

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*

広光 慎一^{*1}, 前野 隆司^{*2}

Stick/slip Distribution on the Fingerpad and Response of Tactile Receptors when Human Grasp an Object

Shinichi HIROMITSU and Takashi MAENO

Grip force and contact condition including stick/slip are measured to investigate the mechanism of dynamical transmission of contact information to tactile afferents in precision grip of human. A system for measuring normal/tangential forces and stick/slip condition between the human finger and grasping object is made. As a result of measurement, it is found that the increase ratio of the grip force and the change in stick area are mutually related. Contact condition is also calculated using a FE (finite element) analysis. It is found that the stick/slip condition shows the similar phenomena as experiment. Change in SED (strain energy density) at the Meissner's corpuscles' location shows local maximum at the slip area. The relationship among the SED at the location of Meissner's corpuscles, the deformation of the finger and the stick/slip condition in precision grip is shown. In other word, a model for transmitting the dynamic information from the contact condition to tactile afferent responses during precision grip is constructed.

Key Words: finger, stick/slip, tactile receptors, sensor, finite element method

1. 緒 言

ヒトが物体をつかみ持ち上げる把持動作は、単純ではあるものの、ヒトの運動や神経機構を理解するための極めて興味深い対象である。また、これらを明らかにすることは、ロボットによる物体把持の問題に様々な示唆を与えるものと考えられる。このため、これまでにヒトの把持動作に関する多くの研究が行われてきた。把持力の制御はフィードフォワード制御とフィードバック制御から成る⁽¹⁾。フィードフォワード制御は、予想される物体重量を視覚により認識した後に、適切と予測される把持力を加えるものである。100ms 以上かかるといわれる神経のフィードバック経路を用いないため、高速な把持動作の遂行が可能である。一方、物体の重さおよび摩擦係数が未知の物体を把持する場合には、指腹部に存在する触覚受容器を用いて何らかの触覚情報を取得し、この情報を処理した後に把持力

のフィードバック制御を行う必要がある。利用される触覚情報は、皮膚と対象物間の接触状態、特に、接触領域内の固着・滑り状態であると考えられている⁽²⁾⁽³⁾。ところが、マイスナー小体などの触覚受容器単体の応答特性はこれまでに明らかにされている⁽²⁾ものの、皮膚・対象物間の固着・滑り状態、指の変形状態、触覚受容器近傍の変形と発火状態といった、力学情報を触覚受容器に伝達する過程の研究は十分に行われていなかった。特に、固着・滑り状態が把持力の変化に伴いどのように変化するかは定量的に明らかにされていなかった。

本研究では、ヒトが指で物体を把持する際の固着・滑り領域の変化を光導波路を用いて計測する装置を開発する。つぎに、本装置を用いた計測を行い、物体把持時における固着・滑り領域の変化を明らかにするとともに、固着領域と把持力に深い関連があることを示す。さらに、指断面のモデルと平板の接触状態を有限要素法を用いて解析し、固着・滑り領域と把持力、触覚受容器発火の関係を推定する。以上より、ヒトが指腹部で物体を把持し持ち上げる際の接触部における固着・滑り状態と、固着・滑り情報が触覚受容器に伝

原稿受付平成 13 年 7 月 26 日

^{*1} 学生員，慶応義塾大学大学院(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)

^{*2} 正員，慶応義塾大学理工学部

達される機構を示すことを、本研究の目的とする。

2. 計測

2.1 実験装置 図1(a)に、物体を把持し持ち上げる際の力の定義を示す。 F_n は法線力(grip force), F_t は接線力(lift force), μ は摩擦係数である。図1(b)には、把持力の変化を示す。図1(b)の灰色の範囲は F_n と F_t の存在可能領域である。 F_{ift} は物体把持が終了した際の法線力, mg は物体の重さである。重さと摩擦係数が未知の物体の把持とは、白矢印で示したような把持力の増加曲線を経由して F_{ift} で示した点に力が到達する過程である。

