

知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価

雨宮 智浩^{*1} 安藤 英由樹^{*1} 前田 太郎^{*1}

Non-grounding Force Display Utilizing Nonlinearity of Human Perception

Tomohiro Amemiya^{*1}, Hideyuki Ando^{*1}, and Taro Maeda^{*1}

Abstract - This paper describes the design of a novel force perception method for non-grounding force displays and the development of a handheld force display based on the method. The force perception method is attributed to the nonlinear characteristics of human tactual perception; humans feel rapid acceleration more strongly than slow acceleration. The method uses periodic prismatic motion to create asymmetric acceleration leading to a virtual force vector. A prototype of the handheld force display that generates one-directional force using a relatively simple mechanism was built, and its performance was tested in terms of both physical and perceptual characteristics. We verify the feasibility of the proposed method through experiments that determine the display's motor's rotational frequency that maximizes the perception of the virtual force vector. In addition, we examine the effect of the frequency of acceleration change and the amplitude of force on implicit, functional judgment of the perception of the virtual force vector.

Keywords : Haptic Display, Perception, Wearable and Mobile Computing, Non-grounded Device, Interface using Sensory Illusion

1 はじめに

力触覚を利用した情報インタフェースは、刺激自体が方向情報を有し、直観的な理解が可能で非言語的な情報提示チャンネルとして有効であると言える。力触覚モダリティが持つ特性を実験室外でも活用するため、モバイル用途での力触覚デバイスの研究が進められている。

モバイル式の力覚提示デバイスでは、可搬性の側面から据え置き式の力覚装置と異なり、装置そのものを接地することなく力ベクトルを提示する装置である必要がある。しかしながら、従来のモバイル式の力覚提示デバイス、たとえば非接地方式(ジャイロ効果 [1] や角運動量変化を利用した方式 [2]) では並進方向に連続的な力を提示することが原理的に不可能であった。そこで我々は、人間の触覚や固有感覚の知覚特性を利用することで、非接地方式にも関わらず時間的に安定した「バーチャルな力ベクトル」 [3] を知覚させる力触覚提示方法 Phantom-DRAWN (Phantom-drawn Direction guidance using Rapid and Asymmetric acceleration Weighted by Nonlinearity of perception) を提案する。本稿では 1 自由度の質点が非対称な並進周期運動を行うモバイル式の力触覚デバイスを設計および開発について報告し、評価実験の結果を基に提案する手法の有用性について議論する。

2 従来のモバイル式力覚装置

一般に従来の力覚インタフェースは、据え置き式である環境接地型 (PHANToM[4], SPIDAR[5] や SmartTool[6] のように支点を環境に置いた装置)、人間接地型 (HapticGEAR[7] のように人体に支点を置いた装置)、そして非接地型(角運動量変化を利用した装置 [1][2][8] や空気圧噴射を用いた装置 [9][10]) の 3 つに分類することができる。

移動を伴う方向誘導を目的とした力覚提示装置には、可搬性に適した人間接地型や非接地型が主に適用されてきた。しかしながら、人間接地型では装着基部に発生した力の反作用が生じる点、また非接地型では連続的な力を原理的に生成できない点が根本的な問題点であった。さらに非接地型で角運動量の変化を利用する場合、回転方向の力しか生成できなかった。

そこで筆者らは従来のモバイル式の力覚提示デバイスではほとんど扱われてこなかった、人間の知覚特性を利用して力覚を惹起させる方法を提案する。本手法を用いて従来困難であった並進方向でかつ連続的な力感覚の提示手法の確立を目指す。

3 提案する力覚惹起手法と原理説明

本章では、人間の知覚特性を利用して物理的には 2 方向に力が生成されているにもかかわらず、1 方向の力感覚として知覚させる方法を提案し、そ

^{*1} 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所

^{*1} NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation

の原理について述べる。

本稿で提案する方法とは、ある質量を持った物体の並進運動において、提示したい方向に大きな加速度を短時間（パルス状で閾値上の急峻な加速度変化）、それと逆の方向に小さな加速度を長時間（閾値下で元の位置に復帰する緩やかな加速度変化）という非対称な偏った加速度（以下、偏加速度）を持った周期運動が、その物体を含む系を把持しているユーザに対して任意の方向を想起させることができる、という方法である。これは人間の知覚特性である、短時間の大きな加速度をより大きく知覚する非線形性に起因している。

一般に知覚反応は図1に示すような非線形なS字型曲線（sigmoid curve）で近似できることが知られている [11][12]。刺激（ここでは加速度）を一周期積分すると物理的には零になる周期運動でも、このS字型の感覚強度曲線によって変換された感覚値は同様に積分しても零になるとは限らない。例えば加速度変化を表す関数 $\alpha(t)$ が以下の条件式を満たすと仮定する。

$$\int_0^T \alpha(t) dt = 0 \quad (1)$$

ただし、 T は当該周期運動の周期である。このとき知覚される感覚値は人間の知覚の非線形関数 $\varphi(x)$ との合成であり、以下のような等式を満たす。

$$\int_0^T \varphi \circ \alpha(t) dt \neq 0 \quad (2)$$

さらに、加速度の値自体は小さくても、ある特定の範囲では急峻な加速度変化をS字型曲線により過大評価し、緩やかな加速度変化をS字型曲線により過小評価する箇所が存在することが考えられる。この感覚強度の差分を利用することで、等価的な力ベクトルを知覚させることができると考え

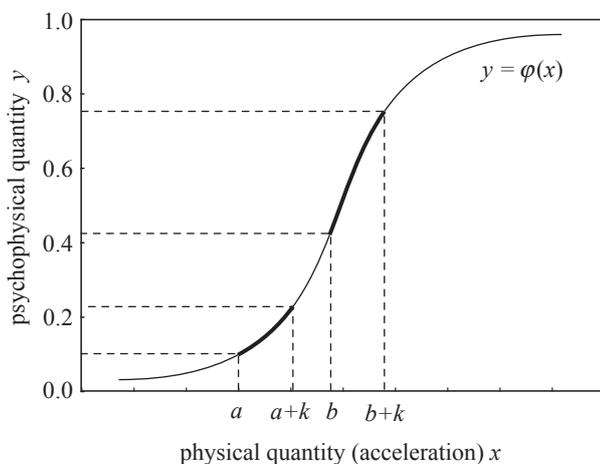


図1 人間の非線形知覚モデル

Fig. 1 Model of sigmoid curve of perception

られる。たとえば、図1に示すように b が a より大きい場合、または $\varphi(b)$ が $\varphi(a)$ より大きい場合でも、 $\partial\varphi/\partial x|_{x=a+k} - \partial\varphi/\partial x|_{x=a}$ の値が $\partial\varphi/\partial x|_{x=b+k} - \partial\varphi/\partial x|_{x=b}$ より大きい値が存在する。このようなスイートスポットをうまく活用できれば、感覚強度の差分が効果的な力として知覚される。つまり、提案する手法では加速度の最大値が小さい場合でも差分が十分に存在する場合には力ベクトルが想起できる可能性がある。

