

ロボットによる指先での転がり接触を用いた物体操作と滑りの計測

本田, 久平
九州大学大学院システム情報科学府知能システム学専攻 : 博士後期課程

長谷川, 勉
九州大学大学院システム情報科学研究所知能システム学部門

松岡, 毅
福岡大学工学部

<https://doi.org/10.15017/1515719>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 6 (1), pp.69-75, 2001-03-26. 九州大学大学院システム情報科学研究所
バージョン :
権利関係 :

ロボットによる指先での転がり接触を用いた物体操作と滑りの計測

本田 久平*・長谷川 勉**・松岡 毅***

Measurement of Fingertip Slip in Robotic Manipulation with Rolling Contact

Kyuhei HONDA, Tsutomu HASEGAWA, and Takeshi MATSUOKA

(Received December 15, 2000)

Abstract: This paper describes a new method of detection and measurement of fingertip slip on the surface of a manipulated object in a multi-fingered precision manipulation with rolling contact. Due to the fact that slip sensors are still in a basic research phase and no slip sensor is compatible with the actual fingertip manipulation, our method is based on the multi-sensor fusion of vision, joint-encoders of the fingers, and finger-tip force/torque sensors. Position of the contact between the object and the fingertip is computed in realtime from the measured pose of the object and the fingertip position. Slip displacement of the fingertip contact is then separated from the displacement by rolling motion of the fingertip. Reliability of the slip detection from the noisy data is improved using the tangential-to-normal ratio of the measured force at the contact and the mutual relationship between the tangential force and the direction of the contact displacement. Results of the experiments show the effectiveness of the method.

Keywords: Slip detection, Multi-fingered manipulation, Rolling contact, Multi-sensor fusion

1. はじめに

多関節多指ハンドは、器用で繊細な作業の可能性を有するロボットハンドである。多数の自由度が並列にコンパクトな空間に配置された機構は、安定な把握と多様な操作を可能にしている。本論文では、指先だけの接触により物体を把持し操作する過程で、指先での滑りを検出する手法を提案する。

多関節多指ロボットハンドでは、1本の指の運動自由度は3程度であるため、複数の指の協調によって物体の6自由度の運動を制御しなければならない。このとき、現実の指先は体積のない点とみなすことができないため、把握物体と指との接触点を転がりや滑りにより移動させる必要がある。転がりによる接触点の移動は幾何学と運動学に基づく解析が可能で、対象の状態の局所的な予測や計測がしやすく、過度の力のかからない繊細な動作が期待できる。転がり接触による物体操作については、転がりにおける指先と対象物との関係が微分方程式として記述され、指先上の接触点の位置が正確に分かることを前提にした制御則が提案されている^{1),2),3)}。

多関節多指ハンドによる物体操作では、従来の平行2指ハンドとアームによる操作と異なり、指先と操作対象との接触状態の制御を通じて、操作対象と外部環境との接触状態を制御する。このとき、操作対象と外部環境と

の摩擦や衝突などの相互作用が、指先と把握中の操作対象との間に滑りを発生させることがある。この滑りは安定な把持を困難にし、関節角度限界への到達を早め、操作対象と環境との接触状態の認識を妨げるため、作業エラーの原因となる。

操作中の滑りが検出できれば、把持の破綻の前に持ち替えにより把持位置を変更したり、滑りが生じないように把握力の再設定を行うといった処置を施すことで、所望の操作を達成できるようになる。また、滑りの方向や大きさが分かると、滑りを積極的に利用して、より多様な操作が可能になると考えられる⁴⁾。

一方、多指ハンド指先の滑りの検出や滑り量の計測は極めてむずかしい。滑りに伴う振動を直接検出するセンサの提案もあるが^{5),6),7)}、いずれも基礎研究の段階であり、曲面である指先上に配置して動的な物体操作をおこなうながら計測/検出できる状況になっていない。また、一般的な力覚センサを用いて滑りを検出する研究も報告されているが、多関節2本指による2次元作業に限られている⁸⁾。

