

力の錯覚：指先への振動触刺激による質量・粘性知覚のバイアス

岡本 正吾^{*1}, 昆陽 雅司^{*2}, 田所 諭^{*2}

Force Illusions: Perceptual biases of mass and viscosity via vibrotactile stimuli on finger pad

Shogo OKAMOTO^{*1}, Masashi KONYO^{*2} and Satoshi TADOKORO^{*2}

^{*1} Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{*2} Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

Here we show that the dynamic vibration on finger pad deceives humans in terms of the perception of mass and viscosity of an object that is being jiggled by them. The vibratory stimuli would affect the perceived magnitude of skin stretch of the finger pad, which results in the perceptual biases of external forces. We apply vibrotactile stimuli on finger pads in synchronization with the velocity or acceleration of jiggling hand movements. Due to the vibration, the participants experience the illusory change in mass and viscosity, which are approximately ± 40 g and ± 0.35 Ns/m, respectively, when the actual mass and viscosity of object are 200 g and 0.5 Ns/m. Also, the vibration more dominantly affect the perception than actual viscosity. For instance, when the increased viscosity and vibration which is a perceptually negative bias are presented to the participants, they experience the decrease of viscosity.

Key Words : Tactile Display, Haptics, Inertial Force, Skin stretch, FAII

1. 緒 言

人間は、物体を持ち上げたり、揺すったりするとき、その物体の質量を手に加わる力から推定する^{(1)~(3)}。通常、手に加わる力の知覚には、筋や腱に存在する自己受容感覚器が関与すると考えられている⁽⁴⁾。ところがこのとき、人間は、同時に指腹皮膚の変形も体験し、この変形は、皮膚の機械受容器を活動させる。皮膚の機械受容器は、振動触刺激によっても活動させることができる。われわれは、振動触刺激を運動中の指腹に呈示することにより、操作物体の粘性の知覚がバイアスされることを実験的に示した⁽⁵⁾。本論文は、質量の知覚についても同様にバイアスが生じることを新たに示し、先の報告と合わせ、指腹への振動触刺激が、質量・粘性の知覚に影響することを論じる。

振動触刺激による質量および粘性の錯覚現象を工学的に応用することの明らかなメリットの一つは、力覚呈示ディスプレイを用いずに、力覚を呈示できることである。身体の一部や環境に接地する必要のある、力覚ディスプレイを、モバイル端末などに搭載することは制約が多い。この制約を補うため、力覚ディスプレイの代替手法が研究されている。例えば、視覚と自己受容感覚情報の相違を用いて、計算機上の物体の弾性⁽⁶⁾や、平面上の丘

陵や凹みを呈示⁽⁷⁾する方法がある。仮想的な金属や木材などの素材の剛性を、スタイラスと素材が接触する際に、高周波振動刺激によって呈示する方法が提案されている^{(8) (9)}。また、物体を擦るとき摩擦現象を、指腹と物体の接触によるスティック・スリップ振動に着目した振動触刺激によって呈示する方法も考案されている⁽¹⁰⁾。物体の質量や粘性を擬似的に呈示する手法はなく、本研究で示される錯覚現象は、力覚の新たな代替呈示手法となり得る。

既存の技術と相性が良いという観点からも、本研究の錯覚呈示技術は工学的価値が高い。本研究で示される錯覚には、振動触刺激が用いられる。振動触刺激は、情報端末のための普及型触覚ディスプレイとして注目されていることから、多くの研究者が、それをを用いた触覚呈示技術を考案している。本研究の錯覚現象は、他の技術と併用することで、振動刺激型触覚ディスプレイの応用を拡張する。例えば、Fukumoto et al. は、ボタンを押すことにより得られる触刺激を、振動触刺激によって仮想的に呈示する方法を考案した⁽¹¹⁾。ハプティックアイコンと呼ばれる、イベント通知などのための記号的な触覚刺激⁽¹²⁾や、凹凸のあるテクスチャや布の質感を仮想的に呈示する手法⁽¹³⁾も、振動触刺激によって実現されている。これらのような、これまでに蓄積された触覚呈示技術と、本研究で示される質量・粘性の錯覚呈示技術は、同様の振動触覚ディスプレイで実現可能である。

^{*1} 名古屋大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

^{*2} 東北大学 大学院情報科学研究科 応用情報科学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-1)
This work was in part supported by MEXT KAKENHI 21686024, and MIC SCOPE 082102006.

2. 実験パラダイム

本研究は、指腹への振動触刺激が質量や粘性の知覚に影響することを実験的に示すが、その実験パラダイムを述べる。われわれは、質量と粘性の知覚にとって、正と負のバイアスになる触覚刺激を、それぞれ設計する。正のバイアス刺激は、質量と粘性の増加を知覚させる。負のバイアス刺激は、その逆の効果となる。これらの刺激が、質量と粘性の知覚をバイアスすることを示すことによって、これらの刺激の効果を示す。

まず、触覚刺激が質量と粘性の変化の知覚を増幅させることを示す。例えば、本物の質量が増加したときに、正のバイアス刺激が同時に呈示されると、知覚される質量の増加がより大きくなる。本物の質量が減少したときに、負のバイアス刺激が呈示されると、質量がより減少したように知覚される。

次に、触覚刺激が質量と粘性の変化の知覚を弱めたり、打ち消したりすることを示す。例えば、本物の質量が増加したときに、負のバイアス刺激が呈示されると、質量の増加が知覚されない、または、知覚される変化が小さくなることを示す。

