

ロボットハンド錯覚における視覚フィードバックの 時空間的整合性の影響

The effect of distorted temporal-spatial visual feedback on Robot Hand Illusion

井岡 裕也[†], 嶋田 総太郎[‡]

Yuya Ioka, Sotaro Shimada

[†] 明治大学大学院理工学研究科, [‡] 明治大学理工学部[†] Graduate School of Science and Technology, Meiji University[‡] School of Science and Technology, Meiji University

ce191004@meiji.ac.jp

概要

自己身体認識に関する錯覚に、視覚情報と運動情報の統合によってロボットハンドに対して運動主体感および身体保持感を感じるロボットハンド錯覚がある。本稿では、ロボットハンド錯覚において、遅延（時間的不整合）に加えて実際の手に対してバーチャルハンドの指先の方向および手の平の向きを変化（空間的不整合）させたとき、錯覚がどのように生起するかを行動実験によって調べた。結果としては、遅延が 100ms のとき、被験者の右手とバーチャルハンドの指先の方向および手の平の向きが一致している条件でのみ身体保持感が生起した。また、遅延が 300ms 以下のとき、被験者の右手とバーチャルハンドが空間的に整合している条件、不整合の条件のどちらにおいても運動主体感が生起した。これらのことから、被験者の右手に対してバーチャルハンドが時間的または空間的に不整合のとき身体保持感は生起しないことがわかった。また、被験者の右手とバーチャルハンドの間に時間的整合性があれば運動主体感が生起することがわかった。

キーワード：自己身体認識, 運動主体感, 身体保持感,
ロボットハンド錯覚 (Robot hand illusion)

1. 研究背景

自己身体認識とは、ある身体部位が自分自身のものであると認識することである。ギャラガーによると、自己身体感は身体保持感 (Ownership) と運動主体感 (Agency) の 2 種類の感覚から構成される (Gallager, 2000; Tsakiris et al., 2007)。身体保持感とは、「この身体は自分のものである」という感覚である。また、運動主体感とは、「この運動を引き起こしたのは自分である」という感覚である。我々は、自身の身体と他者の身体をこれらの感覚により区別することができる。しかし、身体保持感は自分自身の身体に対して生起するだけでなく、その他の物体に対しても生起することが報告されている。その一例が「ロボットハンド錯覚 (robot hand illusion: RoHI)」である。

RoHI は身体保持感と運動主体感の双方に関係して

おり、視覚情報と運動情報の統合によってロボットハンドに対して自己身体感を生起する。Ismail らは、被験者の右手にデータグローブを装着し、データグローブと同期している被験者の手と同様の向きに設置された CG のバーチャルハンドを操作させ、その映像を見せて映像に遅延を挿入するという実験を行った (Ismail & Shimada, 2016)。その結果としては、映像遅延が 490ms 以下の場合には運動主体感が生起し、190ms 以下の場合には運動主体感に加えて身体保持感も生起することがわかった。

また、データグローブによってバーチャルハンドを操作した RoHI の先行研究に、バーチャルハンドの指先の方向を変化させたものもある (Salomon et al., 2015)。この研究では、バーチャルハンドを 3D モニター上に映し、被験者は 3D グラスを装着してバーチャルハンドを観察した。実験では、バーチャルハンドの向きを被験者の手の向きに対して 0° , 90° , 180° , 270° の 4 方向に変化させて実験を行った。結果としては、被験者の手とバーチャルハンドの動きが一致している同期条件において、バーチャルハンドが 0° , 90° のときのように自己の身体として動作可能な向き (被験者がバーチャルハンドを観察している体勢から行える向き) に設置されている条件より、 180° , 270° のときのように自己の身体として動作不可能な向きに設置されている条件のほうが身体保持感および運動主体感が減衰することが示された。

本研究では、バーチャルハンドの指先の方向を被験者の手と同様の方向および 180° 逆の方向に変化させ、さらにバーチャルハンドの手の平の向きを被験者の手と同じ下向きおよび反対の上向きに変化させた場合 (これらの指先の方向と手の平の向きの条件を体勢条件とする) に身体保持感および運動主体感がどのように変化するか、これに加えてバーチャルハンドと被験

