

無意識のための触覚センサ・触覚ディスプレイ

Tactile Sensors and Displays for Non-conscious Tactile Sensation

正 前野 隆司 (慶應義塾大学)

Takashi MAENO, Keio University, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522

E-mail: maeno@mech.keio.ac.jp

1. はじめに

触覚の覚は自覚の覚だろうか?そもそも「覚」とは「意識的に感じる」という意味である。したがって、語源通りに受け入れるならば、触覚の覚は自覚の覚であるといえよう。しかし、ヒトの触覚はそんなに単純ではない。図1に示したように、触覚の伝達先は少なくとも3つある。ひとつめは、私たちが「つつる」や「すべすべ」、「こり」や「しこり」のクオリアを知覚する、意識下の触覚である。このような、いわゆる触感、触覚受容器で発射された神経インパルスが、脊髄に入り、上昇し、大脳新皮質の感覚野に到達し、そこで情報処理された結果として知覚される。ふたつめは、筆者がこれまで関わってきた把持力制御のようなケースである。ヒトは、重さと摩擦係数が不明の物体を、滑り落とさず、かつ、握りつぶさないようなちょうど良い把持力(最小限必要な把持力の1.3倍から1.5倍の力)で把持し持ち上げることができる⁽¹⁾。これは、指と物体の接触面の状態がフィードバック情報として利用され、無意識下で把持力がフィードバック制御されているためである。このとき、“どのくらい滑り落としそうか”というような触感が自覚されるわけではないにもかかわらず、無意識下でフィードバック制御が行われている点が興味深い。この制御は下位中枢で行なわれていると考えられる。3つめは、「熱い」「痛い」といった触覚情報が下位中枢にフィードバックされた結果、反射的に手を離すといった制御(脊髄反射)である。脊髄反射は無意識下で行われ、大脳皮質に熱い・痛いといった情報が伝達され意識されるのはその後である。以上のように、触覚は下位中枢における無自覚なフィードバック制御に使われる場面が少なくないにも

関わらず、触覚の研究者の多くは意識下の触覚を研究対象にしている。本稿では、あまのじゃくな筆者は、無自覚な方の触覚のひとつ、把持力の制御問題について述べる。

2. ヒトの把持力制御

1章で述べたように、ヒトは重さや摩擦係数が不明の物体を、最小限必要な把持力の1.3倍から1.5倍の力で把持し持ち上げることができる。これは、皮膚と物体の間の局所的な滑り情報が触覚受容器により検出され、得られた情報を用いた把持力のフィードバック制御が行なわれた結果と考えられる。

図2のように、指を物体に押し込んだ後に接線方向に動かすことを考える。このとき、指と物体の接触面には垂直反力分布が生じており、接触面の端部の方が垂直反力が小さいので、最大静止摩擦力(=垂直反力×静摩擦係数)も端部で小さい。このため、指を接線方向に動かすと、端部から局所的な滑りが生じる。指の接線方向移動量を増大させると、局所的な滑り領域は徐々に広がり、中央の固着領域がなくなった瞬間に指と物体は全体的に滑るわけである⁽²⁾。

接触面直下の皮膚に埋め込まれた触覚センサ群によってひずみの増分が計測されているならば、表面が滑った点の直下では、皮膚のせん断変形が開放されたことに基づくひずみ増分の減少を測定できる。このため、ヒトが触覚受容器群のひずみ分布(発火分布)をパターンとして計測し解析しているならば、固着・滑り状態が求まることとなる⁽³⁾。以上は仮説に過ぎないが、Johansson⁽¹⁾や筆者⁽³⁾は、把持力制御のために使える情報は接触面の状態しかない以上、接触面の固着・滑り分布が使われているに違いないと考えるわけである。

ただし、指と物体の接触面の中のどこが固着していてどこが滑っているのかを意識的に知覚するのは難しい。つまり、固着・滑り情報は、ヒトの無意識のための触覚フィードバック情報なのである。

