

# 速度情報を用いた接触状態の同定

毛利哲也 (岐阜大), 山田貴孝 (名工大), 岩井綾子 (名工大),  
三村宣治 (新潟大), 舟橋康行 (名工大)

## Identification of Contact Conditions from Velocity Information

Tetsuya MOURI\*, Takayoshi YAMADA\*\*, Ayako IWAI\*\*,  
Nobuharu MIMURA\*\*\*, Yasuyuki FUNAHASHI\*\*

\*: Gifu University, \*\*: Nagoya Institute of Technology, \*\*\*: Niigata University

**Abstract:** When a grasped object is in contact with external environment, it is required to identify contact conditions prior to performing assembly tasks. This paper discusses a method for identification of contact conditions from position and velocity information.

**Key Words:** Identification, Contact Condition, Active Sensing, Position and Velocity Information

### 1. はじめに

人間は、組立作業のように接触を伴う高度な作業を、手先の感覚から器用に遂行している。このような人間の技量をロボットで実現するためには、把持物体と外部環境との接触状態の認識 (Fig.1) とそれに応じた制御が必要である。このため、接触状態の同定や接触の遷移の検出に関する研究が行われている<sup>1)-3)</sup>。

文献 1),2)ではロボットの手首部に装備された6軸力覚センサにより得られる力覚情報 (力・モーメント) を用いた接触状態 (接触の種類, 接触点位置, 接触力) の同定問題を扱った。

手先の感覚から得られる情報には、この力覚情報のほかに位置・速度情報もあり、人間はこれらの情報を有効に利用していると考えられる。そこで本論文では、位置・速度情報のみを用いた場合の接触状態の同定問題を考察する。把持対象物と外部環境との接触点周りで発生する角速度が接触の種類により異なることに着目する。この拘束条件は力覚情報を用いた場合の接触点周りで発生するモーメントの拘束条件と双対な関係となっている。この拘束条件を用いることで4つの接触の種類を判別でき、接触点位置の同定が可能であることを示す。

### 2. 問題の定式化

#### 2.1. 記号

Fig.2のように、把持対象物が外部環境に接触して

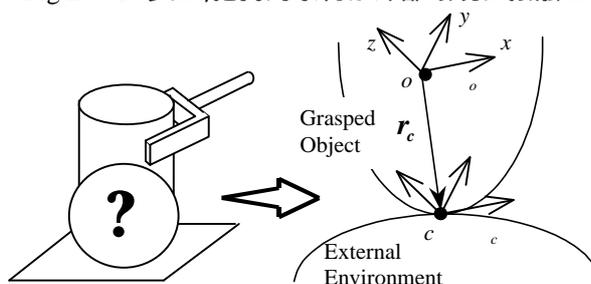


Fig. 1: Interaction between a grasped object and external environment

いる状況を考える。以下に本論文で用いる記号を示す。

$\Sigma_b$ : 基準座標系

$\Sigma_e$ : 外部環境に固定された接触点座標系

$\Sigma_o$ : センサ座標系 (対象物に相対的に固定)

$\Sigma_c$ : 対象物側に固定された接触点座標系。ただし、この座標系の姿勢は座標系  $\Sigma_o$  と同じである。

$\Sigma_{c'}$ : 対象物側に固定された接触点座標系。ただし、初期の姿勢は座標系  $\Sigma_e$  と同じであり、各接触状態の特徴を示す。

${}^o r_c$ : 接触点位置

ここで、 $\Sigma_b$ ,  $\Sigma_e$  は本論文で新たに定義した座標系である。

#### 2.2. 同次変換行列

本論文で用いる同次変換行列を以下に示す。

$${}^b T_o(t_i) = \begin{bmatrix} {}^b R_o(t_i) & {}^b p_{bo}(t_i) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

${}^b T_o$  は座標系  $\Sigma_b$  から座標系  $\Sigma_o$  への同次変換行列を示し、 ${}^b p_{bo}$ ,  ${}^b R_o$  はそれぞれ位置ベクトルと回転行列を示している。以下同様である。

$${}^b T_e = \begin{bmatrix} {}^b R_e & {}^b p_{be} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^e T_{c'}(t_i) = \begin{bmatrix} {}^e R_{c'}(t_i) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