者の手の動作間に遅延を入れた場合に、身体保持感および運動主体感が減衰するかどうかを調査した。

2. 実験方法

2.1 被験者

被験者には 16 人の右利きの男女 (21.6 ± 1.1 歳, 平均 ± 標準偏差, 女性 6 名) が参加した。全ての被験者が正常な視力 (眼鏡やコンタクトレンズによる矯正を含む) を持つ健常者であった。被験者には、実験前に実験に関する概要および安全性の説明を行い、研究参加同意書に署名してもらうことで参加意思を確認した。

2.2 実験機器

図 1 のようにテーブルに各機材を設置した。被験者は衝立により自分の手を直接見えないようにした。被験者の右手にセンサーグローブを装着し、開閉運動を計測した。センサーグローブは Arduino (Arduino Mega 2560 Rev3, ARDUINO) と曲げセンサー (RB-Flx-07, RobotShop) を用いて自作し、これにより CG のバーチャルハンドを操作させた。バーチャルハンドは Unity (Ver. 2018.3.1f1, Unity Technologies) を用いて作成し、その映像は被験者の正面に置かれた液晶モニタ (EV2450, EIZO) に表示した。被験者は液晶モニタに表示されたバーチャルハンドの映像を観察した。Arduino や Unity 等のシステムにより生じる映像の内在遅延は約 100ms であった。

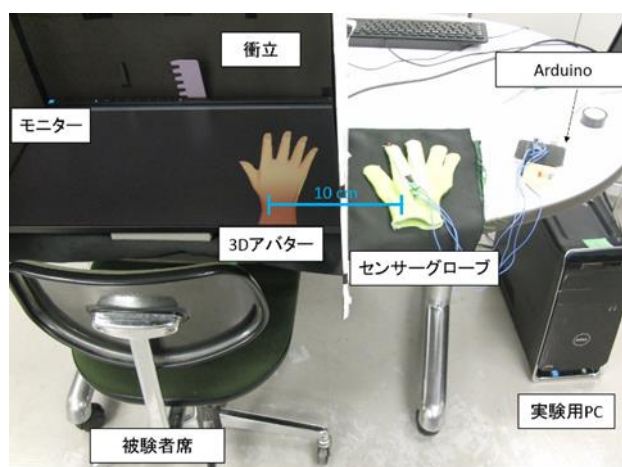


図 1 実験装置

2.3 実験環境

バーチャルハンドの映像に 3 種類の映像遅延 (100ms, 300ms, 500ms. それぞれ内在遅延を含む) を挿入した。また、被験者の右手の位置および向きは図 1 の通りに固定したが、バーチャルハンドの向きおよび位置を Unity 上で変化させ、図 2 のような 4 種類の体勢条件 (Forward-Downward : FD, Forward-Upward : FU, Opposite-Downward : OD, Opposite-Upward : OU) を作成した。このとき、Forward はバーチャルハンドの指先の方向が被験者の右手と一致している条件であり、一方で Opposite はバーチャルハンドの指先の方向が被験者の右手に対し 180° 逆に回転している条件である。また、Downward はバーチャルハンドの手の平の向きが被験者の右手と一致している条件であり、一方で Upward はバーチャルハンドの手の平の向きが逆になっている条件である。

