アクティブセルフタッチ可能なラバーハンド・イリュージョンを利用したヒトの身体所有感の検討

A Study on Body Ownership with Rubber Hand Illusion under Active Self-Touch

○正 原 正之 (東大) 正 山本 晃生 (東大)
正 樋口 俊郎 (東大)

Masayuki HARA, The University of Tokyo, masayuki@aml.t.u-tokyo.ac.jp

Akio YAMAMOTO, The University of Tokyo

Toshiro HIGUCHI, The University of Tokyo

Our previous work has demonstrated that rubber hand illusion (RHI) can be elicited under active self-touch, in which participants can stimulate both their own hand and a rubber hand by using a master-slave system. This paper, in particular, discusses force feedback effect on the RHI under such unique condition. In our RHI paradigm, the participants give haptic stimulations such as tapping and stroking their hand and the fake hand. In this condition, if the tapping force on the fake hand and the contact force on the real hand have large difference, the participants might have strange feeling and would not experience the RHI; we assume that the force feedback plays an important role to determine our body ownership. Then, this paper examines how the force feedback affects the RHI under the active self-touch by changing the magnitude of force rendering on the master device.

Key Words: Rubber hand illusion, Body ownership, Neurorobotics, Haptic technology

1. はじめに

本研究の目的は、ヒトの身体所有感 (body ownership) について、ハプティック技術の適用によりこれまで実現が困難であったアプローチを可能にしながら、様々な面からその発生メカニズムを明らかにしていくことである。また、得られる新たな知見をマルチメディアサービス等に適用し、その応用範囲を拡大することを本研究の最終目標とする。

ヒトの身体所有感に関わる興味深い現象に、ラバーハンドイリュージョン (rubber hand illusion: RHI) と呼ばれるものがある。これは、目の前に置かれたラバー (フェイク) ハンドと衝立などで隠された自分の手が絵筆などで連続的かつ同時に刺激された場合、触刺激がラバーハンド上で知覚されるようになるという錯覚現象である。Botvinick と Cohen によって RHI が発見されて以来[1]、心理物理学やニューロサイエンスなどの分野では新しい刺激・条件を加えた様々なアプローチが試みられており、今なおそのメカニズムについて活発な議論が行われている[2][3][4][5]。例えば Honmura らは、レーザーライトをラバーハンドに当て、そのスポットをラバーハンド上で動かすだけで視覚刺激から触感覚を生じさせることができ、RHI を引き起こすことができることを示唆している[3]。

これらの興味深いアプローチに対して、我々の過去の研究では空間的・時間的分解能や再現性の観点から、ハプティック技術を用いた刺激提示を提案してきた[6]。本稿では、まずこれまでに提案してきた RHI 実験に対する新しいアプローチについて説明するとともに、本研究で新しく加える条件 (力フィードバックの有無) によって考察が可能となるヒトの身体所有感に関する仮説について述べる。また、提案する手法を実際に用いて RHI 実験を行い、力フィードバックの有無がヒトの身体所有感に与える影響について検討する。

2. カフィードバックを伴うアクティブセルフタッチ

図 1 (a) に示すように、RHI 実験では被験者の手 (通常は衝立などで隠されている) と目の前に置かれたラバーハンドに実験者が絵筆やスティック、あるいは実験者自身の人差し指でストロッキングやタッピングなどの刺激を同期/非同期して与えるのが一般的である[1]。また、目を瞑った被験者の

手を実験者がラバーハンドに接触するように誘導し、それと同期/非同期して被験者の手に同様の刺激を与えるという試みもあり、この条件では視覚情報なしでも RHI を誘発することが示されている[2]。これらの実験では、刺激は受動的に与えられ、実験中に被験者が自分の意思で動作を行うことはない。また、刺激は実験者からマニュアルで与えられるため、その空間的・時間的分解能は高いとは言えない。

これに対して、アクティブセルフタッチ (active self-touch)

