

接触情報を用いた物体の関節回転軸位置の推定

A Tactile Sensing for Estimating the Position and Posture of a Joint-Axis of a Linked Object

○松尾 一矢 庭木 勝也 村上 剛司 長谷川 勉 倉爪 亮 (九大)

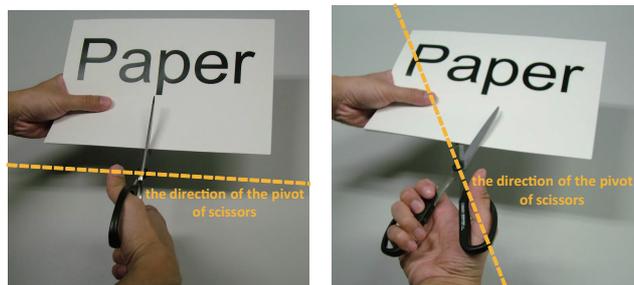
Kazuya MATSUO, kazu_matsuo@kyudai.jp, Katsuya NIWAKI, Kouji MURAKAMI,
Tsutomu HASEGAWA, Ryo KURAZUME (Kyushu Univ.)

This paper describes a tactile sensing to estimate the position and orientation of a joint-axis of a linked object. This tactile sensing is useful when a multi-jointed multi-fingered robotic hand uses a tool with a joint. This estimation requires sensing of the location of a contact point and the direction of an edge of the object as contact information measured by a robotic fingertip. A conventional hard fingertip with a force sensor can measure only the location of a contact point. In contrast, we have already developed a robotic fingertip with a force sensor and a soft skin, and it can measure not only the location of a contact point but also the direction of the edge of the object. The estimation of a joint-axis of a linked object is demonstrated by using the soft fingertip.

Key Words: Tactile, Sensing, Edge.

1 序論

ロボットで高い作業能力を実現することを目指し、多関節多指ロボットハンド^{1,2)}の研究が行われている。人間は手で道具を使用することで、文字を書く、釘を打つ、紙を切るといった様々な作業を行える。多指ハンドで人間と同じように道具を使用できれば、その作業能力は大きく向上する。しかし、道具の利用には、操作対象、道具、ロボットハンドの三者の相対位置姿勢を常時計測する必要があることもあり、その実現例はほとんどない。特にハサミなど関節を持つ道具は、その使用に関節軸の方向と作業対象との関係を考慮する必要もあるうえ、関節の動きに伴って全体形状が変化することもあり、その使用はより困難となる。例えば、ハサミで紙を切る際には、刃を紙に対して垂直にあてる、すなわち紙面に対してハサミの回転軸を常に平行にしなければならない(図1)。道具を使用する際には、操作対象、道具、ロボットハンドが近接し互いに隠れを頻繁に生じさせることから、ビジョンシステムのみで前述の情報を常に得ることは難しい。そこで本研究では、柔軟ロボット指先の触覚センシングにより、回転関節を持つ道具の回転軸の位置と姿勢を推定する手法を提案する。



(a) right usage

(b) wrong usage

Fig.1 Direction of the pivot of scissors.

Katzらは、物体の関節を動かし、そのとき得られる画像データ上で特徴点群の追跡を行うことで、その物体の関節の位置を推定する手法³⁾を提案している。この手法では、物体の表面上の特徴点を画像データから検出し、追跡する必要がある。しかしこの特徴点追跡は、物体の隠れや照明条件変化、複雑背景により容易に失敗する。一方、対象に直接接触させて計測を行う触覚センサでは、そ

れらのビジョンの誤検出要因から解放される。

触覚センサによる接触点位置計測を、視覚センサによる特徴点追跡に置き換えてKatzらの手法を適用する場合、指先と物体の接触点位置が物体表面上を移動しないならば、関節の位置を推定できる。しかし、多指ハンドでは物体操作に伴って物体表面上で接触点位置の移動が起こり得る。接触点位置の移動が起こると、前述の仮定が満たされず関節位置の推定誤差が増加してしまう。ここで、もし接触点位置が物体のエッジ上のみを移動すると仮定すれば、エッジの延長線と物体の回転軸位置との距離が常に一定となることを拘束条件として、エッジ方向を接触点位置と合わせて計測することで、接触点位置の移動に対して頑健に物体の関節位置を推定できる。

