

# ICPF アクチュエータを用いたヒト指腹部への 分布振動刺激に基づく把持力調整反射の誘発

昆陽 雅司<sup>\*1</sup> 中本 雅崇<sup>\*2</sup> 前野 隆司<sup>\*3</sup> 田所 諭<sup>\*1</sup>

Reflective Grasp Force Control of Humans Induced by Distributed Vibration Stimuli  
on Finger Skin with ICPF Actuators

Masashi Konyo<sup>\*1</sup>, Masataka Nakamoto<sup>\*2</sup>, Takashi Maeno<sup>\*3</sup>, and Satoshi Tadokoro<sup>\*1</sup>

**Abstract** – A method is proposed to control human grasping force unconsciously by generating small distributed vibration stimuli on a finger based on a human reflex action against detection of partial slippage of contact. Human beings can increase grasping force before the grasped object slips off the fingers based on afferent signals from tactile receptors that detect the expansion of the partial slippage area. We assumed that vibration stimuli that have an appropriate frequency and distribution generate a virtual sensation of partial slippages and induce a reflective grasping force increase. Grasping experiments with minute distributed vibration stimuli using ICPF (Ionic Conducting Polymer gel Film) actuators were performed. Experiments results showed that the effective vibratory frequency was 30 Hz, which is the most sensitive range for Meissner's corpuscles that are closely related to detection of partial slippage. We also found that distribution of vibration stimuli were important to produce human grasping force increase.

**Keywords** : tactile display, vibration stimuli, partial slip, unconsciousness, ICPF Actuator

## 1 はじめに

近年、医療、福祉、アミューズメントといった分野において、マスタスレーブシステムの研究開発が盛んに行われている。しかし、ヒトが直接操作を行う際と同程度の緻密な操作を実現するには至っていない。この原因のひとつには、マスタ側で把持物体とスレーブ・ハンドとの接触状態が正確に再現されていないことが挙げられる。通常、ヒトは質量と摩擦係数が未知の状態であっても触覚受容器からの情報に基づいて適切な力を把持できることが知られている [1]。この機能を「把持力調整反射」と呼ぶことにする。このような物体の「滑りやすさ」を無意識のうちにヒトに呈示することで、ヒトの器用な技能を十分に活かすことが可能となると期待される。

ヒトの摩擦情報の取得については、接触部に起こる「初期局所滑り」を検出しているという説が最も有力である [2]。図 1 に示すように、把持の際の指の接触部は固着領域と滑り領域に分けられる。ヒトは物体が滑り落ちる直前に滑り領域が拡大を検出することによ

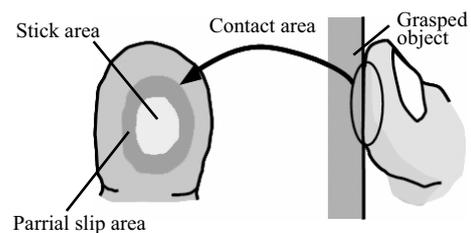


図 1 固着・滑り領域の分布

Fig. 1 Distribution of stick area and partial slip area [3].

り、実際に滑りが起こる前に把持力を調整することが可能である。この原理を利用したロボットハンド用の触覚センサも複数提案されている [4, 5, 6]。一方、毛利ら [3] は、この原理をヒトへの触覚ディスプレイに利用する方法を提案している。彼らは「初期局所滑り」と同等な刺激を接線方向に移動する剛体平板で再現することで、ヒトの把持力増加を誘発できることを示した。しかし、この呈示装置は、機構上、把持持ち上げ動作と触覚呈示が連動するため、把持力の増加が物体を持ち上げようとする意図によって起こった可能性を除外できない。また、触覚呈示のタイミングを手の動きと独立に制御できないため、実用的な応用には向いていない。

本研究では、分布振動刺激を用いて、無意識下でヒ

<sup>\*1</sup>東北大学 大学院情報科学研究科

<sup>\*2</sup>慶應義塾大学 大学院理工学研究科

<sup>\*3</sup>慶應義塾大学 理工学部

<sup>\*1</sup>Graduate School of Information Science, Tohoku Univ.

<sup>\*2</sup>Graduate School of Science and Technology, Keio Univ.

<sup>\*3</sup>Department of Science and Technology, Keio Univ.