図2に、本研究で開発した、ヒトの指と物体の接触状態(固着・滑り状態)および把持力を同時に計測する装置を示す。

法線力計測装置は、それ自体がある重さを持った把持対象物体であり、ヒトが2本の指(母指, 示指)で摘み上げる透明アクリル板, 2枚の平行板バネ, CCDカメラなどから成る。指がアクリル板に加える法線力は、平行板バネに貼付されたひずみゲージにより計測する。把持対象物体を載せた台にも、ひずみゲージを貼付した2枚の板バネが取り付けられている。指がアクリル板に加える接線力は、こちらの平行板バネに貼付されたひずみゲージにより計測する。板バネの右側は固定されており、板バネの左側の台が上下動する。すなわち、台に加わる力の減少分を、指と把持対象物体間の接線力とみなす。

法線力計測装置内部のアクリル板, 鏡, CCDカメラは、接触領域の画像計測装置である。すなわち、アクリル板の側面から光を入射し、光導波路を形成することによって、アクリル板と指との接触領域の輝度を高める。指と把持物体の接触面の画像は鏡を介して CCDカメラに入射し、計測される。CCDカメラは法線力計測装置に固定されているため、物体把持時に把握力測定装置が動いても、固着部を常に静止画像としてとらえられる。この装置によって、固着・滑り領域の画像および法線力 F_n , 接線力 F_t を 30Hz のサンプリング周波数で計測する。なお、本装置における画像情報の取得法は多田ら⁽⁴⁾が製作した装置と類似しているが、多田らは指腹部に描いた点列を画像処理によって読み取るのに対し、本研究では、以下に述べるように、指紋の凹凸を利用する。

指と把持物体の間の固着・滑り状態の判定法は以下の通りである。物体把持実験を行う前に被験者の指紋の谷を黒色の染料で着色し、指紋の山との輝度の差を大きくしておく。CCDカメラによって計測した画像

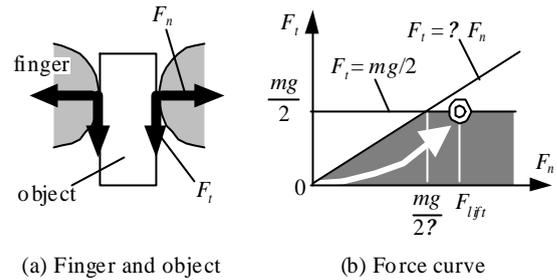


Fig. 1 Relationship between normal force (grip force) and tangential force (lift force or friction force)

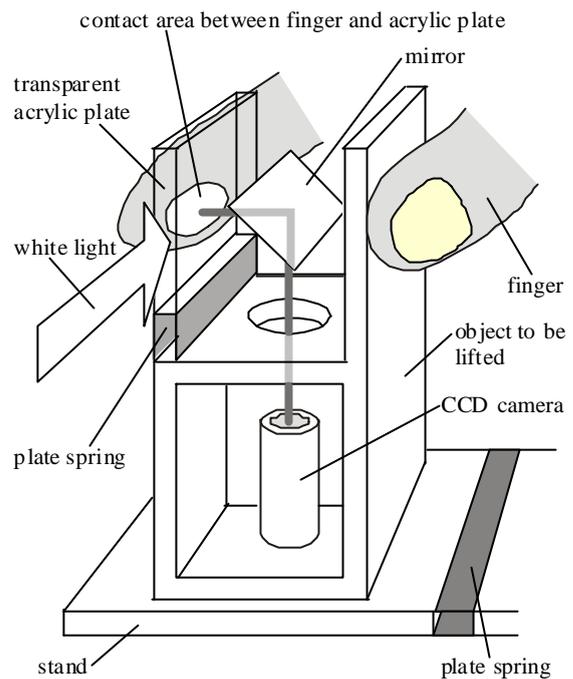


Fig. 2 Experimental apparatus

の例を図3(a)および(b)に示す。図3の右側が図2の下側であり、指を持ち上げる動作によって指は図3の左側に移動する。接触領域が明るく見るとともに、指紋の谷が縞模様として認識できることがわかる。まず、画像の輝度から接触面積を計測する。また、画像を1ステップ($\Delta t=33\text{ms}$)前の画像と比較し、指紋が動いている部分を滑り領域、指紋が動いていない部分を固着領域とみなす。すなわち、画像(b)から1ステップ前の画像(a)を減算し、コントラストを上げるように画像補正を加えたものが図3(c)である。図3(c)において指紋が動いている局所滑り領域が縞模様として表示されている。一方、固着領域では指紋のパターンが見られず、ホワイトノイズ的な画像となっている。両者の境界は明確なので、画像より境界を求めることができる。以上の処理によって、接触領域内の固着領域・滑り領域を分離して計測することができる。

