

接触圧分布変化からの運動推定法

江村 暁*・館 暁**

A Method of Estimating Motion from Change of Tactile Images

Satoru EMURA* and Susumu TACHI**

Tactile sensing has received an increasing amount of attention since 1980s, and some works for the detection of a target shape through contact point sensing from tactile and proprioceptive information have been done. However, all of them are based on the assumption that the target is static and rigid. In this paper, we derive the relation between the motion of the target object and the changes of contact oval parameters, and analyze the conditions for estimating the motion of the target object. On the numerical verification of regularity of this relation for a target model, it is shown that the change of tactile images and the relative velocity on two sites are enough for estimating the motion, compliance, and curvature of the target object.

Key Words: contact oval, curvature, 6 DOF motion

1. はじめに

手と目の間に遮蔽物があるために環境情報の収集を触覚にのみ依存するような場合でも、われわれは日常的に触っている物のおおまかな形状や硬さ、それが動いているかどうかを知覚できる。ロボットの分野においても、これに対応する機能として力覚センサや関節角・関節トルクセンサをもちいて対象物との接触点や対象物の形状を検出する方法が幾つか研究されている^{1) 2) 3) 4) 5)}。

しかし、いずれの研究においても

(1) 対象物は任意の力に対して、その変形が無視できる程度に硬い。

(2) ロボットの検出動作中に、対象物は移動しない。

ことが前提とされており、動きを有する対象物に関する考察や研究はなされていない。

一方ロボット視覚の分野では、カメラと対象間の相対運動により生成されるオプティカルフローが早くから注目され、解析されている⁶⁾。オプティカルフローは、カメラ-対象間の6個の相対運動パラメータと画像内の物体表面のパラメータに依存しており、オプティカルフローから、対象情報の一部を推定することが可能である。一例として、空間中の平面

により生成されるオプティカルフローから回転運動及び面の勾配は求まるが、並進速度と平面までの距離は独立には求まらない。一般に、すべての未知数をオプティカルフローから一意的に決定できないことが知られている⁶⁾。

本論文では、圧力の二次元的分布を計測できるセンサを搭載して対象と接触するロボットアームを想定する。そして、対象の運動とこれに伴う接触面楕円パラメータの変化に注目し、二本のアームで対象に接触している場合の触覚情報からの運動推定の可能性を考察する。そして位置姿勢の異なる二つのセンサにより観測された圧力分布変化から、(1) 対象物の硬さが既知であれば、並進及び回転運動の大きさが推定可能なこと(2) 硬さと曲率の未知な対象物についても対物速度の検出が可能であれば、対象の6自由度の運動・硬さ・曲率が推定可能であることを示す。

2. 接触の定式化

2.1 接触の物理モデル

接触する対象および二次元分布圧センサともに、ほぼ均一の材質からなり、両物体間の摩擦は自然の油膜等のために十分小さいと仮定し⁷⁾、そのヤング率とポアソン比を次のよう

E_e : 対象物のヤング率

E_s : センサのヤング率

ν_e : 対象物のポアソン比

ν_s : センサのポアソン比

さらに次の中間変数 k_e k_s をもちいて、考察をすすめる。

$$k_e \equiv \frac{1 - \nu_e^2}{\pi E_e} \quad (1)$$

* NTT ヒューマンインタフェース研究所 武蔵野市緑町 3-9-11

** 東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

* Human Interface Laboratories, NTT, Musasino

** Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received February 13, 1997)

(Revised December 22, 1997)

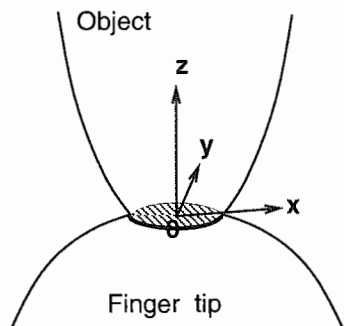


Fig. 1 Contact of two objects

$$k_s \equiv \frac{1 - \nu_s^2}{\pi E_s} \quad (2)$$

ある時刻 t での接触中心を原点に、法線方向を z 軸にとる。接触中心での指先形状が曲率 $2A, 2B$ で与えられる指先表面と対象物体の接触中心付近形状は、 h を押し込み深さとして