3. 実験装置

実験に用いる装置の要求事項は、参加者に操作される物体の機械パラメータを変化させることができ、かつ、参加者の指腹に振動触刺激を呈示することができることである。これらの要求を満たす装置として、Fig. 1a に示される、一軸アームと、力センサ、振動子からなる装置を用いる。一軸アーム (MR12T, Yamaha, Hamamatsu, Japan) は、力センサ (ThinNANO1.2/1, BL AUTOTEC, Kobe, Japan) の出力をもとに、

$$F_x(t) = m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) \quad (1)$$

に従い、インピーダンス制御される。ここで、 $F_x(t)$ 、 m および c はそれぞれ、参加者が振動子に加える X 軸方向の力、仮想物体の質量および粘性である。仮想物体の質量・粘性の操作を、このインピーダンス制御によって実現する。この制御周期は 1 kHz である。実験の参加者は、示指を振動子である積層圧電素子 (ASB510C801P0, NEC/TOKIN, Sendai, Japan) の上に置き仮想物体を左右に揺るように、手を運動させる (Fig. 1b)。手の運動に応じて、振動子から振動触刺激が指に呈示される (Fig. 1c)。振動の周波数は 280 Hz である。振動によって刺激される機械受容器は、主に FAII であると考えられる。周波数の影響は、7.2 節で論じる。バイアス効果のない振動の振幅は、7.2 μm (peak-to-peak) である。振動子の発生力は、およそ 800 N であり、人間の指の力に比べて十分に大きい。指の Z 方向の力 (0.5–3.0 N) による、振動振幅の減衰は軽微であると考えられる。振動刺激の更新周期は 2 kHz である。

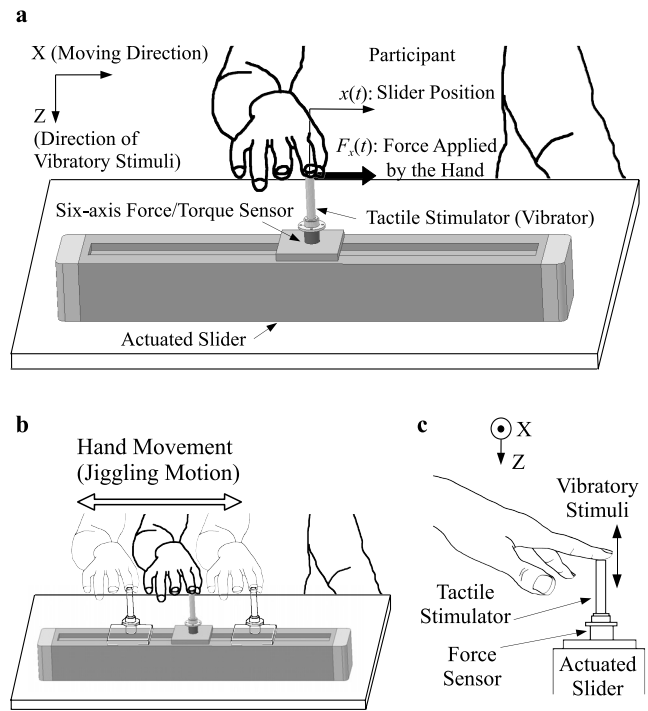


Fig. 1 a. Actuated slider, force sensor and vibrator. b. The jiggling movement. c. The tactile vibration to the finger pad.

4. 質量・粘性の知覚バイアスとなる振動触刺激

4.1 概要 触覚刺激を設計するために、物体を揺すっているときの指腹皮膚のせん断変形を解析した (4.2 節)。物体を揺する運動は等しく、物体の質量のみが増加すると、増加した外力のために、指腹のせん断変形も増加する。このせん断変形の増加は、手の加速度が大きいときに顕著である。せん断変形の増加に伴い、指腹の FAII の活動も増加する。この FAII の活動の増加を振動刺激によってまねるためには、指腹に加わる振動触刺激の振幅を、手の加速度に同期して増加させる。逆に、物体の質量が小さいときは、FAII の活動レベルも相対的に低下する。この活動の低下を再現するためには、振動触刺激の振幅を、手の加速度に同期して減少させる。したがって、質量の増減を知覚させる触覚刺激は、手の加速度に同期して、その振幅を変化させる。

一方で、物体の粘性の変化が指腹せん断変形へ与える影響は、手の速度が大きいときに顕著になる。粘性の増減を知覚させる触覚刺激は、手の速度に同期して、その振幅を変化させる。

4.2 皮膚モデルによる指腹のせん断変形の解析 人間の指が、摩擦のない物体を動かしていると考え、Fig. 2 のような指腹皮膚のモデルを考える。モデルは、皮膚のせん断方向の変形のモデルである。皮膚と物体は固着しており、滑りはないものとする。皮膚内部では、質点 (m_b) とバネ (k_f)・ダンパ (c_f) がつながっている。手が発生する力 ($f(t)$) は m_b に加えられる。物体は、機械パラメータとして質量 (m_i) と粘性 (c_i) を有する。皮膚の質

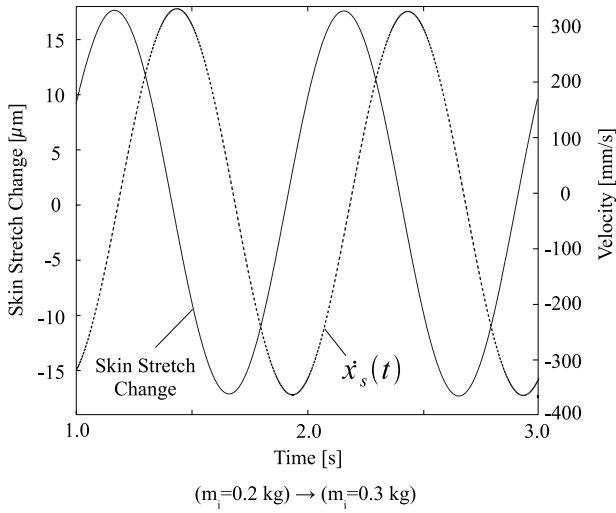


Fig. 3 Skin stretch change caused by the increase of mass: $(x_b(t) - x_s(t)|_{m_i=0.2}) - (x_b(t) - x_s(t)|_{m_i=0.3})$

