

# ロボット指の Active Friction Control

白井 達也, 金子 真, 辻 敏夫  
広島大学

## Active Friction Control of Robot Finger

Tatsuya Shirai, Makoto Kaneko and Toshio Tsuji  
Hiroshima University

**Abstract**— While the *wedge-effect* can be conveniently utilized when a multi-fingered robot hand detaches a cylindrical object from a table, such an approach easily fails under a significant contact friction. To cope with this problem, *Active Friction Control (AFC)* is introduced for reducing the contact friction between the object and the fingertip. We first show that by utilizing *wedge-effect* with the *AFC*, a multi-fingered robot hand can lift up an object which has a significant contact friction. We also implement the *AFC* into the grasping procedure of a three-fingered robot hand.

**Key Words:** Active Friction Control, Multi-fingered Robot Hand, Compliant Motion

### 1. はじめに

多指ロボットハンド(以下,ロボットハンド)を使ってテーブル上に置かれた円柱物体にアプローチし,最終的に包み込み把握する問題を考えてみよう.この際, Fig.1のように,ロボットハンドの指先を対象物の底部に押し込む(くさび効果)ことにより,多くの場合,円柱をテーブルから持ち上げることができる.しかし, Fig.1(a)のように対象物の表面摩擦が大きい場合,指先間で接触力がバランスし,くさび効果を利用した方法は,うまくいかなくなる.ところが,このような場合でも,もし, Fig.1(b)のように接触点の摩擦を十分小さくすることができれば,対象物の持ち上げが可能となる.以上の点を踏まえ,本研究では,ロボット指表面の摩擦を能動的に変える制御方法 (*Active Friction Control*: 以下 *AFC*) について考察する.はじめに,ロボットハンドに *AFC* を実装する方法を提案すると共に,実機を用いた実験により *AFC* の効果を確認する.さらに, *AFC* をロボットハンドによる対象物の把握戦略に導入し,その実用性を検証する.

### 2. Active Friction Control

#### 2.1 基本動作

本研究ではロボット指に振動を与えて人工的に対象物との間の摩擦係数を制御する手法を提案する.いま, Fig.2(a)のように指と対象物間の静止摩擦角を $\theta_s$ ,接触力 $f_a$ は摩擦円錐内で釣り合っているとす.ここで, Fig.2(b)のように指表面に振動を与えたらどうなるか.巨視的には静的に釣り合っているように見えるが,微視的には動的な相対運動が生じており,摩擦角は一般に $\theta_v$ に減少する.その結果,接触力 $f_a$ は摩擦円錐境界に制限されて $f_b$ となり,対象物はリンク表面を滑り始める.

#### 2.2 関連研究

T. Watanabe and S. Fukui<sup>1)</sup>は,超音波振動する振動板を用いてヒトに物体表面の"滑らかさ"を提示する触覚ディスプレイ装置を開発した.松島ら<sup>2)</sup>は,物体表面に加える振動の周波数と摩擦係数の関係を力学的に解析し,そのメカニズムについて論じている. S. Lee and H. Asada<sup>3)</sup>は,圧電素子により振動するエンドエフェクタを備えたロボットによる Pipe-Insertion タスクの実現方法を提案している. Uchiyama and Tanno<sup>4)</sup>は,ディザ効果を利用した双腕ロボットの関節摩擦の低減と摩擦力の推定法を提案している.これらの研究以外にも,超音波モータ,リニアアクチュエータ,マイクロ移動ロボット,パーツフィダなど,振動を積極的に利用し

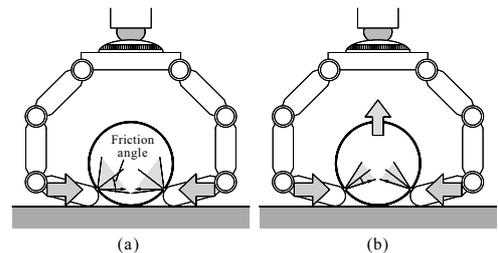


Fig.1 Expected effect of Active Friction Control

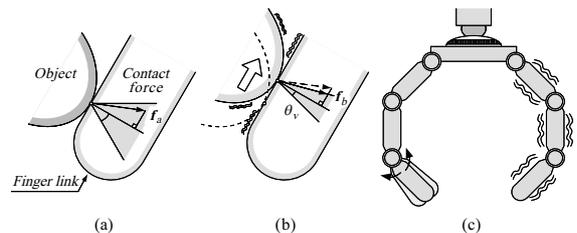


Fig.2 Basic idea of Active Friction Control

た研究は数多く存在する.しかし,振動を多指ロボットハンドに応用した研究は,筆者らの知る範囲では行われていない.

