

## 身体イメージ転移に対する視触覚刺激の時間同期性の影響

## The influence of temporal synchronization of visual and tactile stimulation on body transfer illusion

石井 孝洋  
Takahiro Ishii金 天海  
Chyon Hae Kim早稲田大学大学院創造理工学研究科  
Graduate School of Creative Science and Engineering早稲田大学大学院創造理工学研究科  
Graduate School of Creative Science and Engineering  
ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン  
Honda Research Institute Japan仁科 繁明  
Shigeaki Nishina菅野 重樹  
Shigeki Sugano早稲田大学大学院創造理工学研究科  
Graduate School of Creative Science and Engineering  
ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン  
Honda Research Institute Japan早稲田大学大学院創造理工学研究科  
Graduate School of Creative Science and Engineering

The rubber hand illusion (RHI) is known as one of the illusions of transferring body image induced by visuo-tactile stimulation. In the RHI, a subject feels not only as if tactile sensations are coming from a rubber-made dummy hand, but also as if the other properties like posture or position can be perceived directly via the dummy hand. If we can form the illusion in arbitrary situations, it would become possible to utilize this phenomenon as a novel way to present information about body properties to humans. Using a computer-generated animation of a virtual hand and a vibration motor, we investigated whether the illusion can be robustly induced, and also how the temporal synchronization of visual and tactile stimulation affects the body transfer illusion.

## 1. はじめに

身体イメージは、筋肉、関節、目、運動司令の中枢などからの情報を元に脳内に構築される自己の身体の内面的なイメージである。身体イメージは自己と環境との関係の基準になるものであり、常に安定したものであることが要求される。平常時の脳は、様々な感覚入力と運動指令の遠心性コピーが示す自己の身体に関する情報を統合することによって、一貫した身体イメージを維持している。

安定した身体イメージを保とうとするこの脳の機能を利用し、脳を「騙す」ことによって、身体イメージに関する錯覚を引き起こすことができることが報告されている。よく知られた例はラバーハンドイリュージョン(RHI)である。RHIは、典型的には被験者の手の隣にゴムでできた作り物の手を置き、被験者自身の手は直接被験者から見えないように遮蔽した状態で両方の手を筆などで同時になぞると、被験者があたかも作り物の手を自分の手であるかのように錯覚するという現象である[Botvinick 1998]。Slaterらは、作り物の手の代わりにコンピュータ・グラフィクス(CG)による仮想の手を用い、同様の現象を引き起こすことに成功している[Slater 2009]。また、Lenggenhagerらはヘッドマウントディスプレイとカメラを使ってRHIと同様の錯覚を全身に対して生じさせることを試み、自分自身を背後から観察しているかのような、いわば擬似的な幽体離脱感覚を人工的に引き起こすことに成功している[Lenggenhager 2007]。

身体的所有感覚が別の物体上に移動したこのような状態の下では、脳はその物体への刺激を自己への刺激であるかのように感じることが知られている。Armelらは、RHIを起こした状態で

作り物の手の指を通常は関節が曲がらない方向に曲げると、非RHI条件よりも発汗の度合いが高まることを示した[Carrie Armel 2003]。これは、作り物の手が曲げられるのを観察することにより、それによって感じるであろう痛みを、脳が予測するからであると考えられる。また、この種の錯覚下では、身体的所有感覚が変化するだけでなく、転移先の物体の特性があたかも自分の体であるように知覚されることも分かってきた。Armelらの同じ実験の中では、作り物の手を、対応する実際の指の曲げ量よりも多く曲げると、知覚される曲げの量が実際の指の角度よりも大きくなったという。Kammersらは、RHIを起こした状態で、被験者が感じる自分の手の位置が作り物の手の方へずれることを示した[Kammers 2009]。Lenggenhagerらによる幽体離脱実験でも、自身の身体外座標系における位置感覚が仮想の体の方へずれることが報告されている。