以下に本手法による力感覚の知覚に関わっていると予想される知覚特性を挙げる。

筋紡錘の動的反応と伸張錯覚

筋紡錘の反応特性には、筋の長さが変化する時に強く興奮する動的反応と、伸ばされた筋が一定の長さに保たれるときにインパルス発射を続ける静的反応がある。動的反応は、筋の長さの変化が比較的小さく急なときに強い [13][14]。そのため、短期間の大きな加速度変化が動的反応を引き起こし、逆向きに小さな加速度では動的反応が起らないような条件ではバーチャルな力ベクトルを知覚させることができると予想される。

また、70-80 Hzの振動を肘に当てると肘が伸びるような感覚を生じることが知られている [15]。これは腱に対する振動刺激が筋紡錘を賦活させることによって生じるとされている [16]。振動物体を把持する場合には、腱を直接振動させる場合に比べて腱に対する刺激は減衰されるが、同様の伸張感覚を想起させる可能性はある。

皮膚表面のすべり

皮膚表面と運動物体との接触面で、静止摩擦係数と動摩擦係数の関係により、並進運動の並進力が静止摩擦力を超える加速度では接触面ですべりが生じる。この皮膚表面と運動物体との接触面における摩擦力の変化を指や手掌の機械受容器（特に圧覚知覚のSA-I、局所的な圧迫や伸展に反応するSA-II）がすべり覚として検出できる条件下では、バーチャルな力ベクトルを知覚させる手がかりになると予想される。

継時マスキング

時系列的に大きな力とそれと逆向きに小さな力が近接する場合、前者が後者をマスクする可能性がある。それによって、小さな力は物理的に発生していても知覚されず、1方向の力として知覚されると考えられる。力触覚の継時マスキングの先行研究では、たとえば [17] のように主に皮膚感覚が中心であるが、感覚器のアナロジーにより自己受容感覚においても同様の現象が生じると予想される。

4 プロトタイプの機械特性評価

4.1 設計

提案している手法では携帯電話に代表されるモバイル機器に見られるような手に保持される形態で使用される非接地の力覚デバイスを想定している。そのため、モバイル機器で利用可能な寸法や重量であることが求められる。筆者らは前章で提案した偏加速度の周期運動を生成するため、クランクの等速回転周期運動を、非対称な偏った加速度変化を持つスライダの並進周期運動に変換する1自由度のプロトタイプ(偏加速度発生装置)を設計、開発した(図2)。はじめにモータの等速回転運動を揺動クランクスライダ機構により並進運動に変換し、さらにその並進運動の位相を90度ずらすことで目的の偏加速度運動を実現する。本手法では、入力部のモータが加減速なく等速で回転するため、エネルギー効率が低い。これは供給できるエネルギーに制限があるモバイルおよびウェアラブル用途に適した設計であると言える。提案するプロトタイプではバーチャルな力ベクトルを効

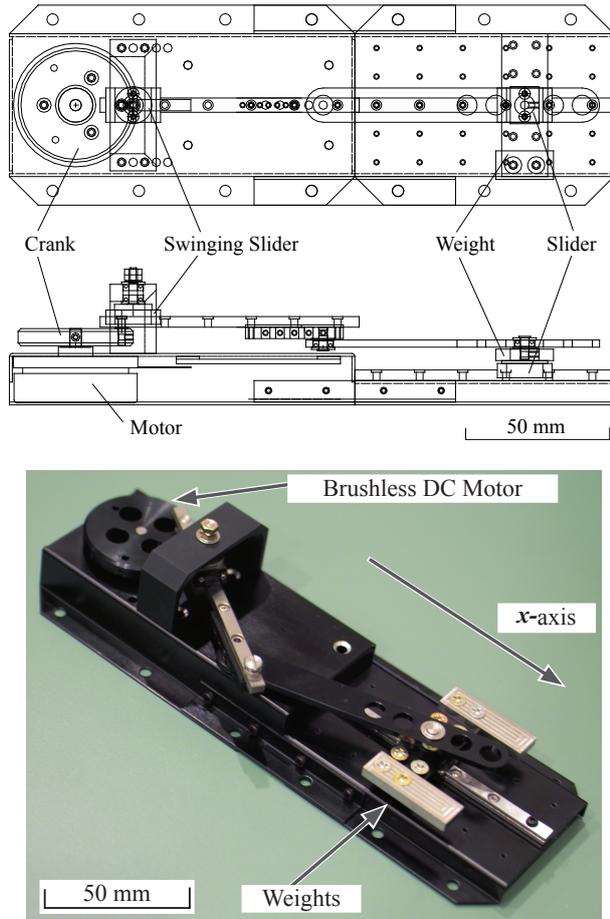


図2 力覚提示装置のプロトタイプの外観
Fig. 2 Overview of a prototype of the haptic display

果的に知覚させるためのパラメータのうち、モータの回転周波数によって偏加速度の周波数、スライダ部分の質量によって加速度の推力の大きさをそれぞれ変更することが可能であり、このパラメータを操作することでバーチャルな力ベクトルを想起させる影響について調べることが可能である。

本機構の出力であるスライダの挙動を表す等式は以下によって与えられる。

$$x = r \cos \theta + \mu(d - r \cos \theta) + \sqrt{l_2^2 - \{r(\mu - 1) \sin \theta\}^2} \quad (3)$$

ただし、

$$\mu = \frac{l_1}{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \theta}} \quad (4)$$

$x = OD$, $r = OB$, $d = OA$, $l_1 = BC$, $l_2 = CD$, $\theta = AOB$ である。プロトタイプでは $r = 15 \text{ mm}$, $d = 28 \text{ mm}$, $l_1 = 60 \text{ mm}$, $l_2 = 70 \text{ mm}$ とした。これらは加速度の極性の時間比をおよそ 1:8 となるように設定された。プロトタイプにおいて、モータを一定速度で回転させたときのスライダの加速度の理論値と機構全体の挙動の時間変化を図3に示す。図にも示されるように、加速度の最大値はモータの回転周波数の自乗に比例して変化する。

また、本機構の動力学は以下のように記述できる。

$$\begin{aligned} m_p \ddot{x} &= F_{Px} \\ &= m_E \ddot{x}_{Ex} - \left\{ m_A \ddot{x}_{Au} - \frac{\tau}{r} \sin(\theta - \phi) \right\} \cos \phi \\ &\quad + \frac{1}{\mu - 1} \left\{ \frac{\mu}{l_1} J_A \ddot{\phi} + \frac{\tau}{r} \cos(\theta - \phi) \right\} \sin \phi \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、

$$\phi = \pi - \arctan \left(\frac{r \sin \theta}{d - r \cos \theta} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x_{Au} &= \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) x_B + \frac{1}{\mu} x_C \\ &= \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) r \{ \sin(\theta + \phi) - \cos(\theta - \phi) \} - d \cos \phi \end{aligned} \quad (7)$$

$$x_{Ex} = h_E \{ (1 - \mu) r \sin \theta + \mu d \} + (1 - h_E) x \quad (8)$$

τ はクランクの制御トルク、 m_p , m_A , m_E は往復質量、リンク BC の質量、CD の質量をそれぞれ表す。 J_A は点 A まわりの慣性モーメントを表す。 F_{Px} はスライダに生じる力である。 x_{Au} および x_{Ex} は点 A, E の位置である。 $h_E = CD/DE$, $\phi = DAB$ である。クランク(モータ)は一定の角速度 ω で回転する($\theta = \omega t$)。なお、計算過程は付録に示す。