接触点の移動のない固定把握ならば、指先と物体との相対位置を視覚などにより計測して、その変化を滑りとして検出できる。しかし転がり接触を用いた物体操作では相対位置や接触点位置は変化するものであり、接触点移動速度は小さくしかも一定でないうえ、視覚系の誤差も加わるため、滑りによる移動のみを抽出し検出するのは極めて困難であった。これにたいし、本研究では、関節角度エンコーダ、指先力センサ、および対象物の位置と姿勢を計測する実時間視覚システムを用いた指先滑り検

平成12年12月15日受付

* 知能システム学専攻博士後期課程

** 知能システム学部門

*** 福岡大学工学部

出手法を提案する。これらのセンサはいずれも入手容易で、ロボットとして構成したときの耐久性にも問題は無いが、単独で用いてもノイズが多く誤差は避けられない。これらのセンサ情報を統合することにより、物体操作中の滑りの検出のみならず滑り量の計測をも可能となることを示す。さらに、滑り検出の意義を明らかにするため、実際に多関節多指ハンド機構に実装し、ピン挿入作業に適用して滑り検出実験をおこない有効性を確認した。

2. 滑り検出方式

2.1 原理

本研究での滑り検出の基本原理は、転がり接触による物体操作の制御ループの中で、接触点の移動量を計測し、転がりによる移動分を差し引いて滑りによる移動量を求めるというものである。まず、把握中の操作対象物体の位置と姿勢を、実時間ステレオ視覚計測と多関節指の指先位置情報とから求める¹¹⁾。次に物体表面と指先との相互位置関係から、接触点位置を求め、転がりを維持するための指関節制御量を求める¹⁰⁾。この実時間制御の過程で接触点移動量を逐次求め、転がりによる移動量を差し引いて滑り量が計測される。

しかし操作対象の位置姿勢計測値は誤差を含むため、制御ループの周期で得られる滑り量には無視できない誤差が含まれ大きく変動する。ここで、接触点での力の法線方向成分と接線方向成分に着目する。滑りが生じるときは、それらの比が摩擦係数より大きくなる。また、滑りの方向も接線力の方向と一致するはずである。指先力はトルクセンサで計測できるが、指の運動制御に伴うノイズが混入する。そこでノイズの影響はしきい値処理により抑えたうえで、上記力学条件を満たすときの滑り計測量を積分して滑り量とする。この方法により、単独ではノイズの大きなセンサ情報を統合し、安定した滑り検出が可能となる。

2.2 接触点における転がりの運動学と滑り速度

指先と操作対象に関する座標系をFig.1のように設定する。 Σ_b を慣性系の基準座標系、 Σ_o を操作対象の重心に固定された座標系、 Σ_{f_i} を各指に固定された座標系とする。 Σ_o 、 Σ_{f_i} 座標系から見た接触点をそれぞれ c_{o_i} 、 c_{f_i} とする。 Σ_b から見た Σ_o の位置を x_o 、 Σ_o の姿勢を R_o で表す。 Σ_b から見た Σ_{f_i} の位置を x_{f_i} 、 Σ_{f_i} の姿勢を R_{f_i} で表す。

接触点は、指先座標系での表現と操作対象座標系での表現の2通りで表現されるが、これらは、基準座標系 Σ_b から見たときには同じであるから、次式が得られる。

$$x_o + R_o c_{o_i} = x_{f_i} + R_{f_i} c_{f_i} \quad (1)$$

この式を微分すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} v_o + \omega_o \times R_o c_{o_i} + R_o \dot{c}_{o_i} \\ = v_{f_i} + \omega_{f_i} \times R_{f_i} c_{f_i} + R_{f_i} \dot{c}_{f_i} \end{aligned} \quad (2)$$

転がり接触の場合、基準座標系から見た、操作対象上の接触点の速度と指先上の接触点速度が等しくなる。すなわち、次式が成り立つ。

$$R_o \dot{c}_{o_i} = R_{f_i} \dot{c}_{f_i} \quad (3)$$

滑りが生じる場合、式(3)は成り立たない。このとき、滑り速度 v_{s_i} は、操作対象上の接触点の速度と指先上の接触点速度の差であり、次のようになる。

$$v_{s_i} = R_o \dot{c}_{o_i} - R_{f_i} \dot{c}_{f_i} \quad (4)$$

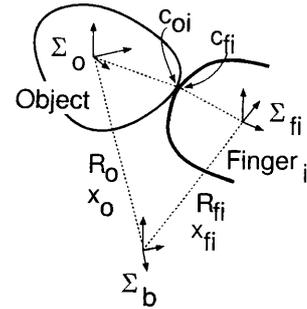


Fig.1 Coordinate systems.