これらの先行研究が示すのは、身体イメージが体外の物体へ転移した状態では、脳は、その転移先の物体に対して起こりうる感覚をあたかも自分の体で起きているかのように感じようとするということである。これは単に物体を客観的に観察することによってその状態を認識するという状況に比べて、脳がより密接に対象と結びついた状態であると考えられる。もしこのような身体イメージ転移現象を安定に生じさせることができれば、身体の状態を効率良く伝達するための新たな情報提示手法として利用できる可能性がある。しかしながら、従来研究でよく用いられている、身体イメージ転移先として人形の手を利用する手法や、人の手により視触覚刺激を与える手法では、視覚情報の表現の自由度も低く、また、刺激のタイミングの制御が困難である。情報提示手法等への応用を考えるならば、より簡便かつロバストで、表現の自由度の高い手法を用いることが必須となる。本研究では、CGによる仮想の手と容易に入手・取り扱いできる一

連絡先: 石井孝洋, 早稲田大学大学院創造理工学研究科  
総合機械工学専攻, 東京都新宿区大久保 3-4-1, 03-5286-8202, takahiro495@gmail.com

一般的な振動モーターを用いて RHI 様の錯覚が生起させようかどうかを検証した。同時に視覚刺激と触覚刺激の時間的なずれの大きさを変化させながら RHI 様の錯覚の強さを測定し、刺激の時間的同期が身体イメージ転移錯覚の生起に与える影響を考察した。

## 2. 実験方法

### 2.1 身体イメージ転移システム

本研究で使用したシステムを図1に示す。スクリーンが机の表面から 15 cm の高さに位置するよう机の上に液晶モニター(27型ワイド液晶ディスプレイ RDT272WLM[三菱電機])を水平に設置した。モニターには3次元コンピュータグラフィックスソフトウェアの Blender2.49b (1) を用いて作成した。CG モデルのレンダリングの1秒あたりのフレーム数は 60 とした。被験者にはモニターの前に座ってもらい、右手を手の甲が上になるよう机の上に置いてもらった。被験者の右手の位置は、被験者の人差し指が仮想の手の人差し指から右側へ水平方向に 15 cm 離れる位置とした。被験者の右手には、図2のような手の甲の中央部に円盤型振動モーター (FM34F[東京パーツ]) が取り付けられた手袋を装着してもらった。実験環境の明るさを一定にし、周囲の様子が見えないよう暗くして被験者にモニターのみを見てもらうため、実験は暗室の中で行なった。

本システムでは、被験者に映像による視覚刺激と振動刺激による触覚刺激を与える。視覚刺激は、杭型の物体が上下して仮想の手に刺さるアニメーションをモニターに表示することで与えた。ただし、杭が下に動いて杭の先端部が仮想の手の表面に触れてから上に動いて抜けるまでの時間が 0.5 s となるよう動かした。また、杭の先端部が仮想の手から離れてから再び触れるまでの時間を 0.5~2.5 s でランダムに変化させた。触覚刺激は、被験者の右手に装着した振動モーターを振動させることで振動刺激を与えた。振動モーターはマイコン (Arduino Uno) により制御した。

また、本システムでは被験者に視覚と触覚へ時間的に同期させて刺激を与えたり、視覚と触覚に一定の時間ずれが生じるよう刺激を与えたりできるよう構成した。視覚と触覚に同期した刺激を与える場合、杭の先端部が仮想の手に触れてから離れるまでの間、被験者に振動刺激を与えるよう振動モーターを制御した。ただし、マイコンにより振動モーターにかかる電圧を変化させてから振動が開始・停止するまでの時間遅れが生じるため、それぞれ 38 ms、83 ms と仮定し(図3)、杭の動きよりもそれらの時間遅れ分だけ早いタイミングでモーターにかかる電圧を変化させた。そして、視覚と触覚に一定の時間ずれが生じるよう刺激を与える場合は、視覚刺激もしくは触覚刺激を与えるタイミング全体を一定時間遅らせた。

振動モーターにかかる電圧を変化させてから振動が開始・停止するまでの時間遅れをそれぞれ 38 ms、83 ms と仮定したが、それらは振動モーターに3軸加速度センサモジュール (KXM52-1050[カイオニクス]) を取り付け、モーターの振動により生じる一軸方向の加速度を測定し、それを元に決定した。図3は振動モーターにかかる電圧を 0.5 s (グラフの 0~500 ms の灰色の区間) の間 HIGH にしたときに生じた加速度を示している。ただし、図3の青い線は振動 50 回分の測定した加速度の絶対値を平均したもので、黒い線はそれをガウス関数 ( $\Sigma = 30$ ) により移動平均をとって平滑化したものである。そして、人が感じられる振動の有無の閾値を決定するために、杭が仮想の手に刺さる瞬間から離れるまでの間 LED を点灯し、仮定した時間

