}_s \times] + \lambda \mathbf{I}_3$$

であるので、

$$\mathbf{x}^T \frac{\partial^2 L}{\partial \mathbf{p}_{fc}^2} \mathbf{x} = \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{x}\|^2 + \lambda \|\mathbf{x}\|^2 \quad (18)$$

である。最適性の 2 次の必要条件は、1 次の必要条件に加えて、

$$\mathbf{x}^T \frac{\partial^2 L}{\partial \mathbf{p}_{fc}^2} \mathbf{x} \geq 0, \quad \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \in \mathbf{X} \quad (19)$$

ただし、

$$\mathbf{X} := \{ \mathbf{x} \mid \mathbf{p}_{fc}^T \mathbf{x} = 0 \} \quad (20)$$

が成立することである [11]。なお、 $(\partial g(\mathbf{p}_{fc}) / \partial \mathbf{p}_{fc})^T \mathbf{x} = 2\mathbf{p}_{fc}^T \mathbf{x}$ であるので、 $\mathbf{X}$ は $g(\mathbf{p}_{fc}) = 0$ により定まる曲面の位置 $\mathbf{p}_{fc}$ における接触平面内にあるベクトルの集合である。また、最適性の 2 次の十分条件は、1 次の必要条件に加えて、

$$\mathbf{x}^T \frac{\partial^2 L}{\partial \mathbf{p}_{fc}^2} \mathbf{x} > 0, \quad \mathbf{x} \neq \mathbf{0} \in \mathbf{X} \quad (21)$$

が成立することである [11]。

なお、以降ではベクトル $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c} \in \mathbf{R}^3$ に対して、

$$\mathbf{a}^T (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{c}^T (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \quad (22)$$

$$\mathbf{a}^T (\mathbf{a} \times \mathbf{c}) = 0 \quad (23)$$

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{a}^T \mathbf{c}) \mathbf{b} - (\mathbf{a}^T \mathbf{b}) \mathbf{c} \quad (24)$$

$$\|\mathbf{a} \times \mathbf{b}\|^2 + (\mathbf{a}^T \mathbf{b})^2 = \|\mathbf{a}\|^2 \|\mathbf{b}\|^2 \quad (25)$$

が成立する [13] ことをしばしば用いている。

次節より上記で述べた最適性の条件に従い、式 (9) の最適解 $\mathbf{p}_{fc}$ の値を求める。なお、式 (17) に左から $\mathbf{F}_s^T$ をかけると、式 (23) より、

$$\lambda \mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc} = 0 \quad (26)$$

を得るので、 $\lambda = 0$ と $\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc} = 0$ の場合分けに従い、最適解を調べる。

3.2 $\lambda = 0$ の場合

$\lambda = 0$ に注意し、式 (24) を用いて式 (17) を整理すると、

$$\begin{aligned} -\mathbf{F}_s \times (\mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_f) \\ = -(\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc}) \mathbf{F}_s + (\mathbf{F}_s^T \mathbf{F}_s) \mathbf{p}_{fc} - \mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f \\ = 0 \end{aligned}$$

より、

$$\mathbf{p}_{fc} = \frac{1}{\|\mathbf{F}_s\|^2} \left\{ \mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f + (\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc}) \mathbf{F}_s \right\} \quad (27)$$

を得る。上式を式 (5) に代入し、式 (23) に注意して、 $\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc}$ について解くと

$$\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc} = \pm \|\mathbf{F}_s\| \sqrt{r^2 - \frac{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|^2}{\|\mathbf{F}_s\|^4}}$$

であるので、制約条件 2 より直ちに

$$\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc} = -\|\mathbf{F}_s\| \sqrt{r^2 - \frac{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|^2}{\|\mathbf{F}_s\|^4}} \quad (28)$$

を得る。式 (28) を式 (27) に代入することにより、解の候補

$$\mathbf{p}_{fc} = \frac{\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f}{\|\mathbf{F}_s\|^2} - \frac{\mathbf{F}_s}{\|\mathbf{F}_s\|} \sqrt{r^2 - \frac{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|^2}{\|\mathbf{F}_s\|^4}} \quad (29)$$

