

力覚情報を用いたロボットの接触状態の同定 —接触状態の遷移判定—

山田貴孝 (名工大) 毛利哲也 (岐阜大) ○下坂京平 (名工大),
三村宣治 (新潟大) 舟橋康行 (中京大)

Identification of Contact Conditions from Contact Force and Moment —Detection of Transition of Contact Conditions—

Takayoshi YAMADA, Nagoya Institute of Technology, Tetsuya MOURI, Gifu University,
*Kyouhei SHIMOSAKA, Nagoya Institute of Technology,
Nobuharu MIMURA, Niigata University, Yasuyuki FUNAHASHI, Chukyo University

Abstract — This paper discusses detection of transition of contact conditions. The contact conditions mean contact position, contact wrench, and contact type. The previous paper treated the static case where the position and the type did not change. In practical tasks, there sometimes exists transition of the type from point contact type to line or plane contact type, and vice versa. If the contact transition can be detected, dexterous manipulation will be achieved. This paper considers the case where the position and the type change in active sensing. Effectiveness of our proposed method is verified by using numerical examples.

Key Words: Contact Conditions, Active Sensing, Transition, Contact Wrench, Robot

1. はじめに

様々な場面においてロボットの活用が期待され、研究・開発が行われている。ロボットが人間と同等の手先の器用さを実現することが必要不可欠となる。

例えば、箱を台の上に置くという作業を考えてみる。人間は目隠しなどで視覚情報を遮断された状態でも、手先の感覚のみで接触状態を点接触から線接触、面接触へと変化させ、正確に作業を進めることができる。このような接触を伴う作業をロボットで行う際、単に力を制御するだけではなく接触状態(接触点位置、接触力、接触の種類)を推定し、その状態に応じた制御が必要となる。

三村ら[1]は力覚情報を用いて接触状態を同定する手法を提案した。毛利ら[2]はデータ数が無限個の場合についてノイズを含む力覚情報から接触状態が同定できることを理論的に示した。そして、有限個のデータから二段階で接触状態を同定するアルゴリズムも提案した。これらは、接触の種類が変化しない静的な場合を扱っていた。実際の作業では、点から線、面へと接触の種類が遷移する場合が生じる。

そこで、本論文では接触状態が遷移する場合について考察する。用いるデータを最近のものに限定し、重みを加えることで接触の遷移を判定する。そして、数値例で本手法の有効性を検証する。

2. 問題の設定

Fig.1 に示すように未知形状の対象物をロボットハンドで把握し、対象物が外部環境に接触している状態を考える。そして、力覚情報に基づいて接触状態の遷移を検出する。紙数の都合により、同定に関する基礎理論の詳細は文献[2]を参照されたい。

2.1 記号

Fig.1 に示す記号を定義する。

c : 把握対象物と外部環境との間の接触点

o : ロボットハンドに装備された力覚センサ原点

Σ_o : 点 o に固定されたセンサ座標系

Σ_c : 点 c に固定された接触点座標系であり、姿勢は Σ_o と同じとする。

f_o, n_o : Σ_o から見た計測力・モーメント

f_c, n_c : Σ_c から見た接触力・モーメント

r_c : Σ_o から見た点 c の位置ベクトル

対象物はロボットハンドにより完全に拘束され、自由に操ることができる。 f_o, n_o は既知物理量、 r_c, f_c, n_c は同定すべき未知物理量である。

本論文では、対象物と外部環境との接触をMason[3]により定義された四つの接触の種類(Fig.2)に限定する。すなわち、摩擦の有る点接触、ソフトフィンガ接触、線接触、または面接触である。Fig.2 の m は Mason により定義された接触自由度である。

2.2 接触モーメントの拘束条件

Fig.2 に示す四つの接触の種類を最もよく表す座標系を Σ_c とする。 Σ_c の原点は接触点 c に一致し、接触面の法線方向に z' 軸を、線接触の場合には、接触線上に x' 軸をとる。 Σ_c から見た接触モーメント n'_c の共分散行列を

$$\text{Cov}[n'_c] := \text{diag}[\sigma_{nx}^2, \sigma_{ny}^2, \sigma_{nz}^2] \quad (1)$$