トの把持力調整反射を誘発する新しい滑り情報の呈示法を提案する。振動刺激を利用した触覚ディスプレイとして、昆陽ら [7, 8] により高分子ゲルアクチュエータ (ICPF) を用いた触覚ディスプレイが開発されている。彼らは、触覚受容器の周波数応答特性を利用して、振動刺激の周波数の違いによって選択的に受容器を刺激する方法を提案した。本研究では、この知見を利用して固着領域と滑り領域の分布情報を分布振動の周波数の違いによって呈示する。この触覚刺激と力覚を同時に呈示にすることにより、ヒトの把持力調整反射の誘発を確認する。

## 2 分布振動刺激による局所滑り呈示法

### 2.1 ヒトの局所滑り知覚機構

ヒトは接触部における局所的な滑りと固着の分布を知覚することによって把持力を調整すると考えられる。実際に、複数の研究者が CCD カメラを用いて、平板状表面を有する物体をヒトが持ち上げる際のヒト指腹部表面の映像を撮影し、指腹部における固着領域と局所滑り領域の分布を算出している [9, 10]。これらの研究により、ヒトが物体を把持する際には、図 1 のように、指腹部中央に固着領域が、その周辺に局所滑り領域が存在することが明らかになった。

また、局所滑りの検出機構として、ヒトの皮膚内部の機械受容器であるマイスナー小体の関与が確かめられている。Johansson ら [11] は、被験者が母指および示指を用いて把持した物体に対して接線方向の力を加え、その際の各触覚受容器の応答を微小電極法により測定した。その結果、マイスナー小体が、把持力を調節するために必要な触覚情報の検知を行っている可能性を示した。また、広光ら [9] は、ヒト指腹部の有限要素モデルを用いて指と剛体平板との接触解析を行い、局所滑り領域が拡大した際に、マイスナー小体の位置におけるひずみエネルギーの変化が増大することを確認した。

以上の知見から、ヒトの局所滑りの検出に関しては、特定の受容器、すなわち、マイスナー小体の活動とその分布が関係していると考えられる。

### 2.2 提案手法

上記の知見より、マイスナー小体を選択的に刺激し、その分布を制御することができれば、人工的に初期局所滑りを呈示することができると考えられる。特定の触覚受容器を選択的に刺激する方法として、触覚受容器の周波数応答特性の利用が考えられる。図 2 は各受容器の振動検出閾値の周波数特性を示す [12]。振動検出閾は、受容器に神経インパルスを発射させることのできる最小の振動振幅を表し、小さい値ほど受容器の感度が高いことを示す。この図より、メルケル小体、

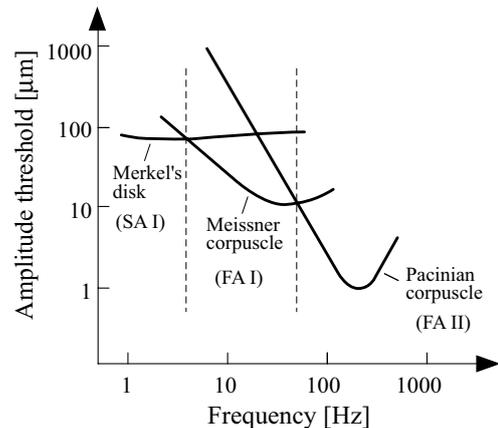


図 2 各触覚受容器の振動検出閾値曲線 (前野 [12] より改変).

Fig. 2 Thresholds of tactile receptors for vibratory stimulus. (revised from Maeno [12]).

マイスナー小体、パチニ小体はそれぞれ、およそ 5 Hz, 30 Hz, 200 Hz の振動刺激に対して最も敏感であることがわかる。

昆陽ら [7] は、この周波数応答特性に基づいた選択的的刺激法を提案し、ICPF アクチュエータを用いて微小分布振動を皮膚表面に呈示する触覚ディスプレイを開発した。このディスプレイを用いて、5 Hz の振動刺激によりメルケル小体を選択的に刺激し、圧覚 (圧迫感) の呈示が可能なことや、複数の周波数の振動刺激を合成することにより様々な材質の質感を呈示できることを明らかにした [8]。ただし、昆陽らの触覚呈示装置は振動の空間分布は考慮されていない。

本研究では、上記の時間周波数による選択的的刺激法と、空間分布を制御可能な振動刺激を用いて、人工的に局所滑りの変化を呈示し、ヒトの把持力調整反射を誘発させる手法を提案する。振動の分布は、指との接触面内の中央部と周辺部の 2 つの領域で制御する。初期局所滑りを再現するために、中央部は「固着状態」を呈示し続け、周辺部は「固着状態」から「滑り状態」への変化を呈示する。ここで、次の仮定をおこなう。

- 「固着状態」は圧覚を生成するメルケル小体の感度が高い 5 Hz の振動刺激を用いて呈示される。
- 「滑り状態」はマイスナー小体の感度が最も高くなる 30 Hz の振動刺激を用いて呈示される。