遅れ分だけモーターにかかる電圧を変化させるタイミングを早めた場合に、LED の点灯とモーターの振動とのタイミングが同期していると感じられるかどうかを検証した。その閾値を加速度の最大値の 50% (開始遅れ 125 ms、停止遅れ 28 ms)、25% (開始遅れ 79 ms、停止遅れ 57 ms)、10% (開始遅れ 38 ms、停止遅れ 83 ms)、5% (開始遅れ 19 ms、停止遅れ 110 ms) として仮定した時間遅れで比較したところ、加速度の最大値の 10% と仮定した時間遅れの場合に最も LED の点灯とモーターの振動とのタイミングが同期していると感じられた。そのため、振動モーターにかかる電圧を変化させてから振動が開始・停止するまでの時間遅れをそれぞれ 38 ms、83 ms と仮定した。

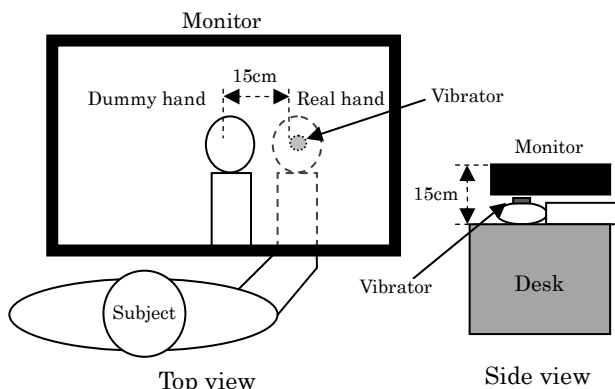


図1 本実験で使用した身体イメージ転移を生起するシステム

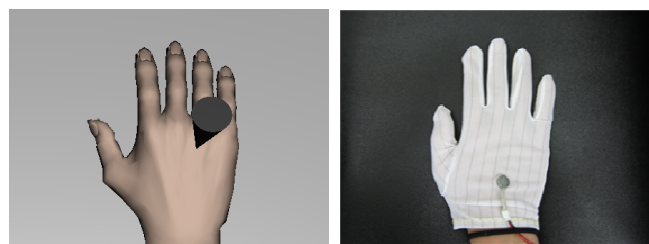


図2A, 2B モニターに表示した仮想の手(左:図2A)と被験者の右手に装着した振動モーターを貼付した手袋(右:図2B)

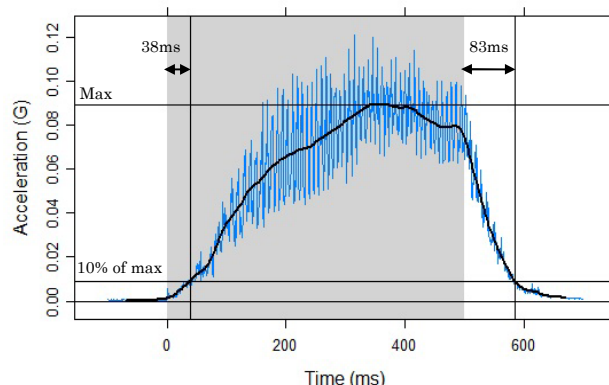


図3 振動モーターにかかる電圧を 0.5 s (グラフの 0~500 ms の灰色の区間) HIGH にしたときに生じた加速度の測定結果。青い線は 50 回分の測定値の絶対値を平均したもので、黒い線はそれをガウス関数により移動平均をとって平滑化したものである。今回は人が感じられる振動の有無の閾値を、最大値(グラフの MAX の部分)の 10% とし、モーターの振動開始遅れ時間を 38 ms、停止遅れ時間を 83 ms とした。

## 2.2 実験手順

本実験は 12 人の被験者(大学生, 無報酬)に対して行なった. 図4に示したように, 被験者に図1のシステムにより視触覚刺激を与えて被験者が感じた手の位置を測定するという流れを1試行とし, 被験者1人あたり 24 回の試行を行なった. 各試行ごとに視触覚刺激の条件 0~7 のように変化させ, 被験者一人あたり各条件で 3 回ずつ行なった. そして, 被験者 12 名のうち 6 名は条件 0→1→2→3→4→5→6→7 の順で試行を行い, 残りの 6 名には条件 0→7→6→5→4→3→2→1 の順で行った.