とする。接触モーメントの標準偏差 $\sigma_{nx}, \sigma_{ny}, \sigma_{nz}$ は

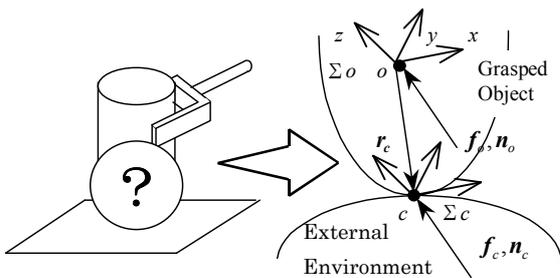


Fig.1 Interaction between grasped object and external environment

接触の種類に応じて次のような拘束を受ける.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Point contact} : \sigma_{nx} = \sigma_{ny} = \sigma_{nz} = 0 \\ \text{Soft finger contact} : \sigma_{nx} = \sigma_{ny} = 0 \\ \text{Line contact} : \sigma_{nx} = 0 \\ \text{Plane contact} : \text{no constraints} \end{array} \right\} \quad (2)$$

2.3 力の釣り合い

力とモーメントの釣り合い方程式は, それぞれ

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{f}_o = \mathbf{f}_c \\ \mathbf{n}_o = \mathbf{r}_c \times \mathbf{f}_c + \mathbf{n}_c \end{array} \right\} \quad (3)$$

となる. 接触力 \mathbf{f}_c を消去すると次の式を得る.

$$\mathbf{n}_o = [-\mathbf{f}_o \times] \mathbf{r}_c + \mathbf{n}_c \quad (4)$$

接触モーメント \mathbf{n}_c は回転行列を ${}^oR_{c'}$ とすると

$$\mathbf{n}_c = {}^oR_{c'} \mathbf{n}'_c \quad (5)$$

と与えられる. 式(4), (5)は, 方程式の数が未知パラメータの数より少ない. そこで, アクティブセンシングを用いて $\mathbf{f}_o, \mathbf{n}_o$ を変化させる. 未知量, 既知量を明確にするため $\mathbf{A} := [-\mathbf{f}_o \times], \mathbf{b} := \mathbf{n}_o, \mathbf{x} := \mathbf{r}_c$ とおき, 偏差力を考慮すると次の関係式が得られる.

$$\bar{\mathbf{b}}_i = \bar{\mathbf{A}}_i \mathbf{x} + \bar{\mathbf{n}}_{ci} \quad (6)$$

ただし, 添字 i は i 回目のセンシングデータとする.

3. 接触状態の遷移の検出

接触の種類が遷移しない場合, 古いデータと新しいデータを平等に扱うことができる. しかし, 接触の種類が遷移する場合, 古いデータは現在の接触の種類を反映していない可能性がある.

3.1 接触点位置

接触の遷移を検出するために, 最近のデータのみを用い, さらに重みを付加する. そこで, 次の評価関数を設定する.

$$J(k, n) := \frac{1}{w_a} \sum_{i=0}^{n-1} w_i \|\bar{\mathbf{b}}_{k-i} - \bar{\mathbf{A}}_{k-i} \mathbf{x}\|^2 \quad (7)$$

ただし, k は現在のサンプル番号, n は同定に用いるサンプル数, w_i は重み係数, w_a は重みの総和である.

