

物理的刺激に基づく疑似力覚の提示と計算に関する研究動向

黒田 嘉宏^{*1} 仲谷 正史^{*2} 長谷川 晶一^{*3} 藤田 欣也^{*4}

Research Trend of Display and Calculation of Pseudo-Force Induced by Physical Stimuli

Yoshihiro Kuroda^{*1}, Masashi Nakatani^{*2}, Shoichi Hasegawa^{*3} and Kinya Fujita^{*4}

Abstract – Ungrounded and light-weight force display is demanded for the daily use of a virtual reality system in a large space. The concern with a pseudo-force display, which displays limited or different physical stimuli compared with the reaction forces causing in real-world, has been growing as a solution for the last several years. This paper reports a research trend of pseudo-force displays for production of physical stimuli to fingers or a palm. We categorize the pseudo-force display according to the approach to induce similar sensation or event cognition to those in real-world. The problems derived from the features of the pseudo-force display are also discussed.

Keywords : Pseudo-force, Force display, Wearable interface, Physical stimulus

1 はじめに

近代アトラクションでは、視覚情報に加えて香りや風など嗅覚や体性感覚への刺激によって、高い臨場感を生み出す試みが行われている。家庭用ビデオゲームにおいても、身体運動に伴ってワイヤレスリモコンが振動することにより物体との接触感や打撃感が得られるインタフェースが普及している [4]。Virtual Reality (VR, 人工現実感) 分野においては、物体の存在や性質、操作感覚を人工的に作り出すために、これまで多数の力覚提示デバイスが開発されてきた [1, 2, 3]。従来の力覚提示デバイスは、作業空間の範囲や装置の重さ等の制約から、自由に動き回る環境において携帯して気軽に使用することは困難であった。このような背景から、小型・軽量で可搬性の高い疑似力覚の提示デバイスが注目されている。

疑似力覚とは、本来の物理的刺激とは異なる刺激、あるいは限定された刺激により知覚される力覚を指す。力覚を知覚するプロセス、つまり皮膚の構造、受容器、知覚情報処理、知覚統合処理における特性を積極的に活用することにより、本来と知覚的に等価な力覚を小型のハードウェアで実現する。

図 1 は、疑似力覚において提示される物理的刺激を、現実世界において生じる力と従来の力覚提示において

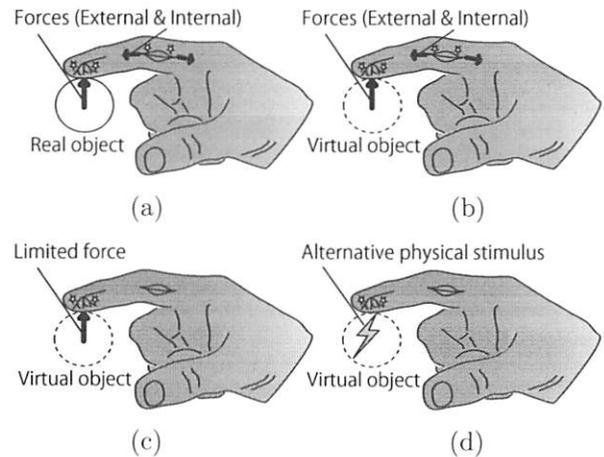


図 1 提示される物理的刺激：(a) 現実世界 (b) 従来の力覚提示 (c) 限定型の疑似力覚提示 (d) 代替型の疑似力覚提示

Fig. 1 Displayed physical stimuli: (a) real world (b) conventional force display (c) limited pseudo-force display (d) alternative pseudo-force display

提示される（生じる）力と対比して示したものである。疑似力覚の提示法は、提示される物理的刺激によって以下の 2 種類に大別される。

限定型 生体に、外力が働いたときの力学的作用の一部（皮膚の圧迫やせん断など）を加えて、外力が働いたときに発火する受容器の一部を発火させる方法。（図 1(c) 参照）

代替型 生体に、外力が働いたときの力学的作用とは異なる物理的刺激を加える方法。（図 1(d) 参照）

本論文では、物理的刺激を用いた疑似力覚提示デバイスに関する研究動向について述べる。特に、これま

^{*1}大阪大学大学院基礎工学研究科

^{*2}資生堂リサーチセンター

^{*3}東京工業大学精密工学研究所

^{*4}東京農工大学大学院工学研究院

^{*1}Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{*2}Shiseido Research Center

^{*3}Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

^{*4}Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

で提案された手指を対象とする疑似力覚提示デバイスについて、幾つかの観点で分類しつつ疑似力覚の提示法や機能を述べる。また、疑似力覚により生じるバーチャル空間の計算上の課題を挙げる。紙面の都合上、物理的刺激以外の刺激ならびに手指以外への物理的刺激が主として引き起こされる疑似力覚については、本論文の対象外とする。他の論文 [5] を参照されたい。本稿で皮膚感覚と述べる際には主に圧覚について言及し、温度感覚については割愛する。また、提示部は手のような無毛部であることを想定し議論を進める。

2 関連研究

2.1 力覚・疑似力覚の生理学

力覚とは、皮膚への物理的刺激によって生じる皮膚感覚と自己受容感覚が統合されることによって得られる感覚をいう。力覚の構成要素の1つである皮膚感覚は肌内部に位置する4種類の機械受容器（メルケル細胞、マイスナー小体、パチニ小体、ルフィニ終末）によって受容されていると考えられている。これらの機械受容器はそれぞれ圧覚、すべり覚、振動覚、および皮膚の伸びを検出している [6]。特にメルケル細胞で終末する遅順応タイプ I (SA I) 求心性神経は、皮膚変形によって生じたひずみの大きさ（ひずみエネルギー密度）に比例して応答することが知られている [7]。また、振動刺激に対する神経生理学的な応答特性についても調べられており、メルケル細胞で終末する遅順応タイプ I (SA I) 求心性神経は 2-10Hz、マイスナー小体に接続するとされる速順応タイプ I (FA I) 求心性神経は 30Hz で、パチニ小体で終末している速順応タイプ II (FA II) 求心性神経は 250Hz で最も応答閾値が低いことが報告されている [8, 9]。

もう1つの構成要素である自己受容感覚は主に筋紡錘、ゴルジ腱器官、および関節受容器によって担われている。筋紡錘は2種類の感覚神経終末 (group Ia, group II) によって支配されており、前者は筋の長さが増加する時に応答する。また、両者とも筋が伸ばされた後、一定の長さに保たれている場合（筋の伸展維持時）に応答する。ゴルジ腱器官は腱にかかる張力を受容しており、筋収縮の度合いを感覚神経 (group Ib) にエンコードする。筋紡錘、ゴルジ腱器官の感覚神経終末 (group Ia, Ib) とともに振動刺激に対して応答するため [10]、物理振動刺激や電気刺激を利用した力覚の拡張手法が提案されている [11]。

一方、疑似力覚とは、先にも述べたように、本来の物理的刺激とは異なる刺激、あるいは限定された刺激により知覚される力覚である。その特性がゆえに、疑似力覚に運動感覚（四肢の位置、動きの感覚）を加えたり、視覚、聴覚を通して過去の力覚体験の想起させ

る情報などを組み合わせることによって、よりリアリティの高い体験につながる経験的に確かめられている。疑似力覚においては、視聴覚による補完は重要な役割を果たす [5, 12]。

