

擬似触覚を利用した 重みのコミュニケーションのための ビジュアルインタラクションデザイン

中小路久美代^{†,§} 山本恭裕[†] 小池康晴^{††}

視覚によるオブジェクトの動きと、体性感覚による自分の動きとが一致している状態から一致しない状態に変化する際に生じる擬似的な触覚や力覚は、Pseudo Haptics (擬似触覚) と呼ばれている。本研究では、この原理を利用して、実際には重さはかかっているのに、腕に重さがかかっているような錯覚を生じさせるようなビジュアルフィードバックデザインの原則の構築を目指している。本論では、重さや粘弾性に関する錯覚を生じさせるにあたりどのようなビジュアルフィードバックをすればどのように重い/粘弾性があると感じるかの試行実験をおこなうために必要となる要因を整理し、モデル化へ向けての課題を論じる。

Visual Interaction Design for Communicating Weight using Pseudo-Haptics

Kumiyo Nakakoji^{†,§} Yasuhiro Yamamoto[†] Yasuharu Koike^{††}

Pseudo-haptics is a phenomenon where visuo-haptic sensory conflicts and the sensory dominance of vision over touch cause a haptic illusion when perceiving spatial properties, such as distance, position, size, texture, and mass. That is, one perceives a haptic property different from the one present in the real world when appropriate visual feedback is provided. The goal of our research is to identify a set of principles for visual interaction design to communicate "weight" by using the pseudo-haptics feedback. This paper lists a set of factors that need to be studied, and describes the IWE (Illusory Weight Exploratorium) tool to conduct the experiments to develop such principles.

1. はじめに

Pseudo-haptics (擬似触覚, あるいは擬似力覚. 本論では、「擬似触覚」で統一する) は、視覚による知覚と、固有受容知覚 (自分で感じている体の動き) との間に不整合が生じた際に、視覚による情報が優勢になるという脳の特性から、固有受容知覚に錯覚が生じる現象を指す [Lecuyer 2009]. たとえば、マウスを等速で動かしている際に、画面上に表示されているマウスの動きが、急に遅くなったり速くなったりすると、画面上に凸な部分や凹んだ部分があるように感じられる。視覚から得られるマウスの動きの情報を受けて、まるで手が力を受けたように感じる現象である。擬似触覚は、物体の固さ [Lecuyer, Coquillart, Kheddar, 2000] や、テクスチャ [Lecuyer et al. 2004], 物体の動き [Congedo, Lecuyer, Gentaz 2006], 質量 [Dominjon, et al. 2005], さらに空気の流れ (風) [Pusch, Martin, Coquillart 2008] についても生じることが実験により確かめられてきている。

我々はこの、人間 (脳) の認識メカニズムをベースとして、遠隔で重みを感じることができるよう仕組みの構築を目指している。擬似触覚をフィードバックする既存の研究には、擬似触覚が生じていることが確認されたことを報告する基礎的なものが多い。本研究の目的は、物理的な重さを実際にかけることなく、視覚的フィードバックのみによって、人間に重みを錯覚させるような機構を、解明することにある。擬似触覚の仕組みを応用する際に、どのような視覚的なフィードバックを、どんなタイミングでおこなうことで、目的とする粘性や弾性を錯覚として生じさせることができるのか、そのようなビジュアルインタラクションデザインの系を構築する際の原則を定めることを目指している。

以下 2 章では、擬似触覚について、既存研究を概観しながら説明をおこなう。3 章では、われわれの研究が目指している、重みをコミュニケーションするためのシステムについて述べ、既存の擬似触覚研究との違いを明らかにする。4 章では、それを実現するにあたって必要となる、調査すべき事柄と、それを実験するために構築したツールを説明する。5 章では、本研究が目指すゴールについて説明をおこなうと共に、本環境が HCI 研究において示唆するところを論じる。

[†] 東京大学先端科学技術研究センター

Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo

[§] 株式会社 S R A 先端技術研究所

SRA Key Technology Laboratory Inc.