が得られる。 $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| > r \|\mathbf{F}_s\|^2$ の場合は虚数解であり、不適であることに注意する

次に、式 (29) の解の最適性を調べる。 $\lambda = 0$ であるので、(18) 式は、

$$\mathbf{x}^T \frac{\partial^2 L}{\partial \mathbf{p}_{fc}^2} \mathbf{x} = \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{x}\|^2 \quad (30)$$

であり、 $\mathbf{F}_s \times \mathbf{x} \neq \mathbf{0}$ であれば、2 次の十分条件式 (21) を満たす。そこで、 $\mathbf{x} = k \mathbf{F}_s$ ($k \neq 0 \in \mathbf{R}$) と仮定し、 $\mathbf{X}$ の定義式 (20) に代入すると

$$\mathbf{p}_{fc}^T \mathbf{x} = -k \|\mathbf{F}_s\| \sqrt{r^2 - \frac{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|^2}{\|\mathbf{F}_s\|^4}} \quad (31)$$

である。 $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| < r \|\mathbf{F}_s\|^2$ のとき、式 (31) $\neq 0$ より $\mathbf{X}$ の定義式 (20) に矛盾するので、 $\mathbf{F}_s \times \mathbf{x} \neq \mathbf{0}$ であり、式 (29) は最適解である。一方、 $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| = r \|\mathbf{F}_s\|^2$ のとき、式 (31) $= 0$ となるので、 $\mathbf{x} = \mathbf{F}_s$ を選ぶことができ、2 次の十分条件式 (21) を満たさない。しかしながら、式 (29) の $\mathbf{p}_{fc}$ を制約

条件 1 を満たすように $\Delta \mathbf{p}$ だけ移動させた点 $\mathbf{p}'_{fc} = \mathbf{p}_{fc} + \Delta \mathbf{p}$ を考え、 $\mathbf{p}'_{fc}$ に対する誤差 $\|\mathbf{e}'\|^2$ を計算すると

$$\|\mathbf{e}'\|^2 = \|\mathbf{e}\|^2 + \|\mathbf{F}_s \times \Delta \mathbf{p}\|^2 > \|\mathbf{e}\|^2 \quad (32)$$

であることを示すことができる (詳細は 付録 A 参照) ので、式 (29) は最適解である。

以上より、 $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| \leq r \|\mathbf{F}_s\|^2$ において、式 (27) は最適解であり、式 (10) を得る。

3.3 $\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc} = 0$ の場合

$\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc} = 0$ であるので、この場合、制約条件 2 は常に満たされることに注意する。

$\mathbf{F}_s^T \mathbf{p}_{fc} = 0$ に注意し、式 (17) と $\mathbf{p}_{fc}$ との内積および外積を計算すると、

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{fc}^T \{ -\mathbf{F}_s \times (\mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_f) + \lambda \mathbf{p}_{fc} \} \\ = \mathbf{p}_{fc}^T \left\{ (\mathbf{F}_s^T \mathbf{F}_s) \mathbf{p}_{fc} - \mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f + \lambda \mathbf{p}_{fc} \right\} \\ = r^2 (\|\mathbf{F}_s\|^2 + \lambda) - \mathbf{p}_{fc}^T (\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_s) = 0 \end{aligned} \quad (33)$$

および、

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{fc} \times \left\{ (\mathbf{F}_s^T \mathbf{F}_s) \mathbf{p}_{fc} - \mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f + \lambda \mathbf{p}_{fc} \right\} \\ = -\mathbf{p}_{fc} \times (\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f) = -(\mathbf{p}_{fc}^T \mathbf{M}_f) \mathbf{F}_s = 0 \end{aligned} \quad (34)$$

を得る。以降では、 $\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f = \mathbf{0}$ と $\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f \neq \mathbf{0}$ に場合分けして考える。

