

別刷

日本バーチャルリアリティ学会 論文誌

日本バーチャルリアリティ学会

振動ファントムセンセーションの位置制御による 指先への接線力と滑りの代替提示

大丘 達也^{*1} 藤田 欣也^{*1}

Substitutive Display of Tangential Force and Slip for Fingertips by Position Control
of Vibrotactile Phantom Sensation

Tatsuya Ooka^{*1} and Kinya Fujita^{*1}

Abstract --- We propose a substitutive tangential force and slip display method by controlling position of the vibrotactile phantom sensation (VPS). The tangential force is substituted by the VPS position displacement and the slip is displayed as the oscillatory displacement of the VPS position. A 20mm x 20mm x 20mm fingertip-wearable device with four pins has been prototyped. The evaluation experiments demonstrated the feasibility of the substitutive display of tangential force and slip, and the assistive effect in cognition of contact state change.

Keywords: phantom sensation, tangential force, slip, tactile display, force display, vibration

1 はじめに

力触覚を介した接触状態変化の提示は、VR における重要な機能の一つである。Johansonらは、物体を指先で把持して別の場所に置くような単純な作業も、把持や持ち上げなど複数の動作フェーズからなり、力触覚を介したフェーズ間の遷移の認知が重要であると述べている[1]。このような複数の指を用いた作業のための力覚提示を目的に、ストリング型[2]やマニピレータ型[3]など、指先への複数自由度の力覚提示を実現する接地型デバイスが開発されている。しかし、これらのデバイスは構造が複雑化しやすく、作業空間に制約を生じる場合も多い。そこで、物体の把持反力の提示に特化した、1自由度の指先力覚提示装置も多数開発されている[4-6]。しかし、十分な反力を提示しようとする駆動部が大型化するなどの理由から、必ずしも小型軽量で容易に使用できるデバイスが実現されているとは言い難い。

そこで、装置のさらなる小型軽量化を目的に、小型モータを用いた指先の圧迫[7,8]やワイヤによる指先の締め付け[9]など、提示情報を限定した擬似的な力覚提示方法が提案されている。刺激対象を指先の圧覚受容器に限定することで小型軽量化が実現され、一部のデバイスは2自由度の力覚提示を実現したが、自由方向の接線力提示や連続的な滑りの表現は困難と見られる。また、ジャイロモーメントを利用した方式[10]や、振動知

覚の非線形性を利用して指先なぞり時の表面形状を提示する装置[11]なども提案されているが、いずれの方式においても、小型軽量で容易に使用できる多自由度の指先への接触力提示の実現のためには、さらなる研究開発が必要である。

他方、従来から簡易なデバイスを用いた振動提示によって、仮想物体と指先の接触状態変化を提示する試みが多数ある[12,13]。非接触から接触への遷移など、接触状態の単純な変化の提示には有効な方法であるが、単に振動を提示するだけでは滑りの発生や、把持力や摩擦力など多自由度の力覚を提示することはできない。そのため、振動を用いて法線力や接線力の連続的な変化や滑りの発生などの情報を表現しようとする試みはほとんど見られなかった。

また、人間の振動知覚に関しては振動ファントムセンセーション(以下振動PSと表記)が広く知られており、振動PSを用いた刺激位置や方向・角度の提示[14]、振動PS位置移動時に得られるなぞり感によるパターン提示[15]など、位置や動きの提示に加えて、振動PSの位置を制御することで擬似的にモーメントを提示する試み[16]なども見られる。振動PSによって知覚される振動の皮膚上の位置を制御できることは、2次元の情報提示が可能であることを意味し、さらに振動強度の1自由度を加えれば、振動PSは3自由度の情報提示能力を基本的に有していると考えられる。

ここで、壊れやすい物体を指先で把持し重力下で保持する場合を考えると、把持力に加えて物体に作用する重力も知覚する必要がある。すなわち、指腹に作用す

^{*1}: 東京農工大学大学院

^{*1}: Graduate School of Tokyo University of Agriculture and Technology

る法線力と接線力の3自由度の力を認知することが要求される。さらに、物体を落下させずに保持するためには、すべりの発生を認知して把持力を補正することも必要になる。

そこで本研究では、指先への3自由度の接触力(法線力と接線力)の連続的な変化と、指先と物体表面の間の滑りを、振動 PS の強度と位置の制御によって、圧覚ではなく振動覚の変化で代替提示する方式を提案する。また、指先に装着可能な小型振動提示デバイスを試作し、提示された接触状態の変化や接触力が認知可能か実験的に検討したので、その結果を報告する。

2 振動制御による接触の代替提示

2.1 振動 PS による接触力変化の代替

先行研究には、低周波振動の振幅を制御することで圧覚を誘起できるとする報告[17]もあるが、多自由度の力覚の生成は困難と見られる。そこで、本研究では、接触力の変化を振動の変化で代替することによって、小型のデバイスで操作状態をハプティックに提示する方法を提案する。図 1 に接触力変化の振動変化による代替の概念図を示す。

実際に物体を把持したときの指先と操作物体間の接触状態の静的な変化は、法線力と接線力の比較的低周波成分の変化として、メルケル盤など主に SA タイプの触覚受容器を介して知覚されると考えられ、FA タイプの受容器は、非接触から接触のように接触状態が大きく変化した際の知覚に主に寄与すると考えられる[1]。他方、高周波の振動 PS の強度や位置を制御すれば、ユーザは主に FA タイプの受容器の一つであるパチニ小体を介して、その変化を知覚する[18]。したがって、仮想空間の接触状態変化にあわせて、視覚情報と同時に振動 PS を提示した場合には、機械受容器が異なるため誘起される感覚が異なるものの、接触状態変化のハプティックな提示によって、比較的容易に変化を認知できる可能性が期待される。そこで本研究では、振動 PS の強度と位置の制御による法線力や接線力の代替提示が、指先の接触状態変化のハプティックな認知につながるか、実験的に検討する。

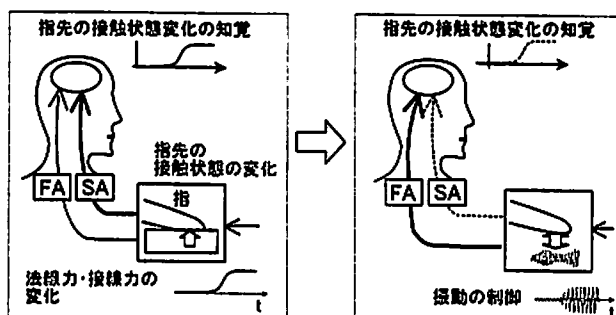


図1 接触力変化の振動変化による代替の概念図

Fig.1 Conceptual diagram of the vibrotactile substitution of contact force.

