ロボット指による剛性と接触位置の能動的触覚センシング*

今村 信昭*¹, 福田 敏男*², 金子 真*³Tactile Based Active Sensing for Detecting Stiffness and Contact Point
Using Robotic Finger

Nobuaki IMAMURA, Toshio FUKUDA and Makoto KANEKO

This paper discusses an approach for detecting not only a contact point between an environment and a robotic finger, but also the local stiffness of the environment where the finger makes contact. We assume that the environment's stiffness is three dimensional with coupling terms, whereas most the conventional studies have assumed a one dimensional spring as an environment model for simplification. When a finger confirms that there exists considerable compliance, the finger tip is pressed against the environment and starts several active pushing motions in various directions to eventually obtaining the stiffness matrix. After the stiffness matrix is obtained, the initial contact point can be evaluated by using the measured stiffness matrix. The overall concept is also verified by experiments utilizing a wire driven robotic finger.

Key Words: Tactile Sensing, Active Sensing, Environment Stiffness, Robotic Finger, Stiffness Ellipsoid

1. ま え が き

ロボットハンド(以下, 単にハンドと略記)が未知の対象物に接近し, 最終的に安定な把握系を構成する問題を想定してみよう。この場合, ハンドと対象物との初期接触点は, ハンドがその後のセンシング動作(例えば対象物の形状を検出する動作)を行う際の出発点になる。著者らは対象物が十分硬いという仮定のもとで, ハンドと未知対象物との接触点をアクティブセンシングの手法を用いて検出する方法について考察してきた⁽¹⁾⁽²⁾。ところが, 一般的な環境を想定した場合, 必ずしも硬い対象物ばかりではなく, ゴムまりのように柔らかい対象物も多い。このように柔らかい対象物の表面剛性を知ることは, ハンドが対象物の柔らかさに応じて適切な把握力を設定する上でも重要である。これまでにも, 対象物の柔らかさを考慮した最適把握力決定問題を取扱った研究^{(3)~(6)}があるが, 対象物の柔らかさは例外なく一次元ばねとしてモデル化されていた。

本研究では一次元線形ばねが何本も結合されたような対象物を想定する。このような対象物は干渉成分を含む剛性行列を用いて表現することができる。剛性をセンシングするためには, ハンドは対象物に力を加える必要があるが, 対象物の表面剛性が小さい場合, 力を加えることによって対象物の形状が大きく変形してしまい, 元々の対象物形状とセンシング時の対象物形状が大きく異なってしまう可能性がある。本研究では対象物の元々の形状と柔らかさを触覚によって推定するという立場で, 対象物とハンドの初期接触点と対象物の剛性を能動センシングによって推定する問題を取扱う。

2. 仮 定

本研究において設定したおもな仮定は以下のとおりである。

- (1) 対象物表面の剛性は線形範囲に限定する。
- (2) ハンドの各関節には, 関節トルクセンサと関節角度センサが備わっているものとする。
- (3) 対象物の変形はするが対象物全体の滑りによる移動は考えないものとする。
- (4) ハンドの可動範囲内に対象物が置かれているものとする。

* 原稿受付 1995年2月27日。

*¹ 正員, 神鋼リサーチ(株)(〒651 22 神戸市西区高塚台1 5 5)。*² 正員, 名古屋大学工学部(〒464 名古屋市千種区不老町1)。*³ 正員, 広島大学工学部(〒724 広島市鏡山1 4 1)。

(5) ハンドは指先を三次元空間内の任意の点に位置決めできるだけの自由度(最低3自由度)を有しているものとする。

仮定(1), (3), (4)は問題を簡単化するための仮定である。一般的なハンドの場合、関節トルクセンサと関節角度センサは備わっていることが多く、こういった意味で仮定(2)は特別な機構を想定している訳ではない。また、視覚を用いれば、ハンドを対象物近傍に位置決めすることは容易であるが、例えば視覚を許容したとしても、対象物の剛性は視覚ではわからない点に留意されたい。さらに仮定(5)は一般的なハンド⁽⁷⁾⁽⁸⁾が保有する自由度である。