^{††} 東京工業大学精密工学研究所

Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

2. 擬似触覚

擬似触覚は、主に、視覚と触覚を統合 (visuo-haptic integration) する際に生じる。Lecuyer [2009]は、擬似触覚について、以下の四つのポイントがあるとしている [Lecuyer 2009, p. 42].

- 第一に、擬似触覚は、視覚と触覚の間で一つ以上の知覚矛盾が生じているということ。
- 第二に、擬似触覚は恐らく、空間 (距離や位置, サイズ, モノの移動, など) を知覚する際に生じる, 触覚に対する視覚優位性に依るものであること。
- 第三に、(矛盾を生じている) 触覚情報と視覚情報との組み合わせに対して、擬似触覚を生じさせることで新たな整合性のある環境の構築をしていることに相当しているのではないかと考えられること。
- 最後に、擬似触覚は、実環境とは異なる触覚属性を知覚するという、触覚の錯覚 (イリュージョン) を生じさせるということ。

これまでに、物体の固さ [Lecuyer, Coquillart, Kheddar 2000] や、テクスチャ [Lecuyer et al. 2004], 物体の移動 [Congedo, Lecuyer, Gentaz 2006], あるいは質量 [Dominjon, et al. 2005] に関して、疑似触覚が生じることが実験により確かめられてきている。いずれの実験においても、実験参加者に、利き腕で入力デバイスを操作してもらう。入力デバイスとしては、isotonic なデバイス (抵抗なく自由に動ける, たとえばマウスなど), isometric なデバイス (無限の抵抗を有する, たとえば Spaceball などのデバイス) [Zhai 1995] のいずれでもよい。手で操作しているところは、布や箱などで覆って見えなくする。実験参加者には、前面にモニタを配置するか、あるいは装着型のディスプレイを見てもらい、そこに表示されるオブジェクトを見ながらデバイスを利用して指示された通りの操作をおこなう。実験参加者には、操作している物体が、より固いか、より重いか、どれくらいの距離を移動したと思うか、といった質問をおこない、結果を統計処理している。

たとえば表面の凹凸といったテクスチャに関する擬似触覚を生じさせる実験では [Lecuyer et al. 2004], 画面上にマウスカーソルを表示し、マウスを操作する手は、箱で覆って見えなくする。画面上に表示した領域内にマウスカーソルが達した瞬間に表示しているマウスカーソルの動きを遅くすると、そこには凸のスロープがあるように実験参加者が報告する、とされている。テクスチャに関してはこのほかにも、マウスカーソルのサイズを大きくすることでも、凸のスロープを感じるようになる [Lecuyer et al. 2008]. スピードとサイズの両方を変化させると、より強く擬似触覚が知覚されるが、矛盾するように表示すると (i.e., サイズは大きくしてスピードは速く

する), サイズの変更の方が優位に効く、といったことも報告されている。

これらの実験では、それまでである一定の速度で動いていたマウスカーソルを、突然遅くしたり速くしたり、また大きくしたり小さくしたりすることで、視覚と触覚に矛盾を起こすことで、擬似触覚を生じさせている。どのような割合で、それを変更するかを、Lecuyer ら [2004] は、C/D (Control/Display) ratio (制御/表示割合) と呼んでいる。目的とする擬似触覚を生じさせるためには、C/D ratio をどのように設定するかが、重要なファクタとなる。

Pusch らは、空気の流れ (風) を擬似触覚によって生じさせる研究を報告している [Pusch, Martin, Coquillart 2008]. 実験参加者は、手を入れて左右に動かせるくらいの穴が正面に空けられた太いパイプの前に立つ。パイプの中を流れる空気を手で感じられるような感じで手をパイプの中に差し入れる。ヘッドマウントディスプレイを装着し、自分の手は直接は見えないようにする。ヘッドマウントディスプレイ上には、パイプの中に差し入れられた自分の手が見えている。そこで、手は物理的には動かしていないにも関わらず、ディスプレイ上の手が右方に移動したように表示すると、右の方に手が吹き流されたような感覚を実験参加者が報告する、という実験である。