(a) Conventional condition

(b) Active self-touch condition

Fig. 1 Experimental conditions for the RHI experiment

という新しい概念を提案し、ハプティック技術の適用により実際の RHI 実験でこのアプローチを実現することを試みてきた。アクティブセルフタッチでは、被験者自身がフェイク（ラバー）ハンドにインタラクションが可能であり、また動作側と反対側の手には同じ強度の刺激が同期／非同期で与えられる。したがって、刺激は被験者の意思に基づいて能動的に与えられることになり、非常にインタラクティブ性の強い現象（例えば、アクティブタッチなど）が現れるものと期待できる。過去の研究では RHI 実験でアクティブセルフタッチを実現するために、マスタスレーブシステムを適用することを提案してきた[6]。提案手法では、図 1 (b) に示すように、被験者は自分の意思でマスタデバイスを操作し、目の前に置かれたフェイクハンドにストロッキングなどの刺激を与えることができる。一方、スレーブデバイスは被験者の動作と同期／非同期して駆動し、被験者の手に同様の刺激を提示する。これまでの研究では、Ehrsson らの実験プロトコル[2]を参考に実際に RHI 実験を行い、アクティブセルフタッチ下においても被験者に RHI を体験させることが可能であることを実証した。この実験では、2つのデバイスに絵筆を取り付け、ストロッキング刺激を与えることを行ったが、これはあくまで RHI の有無を確認するために行った最も基本的なものである。ハプティック技術を用いた本手法ではこれまでに実現が困難であった様々な刺激提示が可能となり、新たな観点から RHI および身体所有感について検討できるものと期待できる。

そこで本研究では、アクティブセルフタッチに力フィードバックを付加し、マスタ側とスレーブ側でその強度を変えた際に現れる影響について検討する。本稿では、力フィードバックはヒトの身体所有感の決定に必要な不可欠な要素であると考え、マスタ側とスレーブ側で与えられる力に不一致がある場合には RHI は起こらないという仮説を立てた。以下、タッピング動作においてこの仮説の検証を試みる。

3. 実験システム

3.1 2 自由度マスタスレーブシステム

本研究では、PHANToM Omni (SensAble) をマスタデバイスとして使用した。これはその入手性もさることながら、前述したように RHI 実験ではストロッキングやタッピングといった刺激を絵筆やスティックを用いて与えることが一般的であり、ペン型のハンドルを持つ PHANToM シリーズがこの種の実験に最も適していると考えたからである。

一方、スレーブデバイスに関しては、図 2 に示すようなパラレルリンク機構の 2 自由度マニピュレータを作製した。このデバイスは X 方向と Z 方向に動作が可能になるよう設計しており、ベースプレートに置かれる被験者の手の甲へ、ストロッキングあるいはタッピングなどの刺激を提示することができるようになっている。作製したデバイスは、ハーモニックギアヘッド（ギア比 50）搭載の 2 つの DC モータ（RH-8D 6006, Harmonic Drive Systems）で駆動され、これらのモータはリニアサーボアンプ（4-Q-DC Servoamplifier LSC 30/2, Maxon）によって電流制御される。それぞれのモータには光学式エンコーダ（分解能 1000ppr）が付属しており、関節角度を取得できるようになっている。また、サーボアンプへの指令電圧およびエンコーダからのパルス信号は、データ集録デバイス（NI PCIe-63232, National Instruments）により入出力制御され、制御用コンピュータ上で PHANToM Omni の情報と統合される。

3.2 実験用アプリケーションと制御システム

後述する実験を行うに当たって、本研究では実験サポート用の GUI 可能なアプリケーションを Visual C++ (Microsoft)

Fig. 2 2-DOF slave device with a parallel-link mechanism

Fig. 3 Block diagram of control system

で作成した。作成したアプリケーションでは、実験条件や制御ゲインなどの全てのパラメータをダイアログボックスあるいはキーボード操作によって行うことができるようになっている。さらに、被験者の情報（位置や速度など）がモニタ上にグラフや数値としてリアルタイムで提示され、実験者は常に実験情報の制御・監視ができるようになっている。