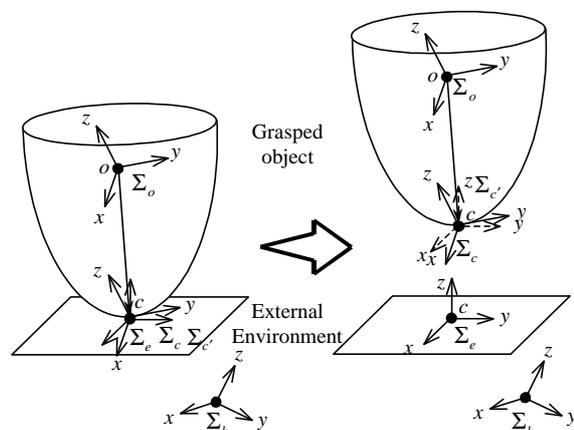


Fig.2: Coordinate frames

$${}^c T_c = \begin{bmatrix} {}^c R_c & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^c T_o = \begin{bmatrix} I_3 & -{}^o r_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

${}^b T_o(t_i)$ ,  ${}^e T_c(t_i)$  はセンシング動作により変化するため、時刻  $t_i$  の関数となっている。  $t_i$  はアクティブセンシングによって得られる  $i$  サンプル目時刻を表している。座標系  $\Sigma_e$ ,  $\Sigma_c$ ,  $\Sigma_o$  の原点は接触点  $c$  で一致しているため位置ベクトル  ${}^e p_{e,c}(t_i)$  と  ${}^c p_{c,c}$  は零となる。座標系  $\Sigma_c$  と  $\Sigma_o$  の姿勢は同じであるため回転行列  ${}^c R_o$  は  $3 \times 3$  の単位行列  $I_3$  となる。座標系  $\Sigma_c$  から  $\Sigma_o$  への位置ベクトル  ${}^c p_{c,o}$  は  ${}^c p_{c,o} = -{}^o r_c$  で与えられる。

### 2.3. 仮定

問題の簡単化のため以下の仮定を設ける。

(A1) 把持対象物はロボットハンドによって拘束され、操られる。

(A2) アクティブセンシングにおいて接触状態の変化はなく、接触点での滑りは発生しない。

(A3)  $\Sigma_b$  から  $\Sigma_o$  への位置ベクトル  ${}^b p_{b,o}(t_i)$ , 姿勢  ${}^b R_o(t_i)$  およびその時間微分  ${}^b \dot{p}_{b,o}(t_i)$ ,  ${}^b \dot{R}_o(t_i)$  は既知である。

(A4) 把持対象物と外部環境は点接触、ソフトフィンガ接触、線接触、面接触のいずれかで接触している。

仮定(A3)において、手先の位置と姿勢およびその速度はロボットの関節角、関節速度情報等により得られているとする。

### 2.4. 拘束条件

本論文で考える接触の種類は、仮定(A4)で述べた4種類である。これらの特徴づけるため、Fig.3で示すような外部環境に対する法線を  $z$  軸とする特殊な座標系  $\Sigma_e$  を設定する。ただし線接触の場合、接触線上に  $x$  軸が沿うように座標系を設定する。座標系  $\Sigma_e$