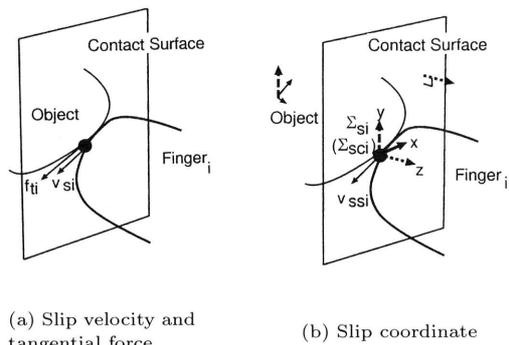
2.3 摩擦と滑り

指先と操作対象との間に滑りを起こさず、転がり接触を維持しているとき、操作対象の接触点での力は摩擦円錐内に含まれる。操作対象の接触点での力に関し、接触面に垂直な方向の成分を法線力 f_{n_i} 、接触面に正射影したものを接線力 f_{t_i} 、指と操作対象の間の最大静止摩擦係数を μ_i とすれば、次式が成り立つ。

$$\frac{\|f_{t_i}\|}{\|f_{n_i}\|} < \mu_i \quad (5)$$

滑り始めるとき、次式が成り立つ。

$$\frac{\|f_{t_i}\|}{\|f_{n_i}\|} = \mu_i \quad (6)$$


Fig.2 Slip at contact point.

操作対象の表面の粗さが一様であり、かつ指先の表面の粗さが一様であるとき、接触面上での滑りの方向と接線力の方向は同じになる (**Fig.2(a)**)⁹⁾。このとき、次式が成り立つ。

$$\frac{v_{s_i} \cdot f_{t_i}}{\|v_{s_i}\| \|f_{t_i}\|} = 1 \quad (7)$$

滑りを表現する座標系として、接触点を原点とし、接触法線（操作対象の外側に向かう方向が正）をz軸とする座標系 Σ_{sc_i} を設定する (**Fig.2(b)**)。この座標系のy軸の方向は、操作対象座標系の1つの軸を接触面に正射影した方向とする。また、 Σ_{sc_i} のx軸とy軸からなる2次元座標系を滑り座標系 Σ_{s_i} とする。

滑り座標系 Σ_{s_i} で表現した滑り速度を v_{ss_i} とすれば、滑り量 s_i は、この滑り速度 v_{ss_i} を積分して求めることができる。

2.4 滑り検出の実装

式 (4) で計算された滑り速度が0でなく、計測された力が式 (6) と式 (7) を満たしているとき、滑りが生じていると判断すればよい。実システムにおいては、モデル誤差や計測誤差を考慮し、式 (4)、式 (6)、式 (7) を以下のように修正して、滑りの検出、及び滑り量の計算を行う。

センサ信号の振動の影響を軽減するため、式 (4) における \dot{c}_{o_i} 、 \dot{c}_{f_i} の計算には、現在の接触点位置の値 $c_i(t)$ と kT 秒前における接触点位置の値 $c_i(t-kT)$ を用いる。ただし、 T は指の制御周期、 k は操作の速度に応じて決める値である。このとき、式 (4) は次のようになる。

$$\begin{aligned} v_{s_i}(t) = & R_o(t)((c_{o_i}(t) - c_{o_i}(t-kT))/kT) \\ & - R_{f_i}(t)((c_{f_i}(t) - c_{f_i}(t-kT))/kT) \end{aligned} \quad (8)$$

指先と操作対象物体間の最大静止摩擦係数 μ_i は、操作

前に概略の値を推定することはできるが⁸⁾、把握力の大きさや把持形態によってその値は変化する。また、指先が滑っているときは、摩擦力は動摩擦係数に依存するが、この動摩擦係数は最大静止摩擦係数よりも小さい。そこで、推定した μ_i の最小値よりさらに小さい値 β_i を用いて、式 (6) を次のように修正する。

$$\begin{aligned} \text{(条件I)} \quad & \frac{\|f_{t_i}(t)\|}{\|f_{n_i}(t)\|} \geq \beta_i \end{aligned} \quad (9)$$