ただし、実際にこれらの触覚受容器を刺激できるかどうかの直接的な証拠は持たない。しかし、初期滑り呈示の結果、把持力調整反射の誘発が可能であったかどうかより、間接的に我々の仮定の妥当性が検証されると考える。

### 2.3 検証課題

本研究でポイントとなる検証課題は次の 2 点である。

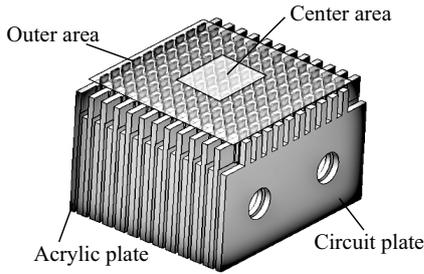


図3 分布刺激呈示装置の構成と刺激呈示領域  
Fig. 3 Components of tactile display device and display areas.

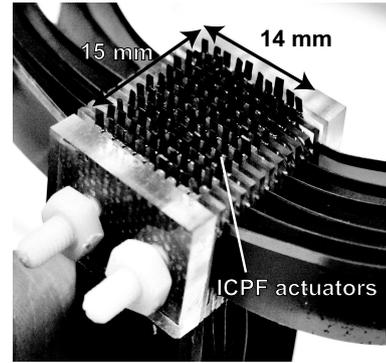


図4 分布刺激呈示装置の外観  
Fig. 4 Overview of tactile display device.

1. 振動周波数の影響：どの周波数の刺激が把持力調整反射を効果的に誘発するか？もし、30 Hz の振動刺激が有効であれば、マイスナー小体の関与が示唆される。
2. 振動分布の影響：振動分布は把持力調整反射に影響するか？初期滑りの「局所性」が本質的に重要であるか？

表1 入力電圧に対する振動検出閾  
Table 1 Threshold of detectable vibration for input voltages

周波数	5 Hz	30 Hz	200 Hz
検出閾値(平均)(V)	2.9	2.8	1.5
検出閾値(最小値)(V)	2.8	2.6	1.2
使用する値(V) (先端部振幅(μm))	3.0 (34)	2.4 (14)	1.0 (2)

### 3 分布振動刺激呈示装置の開発

#### 3.1 設計条件

提案手法を実現するために、周辺部と中央部を別々の周波数で振動させることができる分布振動刺激装置を開発する。設計条件として、すべての触覚受容器の周波数応答領域で選択的に刺激するために、5Hz, 30Hz, 200Hz の振動を生成可能な高い応答性をもつ振動子が必要である。また、指先の2点弁別閾は1-2 mm 程度であるため、刺激子の分布が2点弁別閾以下になるような高密度で振動子を配置する必要がある。

以上の条件を考慮した結果、振動子として、ICPF(Ionic Conducting Polymer gel Film) アクチュエータを用いることとした[13]。ICPF アクチュエータは膜の両面に電圧を印加すると、膜内のイオンの移動に伴って応力が発生し、屈曲運動を行う。加工が容易であることから、任意の形状に成形することが可能である。また、電圧を両面に印加して駆動するため、機構が単純である。したがって、装置全体の小型化と振動子の配置の高密度化が可能となる。また、応答性が高いことから、200 Hz 程度の高周波域での駆動が可能である[7]。さらに、剛性が低く、駆動電圧も低いため、指腹部に直接触れて使用する際にも安全である。ただし、ICPF アクチュエータは湿潤状態で動作させる必要があるが、純水で数分間おきに濡らすことで空気中でも使用可能である[8]。

#### 3.2 製作

図3と図4に考案した分布振動刺激呈示装置の構造と外観を示す。製作した刺激呈示装置は、多数のICPF

アクチュエータと、銅張積層板、アクリル板、およびフレキシブル基板で構成される。ICPF アクチュエータをフレキシブル基板と銅張積層板の間に挟むことにより、ICPF アクチュエータの固定および電圧の印加を行う。

ディスプレイ部の面積は20代の男女10名の指腹部の面積の測定結果をもとに、設置した全てのICPF アクチュエータが指腹部に触れるように考慮した。さらに、指腹部と剛体平面の接触の際の局所滑りの観測結果[9, 10]を参照し、適当な面積を14 × 15 mmとした。ICPF アクチュエータの配置数に関しては、刺激子の分布密度が前述の2点弁別閾以下になるように12行10列(120個)で配置することとした。1本のICPF アクチュエータは幅1 mm, 長さ2 mmである。

また、図3に示す中央部は5 × 5.6 mmの領域であり、外周部は全体から中心を除いた領域である。これは、指腹部との接触面において、局所滑り領域の割合を40%以上にすることが可能であることや、製作の容易さを考慮したことによる。

