

# 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

南澤 孝太<sup>\*1</sup> 深町 聡一郎<sup>\*1</sup> 梶本 裕之<sup>\*2</sup> 川上 直樹<sup>\*1</sup> 舘 暲<sup>\*1</sup>

Wearable Haptic Display to Present Mass and Internal Dynamics of Virtual Objects

Kouta Minamizawa<sup>\*1</sup>, Souichiro Fukamachi<sup>\*1</sup>, Hiroyuki Kajimoto<sup>\*2</sup>, Naoki Kawakami<sup>\*1</sup> and Susumu Tachi<sup>\*1</sup>

**Abstract** - We propose a wearable haptic display to present the sensation of weight and inertial force of virtual objects, which is based on our novel insight that the deformation on fingerpads makes a reliable sensation of weight even when the proprioceptive sensations on wrist and arm are absent. The goal of this project is to meet the increasing demand for realistic haptic feedback with a simple haptic display that delivers realistic existence of virtual objects in entertainment, augmented reality or telexistence systems.

**Keywords** : Haptic display, Wearable interface, Human-computer interaction, Augmented reality

## 1 はじめに

近年、家庭用エンターテインメントシステムのコントローラ等、触覚フィードバック機能を持ったユーザインタフェースが日常生活にも普及しつつある。しかしこれらのデバイスが提示する触覚は現状では振動感覚に留まっており、今後ホームユースのユーザインタフェースにおいて、よりリアルな存在感を伴って人とバーチャルリアリティ環境とを繋ぐために、小型・安価な機構による効果的な触力覚情報の伝達手法が求められている。一方、従来の触力覚情報提示デバイスの研究において物体の形状を伝達するものは多く提案されているものの、物体の存在感において重要な役割を担う質量やダイナミクスを伝えるものは数少ない。そこで我々はバーチャルな物体の存在感を伝達することを目的として、物体の質量の感覚を提示可能な指先装着型触力覚ディスプレイ(図1)の実現を目指す。

### 1.1 従来の把持感覚を提示する触力覚ディスプレイ

人間は周囲に存在する物体の特性を知るために、手を用いて対象物体をつかみ、その材質や形状を知覚する。この物体把持感覚をバーチャルな環境とのインタラクションに用いるため、様々な触力覚ディスプレイが研究されている[1]。PHANToM[2]やSPIDAR[3]のような接地型の力覚



Real world

Virtual world

図1 提案する触力覚ディスプレイの概念図  
実世界(左図)においてデバイスを装着し空のグラスを持つことで、中にバーチャルな液体(右図)が入っているような感覚が提示される様子

Fig. 1: Conceptual drawing of our proposed device. By wearing our proposed devices, the user can feel the weight of virtual liquid in the empty glass.

ディスプレイでは、地面を支点としてモータやワイヤによって手との接触点であるペンやボールが駆動されるため、手に対する力を正確に再現可能である。しかしながら地面への固定が必要であるため、ポータブル、ウェアラブルにするのが困難である。一方、CyberGrasp[4]やNakagawaraら[5]による外骨格遭遇型マスタハンドなど、五指に独立な触力覚を提示する装置も開発されている。これらは指先に把持力を提示することは可能であるものの、物体の重さや手全体が引っ張られるような状況は再現することができない。このような感覚を提示するためには腕全体の固有受容感覚を刺激するために接地型のアームを併用する必要がある。しかしアームによる固有受容感覚の提示を行う際、力の提示点のアームと腕との接触点となるため、把持対象からの力としてではなく、別個の外力として感じられてしまう。またこれらのデバ

\*1 東京大学大学院 情報理工学系研究科

\*2 電気通信大学 人間コミュニケーション学科

\*1 Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

\*2 Department of Human Communication, The University of Electro-Communications

イスは正確な把持感覚の提示を目指せば目指すほど、個人差に対して脆弱になる・装置が複雑でメンテナンス性が低くなる等の問題が生じるため、日常生活への普及を目標とする場合には異なるアプローチが必要になると考えられる。

そこで近年、人間の触知覚特性を活用し、実際の現象とは物理的には異なる力覚提示に対して錯覚を生じさせることで、非接地のデバイスで存在感の高い力覚を提示する手法が提案されている。雨宮ら[6]は急峻な加速度と知覚閾値以下の緩やかな加速度を交互に組み合わせ、急峻な加速度のみを知覚させることで一方向に引っ張られる力を知覚させる牽引力提示装置を提案した。Yaoら[7]は、実際に筒の中を球状物体が転がる際の振動と衝突を記録し、振動子によって再生する手法によって空の筒の中を球が転がっているような錯覚を生じさせることを提案し実証を行った。また稲葉ら[8]は指先の圧縮を行うことで物体との接触感覚や擬似的な把持力を知覚させ、簡単な機構によって操作者にバーチャルな物体の大きさを認識させることに成功している。このように、現実の物理現象を再現するために大規模で複雑なシステムを構築せずとも、人間の知覚レベルにおいては現実の物理現象と本質的に同等の触力覚を提示することができるということが明らかになりつつある。