また、式 (7) で表現される力の方向と滑りの方向の制約は、誤差を考慮して修正する。ただし、力の方向と滑りの方向との誤差許容角度を θ_i とすると、 $\gamma_i = \cos\theta_i$ である。

$$\begin{aligned} \text{(条件II)} \quad & \frac{v_{s_i}(t) \cdot f_{t_i}(t)}{\|v_{s_i}(t)\| \|f_{t_i}(t)\|} \geq \gamma_i \end{aligned} \quad (10)$$

式 (8) によってノイズの影響を軽減できるが、モデル誤差の影響は避けられず、転がり接触が維持されている場合でも、式の値は0にならない。そこで、条件I (式 (9)) と条件II (式 (10)) を同時に満たす時、滑りであると判定する。

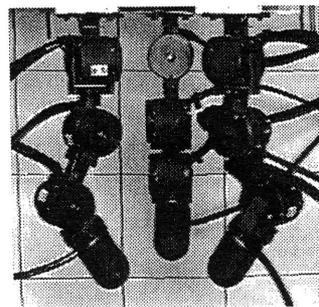
時刻 t_0 から時刻 t までの、滑り座標系 Σ_{s_i} から見た滑り量 $s_i(t)$ は、次式で求める。

$$s_i(t) = \int_{t_0}^t g_i(u) v_{ss_i}(u) du \quad (11)$$

ただし、 $v_{ss_i}(t)$ は滑り座標系 Σ_{s_i} から見た滑り速度であり、 $g_i(t)$ は、時刻 t において滑りを検出したときには1、それ以外は0をとる2値関数である。

3. 多関節多指ロボットハンドシステム

本研究で用いたハンドを**Fig.3**に示す。ハンドは、3関節指3本を有し、指1本の長さは約18cmである。ハードウェア構成とセンサ配置を**Fig.4**に示す^{10),11)}。


Fig.3 3-joint 3-fingered robotic hand.

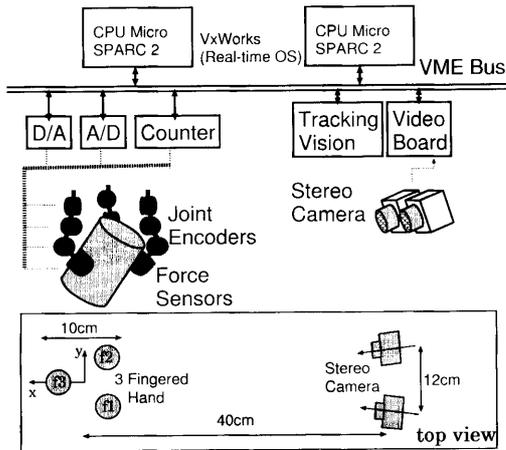


Fig.4 Hardware structure.

操作対象と指との接触は指先のみであり、操作対象は転がり接触に基づき制御される。まず、目標操作を基に各接触点の速度を計算し、次に各接触点の速度と各関節の速度を関係づけるヤコビ行列により目標の各関節の速度を計算する。また、安定な把握が実現されるよう、各指先における把持内力も計算される。目標の各関節の速度と把持内力を達成するように関節制御が実行される。毎秒77回の制御サイクルが得られている。

外界センサとして、各関節の角度検出用のロータリーエンコーダがあり、指の幾何モデルにより、指先の中心位置が計算される。また、指先リンクには6軸力覚センサが装備され、指先接触点での力を知ることができる。

外界センサとして、実時間視覚システムがある。このシステムでは、ステレオビジョンと指先の接触覚を融合し、操作対象の位置姿勢を実時間で計測する。まず、操作対象上のテクスチャパターンを特徴点として、ステレオカメラで観測し、それらの特徴点の3次元位置を計測する。次に、これらと物体の幾何学モデル及び指先の中心位置を基に、操作対象の位置姿勢が計算される¹¹⁾。毎秒30回で計測が行われている。計測誤差は位置誤差平均0.5[mm]、回転誤差平均0.8[deg]である。

