

次世代マルチメディアサービスへの期待： ハプティックデバイスによる力感覚の提示とその応用

工学部知能機械工学科 准教授 黄 健

1. はじめに

近年、スマートフォンをはじめとするマルチメディアサービスは、高質な音声や立体映像の情報を提供するための技術が著しく発展しており、その技術を実用化して生まれたさまざまな製品が我々の生活に華々しく利用されている⁽¹⁾。一方、人間が視覚と聴覚の以外、触覚から外部との接触情報を獲得することが多いため、音声と映像の情報に次いで触覚情報を新しい要素として次世代マルチメディアサービスのコンテンツに取り入れることが高く期待されている。

一般に、人間に力感覚や触覚を提示するため、ハプティックデバイスという力感覚提示装置を利用することは多い。ハプティックデバイスとはバーチャルリアリティ技術の一種であり、計算機のなかに予め作られた仮想世界の動きに合わせて操作者にさまざまな力感覚や触覚を作り出す小型ロボットである。ハプティックデバイスを用いることにより、物理的な制限条件を除去し、仮想対象物を数学的に簡単に作成することが可能となる。また、この手法では同時に操作者の運動データも蓄積できるという利点があり、従来の認知学や心理学に用いられた厳しい実験条件を容易に実現できる。

一方、ハプティックデバイスを用いてより現実に近い力感覚を操作者に提示するためには、さまざまな技術的な問題を解決する必要がある。これらの問題は、(1) ハプティックデバイスの機構や制御などの実現手法に関わる工学的な問題と、(2) 人間の力感覚メカニズムの解明というサイエンス的問題の二つ学術分野の問題に分類される。本稿では、これらの問題を踏まえて最近の研究を紹介する。

2. ハプティックインタフェースの駆動方法

2.1 これまでのハプティックデバイス

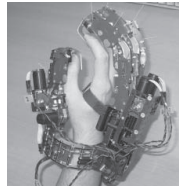
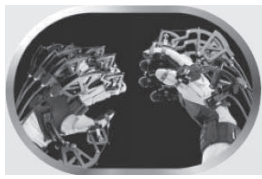
ハプティックデバイスは、コンピュータの中の仮想空間に置かれている物体と接触時の触覚を実世界にあったかのように操作者に提示する装置である。地面に装置の支点の有無によって接地型と非接地型に分類されている。接地型の装置では、力の提示を正確に再現しやすいが、地面に固定しないと力を提示できないという短所がある。図1に示す PHANToM^{®(2)}、SPIDAR^{®(3)}はこの種の装置である。これに対し、操作者の身体に支点を置き、ウェアラブル可能な力感覚提示装置が開発された。図2に示す CyberGrasp^{®(4)}、外骨格遭遇型マスタハンド⁽⁵⁾、Buru-Navi^{®(6)}は非接地型タイプである。これらの図に示すように、ハプティックデバイスのアクチュエータの種類や駆動方法も多様である。



(a) SensAble 社製 PHANToM[®]



(b)佐藤・小池ら開発した SPIDAR
図1 接地型ハプティックデバイス



Immersion 社の CyberGrasp[®] 館ら開発したマスタハンド 雨宮ら開発した Buru-Navi

図2 遭遇型ハプティックデバイス

2.1 異なる減速機構による力感覚の提示

従来のハプティックインタフェースに関する研究は、力感覚の提示できるデバイスの実現に主眼が置かれており、上述したようなさまざまなデバイスが開発されてきた。これらのデバイスでは、力を発生させるための減速機構として、ワイヤやギアなどが用いられることが多いが、減速機構が異なれば機械的性質や人間に与える力感覚にも当然違いが現れるものと考えられる。しかしながら、減速機構が人間の力感覚に与える影響について系統的に調べ、報告した研究はほとんどない。

