

物体に対する拘束に基づくヒト手作業プリミティブの抽出*

松尾 一矢^{*1}, 村上 剛司^{*1}, 長谷川 勉^{*1}, 倉爪 亮^{*1}

Manipulation primitives based on constraints imposed by a human hand on a grasped object

Kazuya Matsuo^{*2}, Kouji Murakami^{*2}, Tsutomu Hasegawa^{*2} and Ryo Kurazume^{*2}

^{*2} Kyushu University

This paper proposes a method of directly measuring the static constraints imposed by a human hand on a grasped object. Based on the analysis of the demonstration data of the human grasp, the static constraints are represented as a combination of frictional force and normal force generated by the human hand. The static constraints are the most important property to be mapped to robotic hands in the programming-by-demonstration. Measured static constraints are to be generated to robotic hands with various shapes and mechanisms to establish the stable grasp. In the experiments, we have successfully measured the static constraints appeared in various different grasps used in the daily human life.

Key Words : static constraints, grasping force, Programming-by-Demonstration

1. 序 論

多関節多指ロボットハンド⁽¹⁾に人間の手作業を代行させるための動作プログラムを, 人間が直接に記述するのは困難である. そこで, 手作業時の人間の手指の連続動作からロボットハンドの動作プログラムを生成する手法 (Programming-by-Demonstration, 以下 PbD)⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾が提案されている.

PbD により人間の手作業をロボットハンドで再現する際には, 手指の関節角度軌跡や指先位置の情報がよくマッピングされる. また, それらを抽象化した表現である, 外見上の手のかたち⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾も用いられている. これらの方法の問題点は, 人間の手が把握物体に加えている内力の情報が明示的にマッピングされないことである. 人間の手と構造が異なるロボットハンドでは, 外観だけ人間の手に似せた指姿勢を取らせても, 物体に加える内力までは再現できない.

人間はその手作業において, 作業内容に応じて物体に加える内力を変化させている. 例えば, 物体を単に持ち運ぶ場合と道具として使用する場合とでは, 同じ形状の物体であっても加える内力は異なる. 内力を選択する戦略には, 人間の経験に基づく作業知識が含まれていると考えられるため, 内力の情報はロボットハ

ンドへマッピングすべきだといえる.

そこで, 人間の手が precision grasp を行う際に, 指先の接触点位置と接触点で指が物体に加える力を計測するデバイスが開発されている⁽¹²⁾. しかし, 人間が日常生活の中で手作業を行う際には, 指先以外の指腹部や掌部も物体と接触し, 手全体で物体に内力を加える. このため, 我々は人間の手掌部全体と把握物体との接触情報を計測可能なデバイスを開発した. 開発したデバイスと, 手指の関節角度を計測するデータグローブ, および人間の手の幾何モデルから, 手掌部全体で把握物体に加えている内力の情報を得ることができる.

本稿では, 日常生活の中で現れる把握を対象として, 人間の手が把握物体に加える内力を計測する. 人間は内力を加えることで, 物体の並進と回転の 6 自由度を拘束している. 次章からは, 加えられた内力により物体に生じる拘束について述べると共に, 内力の計測を通して, 外観が同じ把握でも物体に加える拘束が異なることを示す. また, 手作業内容に応じて拘束が異なることを利用し, 拘束を基準とした手作業プリミティブの抽出について述べる.

2. 人間の手が物体に対して加える拘束

マニピュレータが把握物体に対して加える拘束を表現するために, これまで多くの研究が行われてきた. それらの研究では, マニピュレータが接触点で物体に

* 原稿受付 平成 20 年 12 月 24 日

^{*1} 九州大学

Email: matsuo@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

加える力に着目して、拘束を表現している．具体的には、任意の方向の外力・外モーメントが物体に加わっても、それを打ち消す合力・合モーメントが各接触点での接触力により発生できる状態である force closure⁽¹³⁾ や、物体に加えることができる合力・合モーメント空間から把握の安定度を求めた grasp quality⁽¹⁴⁾ が論じられてきた．また、マニピュレータの静力学的特性を示す指標として、ヤコビ行列から関節角速度と指先速度との関係を示した可操作性楕円体⁽¹⁵⁾ や、静的なトルクと力の関係を表す操作力楕円体⁽¹⁶⁾ がある．

