

速度情報を用いた接触状態の同定

毛利哲也（岐大VSL）

○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）

発表の流れ

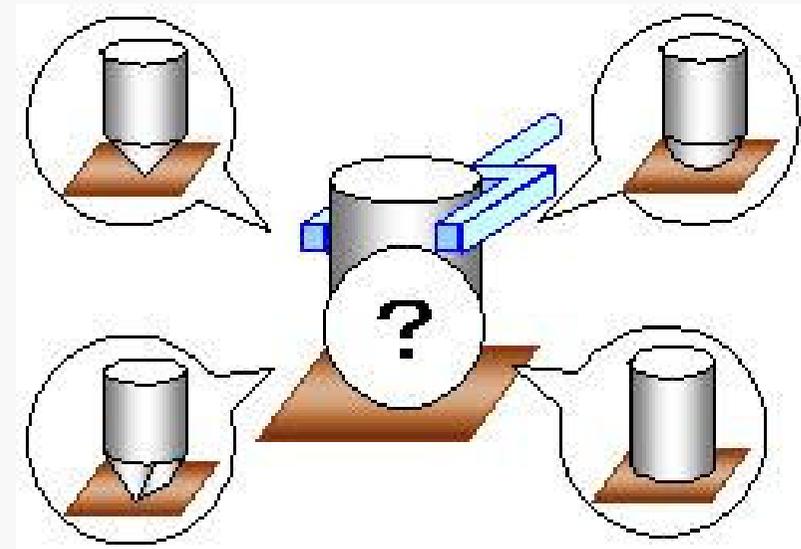
1. 背景
2. 問題の設定
3. 式の導出
4. まとめ

接触状態同定は何故必要か

人間：**手先の感覚**を利用して

接触を伴う作業（例：組立作業）を器用に行っている

目的：人間の高度な技量
ロボットで実現する



ロボット：接触状態の検出・制御が必要

接触点位置，接触力，接触の種類

接触状態の同定に関する研究

接触自由度による表現

Mason (1985)

アクティブセンシング
(複数回)

Salisbury
(ISRR1983)

Kitagaki et al.
(ICRA1991)

永田ら
(SICE1992)

Kaneko
(ICRA1994)

接触の種類

接触点位置

接触力

基礎式

(ICRA1994)

モーメントノイズ

(ICRA1999)

カノイズ

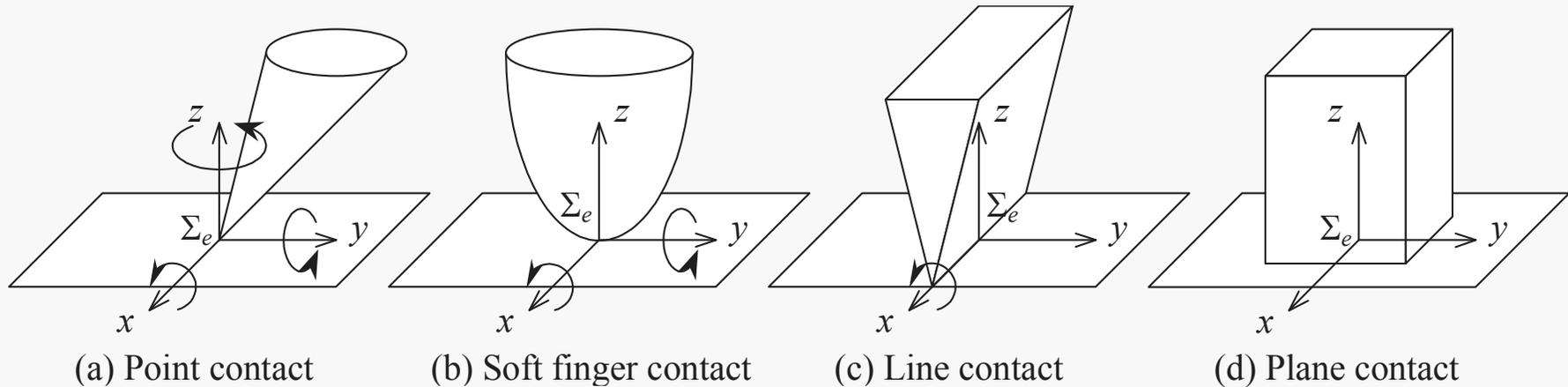
(ICRA2001)

実験

(SI2001)