力覚について神経生理学の知見に基づいてまとめたものが図2である。ヒトへの物理的な刺激は、機械受容器を含む皮膚感覚受容器と、筋や関節等に存在する自己受容器によって検出される。皮膚感覚と自己受容感覚は同じ脊髄伝導路（後索-内側毛帯）によって伝達され、視床腹側基底核を経由して大脳の第一体性感覚野のそれぞれ 3b 野, 3a 野に投射される。その後、皮膚感覚・自己受容感覚のそれぞれに分かれていた感覚が頭頂連合野で統合される。統合された体性感覚は皮質下のさまざまな部位で視聴覚など、体性感覚とは異なるモダリティの感覚と統合される [13]。

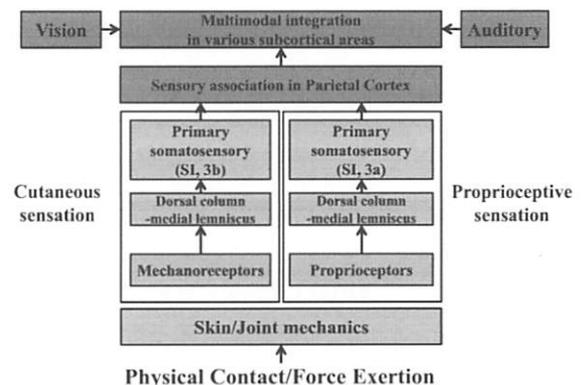


図2 力覚・触覚の感覚伝達経路
Fig.2 Sensory pathways of Cutaneous and Proprioceptive Sensations.

2.2 触知覚動作の分類

バーチャル空間における物体とのインタラクションにおいて、手指を用いた様々な触知覚動作や作業が行われる。本節では、物体の触知覚動作において生じる力を分類し、バーチャル空間における各種物体操作の表現に必要な提示力を整理する。本論文では、図3に示すように、指先と対象との接触によって生じる力のうち、接触面に垂直な方向の力を法線力、水平な力を接線力と呼ぶ。

Ledermanら [14] によって物体の触知覚動作は、接触動作、押し込み動作、なぞり動作、撫で動作、つまみ動作、掴み動作、叩き動作に分類されている。接触動作、押し込み動作、つまみ動作、叩き動作では、接触面に対して垂直方向の相対運動が大きくなるため、法線力が主として生じる。他方、なぞり動作、撫で動作、掴み動作では、接触面に対して水平方向への相対運動が大きくなるため、法線力に加えて接線力が生じる。従って、一般的に、前者の触知覚動作群を体験可

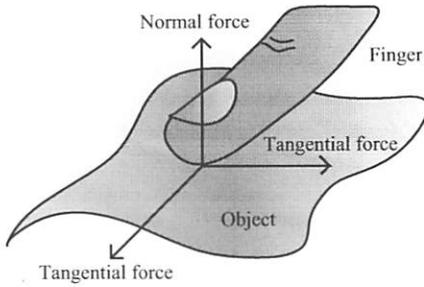


図3 反力方向：法線力と接線力
Fig.3 Force directions: normal and tangential forces

能とするためには、法線力の提示が必要となり、後者の触知覚動作群を体験可能とするためには、法線力と接線力の提示が必要となる。

一方で、本来の力を完全に再現しなくとも知覚の主要因となる一部の力のみ提示によって、対象物の知覚が可能な場合があり [15]、限定型の疑似力覚を行う動機づけとなっている。

2.3 力覚提示デバイスの分類

バーチャル物体とのインタラクションにおける、物体形状の知覚や作業状況の認知のためには、対象物との接触状態に応じた反力の知覚が重要になる。そのため、バーチャル空間で生じた反力の提示を目的とした、多くの力覚提示装置が研究開発されてきた。表1に、いくつかの観点に基づく分類を示す。

力覚提示装置は、据え置きタイプの接地型とウェアラブルな非接地型に分類されることが多い。装置が床などに固定される接地型は、ユーザとバーチャル空間の相互作用によって生じる外力をそのまま表現することができる点で優れている。そのため、デスクトップ型を始め多くの装置が製品化されている [16, 17] が、可動域の大きさが課題となる場合が多い。

他方、ウェアラブルな非接地型は、提示する力の性質によって、さらに二つに分かれる。慣性力や慣性モーメント [18, 19]、ジャイロ効果を利用した方法 [20, 21] は、ウェアラブルなデバイスによる外力の提示を実現するものであるが、蓄積する運動エネルギーによって力の発生可能時間が限られることや、並進力ではなくトルクの発生に限られること、運動質量を利用するため装置重量が増加しやすいことなどが課題となる。一方、非接地型力覚提示装置の多くは、反力発生装置をユーザが装着する内力提示型である。ペンやジョイスティックなどの道具を介して手に力覚提示する装置 [22, 23] や、指の屈曲運動に対して反力を発生する装置 [24, 25] などが該当する。可動領域を大きく取りやすい反面、外力を生成できないため、物体の把持反力は提示できても物体の重さは提示できないなどの制約が生じる。

表1 力覚提示装置の分類
Table 1 Categories of force display devices

1. 力の発生方式による分類
 - 接地型 (外力)
 - 非接地型
 - － 慣性力・ジャイロ効果 (外力)
 - － 関節トルク提示 (内力)
2. 力の伝達機構による分類
 - マニピュレータ型
 - スtring型
3. 自由度による分類
 - 1自由度 (力の大きさ)
 - 2, 3自由度 (力ベクトル)
 - 4~6自由度 (力ベクトル, トルク)
4. ユーザとバーチャル空間の接触方法による分類
 - 道具介在型
 - 直接接触型
5. 反力非提示時の接触状態による分類
 - 装着型
 - 遭遇型

また、接地型、非接地型とも、力の伝達機構の点では、関節構造を持つマニピュレータ型と糸の張力を利用するString型に大別される。一般に、マニピュレータ型は精度に優れ、String型は重量や応答性の点で優れている。

提示する力の自由度による分類では、基本的には、力の大きさのみの1自由度、力の方向も提示する2, 3自由度、回転トルクも提示する4~6自由度の装置のいずれかに分類される。

ユーザとバーチャル空間の接触部に着目すると、メスなどのバーチャル空間の道具に作用する反力を、ペン型等の把持デバイスを介して提示する道具介在型 [16] と、指先など体表面への反力を直接計算して提示する直接接触型 [24] の二つに分類できる。前者は、デバイスとバーチャル空間の干渉力を点接触で考えれば、最大6自由度のレンダリングですむが、把持デバイスとバーチャル空間の道具の把持部の形状を一致させる必要があるため、応用が限定される。後者は、体表面への接触点が一点に限定される動作は極めて少ないため、事実上、多点(多指)接触の提示が必要になり、シミュレーションやレンダリングへの要求が高くなる。さらに、多点・多自由度の力覚提示装置は小型化や制御が困難であることから、現状では、多指力覚提示装置は自由度を削減したものが大半であり、多自由度の

装置の研究事例 [26] は少ない。

さらに、これまでに例示した装置は、すべてエンドエフェクタ部が常時ユーザに装着されており、提示する反力を動的に制御するものであるが、反力を提示しない時にはユーザとエンドエフェクタが接触しない、遭遇型と呼ばれる装置も研究開発されている [27, 28]。遭遇型は人の動作を先まわりする必要があるため、速度と安全性の両立が課題となる。

以上のように、力覚提示装置は多様な分類が可能であるが、特に、接地・多自由度・道具介在・装着型には多くの製品化事例が見られる。他方、バーチャル空間との自由なインタラクションによって発生する反力を表現するためには、非接地・多自由度・直接接触型の実現が望まれるが、すべての条件を同時に満たす機構を設計・製造することは困難であることから、近年では、疑似的に実現しようとする試みが増えている。