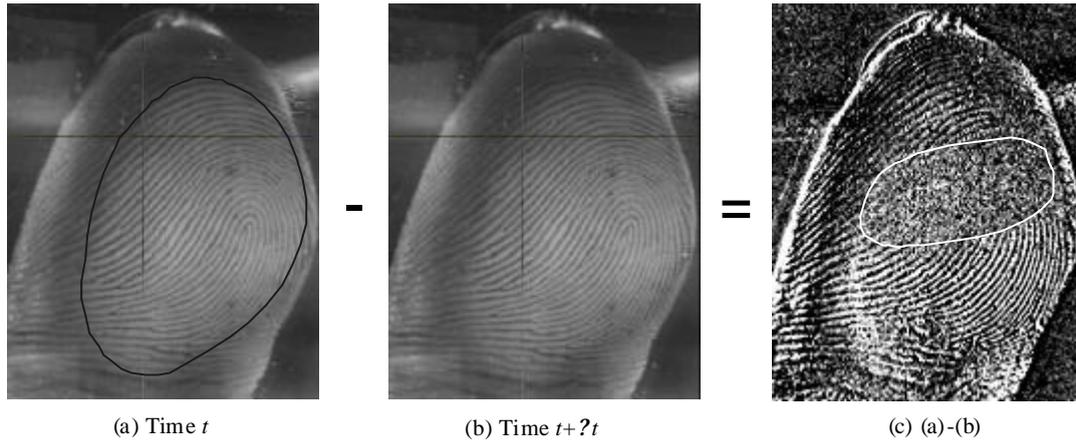


Fig. 3 Measured and subtracted pictures of contact area between finger and plate

2.2 計測結果と考察 ヒトが把持力測定装置を持ち上げる際の把持力と接触状態の計測を行った。ただし、装置におもりを乗せて全体の質量を 400g または 800g の 2 水準とし、被験者からはおもりが見えないようにして 2 水準の質量を持つ装置をランダムに持ち上げさせた。被験者は手指に障害のない健常男子 4 名とした。指先の摩擦係数を変化させるために、水または油（オリーブオイル）を指に均一に塗布してから物体把持の計測を行った。前節で述べた着色を行い、十分指を乾燥させた後に、それぞれの液体を塗布した。

それぞれの場合の摩擦係数は表 1 のようになった。個人差はあるものの、水の場合の摩擦係数は油の場合のほぼ 2~3 倍程度となっていることがわかる。なお、摩擦係数は、本装置を持ち上げさせた後に、徐々に法線力を減少させた際の、全体が滑り落ち始める時の力から求めた。

被験者が 800g の物体を把持し持ち上げている最中の固着・滑り領域の計測結果の例を図 4 に示す。いずれの例においても、最外周の線が指の外形を、中央の円が接触領域の境界を、最内周の円が固着領域の境界を、それぞれあらわす。(i)から(iv)は、133 ms おきに取得したデータを時間経過順に並べたものである。これらを見ると、接触領域はほぼ一定の領域を示しているのに対し、固着領域は様々な形状を描きながら変化している様子が見られる。図 4 (a) (iii)（または図 3 (c)）のように横長の場合、図 4 (a) (iv)のように縦長の場合、図 4 (b) (iii)のようにくの字状に折れ曲がる場合など、状況に応じて変化している。これは、指腹部の微妙な曲率のばらつきや、対象物の傾きに伴い、局所滑りの発生する個所が変化することに起因すると考えられる。局所滑りは、摩擦力が最大静止摩擦力に達したときに生じる。最大静止摩擦力はその点の垂直反力に比例す