図 3 に本研究で適用した制御系のブロック線図を示す。スレーブデバイスはマスタデバイスの位置を目標値に PID コントローラにより位置制御される。マスタデバイスは、詳細については後述するが、スレーブデバイスを用いてあらかじめ計測したタッピングされる側の手との接触位置を基準にインピーダンス制御を行った。本稿では、タッピング動作に着目しているため、マスタデバイスとスレーブデバイスはそれぞれ Z 方向にのみ力フィードバックと駆動を行うようになっている。また、制御サンプリング時間は 1ms に設定した。

4. タッピング動作における力フィードバックの影響

4.1 実験方法および実験条件

タッピング動作における力フィードバックの影響を調べるために、まず初めに極端な例として、スレーブデバイスが被験者の手と接触した際に、マスタデバイスを介して力フィードバックを被験者に与える場合と与えない場合について、Ehrsson[2]や White[4]が用いた実験プロトコルを参考に検討を行った。本実験では、図 4 に示すように、目隠しをした健康者（右利きの 20 代男性 10 人）に右手でマスタデバイスを操作してフェイクハンド（仮想壁）をタッピングさせ、スレーブデバイスを介して、200mm 左側に置かれた左手に刺激を与

Fig. 4 Experimental environment

え続けるように指示した。タッピング動作中は、生活雑音やデバイスが発生する音を遮断すると被験者の集中力を高める目的で、イヤフォンを介してホワイトノイズを提示した。RHI 実験では、実験者の主観的な動作により同期刺激のみならず非同期刺激を与えてそれらの結果の比較から錯覚の強度を評価する必要があるが、本実験ではスレーブデバイスの動きに 500ms の定常遅れを適用し正確な非同期モードを可能とした。これにマスタ側でのフィードバックの有無を新しく加えて、2×2 の要因配置（同期 vs. 非同期、フィードバックあり vs. なし）を設定した。実際の実験では、まず始めにトレーニングセッションを行い、被験者には電子メトロノームの音を参考に 45BPM でタッピングを行う練習を十分にしてもらう。その後、4 つの条件（FF：同期モードでフィードバックあり、FFD：非同期モードでフィードバックあり、NFF：同期モードでフィードバックなし、NFFD：非同期モードでフィードバックなし）を 1 回ずつランダムに 60 秒間提示し、各試行終了直後には 7 段階リッカート尺度（seven-point Likert scale）を用いて、下記の 6 つの質問について 0 から 6 のスコア（0: “I strongly disagree with the statement”, 6: “I strongly agree with the statement” で中間の値は各自で自由に補完）を割り当てるように被験者に指示した。

- Q1: I felt as if I was tapping my left hand with a stick
 Q2: I felt as if I had more than one left hand
 Q3: I felt as if my left hand was becoming bigger
 Q4: I felt as if my left hand was moving to right hand
 Q5: I felt as if my right hand was moving to left hand
 Q6: I could not feel my left hand

なお、本研究で用いた実験プロトコルは東京大学工学系研究科研究倫理委員会の承認を受けたものであり、被験者全員からはインフォームド・コンセントを受けている。

フィードバックに関して、一般的にはスレーブデバイスに力センサを取り付け、計測した値をマスタデバイスで実現するのが理想的である。ここで考えなければならないことは、前述したように RHI 実験では同期／非同期の刺激を与えてその結果の比較を行わなければならない点である。力センサを用いる場合、スレーブデバイスが被験者の手と接触した結果を用いてマスタデバイスは力提示を行うことになるので、同期モードではこの手法は適用可能である。しかしながら非同期モードでは、まずマスタデバイス側では何らかと接触して力提示を行い、それからスレーブデバイスが被験者の手と接触するという状況になるため、力センサを用いた手法を適用することはできない。そこで本実験では図 3 に示すように、