人間の指が把握物体に加える力は摩擦力と垂直抗力とに分解でき、それぞれ外力に対する振る舞いが以下のように異なる．

1. 摩擦力が働く方向は、最大静止摩擦力を越える外力が加わると滑りが生じるため、物体に過大な内力が加わらない．逆に考えると、物体に大きな内力を加えることができない．
2. 垂直抗力が働く方向は、人間の手の剛性が許す限りの大きさの内力を物体に加えることができる．ただし、過大な内力が加わり物体を壊してしまう可能性がある．

我々は、摩擦力が働く方向と垂直抗力が働く方向の組み合わせに着目して、拘束を表現する手法を提案する．以後は、物体に対して摩擦力が働く方向の自由度を摩擦自由度、垂直抗力が働く方向の自由度を垂直自由度と呼ぶ．これまでの研究では、各接触点で物体に加えられる垂直抗力と摩擦力をまとめて指先力として議論していた．なお、以降の議論では、物体は安定把持されているとする．

手作業を行うために物体を把握する際、摩擦自由度と垂直自由度の組み合わせがその作業を行うために適切になるように、人間は物体を把握する．例えば、鉛筆を把握して文字を書く作業では、過大な内力が加わって鉛筆の芯が折れるのを防ぐために、鉛筆の軸方向の自由度は摩擦自由度であるのが望ましい．一方、手と鉛筆の間に滑りが生じて、意図しない方向に鉛筆が動くのを防ぐために、それ以外の自由度は垂直自由度であるのが望ましい．文字を書く作業における、人間の鉛筆に対する把握を実際に観察すると、摩擦自由度と垂直自由度の組み合わせが上記の通りであることが確認できる．このように、人間の作業に対する経験に基づく知識は、その作業を人間が行う際の把握における摩擦自由度と垂直自由度の組み合わせとして表れる．したがって、PbDにおいてその組み合わせをマッピングすれば、人間の作業に対する知識をロボットハンドで再現できる．しかし従来の研究では、摩擦力に

よる拘束と垂直抗力による拘束の違いは特に議論されていない．

2本の指で球を挟む場合(図1)を例として、摩擦自由度と垂直自由度とについて具体的に説明する．簡単のため、ここでは並進の3自由度のみを考える．球に外力が加わると、2つの接触点で図のように摩擦力と垂直抗力が生じる．図の左右方向と前後方向の外力は、摩擦力により打ち消される．一方、図の上下方向の外力は、垂直抗力により打ち消される．したがって、前者の方向の2自由度が摩擦自由度となり、後者の方向の1自由度が垂直自由度となる．

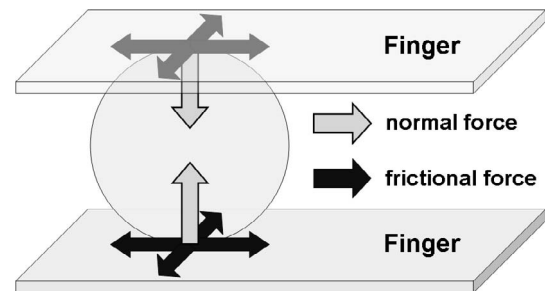


Fig. 1 Ball grasped by two fingers.

3. 垂直自由度数の導出の定式化

安定把持されている場合、物体の6つの自由度は、摩擦力と垂直抗力の少なくともどちらかが働いて拘束される．したがって、垂直抗力が働いている自由度を求めれば、摩擦力が働いている自由度も導出できる．そこで、並進3自由度と回転3自由度のそれぞれにおいて、任意の把握での垂直自由度の数を導出する手法を定式化する．

垂直自由度の数を導出する手法の定式化のために、以下の仮定を行う．人間の指と把握物体との接触は、摩擦あり点接触の集合とする．各接触点での接触法線は、接触点における手表面の形状により決定される．各接触点で物体に加えられる力は、摩擦力と垂直抗力とに分解できる．人間の指が物体に加える力は、全ての接触点での摩擦力と垂直抗力の合力である．各接触点での垂直抗力が働く方向から、垂直自由度の数を導出する．

3.1 並進自由度における垂直自由度の数の導出
各接触点での単位法線ベクトルから成る行列を W_P とする．

$$W_P = [n_1 \ n_2 \ \dots \ n_N] \in \mathcal{R}^{3 \times N} \quad (1)$$

上式において、 n_i は i 番目の接触点での単位法線ベクトルを表し、 N は接触点の総数を表す(図2)．なお、 n_i は人間の手に固定した座標系で表現される．