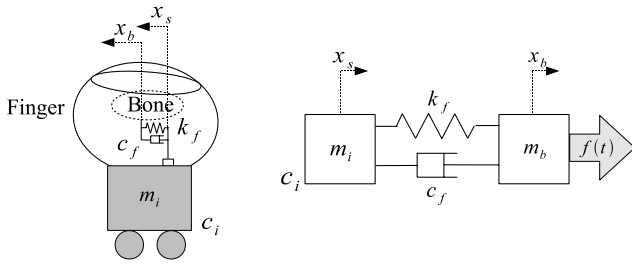


Fig. 2 Skin model for lateral deformation

点の位置と物体の位置がそれぞれ x_b と x_s であるとき、運動方程式は

$$m_i \ddot{x}_s + (c_i + c_f) \dot{x}_s + k_f x_s = c_f \dot{x}_b + k_f x_b, \quad (2)$$

$$m_b \ddot{x}_b + c_f \dot{x}_b + k_f x_b = c_f \dot{x}_s + k_f x_s + f(t) \quad (3)$$

で与えられる。 $x_b(t) - x_s(t)$ が皮膚のせん断変形である。計算に用いられたパラメータは次の通りである。 $m_i = 0.2 \text{ kg}$ と $c_i = 0.5 \text{ Ns/m}$ は、本研究の実験で用いられる値と同じ値である。 $k_f = 400 \text{ N/m}$, $c_f = 2.0 \text{ Ns/m}$ は、Nakazawa et al. の報告⁽¹⁴⁾に基づいている。Nakazawa et al. は、指腹に一定の圧力が加わった状態で、指腹にせん断変形を加え、皮膚のせん断方向の機械パラメータを同定した。この条件は、本研究が想定している条件に近い。 $m_b = 0.01 \text{ kg}$ とする。 $f(t)$ は正弦波状に近似し、 $f(t) = F \sin(\omega t)$, $\omega = 2\pi \text{ rad/s}$ とする。発生力の大きさは、本実験で用いる装置を使用したときの実測値に基づき、 $F = 0.5 \text{ N}$ とする。

物体の機械パラメータが皮膚のせん断変形に与える影響を示す。物体の質量が $m_i = 0.2 \text{ kg}$ のときと、 0.3 kg のときのせん断変形の差を Fig. 3 に示す。参考のために、指の速度を併せて示す。物体の質量が変化したことによる皮膚のせん断変形の変化の位相は、指の速度とおよそ

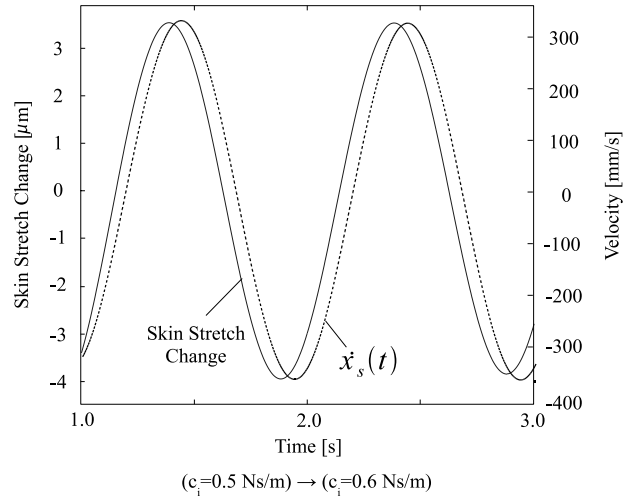


Fig. 4 Skin stretch change caused by the increase of viscosity: $(x_b(t) - x_s(t)|_{c_i=0.5}) - (x_b(t) - x_s(t)|_{c_i=0.6})$

$\pi/2$ ずれており、指の加速度に近い。その差は、 1.79 rad (102.6°) である。指腹の機械パラメータは、個人差があり、指に加わる圧力にも依存するが、これら条件の違いがあっても、この関係はおよそ成立する。例えば、 k_f と c_f が $0.5\text{--}2$ 倍で、 m_b が $0.1\text{--}10$ 倍の範囲で変化すると、この位相差は $1.69\text{--}1.80 \text{ rad}$ の範囲で変化する。

物体の粘性が $c_i = 0.5 \text{ Ns/m}$ のときと、 0.6 Ns/m のときのせん断変形の差を Fig. 4 に示す。物体の粘性が変化したことによる皮膚のせん断変形の変化と、指の速度の位相は近く、その差は 0.36 rad (20.9°) である。先と同様に、この関係は、皮膚の機械パラメータが変化してもおよそ成立する。 k_f と c_f が $0.5\text{--}2$ 倍で、 m_b が $0.1\text{--}10$ 倍の範囲で変化すると、この位相差は $0.23\text{--}0.38 \text{ rad}$ の範囲で変化する。

4.3 振動触刺激の生成式 触覚刺激は、一定の周波数を有する振動刺激である。刺激の変位は、

$$y(t) = A(t) \sin(2\pi f t) \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 $A(t)$ と f はそれぞれ、振幅と周波数である。周波数は、実験を通して一定であり、 $f = 280 \text{ Hz}$ である。ここで用いられた以外の、他の周波数帯域でも機械パラメータの錯覚が生じることを確認している(7.2節を参照)。

質量の変化を錯覚させるための振動触刺激は、

$$\begin{cases} A(t) = \alpha_i & \text{if } |\dot{x}(t)| < B_i, \\ A(t) = \alpha_i \left(1 \pm \frac{|\dot{x}(t)| - B_i}{D_i}\right) & \text{if } |\dot{x}(t)| \geq B_i \end{cases} \quad (5)$$

に従い、手の加速度に同期して、その振幅が変化する。ここで、 α_i , B_i と D_i はそれぞれ、指が静止時の振動刺激の振幅、不感帯の幅、振動振幅の変化率である： $\alpha_i = 3.6 \mu\text{m}$, $B_i = 0.4 \text{ m/s}^2$, $D_i = 1.0 \text{ m/s}^2$ 。これらの値は、錯覚が生じやすい条件の一つとして、われわれが実験的に決定した。

Table 1 Test stimuli in Exp. 1 (Biass of Mass).