2.2 法線力、接線力、および滑りの代替提示法

ユーザが物体に触れたとき、指先には、指腹に垂直な法線力と平行な接線力が複合されて加わる。振動 PS によるこれらの代替イメージを図 2(a)(b)に示す。法線力は、先行研究[12,13]と同様に振動 PS の強度変化で代替する。他方、接線力に関しては、法線方向の振動による直接的な表現は困難と考えられる。そこで我々は、指先に接線力が作用すると、指先の皮膚がせん断変形し、微小に刺激知覚範囲が接線方向に移動する点に着目した。本研究では、図 2(b)のように、接線力の変化に合わせて振動 PS の位置をせん断方向に移動させることによって、接線力の擬似的表現を試みる。振動刺激で誘起される感覚は圧覚とは異なるが、指腹面における2次元の接線力を、指腹面内での2次元の位置変化で表現することから、提示された位置情報を力情報に、比較的容易に対応付けできるものと期待される。

さらに、壊れやすく滑りやすい物体を把持して保持する場合や、操作物体の可動域限界で指先が滑る状況などのハプティックな認知を可能にするためには、法線力や接線力に加えて、操作対象と指先との間の滑りの提示が重要と考えられる。特に、指先が見えない状況では、静止した指先と物体の間に接線力が作用している状態と、指先が物体上を滑っているあるいは滑りそうな状態を区別して提示することが重要である。例えば、毛利らは、滑りの直前に発生する局所滑りを提示することで、把持力の調節が可能であることを示している[19]。ここで、滑りとは、指腹表面と対象物の間のマイクロなスティックスリップによる接線方向の微小振動であることから、本研究では、図 2(c)のように、接線力を代替する振動 PS 位置を振幅変調することによって、静的な接線力の作

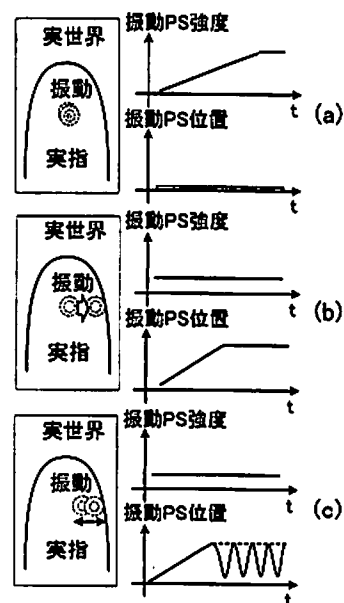


図2 (a)法線力 (b)接線力(c)滑りの振動 PS による代替

Fig.2 Conceptual diagram of the vibrotactile substitution of (a)normal force, (b)tangential force (c)slip.

用状態とは異なる滑り状態を代替提示する方法を提案する。

3 実験システム

3.1 指先振動提示デバイス

試作した指先に装着可能な小型振動提示デバイスを、図3に示す。指先へのPSの誘起方法には電気刺激を用いる方法もあるが、電気刺激は発汗などによる皮膚表面の電気抵抗変化の影響を受け易いことから、本研究では、刺激部位の状態変化の影響が小さく、多数の先行研究で採用されている機械的振動によるPS誘起の方法を採用した。試作機は、曽根らの掌への三次元位置情報提示[20]と同様に4個の振動子を有する。振動子は振動コイル(700回巻, $\phi 4 \times 8\text{mm}$, 約0.78g)とネオジウム磁石(4430G, $\phi 3 \times 8\text{mm}$)からなる。振動コイルは厚さ0.12mmのゴム膜を介して振動ピンを駆動し、指先に振動刺激を加える。振動子の間隔は、4つの振動刺激が一つに融合したPSが誘起可能であり、かつPSの移動範囲を大きくとれることが望ましい。そこで、振動子の幅が調節可能な据え置き型の振動提示装置を用いて、3人の被験者の示指に振動PSを提示し、5mmから10mmまで1mmごとにピン間距離を変化させた時にPSが誘起したか否かを回答させ、全被験者で振動PSが誘起される振動子間隔8mmを採用した。ケーブルを含まないデバイス一つあたりの重量は約14gである。

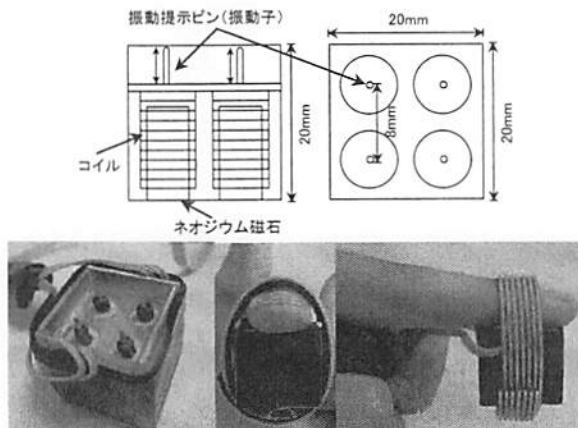


図3 試作振動提示デバイスの構造と外観

Fig.3 Structure of the prototyped fingertip vibrotactile PS display device.

3.2 振動子の制御

振動コイルの駆動電圧振幅は、目標とする接触力ベクトルから、3.4, 3.5で述べる方法を用いてコントローラ(PC)で算出する。算出された駆動振幅はDA変換され、アナログスイッチによって矩形波変調された後に、ローパスフィルタによってコイルを駆動する正弦波に整形さ

れる。図4に製作した駆動システムのブロック図を示す。

振動周波数は、誘起される感覚が十分に大きく、かつ、低周波振動による震えの感覚が軽減される周波数を実験的に求め、200Hzとした。振動子の最大ストロークは、自由振動状態の画像を用いて計測を行ったところ、最大駆動電圧5.5Vで0.24mmであった。なお、最大駆動電圧は、コイルが焼損しない上限に設定した。このとき、最大ストロークと振動周波数から、JIS規格[21]で規定される変換式で算出した振動子一個あたりの振動強度は、19.3Gである。

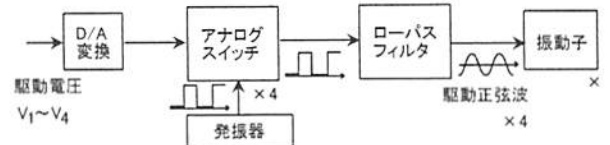


図4 振動子駆動システムのブロック図

Fig.4 Block diagram of the device driving circuit.