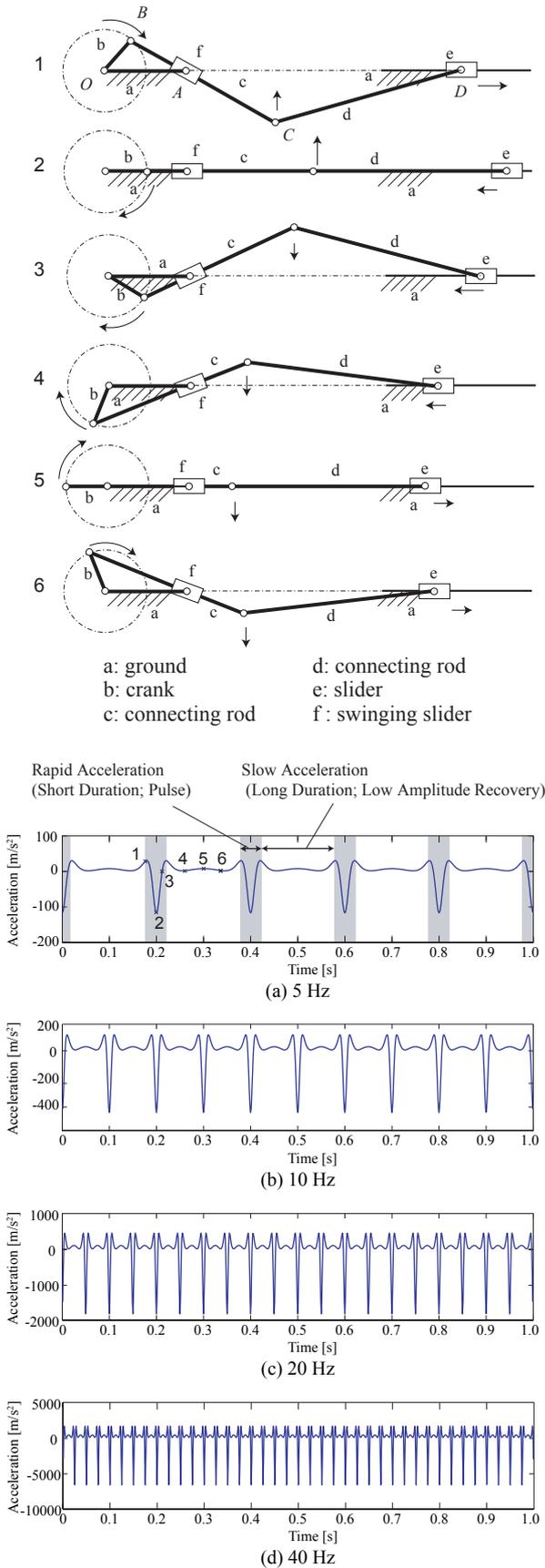


図3 スライダの加速度変化とその動きの対応

Fig. 3 Correspondence of the acceleration graph and the motion of slider *e*. Slider *e* slides backwards and forwards as crank *b* rotates. *f* oscillates around point *A*, and causes the slide to turn about the same point.

4.2 構成

本システムは、偏加速度発生装置、制御用PC (CPU: Pentium4, 1.5 GHz) およびモータアンプ (Maxon Motor 製 DEC50/5) によって構成されている。偏加速度発生装置のモータには Maxon Motor 製 EC45 Flat motor (定格出力 30 W, 重量 88 g, 最大許容回転数 10,000 rpm) を使用した。モータの電源電圧は DC18 V とした。分銅, モータアンプを除いた偏加速度発生装置の重量は 230 g であり, 筐体の大きさは幅 70 mm × 奥行き 200 mm × 高さ 48 mm である。

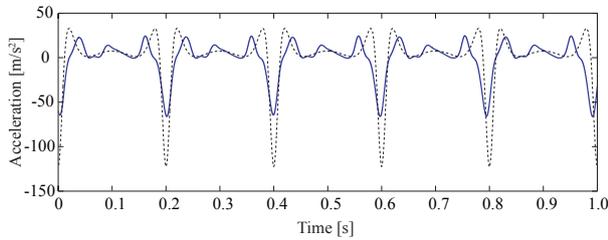
制御用 PC には D/A ボード (Interface 製 PCI-3521) が装備されており, 出力レンジは 5.0 V, 分解能は 12 ビットである。D/A コンバータを用いて目標の回転周波数となるように電流制御によって偏加速度発生装置のモータを制御した。

4.3 特性評価

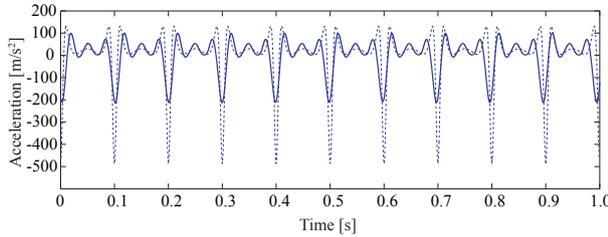
偏加速度発生装置の機械特性評価として並進運動部分 (スライダ *e*) の加速度を計測した。まず, 偏加速度発生装置を固定台に両面テープで固定した状態で, レーザ型変位センサ (キーエンス製 LK-G150) を用いてサンプリング周波数 2 kHz でスライダの位置データを計測し, ローパスフィルタ (7 次バターワース) をかけ高周波成分を除去した。なお, カットオフ周波数は回転周波数 5 Hz および 10 Hz のとき 50 Hz, 回転周波数 20 Hz のとき 100 Hz, 回転周波数 40 Hz のとき 150 Hz とした。この位置データの時間差分 (二階微分) によりスライダの加速度を求めた。装置の分銅の重量 m_E は 20 g とした。モータの回転周波数ごとの計測された加速度の時間変化を図 4 に示す。計測結果 (図 4 の実線) と理論値 (図 4 の点線) を比較すると, スライダとガイドレールの摩擦項などの機械的なノイズおよび変位センサのノイズの影響が観察されたが, 理論値の出力波形との相似性が確認された。しかし加速度の最大値は 5, 10, 20, 40 Hz において, それぞれ理論値の 54 %, 43 %, 43 %, 43 % 程度となった。この原因として, トルクが必要とされる区間におけるモータの回転速度の低下や, スライド支点 (図 3 の *f*) の摩擦の影響が挙げられる。本手法では加速度の時間比に着目する点や, 実験で用いたモータの回転周波数では加速度の最大値の減衰率が 10 Hz 以上では 43 % でほぼ一定であった点から, 本稿では要求された機械特性は実現できたと言える。