従来の硬いロボット指先では、指先表面上の接触点のみしか計測できない。これに対し、村上らは6軸力覚センサと柔軟被覆をもつロボット指先を用いることで、接触点位置に加えてエッジ方向も計測できることを報告している⁴⁾。また、柔軟被覆を通して物体エッジに接触した場合は、物体エッジの指先柔軟被覆へのめり込みにより、接触点位置の移動は物体エッジ上のみを移動するという仮定はほとんどの場合で満たされると考えられる。そこで本研究では村上らの手法を用いて物体の接触点位置とエッジ方向を計測し、物体の関節の位置と姿勢を推定する手法を提案する。

提案手法は、多指ロボットハンドによる関節を持つ道具の利用に役立つ。また、道具の他にも、収納庫の扉の開閉操作や、レバースイッチのON/OFF操作など回転軸の位置と姿勢の情報が、多指ハンドによる操作に必要となることは多い。このため、提案手法は広い応用が期待できる。

2 関節回転軸位置の推定手法

6軸力覚センサと柔軟被覆をもつロボット指先を物体に接触させて、接触点位置と物体のエッジ方向を計測し、物体の関節回転軸の位置と姿勢を推定する手法を提案する。本章で行う定式化では、関節をもつ道具の典型例である、2リンクが1自由度の回転関節で連結された構造の物体(図2)を対象とする。

物体の関節を動かす前後で、エッジの延長線と関節回転軸との距離 d は常に一定となる。この拘束条件を用いて、計測した接触点位置とエッジ方向の複数の組から、回転軸の位置と距離 d を推定す

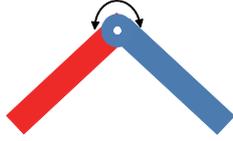


Fig.2 Object which has one revolute joint and two links.

る。物体の関節を動かして、接触点位置とエッジ方向の計測を N 回行う。 i 回目の接触点位置とエッジ方向をそれぞれ $\mathbf{x}_i = (x_i \ y_i \ z_i)^T$, $\mathbf{e}_i = (e_{xi} \ e_{yi} \ e_{zi})^T$, ($|\mathbf{e}_i| = 1$) とすると、エッジの延長線は、媒介変数 t を用いて、

$$(x \ y \ z)^T = \mathbf{x}_i + t\mathbf{e}_i \quad (1)$$

と表される。また、関節回転軸を表す直線は、媒介変数 s を用いて、

$$(x \ y \ z)^T = (p \ q \ r)^T + s(u \ v \ w)^T \\ = \mathbf{p} + s\mathbf{u} \quad (2)$$

$$u^2 + v^2 + w^2 = 1 \quad (3)$$

と表せる。エッジの延長線 (式 (1)) 上の点を $\mathbf{a}_i = (a_i \ b_i \ c_i)^T$, 関節回転軸を表す直線 (式 (2)) 上の点を $\mathbf{a} = (a \ b \ c)^T$ とすると、 $|\mathbf{a}_i - \mathbf{a}|$ の最小値が d となる。 $|\mathbf{a}_i - \mathbf{a}|$ が最小になるとき、 $(\mathbf{a}_i - \mathbf{a}) \perp \mathbf{e}_i$ かつ $(\mathbf{a}_i - \mathbf{a}) \perp \mathbf{u}$ となるので、

$$\begin{cases} (\mathbf{a}_i - \mathbf{a}) \cdot \mathbf{e}_i = 0 \\ (\mathbf{a}_i - \mathbf{a}) \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

となる。 $\mathbf{a}_i = \mathbf{x}_i + t\mathbf{e}_i$ と $\mathbf{a} = \mathbf{p} + s\mathbf{u}$ を代入すると、

$$\begin{cases} (\mathbf{x}_i - \mathbf{p} + t\mathbf{e}_i - s\mathbf{u}) \cdot \mathbf{e}_i = 0 \\ (\mathbf{x}_i - \mathbf{p} + t\mathbf{e}_i - s\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