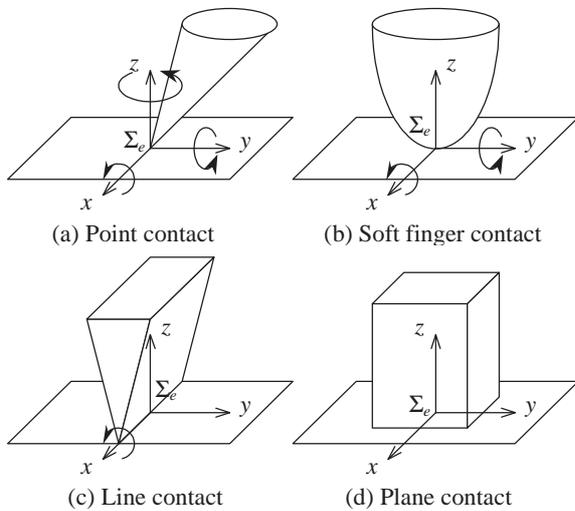


Fig. 3: Contact types

から見た接触点での角速度  $w = [w_x, w_y, w_z]^T$  は接触の種類に応じて以下の拘束条件を持つ。

$$\left. \begin{array}{l} \text{Point contact} \quad : \text{no constraint} \\ \text{Soft finger contact} : w_z = 0 \\ \text{Line contact} \quad : w_y = w_z = 0 \\ \text{Plane contact} \quad : w_x = w_y = w_z = 0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

なお、この角速度  $w$  の拘束条件は各接触の種類における接触モーメントの拘束条件と双対な関係となっている。つまり、ある軸周りにモーメントが発生している時はその軸周りに角速度が発生せず、モーメントが発生していないときはその軸周りに角速度が発生する。

## 3. 接触状態の同定

### 3.1. 基本式

$\Sigma_b$  から  $\Sigma_o$  への同次変換行列は

$${}^b T_o(t_i) = ({}^b T_e)({}^e T_c(t_i))({}^c T_o)({}^o T_o) \quad (4)$$

で表される。ここで  $\Sigma_e$  に対する  $\Sigma_c$  の相対速度を  $\Sigma_e$  で見た場合、

$${}^e \hat{V}_{e,c}(t_i) = \begin{bmatrix} {}^e \Omega_{e,c}(t_i) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = ({}^e \dot{T}_c(t_i))({}^e T_c(t_i))^{-1} \quad (5)$$

と表される<sup>4)</sup>。ただし、 ${}^e \Omega_{e,c}$  は  $\Sigma_e$  から見た、 $\Sigma_e$  に対する  $\Sigma_c$  の相対角速度  ${}^e w_{e,c}$  の歪対称行列：

$${}^e \Omega_{e,c} = \begin{bmatrix} 0 & -{}^e w_{e,c,y}(t_i) & {}^e w_{e,c,z}(t_i) \\ {}^e w_{e,c,y}(t_i) & 0 & -{}^e w_{e,c,x}(t_i) \\ -{}^e w_{e,c,z}(t_i) & {}^e w_{e,c,x}(t_i) & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

である。したがって、式(4)を時間微分すると、

$${}^b \dot{T}_o(t_i) = ({}^b \dot{T}_e)({}^e \hat{V}_{e,c}(t_i))({}^e T_c(t_i))({}^c \dot{T}_o)({}^o T_o) \quad (7)$$

と書ける。式(7)より次の2つの式を得る。

$${}^b \dot{R}_o(t_i) = ({}^b R_e)({}^e \Omega_{e,c}(t_i))({}^e R_c(t_i))({}^c R_o) \quad (8)$$

$${}^b \dot{p}_{b,o}(t_i) = -({}^b \dot{R}_o(t_i))({}^o r_c) \quad (9)$$

式(8),(9)を用いて接触の種類、接触点位置を同定する。

### 3.2. 接触の種類判別

本節では、式(8)を用いて接触の種類を判別する。

$\Sigma_e$  に対する  $\Sigma_c$  の相対角速度を  $\Sigma_b$  から見た歪対称行列  ${}^b \Omega_{e,c}(t_i)$  は、 ${}^e \Omega_{e,c}$  と次の関係にある。

$${}^b \Omega_{e,c}(t_i) = ({}^b R_e)({}^e \Omega_{e,c}(t_i))({}^b R_e)^{-1} \quad (10)$$

また、 $\Sigma_c$  と  $\Sigma_o$  の姿勢が同じであるため、

$${}^b R_c(t_i) = {}^b R_o(t_i) \quad (11)$$

である。式(8),(10),(11)より

$${}^b \Omega_{e,c}(t_i) = ({}^b \dot{R}_o(t_i))({}^b R_o(t_i))^{-1} \quad (12)$$