3 疑似力覚提示デバイス

疑似力覚提示デバイスは、外力が働いたときの物理的刺激との刺激の相違や刺激する受容器によって、表 2 のように分類することができる。以降では、各分類についてこれまでに提案された疑似力覚提示デバイスについて述べる。

表 2 疑似力覚の分類
Table 2 A category of pseudo-force display

	刺激	受容器
限定 (感覚限定)	同種刺激	同一受容器
代替 (感覚模擬)	異種刺激	同一受容器
代替 (認知事象模擬)	異種刺激	異種受容器

3.1 限定型の疑似力覚提示：感覚限定

限定型 (感覚限定) の疑似力覚提示とは、外力が働いたときの力学的作用の一部 (皮膚の圧迫やせん断など) を加えて、外力が働いたときに発火する受容器の一部を発火させることにより、本来の感覚の一部を生じさせるものをいう。後述の図 5(a) に分類される。主に、自己受容器への力学的作用を伴わず皮膚の機械受容器への力学的作用に限定する物理的刺激の方法がとられる。

初めに、物体を押した場合などに生じる法線力を疑似提示する方法について述べる。Inaba ら [29] は、ベルトによる指先圧迫により、自己受容感覚を伴わず皮膚感覚のみによって法線力を疑似的に提示する装置を開発した。Minamizawa ら [30] は、二つのモータを同位相あるいは逆位相で回転させ、連結されたベルトによって指腹部に法線力および接線力を提示する装置を開発した。いずれも非接地・直接接触・装着型の装置であるが、提示力の自由度という観点では、前者は 1

自由度の力 (法線力)、後者は 2 自由度の力 (法線力、接線力 1 自由度) に限られる。また、接触/非接触のみを伝える軽量のデバイスとして、Aoki ら [31] は、ワイヤを用いて局所的に皮膚をひずませ、弱い刺激、つまり限定された刺激強度によって接触感をユーザに知覚させる装置を開発した。その他、Sheibe ら [32] は形状記憶合金の加熱・放熱による伸縮を用いて指腹部に接触感を与える装置を開発した。

同様に、指先に小型・軽量のアクチュエータを装着し、接線力を提示する試みが一部行われている [33, 34]。Gleeson ら [33] は、柔軟な曲げ材を用いたフレームによって 2 個のモータの回転運動を 2 自由度の並進運動に変換し、接触子を介して指先にせん断ひずみを発生させることで、2 自由度の接線力提示を可能とした。Webster ら [34] は、2 個のモータを用いたトラックボールの回転により、2 自由度の接線力を連続的に提示可能とし、滑り感覚を提示した。

また、非接地の装置は実装されていないが、接線力のみを提示により法線力と接線力を疑似的に提示する方法が提案されている。Hayward ら [35, 15] は、凸形状を指先でなぞった時に接線力のみを提示することで、3 次元の形状提示が可能であることを示した。本来生じる力 (法線力および接線力) のうち限定した力 (接線力) の提示により形状知覚を可能とする。法線力の提示機構を省くことで装置の小型・軽量化が可能となるほか、形状知覚のための撫で操作は基本的な触知覚動作であり、あらゆるシステムへの応用が可能である。

物理的刺激を限定するアプローチでは、入力刺激が除かれることによって対象物の性質の知覚や状態の認知が困難となる可能性がある。同様に後述する代替型の提示法においても、刺激の代替による対象の識別への影響が考えられるが、紙面の都合上、他の疑似力覚提示法においても重要な皮膚感覚への限定による影響についてのみ述べる。Minamizawa ら [30] は、皮膚感覚のみに刺激を限定した場合であっても重量弁別が可能であることを実験により示した。他方、指先の皮膚感覚のみでの重量弁別の解像度は、自己受容感覚を併せた場合 (指・手首は自由、腕は固定の条件下) に比べて 3 分の 2 程度に減少することが報告された。また、重量弁別閾の具体的な数値としては、自己受容感覚を併せた場合 (腕も非固定の条件下) の 8% [13] に対して、皮膚感覚のみの場合 (標準刺激 50g 条件下) に 20% 程度であった。

非接地で小型・軽量の力覚提示装置の実現方法の方向性として、物理的刺激を限定する、特に皮膚機械受容器への刺激のみに限定する方法や形状知覚を対象として刺激を限定する方法が示された。他方、刺激の弁別解像度が低下するといった制約に注意が必要である。

また、多自由度化に伴う装置サイズ・重量の増加が課題として残る。

3.2 代替型の疑似力覚提示：感覚模擬

代替型（感覚模擬）の疑似力覚提示とは、本来とは異なる物理的刺激によって、外力が働いたときと同一の神経発火パターンを導き、同一の感覚を得ようとするものであり、外力が働いたときと同一の受容器を刺激する、あるいは、同一の受容器を刺激した場合に生じる神経発火パターンを発生させる方法をいう。後述の図 5(b) に分類される。

本来の法線力とは逆向きに皮膚を吸引し疑似的に力覚を提示する方法が提案されている。Makino らは、「一定口径以下の穴のあいた基板上に皮膚を接触させた状態で、穴を通して皮膚を吸引すると、あたかも棒状の物体で押されたかのような触感が生じる」[36] という錯覚を元に、吸引圧によって押圧と同様の圧覚を生成する疑似力覚提示法を提案した。また、錯覚が生じる原因を調査するため、皮膚内部の機械受容器がひずみエネルギー密度を検出しているという仮説をたて、皮膚内部のひずみを有限要素解析した。

吸引刺激と同じく機械的刺激ながら、皮膚への振動刺激を用いた法線力の提示法が提案されている。Konyo ら [37] は、静的な圧力を知覚するメルケル小体 (SA I) を低周波の振動により選択的に刺激し、圧覚を提示する方法を提案した。

皮膚構造や機械受容器の特性を考慮することにより、本来の物理的刺激と受容器レベルで等価な物理的刺激で代替するというアプローチは、それらの構造や特性が調査できれば、全く異なる物理的刺激で本来と近い感覚を実現する可能性を秘めている。

次に、感覚を模擬するために、外力が働いたときと同一の神経発火パターンを発生させる電気刺激による方法について述べる。経皮的電気刺激による触覚提示法が従来から検討されてきており、機械受容器に本来生じる機械的ひずみを生じさせることなく、発火パターンを模擬する [38, 39]。Kajimoto ら [40, 41] によって、電気刺激パルスによって神経の発火を誘発可能であることが示され、また経皮電気刺激により機械受容器につながる軸索を皮膚からの深さや走行の違いから選択的に刺激する方法によって電気刺激による法線力提示が可能となった。また、Sato ら [42] は、指腹部への刺激強度の分布によって、本来法線力および接線力により生じる皮膚のひずみを模擬した力ベクトルの提示を試みている。提示部は電極と導線のみで構成されるため、提示デバイスの小型・軽量化が行いやすいという利点がある。他方、感覚を生じる電流閾値と痛みを感じる電流閾値の間隔が狭く、安定的な感覚生成に課題が残っている。

3.3 代替型の疑似力覚提示：認知事象模擬

代替型（認知事象模擬）の疑似力覚提示とは、本来とは異なる物理的刺激によって、外力が働いたときとは異なる神経発火パターンを生じるにも関わらず、体性感覚統合過程や視聴覚との複合感覚統合過程を経た結果、外力が働いたときと類似した知覚あるいは事象の認知が得られることを期待するものをいう。後述の図 5(c) に分類される。