条件 0: 振動モーターによる触覚刺激を与えず仮想の手の上に杭が静止した映像のみを見せる

条件 1: 杭の動きに対して振動刺激を 0.3s 遅らせる

条件 2: 杭の動きに対して振動刺激を 0.2s 遅らせる

条件 3: 杭の動きに対して振動刺激を 0.1s 遅らせる

条件 4: 杭の動きと振動刺激を時間的に同期させる

条件 5: 振動刺激に対して杭の動きを 0.1s 遅らせる

条件 6: 振動刺激に対して杭の動きを 0.2s 遅らせる

条件 7: 振動刺激に対して杭の動きを 0.3s 遅らせる

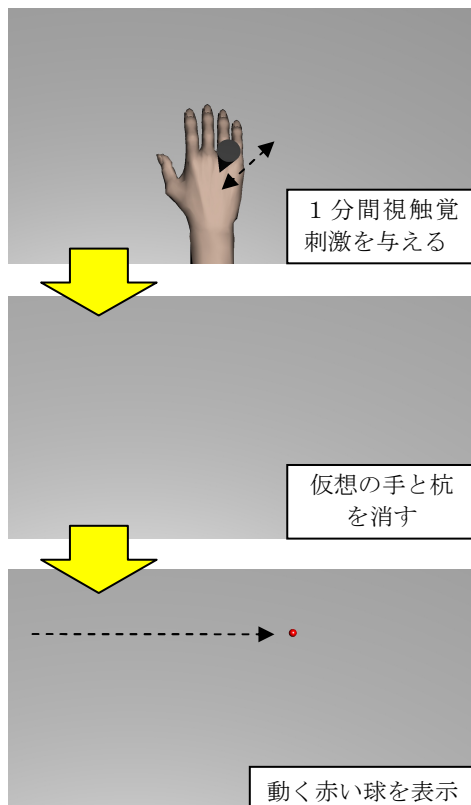


図4 試行の手順. まず図1のシステムを使用して1分間杭の動きのアニメーションと振動モーターによる視触覚刺激を被験者に1分間与えた. その後仮想の手と杭が見えないよう画面から消し, 画面の左端から右端へ動く赤い球を表示した. 被験者に自分の右人差し指があると感じられる位置に赤い球が来たら合図をしてもらい, そのタイミングで赤い球の動きを止めた. そして赤い球の位置と実際の被験者の右手の位置とのずれを測定した.

各試行において, まず図1のシステムにより杭の動きのアニメーションと振動モーターによる視触覚刺激を, 被験者に1分間与えた. その後, 仮想の手と杭が見えないよう画面から消し, 画

面の左端から右端に向かって赤い球の CG が動いていくアニメーション(球の移動速度は画面上で 41 mm/s 程度)を見せた. そして, 被験者には自分の右人差し指があると感じられる位置に赤い球が来たら口頭で合図をしてもらい, そのタイミングで赤い球の動きを止めた. その赤い球の位置を被験者が感じた被験者自身の人差し指の位置とし, その位置と実際の位置とのずれを測定した. 毎試行後, 身体イメージ転移錯覚の効果を打ち消して次の試行に影響させないために, 被験者には右手で 10 回の開閉運動を行ってもらった.

## 3. 実験結果

表1に, 被験者 12 名×3 回の計 36 回分の試行における条件 0 と条件 1~7 の測定値の差の平均値とその標準誤差, 視触覚刺激が時間的に同期した条件 4 との t 検定における p 値を示す. ただし, 測定値の差は被験者の右手の位置から仮想の手の方向(被験者から見て左側)を正としている. 図5の青いプロットは条件 0(コントロール条件)との測定値の差の平均, エラーバーはその標準誤差を示している.

