高速触覚システムを用いたペン状物体の高速把持・操り

High-speed grasp and manipulation of a pen-shaped object using a high-speed multifingered hand with high-speed tactile sensor

○学 石原 達也 (東大) 正 並木 明夫 (東大) 正 石川 正俊 (東大) 正 下条 誠 (電通大)

Masatoshi ISHIKAWA, Univ. of Tokyo, Hongou 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo

Akio NAMIKI, JST / Univ. of Tokyo

Makoto Shimojo, Univ. of Electro-Communications, Chohugaoka 1-5-1, Chohu, Tokyo

Tatsuya Ishihara, Univ. of Tokyo

Key Words: *tactile feedback, robot hand, pen spinning*

We propose a tactile feedback system in real time using a high-speed multifingered robot hand and high-speed tactile sensor. The hand and the sensor is respectively capable of high-speed finger motion up to 180 deg per 0.1 s and high-speed tactile feedback with a sampling rate higher than 1 kHz. We have achieved the pen spinning task using the two robot fingers. In this paper, we describe dynamic pen spinning as an example of a skillful manipulation task with the three robot fingers using the system. The paper describes the tactile feedback control strategies and experimental results.

1. はじめに

Fig. 1.1 Model of the pen spinning.

我々は、視覚とロボットハンドとの感覚統合によって、人間や従来あるロボットをはるかに超える超高速・高機能ロボットハンドシステムを構築した。また、それによって様々な高速動作を要するタスク¹⁾²⁾³⁾を実現させてきた。高速動作の必要性としては、例えば産業界において効率化を可能ならしめることや、ロボットが外界変化に対応して瞬時に判断・行動することが可能となることなどが挙げられる。

しかし、より器用な操作を追求するためにはロボットハンドに細かな接触操作が要求される。そこで触覚が重要な役割を果たすが、現状では、触覚フィードバック⁴⁾⁵⁾⁶⁾を高速作業に適応した例は少ない。

現在、高速ロボットハンドのサンプリングタイムが1[ms]程

度であることを考えると、触覚センサの応答性がこれよりも速いことが望まれる。これによって、シンプルかつ効果的なシステムを構築することが可能となる。我々は電通大の下条研で開発された高速触覚センサ⁷⁾を使用することにより新たなタスクの実現を目指す。

本稿では以上の点を踏まえて、高速動作に因らなければできない器用なタスクの一例として、三指高速ロボットハンドでペン状物体を落とすことなく高速回転させることを目指す(図1.1)。これは、手の対象物体としてペン状物体が多いからである。以下にタスク実現への一過程として、まず、二本指でのペン振り動作を実現させるための戦略とアルゴリズムを示す。その後に応用として三本指でのペン回し動作の実現における戦略と結果を示す。

2. 高速ハンドと触覚センサ

三本指軽量高速ロボットハンドの外観を、図2.1に示す。このロボットハンドは1[ms]のサンプリングレートを持ち、0.1[s]間に180[deg]の高速動作が可能である。ロボットハンド各関節角度は下方方向を正とする(図2.2)。

また、触覚センサの外観、内部構造をそれぞれ図2.3に示す。この触覚センサは、1[ms]以内の応答性を持ち、負荷の値と2次元負荷重心の位置(X, Y)を計測でき、今回はロボットハンド各指のlink1に取り付けられている。

3. 二本指ペン振り動作実現への戦略とアルゴリズム

ペン状物体の長軸方向と鉛直軸との角度 θ (図1.1)が望ましい軌道を描くようにロボットの各関節軌道を動かす。本章では、幾何学的な各関節角目標軌道式導出に加えて、触覚フィードバックにより各関節軌道を修正していく手法について述べる。

3-1 目標軌道 ペン状物体を回転させるにあたって以下の仮定をおく。

(i) ペン状物体は、(x, y)で表される二次元平面(Σ_0)上を運動する(図3.1)。

(ii) link1Rの中心点は x 軸上を、link1Mの中心点は y 軸上をそれぞれ動く。

Fig. 2.1 Photo and model of High-speed multifingered hand with tactile sensors..

Fig. 2.2 Angle of the robotic finger.

以上の仮定により、ロボットハンドの各関節角目標軌道 q が以下のように表せる。

$$q_{1M} = -q_{2M}, \quad q_{1R} = -q_{2R} \quad (1)$$

$$q_{1M} = \sin^{-1} \left\{ \frac{2(r+l)\sin\theta - 2d\cos\theta + a}{b} \right\} \quad (2)$$

$$q_{1R} = \sin^{-1} \left\{ \frac{-2(r+l)\cos\theta - 2d\sin\theta + b}{b} \right\} \quad (3)$$

ここで、添え字はそれぞれ図 2.1 に対応させる。

また、ペン状物体とハンドとの間で滑りがないと仮定すると以下の式が得られる。

$$d = r\theta + d_0 \quad (4)$$

ここで、 d_0 は初期状態によって定まる定数である。

3-2 触覚フィードバック ハンドにペン状物体を回転させる際、初期状態や物体の大きさの違い等により、各関節角度に

Fig. 2.3 Photo and structure of tactile sensor.

Fig. 3.1 Approximated model of front view.