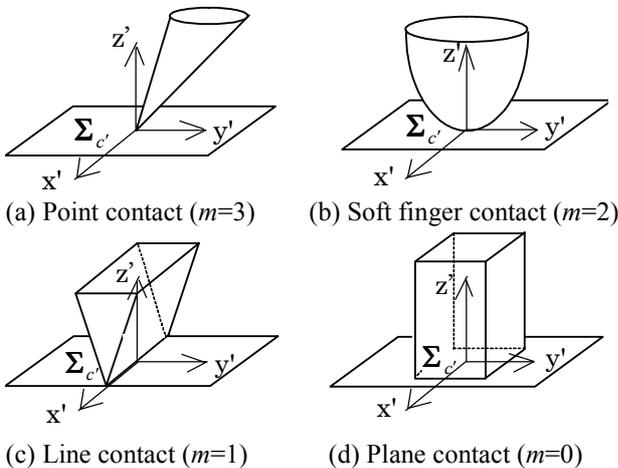


Fig.2 Contact types

$$w_a := \sum_{i=0}^{n-1} w_i \quad (8)$$

評価関数 $J(k, n)$ を最小にするパラメータ \mathbf{x} を接触点位置の推定値とする.

$$\hat{\mathbf{x}}(k, n) := \left(\frac{1}{w_a} \sum_{i=0}^{n-1} w_i \bar{\mathbf{A}}_{k-i}^T \bar{\mathbf{A}}_{k-i} \right)^{-1} \left(\frac{1}{w_a} \sum_{i=0}^{n-1} w_i \bar{\mathbf{A}}_{k-i}^T \bar{\mathbf{b}}_{k-i} \right) \quad (9)$$

3.2 接触の種類

式(7)は接触の種類を点接触と仮定し, 接触点位置を一点に集中させて推定している. その残余はその位置で生じる接触モーメントに相当し, 推定値を次の式で求める.

$$\hat{\mathbf{v}}_i(k, n) := \bar{\mathbf{b}}_i - \bar{\mathbf{A}}_i \hat{\mathbf{x}}(k, n) \quad (10)$$

接触モーメントには式(2)の特徴があるため, 次の行列を設定する.

$$\mathbf{N}(k, n) := \frac{1}{w_a} \sum_{i=0}^{n-1} w_i \hat{\mathbf{v}}_{k-i}(k, n) \hat{\mathbf{v}}_{k-i}(k, n)^T \in \mathcal{R}^{3 \times 3} \quad (11)$$

式(11)の対称行列を固有値分解する.

$$\mathbf{N}(k, n) = \mathbf{R}(k, n) \text{diag}[\mu_1(k, n), \mu_2(k, n), \mu_3(k, n)] \mathbf{R}(k, n)^T$$

$$\mu_1 \geq \mu_2 \geq \mu_3 \geq 0 \quad (12)$$

μ_1, μ_2, μ_3 は固有値, $\mathbf{R}(k, n)$ は対応する固有ベクトルから構成される直交行列であり, 姿勢 ${}^oR_{c'}$ の推定値である. 予め設定されている閾値 θ を越えた固有値の個数により接触の種類を判別する.

$$m(k, n) = \begin{cases} 3: & \theta > \mu_1(k, n) \\ 2: & \mu_1(k, n) \geq \theta > \mu_2(k, n) \\ 1: & \mu_2(k, n) \geq \theta > \mu_3(k, n) \\ 0: & \mu_3(k, n) \geq \theta \end{cases} \quad (13)$$

$m(k, n) = 2$ と判別された場合は $\mathbf{R}(k, n)$ の第 1 列が法線方向を, $m(k, n) = 1$ の場合は第 3 列が接触線方向を表す.

文献[2]は, $k = n$ および $r_i = 1$ の場合に相当する.

3.3 接触の遷移の判定

データ数が少ないと, まれに誤った接触の種類に判別される場合がある. そこで, 数回連続して同じ種類と判別された場合に, その接触の種類に遷移したと判定する.