が得られる。これを解くと、

$$s = \frac{|\mathbf{e}_i|^2(\mathbf{x}_i - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{u} - (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})(\mathbf{x}_i - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{e}_i}{|\mathbf{e}_i|^2|\mathbf{u}|^2 - (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})} \quad (6)$$

$$t = \frac{(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})(\mathbf{x}_i - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{u} - |\mathbf{u}|^2(\mathbf{x}_i - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{e}_i}{|\mathbf{e}_i|^2|\mathbf{u}|^2 - (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})} \quad (7)$$

となる。この s と t をそれぞれ s_d と t_d とすると、

$$|\mathbf{x}_i - \mathbf{p} + t_d\mathbf{e}_i - s_d\mathbf{u}| = d \quad (8)$$

と表せる。6 回の計測から得られる 6 つの式 (8) が独立であれば、その 6 つの式と式 (3) から $\mathbf{p} = (p \ q \ r)^T$ と $\mathbf{u} = (u \ v \ w)^T$ と d の 7 つの変数が求められる。つまり、最低 6 回の接触点位置とエッジ方向の計測を行えば、関節回転軸の位置と姿勢を決定する 6 つの変数を推定できる。なお、 s_d と t_d の分母が 0 になるのは、エッジの延長線と回転軸が平行になるときである。このとき $\mathbf{e}_i = \mathbf{u}$ であるので、式 (5) より、

$$s - t = \frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{e}_i}{|\mathbf{e}_i|^2} \quad (9)$$

となる。したがって、式 (8) において、

$$s_d = \frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{e}_i}{|\mathbf{e}_i|^2}, \quad t_d = 0 \quad (10)$$

として、回転軸の位置を推定する。

3 接触情報の計測

6 軸力覚センサと柔軟被覆をもつロボット指先と 3 次元測定器を用いて、接触点位置と物体のエッジ方向を計測する。6 軸力覚センサと柔軟被覆をもつロボット指先を用いると、接触部位での物体のエッジ方向を計測できる。これは、接触に伴う物体の柔軟被覆へのめり込みを利用して、従来の硬い指先では実現できなかった機能である。

3.1 接触点位置の計測

Bicchi の手法⁵⁾を適用すると、接触点で指先に加わる力とモーメント、および指先の幾何形状から、指先座標系での接触点位置を求めることができる。力とモーメントは、指先に装着された 6 軸力覚センサの出力として得られる。また、指先の幾何形状は既知であるとする。

3.2 エッジ方向の計測

接触部位での物体のエッジ方向を計測するために、村上らの手法⁴⁾を用いる。この手法では、6 軸力覚センサと柔軟被覆をもつロボット指先を用い、被覆への物体のめり込みに伴う、接触部位における力学的拘束の変化を利用してエッジ方向の計測を行う。指先中心に加わる力 \mathbf{f} とモーメント \mathbf{m} 、および指先の幾何形状から、接触点位置 \mathbf{r} を求めることができる⁵⁾。そして、力とモーメントの釣り合いを表す式 (11) から、指先に伝達されている回転摩擦モーメント \mathbf{q} が求まる。

$$\mathbf{m} = \mathbf{q} + \mathbf{r} \times \mathbf{f} \quad (11)$$

なお、指先座標系はセンサ座標系と一致しており、すべてのベクトルは指先座標系で表現されているとする。 \mathbf{q} から \mathbf{r} での接触法線方向成分を消去したベクトル \mathbf{h} は、式 (12) で定義できる。この \mathbf{h} は回転摩擦モーメントの接線成分を表すので、接触法線ベクトル \mathbf{n} とベクトル \mathbf{h} の外積として、接触点における物体のエッジ方向を求めることができる。

$$\mathbf{h} \equiv \mathbf{q} - (\mathbf{q} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} \quad (12)$$

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla S(\mathbf{r})}{\|\nabla S(\mathbf{r})\|} \quad (13)$$

