

指の触覚機能に学ぶ把持力制御システムの開発

Development of Grip Force Control System Imitating Tactile Perception of Human Finger

○学 広光 慎一(慶大)

学 河合 隆志(慶大)

正 前野 隆司(慶大)

Shinichi HIROMITSU, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama
 Takashi KAWAI, Keio University
 Takashi MAENO, Keio University

In this study we propose a method for controlling contact force when object is lifted by fingers having curved surface without producing whole slip or applying excessive force even when the weight and friction coefficient of the object are unknown. It is found that the partial incipient slip region at the contact surface changes due to the change of the tangential force. It is also found that differential of the internal shear strain distribution is in relation with the partial incipient slip at the contact surface during the precision grip. From this, we can conclude that we can obtain the tangential force change from the shear strain distribution inside the elastic body

Key Word : Tactile Sensor, Contact Problem, Tribology, Friction, Biomechanics

1. 緒言

ヒトは重量及び摩擦係数が未知の物体を、適切な力で容易に把持し持ち上げることができる。また、従来開発されてきた人工のセンサ⁽¹⁾の場合とは異なり、摩擦係数が未知であっても物体全体に滑りを生じさせることはない。このようなヒトの把持力制御には、皮膚と対象物間の初期局所滑りと、触運動時のせん断力増加率が大きいときに発火する触覚受容器の働きが重要な役割を担っていると考えられている⁽²⁾。筆者らは、有限要素法を用いて均一材料特性を持つ曲面状弾性体モデルに対する解析を行い、接触面の局所滑りの状態は、触覚受容器近傍の内部せん断ひずみ分布パターンの変化によって把握できることを明らかにした⁽³⁾。また、弾性体内部のせん断ひずみ分布を検出できる曲面状ひずみ分布センサを開発した⁽⁴⁾。本研究では、このセンサを用いて物体を滑らせずかつ握りつぶさない適切な力で物体を把持できるシステムを開発する。

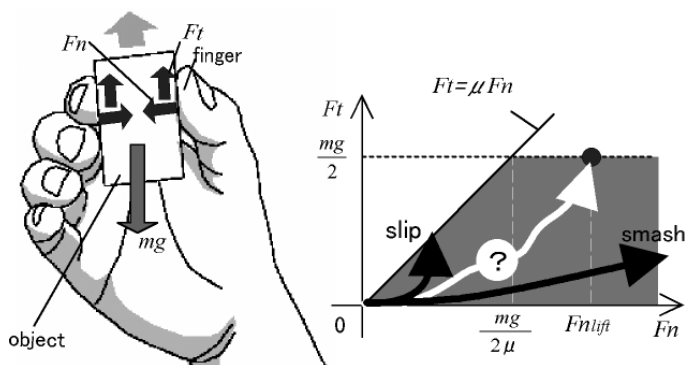


Fig. 1 Relationship between normal force(grip force) F_n and tangential force(friction force) F_t

2. ヒトの物体把持力制御

2.1 測定手法 重量及び摩擦係数が未知の物体を把持し持ち上げるという問題は、図1に白抜き矢印で示した力増加曲線とで示した力の到達点を求める問題に帰着できる。ここで、 F_n は法線力(把握力)、 F_t は接線力(持ち上げ力)、 mg は物体の重量、 μ は摩擦係数、 $F_{n,lift}$ は把持が完了した際の法線力である。

ヒトの触覚機構を模倣したセンサを用いて把持力制御を行うためには、ヒトがどのように把持力を加えているかを知ることが重要であろう。このため、これまでに、ヒトの把持特性に関し様々な研究が行われている⁽²⁾。しかし、複数回試行を行う際に、前回の試行時の重さ・摩擦係数の短期的な記憶・経験に基づくフィードフォワード制御の効果を排除した実験は行われていない。このため、ヒトの把持力を測定できる装置を製作し、重さ、摩擦係数が未知の物体を把持するときの力の履歴を測定する。

2枚平行に配置したリン青銅板の板ばねにひずみゲージを貼付した平行移動機構を2個製作した。これらを水平、垂直に配し、ひずみゲージのひずみから、人が物体を把持し持ち上げる際の接線力 F_t 、法線力 F_n を計測する装置を製作した。

2.2 測定結果 上述の装置を用いて重量8N、摩擦係数1.1または0.25の物体を把持し持ち上げる際の力増加曲線を測定した(図2)。摩擦係数 μ が1.1の時には、はじめ法線力を増大させた後に徐々に接線力を増大させている。しばらく経つと、力増加曲線の傾きを摩擦係数にほぼ一致させたまま力を増加させ、最後に接線力が4Nに達したときに物体が持ち上がる。摩擦係数が0.25の時には、力増加曲線の傾きを変化させながら、力を増加させている。このことは、触覚フィードバックに基づき試行錯誤的に力増加曲線の傾きを変化させる操作と考えられる。このほかにも、物体重量および摩擦係数を変化させて同様な実験を行った結果、常に上述の2つの