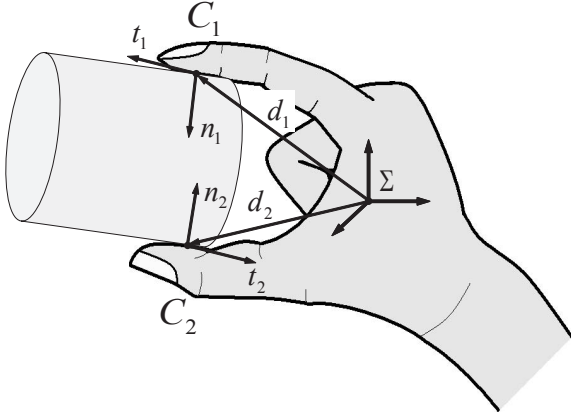


Fig. 2 Defined vectors to calculate the number of normal DOFs with respect to the translational DOF and the rotational DOF: n_i is a unit normal vector at a contact point, d_i is a position vector of a contact point, $t_i = d_i \times n_i$, and C_i is a contact point ($i = 1, 2$).

垂直抗力は単位法線ベクトルの方向に働くので、並進自由度における垂直自由度の数は W_P の階数 ($\text{rank}(W_P)$) と等しくなる．実際には計測誤差を考慮して、以下のように垂直自由度の数を導出する．まず、 W_P を特異値分解する．

$$W_P = U \Sigma V^T \quad \because \Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (2)$$

なお、 U は 3 次直交行列であり、 V は N 次直交行列である．次に、特異値 ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) を最大の特異値 σ_1 で正規化する．

$$\sigma'_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad \sigma'_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \quad (3)$$

$$1 \geq \sigma'_2 \geq \sigma'_3 \geq 0 \quad (4)$$

正規化した特異値 (σ'_2, σ'_3) に θ で閾値処理を行い、垂直自由度の数 ($\text{DOFs}(W_P)$) を求める．

$$\begin{aligned} \text{if}(\theta > \sigma'_2) &\Rightarrow \text{DOFs}(W_P) = 1 \\ \text{else if}(\theta > \sigma'_3) &\Rightarrow \text{DOFs}(W_P) = 2 \\ \text{else} &\text{DOFs}(W_P) = 3 \end{aligned} \quad (5)$$

摩擦力と垂直抗力の両方が働く方向に最大静止摩擦力を超える外力が加わった場合、垂直抗力が働いてその外力は打ち消される．よって、この方向の抗力の外力に対する振る舞いは、摩擦力の振る舞いよりも垂直抗力の振る舞いに近い．したがって、本定式化では、摩擦力と垂直抗力の両方が働く方向の自由度を垂直自由度としている．

3.2 回転自由度における垂直自由度の数の導出
回転自由度における垂直自由度の数を、以下のように導出する．各接触点での単位法線ベクトルによる回転モーメントから成る行列を W_R とする．

$$t_i = d_i \times n_i \quad (1 \leq i \leq N) \quad (6)$$

$$W_R = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_N] \in \mathcal{R}^{3 \times N} \quad (7)$$

上式において、 t_i は i 番目の接触点での単位法線ベクトルによる回転モーメントを表し、 d_i は i 番目の接触点の位置ベクトルを表す (図 2)．なお、 d_i は人間の手に固定した座標系で表現される．

回転自由度における垂直自由度の数は、 W_R の階数と等しくなる．よって、第 3.1 章の手法と同様にして、回転自由度における垂直自由度の数が導出できる．

3.3 人間の手の幾何モデル 提案手法を実装するために、人間の手の幾何モデルを作成した．作成した手の幾何モデルでは、指の形状は連結された直方体で近似し、掌の形状は多角柱で近似した．幾何モデルの指のリンク長、指の幅、および掌部の大きさは、被験者 (24 歳、男性) の手のサイズを計測することで決定した．

手の幾何モデルと把握物体とは、指を近似した直方体と掌を近似した多角柱の各面で接触する．手の幾何モデルに、手指の関節角度と手の幾何モデル上の接触点位置を入力すれば、各接触点での単位法線ベクトル (n_i) を計算できる．(1) 式より W_P が得られ、並進自由度における垂直自由度の数が求められる．