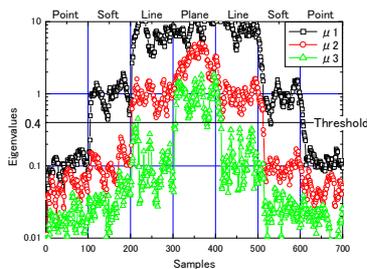
$$m_{rev}(k, n) = m(k, n)$$

$$\text{if } m(k, n) = m(k-1, n) = \dots = m(k-n_i+1, n) \quad (14)$$

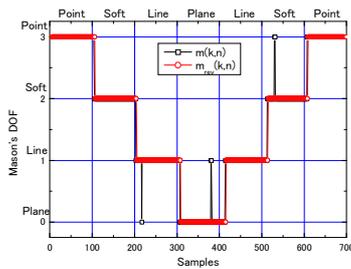
3.4 接触の種類によるパラメータの再同定

3.3 節までの手法で接触の種類がソフトフィンガ接触もしくは線接触と判定された場合, より正確なパラメータに修正するため, 各接触の種類での評価関数を式(15)とおき直し, これを最小とするパラメータを再同定する[2].

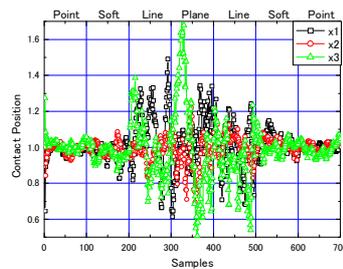
$$J_{type}(k, n) := \frac{1}{w_a} \sum_{i=0}^{n-1} w_i \|\bar{\mathbf{b}}_{k-i} - (\bar{\mathbf{A}}_{k-i} \mathbf{x} + \bar{\mathbf{n}}_{c,k-i})\|^2 \quad (15)$$



(a) Eigenvalues



(b) Contact Type



(c) Contact Position (Linear Estimates)

Fig.3 Numerical Example 1

4. 数値例

数値例により、本手法の有効性を検証する。

4.1 数値例 1

接触状態の遷移の判定が可能か否かを評価するため、接触点位置、方向は変化せず、接触の種類のみが変わる場合を検証する。なお本数値例ではノイズのバイアス補償[4]を行わない。

<数値例の設定>

• 接触点位置: $\mathbf{x} = [1,1,1]^T$

• 姿勢: ${}^oR_c = \text{diag}[1,-1,-1]$

• 接触力・モーメント:

$$\text{Cov}[\mathbf{f}_c] = \text{diag}[1.00^2, 2.00^2, 3.00^2]^T$$

$$\text{Cov}[\mathbf{n}_c] = \text{diag}[2.00^2, 3.00^2, 1.00^2]^T$$

• 計測センサノイズの共分散:

$$\text{Cov}[\boldsymbol{\varepsilon}_{f_o}] = \text{diag}[0.10^2, 0.15^2, 0.20^2]^T$$

$$\text{Cov}[\boldsymbol{\varepsilon}_{n_o}] = \text{diag}[0.10^2, 0.15^2, 0.20^2]^T$$

<接触の種類>

100 サンプル毎に次のように遷移する。このような遷移は現実には生じないが、効果を確認するためである。

点→ソフト→線→面→線→ソフト→点

<同定のための設定>

• 推定用データ数: $n = 15$

• 閾値: $\theta = 0.4$

• 重み係数: $w_i = 0.96^i$

• 遷移の連続判定: $n_t = 3$

Fig.3(a)に固有値, (b)に接触の種類, (c)に接触点位置を示す。Fig.3(a)より、接触状態の遷移が検出されている。Fig.3(b)において $k=220, 380, 530$ 付近で誤判