体性感覚統合過程の作用を利用した代表的な研究に、Amemiya らの研究がある。Amemiya らは、図 4 に示すような知覚の非線形性を利用し、微小な加速と急激な加速による知覚量の差から疑似的な並進方向の力を提示可能とした [43]。また、手で把持する形態の提示装置を用いてある方向に引っ張られる感覚（牽引感覚）や重量感覚を提示可能であることを示した [44]。

接線力の多自由度化の方法として、本来の接線力を提示するのではなく、法線力の刺激に仮現運動やファントムセンセーションの知覚現象を組み合わせる方法が考案されている [45, 46]。仮現運動 (apparent motion) とは、実際に動く刺激を提示しなくとも、2 個の点刺激の一方が他方へ移動して知覚される知覚現象をいう [47]。また、ファントムセンセーション (phantom sensation) とは、二つの触刺激が近接する場合、二つの刺激が融合し、刺激の強度差や周波数差などにより、その間のある部位にあたかも一つの刺激として知覚される現象をいう [47]。Ooka ら [46] は、皮膚感覚のみを対象とし、配置した 4 個の振動子の振動振幅の差からファントムセンセーションを用いて 2 自由度の接線力を表現した。

Konyo ら [48] は、物体を撫でた際に摩擦力などの接線力によって生じる、固着-滑りに伴う断続的な皮膚の振動を、パチニ小体 (FA II) を選択的に刺激する高周波振動により再現し、摩擦感を提示した。対象物から受ける本来の外力（せん断力）ではなく、外力によって対象物と指先との間に生じる物理現象（皮膚の

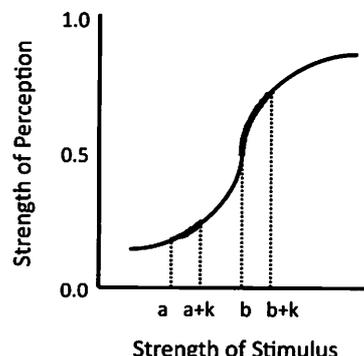


図 4 知覚の非線形性

Fig. 4 Non-linearity of perception

振動)の提示により摩擦を表現した点において、広い意味でやはり人間の認知機構の特性を利用する方法の一つと言える。

代替型(認知事象模擬)では、外力が働いたときは異なる神経発火パターンを生じるため、疑似反力の他に実際の外力が生じている場合にその影響を受けやすく、視覚や聴覚などによる積極的な補完が必要とされる場合が多い。また上述の三つの方法も含め、振動刺激を用いた方法では本来の接触力による圧覚に加えて、振動覚が知覚される傾向があり、本来とは感覚が異なってしまう点が課題である。結果として、デバイスが用途を選ぶ可能性がある。

その他、外力が働いたときの感覚というよりは、むしろ、事物の状態(接触/非接触など)を認知させるための記号的な情報伝達手段として、振動刺激を指腹部に与える装置などが提案されている[49]。

3.4 まとめ

図5に、疑似力覚提示デバイスの分類をまとめる。限定型(感覚限定)では、自己受容器への刺激を行わず皮膚感覚受容器への同一受容器・同種刺激を行い、感覚としては外力が働いたときと同一のものを得て、本来と同様の体性感覚を得ようとするものをいう。代替型(感覚模擬)では、本来と同一受容器・異種刺激によって、外力が働いたときと同一の神経発火パターンを導き、同一の感覚を得ようとするものである。代替型(認知事象模擬)では、本来と異種受容器・異種刺激によって、外力が働いたときとは異なる神経発火パターンを生じるにも関わらず、体性感覚統合過程や複合感覚統合過程を経た結果、外力が働いたときと類似した知覚あるいは事象の認知が得られることを期待するものをいう。限定型では刺激する受容器を限定する一方、代替型では既存デバイスの大半は皮膚機械受容器に限定するものの必ずしも刺激する受容器を限定するものではない。それぞれ刺激の種類や受容器は異なるが、力覚の知覚・認知機構を利用することで、外力を疑似的に認知させようとする点が共通である。

これまでに提案された疑似力覚提示デバイスの多くは、非接地・直接接触・装着型の提示装置であり、小型・軽量かつ多自由度な疑似力覚提示デバイスが実現しつつある。一方、重量が気にならないほど軽量の装置(1指あたり1.4g以下[31])は、一部の装置[31, 40]を除いて現状では実現していない。提示力の自由度は、振動覚や痛覚を生じないという条件下では、限定型[30]による2自由度(法線力, 接線力1自由度)が最大であり、条件を設けない場合は、代替型[42, 46]による3自由度(法線力, 接線力2自由度)が実現している。一方、モータなどの駆動系を用いた場合、多自由度化による機構の大型化は避けられず、現状を鑑みると、

神経活動の模擬や認知事象模擬の活用が必要になると考えられる。また、疑似力覚提示デバイスは、知覚解像度の低下、感覚生成の不安定性といった制約を十分考慮したシステム開発が必要である。

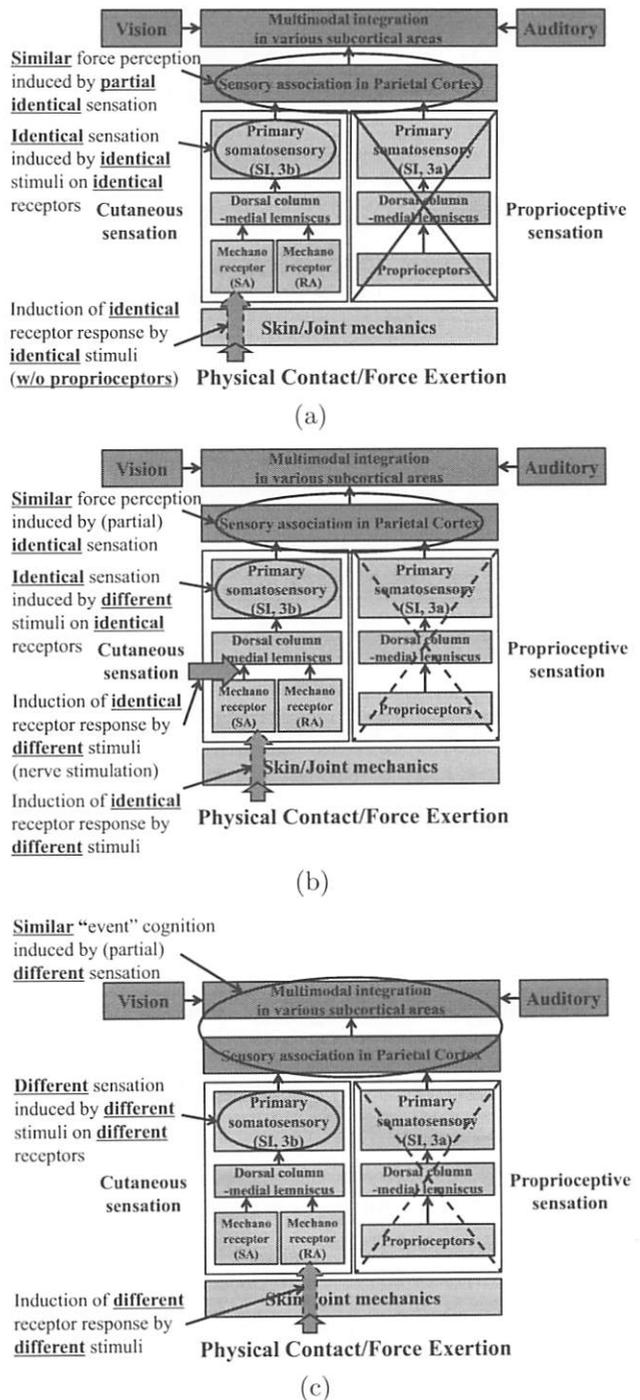


図5 疑似力覚提示デバイスの分類ごとの刺激と効果: (a) 限定型(感覚限定), (b) 代替型(感覚模擬), (c) 代替型(認知事象模擬)