そこで筆者らは、4種類の減速機構を有するデバイスを作製し、インピーダンス制御による力提示を行い、減速機構の影響について検討を行った^{(7)~(9)}。複雑な機構の干渉など要因による影響を抑え、減速機構の影響を顕在化させるため簡単な機構を有する1軸アームを設計し、図3に示す遊星機構(PD)アーム、ハーモニックギア(HD)アーム、ワイヤ駆動(WD)アーム、モータから直接駆動(DD)アームを試作した。ロボット制御系を図4に示す。

◇サーボ系の影響

制御系には力サーボ系と位置サーボ系の2通りのインピーダンス制御を適用した。両サーボ系ともに、位置または力のシングルフィードバックだけでもインピーダンス制御は可能であるが、もう一方も間接的にフィードバックすることで両サーボ系ともに位置と力の

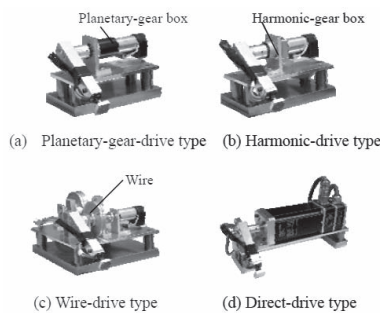


図3 異なる減速機を有するアーム

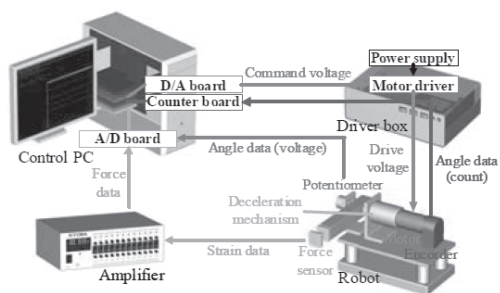


図4 アームロボット制御システム

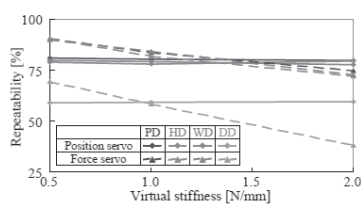


図5 仮想弾性の再現性

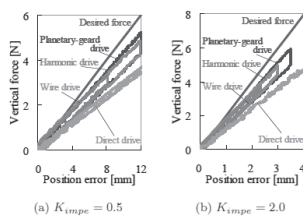


図6 力サーボの結果

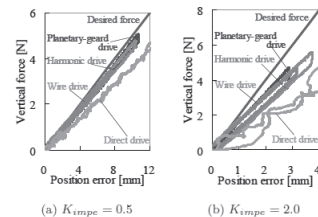


図7 位置サーボの結果

ハイブリッド制御を実現している。両サーボ系での設定した仮想ダイナミクスに対する剛性の再現率の推移を図5に示す。変位と力の関係については、図6と図7のそれぞれに力サーボ系と位置サーボ系で得られた結果を示す。これらの結果が示すように、制御系や減速機構の違いにより結果が異なることが確認できた。力サーボ系では設定した弾性係数の大小に関係なく、一定の割合で剛性が再現できることがわかる。これに対して、位置サーボ系では弾性係数の増加に伴い、システムが再現する剛性の低下がみられた。

◇減速機の影響

DDを除いた減速機構を有する構成ではほぼ同一の再現率が得られた。しかしながら、細かく見るとこれらの結果には若干の差異がみられる。まず、PDでは負荷と除荷で再現する剛性が異なり、ヒステリシスが増大する傾向がある。これはPD機構のバックラッシュによる影響であると考えられる。HDではノンバックラッシュな性質を有しているため、ヒステリシスは小さいものと予想されるが、実際はギアボックスの粘性摩擦効果により比較的大きなヒステリシスが現れる。WDでは連続的に動作するために微小変化時にはヒステリシスは3台の構成の中で最も小さい。また、ワイヤーテンションの影響も考慮し、3通りのテンションパターンでその影響を調べた。実験の結果から準静的な付加ではワイヤーテンションが仮想剛性に与える影響は非常に小さいことがわかった。

