

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

Method for displaying partial slip used for virtual grasp

非 毛利 優之(慶大) 正 前野 隆司(慶大) 正 山田 陽滋(豊田工大)

Masayuki MORI, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223-8522

Takashi MAENO, Keio University

Yoji YAMADA, Toyota Technological Institute, Tenpaku, Nagoya 468-8511

A method is presented to display partial slip in precision grip of humans. Partial slip is important information for precision grip of humans, because the human controls grasping force by detecting expansion of the partial slip area. Therefore, a device that displays partial slip will make it easier for remote controlled mechanical hands to grasp objects, irrespective of the friction coefficient between the mechanical hand and object. To design the device displaying partial slip, we analyzed the deformation of a finger when in contact with a rigid plate using a finite element model. We also analyzed the deformation of the finger section model when in contact with the device that displays partial slip. As a result of the analyses, it is confirmed that there is a possibility in displaying partial slip using a tactile displaying device, which stimulates the finger with three stimulating parts. And we confirm the effectiveness of the method to stimulate the finger with three stimulating parts.

Key Words : tactile display, partial slip, grasp

1. はじめに

近年、ロボット技術の発展に伴い、遠隔操作ロボットハンドの活躍が様々な分野で求められている。遠隔操作ロボットハンドを用いて対象物を適切な力で把持するためには、対象物からロボットハンドに加わる反力を呈示する力覚呈示装置が必要である。しかし、力覚呈示のみでは、対象物とロボットハンドの摩擦係数の違いを呈示することができないため、ロボットハンドに対して様々な摩擦係数を有する物体を滑り落とさずに適切な力で把持することは困難である。したがって、遠隔操作ロボットハンドを用いて様々な摩擦係数を有した物体を適切な力で把持するためには、ヒトの把持機構を考慮した触覚呈示を行う必要がある。

ヒトが指先で物体を把持する場合、ヒトは無意識に把持力を調節している。また、ヒトの触覚受容器からの信号を伝達する求心神経を麻痺させた状態では、ヒトの把持力調節能力は低下することが知られている。このため、皮膚内部に配された触覚受容器からの感覚情報を下位中枢神経系で処理して筋への運動出力を生成することによって、把持力を調節していると考えられている¹⁾。また、ヒトは、指腹部と把持物体との接触面に生じる固着領域と局所滑り領域の割合を触覚受容器で検出することによって把持力を適切に調節していることが示唆されている²⁾。固着領域とは、指腹部表面が対象物に固着している領域であり、局所滑り領域とは、指腹部表面が対象物の表面を滑っている領域である。ここで、触覚受容器の1つであるマイスナー小体は、局所滑り領域が広がった際に発火頻度が増すことが知られている³⁾。また、ヒトの把持において、マイスナー小体の発火頻度が把持力の増減に強く影響していることが知られている⁴⁾。このため、ヒトはマイスナー小体の発火状態から局所滑り領域の変化を検出することによって、把持力を適切に調節していると考えられる。したがって、遠隔操作ロボットハンドの操作装置に局所滑り領域が拡大した際の「滑りそう」な触感をヒトの下位中枢に呈示する簡便な触覚ディスプレイを装着すれば、遠隔操作ロボットハンドと対象物との摩擦係数の値にかかわらず、無意識下で対象物を滑り落とさずに把持することができると思われる。

本研究では、有限要素法を用いて局所滑りが生じている際の指の変形再現し、局所滑りが生じた際のマイスナー小体の発火状態を再現する手法を構築する。また、指の有限要素モデルと局所滑りディスプレイの接触解析を行い、局所滑りデ

ィスプレイの設計指針をえる。さらに、局所滑り呈示実験を行うことによって、本研究が提案する「滑りそう」な触感の呈示法の有効性を確認する。

2. 有限要素法を用いた「滑りそう」な触感の呈示法の構築

2.1 局所滑り発生時における指の有限要素解析

2.1.1 方法

図1に示すように、剛体平板を指の有限要素モデル(指モデル)⁵⁾に押し込んだ状態で接線方向にずらす静的接触解析を行うことによって、局所滑りが生じている際の指の変形を再現した。指紋の位置を示す番号は、図の左から順に1~26とし、各指紋に2つ存在するマイスナー小体の位置を示す番号