## 1.2 触運動知覚における「重さ」

Jonesら[9]による触運動知覚の分類によると、把持動作においては、大きく分けて、対象物体の形状・大きさ・重さ・硬さ・温度が知覚される。これらの感覚は、腕や手の姿勢の感覚、物体を支えるための手指の筋収縮活動により生じる固有受容感覚、物体が手指の皮膚を变形させることにより生じる皮膚感覚の統合によって知覚される。把持動作の制御はこれらの感覚に基づいて行われる。ここで、重さの感覚は腕・手首・指の末節における固有受容感覚と指腹部における皮膚感覚の統合によって知覚されていると考えられる。しかし従来、重さの感覚は固有受容感覚が主であり、その提示のためには地面を支点とした力覚提示が必要であると考えられてきた。しかし物体がすべり落ちそうになったときや荷重に急な変化が生じた時の把持力の強さの制御においては、指の深部受容器は関節位置の変化が生じないような物体の滑りや荷重の急な変化には反応できないため、皮膚感覚が優先的に用いられていることがJohanssonら[10]によって示されている。そこで我々は、固有受容感覚を刺激せずとも皮膚感覚の刺激のみで重さ感覚を伝達することが可能であるという仮説を提案する。本論文では、本仮説に基づいた装置を試作し提示される触力覚情報の有用

性を検証することで、非接地型装置による指先への皮膚感覚提示のみで重さ感覚が知覚可能であることを示し、指先皮膚感覚への触力覚提示による装着型触力覚ディスプレイを実現する。

## 2 手法の提案と検証

### 2.1 静的な把持における指先の皮膚感覚

固有受容感覚を刺激せずとも、皮膚感覚の刺激のみで重さの感覚を伝達することが可能であるという我々の提案仮説を検証するため、物体把持時に知覚される皮膚感覚の有効性と、皮膚感覚による重さ感覚の再現に関する検証を行う。まず最も基本的な把持状態として、物体を横からつまみ、姿勢を変化させないで物体を保持する状況を想定する。この静的な把持状態における重さの感覚を重量感覚と呼ぶ。指先と物体との境界面で発生する力を考えると、図2のように、大きく垂直力とせん断力に分類できる。このとき示指と拇指における垂直力( $F_v$ )の和は把持力と等しく、せん断力( $F_s$ )の和は対象物体の重量(質量×重力加速度)に等しい。本手法では、指腹部に生じる垂直力及びせん断力に基づく皮膚感覚を再現することで、固有受容感覚を介在せずに重量感覚を提示することを試みる。

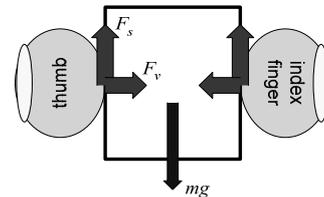


図2 物体把持時の指先の垂直力とせん断力

Fig. 2: Vertical force ( $F_v$ ) and shearing force ( $F_s$ ) between finger and object in grasping.

### 2.2 指先の皮膚感覚による重量弁別閾の測定

まず指先の皮膚感覚により重量弁別が可能であることを示すため、実物体を把持した際の重量感覚の弁別閾を、固有受容感覚及び皮膚感覚の双方が知覚される場合と、固有受容感覚が介在せず皮膚感覚のみが知覚される場合において比較した。前者において知覚させる固有受容感覚は手首部と指部のものに限定し、肘関節や肩関節における固有受容感覚は除外する。固有受容感覚を知覚させた状態での実験においては、被験者は前腕部をアームレストに固定されるが、手首や腕は自由に動く状態とする。このとき物体を把持すると、手首部と指部において固有受容感覚が生じる。また固有受容感覚を除外した状態での実験においては、図3のように、被験者の前腕と手首、さらに指の動きをも固定し、被験者は指先で物体をつまむ。こ

のとき手首と指部においても固有受容感覚が抑制され、被験者は指先の皮膚感覚のみによって物体の重さを判別することとなる。

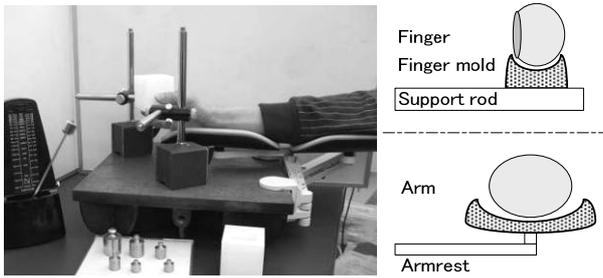


図3 皮膚感覚による重量弁別閾測定の実験装置

Fig. 3: Experimental setup for with-proprioception sessions.

本実験は恒常法に基づいて行われた。被験者は目隠しをした状態で、まず標準刺激として50g, 100g, 200gのいずれかの質量の物体を2秒間把持する。次に約5秒間の間隔をおき、比較刺激としてランダムに設定された質量の物体を2秒間把持する。その後被験者に、比較刺激が標準刺激に比べて「重い」「同じ重さ」「軽い」のいずれかを三件法で回答させた。これを1回の試行とし、各試行間には5秒以上の間隔をおいた。3種類の標準刺激に対して20回ずつ計60回の試行を1セッションとし、各セッション間には5分以上の休憩をおいた。20歳代の4名の被験者に対して、固有受容感覚の有・無それぞれの状況下において2セッションずつ計4セッションの実験を行った。50g, 100g, 200gそれぞれの標準刺激の試行において「重い」という回答を得た確率および正規累積分布関数によるS字カーブフィッティングの結果を図4に示す。この結果における弁別確率75%の元での弁別閾（75% DL）を主観的等価質量（PSE）と75%の正答率を示す質量との差として定義し、表1にまとめた。この結果より、皮膚感覚のみによる重量弁別能力は、固有受容感覚と皮膚感覚を併せた場合に比べて3分の2程度の解像度ではあるものの、重量弁別が十分に可能であることが分かる。すなわち、固有受容感覚を伴わない場合でも十分な重量弁別が可能であることが示された。なお腕が自由な状態で実物体を持つときの重量弁別閾は標準重量に対して8%程度である[11]ことが知られている。本結果では皮膚感覚のみが知覚される状態でも標準重量に対して20%以内の弁別閾を持つことが示され、本手法による感覚提示の解像度は実用上妥当な範囲にあるといえる。また、300gの標準刺激による試行も試みたが、指先のみで物体を把持すると被験者の疲労が大きく、測定を行うことができなかった。本手法による知覚できる重量の上限は200g程度であると考えられる。