3. センシング方法

一般に対象物の剛性をセンシングするためには、図1のように触覚に基づく能動センシングに頼らざるを得ない。以上の点を踏まえ、本研究では、触覚に準拠した能動センシングによって、接触点と剛性の両方をセンシングする方法について考察する。ハンドと対象物が接触した瞬間のセンサ情報を使って初期接触点 P_i を直接推定することは、衝突問題が絡んでくるため一般に困難であるが、平衡状態に達した後の点 P^* をトルクセンサ出力から推定することは、比較的容易である。以上の点を踏まえた上で、本研究では、まず平衡状態に達した後の点 P^* を推定し、次に、この P^* を用いて初期接触点 P_i を推定するという手順を踏む。

3.1 アプローチ ロボットが対象物にアプローチする方法としては、自己姿勢変形動作を利用した接触点検出において金子ら⁽¹⁾が採用したようにハンドを図2(a)のように直線にした状態で、ダンピング制御によって対象物に接近する方法を採用する。この方法は、幅広い領域をカバーできる、ハンドが対象物に接触した状態でサーボ系は自動的に速度制御からトルク制御に切り替わるため、ハンドが対象物に接触した

ことを判定する際の誤判定を防止できるといった利点を備えている。ただし、仮定(5)により、ロボットには x 軸回りの回転の自由度が備わっているが、アプローチの際にはこの自由度は実質的にロックしておくものとする。つまり、アプローチ相ではハンドの運動は二次元平面内に拘束される。その拘束平面を $x-y$ 平面と一致させて考える。

3.2 平衡点センシング 図2(b)のようにアプローチ相が終了した状態を想定してみよう。この状態の接触点を $P^*(x^*, y^*, 0)$ とし、最初にロボットが対象物に接触した点を $P_i(x_i, y_i, 0)$ とする。また P^* と P_i は式(1)が成立する程度に近い点であるものとする。

$$\sqrt{(x^* - x_i)^2 + (y^* - y_i)^2} < \varepsilon \quad (1)$$

ただし、 ε は正の微小量とする。図2(b)の平衡状態における関節トルクをそれぞれ、 τ_1, τ_2 とする。また、第2関節から接触点までの長さを l^* とすると、トルクと法線方向接触力 f_n との間に式(2), (3)の関係が成立する⁽⁹⁾。

$$\tau_1 = (l_1 + l^*)f_n \quad (2)$$

$$\tau_2 = l^*f_n \quad (3)$$

接触力としては f_n のほかに摩擦力による接線力 f_t もあるが、接触点が極端に関節に近くなければ、 f_t は関節トルクに関与しないことを付記しておく。式(2), (3)より f_n を消去すると、

$$l^* = \frac{l_1}{\tau_1 - \tau_2} \quad (4)$$

これより $x-y$ 平面内における点 P^* の座標は、接触点が極端に関節に近くなければ、近似的に式(5), (6)で与えられる⁽¹⁰⁾。

$$x^* = l_1 \cos \theta_1^* + \sqrt{l^{*2} + d^2} \cos \left(\theta_1^* + \tan^{-1} \frac{d}{l^*} \right) \quad (5)$$

Fig. 1 An overview of a finger sensing an environment

Fig. 2 Active Sensing Motions for Detecting Stiffness and Initial Contact Point

$$y^* = l_1 \sin \theta_1^* + \sqrt{l^{*2} + d^2} \sin \left(\theta_1^* + \tan^{-1} \frac{d}{l^*} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 d はリンク幅の半分を表している。以下添字 i は第 i 関節を表しているものとする。また上付きの添字 $*$ は平衡点を表しているものとする。もし、対象物が硬ければ、式(5)、(6)を用いれば、容易に接触点の座標を算出することが可能である。ところが、対象物が柔らかい場合には、この点は必ずしも初期接触点とは一致しない。