$$z = -Ax^2 - By^2 + h \quad (3)$$

$$z = Cx^2 + Dxy + Ey^2 \quad (4)$$

で表わせる。 λ_1, λ_2 を対象物の主曲率、 θ を λ_1 方向と x 軸とのなす角とすれば、それぞれ

$$\lambda^2 - (2C + 2E)\lambda + (4CE - D^2) = 0 \quad (5)$$

$$\tan 2\theta = \frac{D}{C - E} \quad (6)$$

の解として与えられる。

Fig.1のように二つの物体が接触するとき、実際に圧力分布の境界として接触面で観測可能な楕円（以後、圧力分布接触面楕円と呼ぶ）

$$Cx^2 + Dxy + Ey^2 = 1 \quad (7)$$

と次式で定義される楕円（以後、接触面楕円と呼ぶ）

$$\hat{C}x^2 + \hat{D}xy + \hat{E}y^2 = 1, \quad (8)$$

$$\hat{C} \equiv \frac{C}{h}$$

$$\hat{D} \equiv \frac{D}{h}$$

$$\hat{E} \equiv \frac{E}{h}$$

は物体変形のために一致しないが、圧力分布接触面楕円から接触面楕円への変換は Hertz の接触理論の適用により求めることができる。圧力分布接触面楕円の長径が l 、短径が m のときに長径方向に x' 軸をとると、その標準形は

$$C'x'^2 + E'y'^2 = 1, \quad (9)$$

$$C' \equiv \frac{1}{l^2}$$

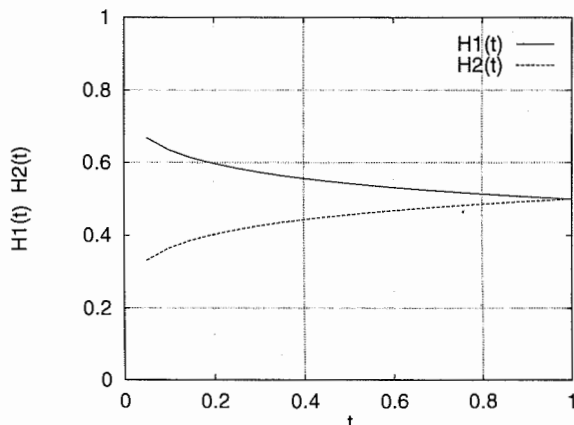
$$E' \equiv \frac{1}{m^2}$$

で与えられ、対応する接触面楕円は

$$\hat{C}'x'^2 + \hat{E}'y'^2 = 1$$

$$\hat{C}' = C' H_1(t)$$

$$\hat{E}' = E' H_2(t), \quad (10)$$

Fig. 2 The graph of function $H_1(t)$ and $H_2(t)$

$$t \equiv \frac{m^2}{l^2}$$

で与えられる⁸⁾。

ただし関数 $H_1(t), H_2(t)$ は以下で定義され、そのグラフは Fig.2 で与えられる。

$$H_1(t) \equiv \frac{K_1(t)}{K_h(t)}$$

$$H_2(t) \equiv t \frac{K_2(t)}{K_h(t)}, \quad (11)$$

$$K_h(t) \equiv \int_0^\infty \frac{d\eta}{\sqrt{(1+\eta)(t+\eta)\eta}}$$

$$K_1(t) \equiv \int_0^\infty \frac{d\eta}{(1+\eta)\sqrt{(1+\eta)(t+\eta)\eta}}$$

$$K_2(t) \equiv \int_0^\infty \frac{d\eta}{(t+\eta)\sqrt{(1+\eta)(t+\eta)\eta}}$$

したがって次のフロー

$$C, D, E$$

↓ xy 座標系から $x'y'$ 座標系への回転変換

$$C', E'$$

↓ (10)(11) 式による変換

$$\hat{C}', \hat{E}'$$

↓ $x'y'$ 座標系から xy 座標系への回転変換

$$\hat{C}, \hat{D}, \hat{E}$$

により、観測された圧力分布接触面楕円から接触面楕円の各係数が求められる。

原点での変形量 h と圧力分布の関係も Hertz の接触理論⁹⁾により求められる。圧力分布接触面楕円の長径短径がそれぞれ l, m のとき、接触面での圧力分布 $q(x', y')$ は半楕円体の縦座標すなわち

$$q(x', y') = q_0 \sqrt{1 - \frac{x'^2}{l^2} - \frac{y'^2}{m^2}} \quad (12)$$

で与えられる。関係をより見やすくするために、Hertz の求

めた理論的圧力分布を極座標系で $q(s, \phi)$ と表わし、代入して積分を実行する。長径と短径の比 $r \equiv m/l$ をもちいて定義される関数 $I(r)$ をもちいて、

$$h = (k_e + k_s) \iint q(s, \phi) ds d\phi$$

$$= (k_e + k_s) m q_0 I(r), \quad (13)$$

$$I(r) \equiv \pi \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{r^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi}}$$