Stimuli Group	Condition #	Propri. Mass	Accel.-Synch. Tactile Stimulus
(i) Mass Only	1	Increased	Constant
	2	Decreased	Constant
(ii) Tactile & Mass, Same Direction	3	Increased	Increased
	4	Decreased	Decreased
(iii) Tactile & Mass, Opposite Direction	5	Increased	Decreased
	6	Decreased	Increased

Table 2 Test stimuli in Exp. 2 (Biass of Viscosity).

Stimuli Group	Condition #	Propri. Viscosity	Velocity.-Synch. Tactile Stimulus
(iv) Vicousity Only	7	Increased	Constant
	8	Decreased	Constant
(v) Tactile & Visc., Same Direction	9	Increased	Increased
	10	Decreased	Decreased
(vi) Tactile & Visc., Opposite Direction	11	Increased	Decreased
	12	Decreased	Increased

不感帯は、錯覚の生起には影響しないが、実験を厳密に遂行するために用いられた。参加者が指を刺激子の上に置くときに、スライダがガイド上を微動する例が予備実験にて確認された。このとき、不感帯が設けられていなければ、スライダの移動にもなって、錯覚刺激が生成される。物体を揺するタスクを行っているときのみ、錯覚刺激を生成するように条件を統一するため、不感帯を設けた。(5)中の±は、質量の知覚を増加させる刺激では、+になり、減少させる刺激では、-になる。

粘性の変化をバイアスするための振動触刺激は、

$$\begin{cases} A(t) = \alpha_v & \text{if } |\dot{x}(t)| < B_v \\ A(t) = \alpha_v(1 \pm \frac{|\dot{x}(t)| - B_v}{D_v}) & \text{if } |\dot{x}(t)| \geq B_v \end{cases} \quad (6)$$

に従い、手の速度に同期して、その振幅が変化する。ここで、 α_v 、 B_v と D_v はそれぞれ、指が静止時の振動刺激の振幅、不感帯の幅、振動振幅の変化率である： $\alpha_v = 3.6 \mu\text{m}$ 、 $B_v = 40 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、 $D_v = 120 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。

5. 実験: 質量・粘性の知覚バイアス

2種類の実験を行った。実験1では、加速度に同期する触覚刺激(5)の質量知覚への影響を調査した。実験2では、速度に同期する触覚刺激(6)の粘性知覚への影響を調査した。

5.1 実験1: 質量の知覚バイアス 実験1では、自己受容感覚刺激として、仮想物体の質量が操作された。触覚刺激は、手の加速度に同期して、その振幅が変化した。8名の参加者が、示指で物体を左右に揺することにより、その質量を調査した。参加者らは、標準刺激と試験刺激を比較し、試験刺激の質量が、標準刺激に比べ増加したか、減少したかを回答した。

5.1.1 試験刺激のグループ 試験刺激は、条件別に3つのグループに別けられた(Table 1)。グループ(i)では、仮想物体の質量のみを変化させた。このグループの刺激は、参加者らが質量の変化を検出できることを確認

するために設けた。グループ(ii)では、質量の変化と触覚刺激のバイアスが同じ方向になるように、刺激を呈示した。このグループは、触覚刺激が、知覚される質量の変化を増長させることを確認するために設けた。グループ(iii)では、質量の変化と触覚刺激のバイアスを逆方向とした。例えば、条件5では、質量が増加し、同時に、質量の知覚が減少するような触覚刺激を呈示した。このグループは、触覚刺激が、知覚される質量の変化を打ち消すことを確認するために設けた。

グループ(i)の条件1と2では、それぞれ、標準刺激よりも大きい質量と、小さい質量が呈示された。触覚刺激は、標準刺激のそれと同じであり、一定の振幅(7.2 μm peak-to-peak)で振動した。グループ(ii)の条件3では、質量が増加し、かつ触覚刺激も質量の知覚が増加するように呈示された。条件4では、質量が減少し、かつ質量の知覚が減少するように触覚刺激が呈示された。グループ(iii)の条件5では、本物の質量は増加するが、触覚刺激は質量が減少したと知覚されるように呈示された。条件6では、逆に、質量は減少するが、触覚刺激は質量が増加したと知覚されるように呈示された。

5.1.2 グループ間の比較方法 Fig. 5に、実験結果の予想と、比較方法を示す。図は、それぞれの刺激グループにおける、正答率の平均値を示す。正答とは、参加者の回答と、質量刺激の変化の一致である。主題の前に、まず、グループ(i)の正答率がチャンスレベル(0.5)以上であることを確認する。そうであれば、一定の振動触刺激が呈示されているときに、参加者らは質量の変化を正しく認識したことを意味する。次に本題として、グループ間の正答率の差を確認する。もし、グループ間の正答率に差がなければ、それは、触覚刺激が質量の知覚に何も影響を与えなかったことを意味する。もし、グループ(ii)の率が、グループ(i)のそれよりも大きければ、触覚刺激が、知覚される質量の変化を増長したことになる。また、グループ(iii)の率が、グループ(i)のそれよりも小さければ、触覚刺激が、知覚される質量の変化を妨げたことになる。さらに、グループ(iii)の刺激がチャンスレベルよりも小さいかどうか注目する。もしそうであれば、これは、触覚刺激の効果が、本物の質量の変化よりも支配的に知覚に影響したことを意味する。

5.1.3 触覚刺激と質量刺激 標準刺激では、アームのインピーダンス制御に用いられたパラメータは、 $c = 0.5 \text{ Ns/m}$ 、 $m = 0.2 \text{ kg}$ である。触覚刺激は、 $A(t) = 3.6 \mu\text{m}$ 、 $f = 280 \text{ Hz}$ とした。

試験刺激で用いられる機械パラメータの大きさは、参加者ごとに事前の予備実験で決定した。試験刺激と標準刺激の機械パラメータの差(Δm)が、触覚刺激の影響よりも十分に大きければ、触覚刺激の影響を上述の実験によって評価することができない。したがって、調度検出が可能な程度の機械パラメータの変化を、極限法にて予