接触モーメントを推定し、
その共分散行列の固有値を
用いて接触の種類を判別

力覚情報の特徴



	接触モーメント
点接触	$n_x = n_y = n_z = 0$
ソフトフィンガ接触	$n_x = n_y = 0$
線接触	$n_x = 0$
面接触	拘束なし

本研究

力覚情報

ノイズが無い場合

$$\text{rank}[\mathbf{n}_{c1}, \dots, \mathbf{n}_{ck}]$$

ノイズが有る場合

$$N_n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{n}_{ci} \mathbf{n}_{ci}^T$$

アクティブセンシングにより、
現在の接触状態を正確に求める

手先の感覚とは？

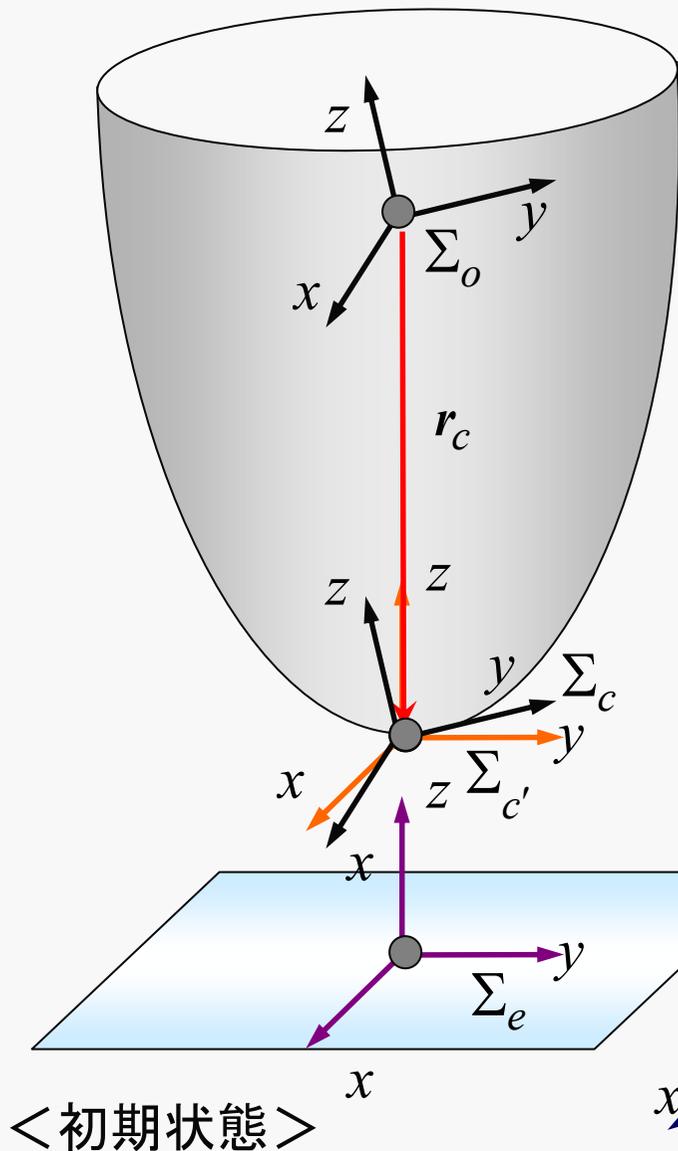
力覚
位置・速度

武藤, 下倉 : 接触点位置
菊植, 吉川 : インピーダンス推定

位置・速度情報のみで
接触状態を同定するた
めの基礎式の導出
(ノイズなし)

力覚との対応を考慮する

2.1 記号



対象物側

Σ_o : 対象物座標系

Σ_c : 対象物に固定された接触点座標系 (Σ_o と姿勢が同じ)

$\Sigma_{c'}$: 対象物に固定された接触点座標系 (接触状態の特徴を示す)