また、各接触点の位置ベクトル (d_i) から t_i を計算できる．(7) 式より W_R が得られ、回転自由度における垂直自由度の数が求められる．

4. 計測デバイス

手指の関節角度と手と物体の間の接触点位置を計測するために、データグローブと我々が開発したセンサグローブとをそれぞれ用いる．

4.1 関節角度情報 人間の手指の関節角度を計測するため、Cyber Glove (CG1802-R: Immersion 社) を用いる．その仕様を表 1 に示す．Cyber Glove では、手首部の 2ヶ所の関節角度と手指部の 16ヶ所の角度との計 18ヶ所の角度を計測できる．本研究では、手指部の 16 個の角度を関節角度情報として用いる．その 16 個の角度に対応する計測箇所を図 3 に示す．図において、左図の親指根元の関節のみ 2 自由度であり、他は全て 1 自由度である．Cyber Glove で計測する手指部の関節角度は、第 3.3 章で示した人間の手のモデルの関節角度と対応している．なお、DIP 関節 (distal

interpharangeal 関節)の角度は、PIP 関節 (proximal interpharangeal 関節)の角度の 3 分の 2 であると仮定した⁽¹⁷⁾。

Table 1 Specifications of Cyber Glove.

Number of Sensors	18
Sensor Resolution	0.5 degrees
Interface	RS-232
Maximum Data Rate	115.2 kbaud

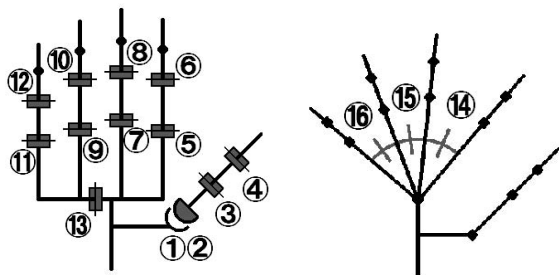


Fig. 3 Positions of the measured joints of the Cyber Glove.

4.2 接触情報 人間の手と把握対象物体との接触点位置を計測するため、手掌部全体に 160 個のスイッチ (EVQPLDA15 1.0: 松下電器産業) を配置したセンサグローブを開発した。その外観とスイッチの配置を図 4 に示す。図 4(b) の黒丸はスイッチの配置を表しており、指の輪郭外の点は指の側面に配置したスイッチを意味している。

使用したスイッチは機械式であり、オンかオフかの 2 値を出力する。スイッチの形状は一辺が 5.0mm の正方形であり、その厚さは 0.8mm である。スイッチの直径 3.2mm、厚さ 0.4mm の円形の押し込み部に 1.0[N] 以上の力が加わるとオン値を出力する。センサグローブにより、人間の手の 160ヶ所の接触情報が計測される。第 3.3 章で示した手のモデルで考えた場合の 160 個のスイッチの位置は、既知であるとする。

5. 実験

日常生活で人間が行う様々な手作業で、手が物体に対して加える拘束を調査するため、Cutkosky の把握分類⁽¹⁰⁾と鎌倉の把握分類⁽¹¹⁾の把握の型を対象として垂直自由度の数を求めた。把握の型とは、分類された外見上の手のかたちである。把握は手作業の基本動作であり、日常生活の手作業の多くがこれらの把握の型のシーケンスとして表現される。Cutkosky は、工場内の道具や金属部品に対する把握を、操作内容と操作対象物体形状とに基づいて 16 種類に分類している (図 5)。また、鎌倉は、リハビリを行う作業療法士の観点

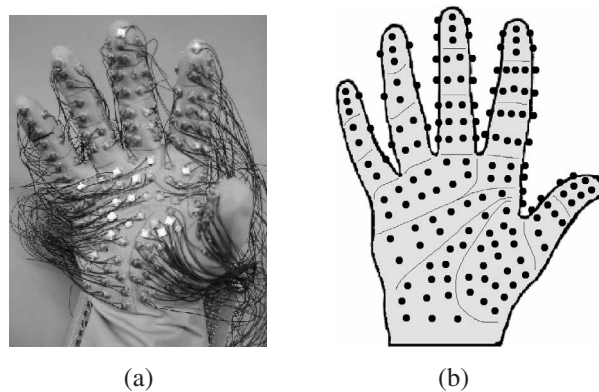


Fig. 4 (a) Photograph of the tactile sensing glove with 160 switches. (b) Placement of the 160 switches.