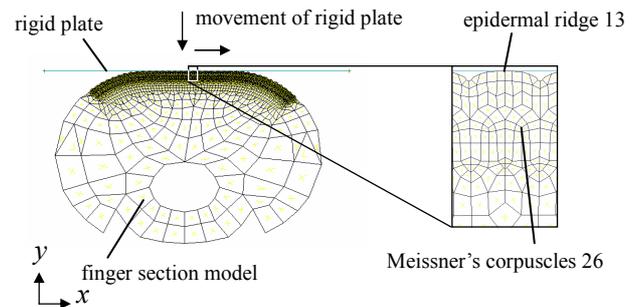


Fig.1 Finite element model of finger and rigid plate

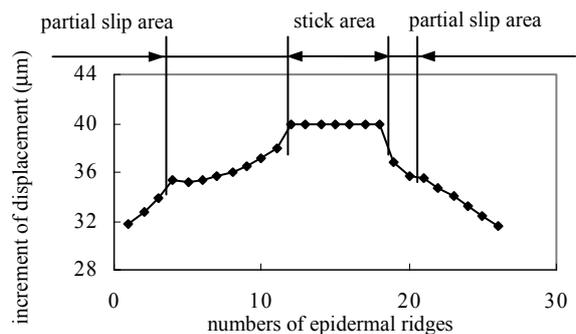


Fig. 2 Increment of displacement of epidermal ridges (contact analysis between finger and rigid plate)

は図の左から順に 1~52 とした。剛体平板と指モデルの摩擦係数は 0.25, 0.5, 0.75, 剛体平板の指モデルへの押し込み深さは 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 剛体平板の 1step あたりの接線方向移動量は 40.0 μ m とした。また、ヒトの触覚受容器の神経インパルス発射頻度は触覚受容器位置でのひずみエネルギーと相関があること、マイスナー小体は速度を検出していることが知られている⁵⁾。このため、マイスナー小体の発火状態を推定する物理量として、本解析での 1step あたりのマイスナー小体位置でのひずみエネルギー変化量の絶対値 $|\Delta E|$ を用いる。

2.1.2 指表面の接線方向変位分布

図 2 に、剛体平板の指モデルへの押し込み深さ 1mm, 剛体平板の押し込み後の接線方向移動量 1.32mm から 1.36mm, 剛体平板と指モデルの摩擦係数 0.5 における各指紋の 1step あたりの接線方向変位増分を示す。図より、局所滑り領域における変位増分は、固着領域と比較して小さいことがわかる。また、摩擦係数 0.25, 0.75, 剛体平板の指モデルへの押し込み深さ 0.5mm, 1.5mm の場合においても同様の傾向があった。したがって、接触領域の中央部では変位増分が大きく、その周囲では変位増分が小さくなるように指腹部に刺激することによって局所滑りが生じた際の「滑りそう」な触感を呈示できると考えられる。