$\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f = \mathbf{0}$ のとき、式 (33) より直ちに、

$$\lambda = -\|\mathbf{F}_s\|^2 \quad (35)$$

を得る。よって、式 (25) を用いれば、この場合式 (18) は、

$$\mathbf{x}^T \frac{\partial^2 L}{\partial \mathbf{p}_{fc}^2} \mathbf{x} = \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{x}\|^2 - \|\mathbf{F}_s\|^2 \|\mathbf{x}\|^2 = -(\mathbf{F}_s^T \mathbf{x})^2$$

となる。 $\mathbf{F}_s \neq \mathbf{0}$ であり、式 (20) より $\mathbf{x}$ は $\mathbf{p}_{fc}$ に垂直な平面内の任意のベクトルであるので、上式を負とする $\mathbf{x}$ が必ず存在する。よって、2 次の必要条件式 (19) は成立しないので、最適解ではない。

$\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f \neq \mathbf{0}$ のとき、式 (34) より、 $\mathbf{p}_{fc}$ は $\mathbf{F}_s$ と $\mathbf{M}_f$ に垂直なベクトルであるので、制約条件 1 に注意すれば、解の候補として、

$$\mathbf{p}_{fc} = \pm r \frac{\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f}{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|} \quad (36)$$

を得る。また、このときの λ は、式 (36) を式 (33) に代入することにより、

$$\lambda = -\|\mathbf{F}_s\|^2 \pm \frac{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|}{r} \quad (37)$$

で与えられる。式 (25) を用いれば、この場合式 (18) は、

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^T \frac{\partial^2 L}{\partial \mathbf{p}_{fc}^2} \mathbf{x} &= \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{x}\|^2 + \left(-\|\mathbf{F}_s\|^2 \pm \frac{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|}{r} \right) \|\mathbf{x}\|^2 \\ &= -(\mathbf{F}_s^T \mathbf{x})^2 \pm \frac{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|}{r} \|\mathbf{x}\|^2 \end{aligned} \quad (38)$$

である。式 (38) 右辺の複合が‘-’の場合、明らかに 2 次の必要条件式 (19) を満たさないの、以降では、右辺の複合が‘+’の場合、すなわち、

$$\mathbf{x}^T \frac{\partial^2 L}{\partial \mathbf{p}_{fc}^2} \mathbf{x} = -(\mathbf{F}_s^T \mathbf{x})^2 + \frac{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|}{r} \|\mathbf{x}\|^2 \quad (39)$$

の場合について考える。なお、この場合の解の候補は式 (36) より、

$$\mathbf{p}_{fc} = r \frac{\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f}{\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\|} \quad (40)$$

である。 $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| < r\|\mathbf{F}_s\|^2$ のとき、式 (25) に注意すると

$$\text{式 (39)} < -(\mathbf{F}_s^T \mathbf{x})^2 + \|\mathbf{F}_s\|^2 \|\mathbf{x}\|^2 = \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{x}\|^2$$

であり、式 (40) および式 (20) より $\mathbf{x} = \mathbf{F}_s$ と選べるので、2 次の必要条件式 (19) を満たさない。一方、 $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| > r\|\mathbf{F}_s\|^2$ のとき、

$$\text{式 (39)} > -(\mathbf{F}_s^T \mathbf{x})^2 + \|\mathbf{F}_s\|^2 \|\mathbf{x}\|^2 = \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{x}\|^2 \geq 0$$

であるので、2 次の十分条件式 (21) を満たす。 $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| = r\|\mathbf{F}_s\|^2$ のとき、2 次の十分条件を満たさないが、この場合式 (40) が式 (A.1) と等しいことに注意すると、前節と同様の議論により、式 (32) を示すことができる。

以上より、 $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| \geq r\|\mathbf{F}_s\|^2$ において、式 (36) は最適解であり、式 (11) を得る。なお、 $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| = r\|\mathbf{F}_s\|^2$ においては式 (10) と式 (11) は一致するので、等号は式 (10) に含めることとした。

4. 実 験

Fig. 2 のように、6 軸力覚センサ（ビー・エル・オートテック株式会社製、ビーエル・NANO センサ）を取り付けた指先を用いて実験を行った。指先は、XY ステージ上に設置された回転ステージに取り付けられており、平面内の並進 (x, y 方向)、回転（回転角 θ ）運動が可能である。図中 ● 印はセンサ座標系 Σ_s の原点であり、回転ステージの回転中心と一致している。先端半球の半径は 9 [mm] であり、 Σ_s の原点から指先中心（× 印）