3・3 剛性センシング 一般に対象物の剛性をセンシングするためには、少なくとも対象物に能動動作を付加して、そのときの接触力の増加分と変位量をセンシングする必要がある。ところが、リンク内面が接触した状態で、能動動作を付加した場合、接触面積が急激に変化し、しかもその変化の仕方が対象物の形状に左右されやすいため、対象物の剛性を正確にセンシングしにくいといった問題点が生じる。そこで、本研究では、平衡点が求まった時点で、指先を平衡点に誘導し、剛性センシングは指先を使って行うことにする。このように指先を用いることにより、接触面積の変化による影響はリンク内面を利用する場合に比べ、はるかに緩和できる。

次に剛性の実験的なセンシング方法について考えてみよう。平衡点 P^* から指先を強制的に微小量変位ベクトル $\Delta \mathbf{x} \in R^{3 \times 1}$ を与えてみる。なお、ベクトルや行列の次元を $R^{m \times n}$ で表示するものとする。ただし、 m 、 n はそれぞれ行、列の次元に対応する。そのときの接触力の増加ベクトル $\Delta \mathbf{f} \in R^{3 \times 1}$ と $\Delta \mathbf{x}$ との関係は剛性行列 $K \in R^{3 \times 3}$ を介して、式(7)のように表すことができる。

$$\Delta \mathbf{f} = K \Delta \mathbf{x} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

$$K = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、剛性センシングではアプローチ相で考慮した拘束平面はなくし、三次元的な押し込み動作を想定する。また、 k_{xx} 、 k_{xy} 、 k_{xz} は、例えば平衡点で x 方向に単位の変位を与えたときに、 x 、 y 、 z 方向に現れる反力を意味している。ここで、指先力の増加分 $\Delta \mathbf{F} = (\Delta f_x, \Delta f_y, \Delta f_z)^t$ と関節トルクの増加分 $\Delta \boldsymbol{\tau} = (\Delta \tau_1, \Delta \tau_2, \Delta \tau_3)^t$ との間には、式(9)の関係が成立する。

$$\Delta \boldsymbol{\tau} = J^t \Delta \mathbf{F} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに $J \in R^{3 \times 3}$ はヤコビアン行列である。式(9)より、関節のトルクセンサ出力から指先の接触力が推定でき

る。実際には厳密な指先接触点がわからないと、 J が決まらないが、それが剛性推定へ及ぼす影響は極めて小さいと考えられる。そこで本研究では指先代表点のリンク長さを用いて J を決定する。一方、関節の変位ベクトル $\Delta \boldsymbol{\theta} = (\Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \Delta \theta_3)^t$ と指先変位ベクトル $\Delta \mathbf{x} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^t$ との間には、式(10)の関係が成立する。

$$\Delta \mathbf{x} = J \Delta \boldsymbol{\theta} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(9)、(10)より、関節トルクと関節角度から、指先変位および指先力が推定できる。

剛性をセンシングするということは、式(8)の九つのパラメータを決定することと等価である。ここで、 i 回めの押し込み動作で得られる関係式は、

$$\Delta f_x^{(i)} = k_{xx} \Delta x^{(i)} + k_{xy} \Delta y^{(i)} + k_{xz} \Delta z^{(i)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\Delta f_y^{(i)} = k_{yx} \Delta x^{(i)} + k_{yy} \Delta y^{(i)} + k_{yz} \Delta z^{(i)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\Delta f_z^{(i)} = k_{zx} \Delta x^{(i)} + k_{zy} \Delta y^{(i)} + k_{zz} \Delta z^{(i)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ただし、上付きの添字 j は第 j 回めの押し込み動作に対応していることを表している。これより1回のセンシング動作によって、三つの独立な式を得ることができる。したがって、剛性行列のすべての成分を決めるためには最低3回の異なった方向への押し込み動作を与える必要がある。本研究では複数回 ($n \geq 3$) の押し込み動作を通じて、最小二乗法により剛性行列の各成分を決定するものとする。すなわち、 $\mathbf{k} = (k_{xx}, k_{xy}, k_{xz}, \dots, k_{zx}, k_{zy}, k_{zz})^t$ 、 $\mathbf{A} \in R^{3n \times 9}$ を k_{xx} や k_{xy} などの係数 $\Delta x^{(i)}$ や $\Delta y^{(i)}$ を寄せ集めた係数行列、 $\mathbf{F}^t = (\Delta f_x^{(1)}, \Delta f_y^{(1)}, \Delta f_z^{(1)}, \dots, \Delta f_x^{(n)}, \Delta f_y^{(n)}, \Delta f_z^{(n)})^t$ とした場合、剛性の各要素は、式(14)で算出することができる。