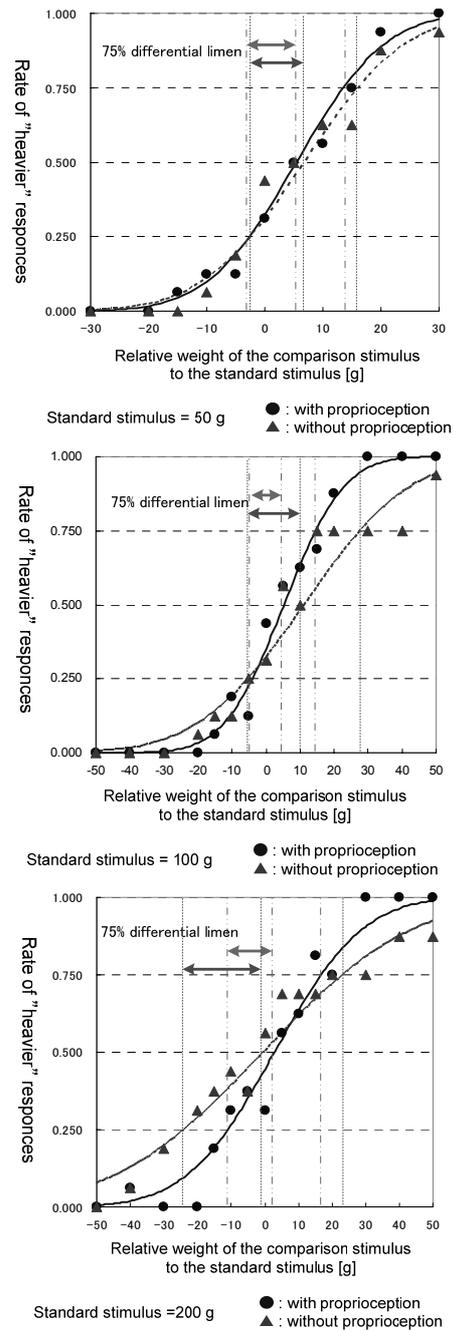


図4 各標準刺激における重量弁別結果

Fig. 4: Average rate of "heavier" responses for each standard stimulus in with- proprioception and without-proprioception sessions. The dashed and the dotted lines indicate the PSE and the 75 % correct lines.

表1 各標準刺激における75%弁別閾

Table 1: 75% difference limen for three kind of standard stimulus with / without the proprioceptive sensation on wrist and fingers.

standard stimulus	75 % DL with prop.	75 % DL without prop.
50 gf	16.2 % (8.1 g)	18.6 % (9.3 g)
100 gf	9.3 % (9.3 g)	16.5% (16.5 g)
200 gf	7.0 % (13.9 g)	11.8% (23.6 g)

### 3 デバイスの設計と検証

#### 3.1 触覚提示機構の設計

物体把持時の指先の垂直力とせん断力を再現する機構として、我々は図5のように2つのモータとベルトを用いる機構を提案する。本機構においては、2つのモータを逆位相の回転で駆動することでベルトが両側から巻き取られ、指腹部を垂直に圧縮する力が発生する。一方、2つのモータを同位相の回転で駆動すると、ベルトが指腹部に対して接線方向に移動する（図5の場合はモータの右回りの回転によりベルトが左向きに移動する）ため、指腹との摩擦によってせん断力が発生する。この2つの駆動方法を組み合わせることで、垂直力とせん断力を独立に制御し、指腹部に対する斜め方向の力を提示することが可能となる。

我々は本提案機構に基づき図6のようにデバイスを設計した[12]。実際に作成したプロトタイプデバイスを図7に示す。本デバイスは2つのDCモータ（Maxon Motor Corp. RE 10, 1.5W, gear ratio = 16:1）、3次元プリンタ（Stratasy社 Dimension BST 768）によって成形されたABS樹脂のボディ、真鍮のシャフト、ナイロンのベルトによって構成される。モータのカタログスペックから導出される最大出力による指腹部へ垂直力は一指あたり16.1Nである。ボディはモータ支持部と指支持部から成り、指支持部はせん断力提示の際に付随して発生する締付けを抑制するため、指の横側に突き出すような形状とした。また指背部に生じる不要な圧迫感を軽減するため、デバイスと指背部の間に低反発ウレタンフォームを配置した。指支持部のサイズ(図6におけるL1及びL2)は動作中に指が移動しないよう、ユーザの指の大きさに合わせる必要がある。本プロトタイプでは、  
S (L1=10mm,L2=15mm),M(L1=10mm,L2=18mm)  
L(L1=15mm,L2=21mm),LL(L1=18mm,L2=24mm)  
の4サイズを用意した。例えば筆者の場合、示指（末節の幅12mm, 厚さ15mm）ではMサイズを、拇指（末節の幅15mm, 厚さ15mm）ではLサイズを使用することとなる。