Fig. 2 Experimental equipment

までの距離は 12 [mm] である。実験においては、回転ステージを適当な角度で固定した後、XY ステージを前後方向 (y 方向) に動かし、指先を適当な力で対象物に押し付けた後サンプリングタイム 0.1 [sec] にて 10 [sec] 間 (100 点) の計測を行った。

初めに、指先を対象物に押し付けた後、指先を静止させておいた場合の結果を示す。回転ステージの回転角は、 $\theta = 0, 30, -30$ [deg] の 3 通り行った。接触点位置の真値 $\mathbf{p}_{fc}^0$ は、 $\theta = 0, 30, -30$ [deg] において、それぞれ、 $\mathbf{p}_{fc}^0 = [0.00 \ 9.00 \ 0.00]^T$, $[-4.50 \ 7.79 \ 0.00]^T$, $[4.50 \ 7.79 \ 0.00]^T$ [mm] である。結果を Table 1 に示す。左から $\theta = 0, 30, -30$ [deg] における結果であり、上から、計測された力とモーメント、ならびに接触点位置の推定値の平均値と標準偏差が示してある（それぞれ上から x, y, z 軸方向成分）。表上段よりこの力覚センサの計測値には、ノイズ等の影響により、標準偏差にして力成分に 10^{-2} [N] 程度、モーメント成分に 10^{-4} [N・m] 程度のばらつきがあるのが分かる。また Table 1 下段より、この計測データに対し、接触点位置の真値と推定値の平均値のずれは最大で 0.12 [mm] 程度、ばらつきは標準偏差にして最大で 0.12 [mm] 程度であった。指先半球の半径が 9 [mm] であることを考慮すると、この推定値は多指ハンドロボットの制御などへの利用に対して十分な精度を有していると考えられる。

次に、指先を計測時間中に左右方向 (x 方向) に滑らせた場合の結果を示す。回転ステージの回転角は $\theta = 0$ [deg] とした。結果を Fig. 3 に示す。図上段から、計測された力とモーメント、ならびに、接触点位置の推定値であり、左から x, y, z 軸方向成分となっている。なお、最下段の接触点位置の推定値のグラフにおいては、真値が破線で示してあり、また、図中に推定値の平均値と標準偏差が示してある。この場合、接触点位置の真値と推定値の平均値のずれは最大で 0.14 [mm] 程度、標準偏差は最大 0.18 [mm] で程度であり、固定した場合の結果に比べてわずかながら推定精度の劣化が見られた。劣化の理由としては、滑らせることにより接触状況が変化するため、引っかかり等により接触点においてモーメントが生じたことなどが考えられる。なお、接触点位置のばらつきが y 方向に比べて x, z 方向に大きくあらわれているのは、 $\theta = 0$ [deg] において、接触点位置の変化がこれらの方向に大きく寄与するためであると考えられる。

【注 2】 本実験においては、すべての場合で式 (11) を用いる状況は起こらなかった。このことを、 $\theta = 30$ [deg] で指先を固定した場合の実験データ (Table 1 の $\theta = 30^\circ$ 欄) により考察してみる。この場合、 $\mathbf{F}_s$ と $\mathbf{p}_{fc}$ は $x-y$ 平面内にあるとみなせるので、注 1 より、 $\mathbf{e}$ としては z 軸の正方向 ($\mathbf{p}_{fc}^T \mathbf{F}_s \times \mathbf{e} = \mathbf{e}^T \mathbf{p}_{fc} \times \mathbf{F}_s$ が正となることを考慮) を向くときが最も式 (11) を用いる状況を生じやすい。 $\mathbf{e}$ をこの向きにとり、表中の平均値を $\mathbf{F}_s, \mathbf{M}_s$ として $\mathbf{e}$ の大きさを徐々に大きくしていくと、 $\|\mathbf{e}\| = 3.80 \times 10^{-2}$ のとき初めて $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| > r\|\mathbf{F}_s\|^2$ となった。 $(\|\mathbf{F}_s\| \text{ に対する } \|\mathbf{e}\| \text{ の割合は } 1\% \text{ 程度})$ 。一方、表中の標準偏差を測定ノイズによる誤差 $\Delta \mathbf{F}_s, \Delta \mathbf{M}_s$ とみなすと、 $\|\mathbf{e}\| \leq \|\mathbf{p}_c\| \|\Delta \mathbf{F}_s\| + \|\Delta \mathbf{M}_s\| = 9.84 \times 10^{-4}$ となった。このことから分かるように、本実験装置の力センサの測定ノイズは式 (11) を用いる状況を生じる誤差に対して十分に小さく、そ