3.3 仮想物体接触システム

構築したシステムのブロック図を図5に、実行例を図6に示す。6軸磁気センサ(FOB, Ascension)によってユーザの指先位置を検出し、汎用物理シミュレータODEにより物理シミュレーションを行う。ODEは解析法シミュレータであるため、バーチャルカップリング(以降VCと表記)によりシミュレータと位置計測および力覚提示装置と接続し、操作力および提示力を算出した。ここで、

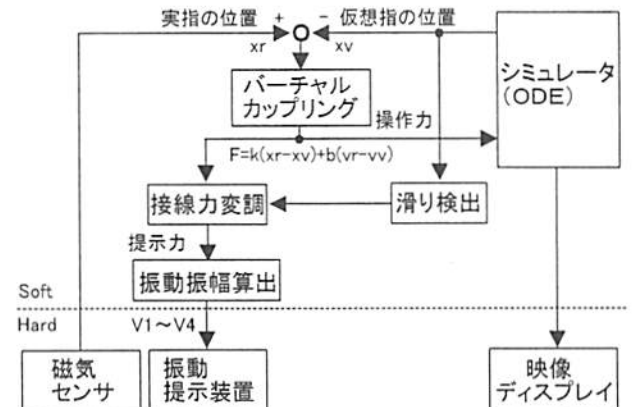


図5 仮想物体接触システム構成

Fig.5 Configuration of the virtual object touching system.



図6 仮想物体接触システム実行例

Fig.6 Snapshot of the virtual object touching.

VC のバネ定数は無限大が理想であるが、非接地力覚提示装置は指先動作を拘束できず実指が仮想物体に大きく侵入するため、バネ定数が過大になるとシミュレーションの安定性が損なわれる。一方、バネ定数が不足すると、指先が仮想物体に接触したときの提示力の増加率が小さくなり干渉時の撃力が不明瞭になる。そこで、安定なシミュレーションが可能な範囲内で、VC による提示力の立ち上がり遅延が、反応時間に比較して十分に小さくなるように、バネ定数 $k=1000\text{N/m}$ 、ダンパ定数 $b=20\text{Ns/m}$ とした。把持時の動作速度を 0.1m/s と仮定すると、接触後 10ms の反力は 3N となる。

3.4 提示力からの振動振幅の算出

ユーザが知覚する振動の強さは、Fechnerの法則より振動振幅の対数に比例すると考えられる[18]。そこで本研究では、各振動子の振幅 V_i の対数値の合計に、知覚される振動強度が比例すると仮定し、各振動子の振幅 V_i に接触力ベクトル $\vec{F}$ の大きさが比例する(1)式を設定した。複数の振動子によって誘起される感覚量が実際に振動振幅の対数に比例するかは、4.1 で検証する。

$$|\vec{F}| = k_n \sum_{i=1}^4 \log V_i \quad (1)$$

また、提案する接線力提示法は、振動PSの位置 p を提示する接触力の接線方向成分に比例させるものである。図7のように二次元に簡略化して考えると、知覚される振動PSの位置 p と各振動子までの距離は、個々の刺激強度の逆比に比例する[22]ため、振動振幅の対数の逆比に比例すると予想される。そこで、最大提示接線力で正規化した接触力ベクトルの接線方向成分 F_{nt} と、駆動電圧振幅比の間に、(2)式の関係を保定した。実際に振動振幅の対数比と誘起される接線方向の感覚量が比例するかは、4.1 で検証する。

$$p = \frac{\log V_1 / \log V_2 - 1}{\log V_1 / \log V_2 + 1} = k |\vec{F}_{nt}| \quad (2)$$

さらに、(2)式を二次元に拡張することで、試作システムの4つの振動子の振幅が決定される。図8のベクトル $\vec{F}_{nt}$ は、正規化した接触力ベクトルの接線方向成分である。 $\vec{F}_{nt}$ を各振動子の対角線上に分解したベクトルの終点位置を $p1, p2$ とすると、対角線上の2つの振動子の振動強度は、図7と同様に振動子と振動PSの距離の逆比によって決定される。 $\vec{F}_{nt}$ と仮想指接触面上の直行する軸のなす角を θ とすると、4つの振動子の振幅比

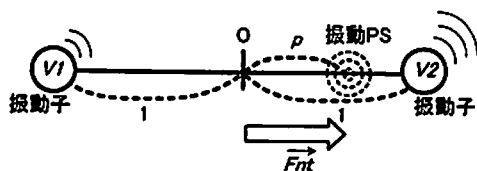


図7 接線力ベクトルと振動PS位置の関係

Fig.7 Relation between tangential force and position of VPS.

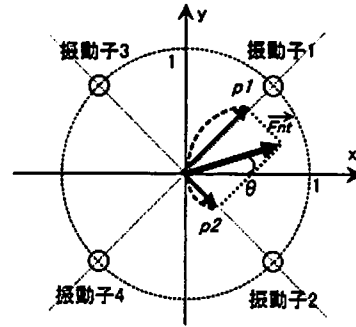


図8 接線力ベクトルと駆動電圧比の関係

Fig.8 Relation between tangential force and ratio of driving voltage.

は(3)式で与えられる。したがって、(1)式と(3)式から、4つの振動子の振幅が決定される。

$$\begin{aligned} \log V_1 : \log V_2 : \log V_3 : \log V_4 \\ = 1 + |\vec{F}_{nt}| \left(\sin \theta \sin \frac{\pi}{2} + \cos \theta \sin \frac{\pi}{2} \right) : \\ 1 + |\vec{F}_{nt}| \left(\cos \theta \cos \frac{\pi}{2} - \sin \theta \cos \frac{\pi}{2} \right) : \\ 1 - |\vec{F}_{nt}| \left(\cos \theta \cos \frac{\pi}{2} - \sin \theta \cos \frac{\pi}{2} \right) : \\ 1 - |\vec{F}_{nt}| \left(\sin \theta \sin \frac{\pi}{2} + \cos \theta \sin \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、振動PS位置を変化させるために個々の振動強度を変化させると、知覚される振動PSの強度が変化する可能性がある[23]。そこで、濱野らと同様に調整法を用いて、振動PS位置を変化させたときの振動PS知覚強度を4人の被験者で評価した。その結果、指腹中心への振動PS提示に比較して、振動子付近への提示が約30%強く知覚される傾向が見られた。しかし、振動PSの指腹周辺部への変位は接線力の増大、すなわち指先に作用する力ベクトルの大きさの増大を意味する。したがって、法線力知覚強度への影響は、力ベクトル全体の大きさの変化に対して相対的に小さい。そこで本研究では、振動PS位置を移動させても知覚される振動PS強度は一定とみなせるものと仮定した。