原点での変形量 h と圧力分布の関係が与えられる。

2.2 接触の運動学

対象の動きは位置姿勢の6自由度の変化で記述され、これに応じてセンサ面に固定された座標系における接触面楕円の各パラメータが変化する。この関係を知るには、センサ座標系において運動後の対象を記述する式を求め、接触面楕円を求めればよい。まず対象姿勢が変化したときの関係を考察する。移動量が小さければ、各変化を重ね合わせることができ、一般の微小運動時の接触面楕円パラメータ変化が得られる。以後時刻 t_0, t_1 において、時刻 t_0 の接触面楕円の中心を原点とするセンサ座標系で接触面楕円が観測できるとして議論を進める。

対象に ZYX オイラー角 $(\gamma \beta \alpha)$ なる微小回転が加えられた場合、その座標変換は $\cos \alpha \rightarrow c\alpha, \sin \alpha \rightarrow s\alpha$ なる略記をもちいて、

$$\begin{pmatrix} x & y & z \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ s\gamma c\beta & s\gamma s\beta s\alpha + c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x' & y' & z' \end{pmatrix}^T \quad (14)$$

で与えられ、微小角 α に関する近似 $\cos \alpha \cong 1, \sin \alpha \cong \alpha$ をもちいて

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (15)$$

となる。これを

$$z' = Cx'^2 + Dx'y' + Ey'^2 \quad (16)$$

に代入し、微小回転後の対象物体表面の二次曲面近似式

$$z = (C - \gamma D)x^2 + (D + 2C\gamma - 2E\gamma)xy + (E + \gamma D)y^2 - \beta x + \alpha y \quad (17)$$

が得られる。

これより、対象微小運動が並進成分 $(uvw)^T$ 回転成分 $(\alpha \beta \gamma)^T$ で与えられるとき、実際にセンサ座標系において観測できる接触面楕円の各係数は以下のように変化する。

$$\begin{aligned} x^2 &: \frac{C+A}{h} \implies \frac{C-\gamma D+A}{h-w} \\ xy &: \frac{D}{h} \implies \frac{D+2(C-E)\gamma}{h-w} \\ y^2 &: \frac{E+B}{h} \implies \frac{E+\gamma D+B}{h-w} \\ x &: 0 \implies \frac{-2Cu-Dv-\beta}{h-w} \\ y &: 0 \implies \frac{-2Ev-Du+\alpha}{h-w} \end{aligned}$$

2.3 接触面楕円パラメータの正規化

これら接触面楕円パラメータには、それぞれ未知数 $1/h$ $1/(h-w)$ がかかっている。押し込み深さ h はサブミリの値をとり $w \approx h$ もしくは $w > h$ のため、分子と分母に運動の変数が入っている接触面楕円の各係数と微小運動との関係は非線形になり、その取扱いは困難である。

そこで次式で定義される k^*

$$k^* \equiv k_e + k_s \quad (18)$$

をもちい、観測された圧力分布から算出可能な $m q_0 I(r)$ を t_0, t_1 で観測された接触面楕円のパラメータにかけて

$$a x^2 + b xy + c y^2 + d x + e y = f \quad (19)$$

で表わされる正規化された接触面楕円を考える。すると

$$\begin{aligned} a &: \frac{C+A}{k^*} \implies \frac{C-\gamma D+A}{k^*} \\ b &: \frac{D}{k^*} \implies \frac{D+2(C-E)\gamma}{k^*} \\ c &: \frac{E+B}{k^*} \implies \frac{E+\gamma D+B}{k^*} \\ d &: 0 \implies \frac{-2Cu-Dv-\beta}{k^*} \\ e &: 0 \implies \frac{-2Ev-Du+\alpha}{k^*} \\ f &: \frac{h}{k^*} \implies \frac{h-w}{k^*} \end{aligned}$$

のように、楕円パラメータの変化分と運動変数との間に線形の関係式が成立し、取扱いやすくなる。実際、 $D=0$ もしくは $C=E$ のときに、両者の関係を表す行列の rank が落ちてしまわないように、

$$\Delta p \equiv \begin{pmatrix} \Delta d & \Delta e & \Delta f \end{pmatrix}^T \quad (20)$$

で定義したベクトル Δp について、

$$H \equiv \frac{1}{k^*} \begin{pmatrix} -2C & -D & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -D & -2E & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

で定義される行列 H をもちいれば、速度及び角速度ベクトルが

$$V = \begin{pmatrix} u & v & w \end{pmatrix}^T \quad (22)$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} \alpha & \beta & \gamma \end{pmatrix}^T \quad (23)$$