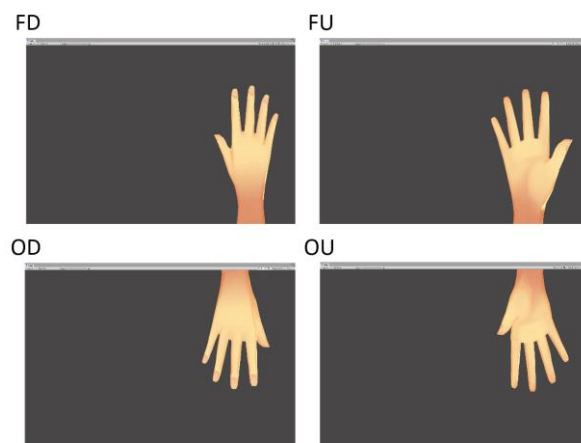


図 2 バーチャルハンドの体勢条件

被験者には 30 秒間、0.5Hz の開閉運動をしてもらった。その後、主観評価アンケートに答えてもらった。アンケートは先行研究[1]で用いられたものを使い、これは身体保持感と運動主体感およびそのダミー項目の全 16 項目から構成される。評価には 7 段階 (-3 ~ +3) のライカートスケールを用いた。

被験者は、遅延 3 条件 × 指先の方向 2 条件 × 手の平の向き 2 条件の 12 条件を行い、1 条件につき 1 試行ずつ行った。なお、体勢条件の順番と体勢条件内の遅延条件の順番は全被験者でランダムだった。なお、実験中は被験者に耳栓を装着してもらった。

3. 実験結果

3.1 身体保持感

図3に体勢条件毎の身体保持感における主観評価アンケートの平均スコアを示した。エラーバーは標準誤差を表す。t検定を行ったところ、FD-100 (FD条件の100ms遅延)において有意に0より高いスコアが見られた ($p < 0.01$)。また、FD以外の300ms遅延条件と500ms遅延条件において有意に0より小さいスコア値が見られた (FU-300, OD-300, FD-500, FU-500, OD-500, OU-500, $p < 0.001$; OU-300, $p < 0.005$)。さらに、条件間での差を詳しく見るために、[指先の方向 (Forward, Opposite), 手の平の向き (Downward, Upward), 遅延 (100ms遅延, 300ms遅延, 500ms遅延)]の対応のある三要因分散分析を行ったところ、指先の方向の2条件間において有意な主効果が見られた ($F(1, 15) = 6.41, p < 0.05$)。また、遅延条件において有意な主効果が見られた ($F(2, 30) = 37.2, p < 0.001$)。下位検定の結果、FD条件では、すべての遅延条件間、FU条件では、100ms遅延条件と300ms遅延および500ms遅延それぞれの条件間、OD条件では、100ms遅延条件と300ms遅延および500ms遅延それぞれの条件間、OU条件では、すべての遅延条件間、さらには100ms遅延および300ms遅延条件下における指先の方向の条件 (Forward-Opposite)間において有意差が見られた ($p < 0.01$, Tukey-Kramer's HSD)。

3.2 運動主体感

図4に体勢条件毎の運動主体感における主観評価アンケートの平均スコアを示した。エラーバーは標準誤差を表す。t検定を行ったところ、FDの100ms遅延および300ms遅延条件、FUの100ms遅延条件、ODの100ms遅延条件、OUの100ms遅延および300ms遅延条件において有意に0より大きいスコア値が見られた (FD-100, FU-100, OD-100, OU-100, $p < 0.001$; FD-300, $p < 0.05$; OU-300, $p < 0.005$)。さらに、条件間での差を詳しく見るために、[指先の方向 (Forward, Opposite), 手の平の向き (Downward, Upward), 遅延 (100ms遅延, 300ms遅延, 500ms遅延)]の対応のある三要因分散分析を行ったところ、遅延条件において主効果が見られた ($F(2, 30) = 22.5, p < 0.001$)。下位検定の結果、FD条件では、100ms遅延条件と300ms遅延および500ms遅延それぞれの条件との間、FU条件では、100ms遅延条件と300ms遅延お

よび500ms遅延それぞれの条件との間、OD条件では、100ms遅延条件と300ms遅延および500ms遅延それぞれの条件との間、OU条件では、100ms遅延と500ms遅延条件間において有意差が見られた ($p < 0.01$, Tukey-Kramer's HSD)。また、OU条件の300ms遅延と500ms遅延条件間においても有意差が見られた ($p < 0.05$, Tukey-Kramer's HSD)。