5 知覚特性評価

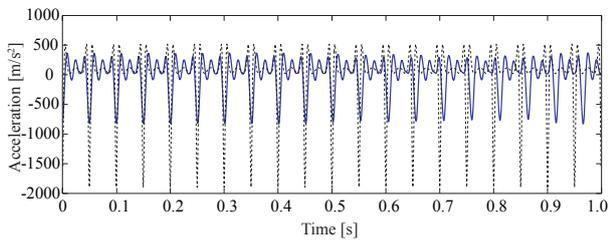
本手法は設計指針からこれまでの力覚ディスプレイと異なっているため, 物理的な力の提示側だ



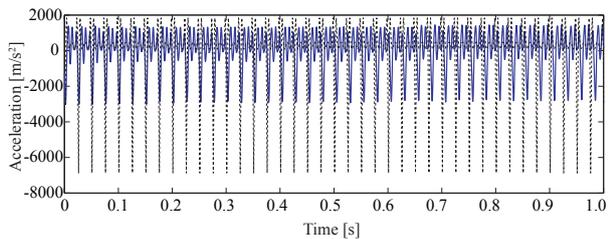
(a) 5 Hz



(b) 10 Hz



(c) 20 Hz



(d) 40 Hz

図4 加速度変化の実測値と理論値の比較

Fig. 4 Actual acceleration value of slider e vs. calculated value

けではなく、バーチャルな力を知覚するとき人間は「大きさ」と「方向」を受け取っているのかといった知覚-認識側を含めて検討していく必要がある。ここでは、このうち「方向」に関する知覚特性について偏加速度発生装置を用いて評価する。

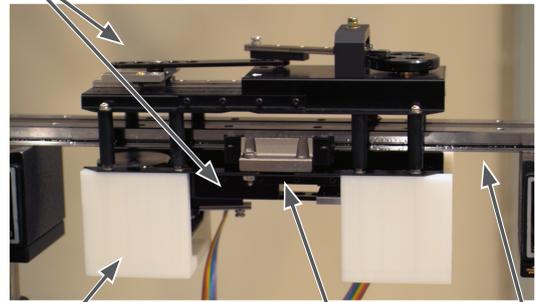
5.1 実験1: モータの回転周波数の知覚の影響

筆者らは予備実験 [3] において偏加速度発生装置を用いることでバーチャルな力を被験者が知覚できる知見を得ている。また、これまでの国内外の学会における対話発表、デモンストレーションを通じて、中空で偏加速度発生装置を把持した場合、往復する質量の可動軸を向けた方向に応じて全方位に力覚が想起されることを150名以上の体験者

から報告を受けている[†]。しかしながら、バーチャルな力感覚を効果的に惹起させるパラメータについては未確認であった。そのため、力感覚の惹起に効果的な偏加速度発生装置の制御パラメータを以下の実験を通じて推定し、それを基に知覚特性評価を行う。

本実験では様々なモータの回転周波数条件における方向知覚の正答率を二肢選択法を用いて調べた。28～31歳の4名の被験者が本実験に参加した(男性3名: IT, GK, TBと女性1名: AM)。すべての被験者は右利きであった。被験者ITとGKは予備実験 [3] に参加しており、被験者AMとTB

Proposed Force Displays in Opposite Directions



Case for Holding Slider Linear Rail

Headphone Eyemask Proposed Force Displays

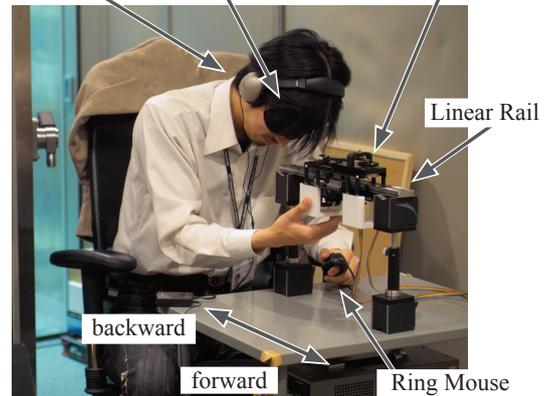


図5 実験の様子

Fig. 5 View of experiment

[†] : 事前に偏加速度発生装置の説明を受けなかった体験者に装置を把持させ、最初に前方(肘から掌の方向)、次に持ち替えて後方に提示した場合、どのように感じたかの問いに対して「明らかにある方向にぐっぐっと引っ張られて、手から落ちそうに感じる。ゆるく握った方が力を感じる。」「前方に引かれる感じの力を受けた。」「はじめ手を引かれる感じがした。ひっくり返して持つと手が押される感じがした。」「自分の体に向かって押されるほうが明確に感じられた。引っ張られるというほど強くは無かった。」「引っ張られたり、押されているように感じた。」「連れていってもらうような感じがした。」「などの報告を受け、バーチャルな力ベクトルが知覚されたことが確認された。一方で「震えている。逆に持ち替えてと言われたがあまり変化した印象は無かった。」「違いは無いように感じた」など知覚出来ないという感想も少数ながら得られた。事前に原理などの説明がなくても10 Hzの回転周波数でおよそ7割の体験者はバーチャルな力ベクトルを想起することが可能であった。

はナイーブな被験者であった。すべての被験者は本研究と関わりを持っていない。

図5に実験セットアップと実験の様子を示す。被験者は偏加速度発生装置の前に座り、装置を自然に把持できるように椅子の高さを各自調節した。床から装置までの高さは1,000 mmであった。実験装置にはABS樹脂の箱が装着されており、被験者はその近い側の箱を利き手(この場合、右手)で把持した。把持の仕方は指先で上記の箱を包み込むように握る方法で、実験を通じて統一させた。被験者はアイマスクおよびアクティブノイズキャンセラのヘッドフォンを着用し、視聴覚の手がかりをマスクされた。被験者の応答は利き手ではない側の手で握っているリングマウス(シグマAPOシステム販売社製SGM-UK)のボタンで収集された。実験中は被験者に正解のフィードバックは与えられなかった。

また、リンクの動きによって生じる、意図する方向の正逆方向以外に発生する加速度をキャンセルするため、実験装置はスライダとリニアレール(日本トムソン社製LWFF, レール長400 mm)を用いて力覚提示方向を一軸のみに限定した。前方提示用および後方提示用にそれぞれ1台ずつ、計2台の偏加速度発生装置をスライダの上下に固定した。2台はそれぞれデジタル出力ボード(Interface製PCI-2702)によって提示する方向を切り替えられた。実験システムの構成を図6に示す。また、スライダの質量には20 gの分銅を用いた。