Fig. 5 Physical stimulus and effects of categorized pseudo-force displays: (a) limited type (sensation limiting), (b) alternative type (sensation imitation), (c) alternative type (cognitive event imitation)

4 力覚レンダリングにおける諸問題

力覚提示デバイスを用いて、物体形状や物体を操作する際の感覚を提示するためには、物体形状や物体の動力学特性などとユーザの操作に基づいてユーザに提示すべき力を計算する力覚レンダリングと呼ばれる計算処理が必要である。力覚レンダリングはこれまで外力を提示できる通常の力覚提示デバイスを想定して研究されてきた。しかし、提示する力が限定的であったり、他の刺激で代替される場合には、力覚レンダリングへの要求も異なってくる。ここでは、これまでの力覚レンダリング手法と比較しながら、限定（感覚限定）型、代替（感覚模擬）型、代替（認知事象模擬）型に共通する、疑似力覚提示デバイスのための力覚レンダリングに特有の問題を考える。なお、疑似力覚提示においては、力から物理刺激量への変換も必要になるため、ここでは、変換のための計算も含めて力覚レンダリングと呼ぶ。

4.1 接触力の計算

人の触知覚動作に対応して、位置に応じた接触力を提示すると物体形状が提示できる。黎明期にはデバイス位置に最も近い物体外部の点にデバイスを向かわせるような力を求めていたが [50]、薄い物体を通り抜けてしまうなどの問題が起こる。物理シミュレータ内の物体（ツール）とデバイスがバネダンパでつながれていると考えてバネダンパの力を用いる Virtual coupling 法 [51] ならばこの問題は起きないが、ツールの慣性力が提示されてしまうため、指で直接物体に触れるのとは異なる感覚の提示となる。

これに対して、シミュレータ内に質量のない仮想の物体（プロキシ）を考え、デバイスとの間にバネモデルを考えてバネの力を用いる God object 法や Proxy 法 [52, 53, 54] ではツールの慣性力は提示されず、直接物体に触れた感覚が提示できる。Kikuuwe ら [55] はこの手法にダンパを組み込む手法を提案している。

Virtual coupling 法や Proxy 法では、デバイスの位置ではなくツールやプロキシの位置に映像のポインタを表示することで、映像上はポインタが物体に侵入していないように見せることができる。さらに、提示力の反力を物体に加え、動力学シミュレータを用いて物体運動をシミュレーションすると物体操作が行えるようになる。また、複数のデバイスを複数の指に装着することで把持操作を行うこともできる。

4.2 刺激の限定や相違の影響

このとき、力覚レンダリングは、ユーザとバーチャル物体の間に作用する力を正しく算出することを、力覚提示デバイスは、算出された力を正確に提示することが求められる。他方、疑似力覚提示デバイスは、提示する力が限定的であったり、他の物理刺激による代

替であったりするため、正しく算出された力に基づいて提示をおこなっても、正しい力覚が得られるとは限らない。例えば、指を介して腕全体に反力が加わったときと同じ圧力で指先を圧迫しても、生起する力覚は異なる可能性がある。さらに、異なる刺激で力覚を代替する場合には、力から代替する刺激量への変換が必要であるだけでなく、応答特性が異なる場合には、刺激の改変による特性差の補償なども検討が必要になる。

また、外力を提示するとユーザと VR システムで力のフィードバックループが形成されるため安定性にも配慮する必要があるが、疑似力覚提示デバイスではループが形成されないため、安定性による制約は生じない。したがって、適切な力覚が認知されるように、積極的に刺激を強調するなどの改変が可能と考えられる。これに対して、これまでに限定型や代替型のデバイスとして挙げた例では、主観的感覚量が同程度になる刺激を実験的に求めて換算係数を決定しているが、積極的な刺激の強調や改変には至っておらず、刺激の種類に応じた力覚レンダリングの検討が望まれる。

さらに、力覚提示においては、力そのものの提示ではなく、力覚を介した状態の認知支援を目的とする立場も取り得る。刺激の種類が異なる代替型を利用する場合など、力覚の正確さよりも干渉の発生など事象認知の確実性の向上を目的とする場合には、さらに積極的なレンダリングアルゴリズムの改変の可能性も考えられる。

4.3 侵入を阻止できないことの影響

刺激の限定や相違に加えて、疑似力覚提示デバイスは外力を提示出来ないため、デバイスをバーチャル物体内に侵入させても、それを押し戻す力が働かない。このため、ユーザが意図した以上にデバイスが物体内に深く侵入し、物体に過大な力が作用した結果、物体をはじき飛ばしてしまう場合が生じる。したがって、疑似力覚提示デバイスを用いたシステムでは、操作性確保のためにバネ係数を小さくする必要が生じる。この問題は、通常の力覚提示デバイスやテレオペレーションでも、制御の更新頻度やデバイスの剛性が低い場合などに生じるが、疑似力覚デバイスにおいて特に顕著になり、Fujita ら [56] は、疑似力覚提示デバイスでの把持操作のための力覚レンダリングの諸問題点を指摘している。

バネ係数が小さいと、物体に接触してから提示刺激が大きくなって知覚できるようになるまでに時間がかかる。このため接触の認知に遅れが生じ操作が困難になる。この問題は、Virtual coupling 法や Proxy 法等とは異なる計算が要求される点が課題となるが、接触時に起こる振動を提示することで改善することが知られている [57]。

また、物体に指が深く侵入することから、薄い物体を把持することが困難になったり、把持を解除するために指先を大きく動かすことが必要となり物体を置く操作が困難になったりする。この問題の解決例は見つからないが、バネモデルの代わりに弾塑性モデル等を使い、過大な力をモデルの変形によって逃がすことなどが考えられる。

4.4 接触力以外の力の提示における問題

接触力以外の重力、慣性力、撃力などの力は、物体の運動を物理シミュレーションする際に算出されるため、Virtual couplingやProxyを介して提示することができる。この手法は、力覚提示デバイスの速度や加速度が精度良く計測できない場合でもなめらかに慣性力が提示できるという利点を持つ。しかし、疑似力覚提示デバイスの利用を前提としたバネダンパ係数が小さい系では、伸びが大きくなり操作が難しくなる。また、間接的な接触による撃力（デバイスと接触している物体が、他の物体と接触した際に生じる撃力）は、バネダンパ係数が小さいと伝わりにくくなるため、知覚できない場合が生じる。

Minamizawaら[58]は、実物体を把持させた上で、指腹に抗力と摩擦力を提示するデバイスを装着し、把持対象とそれに接触する物体の接触、質量、慣性を提示している。その際に、デバイスの加速度を物理シミュレータ内の把持対象にセットし、プロキシではなく把持対象に加わった力を提示することで、小さなバネダンパ係数の問題を回避している。同様に、Kamuroら[59]は、ペン型の限定力覚提示デバイスの位置を物理シミュレータ内の物体にバネダンパを用いて与え、その物体に加わる力をシミュレータから取得して提示している。