このように、自分の手は実際には動いていないのに、視覚として自分の手 (と思われる画像) が動いている情報を与えられると、手が動いているような固有受容知覚が生じる。Ernst と Banks [2002]によると、少なくとも空間認知に関しては、視覚が体性感覚に勝るとしている。このことは、自分の手の横にゴム製の手を置いて、自分の手を見えなくした状態で、ゴム製の手と自分の手とに同様に刺激を与えていると、ゴム製の手が自分の手のように感じるようになり、さらには、目を閉じた状態で両手の指を合わせてみる、という実験をすると、ゴム製の手があった場所に、もう片方の手が近づいていく、という Botvinick と Cohen [1998] らの実験の結果を説明するものもある。

3. 擬似触覚の生成

我々は、擬似触覚の機構を利用して、遠隔で重みを感じることができそうな仕組みの構築を目指している。具体的には、前腕の筋電を触覚の入力装置とし、仮想ディスプレイや三次元オブジェクト、あるいはロボットといった表示装置によってビジュアルなフィードバックを返すことを考えている。前節で見たように、既存の擬似触覚に関する研究の多くは、触覚としてはインタフェースデバイスを利用したものが多く、それに比して本研究は、触覚としては筋電を利用するものである。

Lecuyer[2009]は、与えられた触覚プロパティに関する擬似触覚をフィードバックするシステムをデザインするにあたっては、以下の三つの段階をおこなう必要があるとしている。

- (1) その触覚属性を制御し、空間のパラメータと関連づける法則を見つける。
- (2) その触覚属性に関する空間のパラメータについて、視覚と触覚の間での感覚矛盾が生じるようにする。
- (3) その空間パラメータの視覚的フィードバックを変更して、目的とする触覚のプロパティを知覚し、擬似触覚を生じさせる。

提案する環境においては、触覚属性は筋電に対応する。我々はこれまで、筋電を用いた三次元オブジェクトとのインタラクション環境を構築している [Koike, Yamamoto, Nakakoji 2005]。上腕に貼付した筋電センサーを介して、上腕に力を入れると三次元のオブジェクト（三次元入力装置 SPIDAR の制御ボール）が上部に移動し力を抜くと下がってきたり、振り子を模した動きをしている三次元オブジェクトに対して、上腕に力を入れると振り子が上部で停止し力を抜くと再び動き出したり、といった、「念力インタラクション(tele-kinesthetic interaction)」を実装した。また、上腕の筋電を入力としてゴム人工筋を用いた空気圧制御ロボットの腕が動く剛性の調整をおこなってきており、自分で腕を曲げたり伸ばしたりすると、ロボットも同様に腕を曲げたり伸ばしたりする。このように、仮想ディスプレイ内のオブジェクトをはじめ、三次元オブジェクトやロボットを空間のパラメータとして関連づけ、触覚属性(筋電)と、空間のパラメータとの法則をつくることができる。

第二段階の、感覚矛盾を生じさせるためには、まずは、筋電と空間パラメータとがどのように一致しているかの馴化のプロセスが必要となる。その上で、オブジェクトに重さがかかった状態をつくり、一致していた系における触覚感覚と視覚感覚の間で矛盾が生じる状態を発生させることになる。

第三段階の、空間パラメータの視覚的フィードバックの部分で、仮想ディスプレイや三次元オブジェクト、あるいはロボットといった表示装置が、それまでと異なるビジュアルな動きを表現する。これによって、視覚と触覚との間での感覚矛盾が生じ、自分の腕にも重みがかかっているような、擬似触覚を生じさせることができると考えている。

4. 実験調査項目と実験環境

前章で述べたように、我々は、前腕の筋電を触覚の入力装置とし、仮想ディスプレイや三次元オブジェクト、あるいはロボットといった表示装置によってビジュアルな

フィードバックを返すことにより、「重さを錯覚する」(疑似的に触覚する)ようなフィードバック環境の構築を目指している。本研究の目的は、そのためにどのように表示装置のビジュアル表現をデザインすべきかの原則を明らかとすることである。