から、日常生活に現れる把握を 14 種類に分類している (図 6)。

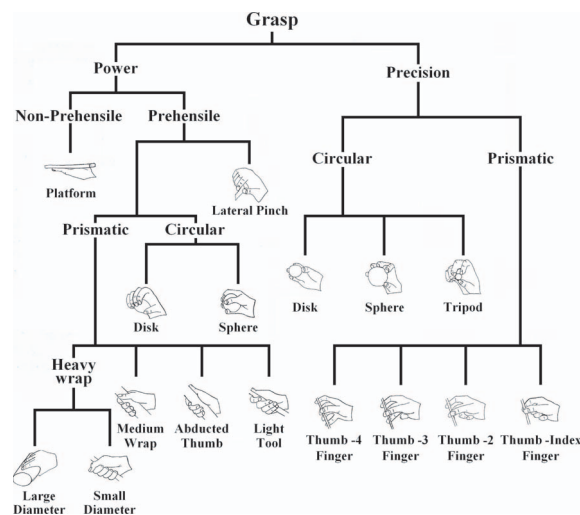


Fig. 5 Cutkosky's taxonomy of prehension⁽¹⁰⁾.

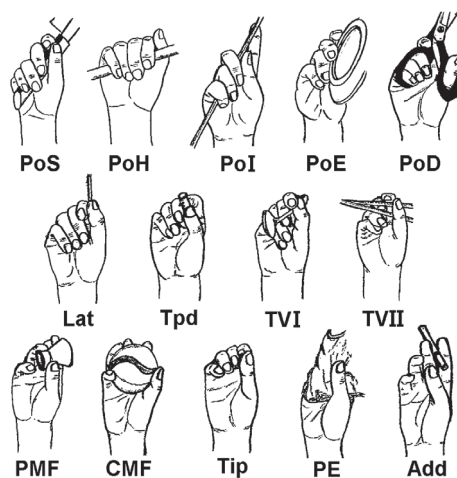


Fig. 6 Kamakura's taxonomy of prehension⁽¹¹⁾.

Cyber Glove の上に重ねてセンサグローブを装着した状態で Cutkosky と鎌倉の計 30 種類の把握の型を行い、各デバイスによる計測を通して関節角度情報と接触点位置情報とをそれぞれ取得した。把握対象には日常生活で使用する物体を用い、各把握ごとに 50 回ずつ計測を行うことで計 1500 組のデータを取得する。データの取得を行った被験者は、第 3.3 章で手のサイズを計測したのと同じ被験者（24 歳，男性）である。Cyber Glove とセンサグローブの厚みや配線のために、手を動かす際の接触部位や関節角度に制限があるが、30 種類の把握が全て達成できていることを目視で確認した（図 7，図 8）。

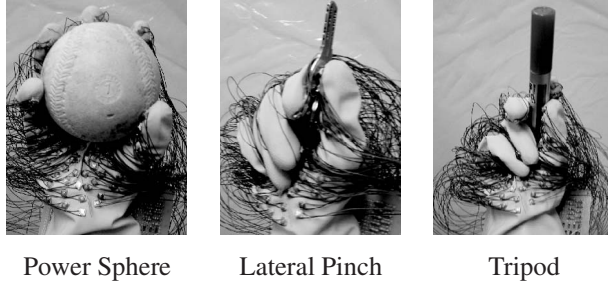


Fig. 7 Photographs of several Cutkosky's grasp types.

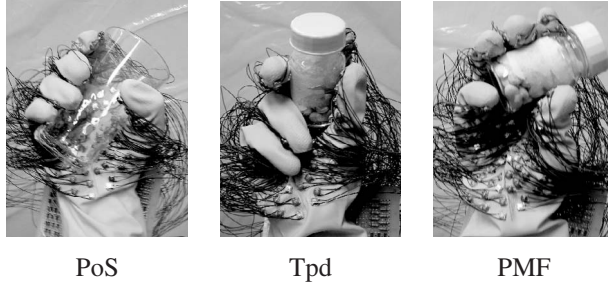


Fig. 8 Photographs of several Kamakura's grasp types.