目標軌道を与えるだけでは成功しない。そこで中指の各関節を目標軌道に沿わせながら、以下に述べる触覚センサによるフィードバックを用いて両サイドの指の各関節軌道を補う。

3-2-1 カフィードバック 触覚センサにより得られる力の値 f によって、link2R の軌道を修正する。以下の式により、修正目標軌道 q'_{2R} を得る。

$$q'_{2R} = q_{2R} + KJ(\theta) \int (F - f) \cdot dt \quad (5)$$

ここで、 $K, J(\theta), F$ はそれぞれ、比例ゲイン、適当なスカラー、そして力の目標値である。

3-2-2 位置フィードバック 触覚センサにより得られる位置情報 Y によって、link1R の軌道を修正する。ここでは、触覚センサによって計測される Y 軸方向の値が一定の範囲内に収まるように link1R の関節角度を微小に変化させる (図 3.2 参照)。以下の式により、修正目標軌道 q'_{1R} を得る。

$$q'_{1R} = q_{1R} + \delta \quad (6)$$

ここで δ は微小変位である。

Fig. 3.2 Control model of the side top finger.

Fig. 4.1 Trajectory of side root finger with force feedback.

4. 実験結果

今回ペン状物体として、直径 1.7[cm]、長さ 35[cm]、重さ 2[g] の円柱を使用した。また、回転速度を 5[Hz] とした。

円柱が以下の軌道で 10 周期ペン振り動作できるように、ロボットハンドの各関節角度を動かした時の実験結果を以下に示す。

$$\theta = \frac{\pi}{3} \sin(10\pi t) \quad (7)$$

4-1 カフィードバック 図 4.1 に、目標軌道とカフィードバックによって修正した目標軌道を示す。カフィードバックによる軌道修正により、物体を落とさないように link2R の関節角度がより内側に遷移していることが分かる。

4-2 位置フィードバック 図 4.2 により、触覚センサの位置フィードバックによって物体の Y 軸上での動きが特定の範囲 (-0.5~0.5) に収まるように制御されていることが分かる。

4-3 考察 図 4.3 から実際にペンがどのような動きをしたか観察できる。ここでセンサ上の X の値の振幅が約 1.5 cm であり、式 (4) から実際のペンの振幅は 50.6 度と推定される。また、二本指でのペン回振り動作の様子を示した高速写真を図 4.4 に示す。

5. 三本指ペン回し動作実現への戦略と実験結果

以上のペン振り動作の応用として、以下の 3 ステップを繰り返すことによってペン回し動作を実現させた。ただし、() 内は一回目の流れによるものである。

1. 二本指 (link1R, link1M) でのペン振り動作によって、ペンが水平近くになるまで勢いを与える。
2. θ の理論値から、片指 (link1R) を離して反対側の指 (link1L) で把持するタイミングを逆算する。

Fig. 4.2 Trajectory of side top finger and Y position.

Fig. 4.3 Movement of stick (X position on the side top finger).

3. 反対側の指にてキャッチ

今回は 80[deg] になる 30[ms] 前に、片指を離すと同時に、反対側の指でキャッチに移行させた。三本指でのペン回しの様子を示した 30[ms] 毎の高速写真を図 5.1 に示す。また、これらの実験結果は Web⁸⁾ において動画として見る事ができる。

6. まとめ

高速ロボットハンドと高速触覚センサを用いて、リアルタイムでの触覚フィードバックシステムを構築した。また、システムの有効性を実証するために高速ペン回し動作を実現した。今後の展望としては、視覚情報も取り入れた高速視触覚システムによってより高度な高速把持・操り動作の実現を目指す。

参考文献

- 1) 妹尾, 並木, 石川. High-Speed Batting Using a Multi-Jointed Manipulator. IEEE Int. Conf. Robot. and Automat, pp. 1191-1196, 2004.
- 2) 今井, 並木, 橋本, 石川. Dynamic active catching using a high-speed multifingered hand and a high-speed vision system. Proc. IEEE Int. Conf. Robot. and Automat., Vo. 2004, No. 2, pp. 1849-1854, 2004.
- 3) 塩形, 並木, 石川. Robot Dribbling Using a High-Speed Multifingered Hand and a High-Speed Vision System. Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp. 3945-3950, 2005.
- 4) 前川, 谷江, 小森谷. Tactile Feedback for Multifingered Dynamic Grasping. IEEE Control Systems Magazine, Vol. 17, No. 1, pp. 63-72, 1997.
- 5) 大隅, 石井, 高橋, 梅田, 木下. Optimal Grasping for a Parallel Two-Fingered Hand with Compliant Tactile Sensors. Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pages 799-804, 1999.
- 6) J. S. Son and R. D. Howe. Tactile Sensing and Control with Multifingered Hands. Proc. IEEE Int. Conf. Robot. and Automat., Vo. 4, pp. 3228-3233, 1996.
- 7) 下条, 谷保, 並木, 石川. 2 次元分布加重測定法を用いた触覚センサへの応用. 第 5 回システムインテグレーション部門学術講演会, pp. 1144-1145, 2004.
- 8) <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/PenSpinning/>

0 [ms]

20 [ms]

48 [ms]

72 [ms]

132 [ms]

156 [ms]

184 [ms]

204 [ms]

Fig. 4.4 Continuous sequence of pictures (with two robot fingers).

Fig. 5.1 Continuous sequence of pictures (with three robot fingers).