これらの研究では、物体間の相対速度から接触力を計算する解析法の物理シミュレータ[60, 61]を用いているため、物体同士が侵入しても過大な力が発生しないが、ペナルティ法のシミュレータ(例えば[62])では、物体同士が重なった際に過大な力が発生するため使用できない。また、距離の拘束を保つ必要のある把持などをこの手法だけで提示することが難しい場合には、撃力や慣性力を適切に算出できるレンダリング法の開発が必要とされる。

4.5 接触力とその他の力の分離

接触力とそれ以外の力を分離して扱うことが可能であれば、接触力だけをVirtual coupling法やProxy法を用いて提示し、他の力はシミュレータから取得して直接提示することによって、小さなバネダンパ係数の撃力などへの影響を回避する方法が考えられる。

疑似力覚提示デバイスではなく外力提示が可能なデバイスを対象とした研究であるが、Hasegawaら[63]

は、把持力を計算するためのバネモデルに慣性力などの外力が加わると、指間の距離が短くなり把持の維持が難しくなることを指摘し、外力と把持力を分離して計算することを提案している。これは、Yoshikawaらの手法[64]を位置から力を計算する形式で表したとも解釈できる。Yoshikawaらの手法では指が提示デバイスに与えた力を力センサで計測し、把持対象の動力学特性に基づいて指先の加速度を求め、デバイスの運動を制御している。この手法では、力と加速度の次元で拘束しているが位置を拘束していないため、誤差により指間の距離に誤差が蓄積する。そこで指間にバネモデルを入れている。

また、Susaら[65]は、マルチレート力覚提示のために、力覚提示デバイスに直接・間接に接触している剛体群が発生する力と、剛体群に新たに別の剛体が接触した際に生じる撃力を分離して計算することを提案している。Constantinescuら[66]によって、干渉発生時の運動量変化を近似的に求めて撃力を算出する方法も提案されている。

複数ユーザによる共同作業場面においては、Sankaranarayananらのように、通常のVirtual couplingとは別のバネダンパを用いてユーザ間を接続する方法[67]や、バーチャル世界におけるユーザ間の拘束によって発生する実空間とのずれをバネダンパを介して提示する方法[68]などが、共同作業相手からの力の認知に有効と考えられる。

4.6 まとめ

疑似力覚提示に際し、力の限定や代替、過大な侵入がレンダリングにも様々な影響を及ぼすことに対して、上記のように多様なアプローチが検討されている。過大な侵入の影響に関しては、慣性力や撃力、共同作業者の力など、バーチャル世界においてユーザに様々な力が作用することから、これらを単一のバネダンパを介して提示するのではなく、適切に分離してレンダリングをおこなうことによって操作性や認知特性が向上すると予想され、今後の体系化が期待される。他方、力の限定や代替の方法による認知特性の相違に関しては、提示する刺激に依存することもあり未検討の部分が多い。提示方式に応じた、より適切なレンダリング方式の検討が必要である。

5 疑似力覚提示の今後の展開

受容器の応答特性や皮膚の力学特性、人間の力触覚認知機構などを利用した多様な疑似力覚提示装置と、疑似力覚提示装置を利用する上で生じる問題に対応するための計算方法の研究が活発になされている。本論文では、体性感覚を刺激するデバイスを対象に疑似的に力覚を提示する方法を議論したが、視覚的なカーソ

ルの速度変化に抵抗感を感じる Pseudo-Haptics[5] のように、視覚などの他の感覚や、ユーザ自身による能動的な触動作による自己受容感覚なども力覚に影響することが知られている。Tsuchiya らの VibTouch[69] は、ポインティングスティックに振動装置を搭載し、カーソルの運動速度と振動を制御することで、カーソルに作用する抗力の変化を表現した。視覚だけでなく、ポインティングスティックを利用することで、自己受容覚を介した定常的な反力が知覚される点も抗力の認知に寄与していると考えられる。Minamizawa ら [58] は、把持物体と他の物体の接触を表現する際に、実物体を把持させることによる把持反力や、ユーザに能動的に動作をさせることによる自己受容感覚や運動指令の遠心性コピーを、前出のデバイス [30] による皮膚触圧覚と併用している。Okamoto ら [70] は、運動中の手指の機械受容器への振動刺激が操作対象の物理特性の知覚に影響を与える [71] ことを利用し、皮膚を变形する代わりに、運動の加速度と速度に比例した振幅の振動刺激を提示することで、物体の慣性感や粘性感が知覚されることを示した。これらの例のように、力覚や触覚以外の視覚や聴覚、さらにユーザの能動的動作を積極的に利用することで、より力学的な作用を伴う事象の認知が促されると考えられる。

また、本論文では、対象物体や操作を限定しない力覚提示を、いかに簡易なハードウェアで実現するかを中心に研究動向を整理したが、パイプの中を球体が転がる感覚を振動により提示する Yao ら [72] の研究や、Sekiguchi ら [73] の重心位置制御による内容物の表現のように、提示する対象動作や物体を限定することによって簡易な装置による力覚提示を実現するアプローチもある。すなわち、システム設計と同時にコンテンツも具体的に想定することによって、提示物体やユーザ動作が規定され、さらに疑似力覚提示装置の応用場面が広がるものと期待される。

以上のように、疑似力覚提示は、物体と身体の間作用する「力」そのものではなく、力触覚を介して認知される「体験」を再現しようとするものであり、力学的インタラクションのバーチャル化を指向する研究ということが出来る。反力のバーチャル化によって、ユーザの動作を拘束しない多自由度の直接力覚提示が可能になれば、より多様なバーチャル空間とのインタラクションに加えて、現実世界におけるインタラクションへの力触覚の付加や変更などの応用も考えられる。すなわち、なぞり動作中に振動刺激を加えることで、凹凸感の提示を試みた Ando らの SmartFinger[74] や、歩行中に足に振動を加えることで実際と異なる歩行面を提示する Turchet ら [75] の試みのように、疑似力覚による Augmented Reality への展開も期待される。ま

た、力触覚提示の普及に向けては、小型軽量化や多自由度化だけでなく、使いやすさや、SPIDAR-mouse[76] のように低コスト化や一般ユーザへの教育の視点も必要である。

6 おわりに

本論文では、物理的刺激を用いた疑似力覚提示デバイスに関して、これまでの研究動向を整理した。本来の物理的刺激を限定あるいは代替し、感覚の限定や感覚・認知事象の模擬を行うことで、外力が働いたときと類似した力覚を疑似的に認知させる方法が多数提案された。従来の力覚提示デバイスでは実現が困難とされた、小型・軽量の非接地・直接接触・装着型の力覚提示装置が疑似力覚のアプローチによって一部実現している。ウェアラブルで拘束感の極めて少ない力覚提示装置を実現するためには、今後、提示力の多自由度化と更なる軽量化を進める必要がある。これらを両立するためには、モータなどの駆動系以外のアプローチ（神経活動の模擬や認知事象の模擬）や視聴覚の積極的利用が必要になると考えられる。本論文では、疑似力覚提示法の原理と機能の報告を主とし、紙面の都合上、その性能である提示感覚の評価については別論文の範囲とした。また、疑似力覚により生じるバーチャル空間における計算の課題は、今後、物理シミュレータとの連携下において疑似力覚を用いた多様なインタラクションを破綻なく実施するために解決していく必要がある。

ヒトの知覚という観点で本質を表現する技術が VR であるとするならば、力覚の本質を捉え、本来と同様の力覚を生成しようという疑似力覚の試みは、まさに VR 的研究といえる。今後、ウェアラブルな疑似力覚提示デバイスが進化することによって、設計、教育、訓練、エンタテインメントなどへの応用において作業の効率性や臨場感を高める手段として活用されることが期待される。本論文が VR 研究者の今後の研究の一助となれば幸いである。