#### 2.3 ロボットハンドへの実装

ロボット指に振動を発生させるために特別なハードウェアを付加するのではなく, Fig.2(c)のように各関節を駆動するアクチュエータの制御出力信号にディザ信号を加えることで *AFC* を実現する. Fig.3は三関節三本指ロボットに *AFC* を実装した実験結果である.対象物表面は摩擦係数を大きくするためにラバーシートで覆われているため, Fig.3(a)の初期姿勢から, Fig.3(b)のように指先を対象物底部とテーブル表面の間に押し込もうとしても,くさび効果は発生しない.ここで, Fig.3(c)のように各指先リンクの関節に20, 30, 40[Hz]のディザ信号を加えると, Fig.3(d)のように指先と対象物の間に滑りが発生し,対象物をテーブルから引き剥がすことができた.この時,指先リンクの関節は約 $\pm 1[deg]$ の振幅で振動している.

### 3. 把握戦略への応用例

Fig.4のようにテーブル上に置かれた大きさ/表面摩擦の異なる対象物を包み把握する問題を考える.筆者らは,ヒトの把握動作の観察を通して,ヒトは対象物の大きさに応じて把握戦略を切り替えていること(スケール依存型把握)を発見し,ロボットハンドの把握戦略に応用した<sup>5)</sup>.大きな対象物は直接把握する.直接把握する場合は,対象物を幾何学的に拘

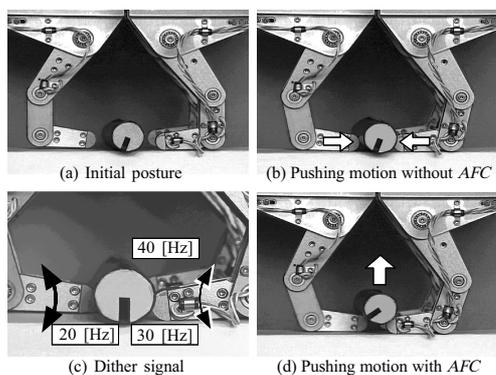


Fig.3 Wedge-effect with AFC

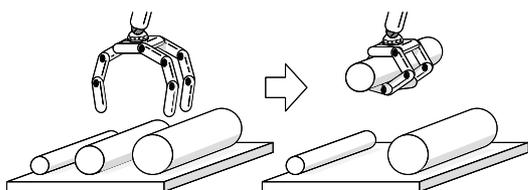


Fig.4 Application of AFC to grasping procedure

束できるならば表面摩擦の大小に関係なく包み込み把握は完成する．対象物が小さくなると，指先がテーブル面と干渉するため直接把握できなくなる．そこで，まず対象物をテーブルから引き剥がす動作を行い，次いで対象物をパームまで誘導する動作を組み合わせる．対象物直径が指先よりも大きく，指先と対象物表面の間の摩擦係数が小さいならば，くさび効果により対象物をテーブル面から引き剥がすことができる．さらに対象物が小さくなると，くさび効果が利用できなくなる．そのような小さな対象物に対しては，引き剥がし支援動作 (*Detaching Assist Motion : DAM*)<sup>6)</sup>を用いる．*DAM*は，Fig.5(a)のように指先で対象物を挟み込んだまま，指先を立てた姿勢から，Fig.5(b)のような寝かせた姿勢まで回転させる単純な把握動作である．指先と対象物の間に滑りが生じないならば転がりにより対象物はテーブルから持ち上げられると同時に接触点は対象物底部に移動する．そして指先と対象物の間の転がり接触の条件が崩れると滑りが生じ，対象物は指表面を滑りながら持ち上がっていく．