モータの回転周波数の値は5, 10, 15, 20, 40 Hzの5水準を用いた。加速度の出力の極性および周波数の値はランダムに変化させ、各被験者ごとに

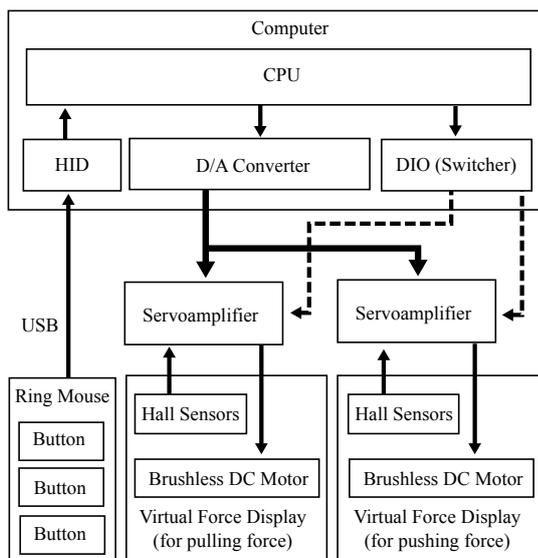


図6 実験システムの構成図
Fig. 6 System configuration of experiment

500 試行(各回転周波数条件あたり100 試行, 前方への提示に50 試行, 後方への提示に50 試行)を行った。提示される順番は被験者ごとにランダムに変化させた。

被験者は知覚した方向が「前方(肘から掌の方向)」または「後方(掌から肘の方向)」のどちらかを把持しているリングマウスの左右のボタンを押して回答した。そのため、チャンスレベルは50%である。ボタンが押されると対応した応答(「前」「後ろ」「決定」)が合成音声(IBM ProTalker)により再生された。被験者の回答を決定する「決定」ボタンを押された2秒後に次の刺激が2秒間1回だけ提示された。振動順応と疲労の影響を考慮して、50 試行おきに2分間の休憩を入れた。

5.2 実験1の結果と考察

各被験者の正答率を図7に示す。横軸はモータの回転周波数, 縦軸は正答率である。すべての被験者においてモータの回転周波数が10 Hzのときが最も高い正答率であり, 平均正答率は96.5%であった。また40 Hzのとき最も低い正答率となり, ほぼチャンスレベルと等しい値となった。被験者の正答率が100%とならない要因として, (1)実験での刺激提示時間の影響, (2)リンクの挙動によって意図する方向と直交する方向に生じた外乱要素の影響, (3)加速度プロファイルの影響の3点が挙げられる。(1)については実験では2秒間の提示としたが, 提示時間が長くなるほど方向知覚の判断材料が量的に増えるため, 提示時間を長くすることで判断の確信度が上昇し, 正答率の向上につながると思われる。(2)については評価実験ではリニアスライダ上に固定することで意図する方向と直交する方向の力を遮断させるを試みたが,

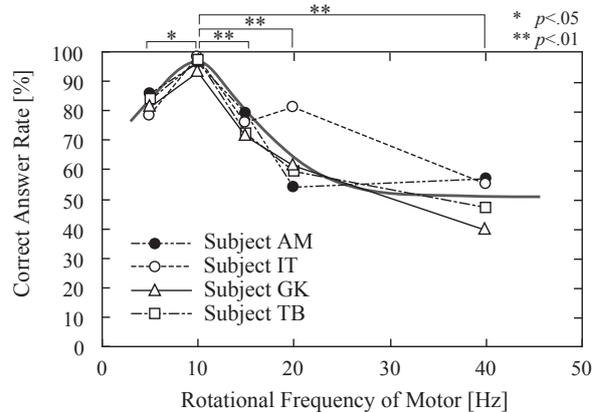


図7 各被験者の回転周波数に対する正答率
Fig. 7 Percentage-correct scores v.s. rotational frequencies of motor for subjects AM, IT, GK, and TB (close circles, open circles, open triangles, and open squares).

完全に相殺させることはできなかった。完全に相殺させるためには、例えば逆位相にリンクが駆動する装置を加えた2台の構成に変え、相殺したい力の発生する軸上に2台を並べて配置する方法が挙げられる。この構成を用いた予備実験において、力覚がより明確に知覚されるという内観報告を得ている。また、(3)については加速度のプロファイル波形を変化させると正答率に強く影響を及ぼすため、加速度プロファイルの最適化によって正答率はさらに100%に近づくと推測される。得られた正答率について、モータの回転周波数条件5水準を要因とする1元配置分散分析を行った。その結果、モータの回転周波数の効果が有意となった($F(4,12) = 29.2, p < .01$)。モータの回転周波数条件について、Scheffeの多重比較検定を行った結果、10 Hzが15 Hz, 20 Hz, 40 Hzに対して有意水準1%で、5 Hzに対して有意水準5%で、それぞれ正答率に有意差が認められた。このことはモータの回転周波数が10 Hzのときが、非対称の偏加速度を1方向の力として知覚できる有効な周波数条件であることを示す。

被験者AM, GK, TBは10 Hzを超えると回転周波数の増加に伴って正答率がチャンスレベル付近へ徐々に落ちていった。また被験者ITについては、20 Hzが正答率の極大値となる以外の傾向は他の被験者とほぼ同様であると言える。さらにすべての被験者に対して、前後の提示方向に依らず10 Hzのときが最も高い正答率となった。回転周波数が10 Hzを超える場合、時間的に近接する逆方向の復帰する力を筋紡錘が検出してしまうため、正答率が低下したと考えられる。

一方、皮膚の機械受容器において、マイスナー小体(FA-I)の反応を最大化させる振動周波数は5 Hzから40 Hzであるとされる[18]。さらにTabotらはマイスナー小体はおよそ30 Hzから40 Hzが最も敏感であると報告している[19]。本実験では5 Hzから40 Hzの値を用いたことから、皮膚表面においてはバーチャルな力ベクトルを知覚する主な受容器はマイスナー小体であると言える。モータの回転周波数が40 Hzのときでは皮膚表面に分布するマイスナー小体の反応が増大するため、単振動と偏加速度運動の区別が出来なくなると考えられる。これは同周波数で「振動のように感じる」という被験者の内観報告と一致する。

5.3 実験2: モータの回転周波数と推力の大きさが知覚に与える影響

実験1ではスライダeの質量を一定としたため、物理的に発生する推力がモータの回転周波数の自

乗に比例して増加した[†]。これは計測された各周波数での加速度のピーク値(図4)からも確認できる。そのため、モータの回転周波数が知覚において重要な役割を果たすことが示されたもの、実験1の結果だけではバーチャルな力ベクトルを知覚する要因が偏加速度の周波数に起因するものなのか、推力の大きさに起因するものかを結論付けることが出来ない。実験2ではこれらの要因のどちらが知覚において支配的かを調べる実験を行った。被験者は実験1からAM, IT, GKの3名が引き続き参加し、実験方法はスライダeで発生する物理的な推力の大きさとモータの回転周波数の組み合わせを表1のように変更した。なお、推力の大きさはスライダeの質量を変更することによって調整した。それ以外は前述の実験と同様の手続きであった。なお、表中の各列(C1~C4)はそれぞれスライダeでの推力の大きさが等しい。また、C4の推力はC3の4倍、C3はC2の4倍、C2はC1の4倍であった。

5.4 実験2の結果と考察

各被験者の正答率のモータの回転周波数と推力の大きさの関係を表2に示す。なお、表2中の背景が灰色の箇所は正答率の閾値である75%を越えたことを示す。

実験結果から、モータの回転周波数が増加するとスライダeの質量(推力の大きさ)に依らず、正答率がチャンスレベルに近づくことがわかる。また、スライダe部での推力の大きさが等しい条件内(C2, C3, C4)でも、モータの回転周波数が増加すると正答率が減少することがわかった。このことからバーチャルな力の知覚は偏加速度の周波数がより支配的であることが示唆された。

表1 スライダ質量とモータの回転周波数の組み合わせ
Table 1 Combination of rotational frequency of motor and mass of weights yielding equivalent force. Each column is combination of the same amplitude of force.