4.1 調査すべき実験項目

第3章でも述べたように、筋電を触覚の入力装置とし、仮想ディスプレイや三次元オブジェクト、あるいはロボットといった表示装置におけるオブジェクトのビジュアルな動きとに関連があることに馴化するプロセスが必要である。その上で、触覚と視覚とで矛盾が生じるように、触覚情報と視覚情報との間のマッピングを変化させる。これらを踏まえて、重みをコミュニケーションするという本研究の目的へ向けて、下記の事柄を実験により調査、分析する必要があると考えている。

- a. 上腕の筋電と表示オブジェクトの動きとが関連づいているということを学習するのに必要となる動作回数あるいは時間。その後矛盾が生じていると感じるためには、それよりも前に、自然な系というものを学習、体得しておく馴化のプロセスが必要がある。どの程度の試行回数や試行時間が必要となるのかを実験によって明らかにする。
- b. 上腕の筋電と表示オブジェクトの動きの間に矛盾が生じていると感じるためには、どの程度の試行回数や試行時間が必要となるのかを実験によって明らかにする。
- c. 知覚した矛盾に対して、恒常的に同様の触覚のイリュージョン(錯覚)が生じるのかどうか、すなわちある重みを擬似触覚として安定して生じさせることが可能かどうかを調査する。これまでに報告されている擬似触覚の調査はすべて、その日限りの報告である。たとえば1週間後、1ヶ月後にも、同様の擬似触覚が生じるのかどうかの調査はおこなわれていない。そういった、長期間に渡る、実験参加者内、参加者間の比較実験をおこなう。
- d. 目指す重みを疑似的に知覚できるような、C/D ratio を調査する。本研究では、前項目が可能であるとの結論が出た上で、馴化後に、筋電と表示オブジェクトの動きとのマッピングを変化させることで、このくらい重い、という感覚を人間に錯覚させたいと考えている。そのための、Control/Display ratio を実験によって調査する。
- e. 視覚フィードバックとしての、三次元オブジェクト、ロボット、および画面上に仮想的に表示する物体とでの差異の有無を調査する。既存の擬似触覚の研究はいずれも画面上に仮想的に表示するものであったのに対して、本研究では、三次元オブジェクトや実世界のロボットも視覚フィードバックとして利用しようと考えている。仮

想的な表示物体との差異があるのかわからないのかを、実験を通して明らかにする。

f. 視覚フィードバックとしてのディスプレイ上のオブジェクトの種類による、重さの錯覚の出現の違いを調査する。既存の疑似触覚の研究のほとんどは、ある表示オブジェクトを視覚表現として選びそれに対して実験をしており、表示の仕方の違いを比較したものは見られない。本研究では、たとえば、振り子やロボットアーム、バネ秤や輪ゴムといった、異なる形状の仮想オブジェクトを表現し、重さの錯覚がどのように異なって現れるかを実験により調査する。また、それぞれのオブジェクトの、実験参加者に対する配置および視点位置による違いを調査する。

g. 視覚フィードバックとしての三次元オブジェクトおよび実物のロボットの、実験参加者に対する配置および姿勢位置による違いを調査する。三次元オブジェクトや実物のロボットを「見る」ことで視覚フィードバックとしようと考えているが、どのような体勢から見るかによって、疑似触覚の起こり方に差があるとも考えられる。例えば、ロボットを横に並べて同じ方向から腕を並べて動かしてみているときと、対面から腕を突き出しあって動かしてみるのでは、感じ方が異なることも考えられる。

4.2 実験環境: IWE

ビジュアルフィードバックとして画面上に表示するオブジェクトの形状、向き、動きのマッピング係数、時間差といったパラメータをインタラクティブに変更しながらビジュアルフィードバックを設定できるようなツール IWE (Illusoty Weight Exploratorium) を構築した。IWE では、ビジュアルフィードバックとして画面上に表示する三次元オブジェクトの形状を選択し、その向きや動きのマッピング係数、時間差といったパラメータをインタラクティブに変更できる。

なお、生体信号を含め、様々な入力信号に対応できるように、入力数値をスライダで変更するとオブジェクトがそれに連動して動くようにするモードと、正弦波に連動して動くモードとを有している。設定したパラメータはファイルに記録でき、再び呼び出すことができる。