ただし、 ∇ は微分演算子ナブラであり、 $S(\mathbf{r})$ は指先の幾何形状を表す関数である。

4 関節回転軸位置の推定実験

4.1 実験環境

実験装置を図 3 に、対象物体を図 4 に示す。2 つのリンクが 1 つの関節で連結された物体が台上にあり、物体の左柄は台に固定されている。物体の右柄に対して柔軟ロボット指先で触覚センシングを行って、回転軸位置を推定する。実験で用いた柔軟ロボット指先の内部構造と外観を図 5 に示す。指先はアルミニウム製の内殻とシリコン製の柔軟被覆で構成されており、内殻には 6 軸力覚センサ (ビーエル・NANO センサ, ビーエルオートテック (株)) が装着されている。柔軟ロボット指先は、3 次元座標を μm の分解能で計測できる高精度機械式 3 次元測定器に固定されている。3 次元測定器の座標系とロボット指座標系の相対位置姿勢は既知であり、指先で計測した接触点位置とエッジ方向は世界座標系で表現できる。

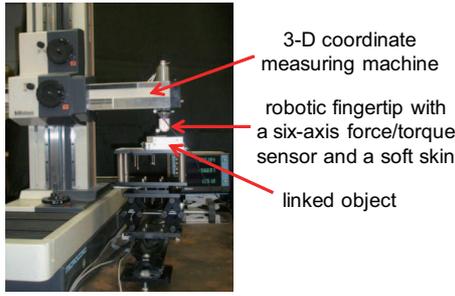


Fig.3 Experimental setup.

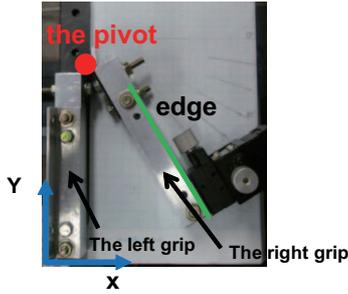


Fig.4 Object composed of two-links connected by one joint.

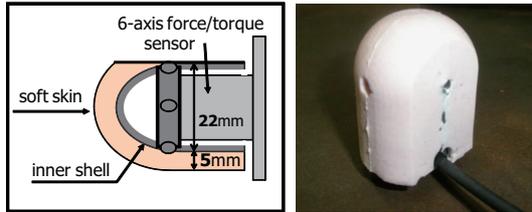


Fig.5 Inner structure of a robotic fingertip with a soft skin and its appearance.

4.2 実験のための定式化

4.2.1 提案手法

実験では、物体のリンクが xy 平面上のみを動く。この条件を 2 章の定式化に当てはめて計算式を簡略化する。

提案手法において $\mathbf{x}_i = (x_i \ y_i \ 0)^T$, $\mathbf{p} = (p \ q \ 0)^T$, $\mathbf{e}_i = (e_{xi} \ e_{yi} \ 0)^T$, $\mathbf{u} = (0 \ 0 \ 1)^T$ となるので, $s_d = 0$ であり, $t_d = -(\mathbf{x}_i - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{e}_i = -e_{xi}(x_i - p) - e_{yi}(y_i - q)$ である。これらを式 (8) に代入して整理すると,

$$\begin{vmatrix} (1 - e_{xi}^2)(x_i - p) - e_{xi}e_{yi}(y_i - q) \\ (1 - e_{yi}^2)(y_i - q) - e_{xi}e_{yi}(x_i - p) \end{vmatrix} = d \quad (14)$$

が得られる。 $e_{xi}^2 + e_{yi}^2 = 1$ であることから,

$$e_{yi}(x_i - p) - e_{xi}(y_i - q) = d \quad (15)$$

となる。これを p , q , d について整理すると,

$$(e_{yi} \ -e_{xi}) \begin{pmatrix} p \\ q \\ d \end{pmatrix} = e_{yi}x_i - e_{xi}y_i \quad (16)$$

となる。 N 回の計測における式 (16) から,

$$\begin{pmatrix} e_{y1} & -e_{x1} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{yN} & -e_{xN} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{y1}x_1 - e_{x1}y_1 \\ \vdots \\ e_{yN}x_N - e_{xN}y_N \end{pmatrix} \quad (17)$$

が得られる。この行列式を,

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (18)$$

と表し、疑似逆行列を用いて $\|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|$ を最小にする \mathbf{x} を求め、回転軸の位置 (p, q) とする (図 6)。