◇粘性制御について

仮想ダイナミクスのうち粘性の再現性について検討を行った。図8に示すように、デバイスを動的に操作したときに、システムが実際に再現する粘性と設定した仮想ダイナミクスとの関係について調べた。実験結果に示すように、力サーボ系では剛性の再現性と同様に粘性も一定の割合で再現できることがわかったが、減速機構によって再現性が異なる。これは、減速機構によってシステム全体の粘性特性が大きく異なるため、仮想ダイナミクスに干渉して再現性が変わったものと推測される。また、仮想ダイナミクスと再現した粘性の関係性を同定することにより、補償が可能であることがわかった。

3. 人間の触知覚メカニズムの解明

上述したように力を正確かつ迅速に提示するためには、ハードからソフトまでさまざまな工学的なアプローチが必要になる。一方、人間がどのように力の触知覚を認知しているのか、そのメカニズムが明らかになっていない部分が多いため、サイエンス的なアプローチが必要である。

3.1 ハプティックデバイスを用いた錯覚現象の提示

錯覚現象とは、実環境において対象が有する本来の物理量を人間はしばしば誤って認識してしまうという現象であり、個人差はあるものの作為的な行動がなく理性的に判断されるならば、ほぼ必ず起きてしまうと

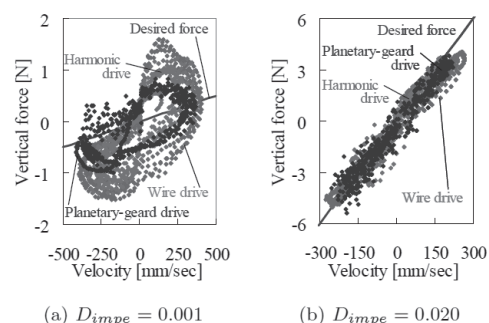


図8 粘性制御の結果

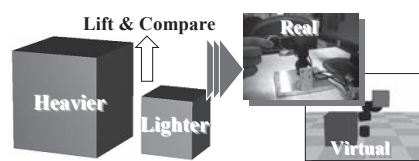


図9 大きさ重さ錯覚

いう非常に興味深い現象である。錯覚現象の研究は、本来心理学や認知学の分野の研究であるが、バーチャルリアリティ技術の進歩によって、近年ロボティクスの分野においても広く展開されている。

大きさ重さ錯覚は、図9に示すように同一の重さの対象物に対しても、人間は大きい対象物であればあるほど軽いとの錯覚を起こす現象である。図9の実験では、被験者が提示された二つの立方体を見ながら、ハプティックデバイスを持ち上げて大きい方を軽く、小さい方を逆に重く感じた結果が得られ、大きさ重さ錯覚を再現できたことが分かる。この実験では、支持する対象物体の重さを瞬間的に微小変化させた時の力感覚メカニズムを検討したものである。対象物の重さが瞬間的に微小変化する現象は自然現象では起こりえず、バーチャルリアリティ技術を用いて始めて実験できるものである。被験者の重さ変化を感知する認識率は、瞬間的に重さが印可される場合と重さが除去される場合で差があり、重さが除去される場合より、重さが印可される場合感度が高くなっている傾向が得られた(10)~(13)。

この結果は単に提示した力感覚のリアリティを実証しただけでなく、バーチャルリアリティ技術を上手く組み合わせて利用することで、実環境に特有な錯覚現象を被験者に対して引き起こすことができ、心理学で行なわれるような知覚実験が可能になるということを示唆している。

3.2 実空間にける重さ知覚と運動の関連

ものを上下方向に振ってその重さを知る行動を人間が日常的に行う動作の一つである。人間がこの行動からどのような情報を検出し、重さ知覚に用いたのか大変興味深い。そこで、筆者らは上下方向に振る行動に注目し、重さ知覚と上肢運動の関連の解明を試みた^{(14)~(16)}。図10に示すように、モーションキャプチャ画像計測システムを用いて実空間において重さの錯覚現象を測定した。