Table 1 Experimental results (Fixed)

	$\theta = 0^\circ$ ($\mathbf{p}_{fc}^0 = [0.00 \ 9.00 \ 0.00]^T [\text{mm}]$)	$\theta = 30^\circ$ ($\mathbf{p}_{fc}^0 = [-4.50 \ 7.79 \ 0.00]^T [\text{mm}]$)	$\theta = -30^\circ$ ($\mathbf{p}_{fc}^0 = [4.50 \ 7.79 \ 0.00]^T [\text{mm}]$)
	Mean value (Standard deviation)	Mean value (Standard deviation)	Mean value (Standard deviation)
$F_{sx} [\text{N}]$	-0.1460 (0.0430)	2.0387 (0.0348)	-4.6476 (0.0552)
$F_{sy} [\text{N}]$	-7.8132 (0.0268)	-3.7889 (0.0126)	-10.687 (0.0248)
$F_{sz} [\text{N}]$	-0.2986 (0.0377)	-0.3801 (0.0173)	0.1700 (0.0383)
$M_{sx} [\times 10^{-3} \text{Nm}]$	-6.4248 (0.2153)	-7.7430 (0.1227)	2.2345 (0.3452)
$M_{sy} [\times 10^{-3} \text{Nm}]$	0.1574 (0.0970)	-2.4244 (0.0528)	-0.3958 (0.1138)
$M_{sz} [\times 10^{-3} \text{Nm}]$	2.4162 (0.2106)	-23.594 (0.2167)	42.829 (0.3575)
$p_{fcx} [\text{mm}]$	0.0837 (0.1216)	-4.4504 (0.1027)	4.5799 (0.0671)
$p_{fcy} [\text{mm}]$	8.9981 (0.0024)	7.8202 (0.0590)	7.7462 (0.0393)
$p_{fcz} [\text{mm}]$	-0.0200 (0.1122)	-0.1236 (0.0988)	-0.1016 (0.0709)

Fig. 3 Experimental results (Sliding, $\theta = 0^\circ$)

のため式 (11) を用いる状況が生じなかったと考えられる。

[注 3] 前述したように、接触点位置の計算は、逐次二次計画法などを用いて数値最適化により求めることも可能である。数値最適化と提案手法の比較のため、Fig. 3 で用いた測定データ 100 点 ($\theta = 0 [\text{deg}]$ で指先を滑らせた場合) に対して、パソコン (Pentium III 667 MHz) 上で数値計算用ソフトウェア Matlab を用いて接触点位置の計算を行った (数値最適化には逐次二次計画法を用いた)。初めに、数値最適化の解の初期値を真値 ($\theta = 0 [\text{deg}]$ のときの接触点位置) として計算を行ったところ、数値最適化に要した時間は 9.39 [sec] であった。一方、提案する解析解を用いた場合の計算時間は 0.11 [sec] であり、この場合、解析解の計算時間に比べて数値最適化にはおよそ 100 倍の計算時間を必要とした。次に、数値最適化の初期値

を $\theta = 30 [\text{deg}]$ の時の接触点位置として同様の計算を行ったところ、数値最適化に要した時間は 13.23 [sec] となり、計算時間は初期値を真値とした場合に比べて 40% 程度増加した。なお、数値最適化による接触点位置はほとんどの場合において解析解に十分近いものが得られていたが、解の初期値を $\theta = 30 [\text{deg}]$ とした場合の一つのデータに対しては解析解と大きな差が見られた。