$$\mathbf{k} = [\mathbf{A}^t \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^t \mathbf{F} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$n=3$ のとき、式(14)は $\mathbf{k} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{F}$ となり、剛性行列の各要素は一意に決まるが、局所的な3方向のデータだけで剛性行列を決めるより、いろいろな方向に押し込み動作を行い最小二乗法的な意味での平均化操作を行った上で剛性行列を決めるほうが、方向性の影響がでにくいことが予想される。

3・4 初期接触点推定 ここでは対象物が柔らかいことを想定した上で、平衡点から近似的な初期接触点を推定する方法について考察してみよう。ただし、平衡点 P^* はわかっているものとする。推定方法としては、大きく以下のように2とおりの方法が考えられる。

(1) 初期接触時の関節角メモリ方式：初期接触時の衝撃的な力が作りだすパルス状の関節トルクが計測されたときの関節角度 θ_i と平衡点での関節角度 θ_i^* を用いると、式(15)を使って平衡点を初期接触位置まで回転させることができる。

$$\mathbf{r}_i = \Delta \mathbf{R}' \mathbf{r}^* \dots\dots\dots (15)$$

ただし, $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i)'$, $\mathbf{r}^* = (x^*, y^*)'$ であり, $\Delta \mathbf{R}$ は式 (16) で与えられる,

$$\Delta \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\theta \\ \Delta\theta & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

ただし, $\Delta\theta = \theta_i^* - \theta_i$ である,

一方, 別方式として, 平衡状態から接触力が緩和される方向に第1関節を回転させ, 関節トルクが零になったときの関節角度を θ_i とする方法も考えられる,

(2) 剛性行列を使った逆算方式: もう一つの方法は, 3・3 節のアクティブセンシングにより求めた剛性行列から, 初期接触位置 $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i)'$ を近似的に推定する方法である. いま, 力の z 成分は小さいものとし, 仮想的な平衡状態での接触力を $\mathbf{f}^* = (f_x^*, f_y^*, 0)'$ とおく. ただし, f_x^*, f_y^* は平衡状態での接触力の x, y 成分である. 次に式 (17) を使って近似的に $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i)'$ を推定する,

$$(\mathbf{r}_i', w)' = (\mathbf{r}^{*'}, 0)' - \mathbf{K}^{-1} \mathbf{f}^* \dots\dots\dots (17)$$

ただし w は初期位置の z 方向成分であるが, アプローチ相でリンクの動きを二次元平面に拘束しているため, z 方向成分は自動的に決まる. したがって, この w についての関形式は $\mathbf{r}_i$ の推定に反映させないものとする,