#### 3.3 予備実験

通常、把持の際に、ヒトは局所滑り覚の感覚が意識に上ることはない。このことから、局所滑りを呈示するための触覚刺激は、意識に上らない程度の大きさで呈示する必要がある。これは、被験者が触覚刺激の変化に気づくことによって把持力調整に影響を受ける可能性を排除するためにも必要である。本節では、分布振動刺激呈示装置への入力電圧に対する振動検出閾を調べ、無意識下の刺激を与えるための入力電圧を定める。振動周波数は、以後の実験で用いる5 Hz, 30

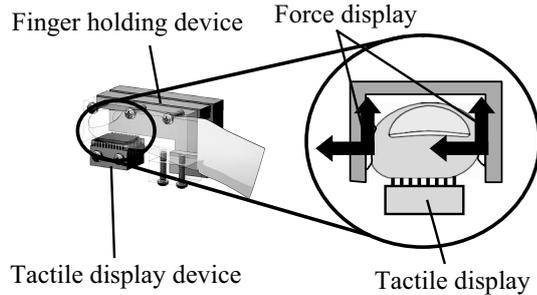


図5 触覚刺激と力覚の独立分離型ディスプレイ

Fig.5 Separable display presenting tactile stimuli and force independently.

Hz, 200 Hz を対象とする。各周波数において入力振幅を 0.2 V 刻みで変化させ、被験者に刺激を感じるか否かを質問した。なお、振幅の変化は昇順、降順両方で確認した。被験者は 6 名である。表 1 に得られた各周波数の振動検出閾の平均値、最小値を示す。この結果より、30 Hz と 200 Hz の振動については、閾値の最小値よりも小さい 2.4 V, 1.0 V をそれぞれ使用することとした。ただし、5 Hz の振動については、閾値よりも少しだけ大きい 3.0 V を使用する。これは、5 Hz の振動は圧覚呈示を想定しており、実際の把持においては、物体をつかんだ際には常に圧覚を感じることを考慮したためである。なお、ICPF アクチュエータが皮膚に接触したときの振動振幅を測定することは困難である。参考のため、皮膚と非接触の状態 ICPF アクチュエータを駆動した場合の先端部の振幅を表 1 に示す。

#### 4 仮想把持実験

##### 4.1 想定する状況

ヒトが母指と示指を用いて物体を把持している際に物体に突然外力が加わる、という状況を想定する。そのような場合、ヒトは物体と指との接触面に起こる初期局所滑りを検出することにより、反射的に把持力を増加させると考えられる。

本節では、前節の分布振動刺激呈示装置に加えて、力覚ディスプレイを用いることによって、上記の状況を仮想的に再現するような実験をおこなう。この際、様々な分布と周波数の組み合わせをもつ分布振動刺激を仮想接触面に呈示することにより、人工的に初期局所滑りを呈示できるような条件を調べる。初期局所滑りが呈示できたか否かは、ヒトの把持力を測定し、法線力の反射的な増加が誘発できたかどうかで間接的に判定する。

##### 4.2 実験装置

本実験では、図 5 に示すような、触覚刺激と指に加わる外力とを分離して呈示可能な実験装置を開発し

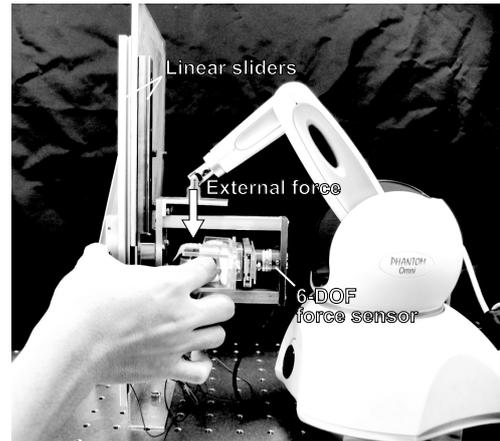


図6 実験装置

Fig.6 Experimental setup.