IWE は、以下の五つの部分から成る。オブジェクト表示部分は、実験参加者用の別ウィンドウとして開くことができるようになっている。図 1 に、IWE のスクリーンショットを示す。

(1) オブジェクト表示

バネ秤、振り子、ロボット手腕、スケルトン手腕、浮遊球、ゴム輪といった、自由度 1 の三次元オブジェクトを選択表示する。

(2) オブジェクトの方向定位設定

表示した三次元オブジェクトを設定した視点方向と大きさで表示する。設定した視点方向と大きさは、最大 6 個まで保存できる。

(3) マッピング係数入力

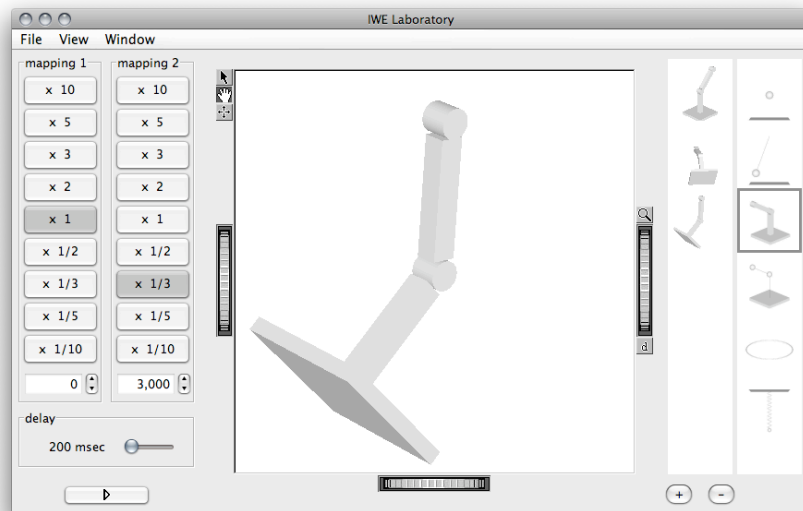
入力数値とオブジェクトの動きのマッピング (C/D ratio) を変更するインタフェース。

(4) 遅延時間操作

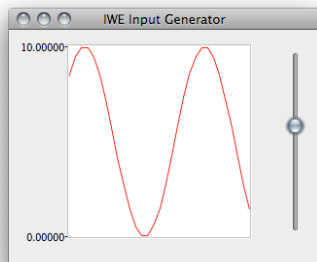
入力数値の動きへのフィードバックの遅延時間を操作するインタフェース。

(5) 時間ベースのマッピング係数プログラミング

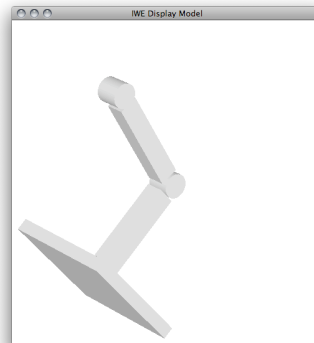
二種類のマッピング係数を指定し、指定した時間経過後 1 個目のマッピング係数を 2 個目のマッピング係数に変更する。



(1)



(2)



(3)

図 1: IWE スクリーンショット: (1)実験者用画面, (2)入力信号ウィンドウおよび(3)実験参加者用画面. (3)は(1)のオブジェクト表示部分に連動して動く.

5. 考察

本研究では、疑似触覚の機構を応用して、遠隔で重みを伝えたいと考えている。疑似触覚は、触覚の錯覚（イリュージョン）ともいえる。錯覚（イリュージョン）は、知覚エラーと捉えられていることが多いが、実際には、知覚によるエラーではなく、脳によって作りあげられているエラーである [Lecuyer 2009]. Lecuyer [2009]は、疑似触覚が、触覚の錯覚か、あるいは脳による戦略的な意思決定であるのかは実はまだよくわからないとしている。触覚の錯覚であるとするれば人間にとっては避けられない現象であるが、脳による意思決定なのであれば、そのような現象が起こらないようにすることは可能である。これまでのところ、錯覚か否かは別として、擬似的に触覚が生じるようなフィードバックを返せるということが、実験的に確かめられてきている。