3.5 滑りの代替表現

指先に実際の接線力を生じない提案方式は、指腹表面のマイクロなスティックスリップによる接線方向の微小振動を、そのままでは表現できない。そこで本研究では、図9(c)の出力例のように、VCにより算出された操作力の接線方向成分 $F_{nt}(t)$ を振幅変調することで振動PS位置を接線方向に振動させ、滑りによる微小振動を代替表現する。また、VCは仮想世界の摩擦を反映しないため、滑り発生時の接線力の微小振動を算出することが原理的にできない。そこで試作システムでは、指先の接触状態と接線方向速度から滑りを検出し、(4)式のように接線力を正弦波で振幅変調した。滑り開始時に振動PSによ

る代替接線力が減少するため、初期滑りも疑似的に表現されるものと期待される。

ここで、実空間での滑りによる振動周波数は、物体表面のテクスチャにより異なる。他方、変調正弦波の周波数は、搬送波である振動子の振動周波数 200Hz より十分に小さい必要がある。本研究は、素材感の表現ではなく、ユーザに滑りの発生を認知させることが目的であるため、変調周波数は、10, 50, 100Hz の3種の周波数で変調した振動を3人の被験者に提示し、非変調振動との違いが最も分かりやすい 50Hz を採用した。

また、滑りによるスティックスリップ振動の強度は、摩擦力や滑り速度を反映して変化するのが妥当と考えられるため、変調深度が物体の摩擦係数 μ 、および滑り速度 v_t に応じて 0 から 1 の範囲で変化するように、(4)式を設定した。ここで、 μ_{max} は想定する最大摩擦係数、 v_{tmax} は想定する最大滑り速度を意味する。 μ_{max} は、指と紙やすり、および指と塩化ビニール板の摩擦係数を、指の押し付け力と滑り出す直前の接線力を力センサによって計測し算出したところ、それぞれ 0.92 と 0.77 であったため、両者の中間値 0.85 に設定した。 v_{tmax} は、上肢の動作速度を磁気式位置センサを用いて計測した結果を参考に、1.0m/s に設定した。また、変調深度を単純に滑り速度に比例させた場合、なぞり速度が遅い時に代替接線力提示状態との識別が困難になる場合があった。そこで、変調正弦波の振幅は、正規化された μ と v それぞれの 1/3 乗に比例させた。べき乗数は、1/2, 1/3, 1/5, の3条件で3人の被験者に滑りを代替提示し、接線力

代替提示からの状態変化が最も分かりやすいと回答があった 1/3 に設定した。摩擦係数の指数も同様の手順で決定した。これらにより、最終的に提示される接線力 F_t は、変調前の接線力 F_{t0} と 0 の間で振動する。

$$F_t(t) = \left\{ 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{max}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{v_t}{v_{tmax}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot (\sin \omega t + 1) \right\} F_{t0}(t) \quad (4)$$

図9は $\mu_{max}=0.85, v_{tmax}=1.0\text{m/s}$ のときに、摩擦係数 0.85 の物体上で仮想指を滑らせたときの動作例である。図9(a)は図5中のVCが出力した力の3成分を示し、y軸が指腹法線方向、x軸が指腹接線方向のうち指が運動した方向である。図9(b)のように 0.9s 付近で指先がx軸方向に滑り始めると、x軸方向の提示力が振幅変調される様子が図9(c)から確認される。

4 法線力・接線力・滑りの代替提示の認知特性評価

指先を使った迅速な物体操作や精密な把持力制御のためには、非接触から接触への遷移や、把持物体の滑り始めのような「不連続な接触状態の変化」と、把持力や摩擦力などの「接触力の連続的な変化」、の両者の適切な認知が必要と考えられる。そこで本章では、振動 PS 制御による法線力と接線力の連続的な変化の代替提示能力、ならびに滑りの発生を中心とした不連続な接触状態変化の提示能力を実験的に検証する。

4.1 法線力・接線力の連続量の認知特性評価

振動 PS によって誘起される刺激の強度や位置を、ユーザがどの程度の法線力や接線力と等価と認知するかは、指先の物理特性や受容器の感度に加えて、個人の主観的な特性が影響する可能性が考えられる。そこで以下のように、振動 PS 刺激の強度と、その振動を被験者が評定した法線力の大きさの関係、同様に、振動 PS 位置と接線力の大きさの関係を実験的に評価した。

4.1.1 実験方法

被験者が提示された振動 PS と等価と評定する法線力を、以下の手順で計測した。実験ではまず、被験者の示指の指腹に一定強度の振動 PS を視覚情報なしで提示した。被験者には、掌を下にして肘を台の上に置かせ、腕の力を抜くように指示した。次に、被験者に、そのとき感じた法線力(指腹に対して垂直方向の力)を、3自由度力センサ(PD-3-30, NITTA)を示指腹で随意的に押しして再現させた。被験者数は5人で、振動振幅 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0v の5条件でそれぞれ5試行おこなった。提案手法は、法線力そのものを被験者が知覚するものではないが、被験者が、「この大きさの法線力と等価であると評定した」という意味で、以降では、被験者が

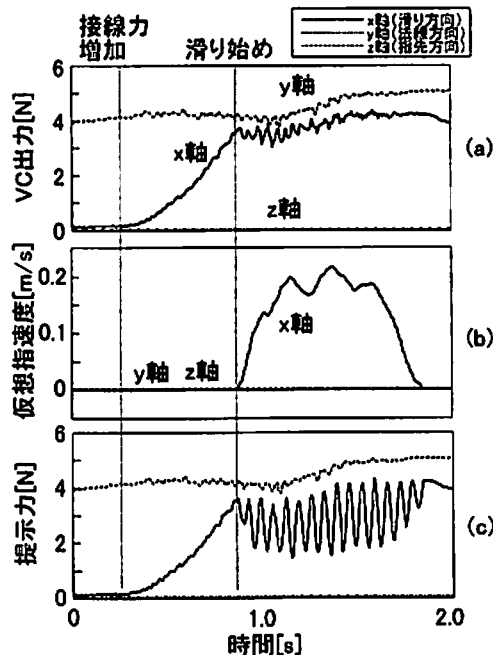


図9 滑り代替表現時の出力例。

(a)VC が出力した操作力、(b)仮想指速度、(c)提示力

Fig.9 Example of the displayed signals during substitutive slip representation.