上記の結果からも分かるように、本研究の最適化問題の未知数はたかだか 3 変数であり、また、目的関数も比較的性質の良い最小 2 乗の問題であるので、数値最適化においても極端な困難は生じていないが、それでもなお、計算時間や解の収束性において解析解が得られていることの優位性は高いと考えられる。

5. 結 言

本研究では、力覚センサに測定ノイズが存在する場合を想定した、力覚情報による接触点位置の推定法を提案した。接触点の推定問題としては、接触点が指先半球上にあるという事実と指先力は引っ張り方向に働かないという事実を制約条件とし、測定ノイズのもとで推定誤差の最小化を行う最適化問題として定式化を行った。さらに、上記最適化問題をラグランジュの未定乗数法を用いて解析を行い、その解析解を導いた。また、提案手法の有効性を、実験により検証した。

本研究では、最も基本的な場合として、指先形状が半球の場合を考えたが、今後、本手法を2次曲面などより一般形状の指先へ拡張する必要がある。また、本研究では、指先力にモーメントが発生しないハードフィンガータイプの指先を考えた。本手法をモーメントの発生を許容するソフトフィンガータイプの指先へ拡張することも今後の課題である。

参 考 文 献

- [1] 吉川恒夫：“把持と操りの基礎理論 1. 受動拘束と能動拘束”，日本ロボット学会誌，vol.13，no.7，pp.950-957，1995.
- [2] 吉川恒夫：“把持と操りの基礎理論 2. 指先力”，日本ロボット学会誌，vol.14，no.1，pp.48-54，1996.
- [3] 吉川恒夫：“把持と操りの基礎理論 3. 制御”，日本ロボット学会誌，vol.14，no.4，pp.505-511，1996.
- [4] 長瀬賢二，早川義一：“多指ハンドロボットの把握と操り—指先力を利用した制御系設計法—”，システムインテグレーション部門学術講演会講演論文集，pp.197-198，2001.
- [5] 中島明，長瀬賢二，早川義一：“2指ハンドによる転がり接触を用いた対象物の把握・操りと接触点の制御”，計測自動制御学会論文集，vol.40，no.1，pp.70-79，2004.
- [6] 北垣高成：“組立作業における力覚情報処理—接触点検出法—”，電気学会論文誌 C，vol.115，no.10，pp.1099-1102，1995.
- [7] 永田和之，津村稔，小俣透：“指先力覚センサの開発と接触点検出誤差評価”，日本ロボット学会誌，vol.14，no.8，pp.1221-1228，1996.
- [8] 坂根茂幸，石川友彦，佐藤知正：“視覚と力覚のセンサフュージョンによる把持物体の接触位置の推定”，日本ロボット学会誌，vol.12，no.5，pp.677-684，1994.
- [9] 堀江竜太，金子真：“自動感度可変型触覚センサ”，日本ロボット学会誌，vol.21，no.8，pp.940-946，2003.
- [10] 中山繁生，陳鵬，松宮俊彦，豊田利夫：“複合型八角リングによるロボットハンド用多機能触覚センサの実現”，計測自動制御学会論文集，vol.35，no.8，pp.981-988，1999.
- [11] 福島雅夫：数理計画入門，pp.96-140，朝倉書店，1996.

[12] 徐剛，辻三郎：三次元ビジョン，pp.51-55，共立出版，1998.

[13] C.R. ワイリー著，富久泰明訳：工業数学<下>，pp.559-623，プレイン図書出版，1987.