2.1.3 マイスナー小体位置での $|\Delta E|$ 分布

図 3 に剛体平板の指モデルへの押し込み深さ 0.5mm, 1mm,

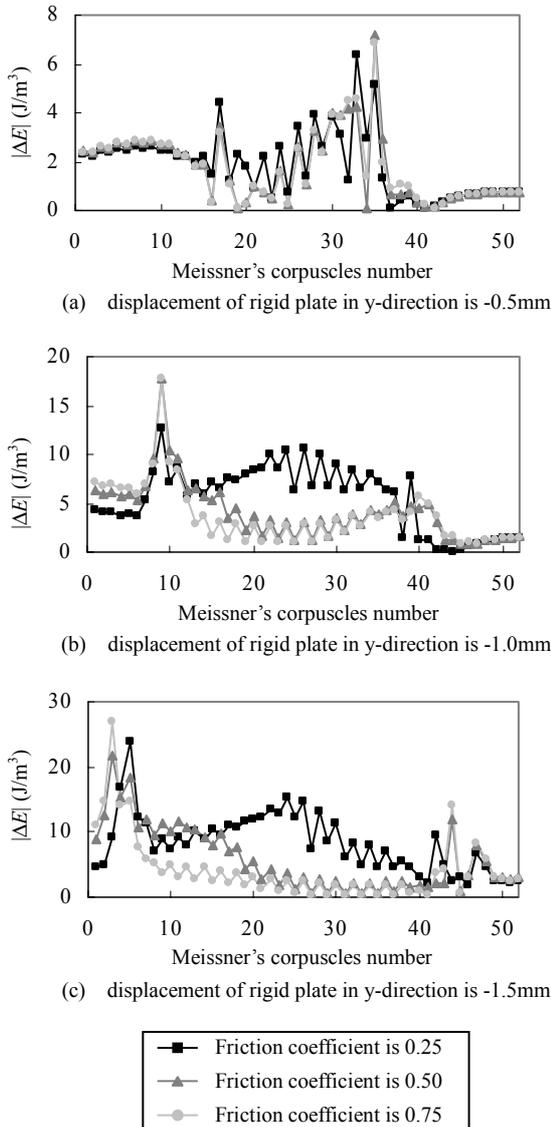


Fig.3 Distribution of $|\Delta E|$ at the Meissner's corpuscles (contact analysis between finger and rigid plate)

1.5mm 剛体平板の接線方向移動量それぞれ 0.2mm, 0.6mm, 0.8mm のときのマイスナー小体位置での $|\Delta E|$ 分布を示す。図 3 より、剛体平板と指モデルの摩擦係数が小さいほど、すなわち接触領域における局所滑り領域の割合が大きいくほど中央部付近におけるマイスナー小体位置での $|\Delta E|$ が大きくなることわかる。したがって、指中央部付近におけるマイスナー小体位置での $|\Delta E|$ の分布が大きくなるように指表面を刺激することで局所滑りを呈示できると考えられる。

3. 局所滑りディスプレイの設計指針

3.1 局所滑りディスプレイの有限要素モデル

図 2 と図 3 より、接触領域の中央部の変位増分よりも小さい変位増分を接触領域の端部の指紋に与えることによって、局所滑りを呈示できると考えられる。このため、局所滑り領