(a)VC output, (b)Velocity of proxy, (c)Displayed force

再現した法線力を等価法線力と表記する。

同様に、振動 PS 位置と被験者が等価と評定した接線力(以下、等価接線力)の関係を、以下の手順で求めた。まず、指先に軽く物体が接触した状態で接線力が作用する状況を想定し、あらかじめ被験者の示指腹に、前記の法線力評定実験の全被験者の平均では約 2.0N の法線力と評定される 1.0V (試作デバイスの最大出力の 1/4) の振動を視覚情報なしで与え、その状態で振動 PS の位置を連続的に移動させる。被験者にはそのとき感じた接線力を、3 自由度力センサを示指腹で随意的に押して再現させた。力センサを押させる際、被験者には、まず振動 PS の位置を移動させる前に感じた法線力で力センサを押させ、その後に指腹を力センサの接触部分と平行に保ったまま接線方向に力を加えるように指示した。被験者数は 7 人で、振幅比が対数軸で等間隔になるように、振幅比 1.75, 3.06, 5.36, 9.39, 16.44 の 5 条件でそれぞれ 5 試行おこなった。

また、提案手法は 2 次元の接線力を代替提示する、すなわち、接線力の大きさに加えて方向を提示しようとするものである。そこで、振動 PS 位置を移動させたときの角度弁別閾を曽根らの方法[20]と同様に、以下の手順で評価した。まず前記の代替接線力評定実験と同様に、あらかじめ被験者の示指腹に各振動子 1.0V の振動を提示した。指先に物体が接触し法線力 2.0N が作用している状況に相当する。その状態から指腹上を 30° 刻みで 12 分割した方向(図 10)の中からランダムに選択された方向に振動 PS 位置を連続的に移動させる。被験者には、知覚した振動 PS の移動方向を、図 10 の角度が記入されていないものを用いて回答させた。

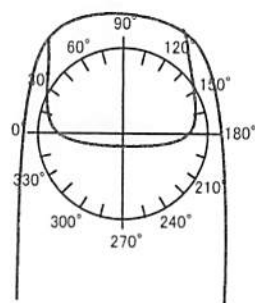


図10 指腹上の振動 PS 移動方向

Fig.10 Vibrotactile PS moving direction on fingertip.

4.1.2 実験結果

図 11 に、提示した刺激の振動振幅と、5 人の被験者が力センサを押して再現した等価法線力の関係を示す。(1)式で仮定したように、等価法線力は振動振幅の対数に比例する結果となった。同一振幅に対する等価法線力に個人差はあるが、それぞれの被験者において、振幅比と等価法線力の間にほぼ線形な関係が得られたことから、法線力の相対的な変化は表現可能と考えられる。すなわち、物体を把持する強さなど、指先への法線

力の連続的な変化を、振動 PS 強度の変化によって情報提示できる可能性が確認された。

図 12 に、被験者 7 人における振動振幅の対数比と等価法線力の関係を示す。等価法線力と同様に個人差があるものの、同一被験者内では、等価接線力が振動振幅の対数比に比例することが確認された。ドアノブを把持して回転させた時の摩擦トルクの増減のような、指先に対する接線力の連続的な変化を、振動 PS 位置の制御によって情報提示できる可能性が示された。

図 13 に、提示された振動 PS の移動方向と、10 人の被験者が回答した方向の平均角度誤差を示す。提示

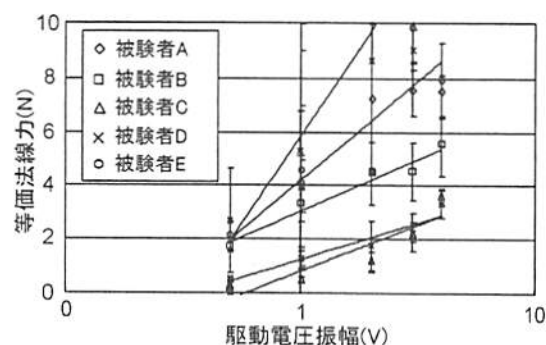


図11 振動振幅と誘起された等価法線力の関係

Fig.11 Relation between vibration amplitude and evaluated normal force sense.

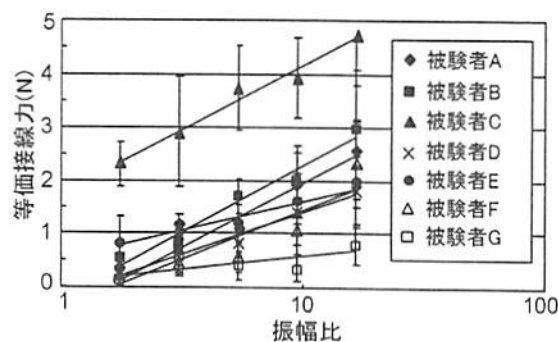


図12 振動振幅比と等価接線力の関係

Fig.12 Relation between vibration amplitude ratio and evaluated tangential force sense.

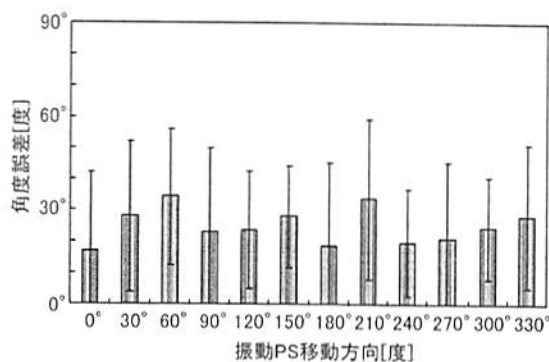


図13 振動 PS 移動方向と回答角度の平均誤差

Fig.13 Average errors and standard deviations between vibrotactile PS moving directions and answered directions.

する方向によってばらつきがあるが、全体の平均誤差は 24.9° で、標準偏差は 23.2° であった。指先振動 PS の位置制御によって、8 から 12 方向程度の分解能での角度弁別が可能と考えられる。

4.2 不連続な接触状態変化に対する反応時間

非接触から接触への遷移など、法線方向の不連続な接触状態の変化が振動提示によって可能であることは、多くの先行研究で示されている。そこで本節では、滑りの発生を中心とする接線方向の不連続な状態変化の代替提示を、ユーザが認知可能であるか、また、認知に際しての遅延を実験的に検討する。

4.2.1 振動 PS 滑りに対する単純反応時間

接触力を提示する振動位置を、さらに正弦波状に変調することで滑りを代替提示する提案手法は、同一周波数域の振動覚刺激によって、静的な接触力と動的なスティックスリップ振動の両者を表現することになる。そのため、静的な接触状態から滑り状態に移行したときに、それを認知できないことや認知が遅れる可能性が考えられる。そこで、滑りの発生を被験者が認知可能かどうか、さらに他の提示方法に対する遅延の程度を検証するために、振動 PS 滑りへの単純反応時間を以下の手順で計測した。

1) 初期状態として、等価接線力の実験と同じく提示力の法線成分を 2.0N に設定し、さらに接線成分を 1.7N に設定したときに(1),(3)式で算出される振動を、被験者の示指の指腹に加えた。このとき、振動 PS の位置は、指腹の側方に最大に変位した状態となる。同時に、仮想物体から仮想指に接線力が加わっている図 14(a)の CG 映像を被験者に提示した。