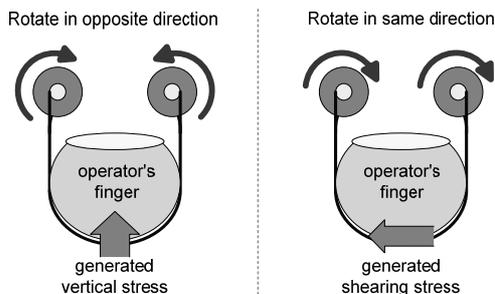


図5 垂直力とせん断力を提示する提案手法  
Fig. 5: Our proposed method for generating vertical force and shearing force.

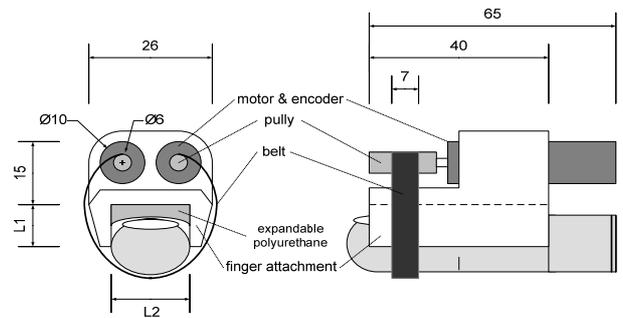


図6 提案するデバイスの構成図 (寸法単位: mm)  
Fig. 6: Design drawing of the prototype device.

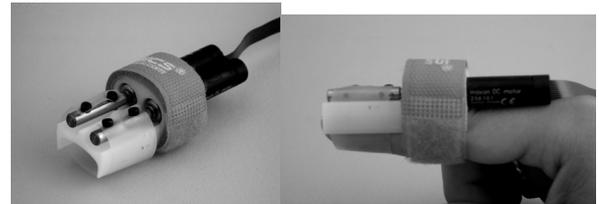


図7 作成したプロトタイプデバイス  
Fig. 7: Implemented prototype device.

#### 3.2 提案デバイスの制御手法と応答性

本手法に於いては指先にかかる力を再現することが目的であるため、本デバイスではモータの電流入力と出力トルクの線形性を仮定し、モータの電流値を制御する手法を採用した。ユーザがデバイスを装着すると、まず小さなトルクを出力して左右のモータでベルトを巻き取り、ベルトが指腹部に軽く接した状態とする。これを原点として、エンコーダの値からモータによるベルトの巻き取り・押し出し量を計測し、力ベクトルの方向を制御すると共に、安全のため過度の巻き取りや押し出しが発生すると出力を停止するようにシステムを構築した。本機構ではモータによってベルトを巻き取るため、巻き取りの所要時間に起因する触力覚提示の時間遅れが生じる。本手法においてデバイスの応答速度は提示できる物体の硬さに影響し、応答が遅いと軟らかい物体を把持しているかのように感じられてしまう。そこで入力指令値に対するデバイスの時間応答を検証するため1Nの垂直力提示におけるステップ指令応答を測定（図8）したところ、約67msであった。

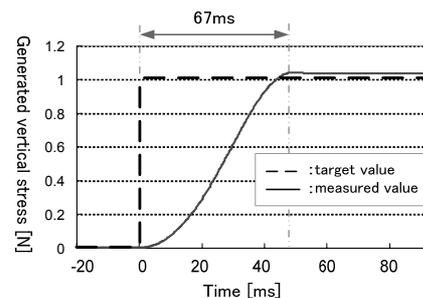


図8 1[N]のステップ指令に対する提示力の応答  
Fig. 8: Response of displayed vertical stress to a step signal.

### 3.3 提案デバイスによる重量感覚の提示

試作したプロトタイプデバイスを用いて提示できる重量感覚の有効性を検証するため、物体を静止状態で把持する状況を想定し、図10に示す複数の把持姿勢においてプロトタイプデバイスにより提示されるせん断力および垂直力と知覚される重量感覚の関係性を測定した。本実験は極限法に従い、被験者は20代3名であった。まず被験者の右前腕および左前腕をそれぞれアームレストに固定し、右手の示指と拇指にプロトタイプデバイスを装着した。標準刺激として既知の重量の立方体（1辺5cm, 50g, 100g, 200g）を左手に把持し、比較刺激として図9のように同じ形状のABS樹脂製の軽量の立方体（1辺5cm, 30g）を右手に把持しながらデバイスによる重量感覚提示を行った。そして比較刺激における提示力を段階的に増加あるいは減少させながら標準刺激と比較刺激を把持させ、被験者は比較刺激が標準刺激と比べて「重い」「等しい」「軽い」のいずれかを回答した。

図11には、被験者ごとに、全ての姿勢における主観的等価点を平均した結果を、図12には、各把持姿勢における主観的等価点を全ての被験者に亘って平均した結果を示す。それぞれの直線は最小二乗近似直線を示す。近似曲線のx切片は30g付近にあることが見て取れるが、これは右手で把持していた立方体自体の重量によるものである。これらの結果より、本手法におけるデバイスの出力に対する知覚重量において個人差や姿勢ごとの差は比較的小さいことが確認できた。理想的には、本手法で提示する力ベクトルは実物体から加わる力ベクトルに等しいため、人が日常の経験の中で姿勢ごとの重さ知覚の誤差を補正ながら認識しているとすれば、本手法においても個人差や姿勢による差は生じない。本結果における誤差は、主にデバイスの指への固定状態の変動、ベルトの伸縮、モータの内部摩擦によるものと考えられる。



図9 軽量な立方体を把持した状態でプロトタイプデバイスにより重量感覚を提示する様子  
Fig. 9: Displaying additional weight on a light-weight cube with the prototype devices.