Table 1 Measured frictional coefficients

Subject	AK	KE	KT	TE
Oil	0.43*	0.33	0.41	0.71
Water	1.27	0.78*	1.31*	1.26

*: part of results are shown in Fig. 3-Fig. 8

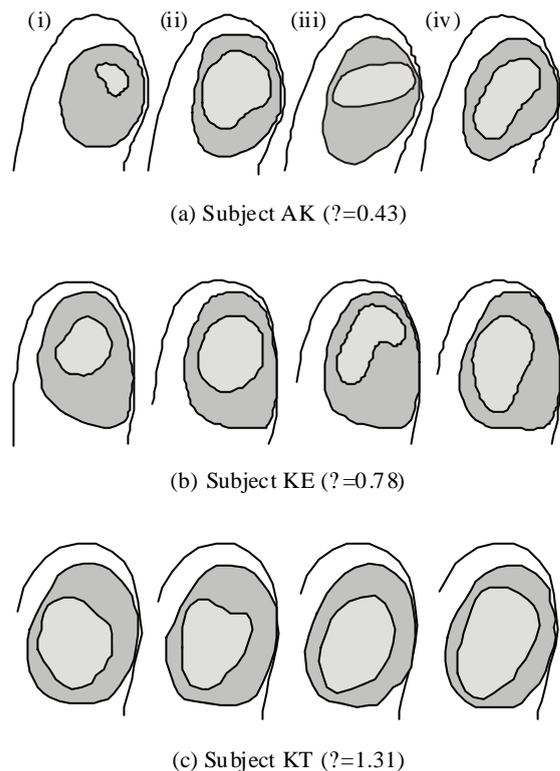


Fig. 4 Measured stick/slip area

る。このため、微妙な接触状態の違いにより、垂直反力が小さくなってしまった個所で局所滑りが発生するのである。ただし、被験者 KT（図 4 (c)）のように、固着領域の形状があまり変化しない被験者もいた。

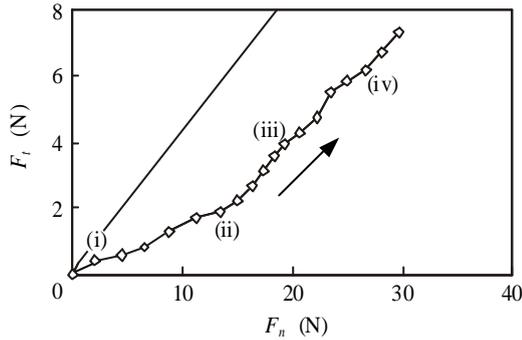


Fig. 5 Relationship between normal and tangential force for subject AK ($\mu=0.43$)

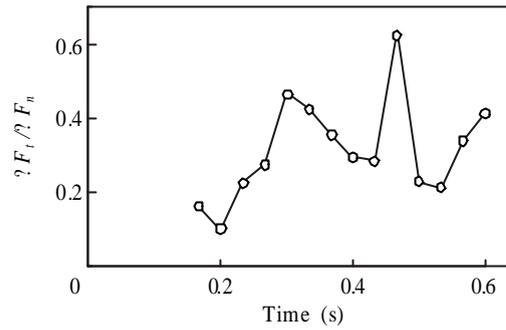


Fig. 7 Change in F_t/F_n for subject AK ($\mu=0.43$)

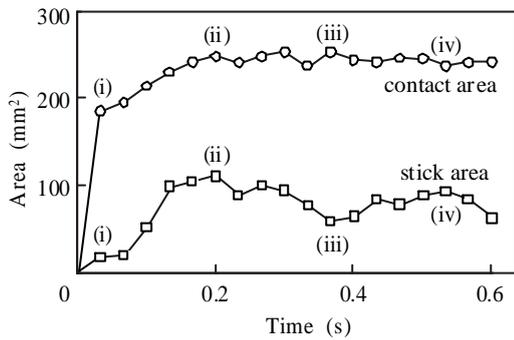


Fig. 6 Change in contact/stick area for subject AK ($\mu=0.43$)