モータの回転周波数 [Hz]	推力の大きさ			
	C1	C2	C3	C4
5	20	80		
10	5	20	80	
20		5	20	80
40			5	20

(表中の単位はg)

[†]：本稿の実験装置で発生する物理的な推力 F はニュートンの法則により往復する質量 m とその加速度 α を用いて $F=ma$ で表される。ここで α はモータの回転周波数 f の2乗に比例するため $F \propto f^2$ である。

表2 各被験者のモータの回転周波数と推力の大きさに対する正答率

Table 2 Percentage-correct scores comparing combinations of frequency of acceleration change and force for subjects AM, IT, and GK (top, middle, and bottom row).

Subject AM				
モータの回転 周波数 [Hz]	推力の大きさ			
	C1	C2	C3	C4
5	86	100		
10	98	96	88	
20		64	54	58
40			57	46

Subject IT				
モータの回転 周波数 [Hz]	推力の大きさ			
	C1	C2	C3	C4
5	78	89		
10	79	98	82	
20		60	81	56
40			55	39

Subject GK				
モータの回転 周波数 [Hz]	推力の大きさ			
	C1	C2	C3	C4
5	82	96		
10	99	94	76	
20		59	62	52
40			40	40

(表中の単位は%)

5.5 リンクの並進運動成分の影響

本章の知覚評価実験ではリンク BC 及び CD の重量を 0 g とみなし、リンクの並進運動成分は無視した。しかしながら、プロトタイプにおけるリンク BC 及び CD の重量はそれぞれ 10.9 g, 6.5 g であったため、特にスライダの質量が軽い場合にはその影響は無視できない。そのため、リンクの重量を考慮した場合についても考察する必要がある。

図4のリンク BC 及び CD のスライダの重心の並進運動方向の加速度変化を図8に示す。スライダ e (点 D) の加速度の振幅と比較して図8(b)は 39%, 図8(d)は 84% 相当であると考えられる。また、スライダおよび分銅固定部の重量は分銅以外に 7.8 g であった。これらのリンクの重量およびスライダ固定部の重量を考慮した推力の大きさに対する実験2の被験者の平均正答率のグラフを図9に示す。なお、グラフの横軸は推力の大きさの比率、エラーバーは正答率の標準偏差をそれぞれ表す。図9から、推力の大きさの比率が 10 付近では 10 Hz の条件では閾値上であるが、20 Hz の条件では閾値下であることがわかる。リンクの重量およびスライダ固定部の重量を考慮した場合も偏加速度の周波数の方が支配的であることが示唆された。

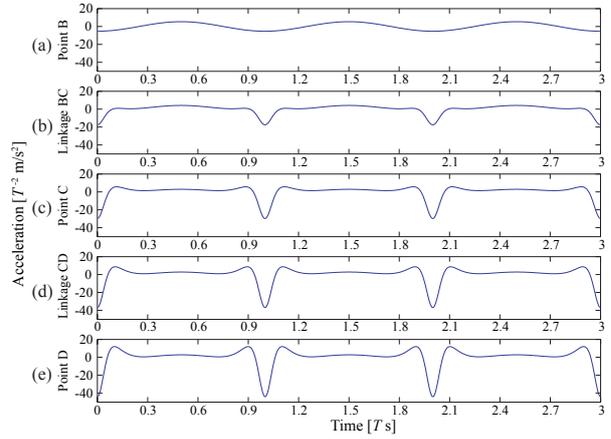


図8 各リンクの並進運動成分の加速度
Fig.8 Acceleration on linkages when the motor in the force display rotates at constant speed with cycle T [s].

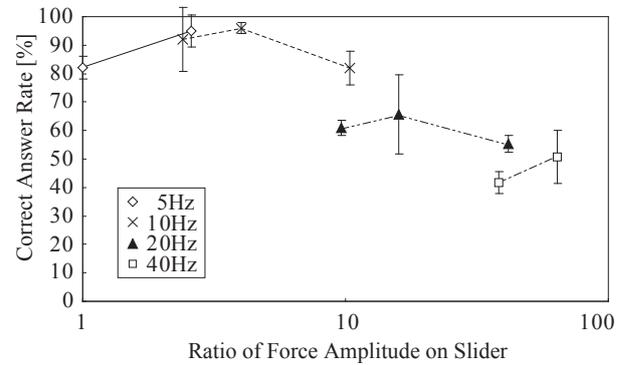


図9 リンクおよびスライダ周辺部の重量を考慮した周波数と推力の大きさの正答率
Fig.9 Average percentage-correct scores v.s. amplitude of force on slider considering weight of linkages and slider.

6 考察

6.1 バーチャルな力ベクトルの知覚

バーチャルな力ベクトルの知覚には推力の大きさより偏加速度の周波数が支配的であることが実験結果から明らかになった。知覚に関与する感覚器については、被験者は腕が動く感覚が生じることを報告しており、筋紡錘や腱の反応が中心であるとされる。実験では、手腕の動きに対しては被験者が筋のスティフネスを高めることによってバーチャルな力ベクトルの感度を減少させる恐れがあったため、力強く固定させるような指示や手腕の挙動の制限に関する指示は行わなかった。筋のスティフネスを高めたときの感度の減衰率や把持する箱を被験者が動かした変位量の影響については今後検討していきたい。

一方、振動による伸張錯覚は 70-80 Hz で最も想

起され、10 Hz 付近で想起されないとされている [20]。本実験の偏加速度では、時間応答に換算すると偏加速度の時間比が 1:8 であるため、パルス状の加速度成分はおおよそ 9 倍の周波数相当であると考えられる。つまり本実験のモータの回転周波数の最適値とされた 10 Hz は 90 Hz 相当の刺激とも考えられるため、本実験の結果では伸張錯覚の影響を棄却することはできない。

また皮膚の機械受容器では、20 Hz 以上の回転周波数での正答率がチャンスレベルに近づいたのは当該周波数付近の振動知覚に反応する FA-I がバーチャルな力ベクトルの知覚を妨げたと考えられる。10 Hz 以下での回転周波数で正答率が高かったことから、局所的な圧迫や伸展に反応する SA-II がバーチャルな力感覚の惹起の一部を担っている可能性がある。