4. 滑り検出実験

種々の誤差要因のもとでクリアランスの小さなはめ合いを達成する組立作業 (Peg-in-Hole作業) について滑り検出実験を行った。一般に組み立て作業では、操作対象と環境との接触を実現し、その接触を維持したまま新たな接触状態を作り出すことを繰り返して目標状態を達成する。この過程で操作対象と環境との接触に伴う複雑な相互作用が生じる。特に摩擦力は動的に変化するため、把握内力の設定や目標達成の判定を適切かつ確実に行うのは容易でない。壊れやすい物体の操作や環境への影響を考慮して、把握内力や環境への押しつけ力を小さくす

ると、指先での滑りも生じやすくなる。滑りが発生すると操作が不安定になり、目標達成の判定にも失敗することが多くなる。

本章では、Peg-in-Hole作業を対象に実験し、どのように滑りが検出されるかを示すとともに、同様な運動軌跡でも環境との接触のない操作では滑りが生じず、検出もされないことを確認する。また、滑り検出結果を利用した制御実験も示す。

4.1 組立作業の戦略

作業目標の達成を確実にするため、環境と操作対象との接触状態の遷移に対応した3つのプリミティブ操作 ("Vertical Move-to-touch", "Horizontal Move-to-touch", "Rotate-to-insert") を定義し¹⁰⁾、これを順次実行する (Fig.5)。

(操作1) "Vertical Move-to-touch"

PegがHoleの上空で斜めに把持された状態から、Holeの縁に接触するまで垂直方向に並進するように制御される。接触判定は、Pegに加わる垂直方向の外力の変化の大きさをしきい値処理することにより行われる。

(操作2) "Horizontal Move-to-touch"

Pegは、垂直方向に一定の力で押し付けを行い、かつ、水平方向にHoleの縁と接触するまで並進するように、ハイブリッド制御される。接触判定は、Pegに加わる外モーメントの変化の大きさをしきい値処理することにより行われる。

(操作3) "Rotate-to-insert"

Pegは、回転および軸方向に並進するように制御されてHoleに挿入される。目標状態達成の判定は、垂直方向についてPegに加わる外力の変化をしきい値処理することと、垂直方向のPegの移動量が一定値に達することの論理和によって行われる。

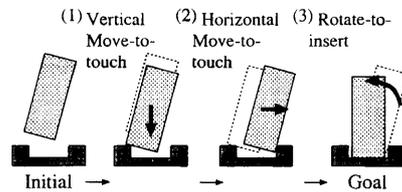


Fig.5 Peg-in-hole task.

物体配置や対象操作の位置誤差を考慮して、目標状態達成の判定に力またはモーメントの変化のしきい値処理を用いている。プリミティブの導入により動作の意味が明確になっているので、判定が簡単化できている。ただし、判定に失敗することもあるので、視覚により対象物

体の姿勢を監視し、初期配置から想定しうる姿勢変化の幅を超えた場合はエラーとして、しきい値を修正し作業をやり直すりカバリ処理を開発している¹⁰⁾。

4.2 組立作業の実行と滑り検出

操作対象のPegとして、直径40[mm]、高さ125[mm]、重量100[g]のベークライト円柱を用い、はめ合い実験を行った。Pegを把握したときの3本の指先の初期配置、操作過程の状態遷移の様子をFig.6に示す。

操作1は目標状態で停止した。操作2では、Pegの底部とHoleの上縁との接触を維持しつつ、Pegを水平に滑らせて新たな接触状態の達成を試みたが、接触判定のしきい値が大きすぎたため、接触した後も動作が続いた。把持内力を小さくしていたため指先が滑り、Pegが大きく傾いたが、視覚による傾き計測により停止した(操作2E)。操作3Eでは、PegがHoleに引っかかりながら操作が行われたため、Pegの挿入には成功したが指先では滑りが生じた。

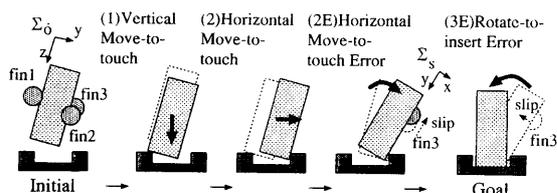


Fig.6 Peg-in-hole task with error.