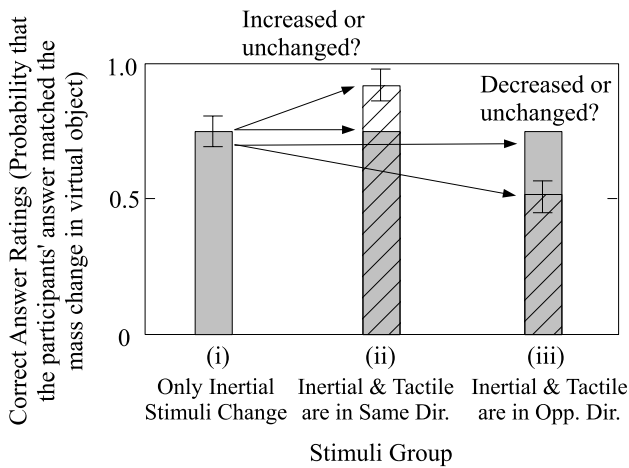


Fig. 5 Comparison of results. Correct answer ratings for each stimulus group. The stimuli in group (ii) are presented to enhance the perceived change of mass. Hence, the ratings for group (ii) are expected to be higher than those of group (i). The stimuli in group (iii) are presented to prevent the perceived change of mass. Hence, the ratings for group (iii) are expected to be smaller than those of group (i).

備実験で決定した。予備実験では、上昇系列と下降系列がそれぞれ2度ずつ、参加者に呈示された。系列中の刺激のステップ幅は、0.01 kg (実験1) と 0.02 Ns/m (実験2) であった。決定された値は次のとおりである。試験刺激にて、増加した質量が呈示される場合 (条件 1, 3, 5), $\Delta m = 0.025 - 0.065$ kg であった。減少した質量が呈示される場合 (条件 2, 4, 6), $\Delta m = (-0.015) - (-0.04)$ kg であった。

5.1.4 タスク・参加者 実験では、標準刺激と試験刺激が対に呈示された。まず、標準刺激が呈示され、次に試験刺激が呈示された。その間、参加者らは、指と刺激子との接触条件を保つように指示された。参加者らは標準刺激に比べて、試験刺激の質量が増加したか、減少したかを回答した。参加者らは、一試行ごとに指を刺激子から放した。試験刺激として、6種類の試験刺激のうち1つがランダムに呈示された。それぞれの種類は、合計20回呈示された。参加者らの手の運動を概して揃えるために、参加者らに、メトロノームのリズム (1.42 Hz, 85 beats per minute) に合わせて、手を左右に動かすように指示した。参加者らは、1ビートに対し、1ストローク、2ビートで、1往復の運動になるように手を動かした。結果として、手の速度のピークはおよそ 220 mm/s、ストロークは 50 mm 程になった。また、指を刺激子に押しつけるZ方向の力の最大値は、個人差が大きく、およそ 0.5–3.0 N の間に分布した。ほとんどの試行に関して、参加者らは手を左右に2–3往復させた後に回答した。8名の参加者が実験に参加した。全員からインフォームドコンセントを得たうえで、謝礼を支払った。刺激子から

発生する音を遮断するため、実験中は、参加者らはノイズキャンセルヘッドフォンを装着し、ピンクノイズを聞いていた。実験に要した時間は、一人当たりおよそ40分であった。参加者らは、触覚刺激の効果については、事前に何も知らされていなかった。

5.2 実験2:粘性の知覚バイアス 実験2でも、実験1同様に、3種類の試験刺激グループを用意した。試験刺激では、物体の粘性を変化させ、手の速度に同期して触覚刺激の振幅を変化させた (Table 2)。実験1とは異なる新たな8名が、実験に参加した。粘性刺激が増加する条件 (condition 7, 9, 11) では、 Δc は 0.10–0.26 Ns/m の範囲であった。粘性刺激が減少する条件 (conditions 8, 10, 12) では、 Δc は $(-0.16) - (-0.32)$ Ns/m の範囲であった。

6. 実験結果

6.1 実験1の結果 (質量の知覚バイアス) Figs. 6a に、実験1における、参加者らの回答率を示す。参加者らの回答と、質量の増減が一致した場合を、正答とした。まず、グループ (i) の結果を確認する (Fig. 6a)。ここでは、正答率がチャンスレベル (0.5) よりも大きい (t -test, $t_0(15) = 6.60$, $p < 0.001$, two-tailed)。参加者らは、一定の振動触刺激が呈示されているとき、質量の変化の方向 (増減) を正しく検知していた。次に、グループ (i) と (ii) の正答率の差に着目する。グループ (ii) の正答率が (i) のそれよりも大きい (Steel-Dwass test, $q_0(3, \infty) = 4.73$, $p < 0.01$)。これは、物体の加速度に同期した触覚刺激が、参加者らに知覚される質量の変化を増長したことを意味する。最後に、グループ (i) と (iii) の正答率の差に着目する。グループ (iii) の解答率が (i) のそれよりも小さい (Steel-Dwass test, $p_0(3, \infty) = 5.75$, $p < 0.001$)。また、グループ (iii) の正答率は、チャンスレベル程度である (平均 0.42, 標準偏差 0.21)。これらの結果は、触覚刺激が、参加者らに知覚される質量の変化を打ち消したことを意味する。以上の解析より、質量の変化と触覚刺激のバイアスの方向が同じであるとき、触覚刺激が、知覚される質量の変化を増長させたと結論づける。また、質量の変化とバイアスの方向が逆であるとき、触覚刺激が、知覚される質量の変化を打ち消した。加速度に同期した触覚刺激は、質量の正もしくは負のバイアスとして知覚された。