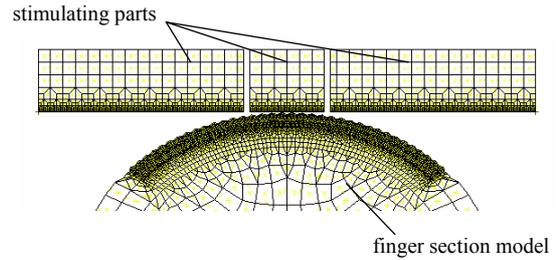


Fig.4 Finger section model and stimulating parts

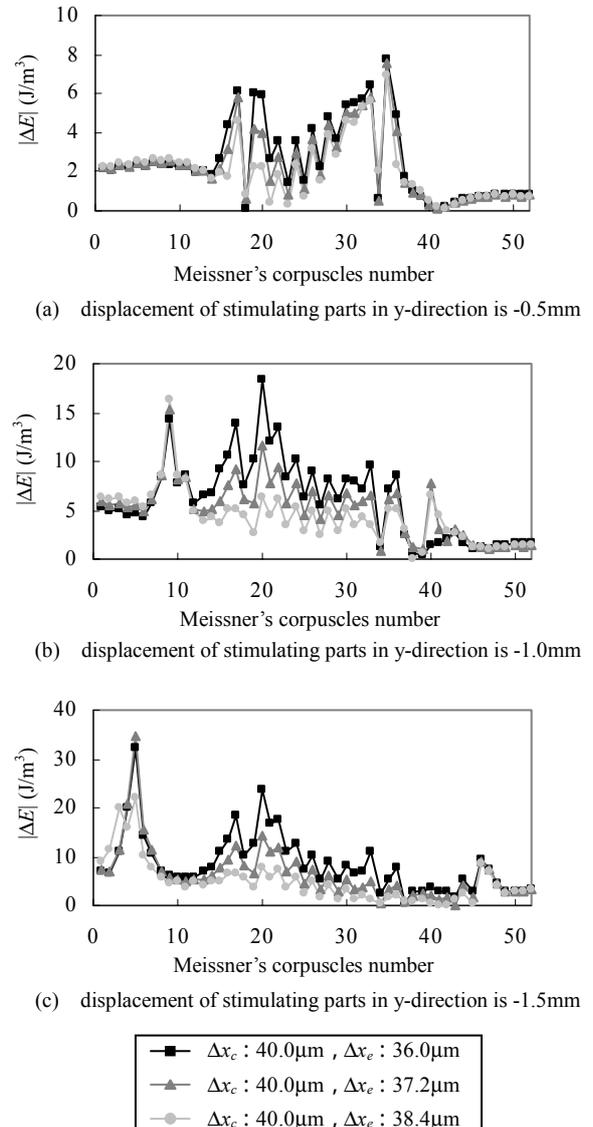


Fig.5 Distribution of $|\Delta E|$ at the Meissner's corpuscles (contact analysis between finger and stimulating parts)

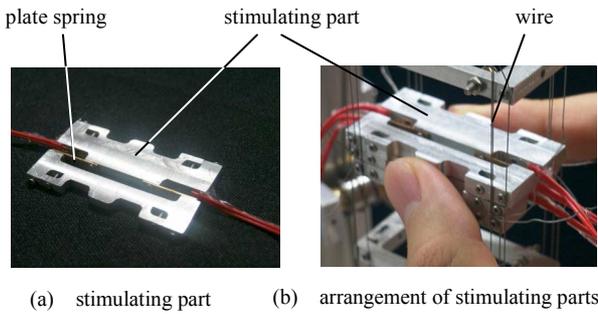


Fig.6 Structure and arrangement of stimulating parts

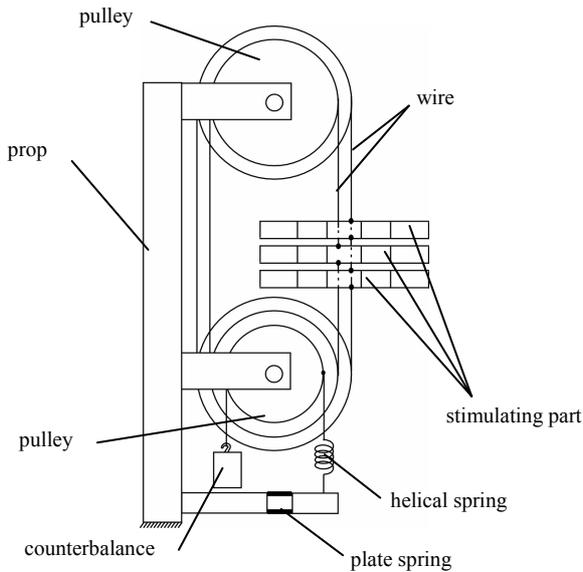


Fig.7 Tactile device displaying partial slip

域および固着領域に位置する指紋の直上にそれぞれ刺激子を離散的に配置した局所滑りディスプレイの有限要素モデルを作成した。図4に、局所滑りディスプレイの有限要素モデルを示す。なお、中央の刺激子の幅は3mm、各刺激子の間隔は指紋の間隔よりも小さい0.25mmとした。

3.2 局所滑りディスプレイと指モデルの接触解析

3.2.1 方法

図4に示した刺激子を構成する節点に強制変位を与え、指モデルに刺激子を1mm押し込み、その後、刺激子を接線方向に移動させた。本解析では、局所滑りが生じた際と同様の指の変形を再現するために、中央の刺激子に与える1stepあたりの接線方向変位増分 Δx_c を40.0 μm 、両端の刺激子に与える接線方向変位増分 Δx_e を、中央の刺激子よりも小さい36.0 μm 、37.2 μm 、38.4 μm とした。