この実験においては、操作2Eと3Eにおいて滑りが発生し目視でも確認できている。このときの指3 (Fig.6中のfin3)の滑り検出の結果をFig.7とFig.8に示す。図中の一点鎖線の縦線で分けられた部分が各操作プリミティブの実行に対応する。滑り判定と計測にあたって、式(8)(9)(10)の各パラメータの値は $\beta = 0.45$, $\gamma = 0.45$, $k = 3$, $T = 0.013$ である。また滑り計測座標系 Σ_{s_i} のy軸は円柱の軸を接触面に正射影した方向としている。

Fig.7は上から、サーボサイクルで計測された滑り速度 v_{ss_i} のx軸成分、同y軸成分、条件I、条件II、条件IとIIの論理積である。図中、太い実線は条件Iと条件IIのしきい値を表す。転がり接触による制御則中で必要な指先接触点位置の計算に、視覚で計測された操作対象の位置姿勢を用いており、これが誤差を持つため、滑り速度は大きなノイズを含んでいる。

Fig.8は上から、条件IとIIが成立するときの滑り速度だけを積分して得られた滑り量のx軸成分、y軸成分、条件IとIIには無関係に滑り速度を積分したもののx軸成分とy軸成分である。ただし、各操作プリミティブの切り替え時点で積分量をゼロとしている。

指3では、操作2Eで操作対象座標系のz軸(滑り座標系

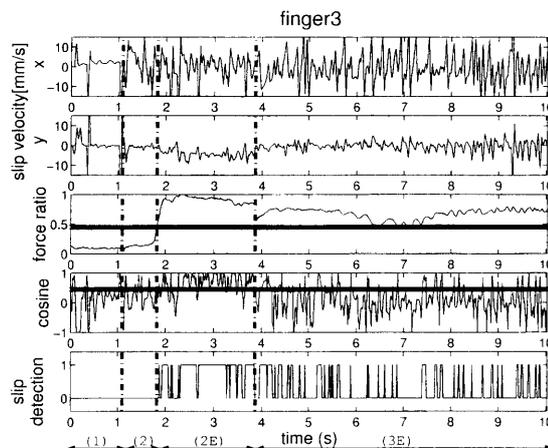


Fig.7 Slip detection in peg-in-hole task(finger 3).

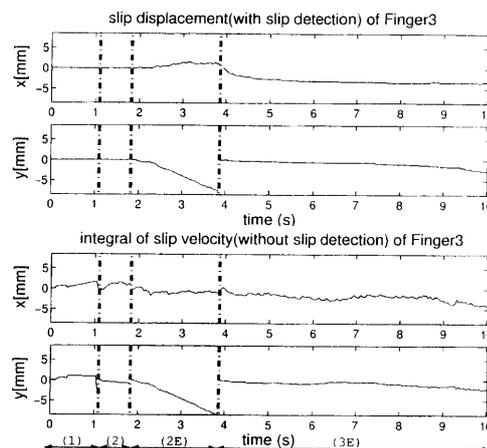


Fig.8 Slip displacement in peg-in-hole task(finger 3).

のy軸と平行)のマイナス方向への指先滑りが観測され、操作3Eで操作対象座標系のy軸(滑り座標系のx軸とほぼ平行)のマイナス方向への指先滑りが観測された。操作1と操作2における指先滑りは微小で、目視では確認できなかった。Fig.8の結果から、条件IとIIが成立するときの滑り量の計測が、目視による観測と一致した結果となっていることがわかる。

なお、操作2Eにおいて、物体表面上での接触点移動量は約10.5[mm]で、そのうち滑りによる移動量は約8.1[mm]、転がりによる移動量は約2.4[mm]である。

4.3 転がり接触が維持された物体操作

操作対象を環境から離して、それらの間の衝突や摩擦がない状態で十分な内力をかけ、滑り検出実験を行った。この操作においては、転がり接触が維持されており、滑りは目視では生じていない。前節の実験と比較するために、

5つの経路点を与え、軌道をほぼ同じにした (Fig.9).

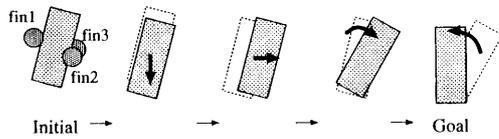


Fig.9 No collision with environment.