た。この機構は力覚ディスプレイと指との接触によって起こる触覚情報が、分布振動刺激呈示装置によって呈示される仮想接触面の触覚刺激に影響しないように考慮している。力覚は関節周辺の靭帯や筋などによって知覚される深部感覚であるため、本来の作用面である指腹部に呈示する必要はないと考える。本研究では、図 5 のような示指の両側面を剛性の高い樹脂素材とアクリル板で挟み込むことで指全体に力を加える指支持機構を製作し、力覚はこの指支持機構を介して呈示する。

図 6 に示すように、外力の発生装置として、PHANTOM Omni (SensAble Technology 社) を用いる。また、指に加わる法線力と接線力を測定するために指支持機構には 6 軸力センサを取り付けた。PHANTOM は鉛直上方向に力を加えることで、指支持機構全体の重量を補償する役割も果たす。本実験では、初期状態では、鉛直下方向に 1 N が加わるように力覚センサを用いて PHANTOM を制御した。

分布振動呈示装置はマジックテープを用いて示指に装着され、示指はその状態のまま指支持機構に固定される。この結果、ICPF の振動方向と外力の向きは直交する。振動方向に関しては、皮膚の接線方向の引っ張り向きはルフィニ終末が検出するといわれており [14]、マイスナー小体、メルケル小体、パチニ小体は振動の向きには関与しないため影響は少ないと考えられる。

指支持機構に固定された示指と母指側のステージは、図 6 に示すようにそれぞれの指が向かい合うようにリニアスライダに取り付けられているため、上下方向に滑らかに動かすことが可能である。以上の機構により、被験者は母指と示指の 2 本で物体を把持するような感覚を得ることができる。

##### 4.3 振動周波数の影響

###### (A) 実験方法

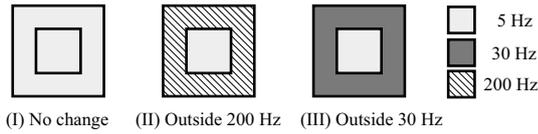


図 7 周波数の影響を調べる触覚刺激の呈示条件  
Fig. 7 Conditions of tactile stimuli for verifying the frequency effects.

振動周波数の影響を調べるため、前述の実験装置を用いて仮想把持実験をおこなう。具体的には、局所滑りを呈示する分布振動刺激呈示装置の外周部の振動を複数の周波数で検証する。

被験者には仮想把持物体を同じ高さで 10 s 間保持させるというタスクを与える。この 10 s 間の間に外力を加える。外力は 1.0 N から瞬時に 3.0 N に変化するように力覚センサを用いて制御される。このとき、被験者にはいつ外力が加えられるか知らされていない。初期の触覚刺激は全領域が「固着状態」となっていることを想定して、全領域で 5 Hz の振動を与える。その後、外力が加わったと同時に、分布振動刺激呈示機構の外周部の触覚刺激を以下の条件のように変化させる。

- (I) No change: 全領域 5 Hz の振動のまま変化させない
- (II) Outside 200 Hz: 外周部の振動を 200 Hz に変化させる
- (III) Outside 30 Hz: 外周部の振動を 30 Hz に変化させる

Fig. 7 は上記の各条件を図示したものである。各周波数の振動振幅は表 1 で定義されたものを用いる。

ここで、上記の振動分布の刺激は 0.5 s 間だけ与えるものとする。この時間は、ヒトは 2 N の外力が把持物体に加わった際に、外力が加わってから 0.5 s 以内に法線力の増加を終了させる、という知見 [11] に基づいて決定した。0.5 s 間、上記の刺激を与えたのち、触覚刺激は初期の全領域 5 Hz の状態に再び戻す。

被験者は 20 代の 6 名である。各条件について 3 回呈示を行った。その際、呈示の順番および外力の発生時間はランダムとした。また、実験終了時に、被験者に触覚の違いを判別できたかどうかを質問した。

(B) 結果

外力が加わった際の法線力の変化を力覚センサによって測定した。図 8 は法線力の変化の実験結果の中から典型的な傾向を示したものを例として示す。図中の時刻 1.0 s は外力が加え始められた時刻を表すように調整してある。把持力の増加率を計算するために、外力が加わる直前の 1.0 s 間の法線力の平均値を基準値 ( $F_{ref}$ ) として定義する。図 8 はこの基準値を 1.0 とした場合の法線力の変化率を表している。この図よ

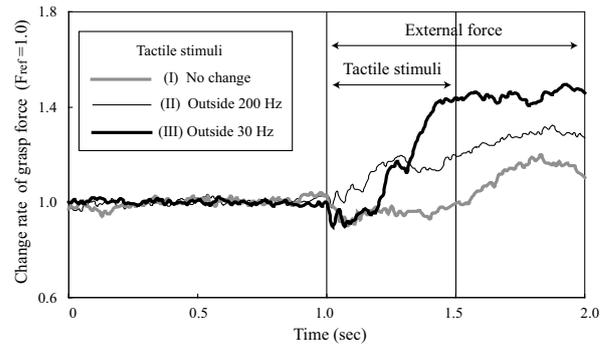


図 8 振動周波数の違いによる法線力変化の典型例

Fig. 8 An example of typical changes of the normal force by presenting vibration stimuli in the different frequencies.