付録 A. $\lambda = 0$, $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| = r\|\mathbf{F}_s\|^2$ における解の最適性

ここでは、 $\lambda = 0$, $\|\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f\| = r\|\mathbf{F}_s\|^2$ における解式 (29) の最適性を示す。この場合、式 (29) は、

$$\mathbf{p}_{fc} = \frac{\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f}{\|\mathbf{F}_s\|^2} \quad (\text{A.1})$$

であることに注意する。

式 (A.1) の $\mathbf{p}_{fc}$ を、制約条件 1 を満たすように $\Delta \mathbf{p} (\neq \mathbf{0})$ だけ移動させた点 $\mathbf{p}'_{fc} = \mathbf{p}_{fc} + \Delta \mathbf{p}$ を考える。式 (A.1) より

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_f &= \mathbf{F}_s \times \frac{\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f}{\|\mathbf{F}_s\|^2} + \mathbf{M}_f \\ &= \frac{(\mathbf{F}_s^T \mathbf{M}_f)}{\|\mathbf{F}_s\|^2} \mathbf{F}_s \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

であることに注意して、 $\mathbf{p}'_{fc}$ に対する誤差 $\|\mathbf{e}'\|^2$ を式 (7) により計算すると、

$$\begin{aligned} \|\mathbf{e}'\|^2 &= \|\mathbf{F}_s \times (\mathbf{p}_{fc} + \Delta \mathbf{p}) + \mathbf{M}_f\|^2 \\ &= \|\mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_f\|^2 + \|\mathbf{F}_s \times \Delta \mathbf{p}\|^2 \\ &\quad + 2(\mathbf{F}_s \times \mathbf{p}_{fc} + \mathbf{M}_f)^T (\mathbf{F}_s \times \Delta \mathbf{p}) \\ &= \|\mathbf{e}\|^2 + \|\mathbf{F}_s \times \Delta \mathbf{p}\|^2 \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

となる。ここで、 $\mathbf{p}_{fc}$ と $\mathbf{p}'_{fc}$ がともに制約条件 1 を満たすことに注意すると、式 (A.1) より、

$$\begin{aligned} \|\Delta \mathbf{p}\|^2 &= \|\mathbf{p}'_{fc} - \mathbf{p}_{fc}\|^2 = \|\mathbf{p}'_{fc}\|^2 - 2\mathbf{p}'_{fc}^T \mathbf{p}_{fc} + \|\mathbf{p}_{fc}\|^2 \\ &= 2r^2 - 2\mathbf{p}'_{fc}^T (\mathbf{p}_{fc} + \Delta \mathbf{p}) = -2 \frac{(\mathbf{F}_s \times \mathbf{M}_f)^T}{\|\mathbf{F}_s\|^2} \Delta \mathbf{p} \\ &= 2 \frac{\mathbf{M}_f^T (\mathbf{F}_s \times \Delta \mathbf{p})}{\|\mathbf{F}_s\|^2} \end{aligned}$$

となる。ここで、 $\mathbf{F}_s \times \Delta \mathbf{p} = \mathbf{0}$ とすると $\|\Delta \mathbf{p}\|^2 = 0$ となり $\Delta \mathbf{p} \neq \mathbf{0}$ に矛盾するので、 $\mathbf{F}_s \times \Delta \mathbf{p} \neq \mathbf{0}$ である。このことから、式 (A.3) より、式 (32) が成立する。

長瀬賢二 (Kenji Nagase)

1969 年 9 月 25 日生。1998 年名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年名古屋大学工学研究科助手。2005 年和歌山大学システム工学部助教授。振動の制御、ロボットの制御などの研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会などの会員 (工学博士)。(日本ロボット学会正会員)

中島 明 (Akira Nakashima)

2005 年名古屋大学大学院工学研究科電子機械工学専攻博士後期課程修了。同年、名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻助手。多指ハンドロボットによる把握・操りの制御、非ホロノミックスシステムの制御の研究に従事 (工学博士)。計測自動制御学会の会員。

吉永光介 (Kousuke Yoshinaga)

2004 年名古屋大学大学院工学研究科電子機械工学専攻博士前期課程修了。現在、セイコーエプソン株式会社勤務。

早川義一 (Yoshikazu Hayakawa)

1951 年 7 月 10 日生。1979 年名古屋大学大学院博士後期課程修了。同年名古屋大学工学部助手、講師、助教授を経て、1996 年同教授。システム制御理論、ロボット工学の研究に従事。計測自動制御学会、システム制御情報学会などの会員 (工学博士)。(日本ロボット学会正会員)