実験中のボトルの運動については、ボトルの持ち上げ高さは被験者によってバラバラであったが、全被験者のボトル持ち上げ最大速度がボトル降ろし最大速度より大きいことが分かった。また加速度のデータについては、ほぼ全員の結果において前半の持ち上げ運動

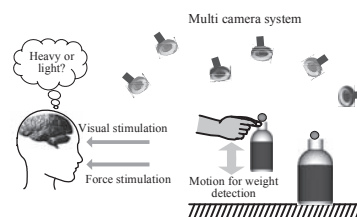
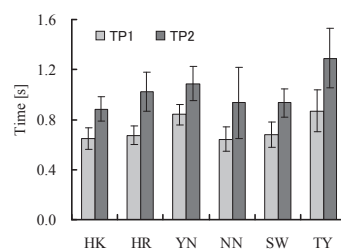
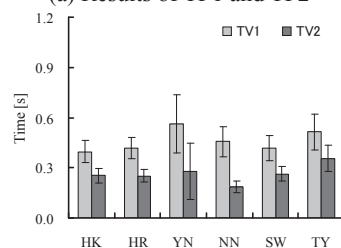


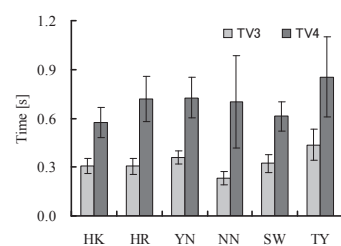
図10 実空間での重さ知覚の計測



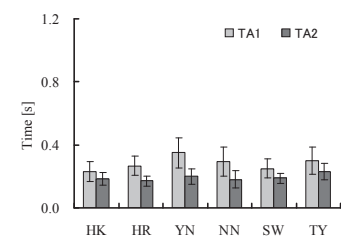
(a) Results of TP1 and TP2



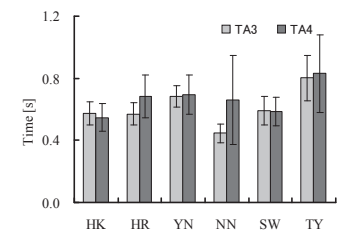
(b) Results of TV1 and TV2



(c) Results of TV3 and TV4



(d) Results of TA1 and TA2



(e) Results of TA3 and TA4

図11 時間 Profile 解析結果

時の加減速が後半の降ろし運動時の加減速より大きいことが明らかになった。

位置/速度/加速度などの大きさだけではなく、それぞれの時間解析も試みた。図 11(a)の位置情報の時間プロフィールにおいては、持ち上げ運動時間 TP1 より降ろし運動時間 TP2 の方が長いことが分かった。また、速度の時間プロフィールについては、持ち上げ運動において時間 TV1 が TV2 より比較的長く、降ろし運動において減速時間 TV4 が加速時間 TV3 より長いという結果が図 11(b),(c)で確認された。また、加速度の時間プロフィールについては、持ち上げ運動に加速時間が減速時間より長いものの、前半の TA1 と TA2 の時間が降ろし運動の加速時間 TA3 と減速時間 TA4 より短いことが図 11(d),(e)から分かった。

これらの結果から、ボトルの降ろし運動が慎重に行われた様子が伺わせており、降ろし運動時に重さを知覚した気配が察せられる。また、2回目の基準ボトルの知覚運動の最大速度と最大加速度より、1回目の比較ボトルの知覚運動の方が大きいことから、比較ボトルの知覚運動に注意深いという心理状態が現れたと考えられる。さらに、被験者ごとの錯覚発生率が、各自の重さ知覚運動におけるボトルの運動速度や加速度の最大値と同じ分布の特徴があり、重さ知覚と運動の関連性を示唆すが、今後追加実験を重ねて検討していく必要がある。