接触点位置

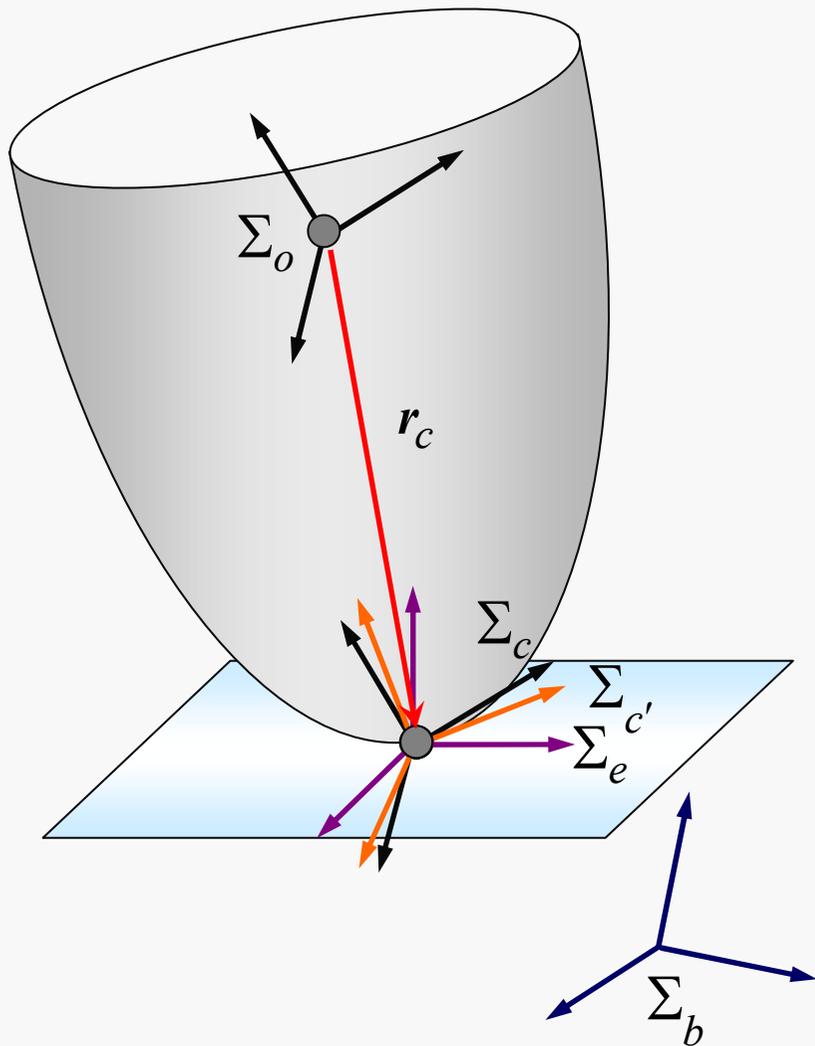
r_c : 接触点位置ベクトル

環境側

Σ_e : 環境に固定された接触点座標系

Σ_b : ベース座標系

2.2 同次変換行列



$${}^b T_o(t_i) = \begin{bmatrix} {}^b R_o(t_i) & {}^b \mathbf{p}_{b,o}(t_i) \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^b T_e = \begin{bmatrix} {}^b R_e & {}^b \mathbf{p}_{b,e} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^e T_{c'}(t_i) = \begin{bmatrix} {}^e R_{c'}(t_i) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{c'} T_c = \begin{bmatrix} {}^{c'} R_c & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^c T_o = \begin{bmatrix} I_3 & -\mathbf{r}_c \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^b T_o(t_i) = ({}^b T_e)({}^e T_{c'}(t_i))({}^{c'} T_c)({}^c T_o)$$

2.3 仮定

(A1) 把持対象物はロボットハンドにより拘束され，操られる．

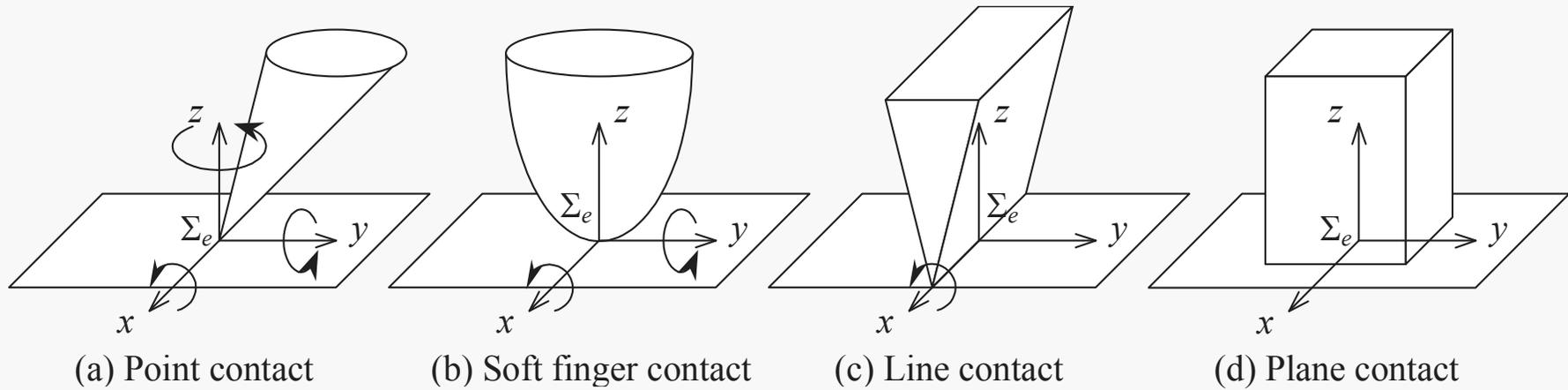
(A2) ${}^bT_o(t_i)$ およびその時間微分 ${}^b\dot{T}_o(t_i)$ は**既知**である．