2) 上記の状態から、ランダムな時刻に CG 映像の仮想物体を滑らせた。さらに、映像と同期して振動 PS 滑りを被験者に提示した。このときの振動 PS 滑りは、摩擦係数

の高い物体が急激に滑る場合を想定し、 $\mu_{\max}=0.85$ 、 $v_{\max}=1.0\text{m/s}$ とした。被験者には接触物体が滑ったと感じたらできるだけ早く仮想物体を押さえるように教示した。このときの、仮想空間内の接触物体の滑り始めから被験者の押しつけ動作までの経過時間を、PCによって計測し記録した。

実験条件は振動 PS+映像、振動 PS(映像なし)、映像のみの 3 条件とし、接触仮想物体の移動速度は対数軸上で等間隔になるように 0.032 , 0.179 , 1.000m/s の 3 段階とした。試作デバイスは図 14(b)のように被験者の右手示指に装着し、押しつけ動作は、振動 PS 滑り、実滑りとも示指基部の下に設置した力センサにより検出した。試行回数は、各物体移動速度につきランダムに 5 試行ずつ全 15 試行×3 条件とした。被験者は 20 代の 7 名である。

4.2.2 振動 PS 接線力と滑りを識別する複雑反応時間

単純反応時間計測実験では、代替提示による滑りを認知して反応するのではなく、振動 PS 位置を変化させるための各振動子の強度変化そのものに反応する可能性を完全に排除できない。また実際の作業においては、ドアノブを回転させて可動域限界で指が滑った時のように、接線力の増減と滑りの有無を識別して反応することが必要な状況がある。そこで、振動 PS 滑りならびに実物体の滑りに対して、滑りと接線力の増加を識別する、複雑反応課題の反応時間を、以下の手順で計測した。

1) 単純反応時間評価実験と同じく、提示力の法線成分を 2.0N 、接線成分を 1.7N に設定して算出される、振動 PS 位置が指軸側方に最大変位した一定強度の振動 PS を、被験者の示指の指腹に与えた。実接触の場合は、事前に 3 軸力センサで計測した法線力と接線力を計算機画面上でモニタしながら法線力 2.0N 、接線力 1.7N の接触力を加える練習をさせた後に、同程度の接触力を図 14(c)のリニアアクチュエータ(RCA2-SA5C, IAI)のスライダ部上に、随機的に再現させた。同時に、仮想物体から仮想指に接線力が加わっている図 14(a)の CG 映像を被験者に提示した。

2) ランダムな時刻に、仮想空間内の接触物体が滑る、あるいは接線方向に微小移動する映像を提示した。さらに、CG 映像と同期して、振動 PS 滑りまたは振動 PS 接線力 1.0N の増加を提示した。同様に、実滑り課題では、リニアアクチュエータを用いて、連続的な滑りあるいは滑らない程度の微小移動を、CG と同期して提示した。リニアアクチュエータの微小移動速度は滑り提示時の速度と同一とし、その移動時間は振動 PS 滑り提示において振動 PS 変位が最小になる時間(変調波の半周期)に等しい 10ms とした。すなわち、振動 PS 滑り条件と実滑り条件のいずれも、刺激提示直後の 10ms は滑りと接線力増加の区別がつかない課題とした。振動 PS 滑り提示条件では、 $\mu_{\max}$ の値は、紙やすりと塩化ビニール板の中

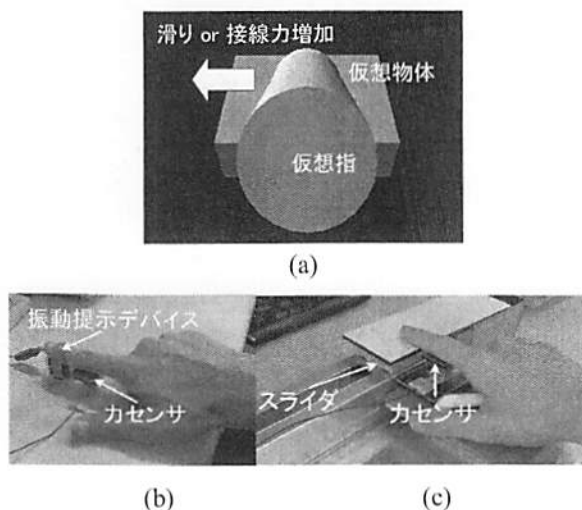


図14 提示された映像と刺激提示部分

Fig.14 Displayed CG and stimulus display methods for vibrotactile PS slip and real slip.

間値 0.85 とした。リニアアクチュエータのスライダ表面には、最大の微小移動距離でも指が滑らないような静止摩擦係数 0.85 程度の厚紙を貼付した。また v_{max} は、リニアアクチュエータの最高動作速度に合わせて 0.300m/s とした。被験者には、接触物体が滑ったと感じたときのみ、できるだけ早く仮想物体を押さえつけるように教示し、反応時間を PC で計測し記録した。また、滑りに反応できなかった、あるいは接線力増に反応した回数を計数し、滑りへの反応の正答率を算出した。

実験条件は表 1 の 5 条件とし、接触仮想物体の移動速度は、対数軸上で等間隔となるように 0.032, 0.099, 0.300m/s の 3 段階とした。実滑りの接触部分は接線力増加条件では滑らないように、静止摩擦係数約 1.55 の厚紙を用いた。また、実滑りの実験では、アクチュエータの動作音が反応に影響しないように被験者に耳栓を着用させた。試行回数は、滑り、接線力増加とも各物体移動速度につきランダムに 5 試行ずつ全 30 試行×5 条件とした。被験者は 20 代の 10 名である。

表1 提示刺激

Table 1 Pattern of displayed stimulus

提示刺激
実滑り+映像
実滑り(映像なし)
振動 PS 滑り+映像
振動 PS 滑り(映像なし)
映像のみ

4.2.3 実験結果

単純反応課題の実験結果を図 15 に示す。振動 PS 滑りへの単純反応時間は、視覚刺激への単純反応時間よりも約 40ms 短く、視覚の知覚時間 194ms と触覚の知覚時間 153ms [24] から予想される差と同等となった。また、映像無し条件での、振動 PS 滑りへ反応の正答率は 100% であった。触覚を介して振動 PS 滑りが知覚されていることが確認されるとともに、操作物体の滑りの開始を、滑りが実際に指腹に提示された場合と同等の反応時間で提示できる可能性が示された。