謝辞

本学会力触覚の提示と計算委員会には、本論文をまとめる機会をいただいた。ここに感謝の意を表す。特に、疑似力覚について議論いただいた東北大学昆陽雅司先生、慶應義塾大学南澤孝太先生、東京大学篠田裕之先生、NTT コミュニケーション科学基礎研究所雨宮智浩氏に深謝する。また、示唆に富む有益なコメントを多数いただいた査読者各位に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- [1] 舘, 佐藤, 廣瀬 (監), 日本バーチャルリアリティ学会 (編): バーチャルリアリティ学, コロナ社, 2011.
- [2] H. Iwata: Artificial Reality with Force-feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator, ACM Computer Graphics, Vol. 24, No. 4, pp.165-170, 1990.
- [3] 佐藤, 平田, 河原田: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J74-D2, No. 7, pp. 887-894, 1991.
- [4] Wii remote, www.nintendo.co.jp/wii/controllers/, (accessed 2011)
- [5] A. Lecuyer: Simulating Haptic Feedback Using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback, MIT Presence, Vol. 18, No. 1, pp. 39-53, 2009.
- [6] K. O. Johnson: The Roles and Functions of Cutaneous Mechanoreceptors, Current Opinion in Neurobiology, Vol. 11, pp. 455-461, 2001.
- [7] M. A. Srinivasan and K. Dandekar: An Investigation of The Mechanics of Tactile Sense Using Two-dimensional Models of The Primate Fingertip. J Biomech Eng, Vol. 118, No. 1, pp. 48-55, 1996.
- [8] W. H. Talbot, I. Darian-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, J. Neurophysiol., Vol. 31, pp. 301-334, 1967.
- [9] A. M. Freeman and K. O. Johnson: A Model Accounting for Effects of Vibratory Amplitude on Responses of Cutaneous Mechanoreceptors in Macaque Monkey, J Physiol, Vol. 323, pp. 43-64, 1982.
- [10] M. C. Brown, I. Engberg and P. B. C. Matthews: The Relative Sensitivity to Vibration of Muscle Receptors of The Cat, J Physiol, Vol.192, pp. 773-800, 1967.
- [11] 藤田: 電気刺激による筋収縮を利用した力覚提示法の検討, 第 11 回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp. 329-334, 1995.
- [12] V. Occelli, C. Spence, M. Zampini: Audiotactile interactions in temporal perception, Psychonomic Bulletin & Review, 2011.
- [13] 大山, 今井, 和気 (編): 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, 1994.
- [14] S. J. Lederman and R. K. Klatzky: Hand movements: A window into haptic object recognition, Cognitive Psychology, Vol. 19, No. 3, pp. 342-368, 1987.
- [15] G. Robles-De-La-Torre, V. Hayward: Force Can Overcome Object Geometry In the perception of Shape Through Active Touch, Nature, Vol. 412, pp. 445-844, 2001.
- [16] T. H. Massie, J. K. Salisbury: The PHANTOM haptic interface: a device for probing virtual objects, Proc. ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol.55-1, pp. 295-301, 1994.
- [17] 金, 長谷川, 小池, 佐藤: 7 自由度力覚ディスプレイ SPIDAR-G の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 3, pp.403-412, 2002.
- [18] Y. Sekiguchi, K. Hirota, M. Hirose: The Design and Implementation of Ubiquitous Haptic Device, Proc. World Haptics 2005, pp. 527-528, 2005.
- [19] 広田, 宇佐見: エネルギー蓄積型力覚提示装置, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol. 16., No. HDC-03, pp. 37-40, 2009.
- [20] H. Yano, M. Yoshie, H. Iwata: Development of a Non-grounded Haptic Interface Using the Gyro Effect, Proc. 11th Symp. haptic interfaces for Virtual environment and Teleoperator Systems, pp. 32-39, 2003.
- [21] 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.
- [22] 笈, 矢野, 齊藤, 小木, 廣瀬: 没入型仮想空間における力覚呈示デバイス Haptic GEAR 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.
- [23] 岩田, 中川: 着用型力覚帰還ジョイスティック, Human Interface N&R, Vol. 13, No. 2, pp.135-185, 1998.
- [24] CyberGrasp™ and CyberForce™, Immersion Corp., www.immersion.com, (accessed 2011)
- [25] 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, ヒューマンインタフェースシンポジウム, pp. 55-58, 1991.
- [26] 川崎, 堀, 毛利: 対向型多指ハプティックインターフェイス; 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 4, pp. 449-456, 2005.
- [27] 横小路, 佐藤, 木倉, 吉川: 多指遭遇型ハプティックデバイスの設計と動作計画, 日本バーチャルリアリティ学会 9 回大会論文集, pp. 1342-4564, 2004.
- [28] 中河原, 梶本, 川淵, 川上, 舘: テレグジスタンスの研究 (第 41 報) 遭遇型多指マスタハンドを用いた指のマスタスレーブ制御, 日本バーチャルリアリティ学会 8 回大会論文集, pp. 469-470, 2003.
- [29] 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. 95-102, 2007.
- [30] 南澤, 深町, 梶本, 川上, 舘: 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.
- [31] 青木, 三武, 長谷川, 佐藤: ワイヤによる皮膚感覚刺激を用いた指先装着型接触感提示デバイス, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 3, pp. 421-428, 2009.
- [32] R. Sheibe, M. Moehring, B. Froehlich: Tactile Feedback at the Finger Tips for Improved Direct Interaction in Immersive Environments, IEEE Symposium on 3D User Interfaces, pp. 293-294, 2007.
- [33] B. T. Gleeson, W. R. Provancher: Design of a Fingertip-Mounted Tactile Display with Tangential Skin Displacement Feedback, IEEE Transactions on Haptics, pp. 297-301, 2010.
- [34] R. J. Webster, III, T. E. Murphy, L. N. Verner, A. M. Okamura: A Novel Two-dimensional Tactile Slip Display: Design, Kinematics and Perceptual Experiments. ACM Trans. Appl. Percept. Vol. 2, pp. 150-165, 2005.
- [35] V. Hayward: Display of Haptic Shape at Different Scales, Eurohaptics 2004, pp. 20-27, 2004.
- [36] 牧野, 篠田: 吸引圧刺激による触覚生成法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 123-132, 2006.
- [37] 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.
- [38] K. A. Kaczmarek, J. G. Webster, P. B.y-Rita, W. J. Tompkins: Electrotactile and Vibrotactile Displays for Sensory Substitution Systems, IEEE