(A3) アクティブセンシングにおいて**接触の種類の変化はなく**，
接触点での**滑りは発生しない**．

(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．

関節角，関節速度情報等により計測できるとする ←

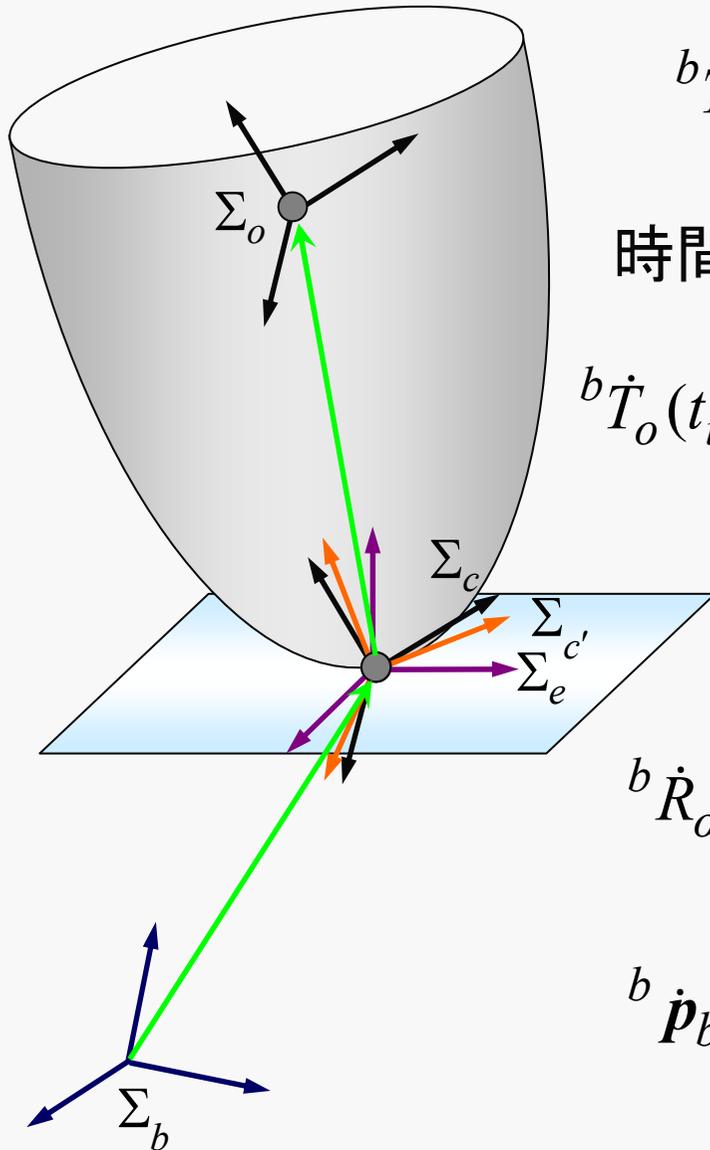
2.4 拘束条件



Σ_e に対する $\Sigma_{c'}$ の角速度における拘束条件

$${}^e\omega_{e,c'} = \begin{bmatrix} {}^e\omega_{e,c'x} \\ {}^e\omega_{e,c'y} \\ {}^e\omega_{e,c'z} \end{bmatrix} \left. \begin{array}{l} \text{点} \\ \text{ソフト} \\ \text{線} \\ \text{面} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{no constraint} \\ {}^e\omega_{e,c'z} = 0 \\ {}^e\omega_{e,c'y} = {}^e\omega_{e,c'z} = 0 \\ {}^e\omega_{e,c'x} = {}^e\omega_{e,c'y} = {}^e\omega_{e,c'z} = 0 \end{array}$$