複雑反応課題における正答率を図 16 に、複雑反応時間を図 17 に示す。複雑反応時間は力センサの押し付け動作の検出もれなどによる計測失敗データの除去のため、スミルノフ・グラブス検定により有意水準 5% で外れ値を除外した。図 16 に見られるように、できるだけ早く反応するように要求した結果、実滑りを含むほとんどの条件で数%程度の判断誤りが見られた。映像なしの振動 PS 滑りへの反応正答率は他の条件より若干低くなったが、約 90% の正答率が得られた。すなわち、視覚情報を伴わない振動 PS の位置制御によって、接線力の増加と滑りの識別が十分に可能であることが確認され

た。

また視覚情報のない振動 PS 滑りへの複雑反応時間は、図 17 のように、実滑りを含む他の条件と比較して、約 200ms 遅い結果となった。視覚情報を伴う振動 PS 滑りの複雑反応時間は、実滑りと同程度であった。接線力の増減と滑りの有無を識別する複雑反応が要求される場面においても、数 100ms で反応可能であることは確認されたが、単純反応と異なり、滑り開始の認知時間の短縮にはつながらなかった。

5 考察

法線力・接線力の連続量の認知特性評価実験では、振動 PS の強度の対数は被験者が評定した等価法線力と、振動 PS 位置(振動強度の対数比)は等価接線力と、

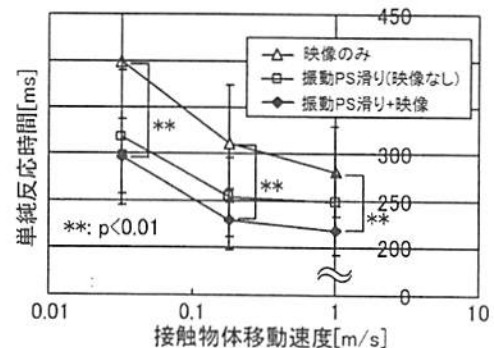


図15 振動 PS 滑りへの単純反応時間

Fig.15 Simple reaction time for substitutive vibrotactile PS slip representation

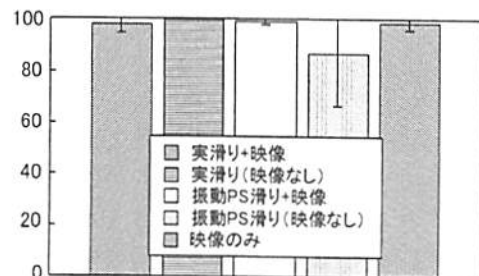


図16 滑りへの複雑反応の正答率

Fig.16 Correct answer rate for slips.

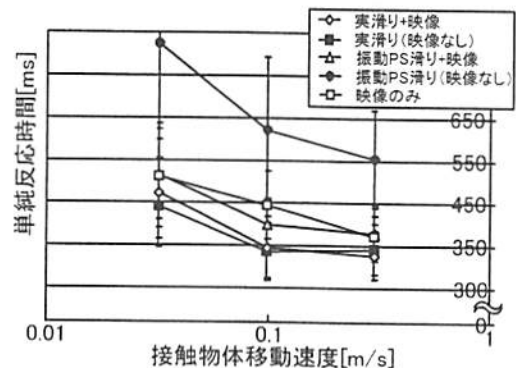


図17 振動 PS 滑りと実滑りへの複雑反応時間

Fig.17 Complex reaction time for substitutive vibrotactile PS slip representation and real slip.

線形に相関する結果が得られた。壊れやすく滑りやすい物体を把持して重力下で保持するような、指先への法線力と接線力の連続的な変化の認知を要求されるタスクに有効と考えられる。ただし、個人差があるため、相対的な変化ではなく定量的な力の提示のためには、キャリブレーションが必要になる。個人差の原因としては、振動の強度と接線力の強度の対応付けの個人差に加えて、デバイスの押し付け力や提示部位のばらつきなどが考えられる。また、接線力の代替提示によって法線力の知覚強度が30%程度変化する可能性があるため、提示する接線力に応じて法線力を補正するなど、より精密な提示のためには、各振動子の振幅算出方法は、さらに検討が望まれる。

また実験結果から、接線力の方向は8~12方向程度の分解能で可能と見られ、従来の小型力覚提示装置では困難だった、把持物体を別の物体に押しつけたときの反力方向の違いの認知も、ある程度可能になるものと期待される。

滑りの発生認知に関しては、計測された単純反応時間を見ると、最も速い接触物体移動速度における映像のみ条件で約280ms、振動PS滑り条件で220msであった。従来の研究で報告されている視覚の知覚時間194ms、触覚の知覚時間153ms[24]と比較して、どちらも約80ms遅い。この遅れを、滑りを知覚してからセンサを押しつけるまでの動作遅れによるものと考え、どの移動速度でも映像のみ条件よりも振動PS滑り条件は反応が数10ms早く、妥当な実験結果と考えられる。すなわち、触覚を介して振動PS滑りを知覚していることが確認された。滑りを伴わない接線力の増加と、接線力の増加による滑りの発生を識別する必要がない状況、例えば滑りやすく壊れにくい物体を空中で把持している状況(実際に滑ったか、接線力が急激に増加したか、いずれの場合も反応は把持力の増加)では、提案する滑りの代替提示法は、実空間における接触力や滑りの提示と同程度の時間での反応を可能にすると考えられる。

他方、複雑反応時間は、最も速い接触物体移動速度における映像のみの条件で約370ms、実滑り条件で350ms、振動PS滑り条件では約550msであった。すなわち、振動PS滑りは実滑りに比較して約200ms遅い結果となった。実滑りでは、静的接触からスティックスリップ振動に移行することで、主に刺激される受容器がSAタイプからFAタイプに変化する。これに対して、振動PS滑り条件では、静的接触時の接線力が振動PSで提示され、滑りも振動PSを変調することで表現される。いずれもFAタイプで知覚する必要があるため判断が困難になって、反応時間が長くなった可能性が考えられる。しかし、実滑りと振動PS滑りの反応時間の差は約200msであり、できるだけ早く回答するように要求しても視覚情報なしで90%程度の正答率が得られていたことから、極

めて早い判断が要求される場面以外では、特に、物体背面のつまみを指先で把持して回転させた時の可動域限界での滑りの知覚のように、作業対象が見えない状況での有効な代替提示手段になるものと期待される。