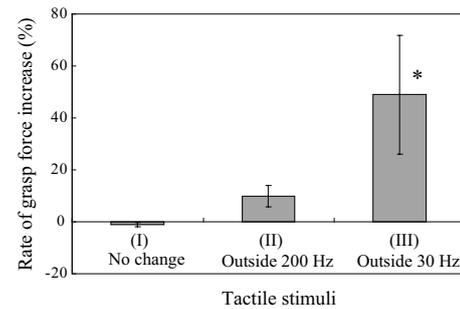


図 9 振動周波数の違いによる法線力増加率  
Fig. 9 Increase ratio of the normal force in the different vibration frequencies.

り、条件 (III) の刺激が加えられた 1.0 s から 1.5 s の間、被験者の法線力が増加していることが確認できる。この傾向は、他の被験者でも確認された。

次に、法線力の増加率を統計的に解析する。ここでは、触覚刺激の呈示終了時から 1.0 s 間の間、すなわち、1.5 s から 2.5 s の間の法線力の平均値を法線力の増加量 ( $\Delta F$ ) として定義する。このとき、法線力の増加率は、 $\Delta F / F_{ref}$  として計算することができる。図 9 は、各条件の刺激に対して、すべての被験者の法線力の増加率を平均したものである。この図より、条件 (III) の刺激を与えることによって、法線力が平均で約 50 % 増加したことが示された。一方、条件 (II) は法線力の増加に大きな影響を与えなかった。何もなかった条件 (I) と条件 (III) との間には、統計的にも有意な差が確認された ( $P < 0.05$ )。条件 (I) と条件 (II) との間には有意な差は見られない。

ここで、被験者が把持力を増加させた要因について考える。本実験では、被験者が外力に対してどのように対応すべきかは、把持物体の高さを保持すること以外には特に指示されていない。今回の実験装置では、手指全体に外力が加わるため、通常は、上下方向の腕力で外力で抵抗するだけでこのタスクに対応できるはず

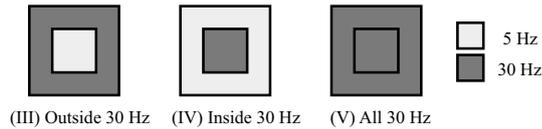


図 10 振動分布の影響を調べる触覚刺激の呈示条件

Fig. 10 Conditions of tactile stimuli for verifying the distribution effects.

である。つまり、タスクとして把持力を増加させるような要因はない。実際、皮膚刺激を変化させないときは把持力の増加はほとんど観察されなかった。一方、特定の皮膚刺激を加えたときに法線力の増加が観測されたのは、皮膚刺激によって初期局所滑りと同様の知覚が起こり、被験者は把持物体が滑ったことを察知し把持力を増加させたと考えられる。

以上の実験結果から、外力の発生と同時に 30 Hz の振動刺激を外周部に呈示することで、ヒトの把持力調整反射を効果的に誘発できることが確認された。この現象はパチニ小体の感度が最も高くなる 200 Hz の振動では確認できなかった。また、被験者の聞き取り調査の結果より、全ての被験者が触覚刺激の変化に気づかなかったことが分かった。これは、被験者に事前に振動の変化が起こるといふ情報を与えた場合でも同様であった。このことは、我々が提案する方法によって、ヒトの把持力を無意識のうちに制御できることを意味する。

#### 4.4 振動分布の影響

##### (A) 実験方法

本実験では振動分布の影響を調べる。前節で、30 Hz の振動刺激が効果的に把持力調整反射を誘発することが確認された。本節では、この 30 Hz の振動をもちいて、触覚刺激の中央部と周辺部の分布を変えた場合の影響を調べる。本実験で用いる振動分布は次の条件である。

(III) Outside 30 Hz: 外周部が 30 Hz, 中央部が 5 Hz の振動分布 (前節の条件 (III) と同じ)

(IV) Inside 30 Hz: 外周部が 5 Hz, 中央部が 30 Hz の振動分布

(V) All 30 Hz: 全ての領域が 30 Hz の振動分布

Fig. 10 は上記の振動分布条件を図示したものである。

実験の手順は前節の実験と刺激条件を除いて同じである。被験者も前節と同一の 6 名を用いた。

##### (B) 結果

実験結果の解析は前節の周波数の影響と同じ方法を用いる。図 Fig. 11 は、振動分布を変化させた際の法線力の変化率を表す。条件 (III) と条件 (IV) のとき、法線力の増加が起きていることが確認できる。条件 (V)