指3での滑り検出の信号としきい値をグラフにしたものをFig.10に示す。条件I, IIを考慮せず、滑り速度をそのまま積分したものをFig.11に示す。Fig.10の滑り速度とFig.11の値には、誤差成分が見られ、0になっていないが、式(9)(10)の条件も併せて考慮すると、滑りが生じていないことが分かる。他の指に関しても滑りは検出されていない。

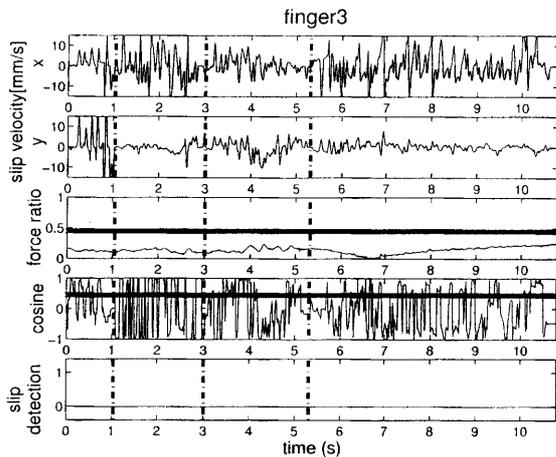


Fig.10 Slip detection without collision(finger 3).

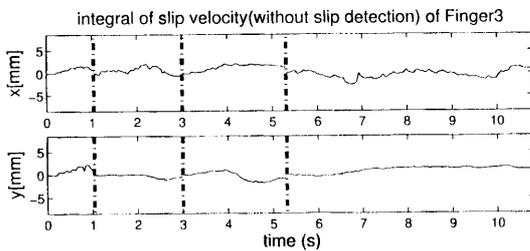


Fig.11 Integral of slip velocity(finger 3).

4.4 滑り計測値を用いた作業エラー検出とリカバリ

滑りの検出と計測結果をどのように利用するかは達成すべき作業により異なる。本節ではその効果を明らかに

するため行った2つの追加実験について述べる。

まず、指先の滑り量がしきい値(1.0[mm])を越えた時、作業エラーと判断するプログラムを組み込んだうえで、Peg-in-hole作業を4.2節と同様の環境で実行した。操作1, 操作2を正しく実行した後、操作2Eでエラーを検出した。このときの指3の滑り量のx軸成分とy軸成分をFig.12に示す。

視覚により円柱軸の傾きを監視してエラーを検出する方法と比較して、滑り量が小さく、時間的にも早い段階で判定が可能となっている。この操作2Eでは、円柱の底面を穴の縁に押しつけながら水平に滑らすときに生じる摩擦抵抗のため円柱の傾きが振動変化する。さらに視覚による傾き計測誤差も考慮すると、傾き変化量によるエラー判定ではしきい値に余裕を持たせる必要がある。一方、滑りは把持や操作を直接的に不安定にするため、計測量が小さい段階でエラーと判定しても誤る可能性が低い。

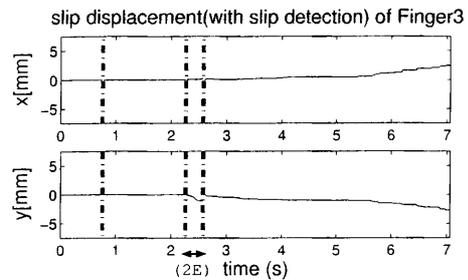


Fig.12 Slip displacement with 2E error detection(finger 3).

次に、エラー検出結果に基づいた把握内力の再設定をおこない、滑りの抑制を試みた。4.2節の操作3Eに関し、各指での滑り量がしきい値(1.0[mm])を越えた時、把握内力を大きくし、操作を続行する。ここでは、操作3Eでのみエラー検出を行った。このときの指1の滑り量をFig.13に示す。エラー検出を行わないときの滑り量をFig.14に示す。Fig.13では、滑りが抑制されており、滑り検出結果が有効に利用できていることが分かる。

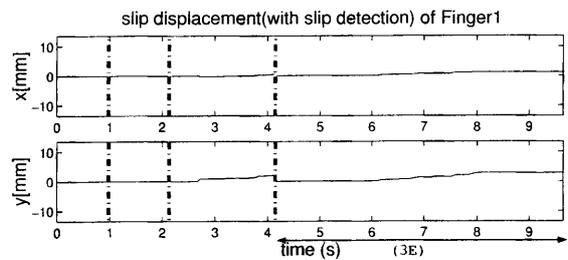


Fig.13 Slip displacement with 3E error detection(finger 1).