6.2 ディスカッション: 質量の知覚バイアスの見積り 実験1における、触覚刺激のバイアス効果は、およそ ± 40 g であると推定される。推定のため、条件 5, 6 の実験結果を用いて、バイアス効果の主観的等価点を計算した。それぞれの条件において、参加者らの正答率を、

$$g(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a - bx)} \quad (7)$$

で表される、ロジスティック曲線にフィットした。ここで、 $g(x)$ と x はそれぞれ、正答率の推定値とオブジェク

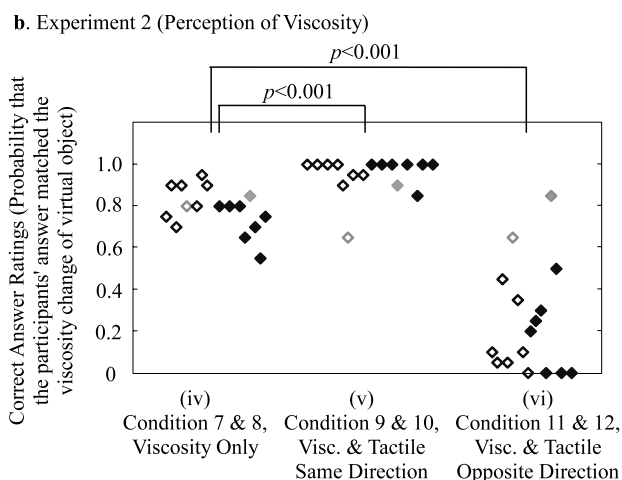
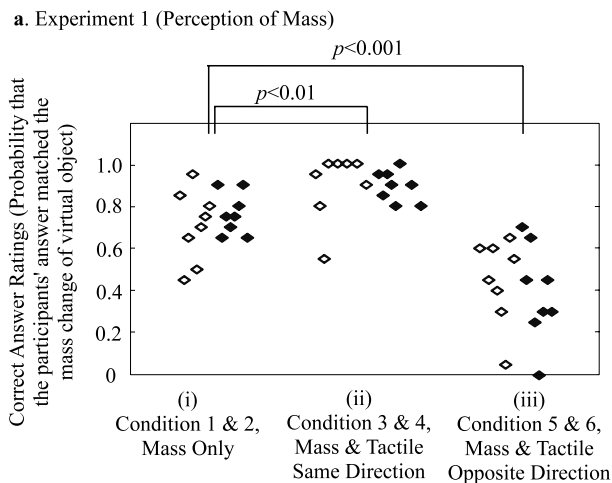


Fig. 6 Experimental Results. a. the answer ratios in Exp. 1 (mass). b. the answer ratios in Exp. 2 (viscosity). The answer ratios are shown for each stimuli group. The blank diamonds are the results of test stimuli of which mass or viscosity increased (conditions 1, 3, 5, 7, 9, and 11). The filled diamonds are the results of test stimuli of which mass or viscosity decreased (conditions 2, 4, 6, 8, 10, and 12). In Exp. 2 (Fig. 6b), one participant did not show the effects of tactile stimuli. The results of this participant are gray diamonds.

トの質量である。 a と b が、自由変数である。 $g(x) = 0.5$ となる x を、主観的等価点と定義した。例として、Fig. 7 は、条件 6 での正答率と、フィットされたロジスティック曲線を示す。主観的等価点を計算するためには、サンプルは X 軸上に幅広く分布するべきであり、等価点の正確な推定には、より多くのサンプルを、実験によって取得するべきであることに留意する。

6.3 実験 2 の結果 (粘性の知覚バイアス) Fig. 6b に、実験 2 での、参加者らの正答率を示す。グループ (iv) の正答率は、チャンスレベルよりも大きく (t -test,

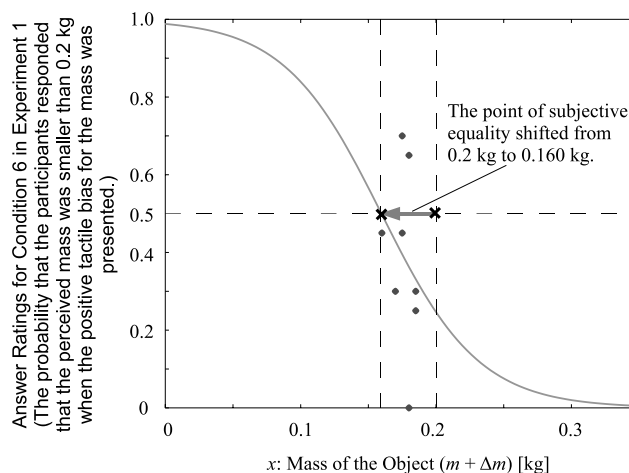


Fig. 7 Answer ratings for condition 6 and a fitted logistic curve. A shift of the point of subjective equality. The point subjectively equal to 0.2 kg has shifted to 0.160 kg due to the tactile stimuli of negative bias for the mass.

$t_0(15) = 10.70, p < 0.001$, two-tailed) ,これは、振幅一定の振動触刺激が呈示されていたとき、参加者らが、粘性の変化の方向を正しく検知していたことを示す。グループ (v) の正答率は、グループ (iv) のそれよりも大きい (Steel-Dwass test, $q_0(3, \infty) = 5.60, p < 0.001$). これは、手の速度に同期した触覚刺激が、知覚される粘性の変化を増長したことを示す。グループ (vi) の正答率は、グループ (iv) のそれよりも小さい (Steel-Dwass test, $p_0(3, \infty) = 6.15, p < 0.001$). これは、触覚刺激が、知覚される粘性の変化を打ち消したことを示す。さらに、グループ (vi) の正答率は、チャンスレベルよりも小さい (t -test, $t_0(15) = 3.87, p < 0.01$). このことは、触覚刺激の効果が、粘性刺激よりも、参加者らの粘性の知覚に支配的に影響したことを意味する。以上の解析より、手の速度に同期した触覚刺激は、粘性の知覚にとって正と負のバイアスになると結論付ける。最後に、触覚刺激の効果には個人差が認められた。参加者 8 名のうち、1 名の結果は、触覚刺激の効果を示さなかった (Fig. 6b, 灰色の菱形)。6.2 節と同様の方法により、触覚刺激のバイアス効果は、およそ ± 0.35 Ns/m と推定される。