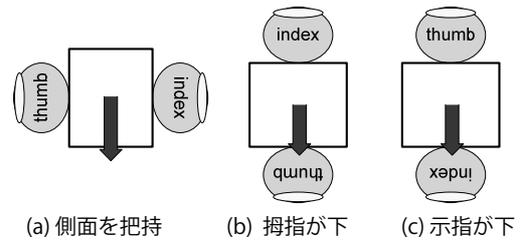


図10 本実験で設定した3つの把持姿勢  
Fig. 10: Three grasping postures in the experiment.

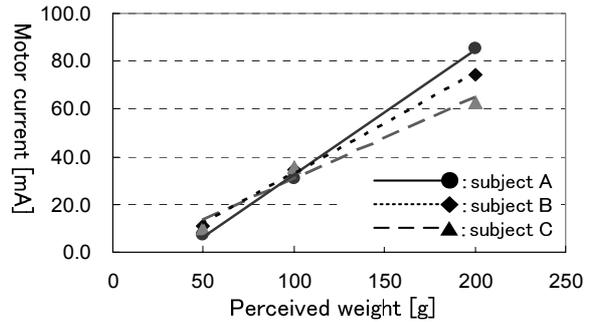


図11 各被験者におけるモータ出力値と知覚重量  
Fig. 11: Perceived virtual weight in three subjects.

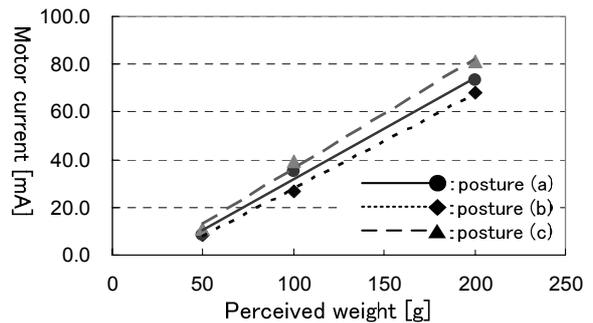


図12 各把持姿勢におけるモータ出力値と知覚重量  
Fig. 12: Perceived virtual weight in three grasping postures.

## 4 質量感覚の提示

### 4.1 重量感覚から質量感覚への拡張

第2章では、物体を把持したまま動かない状態を仮定し、重力加速度と物体質量の積としての物体重量を提示することを検討してきた。しかしながら実際に人が行う把持動作はこの限りではなく、物体を持ち上げる、振る、回転させるといった操作が行われる。このような運動を伴う把持動作において指腹部に発生する力は重力質量に起因するものだけではなく、物体の加速度に起因する慣性力(図13)が加わる。この慣性力を同時に提示することで、物体に対する能動的な動作へのインタラクションが実現され、単なる静的な重量感覚 (weight sensation) ではなく、慣性質量も加わった、物体の質量感覚 (mass sensation) と呼べる感覚をバーチャルに提示できると考えられる。さ

らに動的に物体を動かす把持動作においては静的な把持に比べて重さの弁別能力が向上することが知られている[10]ことから、本提案手法においても運動加速度による慣性質量提示を加えることで質量弁別能力が向上し、より鋭敏な感覚を提示できることが期待される。ここで、提示するバーチャルな物体の質量を  $m$ 、重力加速度を  $g$ 、ユーザの把持動作に伴う物体の運動加速度を  $\alpha_z$  とすると、

$$\text{重力加速度による重量: } F_g = mg$$

$$\text{慣性力による慣性質量: } F_a = m\alpha_z$$

であり、拇指と示指に加わる力として、これらを合わせた力ベクトルを提示すればよい。本デバイスでは指腹部に対して2自由度の力提示を行うため、3次元の動きにおける力変化を完全に再現することはできないが、図13の各運動成分を組み合わせた様々な動きに対応することができる。

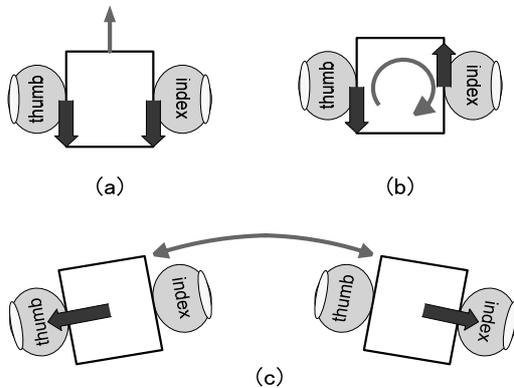


図13 上下(a)、回転(b)、左右(c)への運動を伴う把持において提示すべき慣性質量成分  
Fig. 13: Change in the force directions in grasping during motion.