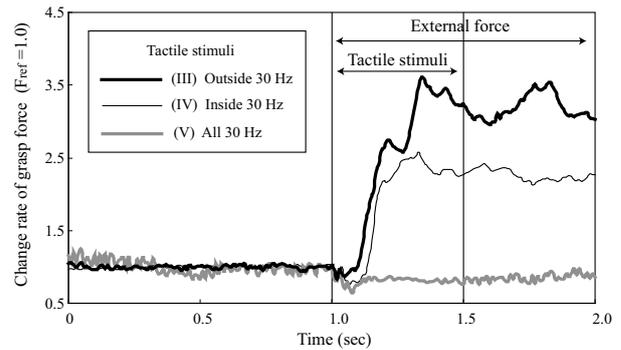


図 11 振動分布の違いによる法線力変化の典型例

Fig. 11 An example of typical changes of the normal force by presenting vibration stimuli in the different distribution (a different subject in Fig. 8).

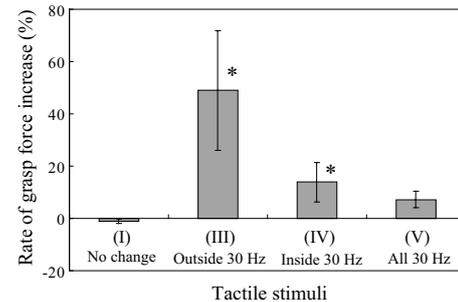


図 12 振動分布の違いによる法線力増加率

Fig. 12 Increase ratio of the normal force in the different distribution ((I) and (III) are same in the Fig. 9).

はほとんど把持力調整反射を引き起こさなかった。これらの傾向は他の被験者にも当てはまる。

図 12 は、前節と同じ定義で求めた全被験者の法線力の増加率の平均を示す。条件 (IV) の増加率は条件 (III) に比べて小さかった。しかし、何も変化させなかった条件 (I) と条件 (IV) の間には統計的に有意な差が確認された ( $P < 0.05$ )。このことから、条件 (IV) も把持力調整反射を引き起こしていると考えられる。一方、条件 (V) は、把持力に影響を与えなかった。

以上の結果から、振動分布は把持力調整反射の誘発に大きな影響を与えることが明らかになった。振動分布が適切でない場合、前節で有効性が確認された 30 Hz の振動刺激を使用しても把持力調整反射は起こらないことが確認された。最も有効な刺激は、外周部に 30 Hz, 中央部に 5 Hz の振動分布を与えることであることが検証された。これは我々が初期局所滑りの現象を再現すると想定していたものと一致する。一方、条件 (IV) のように我々が想定していた刺激分布を逆転させたものでも、把持力調整反射が起こったことから、ヒトは指の中央部と外周部というマクロな分布よりもさらに局所的な滑りの分布に反応して把持力を調

節している可能性が示唆された。

## 5 考察

本節では、周波数と振動分布の影響について、さらに考察を深める。

まず、なぜ 30 Hz の振動が最も効果的に把持力調整反射を誘発できたのかについて考える。周波数と振動分布の実験結果より、中央部を 5 Hz の振動で固着状態、外周部を 30 Hz の振動で滑り状態と仮定した刺激法が妥当であったことが示された。この振動分布は初期局所滑りの分布に基づいて仮定されたものである。一方、初期局所滑りの検出メカニズムに関しては、Johansson ら [11] や前野ら [9, 3] によって、ミスナー小体の関与が示されている。仮に、我々の提案する手法が想定したとおり初期局所滑りを再現していると考えれば、30 Hz の振動刺激がミスナー小体を効果的に刺激したために、初期局所滑りを呈示できたと考えるのが妥当である。実際に 30 Hz の振動刺激がミスナー小体を選択的に刺激できるのかについては、周波数をもっと細かく変化させることや、神経活動を実際に計測するなど、さらに詳細な実験が望まれる。

また、振動分布の実験結果で、条件 (IV) のように我々が想定していた刺激分布を逆転させたものでも、把持力調整反射が確認された。このことから、ヒトは指の中央部と外周部というマクロな分布よりも、さらに局所的な固着・滑り情報を検出している可能性が考えられる。本実験では、振動分布を外周部と中央部の 2 つの領域で分けたが、さらに、振動分布を高分解能で変化させることによって、初期局所滑りを呈示するための刺激分布に関する詳細な条件を求めることが必要である。