あらかじめ計測しておいたスレーブデバイスと被験者の左手との接触位置を基準にマスタ側で垂直方向に仮想ダイナミクス ($M=0.0\text{Ns}^2/\text{mm}$, $D=0.0\text{Ns}/\text{mm}$, $K=1.0\text{N}/\text{mm}$) を構成し、インピーダンス制御により力提示を行う方法を採用した。

4.2 実験結果と統計解析

今回採用した 6 つの質問は、Ehrsson らが用いたアンケートにアレンジを加えたもので、Q1 のみが直接 RHI に関わる質問となっており、その他は被暗示性を回避するための質問となっている。また必ずしも得られるとは限らないが、RHI 実験では時折左手のシフト感が報告されることがある。アクティブセルフタッチでは右手が能動的に動作することを考慮して、Q4 および Q5 の質問も設定した。以上のことから、Q1 において同期モードと非同期モードのスコアに有意差があり、かつ、同期モードにおける Q1 と他の質問に対するスコアにも有意差がある場合には RHI が起こっていたとすることができる。図 5 にアンケート結果を示す。

図 5 の棒グラフとエラーバーは、それぞれ被験者 10 人の平均スコアとその標準誤差（standard error of mean）を示している。まず、同期性（遅れの有無）とフィードバックの有無を要因として繰り返しのある二元配置の分散分析（two-factor repeated measure ANOVA）により、各要因間の平均スコアの差について検定を行った。Q1 の平均スコアに対する ANOVA の結果、同期性には 1% 有意水準で有意差 ($F(1,9)=17.8$, $p<0.002$) があることが示唆されたが、フィードバック ($F(1,9)=1.87$, $p=0.204$) および 2 つの要因の交互作用 ($F(1,9)=0.448$, $p=0.520$) には有意差は現れなかった。この結果は、フィードバックがある場合と無い場合の両方において、同期モードでの平均スコアが有意的に高いことを示している。また、同期モードにおける Q1 の平均スコアは他の質問に対して著しく大きいこと（all $p<0.01$ ）が確認できた。以上の結果から、今回の実験ではフィードバックの有無によらず被験者は RHI を体験していたことが示唆される。

5. 仮説：深部感覚による影響

RHI を引き起こすのにフィードバックが必ずしも必要ではないという結果は、2 章で立てた仮説に反するものである。この理由について、ここではペンなどのツールを介して自分の左手をタッピングする動作に着目して議論を行う。

ペンでのタッピング動作を考えた場合、通常、自由空間上で垂直方向にペンを操作し、ペンの先端が左手と接触すると左手には操作速度に応じた力が与えられる。またこのとき、ペンの操作は瞬間的に一時止まる。動作側の手（右手）に着

Fig. 5 Mean scores of the 10 participants and their standard errors of mean (SEM) in each question

目すると、ペンと左手の間に生じる衝突力（接触力）はペンを介して指先にせん断変形を与え、動作の急停止とともに上肢の筋肉に刺激を与える。このとき、図 6 (a) に示すように、それぞれの刺激は皮膚感覚と深部感覚によって知覚され、それらが融合することで衝突感あるいは接触感が生まれるものと考えられる。一方、4 章の実験で行った力フィードバックが無い場合（条件 NFF）でのタッピングでは、スレーブデバイスが左手に接触してもマスタデバイスはペン先に拘束を与えないため、図 6 (b) に示すように、指先のせん断変形はほとんど生じない。しかしながら、左手に与えられる刺激は右手の動作と連動していることから、刺激が左手で知覚される毎にタッピング動作は一時止まり上肢の筋肉が刺激され、深部感覚によりそれが知覚されるものと考えられる。これに似た現象に、上肢の運動中に運動速度に応じた衝撃圧を手のひらに与えると、人間はその動作を急激に停止し、あたかもその場所に仮想壁（仮想剛性）があるように感じられるという知見がある[7]。4 章の同期モードでのタッピングにおける被験者の垂直方向の運動の軌跡を見てみると、図 7 に示されるように、若干深く動作が行われているものの、力フィードバックが無い場合のタッピングにおいても力フィードバックがある場合と酷似したプロファイルで、おおよそ同じ位置で動作が止められていることがわかる。また、Minamizawa らの知見[7]では動作を行う側の手に直接刺激を与えて仮想壁あるいは仮想剛性を知覚させているが、本研究の結果は動作側とは異なる部位に刺激を与えても同じような現象を引き起こすことができる可能性を示唆している。