で与えられるとき、

$$\Delta p = H \begin{pmatrix} V \\ \Omega \end{pmatrix} \Delta t \quad (24)$$

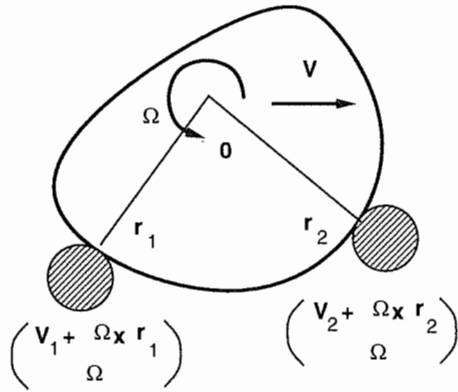


Fig. 3 Relation between velocity and angular velocity vector

により Δt 間の 6 自由度運動と楕円パラメータ変化の関係が記述される. H は対象物の接触点付近の形状だけで決定される行列である.

3. 複数指情報からの運動推定

3.1 二指モデル

対象に対して, 二本の指 (以下, 下付添字 1, 2 で区別する) で接触しているケースを考える. 指 1 の座標系から見て, 時刻 t_0 における対象の瞬時回転中心を O とし, これが並進速度ベクトル V , 角速度ベクトル Ω で動いている. O からの指先位置をそれぞれ r_1, r_2 とすれば, Fig. 3 のように指 1, 2 における速度ベクトルと角速度ベクトルの組は, $(\Omega, V + \Omega \times r_1)$ $(\Omega, V + \Omega \times r_2)$ で与えられる.

このとき V_2 は, V_1, Ω と指 1, 2 の相対位置 $r_2 - r_1$ から次のように計算できる.

$$\begin{aligned} V_2 &= V + \Omega \times r_2 \\ &= V_1 + \Omega \times (r_2 - r_1) \end{aligned} \quad (25)$$

指 1 から指 2 への姿勢変換が回転行列 R で与えられるならば, 指 2 において観測される速度 \hat{V}_2 は次式で与えられる.

$$\hat{V}_2 = R(V_1 + \Omega \times (r_2 - r_1)) \quad (26)$$

この $\times(r_2 - r_1)$ の外積は, 対応する歪対称行列 Q により

$$\Omega \times (r_2 - r_1) = Q \Omega \quad (27)$$

のように置き換えることができ, 指 1, 2 で観測される速度ベクトルと角速度ベクトルの関係式

$$\begin{pmatrix} \hat{V}_2 \\ \hat{\Omega}_2 \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} V_1 \\ \Omega_1 \end{pmatrix}, \quad (28)$$

$$T \equiv \begin{pmatrix} R & RQ \\ 0 & R \end{pmatrix}$$

を得る. T は二指相互の位置姿勢関係のみで決定される行列である.

3.2 硬さが既知のケース

人は, 材質感手がかりの一つとして対象接触時の手指表面の温度変化をもちいており¹⁰⁾, 圧力分布センサに加えて温度センサを備えることで, 材質感すなわち硬さを推定しうると考えられる. これに基づき, 対象の硬さ k_e が既知で, k^* があらかじめ分かっているものと仮定する.

時刻 t_0, t_1 で接触面楕円を観測するとき, t_0 での正規化された接触面楕円パラメータ a_0, b_0, c_0 に注目すれば,

$$\frac{C}{k^*} = a_0 - \frac{A}{k^*} \quad (29)$$

$$\frac{D}{k^*} = b_0 \quad (30)$$

$$\frac{E}{k^*} = c_0 - \frac{B}{k^*} \quad (31)$$

より行列 H のすべての要素が決まる. 時間 Δt の間での指 1, 2 における正規化された接触面楕円パラメータ変化 $\Delta p_1, \Delta p_2$ について,

$$\begin{pmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \end{pmatrix} = \Delta t L \begin{pmatrix} V_1 \\ \Omega_1 \end{pmatrix}, \quad (32)$$

$$L \equiv \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 T \end{pmatrix}$$

によって, 接触面楕円の変化と接触している物体の運動の関係が与えられる. 6×6 行列 L が逆行列をもつならば,

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ \Omega_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta t} L^{-1} \begin{pmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \end{pmatrix} \quad (33)$$

から V, Ω が求まり, 対象運動の並進と回転の 6 自由度すべてが求められる.

3.3 硬さが未知のケース

対象の硬さが未知であれば k^* が未知変数となり, 行列 H のすべての要素は定まらない. Shinoda らは, 触覚センサを構成する弾性体において表面状態が内部へ伝達していく準静的物理特性を弾性体理論から導き, 埋め込み深さの異なる少数のプロープから, 滑り速度を検出する垂直サンプリング法¹¹⁾を提案している. これに基づいて指先における圧力分布と対物速度 u, v の検出が可能だと仮定する.