別されているが、遷移の連続判定により取り除かれている。しかし、 $n_t - 1$ サンプルだけ $m(k,n)$ と比べ $m_{rev}(k,n)$ が遅れることは否めない。 n を大きくすれば、誤判別は少なくなり n_t を小さくできるが、遷移の検出は遅くなる。逆に n を小さくすれば、遷移をより早く検出できるが、誤判別も多くなり n_t を大きくする必要がある。点から面へと接触自由度 m が小さくなる場合は実際の遷移から 2~6 サンプル遅れるのに対し、 m が大きくなる場合には 6~13 サンプルと遅れが大きくなる。これは、注目する固有値がおよそ 0.1~1.0 の間を上下しているところに、閾値を 0.4 と設定したため m が大きくなる場合に閾値までの固有値の下降が遅いことが起因したと考えられる。Fig.3(c)より、接触点位置は点接触とソフトフィンガ接触において真値(1,1,1)に近い値が推定されている。ただし、線接触は接触線上の自由度が含まれ、面接触では接触点位置が決まらないため、 $k=200 \sim 500$ の間で大きく振れている。

4.2 数値例 2

Fig.4 に示す箱のような形状を考える。底面が外部環境と接触し、接触点位置、接触の種類が 100 サンプル毎に Fig.5 の赤色部のように遷移する場合を考える。Table 1 には各接触の接触点位置を示す。 s, t は接触点位置の自由度を表すパラメタであり、線接触の場合には接触線方向を表す。

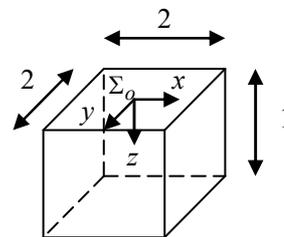


Fig.4 Shape of the grasped object

Table 1 Contact position between the grasped object and external environment

Type	Contact Position
(a) Point	$(-1,1,1)$
(b) Line	$(0,1,1)+s(1,0,0)$
(c) Plane	$(0,0,1)+s(1,0,0)+t(0,1,0)$
(d) Line	$(1,0,1)+t(0,1,0)$
(e) Point	$(1,-1,1)$

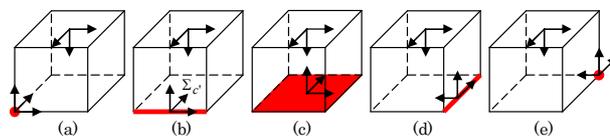


Fig.5 Transition of the contact types

接触力・モーメント，計測センサノイズ，同定のための設定は数値例1と同じ条件で行う．この数値例は，箱の姿勢が大きく変化せず，箱の質量等の力覚データへの影響が小さい場合に相当する．

Fig.6(a)に固有値，(b)に接触の種類，(c)に接触点位置，(d)に再同定後の接触点位置，(e)に接触線の方向，(f)に再同定後の接触線の方向を示す．Fig.6(a)より，接触状態の遷移が検出されている．遷移の連続判定により，Fig.6(b)の $k=200, 230, 270, 380$ 付近の誤判別が取り除かれている．Fig.6(c), (d)より，接触点位置は $(-1,1,1)$ から $(1,-1,1)$ へ遷移しているのが確認でき，線接触では種類別の再同定の結果，真値により近い値に修正されている．ただし， $k=100\sim 200$ の x_1 と $k=300\sim 400$ の x_2 はそれぞれ接触線上の自由度 s, t に対応し，一意に決まらず大きく振れている．

Fig.6(e), (f)より，接触線の単位方向ベクトルはFig.5(b)の状態では $(1,0,0)$ の辺りに，Fig.5(d)の状態では $(0,1,0)$ の辺りに推定されており，種類別の再同定でより近い値に修正されている．角度誤差で表すと約 $\pm 20[\text{deg}]$ から約 $\pm 10[\text{deg}]$ に修正されている．角度誤差の要因として，遷移の検出にノイズを含むモーメントを利用していること，少ないデータ数で同定していることが考えられる．データ数 n を多くすれば，より正確に接触線方向を推定できるが，遷移の検出は遅くなる．上記の角度誤差を $\phi_e = \pm 10[\text{deg}]$ とすると，接触線の方向は