4. 実験

4.1 実験装置

実験はロボットの機構上の制約

Fig. 3 An overview of experimental system

Fig. 4 Block diagram for the approach phase

から, 二次元平面内の運動に限定した. 図3に実験に使用した三関節二次元ロボットの外観を示す. このロボットのアクチュエータは絶対座標系に固定され, ワイヤ・プーリを介して各関節に動力が伝達されている. 各関節には張力差動形のトルクセンサ⁽¹¹⁾と関節角度センサが備わっていて, 本研究で考察しているセンシング方法が実現可能になっている. また実験モデルの第3リンクは $\phi 1.5 \text{ mm}$ の円筒状リンクや $\phi 18 \text{ mm}$ の指先リンクなど自由に交換できるようになっている. 図4はアプローチ時に使われたダンピング制御のブロック線図を示したものである. このサーボ系の特徴は, 速度サーボ系とトルクサーボ系の二面性を兼ね備えている点である. すなわち, リンクが自由空間を運動するときには, トルクフィードバックループは実質的に動作しないため, サーボ系はあたかも速度サーボ系のように振る舞う. 次にリンクが対象物や環境に接触すると, 関節の回転速度は零となるため, 速度フィードバックループはカットされた状態となるが, 一方で関節トルクセンサからのトルクフィードバックループが機能し, 実質的にはトルクサーボ系に切り替わる. この場合, 速度の目標値と速度の前向きゲインとの積 $\theta_1 k_v$ が関節トルクの目標値となる点に留意されたい,

4.2 平衡点検出 式(4)は, 各関節にアクチュエータが組込まれたロボットを想定した場合の接触点距離を与えるが, 本実験で使用したロボットのようにアクチュエータが絶対系に固定されているタイプのロボットの場合, 式(4)をそのまま使用することはできない. この場合, 関節トルクと接触点の法線方向の接触力とのバランス関係より, 式(18)が得られる⁽¹⁰⁾,

$$l^* = \frac{\tau_1}{\tau_2} l_1 \dots\dots\dots (18)$$

図5は式(18)を用いて, l^* をセンシングした結果を示したものである. ただし, l^* の真値は6 cmで第1関節のトルクは0.05 Nmから次第に増加させている. この実験より, 押し付けトルク τ_1 が小さいときには

Fig. 5 The detected l^* for various τ_1

l^* のセンシング誤差は大きいですが、 τ_1 が大きくなるにつれて真値に収束していることがわかる。押し付けトルクが小さいときには、関節の摩擦トルクやトルクセンサに重畳しているノイズの影響が相対的に大きくなり、センシング精度が悪くなるが、押し付けトルクを増やすにつれて、それらの影響を小さく押さえることができ、結果として l^* のセンシング精度が向上する。 l^* が求まれば、式(5)、(6)より平衡点の座標が決まるがセンシング精度は l^* のセンシング精度に依存する。

4.3 剛性感センシング 図6は、ばね定数が既知の一次元線形ばねに対して、ばね定数を推定した実験である。ただし、実験ではばねの長手方向に沿って押し込み動作を与えている。使用したばねのばね定数は

65.0 N/m である。図6より、真値とほぼ等しいばね定数が推定されていることがわかる。これより、関節トルクから指先力への変換、関節変位から指先変位の変換等、キャリブレーションを含めてうまく動作していることが確認できたことになる。

図7は2本の一次元線形ばねを2本指先に固定して、他端の固定位置を3とおりに変えた場合の剛性だ円(Stiffness Ellipsoid)を示したものである。この剛性だ円は以下のようにして算出した。最小二乗法により推定された剛性行列はそのままの形では、非対角成分が同じにならないため、剛性だ円を描くことができない。そこで K の各成分から、非対角項を平均した平均化剛性行列 $\bar{K}$ を式(19)で定義する。

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{xy} & k_{yy} \end{bmatrix} \quad (19)$$

ただし、 $k_{xy} = (k_{xy} + k_{yx})/2$ である。図7は、この k_{xx} 、 k_{xy} 、 k_{yy} を用い、式(20)、(21)で与えられる点の軌跡を描いたものである。

$$x = k_{xx} \cos(t) + k_{xy} \sin(t) \quad (20)$$

$$y = k_{yy} \cos(t) + k_{xy} \sin(t) \quad (21)$$

ただし、 $t:0 \rightarrow 2\pi$ まで変化させている。だ円の長軸方向は最も硬い方向に対応し、短軸方向は最も柔らかい方向に対応する。図7において、例えば(a)の場合、厳