## 6 まとめ

本研究では、ヒトの初期局所滑りの検出に対する把持力調整反射のメカニズムに基づいて、微小な分布振動刺激により、人の把持力を無意識のうちに制御する手法を提案した。本手法は、振動刺激の周波数とその分布状態によって、その効果が大きく影響されることが明らかになった。具体的には、分布刺激の中央部に固着状態を呈示する 5 Hz の振動、外周部に滑り状態を呈示する 30 Hz の振動を加えることで、ヒトの把持力を 50% 程度無意識のうちに増大できることが確認された。

本研究は、力覚に加えて 30 Hz の振動刺激の分布を変化させることで、無意識のうちに把持力を増加させるというヒトの反射行動を発見したともいえる。このような反射は、我々が物体を把持・操りする際に日常的に用いている無意識の技能であると考えられる。

このようなヒトの把持力調整反射を自在に操つことができれば、マスタ・スレーブなどの遠隔操作において、操作者により直感的な情報を呈示できることになる。本研究の成果は、このような人とロボットシステムを一体化させる感覚共有技術の一端を担うと期待される。

## 参考文献

- [1] S. Johansson and G. Westling, " Signals in Tactile Afferents from the Fingers Eliciting Adaptive Motor Responses during the Precision Grip ", *Exp. Brain Res.*, vol. 66, pp. 141-154, 1988.
- [2] T. Maeno, T. Kawamura and S. Cheng, Friction Estimation by Pressing an Elastic Finger-shaped Sensor against a Surface, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 20, No. 2, pp. 222-228, 2004.
- [3] M. Mori, T. Maeno and Y. Yamada, Displaying Partial Slippage for Virtual Grasping, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 17, No. 3, pp. 277-284, 2005.
- [4] M. Tremblay and M. R. Cutkosky, " Estimating Friction Using Incipient Slip Sensing During a Manipulation Task ", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automation*, pp. 429-434, 1993.
- [5] G. Canepa, D. D. Rossi et al, " Detection of Incipient Object Slippage by Skin-Like Sensing and Neural Network Processing ", *IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics-Part B*, vol. 28, no. 3, pp. 348-356, 1998.
- [6] T. Maeno et al, " Analysis and Design of a Tactile Sensor Detecting Strain Distribution inside an Elastic Finger ", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics Systems*, pp. 1658-1663, 1998.
- [7] 昆陽, 田所, 高森, 小黒, 徳田, 高分子ゲルアクチュエータを用いた布の手触り感覚を呈示する触感ディスプレイ, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 6, No.4, pp.323-328, 2001.
- [8] M. Konyo, A. Yoshida, S. Tadokoro and N. Saiwaki, A tactile synthesis method using multiple frequency vibration for representing virtual touch, *IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1121-1127, 2005.
- [9] 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)*, 68 巻 667 号, pp.202-207, 2002.
- [10] M. Tada, M. Imai and T. Ogasawara, Development of Simultaneous Measurement System of Incipient Slip and Grip/Load Force, *Proc. IEEE Intl. Workshop on Robot and Human Interaction (RO-MAN2000)*, pp.57-62, 2000.
- [11] 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.*, 108, pp.155-171, 1996.
- [12] 前野, ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能, *日本ロボット学会誌*, 18 巻 6 号, pp. 772-775, 2000.
- [13] 田所, 柔らかいアクチュエータ, *日本ロボット学会誌*, Vol.15, No.3, pp. 318-322, 1997.
- [14] 下条, 皮膚感覚の情報処理, 計測と制御, Vol.41, No.10, pp. 723-727.

(2005 年 9 月 25 日受付)

[ 著者紹介 ]

昆陽 雅司 (正会員)



1999年神戸大学工学部情報知能工学科卒業。01年同大学大学院自然科学研究科情報知能工学専攻修士課程修了。04年同システム機能科学専攻博士課程修了。同年慶應義塾大学大学院理工学研究科COE特別研究助手。05年東北大学大学院情報科学研究科助手、現在に至る。触覚ディスプレイ・センサに関する研究に従事。博士(工学)。

中本 雅崇



2005年慶應義塾大学理工学部機械工学科卒業。同年同大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻に入学、現在に至る。

前野 隆司 (正会員)



1984年東京工業大学工学部機械工学科卒業。86年同大学機械工学専攻修士課程修了。同年キヤノン(株)勤務。95年慶應義塾大学理工学部機械工学科専任講師。99年同助教授、現在に至る。専門はロボティクス、アクチュエータ・センサ工学。博士(工学)。

田所 諭 (正会員)



1982年東京大学工学部精密機械工学科卒業。84年同大学大学院工学系精密機械工学専攻修士課程修了。同年神戸大学工学部助手。93年同助教授。05年東北大学大学院情報科学研究科教授、現在に至る。02年特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構設立、会長。レスキューロボット、VRなどの研究に従事。博士(工学)。