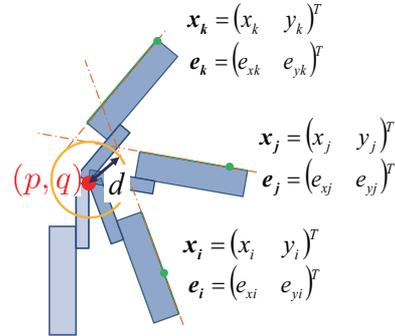


Fig.6 Proposed method: Estimation method of the position of a joint-axis (p, q) based on measurement of the locations of contact points (x_i, x_j, x_k) and the directions of edges of an object (e_i, e_j, e_k) .

4.2.2 比較のための単純な手法

提案手法と比較するために、関節が動く前後で、物体表面上を接触点が動かないと仮定した手法 (simple method) を示す。この場合、関節回転軸と接触点の距離が、関節が動く前後で一定になる。したがって、物体の関節が xy 平面上のみを動く場合は、運動前後の接触点を結ぶ線分の垂直二等分線上に関節回転軸が存在する (図 7)。複数の垂直二等分線を求め、それらの交点として回転軸の位置を推定する。前節と同様に、回転軸の位置を (p, q) とする。 i 回目の接触点 $(x_i \ y_i)$ と j 回目の接触点 $(x_j \ y_j)$ を結ぶ線分の垂直二等分線は,

$$y = -\frac{x_j - x_i}{y_j - y_i} \left(x - \frac{x_i + x_j}{2} \right) + \frac{y_i + y_j}{2}, \quad (y_i \neq y_j) \quad (19)$$

と表される。これを変形すると,

$$(x_j - x_i \ y_j - y_i) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{2} (x_j^2 - x_i^2 + y_j^2 - y_i^2) \quad (20)$$

となる。 ${}_N C_2$ 本の垂直二等分線の式から,

$$\begin{pmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_N - x_{N-1} & y_N - y_{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2) \\ \vdots \\ \frac{1}{2}(x_N^2 - x_{N-1}^2 + y_N^2 - y_{N-1}^2) \end{pmatrix} \quad (21)$$

が得られる。提案手法と同様に、この行列式を,

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (22)$$

と表し、疑似逆行列を用いて $\|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|$ を最小にする \mathbf{x} を求め、回転軸の位置 (p, q) とする。

4.3 実験手順

実験の手順を以下に示す。

1. 物体の右柄のエッジ上に、ロボット指先を接触させる。
2. ロボット指先に加わる力を増加させていき、接触点位置とエッジ方向を計測する。

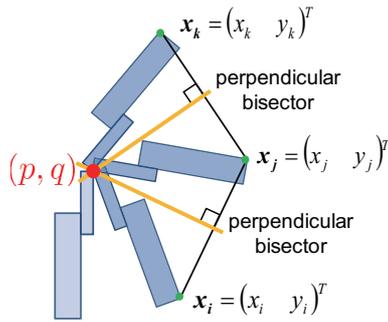


Fig.7 Simple method: Estimation method of the position of a joint-axis (p, q) based on measurement of the locations of contact points (x_i, x_j, x_k) .

3. ロボット指先を物体から離し、物体の右柄を反時計回りに30度だけ、手で回転させる。
 4. 1. から 3. を3回繰り返して計測を行い、その計測結果から物体の関節回転軸位置を推定する。
2. におけるエッジ方向の計測は、柔軟被覆へのエッジのめり込みを考慮して、指先力の大きさが $0.5[\text{kgf}]$ を超えた時点で行った。

実験では、エッジ上の接触点位置の移動が、回転軸位置の推定結果に与える影響を調査した。具体的には、3回の計測を行う際に、ロボット指先を3回とも同じ位置に接触させる場合と、接触させる位置を毎回変える場合とを比較した。前者が接触点位置が動かない場合、後者が接触点位置が動く場合に当たる。