得られたデータに第 3 章で示した手法を適用し、各把握の並進自由度と回転自由度とにおける垂直自由度の数をそれぞれ導出した。なお、閾値 (θ) は 0.3 とした。結果を表 2 と表 3 に示す。各把握の型について、並進と回転とのそれぞれにおいて最も導出されたデータが多かった垂直自由度の数を、網掛けしている。

この結果より、目視で同じ把握の型だと判定された把握であっても、その拘束が異なる場合があることが分かる。例えば、表 2 の Precision Sphere の型だと判定された把握の中で、全ての接触点が把握されている球の同一大円上にある把握は $DOFs(W_P) = 2$ となる（図 9(a)）。一方、球の同一大円上以外にも接触点がある把握は $DOFs(W_P) = 3$ となる（図 9(b)）。また、表 3 の PE の型だと判定された把握の中で、把握されている布が接触領域で平らである把握は $DOFs(W_P) = 1$ となる（図 10(a)）。一方、布が接触領域で平らでない把

Table 2 The number of normal DOFs in the translational DOFs ($DOFs(W_P)$) and the rotational DOFs ($DOFs(W_R)$) at the grasp types defined by Cutkosky.

Cutkosky's grasp types	$DOFs(W_P)$			$DOFs(W_R)$		
	3	2	1	3	2	1
Large Diameter	50	0	0	8	42	0
Small Diameter	50	0	0	50	0	0
Medium Wrap	38	12	0	33	11	6
Abducted Thumb	43	7	0	36	14	0
Light Tool	15	29	6	15	28	7
Power Sphere	50	0	0	24	26	0
Power Disk	50	0	0	50	0	0
Lateral Pinch	31	19	0	0	48	2
Platform	0	7	43	0	33	17
Precision Sphere	37	13	0	0	50	0
Precision Disk	29	21	0	0	50	0
Tripod	6	22	22	0	26	24
Thumb-4 Finger	50	0	0	0	50	0
Thumb-3 Finger	44	6	0	0	50	0
Thumb-2 Finger	50	0	0	7	43	0
Thumb-Index Finger	15	0	35	0	15	35

Table 3 The number of normal DOFs in the translational DOFs ($DOFs(W_P)$) and the rotational DOFs ($DOFs(W_R)$) at the grasp types defined by Kamakura.

Kamakura's grasp types	$DOFs(W_P)$			$DOFs(W_R)$		
	3	2	1	3	2	1
PoS	50	0	0	32	18	0
PoH	25	25	0	4	21	25
PoI	38	12	0	0	50	0
PoE	21	29	0	5	45	0
PoD	19	22	9	0	41	9
Lat	31	19	0	0	48	2
Tpd	44	6	0	0	50	0
TVI	22	28	0	0	47	3
TVII	12	38	0	10	39	1
PMF	0	48	2	2	46	2
CMF	50	0	0	24	26	0
Tip	6	22	22	0	26	24
PE	3	33	14	0	15	35
Add	0	0	50	0	0	50

握は $DOF_s(W_P) = 2$ or 3 となる (図 10(b)). このように, 実際には異なる拘束を物体に対して加えている把握でも, 既存の把握分類法では同じ把握の型だと判定される場合がある. つまり, 外見上の手のかたちである把握の型をマッピングしても, 人間の手が物体に対して加えている拘束をロボットハンドで再現できない可能性がある.

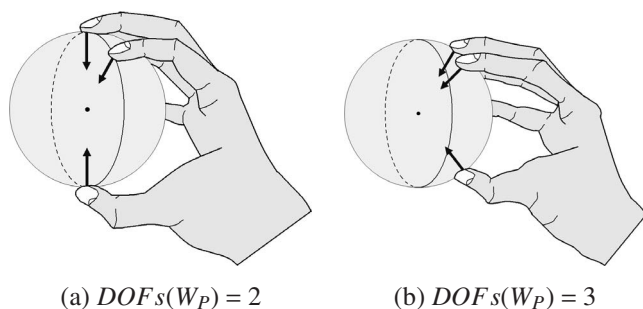


Fig. 9 Calculation of $DOF_s(W_P)$ for Precision Sphere.