を得る。これを3次元ベクトルに書き直す。

$${}^b w_{e,c}(t_i) = \{ ({}^b \dot{R}_o(t_i))({}^b R_o(t_i))^{-1} \}^\vee \quad (13)$$

ただし、 $\vee$  は歪対称行列  $\bullet$  を3次元ベクトルに変換

することを意味する．各センシングごとで得られる ${}^b w_{e,c'}(t_i)$ を用いた行列 $M$ を定義する．

$$M := [{}^b w_{e,c'}(t_1) \quad {}^b w_{e,c'}(t_2) \quad \cdots \quad {}^b w_{e,c'}(t_k)] \in \mathfrak{R}^{3 \times k} \quad (14)$$

ここで

$${}^b w_{e,c'}(t_i) = ({}^b R_e)({}^e w_{e,c'}(t_i)) \quad (15)$$

と表すことができ， ${}^b R_e$ は正則であるため

$$\text{rank} M = \text{rank} [{}^e w_{e,c'}(t_1) \quad {}^e w_{e,c'}(t_2) \quad \cdots \quad {}^e w_{e,c'}(t_k)] \quad (16)$$

である． ${}^e w_{e,c'}(t_i)$ は式(3)の拘束条件を持つため，各接触の種類における行列 $M$ の階数は以下になる．

$$\text{rank} M = \begin{cases} 3 & \text{for Point Contact} \\ 2 & \text{for Soft finger contact} \\ 1 & \text{for Line contact} \\ 0 & \text{for Plane contact} \end{cases} \quad (17)$$

したがって，行列 $M$ の階数を調べれば接触の種類が判別できる．また，判別するためには3回以上のアクティブセンシングが必要である．

### 3.3. 接触法線・接触線の方向の推定

3.2節の方法で接触の種類がソフトフィンガ接触あるいは線接触と判別された場合，それぞれ接触法線，接触線の方向を求める必要がある．以下に各方向の導出方法を示す．

#### 3.3.1. ソフトフィンガ接触の法線方向の推定

ソフトフィンガ接触の場合，式(15)は

$${}^b w_{e,c'}(t_i) = (r_1)({}^e w_{e,c',x}(t_i)) + (r_2)({}^e w_{e,c',y}(t_i)) \quad (18)$$

となる．ここで，

$${}^b R_e = [r_1 \quad r_2 \quad r_3]$$

とされている．この場合，角速度の生じていない方向，つまり $r_1$ ， $r_2$ に直交する方向のベクトルが法線方向を示す．独立なベクトル ${}^b w_{e,c'}(t_i)$ ， ${}^b w_{e,c'}(t_j)$ を用いると次の式で接触法線方向 $n$ を求めることができる．

$$n = \frac{({}^b w_{e,c'}(t_i)) \times ({}^b w_{e,c'}(t_j))}{\|({}^b w_{e,c'}(t_i)) \times ({}^b w_{e,c'}(t_j))\|} \quad (19)$$

#### 3.3.2. 線接触の接触線方向の推定

線接触の場合，式(15)は

$${}^b w_{e,c'}(t_i) = (r_1)({}^e w_{e,c',x}(t_i)) \quad (20)$$

となる．この場合，角速度の生じている方向が接触線の方向 $l$ となる．接触線の方向は次の式により求められる．

$$l = \frac{{}^b w_{e,c'}(t_i)}{\|{}^b w_{e,c'}(t_i)\|} \quad (21)$$

### 3.4. 接触点位置の推定

本節では，式(9)を用いて接触点位置を推定する． ${}^b \dot{p}_{b,o}(t_i)$ ， ${}^b \dot{R}_o(t_i)$ は仮定(A3)より既知量であり， ${}^o r_c$

は未知量であるため

$$A_i := {}^b \dot{R}_o(t_i), \quad x := {}^o r_c, \quad b_i := -{}^b \dot{p}_{b,o}(t_i)$$