以上のことから、力フィードバックが無い場合においても動作の一時停止に伴い、被験者は何らかの衝突感を深部感覚で知覚していたのではないかと考えられる。これにより、力フィードバックの有無に関わらず RHI の体験が報告されたものと推測する。またこの結果は、動作の急停止による深部感覚への影響を示唆しており、動作を静的（例えば、ゆっくり

Fig. 7 Tapping profiles (trajectory of master device in Z direction) for the last 10 s of a participant

押すなど）にすれば、力フィードバックの影響が顕著に現れる可能性もある。

6. まとめ

本稿では、マスタスレーブシステムを用いたアクティブセルフタッチという RHI 実験への新たなアプローチを紹介し、これに新しく力提示機能を利用した条件を付加して、力フィードバックが RHI に及ぼす影響について議論を行った。本研究では、タッピング動作においてフェイクハンドからの力フィードバックが無い場合には RHI は生じないという仮説を立て、実際にマスタスレーブシステムを用いて実験を行った。実験の結果は、RHI を引き起こすのに必ずしも力フィードバックは必要ではないというものであり、このような結果が出た理由について深部感覚の影響を示唆した。

今後は、深部感覚への影響を小さくして、再度、力フィードバックの影響について検討するとともに、身体所有感の自由な操作とその応用について考えていく予定である。

7. 謝辞

本研究は、平成 23 年度独立行政法人日本学術振興会科学研究費若手研究 (B) (基金) (23700246) の援助を受けて行われたものである。ここに感謝の意を表す。

文 献

- [1] Botvinick, M. and Cohen, J., "Rubber hands 'feel' touch that eyes see," *Nature*, vol.391, pp.756, 1998.
- [2] Ehrsson, H. H., Holmes, N. P. and R. E. Passingham, "Touching a Rubber Hand: Feeling of Body Ownership is Associated with Activity in Multisensory Brain Areas," *Journal of Neuroscience*, vol.25, no.45, pp.10564–10573, 2005.
- [3] Honma, M., Koyamab, S. and Osada, Y., "Double tactile sensations evoked by a single visual stimulus on a rubber hand," *Neuroscience Research*, vol.65, no.3, pp.307–311, 2009.
- [4] Dummer, T., Picot-Annand, A., Neal, T. and Moore, C., "Movement and the rubber hand illusion," *Perception*, vol.38, pp.271–280, 2009.
- [5] White, R. C., Davies, A. M. A Davies, Halleen, T. J. and Davies, M., "Tactile expectations and the perception of self-touch: An investigation using the rubber hand paradigm," *Consciousness and Cognition*, vol.19, no.2, pp.505–519, 2010.
- [6] Hara, M., Rognini, G., Evans, N., Blanke, O., Yamamoto, A., Bleuler, H. and Higuchi, T., "A Novel Approach to the Manipulation of Body-parts Ownership Using a Bilateral Master-slave System," *Proceedings of 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4664–4669, 2011.
- [7] Minamizawa, K., Kamuro, S., Kawakami, N. and Tachi, S., "A Palm-Worn Haptic Display for Bimanual Operations," *Proceedings of the International Conference, EuroHaptics 2008*, pp.458–463, 2008.