本研究では、接触力と滑りの代替提示に際し、振動提示条件のいくつかを試行錯誤的に決定した。本報告は、振動PSを用いた代替提示の可能性を示すものであり、設定した数値は必ずしも最適とは限らないため、より良好な特性を得るためには、さらに検討が必要である。滑り提示のための変調周波数は、搬送波となる振動周波数をFA-II受容器の感度ピークとされる周波数200Hzに設定し、変調周波数は実験的に滑りが知覚しやすい周波数として50Hzを選択した。接線方向の応力の知覚にはFA-Iが強くかわり、その感度ピークは30Hz付近にあるとの報告がある[1]ことから、FA-Iとの関連が強く示唆される。また、滑り発生時の振動には、摩擦係数や物体の表面テクスチャなどが関与するため、これらを反映するためには、搬送波となる振動周波数とあわせて検討する必要がある。

手指による仮想物体の把持や操作のためにはデバイスの多指化が必要であるが、試作した振動提示デバイスは指腹から約20mm突出するため、小さな仮想物体の把持を阻害することが予想される。振動発生部を爪上に設置してリンク等で機械的に指腹に振動を伝えるなど、指腹部への突出の小型化の検討が望まれる。あるいは、電気刺激によってもPSの誘起は可能であり、接線力の知覚に主に寄与するFA-Iは応力方向に対する異方性がある[1]との知見もあることから、電気刺激によって受容器の選択的刺激が可能になれば、さらに精密な代替提示の可能性も拡がると期待される。

6 まとめ

本研究では、振動PSの強度と位置の制御によって、指先への接触力を代替提示する方法と、振動PS位置を正弦波状に変調することで滑りを代替提示する方法を提案した。試作した小型振動提示デバイスを用いた実験から、法線力や接線力の連続的な変化や、滑りの発生などの不連続な接触状態変化の表現の可能性が示された。さらに、接線力と滑りを識別する複雑反応課題においても、実滑り条件に比較して200ms程度の反応時間の遅延で反応できることが明らかになった。

今後の課題は、より詳細な振動制御方法の検討と、指先を用いた多様な作業の実現に向けた、デバイスの多指化と小型化である。

(2010年1月15日)

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金によるものである。ここに記して感謝する。

参考文献

- [1] R. S. Johansson, J. R. Flanagan: Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks; *Nature Reviews Neuroscience* 10, pp. 345-359 (2009)
- [2] Y. Kohno, S. Walairacht, S. Hasegawa, Y. Koike, M. Sato: Evaluation of Two-Handed Multi-Finger Haptic Device SPIDAR-8; *ICAT2001*, pp.135-140(2001.12)
- [3] C. Mrad, H. Kawasaki, J. Takai, Y. Tanaka, T. Mouri: Development of a Multifingered Robotic Human Upper Limb as an Inverse Haptic Interface; *Proc. of SMC2002*(2002)
- [4] 岩田, 中川, 中島: 仮想立体の硬さを表現するための、フォースディスプレイ, ヒューマンインターフェースシンポジウム, pp55-58(1991)
- [5] G. Burdea, J. Zhuang, E. Roskos, D. Silver and N. Langrana: A Portable Dextrous Master with Force Feedback, *Presence*, Vol.1, No.1, pp.18-27(1992)
- [6] 藤田: グローブ型仮想物体硬さ感覚呈示装置の試作と評価, 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.J81-D II, No.10, pp.2394-2400(1998)
- [7] 稲葉, 藤田: 指先圧迫による擬似反力提示装置の提案と試作; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.12, No.1, pp.98-102(2007)
- [8] 南澤, 深町, 梶本, 川上, 館: バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.1, pp. 15-23,(2008.3)
- [9] R. Scheibe, M. Moehring, B. Froehlich: Tactile feedback at the finger tips for improved direct interaction in immersive environments; *proc. IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pp.123-130. (2007)
- [10] 中村, 福井: 携帯型感覚情報通信における可触化技術の開発動向～非ベース型触力覚インタフェース 'GyroCube' について～, *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 31, No. 2, pp.90-94, (2007)
- [11] 野崎, 安藤, 前田: 指先に牽引力/凹凸感を提示する爪装着型デバイスの提案, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文抄録集, 2B2-2 (2008)
- [12] E. Piatetski, L. Jones: Vibrotactile pattern recognition on the arm and torso; *Proc. WorldHaptics*, pp.90-95(2005)
- [13] http://www.immersion.com/3d/products/cyber_touch.php
- [14] 上田, 内田, 野澤: Phantom sensationと仮現運動を併用した触覚ディスプレイ; *電気学会論文誌. A*, Vol.127, No.6, pp. 277-284(2007)
- [15] 水上, 澤田: 薄型触覚呈示デバイスによる高次知覚を利用した触覚情報呈示; *情報処理学会 インタラクシオン論文集*, pp. 121-128(2007)
- [16] 白井, 久米, 津田, 畑田: 皮膚感覚のファントムセンセーションを用いた 3 次元画像との対話システム; *電子情報通信学会技術研究報告IE*, Vol.96, No.507 pp. 77-84(1997)
- [17] 昆陽, 横田, 前野, 田所: 低周波振動刺激によって起こる静的圧覚の呈示条件, 第 11 回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp. 179-185 (2006.3)
- [18] 大山, 今井, 和気: 新編 感覚・知覚心理学ハンドブッ

ク, 誠信書房, pp. 1180, pp. 7 (1996)

- [19] 毛利, 前野, 山田: 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; *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, pp.17-18 (2004)
- [20] 曾根, 市吉, 成瀬, 久米: マルチモーダルインターフェースによる三次元仮想作業性の向上; *情報メディア学会論文誌* Vol.56, No.9 pp. 116-120 (2002)
- [21] C 60068-2-6:1997 環境試験方法—電気・電子—正弦波振動試験方法
- [22] 谷江, 館, 小森, 阿部: 電気パルス刺激における強度差ファントムセンセーション像の位置弁別特性; *計測自動制御学会論文集*, vol.15, No.4, pp.91-98(1979)
- [23] 濱野, 久米, 曾根: 触覚ディスプレイによるゲームの検討; *映像情報メディア学会技術報告*, 27 巻, 23 号, pp.17-20(2003)
- [24] 佐藤: 人間工学基準数値数式便覧, 技報堂出版, pp.163(1992)

[著者紹介]

大丘 達也 (学生会員)



2008 年東京農工大学工学部情報コミュニケーション工学科卒業。現在, 同大学院博士前期課程情報工学専攻在学中。仮想空間における両手物体操作のための簡易力触覚提示装置およびシステム開発の研究に従事。

藤田 欣也 (正会員)



1988 年慶應義塾大学大学院理工学研究科修了。相模工業大学, 東北大学医学部, 岩手大学を経て, 現在東京農工大学大学院教授。力触覚や歩行感覚の提示, 共有仮想空間コミュニケーションなど, 人と共生する情報システムの研究に従事。力触覚の提示と計算研究委員会委員長 (工学博士)。