3.1 接触状態の同定



$${}^b T_o(t_i) = ({}^b T_e)({}^e T_{c'}(t_i))({}^{c'} T_c)({}^c T_o)$$

時間微分

$${}^b \dot{T}_o(t_i) = ({}^b T_e) \begin{bmatrix} [{}^e \omega_{e,c'}(t_i) \times] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} ({}^e T_{c'}(t_i)) ({}^{c'} T_c) ({}^c T_o)$$

$${}^b \dot{R}_o(t_i) = ({}^b R_e) [{}^e \omega_{e,c'}(t_i) \times] ({}^e R_{c'}(t_i)) ({}^{c'} R_c)$$

→ 接触の種類の評別

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

→ 接触点位置の同定

3.2 接触の種類判別

$${}^b \dot{R}_o(t_i) = ({}^b R_e) [{}^e \omega_{e,c'}(t_i) \times] ({}^e R_{c'}(t_i)) ({}^{c'} R_c)$$

$$\Downarrow [{}^b \omega_{e,c'}(t_i) \times] = ({}^b R_e) [{}^e \omega_{e,c'}(t_i) \times] ({}^b R_e)^{-1}$$

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

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

$$\Downarrow {}^b \omega_{e,c'}(t_i) = ({}^b R_e) ({}^e \omega_{e,c'}(t_i))$$

$$\text{rank } M_\omega = \begin{cases} 3 & \text{for Point contact} \\ 2 & \text{for Soft finger contact} \\ 1 & \text{for Line contact} \\ 0 & \text{for Plane contact} \end{cases}$$

センシング数
3回以上

3.3 法線・接触線の方法

$${}^b\boldsymbol{\omega}_{e,c'}(t_i) = ({}^bR_e)({}^e\boldsymbol{\omega}_{e,c'}(t_i)) = \begin{bmatrix} {}^b\boldsymbol{r}_{ex} & {}^b\boldsymbol{r}_{ey} & {}^b\boldsymbol{r}_{ez} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^e\boldsymbol{\omega}_{e,c'x}(t_i) \\ {}^e\boldsymbol{\omega}_{e,c'y}(t_i) \\ {}^e\boldsymbol{\omega}_{e,c'z}(t_i) \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \leftarrow 0 \\ \leftarrow 0 \end{matrix}$$

法線の方法

接触線の方法

ソフトフィンガ接触

線接触

単位法線ベクトル

$$\boldsymbol{n} = \frac{{}^b\boldsymbol{\omega}_{e,c'}(t_i) \times {}^b\boldsymbol{\omega}_{e,c'}(t_j)}{\|{}^b\boldsymbol{\omega}_{e,c'}(t_i) \times {}^b\boldsymbol{\omega}_{e,c'}(t_j)\|}$$

接触線の単位方向ベクトル

$$\boldsymbol{l} = \frac{{}^b\boldsymbol{\omega}_{e,c'}(t_i)}{\|{}^b\boldsymbol{\omega}_{e,c'}(t_i)\|}$$

3.4 接触点位置の推定

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

$$Ax = b$$

$$A := \begin{bmatrix} {}^b \dot{R}_o(t_1) \\ \vdots \\ {}^b \dot{R}_o(t_k) \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{3k \times 3} \quad b = \begin{bmatrix} -{}^b \dot{p}_{b,o}(t_1) \\ \vdots \\ -{}^b \dot{p}_{b,o}(t_k) \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{3k} \quad x = {}^o r_c$$

$$\text{rank } {}^b \dot{R}_o(t_i) = \text{rank}^e \Omega_{e,c'}(t_i) \leq 2$$

$$\text{rank } A = \left\{ \begin{array}{l} 3 : \text{点接触} \\ 3 : \text{ソフトフィンガ接触} \\ 2 : \text{線接触} \\ 0 : \text{面接触} \end{array} \right\}$$

一意に決まる

接触線方向の自由度をもつ
求めることはできない

速度情報と力覚情報の比較

手法	位置・速度情報	力・モーメント情報
推定手順	<p>接触の種類^①の判別</p> <p>↓</p> <p>法線, 接触線方向の推定</p> <p>↓</p> <p>接触点位置^②の推定</p>	<p>接触点位置^③の推定</p> <p>↓</p> <p>接触モーメント^④の推定</p> <p>↓</p> <p>接触の種類^⑤の判別</p> <p>↓</p> <p>法線, 接触線方向の推定</p> <p>↓</p> <p>種類別の再同定</p>
方程式の形	線形	非線形
センシング回数	3回以上	6回以上
接触力	同定できない	同定できる
動作条件	接触の種類の変化なし 滑らない	接触の種類の変化なし

今後の課題：ノイズを考慮した解析, センサフュージョン