くさび効果に関しては，前節で述べたように *AFC* なしでは指先を挿入できない摩擦の大きな対象物に対しても，*AFC* を適用することでテーブルから引き剥がせるようになる．一方，*DAM*は，転がりを利用してテーブルから持ち上げる位相では摩擦係数が大きい方が有利である．しかし，Fig.6(a)のように指姿勢が変形し終えた後でも滑りが発生しないと，対象物をテーブルから持ち上げることができても，最終的には指先を対象物底部に挿入することができず引き剥がしに失敗してしまう．Fig.6(a)の状態から *AFC* を適用することで指先と対象物の間の摩擦係数が減少し，滑りが発生すれば，Fig.6(b)のように指先を対象物底面に挿入できるようになる．

くさび効果あるいは *DAM* により，Fig.7(a)のように対象物底面に指先を挿入し終えた後は，対象物の表面摩擦が小さいならば各関節を一定トルク制御することで対象物をパームまで滑らせながら誘導して包み込み把握を完成させることができる．しかし，表面摩擦が大きな場合は指表面と対象物が滑りにくくなるため，Fig.7(b)のように対象物をパームまで誘導することができず，包み込み把握に失敗する危険性が高くなる．ここでFig.7(c)のように，全関節にディザ信号を加えて全リンクに *AFC* を適用すると，Fig.7(d)のように指表面と対象物の間に滑りが発生し，対象物をパームまで誘導することができた．

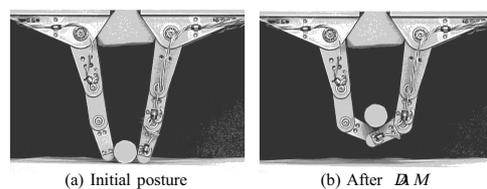


Fig.5 Detaching Assist Motion without AFC

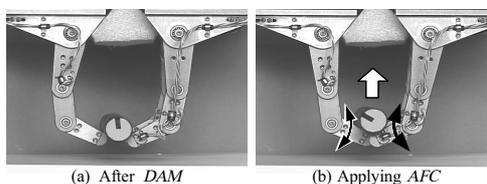


Fig.6 Detaching Assist Motion with AFC

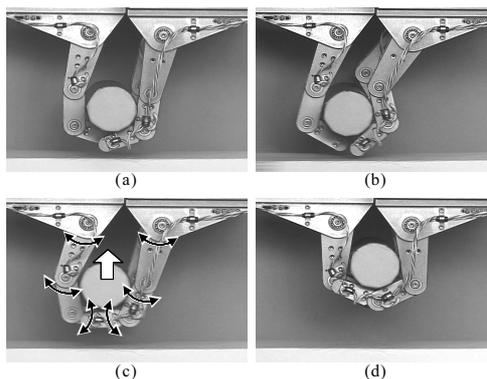


Fig.7 Lifting up phase with AFC

従来，摩擦係数の大きな対象物は，テーブル面から引き剥がしてパームまで誘導するために，転がり接触を利用した複雑な把握戦略を用いる必要があった．もちろん，全ての対象物がそれら複雑な把握戦略を用いずに把握できるようになる訳ではないが，*AFC* を応用することで，従来よりも多くの対象物が，くさび効果や *DAM* といった簡単な把握戦略で包み込み把握できるようになる．

#### 4. まとめ

ロボット指表面の摩擦係数を能動的に制御する *AFC* の概念を実際のロボットハンドに適用した．ディザ信号を用いた *AFC* の実装は，特別なハードウェアを付加する必要がないという利点がある．最後に，*AFC* をロボットハンドの把握戦略に応用し，その有用性を示した．

#### 参考文献

- 1) T. Watanabe and S. Fukui: "A Method for Controlling Tactile Sensation of Surface Roughness Using Ultrasonic Vibration," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1134-1139, 1995.
- 2) 松島, 石垣, 小西, 近藤: "振動型触覚センサの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1998.
- 3) S. Lee and H. Asada: "Assembly Automation using Vibratory End Effector: Modeling and Stability Analysis," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1980-1985, 1997.
- 4) M. Uchiyama and Y. Tanno: "Implementation of Dual-Arm Cooperative Control by Exploiting Actuator Back-drivability," 6th Int. Symp. on Experimental Robotics, preprint pp. 419-428, 1999.
- 5) 白井, 金子, 辻: "スケール依存型把握", 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.4, pp. 111-120, 1999.
- 6) 白井, 金子, 原田, 辻: "拡張自己姿勢変形動作の提案と把握動作への応用", 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 173-174, 1999.