このとき Δp の代わりに次式で定義される Δp^* を考える.

$$\Delta p^* \equiv \begin{pmatrix} \Delta d + 2a_0 u + b_0 v \\ \Delta e + 2c_0 v + b_0 u \\ \Delta f \end{pmatrix} \quad (34)$$

このパラメータと運動との関係は, 微小量の二次以上の項を無視することで, 指先形状のパラメータ A, B で定まる行列 H^* と k^* により次式で与えられる.

$$\Delta p^* = \frac{1}{k^*} H^* \begin{pmatrix} V_1 \\ \Omega_1 \end{pmatrix}, \quad (35)$$

$$H^* \equiv \begin{pmatrix} 2A & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2B & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

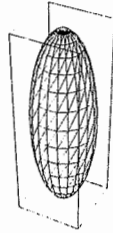


Fig. 4 The object for numerical verification

二本指の場合には、既知の行列 H_1^* , H_2^* , T から定義される行列 L^* により次のようになる。

$$\begin{pmatrix} \Delta p_1^* \\ \Delta p_2^* \end{pmatrix} = \frac{\Delta t}{k^*} L^* \begin{pmatrix} V_1 \\ \Omega_1 \end{pmatrix}, \quad (36)$$

$$L^* \equiv \begin{pmatrix} H^* \\ H^* T \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ \Omega_1 \end{pmatrix} = \frac{k^*}{\Delta t} L^{*-1} \begin{pmatrix} \Delta p_1^* \\ \Delta p_2^* \end{pmatrix} \quad (37)$$

(37) 式の未知数は k^* のみである。対物速度 V_1 の u, v 成分が検出可能であると仮定しているため、両辺の比較により k^* すなわち対象の硬さが分かり、 V_1, Ω_1 の成分すなわち対象の並進及び回転運動の 6 自由度すべてが求められる。また正規化された接触面楕円パラメータと k^* とから、対象形状の情報を含む C, D, E も推定できる。

4. 数 値 例

楕円パラメータ変化と運動を結ぶ行列 L は、 6×6 の行列なので、その rank が 6 であれば L は逆行列を持ち、楕円パラメータ変化から接触対象物の運動を求められる。またこの逆行列演算の数値的安定性は、 L の条件数 (L の最大特異値と最小特異値との比) により決まる¹²⁾。

行列 L は、二指相互の位置姿勢関係で決定される行列 T と対象の接触点付近の形状で決定される行列 H_1, H_2 からなるため、対象の形状に大きく依存する。したがって対象物として表面が

$$s = \begin{pmatrix} 20 \cos \eta \cos \xi, & 20 \cos \eta \sin \xi, & 60 \sin \eta \end{pmatrix}^T \quad (38)$$

で与えられる楕円体 (単位は mm で与えられる) を想定し、この推定演算の数値的検証を行なった。 $s_\eta^T s_\xi = 0$ より、楕円体表面の η, ξ で指定される各点において

$$\begin{pmatrix} \frac{s_\eta}{|s_\eta|} & \frac{s_\xi}{|s_\xi|} & \frac{s_\eta}{|s_\eta|} \times \frac{s_\xi}{|s_\xi|} \end{pmatrix}$$

は正規直交座標系になる。これに指の姿勢を一致させることとした。この点付近での楕円体表面の二次曲面近似法は付録 B による¹³⁾。一つの指を $(\eta, \xi) = (0, 0)$ に固定し、もう一つの指を

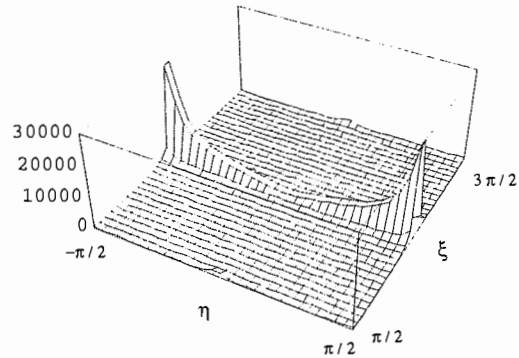


Fig. 5 Overview of conditional number of matrix L as a function of contact position

η	$(\frac{-1}{2} + \frac{i}{33}) \pi$	$i: 1 \sim 32$
ξ	$(\frac{1}{2} + \frac{j}{33}) \pi$	$j: 1 \sim 32$