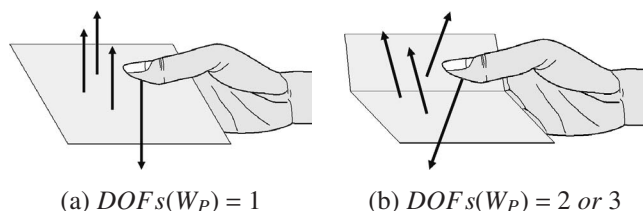


Fig. 10 Calculation of $DOF_s(W_P)$ for PE.

6. 結 論

人間の手が把握物体に加えている拘束を, 手指の関節角度と, 手と物体との接触を計測して得られる情報から導出する手法を提案した. 実験では, 手が把握物体に加える拘束を調査するため, 手作業の基本動作である把握の型を対象として, 垂直自由度の数を求めた. 実験結果から, 外見上の手のかたちが同じであっても, 手が物体に加える拘束が異なる場合があることを明らかにした.

今後の課題としては, 手が連続動作を行っている際に, 摩擦自由度と垂直自由度とがどのように使い分けられているかを調査する予定である. 物体を把握している手の外見上のかたちではなく, 手が物体に加える拘束が作業内容を表現していることを確認する. また, アナログ力センサを用いて, 手が物体に加えている力の大きさを測定することも考えている.

文 献

- (1) A. Bicchi, *Hands for Dexterous Manipulation and Robust Grasping: A Difficult Road Toward Simplicity*, "IEEE Transactions on Robotics and Automation", Vol. 16, No. 6, (2000), pp. 652–662.
- (2) K. Ikeuchi and T. Suehiro, *Toward an Assembly Plan from Observation Part I: Task Recognition With Polyhedral Objects*, "IEEE Transactions on Robotics and Automation", Vol. 10, No. 3, (1994), pp. 368–385.
- (3) Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue, *Learning by Watching: Extracting Reusable Task Knowledge from Visual Observation of Human Performance*, "IEEE Transactions on Robotics and Automation", Vol. 10, No. 6, (1994), pp. 799–822.
- (4) J. Aleotti and S. Caselli, *Grasp Recognition in Virtual Reality for Robot Pregrasp Planning by Demonstration*, "Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation", (2006), pp. 2801–2806.
- (5) L. Y. Chang, N. S. Pollard, T. M. Mitchell and E. P. Xing, *Feature selection for grasp recognition from optical markers*, "Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems", (2007), pp. 2944–2950.
- (6) S. Ekvall and D. Kragic, *Grasp Recognition for Programming by Demonstration*, "Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation", (2005), pp. 760–765.
- (7) K. Bernardin, K. Ogawara, K. Ikeuchi and R. Dillmann, *A Sensor Fusion Approach for Recognizing Continuous Human Grasping Sequences Using Hidden Markov Models*, "IEEE Transactions on Robotics", (2005), Vol. 21, No. 1, pp. 47–57.
- (8) M. Kondo, J. Ueda, Y. Matsumoto and T. Ogasawara, *Perception of Human Manipulation Based on Contact State Transition*, "Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems", (2004), pp. 100–105.
- (9) J. R. Napier, *The prehensile movements of the human hand*, "The Journal of Bone and Joint Surgery", 38B, 4, (1956), pp. 902–913.
- (10) M. R. Cutkosky, *On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks*, "IEEE Transactions on Robotics and Automation", (1989), Vol. 5, No. 3, pp. 269–279.
- (11) N. Kamakura et al., *Patterns of static prehension in normal hands*, "The American Journal of Occupational Therapy", (1980), Vol. 34, No. 7, pp. 437–445.
- (12) 永田, 齋藤, 末広, 人間の手作業分析のための把握情報入力装置の開発, "日本機械学会論文集 C 編", (2001), Vol. 067, No. 664, pp. 333–344.
- (13) F. Reuleaux, *The Kinematics of Machinery*, Macmillan, New York, (1876).
- (14) A. T. Miller and P. K. Allen, *Examples of 3D Grasp Quality Computations*, "Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation", (1999), pp. 1240–1246.
- (15) T. Yoshikawa, *Manipulability of robot mechanisms*, "The International Journal of Robotics Research", (1985), Vol. 4, No. 2, pp. 3–9.
- (16) 吉川, ロボット制御基礎論, コロナ社, (1988).
- (17) Y. Wu, J. Y. Lin, T. S. Huang, *Capturing Natural Hand Articulation*, "IEEE ICCV 2001", (2001), Vol. 1, pp. 426–432.