3.2.2 結果

図5に各刺激子の指モデルへの押し込み深さ0.5mm、1mm、1.5mm、中央の刺激子の接線方向移動量はそれぞれ0.2mm、0.6mm、0.8mmのときのミスナー小体位置での $|\Delta E|$ 分布を示す。図より、各押し込み深さにおいて、両端の刺激子の変位増分が小さいほど、中央の刺激子の直下付近におけるミスナー小体位置での $|\Delta E|$ の分布が大きいことがわかる。ここで、図3に示したように、指中央部付近におけるミスナー小体位置での $|\Delta E|$ の分布は、固着領域の割合が少なくなるほど増大する。よって、両端の刺激子の変位増分が小さいほど、固着領域の割合が少ない場合の局所滑りを呈示できると考えられる。以上から、離散的に配置した刺激子を用いた簡便な装置を用いることで、局所滑りを呈示することができると考えられる。

4. 局所滑りディスプレイ

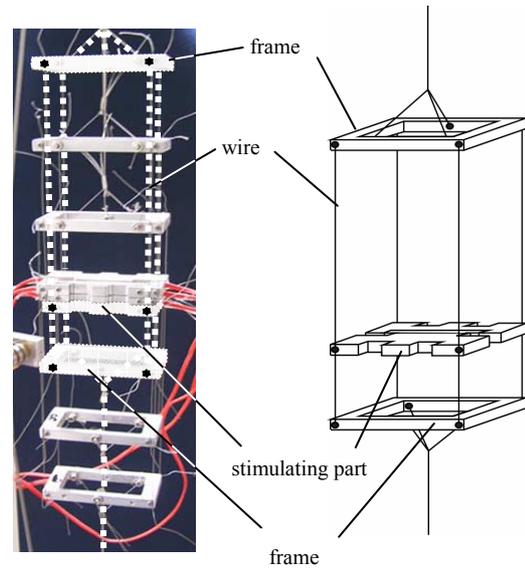


Fig.8 Support of stimulating part

4.1 刺激子

製作した刺激子を図6に示す。各刺激子は図6(a)に示したように2つの刺激子と2枚の板ばねで構成されている。各刺激子に加わる把持力は、2枚の板ばねにひずみゲージを貼り付けることによって計測する。また、各刺激子は、図6(b)に示したように上下に配置されており、局所滑りを呈示する際は、3つの刺激子の中央部を指先で把持する。なお、中央に配置した刺激子の厚みは3mm、上下に配置した刺激子の厚みは4.8mm、各刺激子の間隔は0.25mmとした。

4.2 刺激子の変位調節機構

局所滑りディスプレイの模式図を図7に示す。3つの刺激子は、プーリに巻かれたワイヤにそれぞれ直結されている。また、中央の刺激子に直結されたワイヤが巻かれたプーリの直径は20.0mm、両端の刺激子に直結されたワイヤが巻かれたプーリの直径は20.4mmとした。このため、指先で把持した刺激子を図中の上方向に持ち上げた場合、中央の刺激子に対する両端の刺激子の相対的な変位は、中央の刺激子の変位に比例して大きくなる。ここで、指表面に加わる摩擦力が約2N以下の場合、指表面の接線方向への変位は摩擦力に比例する⁶⁾。よって、中央の刺激子の変位に比例する下方向の力を刺激子に与えれば、各刺激子の指に対する下方向への変位は、中央の刺激子の変位に比例する。したがって、両端の刺激子と中央の刺激子の変位の差が中央の刺激子の変位に比例して大きくなるとともに、指に対する両端の刺激子の変位が中央の刺激子の変位よりも小さくなるため、3.2節で述べた刺激子と指モデルの接触解析と同様の刺激を指に与えることができる。本局所滑りディスプレイでは、図7に示すように、コイルバネを用いて中央の刺激子の変位に比例する下方向の力を刺激子に与える。さらに、コイルバネの固定部を2枚の平行板ばねで支持し、板ばねにひずみゲージを貼り付けることによって持ち上げ力の測定を行う。なお、局所滑り呈示装置の可動部の自重は、図7に示したようにカウンターバランスを吊り下げることによって補償する。ここで、図中に示したコイルバネのバネ定数が異なる場合について、各刺激子の指に対する変位を比較する。刺激子のある距離だけ持ち上げた場合、バネ定数が小さいほど指に対する中央の刺激子の変位は小さくなる。しかし、中央の刺激子と両端の刺激子の指に対する変位の差は一致する。したがって、指に対する刺激子の変位を考えると、中央の刺激子の変位に対する両端の刺激子の変位の割合は、バネ定数が小さいほど減少する。このため、バネ定数が小さい場合には固着領域の割合が少ない場合の局所滑りを、バネ定数が大きい場合には固着領域の割合が多い場合の局所滑りを呈示できる。