とおく．式(9)は次のように書ける．

$$A_i x = b_i \quad (22)$$

式(22)は未知数の数が3である．方程式の数は3であるが，行列 $A_i$ は歪対称行列 ${}^e \Omega_{e,c'}(t_i)$ を含んでおり，

$$\text{rank} A_i = \text{rank} {}^e \Omega_{e,c'}(t_i) \leq 2 \quad (23)$$

となるため正則ではない．1回のセンシングでは接触点位置 $x$ を求めることはできないため，アクティブセンシングを行い，次の式を得る．

$$Ax = b \quad (24)$$

ただし，

$$A := \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_k \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{3k \times 3}, \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{3k}$$

#### 3.4.1. 点接触・ソフトフィンガ接触の場合

点接触の場合には座標系 $\Sigma_e$ のすべての軸周りで，ソフトフィンガ接触の場合には $x$ ， $y$ 軸周りで自由に動くことができるため，

$$\text{rank} A = 3 \quad (25)$$

となる．したがって点接触，ソフトフィンガ接触の場合，式(24)を掃き出すことにより，接触点位置の推定値 $\hat{x}$ は一意に決まる．

#### 3.4.2. 線接触の場合

線接触の場合には座標系 $\Sigma_e$ の $x$ 軸周りに動きが限定されるため，

$$\text{rank} A = 2 \quad (26)$$

となる（詳細は付録参照）．式(24)を掃き出すと次の形の式を得る．

$$\begin{bmatrix} a_1^T \\ a_2^T \\ 0 \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

なお， $a_1, a_2 \in \mathfrak{R}^3$ ， $b_1, b_2 \in \mathfrak{R}$ は適当な値である．したがって，接触点位置の推定値 $\hat{x}$ は

$$\hat{x} = [a_1 \quad a_2] \begin{bmatrix} a_1^T a_1 & a_1^T a_2 \\ a_2^T a_1 & a_2^T a_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} + a(a_1 \times a_2) \quad (28)$$

により決まる．ここで， $a$ は任意のパラメータである．線接触の場合，接触線方向の自由度を持つ形となる．

#### 3.4.3. 面接触の場合

面接触の場合には ${}^e \Omega_{e,c'}(t_i) = 0$ となるため

$$\text{rank} A = 0 \quad (29)$$

である．したがって，接触点位置の推定値 $\hat{x}$ を求めることはできない．

### 3.5. 接触状態の同定アルゴリズム

3.3節，3.4節で述べた理論をもとに速度情報を用

いた接触状態の同定アルゴリズムを示す．

**Step 1:** アクティブセンシングを3回実行し, 位置情報 ${}^b p_{b,o}(t_i)$ ,  ${}^b R_o(t_i)$ , 速度情報 ${}^b \dot{p}_{b,o}(t_i)$ ,  ${}^b \dot{R}_o(t_i)$ を得る．

**Step 2:** 式(13)を用いて ${}^b w_{e,c'}(t_i)$ を計算する．

**Step 3:** 式(14)より行列 $M$ を生成する．

**Step 4:**  $M$ の階数により接触の種類を判別する．

**Step 5:** if 線接触

then 式(21)により接触線の方向を求め, 3.4.2節の方法で接触点位置 ${}^o r_c$ を求める．

**Step 6:** if ソフトフィンガ接触

then 式(19)により接触法線の方向を求め, 3.4.1節の方法で接触点位置 ${}^o r_c$ を求める．

**Step 7:** if 点接触

then 3.4.1節の方法で接触点位置 ${}^o r_c$ を求める．

このアルゴリズムを用いることで接触状態を同定できる．また面接触では, 未知パラメータの同定はできないが接触の種類は判別できる．

#### 4. おわりに

本論文では, 位置・速度情報のみを用いて接触状態を同定する問題を扱い, 次の結果を得た．

- (1) 手先の位置・速度情報をアクティブセンシングにより取得することで, 基準座標系から見た接触点での角速度が求められること, この角速度を並べた行列の階数から4つの接触の種類が判別できることを示した．また, 判別するためには3回以上のアクティブセンシングが必要であることを明らかにした．
- (2) ソフトフィンガ接触の場合には接触法線の方向を, 線接触の場合には接触線の方向を求めた．
- (3) 接触点の推定値は, 点接触およびソフトフィンガ接触の場合には一意に決定できること, 線接触の場合には接触線方向の自由度をもつ形で決まることを示した．