- 'Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 38, No. 1, pp. 1-16, 1991.
- [39] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, and T. M. Jessell: Principles of Neural Science, 4th edition, McGraw-Hill Medical, 2000.
- [40] 梶本, 川上, 前田, 館: 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ, 電子情報通信学会誌, Vol. J84-D-II, No. 1, pp. 120-128, 2001.
- [41] H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi, M. Inami: SmartTouch: Electric Skin to Touch the Untouchable; IEEE Trans. Computer Graphics and Applications, Vol. 24, No. 1, pp.36-43, 2004.
- [42] K. Sato, and S. Tachi: Design of Electrotactile Stimulation to Represent Distribution of Force Vectors, IEEE Haptics Symposium 2010, pp. 121-128, 2010.
- [43] 雨宮, 安藤, 前田: 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, 日本バーチャルリアリティ学会, Vol. 21, No. 1, pp. 47-58, 2006.
- [44] T. Amemiya, T. Maeda: Asymmetric Oscillation Distorts the Perceived Heaviness of Handheld Objects, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 1, No. 1, pp. 9-18, 2008.
- [45] 上田, 内田, 野澤, 井出: 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.
- [46] 大丘, 藤田: 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すべりの代替提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 2, pp. 263-272, 2010.
- [47] 内川 (編): 聴覚・触覚・前庭感覚, 朝倉書店, 2008.
- [48] M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto, Satoshi Tadokoro: Alternative Display of Friction Represented by Tactile Stimulation without Tangential Force, Haptics: Perception, Devices and Scenarios, Lecture Notes in Computer Science, Volume 5024/2008, pp. 619-629, 2008.
- [49] CyberTouch™, Immersion Corp., www.immersion.com, (accessed 2011)
- [50] K. Salisbury, D. Brock, T. Massie, N. Swarup, C. Zilles: Haptic rendering: programming touch interaction with virtual objects, Proc. of the 1995 symposium on Interactive 3D graphics, pp. 123-130, 1995.
- [51] J. E. Colgate, M. C. Stanley, J. M. Brown: Issues in the Haptic Display of Tool Use, Proc. of the IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vol. 3, pp. 140-145, 1995.
- [52] C. Zilles, K. Salisbury: A Constraint-Based God Object Method for Haptic Display, IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 146-151, 1995.
- [53] D.C. Ruspini, K. Kolarov, and O. Khatib: The Haptic Display of Complex Graphical Environments, Proc. ACM SIGGRAPH '97, 1997.
- [54] M. Ortega, S. Redon, S. Coquillart: A Six Degree-of-Freedom God-Object Method for Haptic Display of Rigid Bodies with Surface Properties, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 13, No. 3, pp. 458-469, 2007.
- [55] 菊植, 藤本: 幾何学的力覚提示アルゴリズムの力学的解釈とインピーダンス型およびアドミッタンス型の実装法, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 2, pp. 142-151, 2007.
- [56] 藤田, 鎌田, 鈴木: 疑似力覚提示装置とVCの組み合わせにおける問題点の検討, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol. 1, No. HDC05, pp. 31-34, 2010.
- [57] D. A. Kontarinis, R.D. Howe: Tactile Display of Vibratory Information in Teleoperation and Virtual Environments, Presence, 1996, Vol. 4, pp. 387-402, 1996.
- [58] K. Minamizawa, H. Kajimoto, N. and S. Tachi: Wearable Haptic Display to Present Gravity Sensation - Preliminary Observations and Device Design, Proc. World Haptics 2007, pp. 133-138, 2007.
- [59] 家室, 南澤, 新居, 川上, 館: ポータブルペン型力覚ディスプレイを用いたバーチャル物体との触覚インタラクション, 日本バーチャルリアリティ学会 第14回大会, 1A2-4, 2009.
- [60] R.Smith, Open Dynamics Engine, http://www.ode.org/, (accessed 2011).
- [61] Nvidia Corporation: PhysX.
- [62] Shoichi Hasegawa, Makoto Sato:Real-time Rigid Body Simulation for Haptic Interactions Based on Contact Volume of Polygonal Objects, Computer Graphics Forum, Vol. 23, No. 3, pp. 529-538, 2004.
- [63] 長谷川, 小池, 佐藤: フォースディスプレイを用いた剛物体操作のための物体形状と外力の提示方法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 3, pp. 323-328, 2002.
- [64] 吉川, 横小路, 松本, 鄭: 動特性を考慮した仮想物体操作感の実現, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 8, pp. 132-139, 1993.
- [65] 須佐, 大内, 岩下, 佐藤, 長谷川: 局所的な高速物理シミュレーションによる高解像度力覚提示の実現, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 4, pp. 463-471, 2009.
- [66] D. Constantinescu, S. E. Salcudean, E. A. Croft: Haptic Rendering of Rigid Contacts using Impulsive and Penalty Forces; IEEE Trans. Robotics, 21(3), 309-323, 2005.
- [67] G. Sankaranarayanan, B. Hannaford; Virtual coupling schemes for position coherency in networked haptic environments, Proc. IEEE RAS-EMBS BioRob., 853-858, 2006.
- [68] 鎌田, 藤田: 共同仮想物体操作のための遠隔作業者間の手の拘束の表現, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol. 16, No. HDC01, pp.7-10, 2011.
- [69] S. Tsuchiya, M. Konyo, H. Yamada, T. Yamauchi, S. Okamoto and S. Tadokoro: Vib-Touch: Virtual Active Touch Interface for Handheld Devices, Proc. IEEE RO-MAN'09, pp.12-17, 2009.
- [70] 岡本, 昆陽, 田所: 指腹への振動触刺激による力覚の誘発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 講演論文集, 1A1-D08, 2010.
- [71] S. Okamoto, M. Konyo, S. Saga, S. Tadokoro: Detectability and Perceptual Consequences of Delayed Feedback in a Vibrotactile Texture Display, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 2, No. 2, pp. 73-84, 2009.
- [72] H. Yao, V. Hayward: An Experiment on Length Perception with a Virtual Rolling Stone, Proc. Eurohaptics 2006, pp. 325-330, 2006.
- [73] 関口, 広田: 重心移動型力覚デバイスによる内容物再現の研究, 日本バーチャルリアリティ学会第12回大会, 2007.
- [74] H. Ando, T. Miki, M. Inami and T. Maeda: SmartFinger: nail-mounted tactile display, ACM SIGGRAPH 2002 conference abstracts and applications, p. 78, 2002.
- [75] L. Turchet, R. Norddahl, S. Serafin, A. Berrezag, S.D imitrov and V. Hayward: Audio-haptic physically-based simulation of walking on differ-

ent grounds, IEEE Int. Workshop on Multimedia Signal Processing, pp. 269-273, 2010.

- [76] 佐藤, 一色, 林, 赤羽: Open Source Interface, Spidar-mouse について, 2009 年度 HCG シンポジウム (電子情報通信学会), No. HCG2009-C6-2, 2009.

(2011 年 3 月 7 日)

[著者紹介]

黒田 嘉宏 (正会員)



2000 年京都大学総合人間学部卒. 2005 年京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了. 同年京都大学大学院医学研究科特任助手. 2006 年大阪大学大学院基礎工学研究科助教. 現在に至る. 力触覚の提示と計算研究委員会幹事. 医用 VR, 触覚情報処理, 教育訓練システムに関する研究に従事. 博士 (情報学).

仲谷 正史 (正会員)



2008 年東京大学大学院情報理工学専攻博士課程修了. 2008 年資生堂リサーチセンター入社, 現在に至る. 力触覚の提示と計算研究委員会幹事. 触覚メカニズム・触覚ディスプレイの研究や, TECHTILE 展を通じた触覚デザインの普及に従事. 博士 (情報理工学).

長谷川 晶一 (正会員)



1997 年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業, 1999 年同大学大学院知能システム科学専攻修士修了, 同年ソニー株式会社入社, 2000 年東京工業大学精密工学研究所助手, 2007 年電気通信大学知能機械工学科准教授, 2010 年東京工業大学精密工学研究所准教授, 現在に至る. 力触覚の提示と計算研究委員会幹事. バーチャルリアリティ, 力覚インタフェース, ヒューマンインタフェースの研究に従事. 博士 (工学).

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. 力触覚の提示と計算研究委員会委員長. 力触覚の提示と遠隔共同作業, 共有仮想空間コミュニケーション, 人の状況推定などの研究に従事. 工学博士.