6.2 力覚提示の多自由度化

本プロトタイプでは 5.2 節で述べたようにリンクの挙動によって意図する方向と直交する方向にも力が生じたが、逆位相にリンクが駆動する装置と組み合わせることで直交方向の力を相殺でき、効果的な力覚提示が可能となると考えられる。

現状のプロトタイプを用いて多自由度の力覚提示を実現する場合、上記の逆位相のプロトタイプの組を 2 セット、線形独立となるように配置することで実現可能となる。もしくは、逆位相のプロトタイプの 1 組と、パン方向の回転のためのステップモータを組み合わせることも実現可能である。いずれかの方法を用いれば、2 次元平面で任意の力ベクトルを合成できると考えられる。多自由度の力覚提示システムの一例を図 10 に示す。

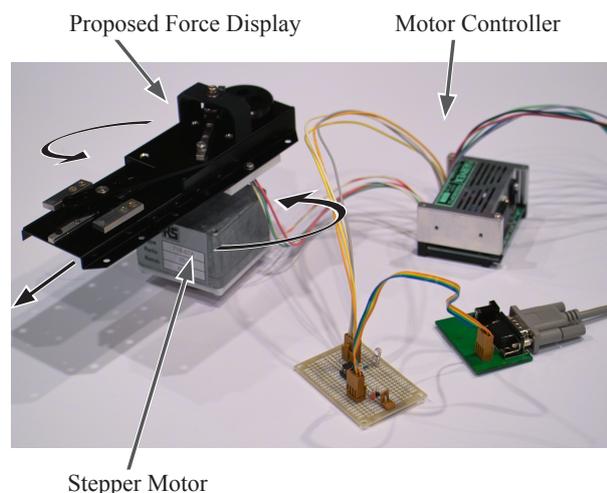


図 10 力覚提示方向の多自由度化の例
Fig.10 Example of multi-DOF force display

6.3 本手法の制約

本手法は利用者によって知覚されるバーチャルな力ベクトルの大きさは異なるため、環境接地型の力覚提示装置でよく見られるバーチャルな物体に触れるような精細な力覚情報の再現などの用途には適していない。

また、本手法では人間の振る舞いに対する強制力となるような大きさの力覚は提示できない。しかしながら、提案する力覚提示装置を中空で把持した状態で能動的に腕を動かすと、パルス状の加速度成分によって生じる腕の位置や運動のずれを自己受容感覚が検出し、腕が引き伸ばされたり、押し込まれたりするような感覚が確認できる。また本手法が想起させるバーチャルな力の主観的な大きさは被験者間で異なる。バーチャルな力の分解能については今後評価し、表現できる力感覚のバリエーションについても調べていきたい。

6.4 スケーラビリティの問題

本手法はモバイルおよびウェアラブル用途の力覚提示手法として提案した。モバイルおよびウェアラブル用途では小型化は常に問題となる。本プロトタイプがそのまま小型化された場合、加速度の大きさや往復重量に比例した推力の大きさは減少すると容易に予想される。しかし、実験結果ではスライダ e の質量が 5.0 g (並進 22.5 g 相当) であっても回転周波数が 10 Hz の場合では平均 92 % の正答率となり、方向の知覚が可能であることが判明した。偏加速度の周波数だけでなく、推力の大きさの知覚限界についても今後調べていきたい。

また、本稿では偏加速度を生成する一つの実現例として、クランクスライダを利用した機構を提案、開発した。クランクスライダ機構では入力部のモータの回転速度を変化させることなく偏加速度が出力できるため、エネルギー効率が高い点とモータ制御の容易な点が長所として挙げられる。一方で機構の強度設計や寸法には限界があるため、装置の小型化や力覚提示の多自由度化により適した機構の検討も必要である。

また、提案する手法では往復質量の可動軸と提示したい力の方向とを一致させる必要がある。本実験では統制をとるため把持の方法を統一させたが、今後携帯端末の内部に偏加速度発生装置を軸が一致するように組み込むことが可能であれば、ピストルを構えるようにデバイスを把持する姿勢、携帯端末のディスプレイを見るように把持する姿勢、及び両手で携帯端末やゲーム機を操作するような姿勢でも、把持の方法に依らず本手法は利用可能であると考えられる。

本稿では、触覚や固有感覚を利用し、非言語的な情報であるバーチャルな力ベクトルを知覚させる力触覚提示方法 Phantom-DRAWN を提案した。また、周期運動内の加速度を変化させる実験装置を基に、偏加速度を知覚できる周波数の計測結果について報告を行った。心理物理実験の結果から、被験者に1自由度のバーチャルな力感覚を提示できることを確認した。また、そのバーチャルな力の知覚には偏加速度の周波数が10 Hz 付近のときが最も適していることが示された。さらにその周波数が推力の大きさより支配的であることが示唆された。

関連研究として、モータの速度ムラを利用して力覚を提示しようとする GyroCubeStick[21] があるが、速度ムラが力を知覚させる根拠や原理説明が全く存在せず、知覚に必要な周波数やデバイスの寸法・重量についても報告されていない。そのため、本手法との比較はできないが、本稿で提案した手法は[21]の知覚原理をも説明することが可能であり、本稿で得られた知見は同様に今後開発される力覚インタフェースの設計指針および知覚の原理説明となると期待される。

今後の課題としては、力覚を提示できる自由度の向上、リンクの挙動によって提示したい方向以外に発生する加速度の対策、可搬性や装着性の最適な設計、知覚できる方向情報と大きさの分解能の評価が挙げられる。また本手法の応用例としては、非接地方式で「手ごたえ」を利用することが有効なアプリケーション、たとえば本提案手法が組み込まれた携帯端末と、GPSなどの位置取得システムや電子コンパスのような姿勢センサを組み合わせた力覚ナビゲーションなどが想定される。

謝辞

デバイスの作成に御助言を頂いた川淵一郎氏に感謝の意を表す。

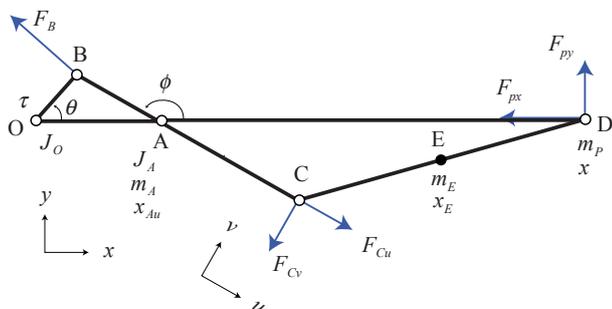


図 11 リンク機構の力およびモーメント

Fig. 11 Force and moment diagram

第4章の式(5)は以下のようにして導出される。

図11において、クランクが等角速度運動をするとき、点Oまわりの慣性モーメント J_O は θ の二階微分が0になるため無視できる。

$$J_O \ddot{\theta} = \tau + rF_B$$

$$\therefore \tau = -rF_B \quad (9)$$

ただし、 F_B は接線方向の力である。リンクBCのu軸方向における運動方程式は以下のように表される。

$$m_A \ddot{x}_{Au} = F_B \sin(\theta - \phi) + F_{Cu} \quad (10)$$

また、リンクBCの点Aまわりのモーメントは以下のように表される。

$$J_A \ddot{\phi} = F_B \frac{l_1}{\mu} \cos(\theta - \phi) - F_{Cv} (1 - \frac{1}{\mu}) l_1 \quad (11)$$