位置・速度情報のみを用いた場合, 接触力は同定できないが, 同定問題が線形方程式に帰着されること, アクティブセンシングの回数が少なく済むことなどの利点がある．

今後はノイズ等の誤差が含まれているときの同定法を検討する．また, 文献1)の力覚情報による手法と融合させることで, それぞれの特徴を生かした同定法を検討する必要がある．

付録

線接触の場合,

$${}^e R_{c'}(t_i) = R_x(\mathbf{q}_i) \quad (30)$$

と書くことができる．ただし,

$$R_x(\bullet) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\bullet) & -\sin(\bullet) \\ 0 & \sin(\bullet) & \cos(\bullet) \end{bmatrix}$$

であり,  $\mathbf{q}_i$ は時刻 $t_i$ においてセンシングされた,  $\Sigma_e$ に対する $\Sigma_{c'}$ の相対回転角を示す．したがって, 式(8)は

$$A_i = {}^e w_{e,c'}(t_i) ({}^b R_e) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \mathbf{q}_i & -\cos \mathbf{q}_i \\ 0 & \cos \mathbf{q}_i & -\sin \mathbf{q}_i \end{bmatrix} ({}^{c'} R_c) \quad (31)$$

となる．式(21)より接触線の方向 $r_1$ が既知となるため,  ${}^b \hat{R}_e$ の推定値は

$${}^b \hat{R}_e = [r_1, r_2 \cos f + r_3 \sin f, -r_2 \sin f + r_3 \cos f] = {}^b R_e R_x(f) \quad (32)$$

と書ける．ただし,  $f$ は任意のパラメータである．これより,

$$({}^b \hat{R}_e)^T (A_i) = {}^e w_{e,c'}(t_i) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\mathbf{q}_i - f) & -\cos(\mathbf{q}_i - f) \\ 0 & \cos(\mathbf{q}_i - f) & -\sin(\mathbf{q}_i - f) \end{bmatrix} ({}^{c'} R_c) = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{A}_i \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$({}^b \hat{R}_e)^T (b_i) = -({}^b \hat{R}_e)^T (A_i) ({}^c r_o^*) = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{b}_i \end{bmatrix} \quad (34)$$

を得る．ここで, 行列 $\bar{A}_i \in \mathcal{R}^{2 \times 3}$ とベクトル $\bar{b}_i \in \mathcal{R}^2$ は適当な値である．式(33)において時刻 $t_i$ と $t_j$ のデータは

$$({}^b \hat{R}_e)^T (A_i) = \Theta_{i,j} ({}^b \hat{R}_e)^T (A_j) \quad (35)$$

と表すことができ, 従属である．ただし,

$$\Theta_{i,j} = \frac{{}^e w_{e,c'}(t_i)}{{}^e w_{e,c'}(t_j)} R_x(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) \quad (36)$$

である．

以上から, 式(24)を掃き出すと式(27)の形になる．

#### 参考文献

- 1) T. Mouri, T. Yamada, N. Mimura, Y. Funahashi: Identification of Contact Conditions from Contaminated Data of Contact Moment, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 1. p. 585-591 (1999).
- 2) 山田, 毛利, 岩井, 三村, 舟橋: 力覚情報を用いたロボット接触状態の同定 - 7自由度ロボットアームを用いた実験による検証 -, SICE SI2001 講演論文集, p273-274 (2001).
- 3) 菊植, 吉川: インピーダンス推定による拘束状態の識別, 第19回日本ロボット学会学術講演会, p.1205-1206 (2001)
- 4) R. M. Murray, Z. Li, S. S. Sastry: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press, p19-69 (1994)