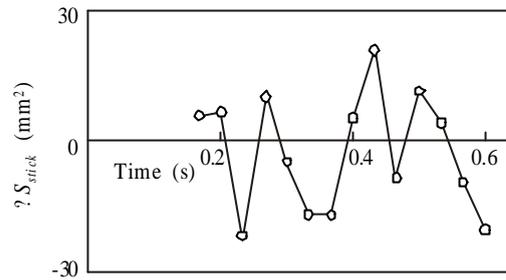


Fig. 8 Change in stick area ΔS_{stick} for subject AK ($\mu=0.43$)

Table 2 Value P

Subject	AK	KE	KT	TE
Oil	0.027	0.004	0.017	0.004
Water	0.029	0.069	0.002	0.000

KT は曲率変動の小さい指腹部を有していたこと、接触部がほとんど変動していなかったこと、などの要因により、固着領域の変動が小さかったと考えられる。図示しなかった場合においても、接触領域、固着領域の変化パターンは、図4の場合とほぼ同様であった。

物体把持中の把持力の一例を図5に示す。図5は被験者 AK ($\mu = 0.43$) の結果であり、図中の(i)から(iv)は図4(a)と対応している。図5の直線は $F_t = 0.43F_n$ を示す。また、被験者 AK の接触面積と固着面積の変化を図6に示す。法線力 F_n が(i)から(iv)へと増加していても、接触面積はあまり増加していないことがわかる。指の構造に基づく幾何学的非線形と指の材料非線形により、接触面積はある値に飽和した後はあまり変化しないのである。このことより、触覚受容器では接触面積の変化を検出しているのではないと考えられる。一方、固着領域は、物体把持時に増減している。すなわち、固着面積は、状態(ii)および(iv)では極大値を、

状態(iii)では極小値を示す。このことは図4(a)の結果と符合している。したがって、このような固着・滑り領域の変化を触覚受容器でモニタすることによって、ヒトは把持力を制御しているのではないかと考えられる。

さて、ここで、接触力と接触状態の関係について考えてみる。固着領域の変化は、接線力変化と法線力変化の比と負の相関があると考えられる。なぜなら、法線力が不足した場合、あるいは接線力が過多の場合に局所滑り領域が増加し、固着領域が減少すると考えられるからである。そこで、図7に、物体把持時における把持力の増加曲線の傾き F_t/F_n の変化を、図8には固着面積 S_{stick} の1ステップ(33ms)前の値との差分 ΔS_{stick} を示す。ただし、接触面積がほぼ一定となる0.167s以降のデータをプロットした。両者は負の相関を持つ傾向があることがわかる。つまり、図7の極大(極小)値と図8の極小(極大)値がある程度一致している。この傾向を確認するため、4人の被験者の8つの試行に対し、 F_t/F_n と S_{stick} の相関を取り、t検定を行った。ただし、いずれの場合にも接触面積がほぼ一定となった、 $F_t > 1.2N$ の時のデータを用いた。結果を表2に示す。P値は一例を除き0.05以下となっている。また、散布図を描いたところ、明らかに負の

相関があることが見て取れた．よって， F_t / F_n と S_{stick} の間にほぼ負の相関があるとみなせる．つまり，把持力増加曲線の傾きの増減にともない固着面積が増減するといえる．

なお， F_t / F_n と S_{stick} ， F_t と S_{stick} など，相関のある可能性があると考えられる他のデータ間においても同様な処理を行った結果，有意な相関は認められなかった．

固着・滑り状態と接触力の計測の結果， F_t / F_n と S_{stick} の間に相関があったということは，ヒトは F_t / F_n および S_{stick} が変動した結果を，触覚受容器を介してフィードバックし，把持力制御曲線に修正を加えていると考えられる．このため，以下では， F_t / F_n および S_{stick} が変動したときに，触覚受容器においてどのような神経インパルス発射が行われているのかを推定するために有限要素解析を行う．