で表わされる楕円体上の各点に動かした。

硬さが既知のケース

行列 L の各 (η, ξ) のサンプリング点では rank が 6 であった。Fig.5,6では、 η, ξ を x, y 軸にとり、各姿勢での条件数を z 軸にとってプロットした。条件数 0 ~ 30000 の範囲をプロットをした Fig.5からは、調べた (η, ξ) の中心を横切る直線領域を除いた領域で rank が 6 であることが推測される。また条件数 0 ~ 200 の範囲のプロット Fig.6 から、検討した (η, ξ) のほぼ半分以上の領域で条件数は 200 以下で逆行列計算に際して殆んど問題なく、条件数の最小値は図中の谷間の部分にあたるのが分かる。サンプリング点における最小値は 13.7 であった。

硬さが未知のケース

対象物に関して硬さが既知のケースと同じ設定で、また指表面の曲率半径が 5, 10mm で与えられるとして行列 L^* の rank と条件数を調べ、ほぼ同様の結果を得た。調べた (η, ξ) の各点では rank が 6 であり、条件数 0 ~ 200 の範囲のプロット Fig.8 から、検討した (η, ξ) のほぼ半分以上の領域で条件数は 200 以下であり、サンプリング点における最小値は 12.76 であった。

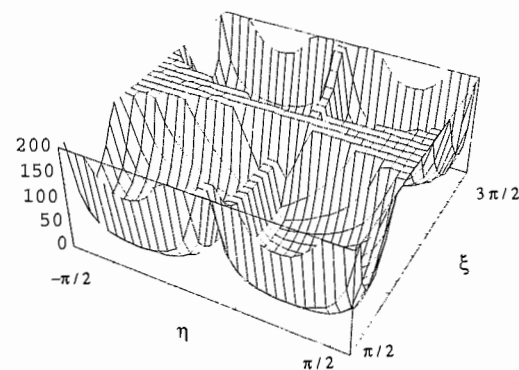


Fig. 6 Closer view of conditional number of matrix L as a function of contact position

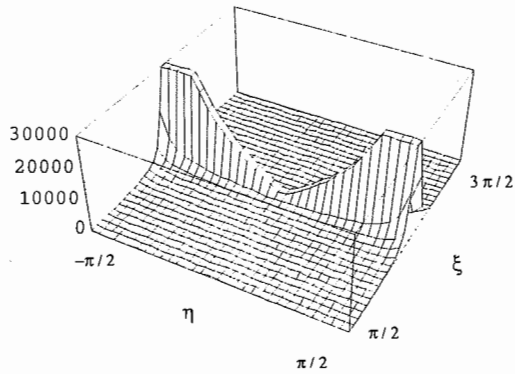


Fig. 7 Overview of conditional number of matrix L^* as a function of contact position

これより、検討領域の姿勢において L , L^* はほぼ逆行列を持つため、硬さが既知であれば、 L の条件数が十分小さい姿勢で静止している二本の指で観測された接触面楕円パラメータの変化から、接触している対象物の運動情報が推定できると結論できる。

次に、硬さが既知の場合について、二本の指が想定している対象上の二点 $(\eta, \xi) = (0, 0)$ $(\pi/8, 7\pi/8)$ に接触し、対象の回転運動が

$$\begin{pmatrix} \alpha & \beta & \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.05i & 0.05j & 0 \end{pmatrix}$$

$$i = 0, 1, 2$$

$$j = 0, -1, -2$$

で与えられるケースについて、(14) 式の座標変換により近似をもちいずに求められた接触面楕円と近似により求められた接触面楕円との相違、および対象の運動と推定結果との相違について、各観測量が誤差なく得られると仮定して、シミュレーションによる検討を行なった。

Fig.9に、近似的に導いた接触面楕円(実線)と真の接触境界線上の点を示す。近似の影響がほとんど見られないことがこの結果より分かる。さらに Fig.10に、真の運動と推定した運動との相違を示す。

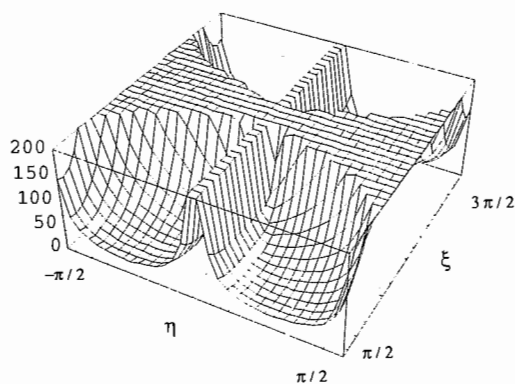


Fig. 8 Closer view of conditional number of matrix L^* as a function of contact position