4. おわりに

ハプティックデバイスは、操作する人間と操作される機械のインタフェースである。機械をつくる立場から、より現実に近い力感覚を提示することを技術的な目標としているが、提示された刺激をどう感じるかが機器を操る人間の感覚である。これから人間が感じしやすい力を如何に提示するかの問題がますます重要になってくる。

近年、ゲーム産業において本体の小型化や映像の立体化などの技術開発が盛んに行なわれており、コンパクトかつ高性能のゲーム機本体が次々に売り出されている。特に、最近話題になっているのが任天堂の体感型ゲーム機 Wii[®]である。このゲーム機は、操作者の意思を入力情報としてゲーム機器に取り入れるだけではなく、ゲームなかの環境や操作内容によってリモコンの振動で操作者にさまざまな触感覚を出力している。このため、従来のゲーム機より楽しさが倍増されたことで、人気の秘密と考えられる。このゲーム機のリモコンは操作者とゲーム機との間のインタフェースであり、振動の周波数、強度、タイミングなどの与え方が操作者の感覚獲得に重要なポイントになる。

このように、ハプティックデバイスによる力感覚の提示は、ゲームのようなエンタテインメント業界だけではなく、医療福祉、宇宙開発などの分野においても重要な要素であり、より正確に、感じしやすい力の提示方法と機器の開発が期待される。

参考文献

- (1) 広瀬通孝, “バーチャルリアリティ”, 産業図書, pp.111-116, 1993.
- (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 Multifingered 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) 反保紀昭・原正之・黄健・藪田哲郎, “ハプティックインタフェースのアクチュエータ機構が人間の力感覚に及ぼす影響の定量的評価”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, 1P1-H18,2008.
- (8) 反保紀昭・竹村洋・原正之・黄健・藪田哲郎, “ハプティックインタフェースのアクチュエータ機構が人間の力感覚に及ぼす影響の評価”, 第26回日本ロボット学会学術講演会講演論文, 3L2-06,2008.
- (9) 反保紀昭・原正之・黄健・藪田哲郎, “異なる減速機構を用いたハプティックデバイスにおける力感覚の評価”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'09, 1A1-B06,2009.
- (10) Hara, M., Higuchi, T., Ohtake, A., Huang, J. and Yabuta, T., “Verification of Haptic Illusion Using a Haptic Interface and Consideration on Its Mechanism”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.18, No.4, pp.476-488, 2006.
- (11) 大竹理香・原正之・黄健・藪田哲郎, “ハプティックインタフェースを用いた力感覚と錯覚現象の計測”, 計測自動制御学会論文集, Vol.43 No.8, pp.699-701, 2007.
- (12) M. Hara, N. Ashitaka, N. Tambo, J. Huang and T. Yabuta, “Consideration of Weight Discriminative Powers for Various Weight Changes Using a Haptic Device”, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2008), pp.3971-3976, 2008.
- (13) M. Hara, T. Higuchi, T. Yamagishi, N. Ashitaka, J. Huang and T. Yabuta, “Analysis of Human Weight Perception for Sudden Weight Changes during Lifting Task Using a Force Display Device”, Proc. of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2007), pp.1808-1813, 2007.
- (14) 黄健・谷野徹也・石川貴大, “モーションキャプチャを用いた実環境での大きさ重さ錯覚現象の画像計測”, 第27回日本ロボット学会学術講演会講演論文 CDROM,3L1-06, 2009.
- (15) 黄健・谷野徹也・石川貴大・畠田直輝, “実環境における重さ知覚運動の画像計測”, 第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文 CDROM 1C2-1, 2009
- (16) 谷野徹也・石川貴大・畠田尚輝・黄健, “実環境における大きさ重さ錯覚現象と手先運動の画像計測”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演論文 CDROM 1A2_F24, 2010.