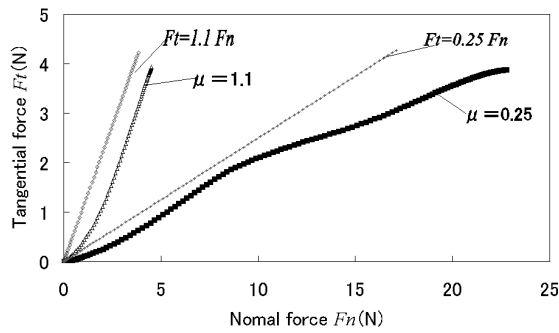


Fig. 2 Pattern of grip force when human lift object

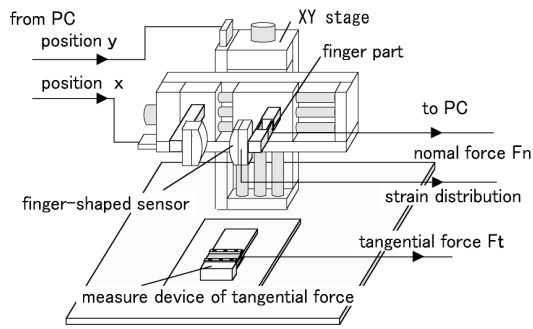


Fig. 3 grip force control system

傾向を示した。これらより、ヒトの力増加曲線に関し、以下のことが言える。

- (1) はじめ力増加曲線の傾きは0である。
- (2) F_n が大きくなりすぎると、力増加曲線の傾きを大きくする。
- (3) 力増加曲線が直線 $F_t = \mu F_n$ に近づくと、その傾きを小さくする。
- (4) 力増加曲線の傾きが μ に近づくと、その傾きをそのままに保つ。

また、従来の研究より以下のことが言える。

- (5) ヒトは、上記のような力増加曲線の制御を、ひずみ速度受容器であるマイスナー小体の継続的な発火により行っている⁽²⁾。
- (6) 物体が局所的に滑り始めたときの固着・滑り情報をマイスナー小体の発火分布パターンから把握できる⁽³⁾。

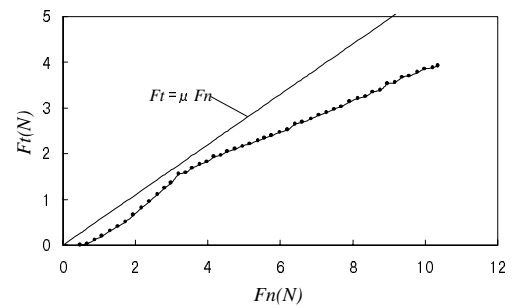
以上のような知見を人工のセンサの制御に応用する手法を次章で示す。

3. 把持力制御システム

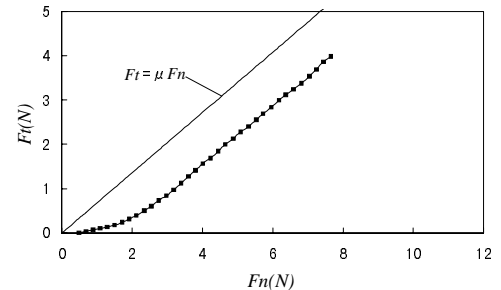
3.1 制御手法 2.2の(1)から(6)を近似的にアルゴリズム化した。すなわち、センサと物体間の固着領域を把握するアルゴリズムを考案した。ひずみの変化率 $\dot{\epsilon}$ / F_t がある閾値を超えると、そのひずみゲージの節点付近は固着していると考えられる。固着領域が大きいときは F_n が大きく、固着領域が小さいときは力増加曲線が直線 $F_t = \mu F_n$ に近づいているといえることから、固着領域の大きさに応じて、2.2の(1)から(6)のように力増加曲線が変化するような式を作成した。

3.2 把持力制御システム

3.1のアルゴリズムを用いて実際に物体を把持するための把持力制御システムを製作した(図3)。フィンガ部を用いて法線力 F_n を測定し、接線力測定装置を用いて接線力 F_t を測定する。また、フィンガ部の先端にひずみ分布センサおよびダミーセンサを取り付けた。



(a) $mg = 8N, \mu = 0.55$



(b) $mg = 8N, \mu = 0.68$

Fig. 4 Measured contact force between sensor

3.3 制御結果 前節で提案したアルゴリズムに従って、摩擦係数が0.55および0.68、重量が8Nの物体を把持させてみた。結果を図4に示す。摩擦係数が0.55のとき(図4(a))には、摩擦係数が0.25のヒトの測定結果(図2参照)と類似した力増加曲線を示した。本アルゴリズムによって、力増加曲線が直線 $F_t = \mu F_n$ に近づく($F_n = 3.2$ 付近)と、その傾きを小さくして全体の滑りを回避している様子がわかる。一方、摩擦係数が0.68の時には、摩擦係数が1.1のときのヒトの測定結果(図2参照)と同様、 F_n が大きくなりすぎると力増加曲線の傾きを大きくする、力増加曲線の傾きが μ に近づくとその傾きをそのままにする、などの操作が行われ、安定的に物体を把持し持ち上げている。以上のように、本システムを用いて実際に重量及び摩擦係数が未知の物体を把持し持ち上げうることを確認できた。

用いた式に含まれるパラメータの最適化、把持特性の定量的な評価などは今後の課題である。

4. 結論

ヒトが物体を把持し持ち上げる際の力増加曲線の特徴を計測した。次に、人の把持力パターンに学ぶ把持力制御法を提案した。また、物体把持時の法線力、接線力、ひずみ分布が測定できる把持力制御システムを製作した。最後に、把持力制御システムを用いて実際に重量および摩擦係数が未知の物体を把持し持ち上げうることを確認した。

参考文献

- 1) 山田, 把持までのセンシング戦略, その2: 滑りと静摩擦係数の検出 - 表面粗さ情報の取得, 日本ロボット学会誌, 11-7, (1993), 959.
- 2) 木下, 手指による摘み運動の制御に関わる感覚・運動機構, システム/制御/情報, 36-9, (1992), 581.
- 3) 前野, 小林, 河合, 平野, 曲面状弾性体の内部ひずみ分布検出に基づく把持力制御法, 機論 64-620, (1997), 142.
- 4) 河合, 平野, 前野, 把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発, 機論 64-627C, (1998), 4264.