Fig. 6 The estimation of spring constant for a 1D spring

Fig. 7 Stiffness sensing for two linear springs

(a) An overview of experiment (b) The influence of pushing direction (c) The influence of pushing angle β

Fig. 8 The estimation of stiffness ellipsoid using a thin finger tip

Fig. 9 The estimation of stiffness ellipsoid for a soft environment

密には円になるべきであるが、実際には、ばね定数の等しい2本の線形ばねの固定条件を厳密に合せることがむづかしいこと、および指先位置の変化に伴って α も微妙に変化し、最初に設定された角度を維持させ続けることはできないこと、などを考慮すれば一応もつともらしい形状が得られている。

図8は環境に固定されたゴムまりに対して、指先に $\phi 1.5$ mmの円筒状リンクを取付けて、ゴムまりに対して5 mmだけ押し込んだ状態から、能動動作を付加しているようすを示したものである。ここに β は法線方向から計った押し込み方向の最大角度を表している。実験では、はじめに β を一定にして、押し込み方向を2, 3, ..., と5とおとり変えたときに剛性だ円の変化について調べた。図8(b)は、この実験で得られた剛性だ円をすべて重ねて描いている。これより、いたずらに押し込み方向を変えなくても、必要最小限の2回で実質的な剛性だ円は求まっていることがわかる。次に押し込み方向を3とおりに変える場合に限定して、 β を $\pi/18$ から $4\pi/9$ まで $\pi/36$ ずつ変えたときに得られる剛性だ円をすべて重ねて描いたのが、図8(c)である。これより、 β を大きく変えても剛性だ円にはほとんど変化が見られない。したがって、指先と対象物との滑りを防ぐ意味から、 β は小さく設定しておいたほうがよい。ただし、極端に小さくしてしまうと式(11)～(13)に対応する独立な2個の式が得にくくなり、剛性の推定はむづかしくなる。したがって β には妥協点が存在するはずである。一方細いリンクでセンシング動作を実行した場合の利点は、押し込んでいったときに接触面積の変化が少ないことである。このような先細の指先はハンドとしての実用性には欠けるが、センシングする観点からはむしろ好ましい点に留意された。

図9は $\phi 18$ mmの半球形状の指先⁽¹²⁾を用いた場合

の剛性だ円について調べたものである。図9(a), (b)はそれぞれ2関節分、3関節分を使って行った実験結果である。3関節使った実験では指先の姿勢が押し込み動作中変化しないように制御されている。実験では押し込み深さを $\Delta s = 1$ mmから1 mm間隔で増やしていき、そのつど、押し込み動作を与えて剛性だ円を求め、図8の場合と同様にすべての剛性だ円を重ねて描いている。この場合、一番小さいだ円は $\Delta s = 1$ mmの場合に対応し、以下 Δs を増やすにつれて、だ円も大きくなっている。特徴的なことは、押し込み深さによって剛性だ円の大きさが逐一変化している点である。図9のように指先が細い棒の場合、押し込んだ際、対象物は局所的に大きく変形するが、周辺への影響はそれほど大きくないが、指先が太くなるにつれて、同じ量押し込んでも対象物側の変形は相対的に周辺に広がっていく。対象物の変形が大きくなると、ゴムまりの表面張力が増大し、結果として剛性が変化してしまう。またこの実験では、押し込み深さ Δs が小さいとき($\Delta s \leq 5$ mm)、指先と対象物との間で明確な滑りが観察された。このように滑りが発生すると、実際の変位が小さくなり、接触力が小さくなるが、ロボットは指令値分押し込んだものとして処理してしまうため、剛性は小さめに評価されてしまう。このように、ロボットを使った剛性センシングでは、接触部での滑りの有無がセンシング精度に直接関与する点に留意する必要がある。一方、全体的に2関節の場合、押し込み動作とともに指先リンクの姿勢が変化し、それに伴って対象物との接触位置も変化するため、だ円の変形も著しくなる。このように、指先が大きくなってくると、押し込み深さ Δs やその他の幾何学的形状の影響を受けやすくなる。