ただし, 横軸の視触覚刺激の時間遅れは杭のアニメーションによる視覚刺激と振動モーターによる触覚刺激を与えるタイミングのずれを意味し, 触覚刺激よりも視覚刺激が遅れている場合を正とする. また, 黒のカーブは測定値の差の平均をガウシアン関数へフィッティング ( $y = -0.7238 + 2.585 * \exp(-x - 0.009975)^2 / 0.3518^2$ ) したものである.

表1 実験結果

条件	条件0との測定値の差の平均 cm	標準誤差 cm	条件4とのt検定におけるP値
1	0.41	0.243	0.0002
2	1.11	0.281	0.0369
3	1.65	0.321	0.3059
4	1.88	0.311	-
5	1.67	0.329	0.3235
6	1.15	0.315	0.0537
7	0.65	0.267	0.0020

\*\* : 有意水準 1%とした場合有意差あり

\* : 有意水準 5%とした場合有意差あり

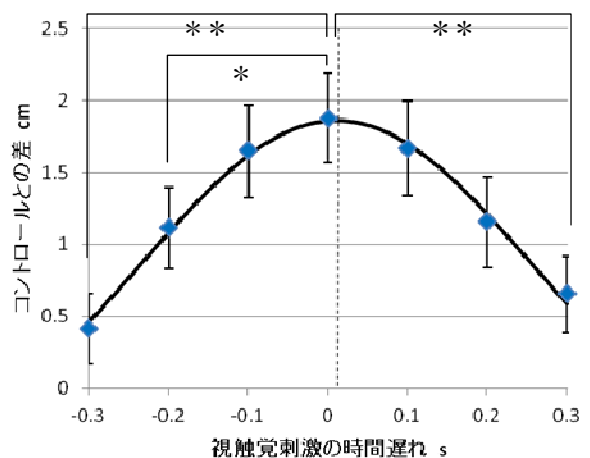


図5 実験結果. 青いプロットは条件 0 との測定値の差の平均, エラーバーはその標準誤差を示している. 横軸は杭の動きと振動刺激のタイミングのずれを意味し, 杭の動きが遅れている場合を正とする. 黒のカーブは測定値の差の平均をガウス曲線でフィッティングしたものである.

条件 1~7 の全ての場合において被験者が感じた自身の手の位置が条件 0 の場合と比較して仮想の手の方へずれる結果となり、本研究で使用したシステムにより身体イメージ転移錯覚が生起されたと考えられる。そして、視触覚刺激の時間的なずれが小さいほど仮想の手の方へ大きくずれ、視触覚刺激が同期する条件 4 においてずれが最大となった。また、視触覚刺激が同期した条件 4 と条件 1,7 では、t 検定において有意水準 1% の有意差があり(条件 1:  $p = 0.0002$ , 条件 7:  $p = 0.0020$ ), 条件 2 では有意水準 5% の有意差があった( $p = 0.037$ )。この結果から、視触覚刺激の時間的なずれが  $\pm 0.1$  s の間では身体イメージ転移の効果の大きさにほぼ変化がないが、 $\pm 0.2$  s となると効果が減少し始め、 $\pm 0.3$  s となると有意な減少が起ると考えられる。

#### 4. 議論

本研究では、CG による仮想の手と振動モーターを用いて RHI 様の錯覚を生起するシステムを構築した。このシステムにより視覚刺激と触覚刺激を被験者に与えることで、被験者が感じる自分の手の位置が仮想の手の方へずれ、仮想の手に対し RHI 様の錯覚を生起させることに成功した。

視覚刺激と触覚刺激を時間的に同期させて与えることが RHI を生起する上で重要な条件であることは RHI の発見と同時に指摘されている[Botvinick 1998]。このことは、視触覚刺激を同期させた場合とさせない場合で RHI の生起の有無を比較した実験により検証されている。しかし、視触覚刺激を同期させた場合と非同期の場合の比較した実験は行われているが、刺激のタイミングのずれの大きさが RHI の錯覚の効果に与える影響については十分に調べられていない。本研究では視覚刺激と触覚刺激のタイミングのずれの大きさが身体イメージ転移錯覚の効果に与える影響を検証するために、刺激のタイミングの大きさを変化させて RHI 様の錯覚を生起する実験を行なった。その結果、視覚と触覚への刺激が時間的に同期させた場合に最も身体イメージ転移錯覚の効果が大きく、ずれが  $\pm 0.2$  s 程度でやや有意傾向が見られ、ずれが  $\pm 0.3$  s となった場合には視覚が先行する場合と触覚が先行する場合の両方で有意な錯覚効果の減少が確認された。今回の実験で用いた視触覚刺激については、その時間的なずれが  $\pm 0.1$  s 以内であることが、身体イメージ転移錯覚の生起に必要であり、それ以上の時間差があると大幅に錯覚効果が減少すると考えられる。