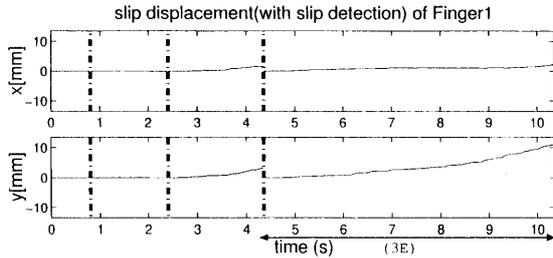


Fig.14 Slip displacement without error detection(finger 1).

5. む す び

多関節多指ロボットハンドによる物体操作中の滑りの検出および滑り量の計測手法について述べた。ビデオレートステレオ視覚システムと多関節指の関節エンコーダおよび指先の力モーメントセンサを併用し、得られる感覚情報を統合することにより、ノイズの多い信号から滑りを検出し計測できた。これらのセンサはいずれも特殊な試作品でなく入手容易であり、耐久性も高く、実際の物体操作と微小な滑りの検出とを両立している。

本研究は、多関節多指ハンドによる繊細で器用な操作の実現に向けた一歩である。壊れやすい物体や環境への影響を考慮して、把握内力は小さく抑えている。また、汎用の操作システムの構築という観点から、操作中の対象物体全体を監視できる広視野の視覚システムを用い、対象の一部のみを拡大して観測し分解能と精度を稼ぐという手法はとらなかった。滑りの防止あるいは滑り検出のみを目的としたシステムではないからである。結果として、汎用の操作性を損なうことなく滑りの検出と計測が実現できた。

参 考 文 献

- 1) J. Kerr and B. Roth: "Analysis of Multifingered Hands," Int. Journal of Robotics Research, vol.4, no.4, pp.3-17, 1986.
- 2) A. Cole, J. Hauser and S. Sastry: "Kinematics and Control of Multifingered Hands with Rolling Contact," Proc. 1988 IEEE ICRA, pp.228-233, 1988.
- 3) H. Maekawa, K. Tanie and K. Komoriya: "Tactile Sensor Based Manipulation of an Unknown Object by a Multifingered Hand with Rolling Contact," Proc. 1995 IEEE ICRA, pp.743-750, 1995.
- 4) 鄭, 中島, 吉川: "3指ハンドを用いた操りにおける指の滑りと対象物運動の制御", 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.6, pp.813-821, 1995.
- 5) 山田, カトコウスキー: "3軸力覚・振動覚を有する触覚センサの開発と物体の並進・回転滑り識別への応用", 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.4, pp.539-544, 1995.
- 6) H. Shinoda and S. Ando: "A Tactile Sensor with 5-D Deformation Sensing Element," Proc. 1996 IEEE ICRA, pp.7-12, 1996.
- 7) Y. Yamada, H. Morita and Y. Umetani: "Vibrotactile Sensor Generating Impulsive Signals for Distinguishing Only Slipping States," Proc. 1999 IEEE IROS, pp.844-850, 1999.
- 8) R. Bayrleithner and K. Komoriya: "Static Friction Coefficient Determination by Force Sensing and Its Application," Proc. 1994 IEEE IROS, pp.1639-1646, 1994.
- 9) S. Goyal, A. Ruina and J. Papadopoulos: "Limit Surface and Moment Function Descriptions of Planar Sliding," Proc. 1989 IEEE ICRA, pp.794-799, 1989.
- 10) 松岡, 長谷川, 本田, 桐木: "作業状態観測と評価に基づく多関節多指ハンド物体操作システム", 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.5, pp.696-703, 1999.
- 11) 長谷川, 本田, 松岡, 桐木: "多関節多指ハンドのための操作対象の位置と姿勢のセンシング- 視覚情報と接触情報の融合 -", 電気学会システム情報部門誌, 第118-C巻, 第9号, pp.1340-1346, 1998.