4.4 初期接触点検出 実際の初期接触位置 P_u と推定された初期接触位置 P_i との差を平衡点までの距離 Δs で規格化した誤差errorを式(22)で定義する。

$$\text{error} = \frac{\sqrt{(x_u - x_i)^2 + (y_u - y_i)^2}}{\Delta s} \dots\dots\dots (22)$$

平衡点と推定された剛性を用いて、式(17)を使って初期接触点を推定した場合、押し込み深さにも依存するが、10回の実験についての平均誤差は0.18であった。また初期衝突リンク角度を測定する方法で算出した場合、17回の実験についての平均誤差は0.13であった。全体的に不確定性要因の多い剛性を推定してから、初期接触点を推定するよりも、初期衝突リンク角度を直接測定するほうが、推定精度も良好でかつばらつきの少ない結果が得られることがわかった。

5. 結 言

本論文ではロボットハンドを使って、対象物の接触点と剛性をセンシングする方法について考察した。おもな結果は、以下のとおりである。

(1) ハンドの指先を対象物に押し当てた状態で、方向が異なる複数の能動動作を付加し、このときの指先力と指先変位の関係から、対象物の剛性行列を最小二乗法により推定することができる。ただし、指先と対象物との間に滑りが発生しないように注意する必要がある。また、剛性を計る観点からは、指先は細いほど環境に与える幾何学的影響が少ないため、正確な剛性計測が可能になる。

(2) 最初にリンクが対象物に衝突した際に発生するパルス状のトルクセンサ信号をトリガにして、第1関節の角度をセンシングすれば、平衡状態での接触点から初期接触点を推定することができる。また対象物の剛性がわかっていれば、平衡状態で指先に作用している接触力から剛性の逆行列を使って初期接触点を推定することもできるが、検出精度は前者に対して劣る。

文 献

(1) 金子真・谷江和雄, 自己姿勢変形性を利用したロボットハ

- 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 (1990), 12.
- (2) 金子真・谷江和雄, 3D リンク系の準静的自己姿勢変形性に関する基礎的研究, 日本ロボット学会誌, **9** 7 (1991), 55.
- (3) 福田敏男・北村尚之・谷江和雄, 対象物の特性を考慮したロボットの力制御方式(第1報), 機論, **53** 487, C (1987), 726.
- (4) 福田敏男・北村尚之・谷江和雄, 対象物の特性を考慮したロボットの力制御方式(第2報), 機論, **53** 496, C (1987), 2577.
- (5) 正司康雄・稲葉忠・福田敏男, 衝突を含むロボットマニピュレータの統一のアプローチに基づく安定制御, 日本ロボット学会誌, **11** 5 (1991), 55.
- (6) Kahng, J. and Amirouche, F., Impact Force Analysis in Mechanical Hand Design, *Int. J. of Robotics and Automation*, **3** 3 (1988), 158.
- (7) Salisbury, J. K. and Craig, J. J., Articulated Hands, *Int. J. of Robotics Res.*, **1** 1, (1982), 4.
- (8) Paetsch, W. and Kaneko, M., A Three Fingered, Multijointed Gripper for Experimental Use, *Proc. of the IEEE IROS*, (1990), 853.
- (9) Gordon, S. J. and Townsend, W. T., Integration of Tactile-Force and Joint-Torque Information in a Whole-Arm Manipulator, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (1989), 464.
- (10) 林辰憲・金子真, 自己姿勢変形動作の実現条件に関する実験的考察, 日本ロボット学会誌, **11** 5 (1993), 145.
- (11) 金子真・ほか3名, ブーリ・ワイヤ駆動系におけるトルクセンシングとトルク制御, 日本ロボット学会誌, **7** 1, (1989), 62.
- (12) 前川仁・ほか5名, 半球面光導波路を用いた指先搭載型触覚センサの開発, SICE 論文集, **30** 5 (1994), 499.