J_A は点Aまわりの慣性モーメントである。リンクCDのx軸方向の運動方程式は以下のように表される。

$$m_E \ddot{x}_{Ex} = -F_{Px} - F_{Cu} \cos \phi - F_{Cv} \sin \phi \quad (12)$$

以上、式(9)(10)(11)(12)を用いることで式(5)は導出される。

参考文献

- [1] 吉江将之, 矢野博明, 岩田洋夫: ジャイロモーメントを用いた力覚提示装置, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 3, pp. 329-337, 2002.
- [2] 仲田謙太郎, 中村則雄, 山下樹里, 西原清一, 福井幸男: 角運動量変化を利用した力覚提示デバイス, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 6, No. 2, pp. 115-120, 2001.
- [3] T. Amemiya, H. Ando, T. Maeda, "Virtual Force Display: Direction Guidance using Asymmetric Acceleration via Periodic Translational Motion", World Haptics Conference 2005, pp. 619-622, 2005.
- [4] T. H. Massie, J. K. Salisbury, "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects", ASME WAM, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Vol. 55-1, pp. 295-300, 1994.
- [5] M. Sato, "SPIDAR and Virtual Reality", World Automation Congress, IFMIP-043, pp. 1-7, 2002.
- [6] T. Nojima, D. Sekiguchi, M. Inami, S. Tachi, "The SmartTool: A System for Augmented Reality of Haptics", IEEE VR 2002, pp. 67-72, 2002.
- [7] 寛直之, 矢野博明, 齊藤允, 小木哲朗, 廣瀬通孝: 没入型仮想空間における力覚提示デバイス HapticGEAR の開発とその評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 5, No. 4, pp. 1113-1120, 2000.
- [8] H. Ando, M. Sugimoto, T. Maeda, "Wearable Moment

[筆者紹介]

- Display Device for Nonverbal Communication”, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E87-D, No. 6, pp. 1354-1360, 2004.
- [9] H. Gurocak, S. Jayaram, B. Parrish, U. Jayaram, “Weight Sensation in Virtual Environments Using a Haptic Device With Air Jets”, Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 130-135, June 2003.
- [10] Y. Suzuki, M. Kobayashi, S. Ishibashi, “Design of Force Feedback Utilizing Air Pressure toward Untethered Human Interface”, CHI2002, pp. 808-809, 2002.
- [11] P. H. Lindsay, D. A. Norman, “Human Information Processing: An Introduction to Psychology”, Academic Press, 1977.
- [12] S. S. Stevens, “Psychophysics: Introduction to Its Perceptual, Neural, and Social Prospects”, John Wiley and Sons, 1975.
- [13] 大山正, 今井省吾, 和気典二編: 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, 1994.
- [14] N. Kakuda, M. Nagaoka, “Dynamic response of human muscle spindle afferents to stretch during voluntary contraction”, Journal of Physiology, Vol. 513, pp. 621-628, 1998.
- [15] G.M. Goodwin, D.I. McCloskey, and P.B.C. Matthews, “Proprioceptive illusions induced by muscle vibration: Contribution by muscle spindles to perception?”, Science, Vol. 175, pp. 1382-1384, 1972.
- [16] E. Naito, P.E. Roland, H.H. Ehrsson, “I feel my hand moving: a new role of the primary motor cortex in somatic perception of limb movement”, Neuron. Vol. 36, No. 5, pp. 785-786, 2002.
- [17] H. Z. Tan, C. M. Reed, L. A. Delhorne, N. I. Durlach, and N. Wan, “Temporal Masking of Multidimensional Tactual Stimuli”, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 114, No. 6, pp. 3295-3308, 2003.
- [18] R. S. Johansson, U. Landstrom, and R. Lundstrom, “Responses of Mechanoreceptive Afferent Units in the Glabrous Skin of the Human Hand to Sinusoidal Skin Displacements”, Brain Research, Vol. 244, pp. 17-25, 1982.
- [19] W. H. Talbot, I. D. Smith, H. H. Kornhuber, and V. B. Mountcastle, “The Sense of Flutter-Vibration : Comparison of the Human Capacity With Response Patterns of Mechanoreceptive Afferents From the Monkey Hand”, Journal of Neurophysiology, Vol. 31, pp. 301-334, 1967.
- [20] J. P. Roll, J. P. Vedel, “Kinaesthetic role of muscle afferent in man, studied by tendon vibration and microneurography”, Exp. Brain Res. Vol. 47, pp. 177-190, 1982.
- [21] N. Nakamura, H. Fukui, “Development of a Force and Torque Hybrid Display “GyroCubeStick””, World Haptics Conference 2005, pp. 633-634, 2005.

雨宮 智浩 (正会員)



2002年東京大学工学部機械情報工学科卒業, 2004年同大学大学院情報理工学系研究科博士前期課程修了, 同年日本電信電話株式会社入社。現在NTTコミュニケーション科学基礎研究所にてウェアラブルインタフェース, 人間の知覚特性を利用した力触覚の錯覚現象の解明, 五感伝送に関する研究, 障害者支援の研究に従事。2004年日本VR学会学術奨励賞, 2005年日本VR学会論文賞, ヒューマンインタフェースシンポジウム2005優秀プレゼンテーション賞受賞。

安藤 英由樹 (正会員)



1998年愛知工業大学大学院工電機電子工修士課程修了。1998年同大学課程。1999年理化学研究所BMC JRA配属。2000年豊橋技術科学大学情報工学系助手, 2000年JST「協調と制御」領域グループメンバーとして東大情報学環研究員を経て現在NTTコミュニケーション科学基礎研究所リサーチアソシエイト。生体工学, 人間の知覚特性に基づく(錯覚, 錯触を利用した)ヒューマンインタフェースなどの研究に従事。2004年SICE SI部門奨励賞, 2005年日本機械学会ロボメック賞受賞。博士(情報理工学)

前田 太郎 (正会員)



1987年東大・工・計数工卒。工博。同年通産省工業技術院機械技術研究所。1992年東大先端科学技術研究センター助手, 1994年同大学院・工助手, 1997年同大学院・工講師, 2000年同大学院情報学環講師。2002年NTTコミュニケーション科学基礎研究所主幹研究員。人間の知覚特性・神経回路のモデル化, テレレイグジスタンスの研究に従事。計測自動制御学会論文賞, 学術奨励賞, 日本ロボット学会技術賞受賞。

(2005年9月27日受付)