$$\cos \phi_e = 0.98 \sim 1$$

$$\sin \phi_e = \pm 0.17$$

の辺りに分布する．このことがFig.6(f)で確認できる．

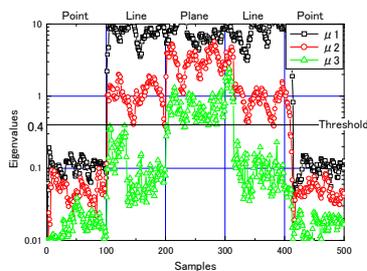
5. おわりに

接触状態が遷移する場合について，その判定法を考察した．データの使用範囲を限定し，さらに最新データの重みを大きくすることで，より早く遷移判定することを考えた．数値例で本手法が有効であることを確認した．そして，次の知見が得られた．接触の種類が点から面へと遷移する場合には，比較的早く検出できる．しかし，面から点へと遷移する場合には，固有値の下降が遅く，検出に遅れが生じる．今後の課題としては，遷移の判定を早くするために閾値の複数設定や能動的な調整，実験による有効性の検証などがあげられる．

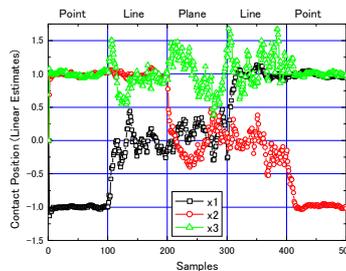
最後に，発端となる研究を行い多くの議論を交わした名古屋工業大学大学院学生 川瀬康裕氏（現：(株)デンソー），川口喜生氏（現：オークマ(株)）に感謝の意を表す．

参考文献

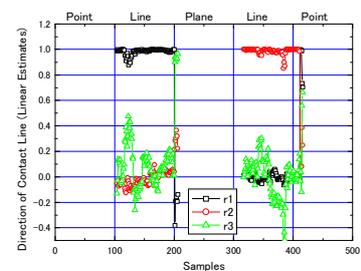
- [1] 三村宣治, 舟橋康行: “アクティブセンシングによる接触パラメータ同定”, 日本機械学会論文集, Vol.60-579-C, pp. 3816-3821, 1994.
- [2] 毛利哲也, 山田貴孝, 三村宣治, 舟橋康行: “接触モーメントのノイズを考慮した接触状態の同定法”, 日本機械学会論文集, Vol.66-648-C, pp. 2685-2692, 2000.
- [3] M. T. Mason, J. K. Salisbury: "Robot Hands and the Mechanics of Manipulation", MIT press, 1985.
- [4] T. Mouri, T. Yamada, A. Iwai, N. Mimura, Y. Funahashi: "Identification of Contact Conditions from Contaminated Data of Contact Force and Moment", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 597-565, 2001.



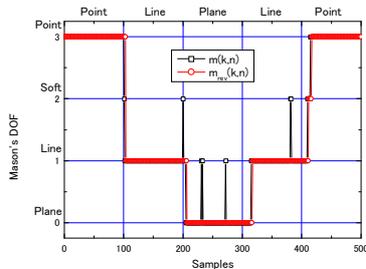
(a) Eigenvalues



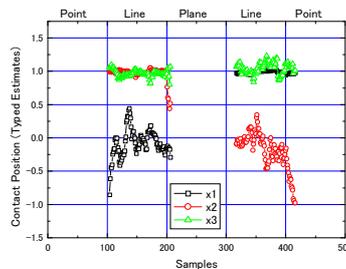
(c) Contact Position (Linear Estimates)



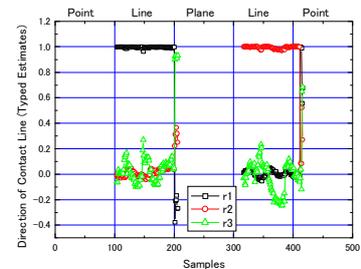
(e) Direction of Contact Line (Linear Estimates)



(b) Contact Type



(d) Contact Position (Typed Estimates)



(f) Direction of Contact Line (Typed Estimates)

Fig.6 Numerical Example 2