6.4 実験結果のまとめ 実験 1 (質量), 2 (粘性) の結果をまとめると、触覚刺激のバイアス効果と質量および粘性の変化が、知覚的に同じ方向である場合、参加者らに知覚される質量と粘性の変化は増加した。逆に、触覚刺激の効果と質量および粘性の変化が、逆方向である場合、触覚刺激は知覚される質量と粘性の変化を打ち消した。触覚刺激は、質量と粘性の知覚において、正と負の両方のバイアスとして機能した。手の加速度に同期して振幅が変化する振動触刺激は、質量のバイアスとして知覚された。手の速度に同期して振幅が変化する振動触刺激は、粘性のバイアスとして知覚された。速度に同期

する振動触刺激は、本物の粘性の変化よりも支配的に、知覚に作用した。バイアスの効果は、本物の質量と粘性がそれぞれ 0.2 kg と 0.5 Ns/m であるとき、 ± 40 g と ± 0.35 Ns/m であった。

これまでに、視覚情報⁽¹⁵⁾、皮膚への静的な圧力⁽¹⁶⁾、物体表面の摩擦係数⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、把持の姿勢⁽¹⁹⁾、運動指令⁽²⁰⁾ および、努力感⁽²¹⁾⁽²²⁾などが、持ち上げた物体の質量の知覚過程に影響することが知られているが、本研究は、指腹への振動触刺激が物体の質量と粘性の知覚に影響することを、新たに発見した。

7. ジェネラルディスカッション

7.1 錯覚は本当に生じたのか 錯覚が生じているかどうかを検証するための、最も直接的な方法は、本物の刺激と錯覚刺激を比較し、両者の区別がつかないことを実証することである。しかしながら、ほとんどの錯覚現象にとって、このような方法での実証は実現できない。なぜならば、たとえよく設計された錯覚刺激であっても、本物の刺激とは何か異なることが常であり、直接両者を比較すると、人間は両者を区別できるからである。このような錯覚現象の性質を考慮すると、直接的な実証方法以外で、可能な限り強い証拠をともなって、錯覚が生じることを示す必要がある。これには、本物と錯覚刺激を何らかの形で比較することが有効である。本研究では、本物の質量・粘性刺激と、錯覚刺激が一つの試験刺激で同時に提示され、非直接的ではあるものの、参加者が本物と錯覚刺激を比較する状況になるよう実験を設計した。また、本物の質量・粘性刺激と、振動刺激の表象の入れ替わりが生じていないことを確認することも、錯覚を示す上で必要である。われわれは、試験刺激の中に、バイアス刺激が存在せず、本物の質量・粘性のみが変化する刺激 (conditions 1, 2, 7, 8) を用意し、参加者らが、本物の質量・粘性の変化を正しく認識することを確認している。このような実験パラダイムのもと、バイアス刺激が質量と粘性の変化の知覚を増長させることも、打ち消すことも示された。実験 2 では、錯覚刺激が本物の粘性よりも支配的に、粘性知覚に作用することが示された。以上の結果は、振動触刺激によって錯覚が生じていることの証拠となり得る。

7.2 なぜ FAII 刺激が質量・粘性知覚のバイアスとなるのか 本実験で用いられた振動触刺激の周波数は 280 Hz であった。これ以外の周波数についても、非公式ながら、錯覚が生じることを確認しているが、アクチュエータの出力変位の都合上、数十 [Hz] 以上の周波数帯について検証を行った。これらは、FAII が優先的に応答する帯域である。通常、皮膚の静的な変位や圧などの外力に応答するのは、SAI, SAII であるとされる⁽⁴⁾が、なぜ FAII への刺激が、質量や粘性の知覚バイアスとなったのだろうか。また、FAII 以外の機械受容器が優先的に応答する周波数帯域では、同様にバイアス効果が生じ

るのだろうか。物体の把持など、指腹に動的な変形が生じる瞬間には、FAII、および、SAI, FAI の受容器も活動することが報告されている⁽²³⁾。また、Birznieks et al. は、FAII については調査しなかったものの、指腹のせん断変形にもなって、SAI, FAI の活動が認められたと報告している⁽²⁴⁾。これらの 2 件の報告から、指腹皮膚の動的な変形の瞬間には、SAI, FAI および、FAII のいずれの受容器も応答すると考えられる。したがって、これらの受容器のうちの、いずれを振動触刺激によって選択的に刺激しても、知覚バイアスが生じる可能性がある。

7.3 動的な力センサとしての指腹 本研究の結果は、人間は指腹を動的な力センサとして利用していることを示唆する。この皮膚センサは、微小な外力に対しては、自己受容感覚器よりも支配的に機能するのではないだろうか。指腹は、その変形から、指腹に加わる力を推定することで、力センサとして機能し得る。Birznieks et al. は、神経生理学的に、指腹の機械受容器の応答が、指腹に加えられた静的な力をコーディングする可能性を報告した⁽²⁴⁾。動的な力に対しては、Minamizawa et al. が、仮想物体を揺るとき、指腹に加えられた強制変位が、物体の質量の知覚に影響することを、心理物理学的に報告した⁽²⁵⁾。以上の報告に加え、われわれの結果は、動的な場合において、指腹は力センサとして機能し、操作対象物の力学特性の推定に寄与していることを示唆する。

7.4 指腹せん断変形に関する情報は不要なのか 物体を揺るときの指腹皮膚のせん断変形について論じるとき、変形の大きさのみでなく、変形の方法も考慮しなければならない。しかしながら、本研究の触覚刺激は、物体の機械パラメータの変化に伴う、皮膚変形の大さの変化に着目したものである。振動触刺激による皮膚の変位は、せん断方向ではなく、法線方向 (Fig. 1c の Z 軸方向) に与えられた。変形の方法に関する情報を振動触覚刺激として呈示しなかったにも関わらず、本研究の実験では知覚バイアス効果が生じた。このことは、皮膚変形の方法は、物体の質量・粘性の知覚に関係がないということであろうか。しかしながら、本実験では、指で物体を左右に揺る過程で、指腹はせん断変形しているということを忘れてはならない。このせん断変形には既に、変形の方法に関する情報が含まれており、質量・粘性の知覚過程には、この情報が利用されている可能性がある。振動触刺激は、物体を揺ることによって生じる指腹のせん断変形に、さらに、機械受容器の活動量を変化させるために重畳されたものである。以上のことから、本研究の結果は、指腹皮膚のせん断変形の方法が、物体を揺る動作の中で、物体の質量・粘性の知覚に寄与しないことを示唆するものではない。