#### 4.2 質量感覚提示における質量弁別閾の測定

本実験では静的把持における重量感覚提示と能動的把持における質量感覚提示を、ユーザの質量弁別能力という観点から比較する。能動的把持における質量感覚提示を実現するため、把持する軽量の立方体に3軸加速度センサ（浅草ギ研，3軸加速度センサーVer1）を取り付け、3.3節の結果における平均的な最小二乗直線に基づいて加速度に応じた力を提示するようにデバイスを駆動するシステムを構築した。本実験では被験者の腕は固定せず、3.3節の実験と同様のABS樹脂製の立方体（1辺5cm, 30g）を持った状態で、図13のような動作を自由に行わせた。本実験は恒常法に基づいて以下のように行われた。まず、腕を拘束しない状態で、200g相当の質量感覚提示を標準刺激として提示した。その後、比較刺激として100~300gの範囲におけるランダムな質量の感覚提示を行った。どちらの提示も10秒間程度行われ、その間、被験者は腕を自由に動かし、提示質量を認識し

た。そして被験者は三件法に基づき、比較刺激が標準刺激に対して「重い」「等しい」「軽い」のいずれかを回答した。

各比較刺激に対して、被験者が「重い」と回答した確率および正規累積分布関数によるS字カーブフィッティングの結果を図14に示す。この結果、200gの標準刺激に対して、静的把持における重量感覚提示では75%弁別閾が29.8g(14.9%)だったものが、能動的把持における質量感覚提示では9.9g(5.0%)となり、たしかに質量感覚提示によって重さの弁別解像度がより高くなったことが示された。

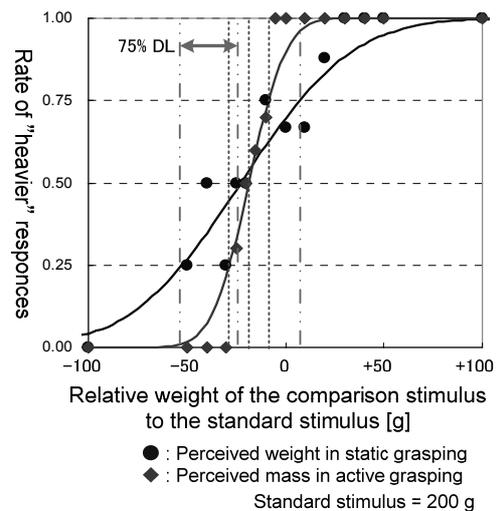


図14 静的把持での重量感覚提示と能動的把持状態での質量感覚提示における弁別閾の比較  
Fig. 14: Average rate of "heavier" responses for 200-g standard stimulus in the static grasping and the active grasping. The dashed and the dotted lines indicate the PSE and the 75 % correct lines.

### 5 内部ダイナミクスの提示

#### 5.1 把持物体の内部ダイナミクス

ここまで、把持対象を単一の剛体と仮定してきたが、現実環境下においては、例えばコップの中に液体が入っている状態、箱の中に複数の物が入っている状態など、直接把持する物体の中に別の物体が内包されている状態が生じうる。このような場合、把持した物体を操作すると内包された物体には、把持物体を通じて間接的に力が加わり、単一の物体とは時空間的に異なる力が操作者に返される。この内包された物体による力を本論文では内部ダイナミクスと呼ぶ。我々は内部ダイナミクスを提示するため、バーチャルな物体をモデル化し、操作者の動作に応じて指先に生じるべき力を物理シミュレーションによってリアルタイムに導出し、提示する触力覚を制御する手法を試みた。図15に内部ダイナミクスを提示するシステムの構成を示す。

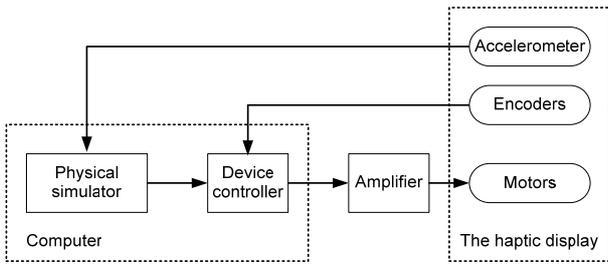


図15 内部ダイナミクス提示におけるシステム構成  
Fig. 15: System structure on presenting the internal dynamics.

### 5.2 内部ダイナミクス提示における質量弁別

本実験では、物理シミュレータとしてODE: Open Dynamics Engine [13]を用い、箱状の物体の内部に複数の物体が内包されている状態をモデル化した。本実験では図16左図のように立方体内部に半径10mmのバーチャルな球（反発係数=0.3）が1個存在する状態を設定した。そしてデバイスに装着された加速度センサ（浅草ギ研，3軸加速度センサーVer2）の出力値を元に，操作者の動作に応じた箱及び球の動力学的シミュレーションを行い，指先に提示されるべき力情報を導出した。物理シミュレーションの計算周期は約5ミリ秒，モータの制御周期は約0.3ミリ秒であった。このようにして，実物体を把持し振る・回す等の動作を行った際における実物体に内包されたバーチャルな球の質量感覚，すなわち物体のバーチャルな内部ダイナミクスを提示した。