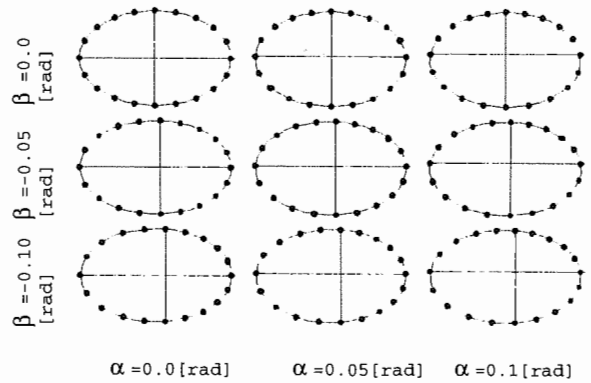


Fig. 9 Approximated contact oval (given by line) and true contact oval (given by dot)

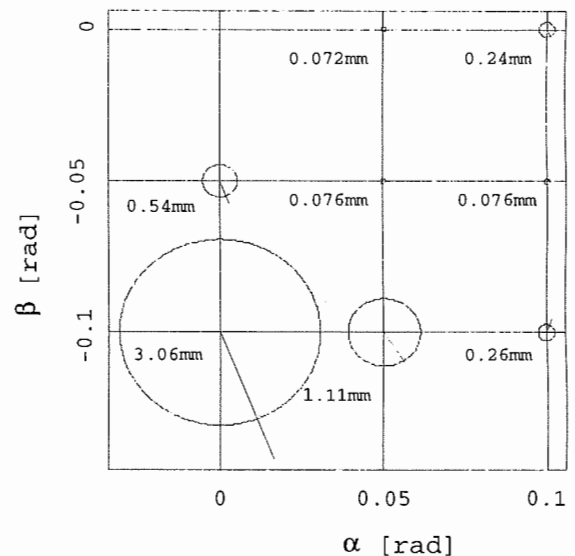


Fig. 10 Errors of motion estimations. Solid lines give the error of estimated rotation, and radii of circles and figures give errors of estimated total translation.

これより、(1) 物体に接触している指のどちらか一方において運動が大きくなる場合には、対象が指表面から離れるために推定が不可能な場合がある。(2) 接触が保たれる場合にも、接触面楕円の近似が実際を反映しなくなり、推定精度が落ちてしまう、ことが分かった。

さらに本手法を実際のロボットへ適用する場合には、接触面楕円パラメータを十分高精度に推定できること、硬さ未知の対象の場合には、対物速度も十分高精度に推定できる必要がある。

5. ま と め

位置姿勢の異なる二センサにより観測された圧力分布の変化から、その対象の硬さが既知であれば、並進及び回転運動の大きさが推定可能なことを示した。また圧力分布変化及び対物速度が計測可能であれば、対象の6自由度の運動、曲率、硬さが推定可能であることを示した。

参 考 文 献

- 金子: 把握までのセンシング戦略 - その1: 接触点及び形状検出, 日本ロボット学会誌, 11-7, 953/958 (1993)
- 金子, 谷江: 自己姿勢変形性を利用した多指ロボットハンドと未知対象物との接触点検出, 日本ロボット学会誌, 8-6, 12/21 (1989)
- M.Huber and R.A.Grupen: 2-d contact detection and localization using proprioceptive information, *IEEE Trans. on R&A*, 10-1, 23/33 (1994)
- 金子, 上野: 能動触覚に関する基礎的研究, 日本ロボット学会誌, 13-1, 149/156 (1995)
- 金山, 金子, 辻: 3D人工能動触覚, 計測自動制御学会誌, 31-12, 1915/1923 (1995)
- B.K.P.Horn: *Robot Vision*, MIT Press (1986)
- 曾田: 摩擦の話, 岩波書店 (1971)
- ランダウ, リフシッツ: 弾性理論, 東京図書 (1972)
- ティモシェンコ他: 弾性論, コロナ社 (1973)
- 井野, 泉, 高橋, 伊福部: 物体接触時の皮膚温度変化に着目した材質感触覚ディスプレイ方式の提案, 計測自動制御学会論文集, 30-3, 345/351 (1994)
- H.Shinoda, M.Uehara, and S.Ando: A tactile sensor with three dimensional structure, *Proc.1993 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 435/441 (1993)
- 中川, 小柳: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会 (1982)
- M.P.Do.Carmo: *Differential Geometry of Curvatures and Surfaces*, Prentice-Hall (1976)

[著 者 紹 介]

江 村 暁 (正会員)



1997年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。日本電信電話株式会社入社、ヒューマンインタフェース研究所に勤務。

館 暁 (正会員)



1973年東京大学工学系研究科博士課程修了。同大学助手、機械技術研究所主任研究官、研究課長、東京大学助教授を経て、94年東京大学工学部計数工学科教授。バイスペクトルを用いる信号処理、盲導犬ロボット、トレイグジスタンスなどの研究を行なう。SICEフェロー(工学博士)。