8. 結 論

本研究は、物体を揺る手の速度・加速度に同期し、指腹皮膚への振動触刺激の振幅を制御すると、物体の質

量や粘性などの機械パラメータの知覚が影響を受けることを確認した。物体の質量の知覚を増減させるためには、振動触刺激の振幅を、手の加速度に同期して増減させる。粘性の知覚に影響するためには、触刺激の振幅を手の速度に同期して増減させる。このような、皮膚への振動刺激によって、仮想物体との力覚インタラクションを表現する手法は、振動刺激型触覚ディスプレイの表現能力を向上させ、付加価値を高めると期待される。

参考文献

- (1) E. E. Brodie and H. E. Ross, "Jiggling a lifted weight does aid discrimination," *The American Journal of Psychology*, vol. 98, no. 3, 1985, pp. 469–471.
- (2) A. H. Holway, J. E. Smith, and M. J. Zigler, "On the discrimination of minimal differences in weight. iii. the role of frequency," *Journal of Experimental Psychology*, vol. 21, no. 4, 1937, pp. 423–432.
- (3) M. T. Turvey, "Dynamic touch," *The American Psychologist*, vol. 51, 1996, pp. 1134–1152.
- (4) K. E. Barrett, S. M. Barman, S. Boitano, and H. L. Brooks, *Ganong's Review of Medical Physiology*. 23rd edition, McGraw-Hill Medical, 2009.
- (5) S. Okamoto, M. Konyo, and S. Tadokoro, "Evocation of force sensations via vibrotactile stimuli to fingertip," *JSME Robotics and Mechatronics Conference 2010*, 2010, 1A1–D08.
- (6) M. A. Srinivasan, G. L. Beauregard, and D. L. Brock, "The impact of visual information on haptic perception of stiffness in virtual environments," *Proceedings of ASME Dynamic Systems and Control Division*, vol. 58, 1996, pp. 555–559.
- (7) A. Leuyer, J. Burkhardt, and L. Etienne, "Feeling bumps and holes without a haptic interface: the perception of pseudo-haptic textures," *Proceedings of the 2004 ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2004, pp. 239–246.
- (8) A. M. Okamura, J. T. Dennerlein, and R. D. Howe, "Vibration feedback models for virtual environments," *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998, pp. 674–679.
- (9) K. J. Kuchenbecker and G. Niemeyer, "Improving telerobotic touch via high-frequency acceleration matching," *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006, pp. 3893–3898.
- (10) M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto, and S. Tadokoro, "Alternative display of friction represented by tactile stimulation without tangential force," *Proceedings of the EuroHaptics 2008*, 2008, pp. 619–629.
- (11) M. Fukumoto and T. Sugimura, "Active click: tactile feedback for touch panels," *Proceedings of ACM SIGCHI 2001 the Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2001, pp. 121–122.
- (12) J. Luk, J. Pasquero, S. Little, K. MacLean, V. Levesque, and V. Hayward, "A role for haptics in mobile interaction: initial design using a handheld tactile display prototype," *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2006, pp. 171–180.
- (13) M. Konyo, A. Yoshida, S. Tadokoro, and N. Saiwaki, "A tactile synthesis method using multiple frequency vibration for representing virtual touch," *Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005, pp. 3965–3971.
- (14) N. Nakazawa, R. Ikeura, and H. Inooka, "Characteristics of human fingertips in the shearing direction," *Biological Cybernetics*, vol. 82, no. 3, 2000, pp. 207–214.
- (15) R. R. Ellis and S. J. Lederman, "The role of haptic versus visual volume cues in the size-weight illusion," *Perception & Psychophysics*, vol. 53, no. 3, 1993, pp. 315–324.
- (16) W. Wundt, *Lectures on human and animal psychology*. University Publications of America, Washington D. C., 1977.
- (17) J. R. Flanagan, A. M. Wing, S. Allison, and A. Spenceley, "Effects of surface texture on weight perception when lifting objects with a precision grip," *Perception & Psychophysics*, vol. 57, no. 3, 1995, pp. 282–290.
- (18) R. R. Ellis and S. J. Lederman, "The material-weight illusion revisited," *Perception & Psychophysics*, vol. 61, no. 8, 1999, pp. 1564–1576.
- (19) J. R. Flanagan and C. A. Bandomir, "Coming to grips with weight perception: Effects of grasp configuration on perceived heaviness," *Perception & Psychophysics*, vol. 62, no. 6, 2000, pp. 1204–1219.
- (20) E. E. Brodie and H. E. Ross, "Sensorimotor mechanisms in weight discrimination," *Perception & Psychophysics*, vol. 36, no. 5, 1984, pp. 477–481.
- (21) D. I. McCloskey, P. Ebeling, and G. M. Goodwin, "Estimation of weights and tensions and apparent involvement of a "sense of effort"," *Experimental Neurology*, vol. 42, 1974, pp. 220–232.
- (22) L. A. Jones, "Perception of force and weight: Theory and research," *Psychological Bulletin*, vol. 100, no. 1, 1986, pp. 29–42.
- (23) G. Westling and R. S. Johansson, "Responses in glabrous skin mechanoreceptors during precision grip in humans," *Experimental Brain Research*, vol. 66, 1987, pp. 128–140.
- (24) I. Birznieks, P. Jenmalm, A. W. Goodwin, and R. S. Johansson, "Encoding of direction of fingertip forces by human tactile afferents," *The Journal of Neuroscience*, vol. 20, no. 20, 2001, pp. 8222–8237.
- (25) K. Minamizawa, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi, "Wearable haptic display to present gravity sensation," *Proceedings of the Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2007, pp. 133–138.