本実験は恒常法に基づいて行われた。被験者は4.2節における実験と同様，プロトタイプデバイスを装着して軽量の立方体（1辺50mm，30g）を把持する。まず，標準刺激として10g，50g，100g，200gのいずれかの質量に相当するバーチャルな球1個を提示し，次に比較刺激として標準刺激近傍のランダムな質量の球を提示する。刺激提示中，被験者は自由に腕を動かして質量を判断し，比較刺激が標準刺激に対して「重い」「否」の二件法により回答した。50gの標準刺激において3名の被験者が「重い」と回答した確率を平均した結果および正規累積分布関数によるフィッティング曲線を図17に示す。本実験の結果，50gの内部ダイナミクスに対する質量弁別閾は10.7gであった。これは標準刺激に対して約20%に相当する。全ての標準刺激に対する質量弁別閾を表2にまとめる。

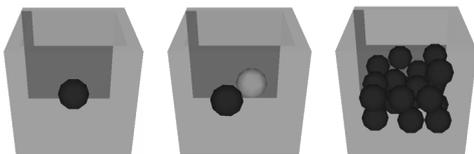


図16 提示する内部ダイナミクスの例。実物体の箱の内部にバーチャルな球が入っている  
Fig. 16: Simulated internal dynamics.

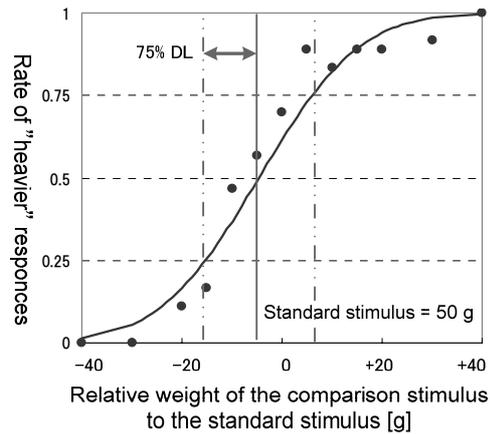


図17 実物体の箱の内部に50gのバーチャルな球を提示した場合の質量弁別  
Fig. 17: Average rate of "heavier" response for 50-g standard stimulus in displaying the internal dynamics.

表2 各標準刺激に対する75%弁別閾

Table 2: 75% difference limen for four kind of standard stimulus in displaying the internal dynamics.

standard stimulus	75 % DL
10 gf	4.3 gf (43.0%)
50 gf	10.7 gf (23.5%)
100 gf	21.0 gf (21.0%)
200 gf	58.2 gf (29.1%)

## 6 考察

本システムはACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies [14]およびインタラクティブ東京2007 [15]において実演展示（図18）を行い，合計1000人以上の体験者を得た。展示に際して提示した内部ダイナミクスは図16で示したような箱の中の球にとどまらず，反発係数の高いスーパーボールのような球，球以外の形状や，把持したコップの中にバーチャルな球が落下してきて蓄積し段々と重くなっていく状況なども再現し，本システムの触力覚提示に対する体験者の反応を観察した。その結果，触力覚提示を開始した後，体験者に手を振ってみることを依頼すると，ほとんどの体験者が即座に自分が手で把持している空の箱の中に何らかの物体が入り込んだという状況を把握し，自ら手を動かす等のインタラクションを行うことができた。ただし若干の体験者においては，指の形状がデバイスと合致せず正しく触覚情報を伝達できない，強い締付けを感じる等の問題が確認された。また体験者の感想から，提示される触力覚が十分に繊細なものであり箱の中で複数の球同士が衝突する状態等の微小な力の変化も知覚させられることも確認された。特に反発係数の高い球が入った箱を振る動作や，柵状の上面が空いた

箱を傾けて中の球をこぼす動作においては、球の跳ね返りや1つ1つの球が落下し段々と軽くなる様子が高いリアリティをもって感じられ、確かに球が存在しているように感じると好評を得た。従来の触力覚ディスプレイにおいてこのような感覚を提示できるものはみられず、本システムはシンプルながら従来にはない高い存在感を伴う触力覚インタラクションを提供可能であると確認できた。



図18 SIGGRAPH2007における体験者の様子  
Fig. 18: Exhibition in SIGGRAPH2007.

今回作成したプロトタイプデバイスの質量は45gであった。これを拇指と示指に装着すると90gの質量が指中節の固定部に加わる。これは本手法の対象である指先腹部への皮膚感覚に直接的には影響しないが、指と手首の固有受容感覚に影響を及ぼす。すなわち提案手法による皮膚感覚提示に加えて、常に90g相当の固有受容感覚が知覚される。実際には配線の重さも加わり、本手法における質量弁別能力の劣化の大きな原因となっているため、これらの不要な重さの低減が今後の課題となる。

また、本デバイスによって適切に提示できた質量はおよそ10gから200gであった。200g以上の質量を加えると指の変形が限界に達し、より大きな質量の識別は困難であることが観察された。本論文における実験では示指と拇指の二指による把持を設定していたことから、人の指先の皮膚感覚のみにおける質量知覚は一指あたり100g程度が上限であると考えられる。すなわち人の質量知覚において、指先腹部の皮膚感覚は小さな質量の弁別に貢献し、大きな質量に対しては腕や手首の固有受容感覚が主たる役割を果たしていることが予想される。今後、このような固有受容感覚と皮膚感覚の機能分担を調査することで、より広い範囲の質量提示を行う手法が構築できる可能性がある。