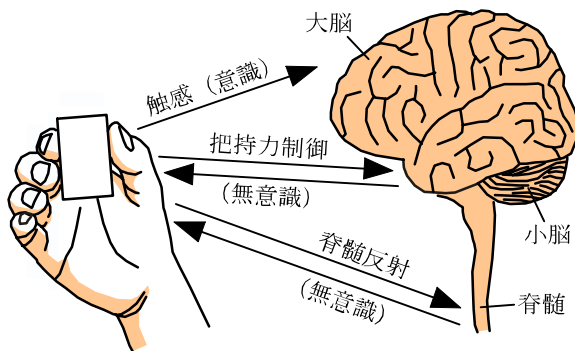


図1 3つの触覚

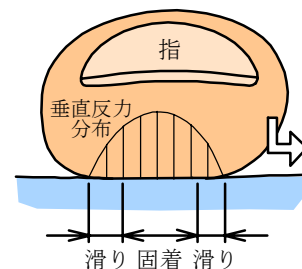


図2 接触面の固着・滑り分布

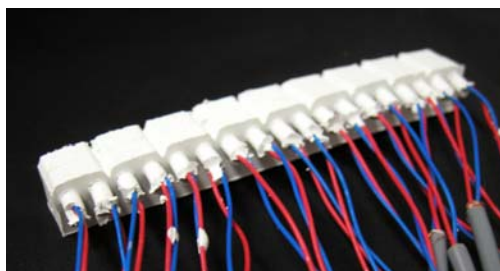


図3 指紋を有する触覚センサ

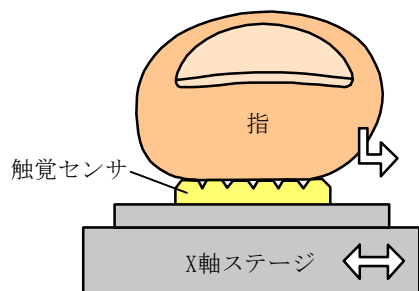


図4 静摩擦覚ディスプレイ（触ミラー）

3. 把持力制御のための局所滑りのセンシング

指紋は、触覚受容感度を向上する役割を果たしている⁽⁴⁾。また、指紋は、図1に示した接触領域内の局所すべりをデジタル化する役割も果たす。つまり、指紋がない場合には局所滑り領域は接触端部から連続的に広がっていくのに対し、指紋がある場合には端の指紋から1個ずつ順に離散的に“ずる”と滑る。このため、指紋のせん断変形の急激な開放をモニタしておけば、指紋の凹凸のない場合よりも局所すべりを明確に検出することができ、把持力の制御を行ないやすい。

これを確認するために作成したのが、図3の触覚センサ⁽⁵⁾である。現状では指紋が1次元的に配置されているだけなので、今後は2次元化、小型化、信頼性向上などを行なって、ロボットハンドへの実装を目指す予定である。

4. ヒューマン・マシン協調制御のための局所すべりの呈示

3章で述べた触覚センサは自律ロボットが物体を把持する際に有用だが、遠隔操作型ロボットの場合はどうだろうか？従来の遠隔操作型ロボット（マスター・スレーブロボット）では、遠隔地にいるロボットが油でべたべたのものを扱っているのか、それともゴムのような滑りにくいものを持っているのかを指先で感じることは難しかった。つまり、ヒトが遠隔物体を器用にハンドリングするためには、ヒトへの摩擦感の呈示が重要であるにもかかわらず、これまでそのような触覚ディスプレイは開発されていなかった。このため、筆者らは、局所滑り情報をヒトの無意識に対して呈示する触覚ディスプレイを開発中である。一例を図4に示す⁽⁶⁾。ヒトの指腹部に指紋状凹凸を有する触覚センサを接触させ、3章と同じ原理により指・センサ間の局所滑り領域分布を計測する。そして、所望の局所滑り領域が生じるように、X軸ステージを

左右に移動させる。つまり、指で起こっていることを鏡のように映し出す触覚センサを使った静摩擦覚ディスプレイ（触ミラー）を用いれば、滑りそうな状態・滑りにくい状態を任意に作り出すことができる。2章で述べたように、ヒトは局所滑り領域が大きくなりすぎないように把持力を制御しているので、この静摩擦覚ディスプレイに触っているヒトは、無意識のうちに把持力を調整することになる。すなわち、遠隔操作の際に、油まみれかゴムのようなかを意識的に知覚することはできないけれども、無意識的に力の加減は行なってしまうのである。現在は、このような局所すべり状態ディスプレイの原理確認をしている状況⁽⁷⁾だが、今後は多指マスター・スレーブロボットに適用していく予定である。

5. おわりに

ヒトの把持力制御に学ぶ触覚センサ・触覚ディスプレイについて述べた。まず、ヒトが無意識下で行う把持力制御と接触面の固着・滑り分布の関係について述べた後に、自律ロボットが自律的に行う把持力制御のための触覚センサと、遠隔操作型ロボットをヒトが操作する際にヒトの無意識的な制御をヒューマン・マシン協調制御に組み込む触覚ディスプレイについて述べた。人工物の制御が人に優しくなる時代から、人工物の制御とヒトの制御が一体化する時代へ、という変化の片鱗を感じていただけたなら幸いである。

参考文献

- (1) S. Johansson and G. Westling, Roles of Glabrous Skin Receptors and Sensorimotor Memory in Automatic Control of Precision Grip When Lifting Rougher or More Slippery Objects, *Exp. Brain Res.*, vol. 56, pp. 550-564, 1984.
- (2) 前野隆司, 広光慎一, 物体把持時におけるヒト指腹部の固着・滑り分布と触覚受容器応答, *日本機械学会論文集* 68 巻 667 号C編, pp. 914-919, 2002.
- (3) 前野隆司, 広光慎一, 河合隆志, 曲面状弾性フィンガの固着・滑り分布推定に基づく把持力の制御, *日本ロボット学会誌* 19 巻 1 号, pp. 91-99, 2001.
- (4) 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係, *日本機械学会論文集* 63 巻 607 号C編, pp. 881-888, 1997.
- (5) 山田大介, 前野隆司, 山田陽滋, 指紋により接触/非接触・固着/滑り分布を検出する弾性ロボットフィンガの開発, *日本機械学会論文集* 70 巻 690 号C編, pp. 560-566, 2004.
- (6) Isao Fujimoto, Yoji Yamada, Takashi Maeno, Tetsuya Morizono and Yoji Umetani, Study on a “Tactile Mirror” for Displaying Static Friction Sensation with Tactile Perception Feedback, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1233-1238, 2004.
- (7) 毛利優之, 前野隆司, 山田陽滋, 局所滑りディスプレイを用いたヒト下位中枢への「滑りそう」な触感の呈示法, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集*, 1A1-H-34, 2004.