従来研究では被験者に作り物の手が実験者により筆でなぞられている様子を見せ、同時に実験者が被験者の手を作り物の手と同様筆でなぞるといように、同一の現象による視覚刺激と触覚刺激を与えることで RHI を生起しているものが多い。CG を用いた研究も行われているが[Slater 2009]、その場合も視覚と触覚の同一性が重視されている。本研究では情報表示デバイス等への応用を見据え、逆に視触覚刺激の同一性が確保できない状況を設定している。視覚刺激は杭が手に刺さるという現象によるものであるのに対し、触覚刺激は振動モーターの振動刺激によるものであり、それぞれ異なる現象により視覚刺激と触覚刺激を与えたにも関わらず RHI 様の錯覚を生起することに成功した。この結果から、視覚と触覚への刺激が同一の現象によるものか否かは身体イメージ転移錯覚を生起する上で支配的な要因ではなく、異なる現象により視覚と触覚へ刺激を与えてもそれらが時間的に同期していれば錯覚を生起できることが分かった。この現象に関して、視覚による認識が支配的であり、触覚については刺激の種類の認識はあまりされずに時間的なタイミングのみを認識している可能性もある。

身体イメージが体外の物体へ転移した状態では、その転移先の物体に対して起こりうる感覚をあたかも自分の体で起しているかのように感じとれることから、身体イメージ転移錯覚を身体運動のインストラクションなどにおいて身体の状態を効率良く伝達する手法として応用できる可能性がある。しかし、人の手により触覚刺激を与えて作り物の体へ身体イメージ転移錯覚を生起する手法では、刺激を与えるタイミングを柔軟にコントロールすることができない。さらに作り物の体の形を変えたり動かしたりするのは容易ではなく、様々な姿勢における利用や運動状態で利用することは困難である。それに対し、本研究で構築したシステムでは、入手・取り扱いが容易である一般的な振動モーターを利用して触覚刺激を与えるため、システムの構築が非常に容易である。また、身体イメージの転移先として CG により作成した仮想の体を利用しているため、仮想の体の形を変えたり運動するアニメーションを表示したりすることが可能であり、様々な姿勢における利用や運動状態で利用も可能である。以上のように、本研究で構築した身体イメージ転移錯覚を生起するシステムにより、身体イメージ転移現象を安定的に生じさせることが可能であり、さらに様々な姿勢における利用や運動状態で利用も可能である。この手法による身体イメージ転移現象の生起の新たな情報提示手法への応用が期待される。

#### 参考文献

- [Ramachandran 1999] V. S. Ramachandran and S. Blakeslee: *Phantoms in the Brain*, Harper Perennial, 1999.
  - [Botvinick 1998] M. Botvinick and J. Cohen: Rubber hands 'feel' touch that eyes see, *Nature* 391, 1998.
  - [Carrie Armel 2003] K. C. Armel and V. S. Ramachandran: Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response, *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 270, 2003.
  - [Kammers 2009] M.P.M. Kammers, F. de Vignemont, L. Verhagen, H.C. Dijkerman: The rubber hand illusion in action, *Neuropsychologia* 47, 2009.
  - [Lenggenhager 2007] B. Lenggenhager, et al. : Video Ergo Sum: Manipulating Bodily Self-Consciousness, *Science* 317, 2007.
  - [Ramachandran 1996] V. S. Ramachandran and D. Rogers-Ramachandran : *Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors*, *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 263, 1996.
  - [Slater 2009] M. Slater, D. Perez-Marcos, H. H. Ehrsson and M. V. Sanchez-Vives: Inducing illusory ownership of a virtual body, *Frontiers in Neuroscience* 3, 2009.
- (1) : <http://www.blender.org/>