## 7 まとめ

本論文では、物体把持時の指先部の力を再現することで固有受容感覚の刺激を伴わずに物体の質量を提示する手法を提案し、重力質量および慣性質量を併せたバーチャルな物体の質量感覚を提示

可能な指先装着型の触力覚ディスプレイを実現した。さらに本手法が提示対象とする触力覚情報を重量感覚から質量感覚提示に拡張し、さらに物体の内部ダイナミクスをも提示可能であることを示した。本手法は現実と同様の力情報を再現することで現実に近い感覚を提示可能であり、特にユーザの動作を伴う状況において高いリアリティを提供可能であることを確認した。今後、デバイスのさらなる小型化や無線化を図ることにより、家庭用エンターテインメントシステムやウェアラブルコンピューティングにおける触力覚提示装置としての応用が可能になると期待できる。

## 謝辞

本研究の一部は文部科学省科研費補助金（特別研究員奨励費19-2781）によって行われた。

## 参考文献

- [1] Vincent Hayward, Oliver R. Astley, Manuel Cruz-Hernandez, Danny Grant and Gabriel Robles-De-La-Torre, "Haptic interfaces and devices", *Sensor Review*, Vol.24, No.1, pp.16-29, 2004.
- [2] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects", in *Proc. 3rd Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 295-300, 1994.
- [3] M. Sato, "SPIDAR and Virtual Reality", *World Automation Congress*, IFMIP-043, pp. 1-7, 2002
- [4] Immersion Co., "The CyberGrasp: Groundbreaking haptic interface for the entire hand", 2003.
- [5] S. Nakagawara, I. Kawabuchi, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi, "An Encounter-type Multi-fingered Master Hand Using Circuitous Joints", in *Proc. 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA '05)*, pp. 2667-2672, 2005.
- [6] 雨宮智浩, 安藤英由樹, 前田太郎, "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論文誌*, Vol.11, No.1, pp.47-58, 2006.
- [7] H. Y. Yao and V. Hayward, "An Experiment on Length Perception with a Virtual Rolling Stone", in *Proc. EuroHaptics Int. Conf. 2006*, pp. 275-278, 2006.
- [8] 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.
- [9] L. A. Jones and S. J. Lederman: "Human Hand Function", Oxford Univ. Press, 2006.
- [10] R. S. Johansson and G. Westling: "Roles of Glabrous Skin Receptors and Sensorimotor Memory in Automatic Control of Precision Grip When Lifting Raugher or More Slippery Objects", *Experimental Brain Research*, vol. 56, pp. 550-564, 1984.
- [11] 大山正, 今井省吾, 和気典二: 「新編 感覚知覚心理学ハンドブック」, 誠信書房, 1994.

- [12] K. Minamizawa, H. Kajimoto, N. Kawakami and S. Tachi, "Wearable Haptic Display to Present Gravity Sensation - Preliminary Observations and Device Design", in Proc. 2nd Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (World Haptics 2007), pp. 133-138, 2007.
- [13] <http://www.ode.org/>
- [14] K. Minamizawa, S. Fukamachi, H. Kajimoto, N. Kawakami and S. Tachi "Gravity Grabber: Wearable Haptic Display to present Virtual Mass Sensation", 34th Int. Conf. On Computer Graphics and Interactive Techniques (ACM SIGGRAPH 2007), Emerging Technologies, 2007.
- [15] <http://interactivetokyo.jp/>

(2007年9月14日受付)

[著者紹介]

南澤 孝太 (学生会員)



2005年東京大学工学部計数工学科卒業。2007年同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。同年同専攻博士課程進学，日本学術振興会特別研究員(DC1)。ハプティックインタフェース，レイグジスタンスシステムの研究に従事。2007年日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞受賞。

深町 聡一郎 (学生会員)



2007年東京大学工学部計数工学科卒業。現在同大学大学院情報理工学系研究科修士課程在学中。レイグジスタンスにおける力覚提示手法の研究に従事。

梶本 裕之 (正会員)



1998年3月東京大学工学部計数工学科卒業。2003年3月同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程退学。博士(情報理工学)。2001年4月日本学術振興会特別研究員(DC1)。2003年4月東京大学助手。2006年9月電気通信大学助教授。2007年4月同准教授。触覚ディスプレイ，触覚センサ，バーチャルリアリティシステムなどの研究開発に従事。日本バーチャルリアリティ学会，日本ロボット学会，計測自動制御学会各会員。

川上 直樹 (正会員)



平8東工大・理工・電気電子修士課程修了。平11東大・工・先端学際工博士課程修了。工学博士。同年東大院・工・計数工助手，平14東大院・情報理工・システム情報学専攻講師。バーチャルリアリティの研究に従事。

舘 暲 (正会員)



昭43東大・工・計数卒。昭48同大大学院博士課程修了。工学博士。同年同大助手。昭50通産省工技院機械技研研究員，マサチューセッツ工科大学客員研究員を経て，平1東大先端科学技術センター助教授，平4同センター教授，平6同大・工・計数工教授，平13同大大学院・情報理工・システム情報学専攻教授。レイグジスタンス，人工現実感の研究に従事。IEEE/EMBS学会賞，通産大臣表彰，国際計測連合(IMEKO)特別功労賞，IEEE-VR Career Awardなど受賞。IMEKOロボティクス会議議長，計測自動制御学会会長，日本バーチャルリアリティ学会初代会長。