4.4 実験結果

提案手法と simple method により、関節回転軸位置を推定した結果を表1に示す。回転軸位置 (p, q) の真値は、 $(17 \text{ mm}, 105 \text{ mm})$ である。接触点位置が動かない場合の結果を図8に、接触点位置が動く場合の結果を図9に示す。左図は提案手法の結果を表し、右図は simple method の結果を表す。なお、図の青い丸は関節回転軸位置の真値を、赤いバツは推定値を表している。また、緑の四角は計測した接触点位置を、緑の直線は計測したエッジ方向を表している。

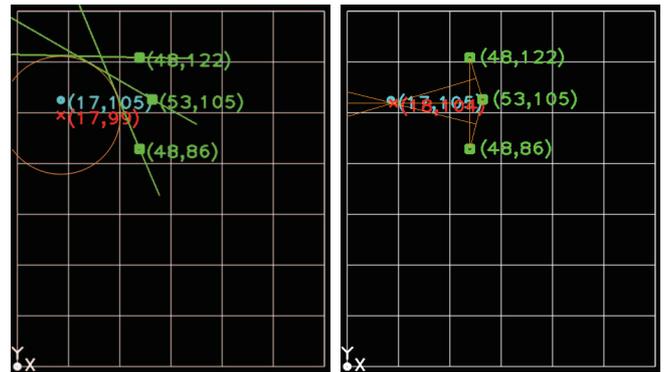
Table 1 The estimated position of the pivot of the object.

接触点位置	関節回転軸位置 (p, q) [mm]	
	提案手法	simple method
動かない	(17, 99)	(18, 104)
動く	(14, 99)	(20, 60)

提案手法では、接触点位置がエッジ上を動いた場合でも、回転軸位置の推定誤差を抑えることができています。一方、接触点位置が物体表面上を動かないと仮定している simple method では、接触点位置がエッジ上を動いた場合に、回転軸位置の推定誤差が大きくなることを確認できました。

5 結論

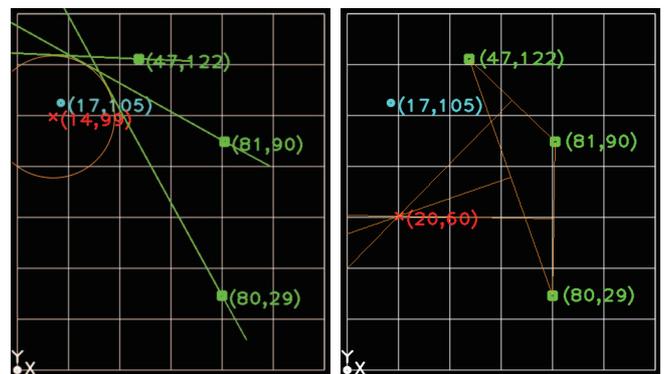
接触点位置と物体のエッジ方向の計測に基づき、物体の関節回転軸位置を推定する手法を提案した。実験では、エッジ上の接触点位置の移動が、回転軸位置の推定結果に与える影響を調査した。具体的には、3回の計測を行う際に、ロボット指先を3回とも同じ



proposed method

simple method

Fig.8 The estimated position of the pivot of the object in the case that the contact point does not move on the edge.



proposed method

simple method

Fig.9 The estimated position of the pivot of the object in the case that the contact point moves on the edge.

位置に接触させる場合と、接触させる位置を毎回変える場合とを比較した。その結果、提案手法では、接触点位置がエッジ上を動いた場合でも、推定誤差を抑えられることが分かった。一方、接触点位置が物体表面上を動かないと仮定した手法では、接触点位置が物体のエッジ上を動いた場合、回転軸位置の推定誤差が大きくなった。

文献

- [1] 金子真: “多指ハンド”, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 7, pp. 889–892, 1998.
- [2] A. Bicchi: “Hands for Dexterous Manipulation and Robust Grasping: A Difficult Road Toward Simplicity”, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 6, pp. 652–662, 2000.
- [3] D. Katz and O. Brock: “Manipulating Articulated Objects with Interactive Perception”, *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 272–277, 2008.
- [4] 村上副司, 長谷川勉: “柔軟指先による把握物体のエッジ方向の触覚計測”, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 240–247, 2006.
- [5] A. Bicchi: “Intrinsic Contact Sensing for Soft Fingers” *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 968–973, 1990.