ヒューマンコンピュータインタラクション研究の多くはこれまで、コンピュータと人との間の情報のやりとりという形でモデル化されてきた。マルチモーダルインタフェースの発展に伴い、HCI のモデルは、人間の異なる知覚経路を利用した情報のやりとりを考える必要が出てきている。たとえば、知覚チャンネル間で矛盾する情報が入力されて来た場合に、それを人間（脳）がどう判断するかといったことを踏まえた上で、インタラクションをデザインする必要がある。

たとえば、携帯電話のタッチスクリーン上で指で直線をゆっくりと描いた際に、どれくらいの「精度」で直線が引かれるかを比較したサイトがある (<http://labs.moto.com/diy-touchscreen-analysis/>)。ここで、「精度」というのは、実際に指が画面を触った点をいかに正確に取って表示するか、ということではなく、いかに人間が思っているような線を表示するか、という軸で評価されることになる。ビジュアルデザインでは、二箇所の色が人間にとって同じ色に見えるように、色の干渉を踏まえてわざと異なる色遣いをして色を調整することがおこなわれている。必ずしも視覚や触覚、それぞれに忠実な情報を入力として受け取り出力として返すのみでなく、異なる知覚チャンネルを総合的に捉えた上で、人間とのインタラクションを考える必要があると考えられる。

本研究で応用しようとしている疑似触覚は、そのような知覚チャンネル間に人為的な矛盾を生じさせることで、実世界では起こっていない感覚を、触覚に起こさせるような仕組みである。

謝辞 本研究は、科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (CREST)

「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」プログラムの支援によるものである。

参考文献

- 1) Botvinick, M., Cohen, J., Rubber hands 'feel' touch that eyes see, *Nature*, 391, p.756, 1998.
- 2) Congedo, M., Lecuyer, A., & Gentaz, E., The influence of Spatial De-location on Perceptual Integration of Vision and Touch, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.15, No.3, pp. 353-357, 2006.
- 3) Dominjon, L., Lecuyer, A., Burkhardt, J.M., Richard, P., Richir, S., Influence of control/display ratio on perception of mass of manipulated objects in virtual environments, *IEEE Virtual Reality 2005 (VR'05)*, pp.19-25, p.318-color-plate 2005.
- 4) Ernst, M., Banks, M., Humans Integrate Visual and Haptic Information in a Statistically Optimal Fashion, *Letters to Nature*, Vol.415, pp.429-433, Macmillan Magazines Ltd., January, 2002.
- 5) Koike, Y., Yamamoto, Y., Nakakoji, K., Tele-Kinesthetic Interaction: Using Hand Muscles to Interact With a Tangible 3D Object, *SIGGRAPH2006, Emerging Technologies*, Boston, MA., July, 2006.
- 6) Lecuyer, A., Simulating Haptic Feedback Using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.18, No.1, pp.39-53, MIT Press, February 2009.
- 7) Lecuyer, A., Coquillart, S., Kheddar, A., Richard, P., Coiffet, P., Pseudo-haptic Feedback: Can Isometric Input
- 8) Devices Simulate Force Feedback?, *Proceedings of the IEEE International Conference on Virtual Reality*, 2000.
- 9) Lecuyer, A., Burkhardt, J.M., Etienne, L., Feeling Bumps and Holes Without a Haptic Interface, The Perception of Pseudo-Haptic Textures, *Proceedings of CHI2004*, Vienna, Austria, pp.239-246, 2004.
- 10) Lecuyer, A., Burkhardt, J.M., Tan, C.H., A Study of the Modification of the Speed and Size of the Cursor for Simulating Pseudo-Haptic Bumps and Holes, *ACM Transactions on Applied Perception*, No.5, Vol.3, Article 14, pp.1-21, August, 2008.
- 11) Pusch, A., Martin, O., Coquillart, S., HEMP: Hand-Displacement-Based Pseudo-Haptics: A Study of a Force Field Application, *Proceedings of IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pp.50-66, 2008.
- 12) Shumin Zhai, Human Performances in Six Degree of Freedom Input Control, Ph.D. Thesis, University of Toronto, Canada, 1995.