4.3 刺激子の支持

刺激子をワイヤで支持した様子を図8に示す。図8の模式

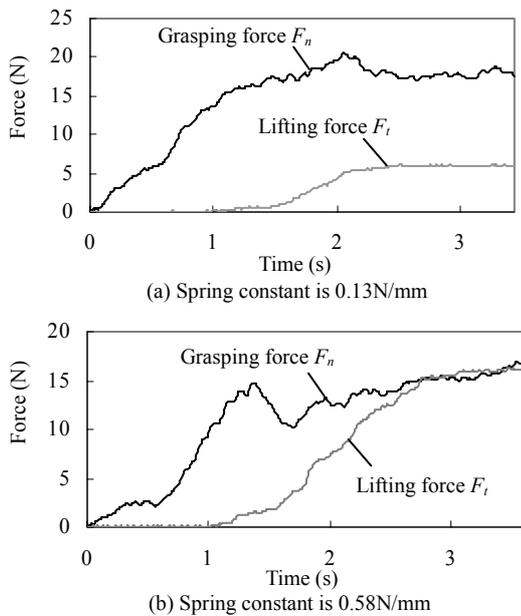


Fig.9 History of the grasping force and the lifting force

Table 1 Ratio of lifting force to grasping force

Subject	$F_{t/n}^1$	$F_{t/n}^2$	$F_{t/n}^1 / F_{t/n}^2$
A	0.52	0.64	0.81
B	0.30	0.42	0.71
C	0.30	0.56	0.54
D	0.47	0.90	0.52
E	0.23	0.47	0.49
F	0.20	0.41	0.49
G	0.26	0.55	0.47
H	0.31	0.68	0.46
I	0.21	0.60	0.35
J	0.15	0.49	0.31

図に示したように、各刺激子は垂直に張ったワイヤによって4点で支持した。また、垂直に張ったワイヤは刺激子の上下に配置したフレームに直結されており、各フレームはブーリーに巻かれたワイヤによって3点で支持した。さらに、ワイヤに張力を与えることによって、刺激子の上下方向以外の自由度を拘束した。

5. 局所滑り呈示実験

5.1 方法

バネ定数の異なるコイルバネ(バネ定数 0.58N/mm, 0.13N/mm)を用いて、固着領域の割合が異なる場合の局所滑りを呈示した。被験者(20代の男女10名)には、把持対象物を滑り落とさずに把持するようにのみ指示した。持ち上げ力と把持力のサンプリング周期は10msとした。なお、バネ定数が0.58Nの場合には固着領域の割合が多い場合の局所滑りを、バネ定数が0.13Nの場合には固着領域の割合が少ない場合の局所滑りを呈示できる。

5.2 結果

図9(a)と(b)に、それぞれ固着領域の割合が少ない場合と多い場合の局所滑りを呈示したときの把持力 F_n と持ち上げ力 F_t の関係を示す。図9(a)と(b)を比較すると、固着領域の割合が少ない場合の局所滑りを呈示したときの方が、持ち上げ力 F_t に対して把持力 F_n が大きいことがわかる。ここで、ヒトが指先で把持した物体に2N/s割合で増加する外力を指腹部に対して接線方向に加えた場合、外力が加わり始めてからヒトが把持力を強めるまでに要する時間は 183 ± 65 ms となることが従来の研究で示されている⁴⁾。このため、局所滑りが呈示され始めた時刻から、把持力が調節され始めるまでに要す