3. 有限要素解析

3.1 解析モデル 図9に，本解析で使用するヒト指の有限要素モデルを示す．このモデルは，ヒトの示指の指紋中心を通る末節骨に直交するモデルであり，筆者⁽⁵⁾らが作成し，現実的な接触状態を解析できること⁽⁵⁾および触覚受容器近傍のひずみエネルギー密度 (SED) と触覚受容器のインパルス発射頻度に相関があること⁽⁶⁾を確認済みである．白丸はマイスナー小体の位置の節点の一部を示す．本モデルは単純化された2次元モデルに過ぎず定量的な議論は困難であるものの，固着・滑り分布と触覚受容器の発火状態の関係を推定するためには十分なモデルであると考えられる．

3.2 解析結果と考察 図9の指モデルに剛体平板を押し付け接触させた後，接線方向に変位させることによって，実際の物体把持時と同様の荷重を指に加える．この解析では固着・滑りを考慮した接触解析を行っている．一例として，静摩擦係数を0.735，動摩擦係数を0.700とし，指に加える把持力の増加曲線を図10のようにした場合の計算を行った．ヒトの物体把持の計測結果と比較するために，図10の点Iから，力増加曲線の傾き F_t / F_n を大きくした場合（点I～点II）および小さくした場合（点I～点III）の解析を行った．このときの指表面の接触状態（固着・滑り状態）と触覚受容器の発火状態を推定するために，触覚受容器の発火頻度にほぼ比例⁽⁶⁾するひずみエネルギー密度 (SED) を計算した．なお，マイスナー小体はひずみの変化速度を検出する受容器であるので，速度に比例する量として，前の時間ステップからのひずみエネルギー密度 (SED) の変化量 E を求めた．指モデル表面の