《 付 録 》

A. 座標変換後の近似二次曲面の算出

接触している対象が zyx オイラー角で $(\gamma \beta \alpha)$ わずかに回転した後の近似二次曲面を、本文中の(15)(16)式より求める。

はじめに $\gamma = 0$ の場合を考える。微小回転変換により、対象物体の式は

$$\beta x - \alpha y + z = C(x - \beta z)^2 + D(x - \beta z)(y + \alpha z) + E(y + \alpha z)^2 \quad (A.1)$$

となり、 z が最小値をとる点を調べる。この両辺を xy でそれぞれ偏微分し、 $z_x = 0, z_y = 0$ とにおいて、次の二式を得る。

$$\beta = 2C(x - \beta z) + D(y + \alpha z) \quad (A.2)$$

$$-\alpha = D(x - \beta z) + 2E(y + \alpha z) \quad (A.3)$$

次式で定義される変数 δ, ϵ

$$\delta \equiv \frac{-D\alpha - 2E\beta}{D^2 - 4CE} \quad (A.4)$$

$$\epsilon \equiv \frac{D\beta + 2C\alpha}{D^2 - 4CE} \quad (A.5)$$

をもちいて、これを x, y について解き、 z が最小となる点 (x_0, y_0, z_0) を求める。

$$x_0 = \beta z_0 + \delta \quad (A.6)$$

$$y_0 = -\alpha z_0 + \epsilon \quad (A.7)$$

$$z_0 = (C\delta^2 + D\delta\epsilon + E\epsilon^2)(1 + \alpha^2 + \beta^2)^{-1} \quad (A.8)$$

δ, ϵ の2次以上の項を無視すると、 $z_0 = 0$ より $x_0 = \delta, y_0 = \epsilon$ である。これを元の式に代入し、括弧内の x, y の一次項を計算していき

$$\begin{aligned} z &= C(x - \delta)^2 + D(x - \delta)(y - \epsilon) + E(y - \epsilon)^2 \\ &= C(x^2 - 2\delta x - \frac{D\epsilon}{C}x) + Dxy \\ &\quad + E(y^2 - 2\epsilon y - \frac{D\delta}{E}y) + C\delta^2 + D\delta\epsilon + E\epsilon^2 \\ &= Cx^2 + Dxy + Ey^2 - \beta x + \alpha y \end{aligned} \quad (A.9)$$

を得る。

次に $\gamma \neq 0, \alpha = \beta = 0$ の場合を考える。微小回転後の対象物体を記述する式は、

$$\begin{aligned} z &= (C - \gamma D)x^2 + (D + 2C\gamma - 2E\gamma)xy \\ &\quad + (E + \gamma D)y^2 \end{aligned} \quad (A.10)$$

となる。

以上を二次以上の微小量を見捨てて重ね合わせることで、対象表面の最終的な二次曲面近似式として

$$z = (C - \gamma D)x^2 + (D + 2C\gamma - 2E\gamma)xy + (E + \gamma D)y^2 - \beta x + \alpha y \quad (\text{A.11})$$

が得られる。

B. 一般曲面の二次曲面近似について

例えば楕円体

$$s = \begin{pmatrix} a \cos u \cos v & a \cos u \sin v & c \sin u \end{pmatrix} \quad (\text{B.1})$$

のような二変数 uv の関数で表される3次元曲面について考える。以下、二ベクトル a, b の内積を $\langle a, b \rangle$ と表記することにする。法線ベクトル

$$N = \frac{s_u \times s_v}{|s_u \times s_v|}$$

をもちいると、次のように第一基本量

$$E = \langle s_u, s_u \rangle$$

$$F = \langle s_u, s_v \rangle$$

$$G = \langle s_v, s_v \rangle$$

および第二基本量

$$e = \langle N, s_{uu} \rangle$$

$$f = \langle N, s_{uv} \rangle$$

$$g = \langle N, s_{vv} \rangle$$

が定義できる。このとき次の行列

$$- \begin{pmatrix} e & f \\ f & g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}^{-1}$$

の固有値を k_1, k_2 とすれば、曲面の曲率は $-k_1, -k_2$ で与えられる。

$\langle s_u, s_v \rangle = 0$ ならば、 $(s_u/|s_u|, s_v/|s_v|, N)$ は曲面上 uv で指定される点での直交座標系となる。それぞれ xy 軸にとれば、その点での局所形状を近似する二次曲面は

$$z = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} e & f \\ f & g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (\text{B.2})$$

で与えられる。