る時間も183ms前後になると考えられる。したがって、図9において、持ち上げ力が増加し始めてから200ms後の時刻を t_1 、持ち上げ力の変化率が十分小さくなる時刻を t_2 とし、時刻 t_1 から t_2 の範囲における把持力 F_n に対する持ち上げ力 F_t の比の平均 $F_{t/n}$ に着目する。なお、時刻 t_2 は、その時刻から0.4s間の持ち上げ力変化率の平均が0.5%未満となる時刻として定義した。

ある被験者について固着領域の割合が少ない場合と多い場合の局所滑りをそれぞれ10回呈示した結果、固着領域の割合が多い場合の $F_{t/n}$ の値は、0.28から0.42の間に分布し、10回の平均値は0.34、標準偏差は0.043であった。また、固着領域の割合が少ない場合の $F_{t/n}$ の値は、0.082から0.24の間に分布し、10回の平均値は0.14、標準偏差は0.048であった。したがって、固着領域の割合が少ない場合の局所滑りを呈示することで、持ち上げ力に対する把持力の割合が増大することがわかった。さらに、表1に、各被験者について、固着領域の割合が少ない場合と多い場合の局所滑りを呈示したときの持ち上げ力 F_t と把持力 F_n の比 $F_{t/n}$ を示す。なお、 $F_{t/n}^1$ は固着領域の割合が少ない場合の、 $F_{t/n}^2$ は固着領域の割合が多い場合の局所滑りを呈示したときの把持力 F_n に対する持ち上げ力 F_t の比である。表1より、固着領域の割合が少ない場合の局所滑りを呈示したときの方が、固着領域の割合が多い場合の局所滑りを呈示したときと比較して、把持力 F_n に対する持ち上げ力 F_t の比が小さいことがわかる。したがって、固着領域の割合が少ない場合の局所滑りを呈示することで持ち上げ力に対する把持力の割合が増大していることから、本研究が提案する「滑りそう」な触感の呈示法の有効性が示されたといえる。

6. おわりに

指の有限要素モデルと離散的に配置した3つの刺激子との接触解析を行い、中央の刺激子に接触している指腹部の接線方向変位が、その他の刺激子に接触している指腹部の接線方向変位よりも大きくなるように指を刺激することによって、局所滑りが生じた際のマウスナー小体位置でのひずみエネルギー分布が再現できることを確認した。また、局所滑り呈示実験を行い、指の有限要素モデルと離散的に配置した3つの刺激子との接触解析と同様の刺激を指に与えることによって、局所滑りが生じた際の「滑りそう」な触感をヒトの下位中枢に対して呈示できることを確認した。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会基盤研究(B)課題番号15360139により行われた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Roland S. Johansson, Charlotte Hager-Ross, Somatosensory control of precision grip during unpredictable pulling loads. III. Impairments during digital anesthesia, *Exp Brain Res*, Vol.89, pp181-191, 1992
- 2) 多田, 小笠原, 指先接触面計測に基づく触覚情報処理の機能レベル探求, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02講演論文集, 1A1-J10, 2002
- 3) 広光, 前野, 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C編, Vol. 68, No. 667, pp. 202-207, 2002
- 4) Vaughan G. Macefield, Charlotte Hager-Ross, Roland S. Johansson, Control of grip force during restraint of an object held between finger and thumb: responses of cutaneous afferents from the digits, *Exp Brain Res*, Vol.108, pp155-171, 1996
- 5) 小林, 前野, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係(第2報 動的接触解析手法および移動する平面と指の接触解析結果), 日本機械学会論文集C編, Vol. 64, No. 628, pp. 4798-4805, 1998
- 6) 黒木, 井野, 和田, 伊福部, 感覚フィードバック型ハンドのための3次元触覚ディスプレイの開発, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp603-604, 1995