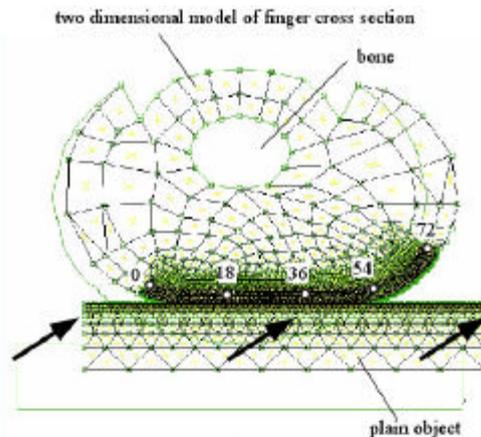


Fig. 9 FE model of finger/object

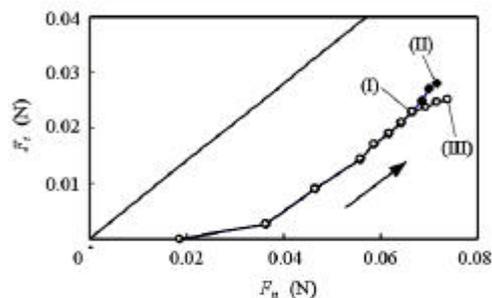


Fig. 10 Relationship between F_t and F_n calculated by FE analysis

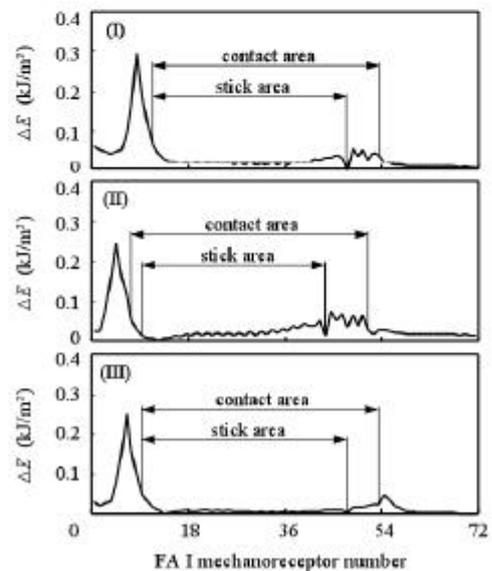


Fig. 11 Change in strain energy density ΔE calculated by FE analysis

接触状態とその直上に存在するミスナー小体のひずみエネルギー密度の変化量 (E) および接触領域・固着領域を図 11 に示す。まず、図 (II) をみると、把持力の傾き F_t / F_n を大きくしたために、指表面における固着領域が減少していることがわかる。また、図 (III) では図 (I) に比べて固着領域が大きくなっていることがわかる。このときのひずみエネルギー密度の変化量 (E) をみると、初期局所滑りが発生している接触終了側 (節点番号 50 前後) に極大値が見られる。特に、滑り領域が増大した II の時に E の値が大きくなっている。このことは、局所滑り領域が増大するとき、局所滑り領域の直上にあるミスナー小体が発火する可能性が高いことを示している。また、どの結果においても、接触開始側 (4~10 番目の節点付近) に E の極大値が見られる。この極大値の大きさは接触終了側の滑り領域における E よりも大きいので、ここでもミスナー小体が発火していると考えるのが妥当である。ただし、こちらの発火は固着・滑り状態の変化には対応していないため、接触非接触の判定など、何らかの別の情報処理のために利用されていると考えられる。

さて、有限要素解析より、 F_t / F_n が増大しかつ S_{stick} が減少したときにミスナー小体近傍の SED 変化量が増加するという結果が得られた。これより、 F_t / F_n の増大に伴う S_{stick} の減少は、把持力のフィードバック制御のための入力情報であると推測できる。つまり、何らかの要因により F_t / F_n が増加し、固着領域が減少してしまった場合に、ミスナー小体が発火し、 F_t / F_n を減少させるべきであるというフィードバック情報を中枢に返していると考えられる。固着領域の減少は、同時に滑り領域が増加していることをあらわしており、滑り領域の増加は物体を滑り落としてしまう可能性の増大を意味するので、これをフィードバック制御により回避することは理にかなっている。

以上のように、本研究では、指表面の固着・滑り状態を計測する手法を開発するとともに、その結果の利用例を示した。本手法を用いれば、さらに、ヒトの把

持動作におけるフィードバック制御、フィードフォワード制御の詳細を明らかにするための知見が得られると考えられる。これらの点の詳細な解析は今後の課題である。

4. 結 言

ヒトの物体把持時の把持力と接触状態を計測可能なシステムを構築し、ヒトの物体把持状態を計測した結果、把持力の増加率 F_t / F_n と固着領域増加率 S_{stick} に負の相関があることを確認した。また、指モデルにヒトの物体把持時と同様な把持力を加えた有限要素解析を行った結果、ヒトの計測結果と同様に把持力の増加率 F_t / F_n と固着領域の変化率とが対応することを確認した。さらに、ミスナー小体のひずみエネルギー密度の変化率 E は、局所滑り領域において極大値を持つことを確認した。

以上のように、物体把持時の固着・滑り状態、皮膚変形、ミスナー小体近傍のひずみに深い関係があることを明らかにした。

参 考 文 献

- (1) Johansson R. S., Sensory Control of dexterous manipulation in humans. In: Hand and Brain, edited by A. M. Wing, P. Haggard, and J. R. Flanagan, New York: Academic, (1996), 381-414.
- (2) Johansson, S. and Westling, G., Signals in Tactile Afferents from the Fingers Eliciting Adaptive Motor Responses during the Precision Grip, Exp. Brain Res., 66, (1988) 141.
- (3) Johansson R. S. and Vallbo A. B., Tactile Sensory Coding in the Glabrous Skin of the Human Hand, Trends in Neurosciences, 6, (1983), 27-32.
- (4) 多田, 柴田, 今井, 小笠原, 人の把持力制御メカニズム研究のための指先変形と把持 / 負荷力の同時計測装置の開発, 電子情報通信学会誌, J-84-D-II, 6, (2001), 1033-1044.
- (5) 前野, 小林, 山崎, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学関係, 機論 63-607, C (1997), 881-888.
- (6) 小林, 前野, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学関係 (第 2 報), 機論 64-628, C (1998), 4798-4805.
- (7) 木下, 手指による摘み運動に関わる感覚・運動機構, システム制御情報, Vol.36, No.9, (1992), 581-590.
- (8) 小林, 前野, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学関係 (第 3 報), 機論 65-636, C (1999), 289-295.