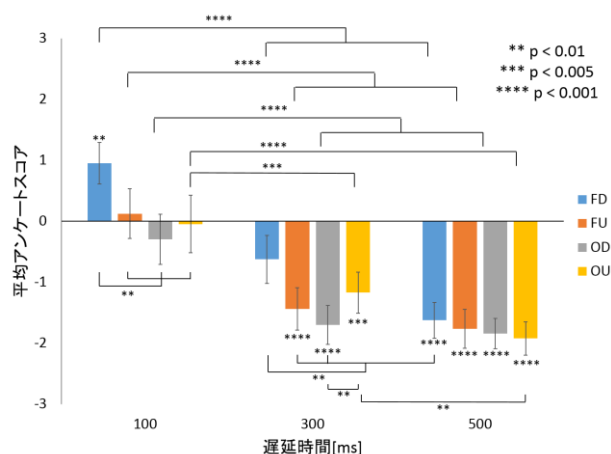


図3 身体保持感の主観的評価

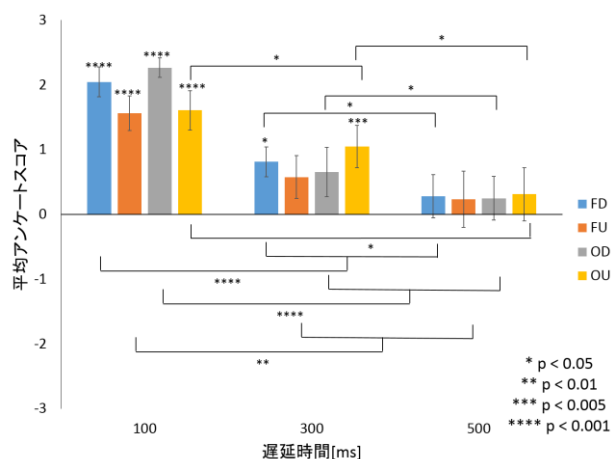


図4 運動主体感の主観的評価

4. 考察

4.1 身体保持感

FD条件では、100ms遅延時に有意な身体保持感のスコアを示し、300ms遅延時および500ms遅延時のスコアよりも有意に高かった。すなわち、被験者の手の体勢とバーチャルハンドの体勢が一致している条件では、300ms遅延条件および500ms遅延条件で身体保持感が生起しなかったと言える。これらの結果は先行研

究 (Ismail & Shimada, 2016) の結果と一致する。

また, 100ms 遅延において, FD 条件の身体保持感のスコアのみが有意に 0 より大きい値であり, FD 条件のスコアのほうがそれ以外の体勢条件のスコアよりも有意に高い値を示した。これは, 先行研究 (Salomon et al., 2015) の結果において, バーチャルハンドの体勢が 0° (本実験での FD 条件) のときの身体保持感のスコアのほうがバーチャルハンドの体勢が 180° (本実験での OD 条件) の身体保持感のスコアよりも有意に高いことと一致する。

また, すべての体勢条件において 100ms 遅延のスコアのほうが 300ms 遅延および 500ms 遅延それぞれのスコアよりも有意に高い値を示した。さらに, FD 条件と OU 条件において, 300ms 遅延のスコアの方が 500ms 遅延のスコアよりも有意に高かった。これらのことから, 100ms 遅延では FD 条件でのみ身体保持感が生起するが, それ以外の体勢条件では生起せず, 遅延時間の増加に伴って身体保持感が減衰することが示唆された。

また, 300ms 遅延において, FD 条件の身体保持感のスコアは FU 条件および OD 条件よりも有意に高かった。したがって, バーチャルハンドの体勢や運動の時間的整合性等の視覚情報が実際の被験者の手の体勢や運動感覚と乖離すると, 身体保持感が生起しないと考えられる。

4.2 運動主体感

100ms 遅延ではすべての体勢条件で有意に 0 より高い運動主体感のスコアが見られ, 300ms 遅延では FD 条件と OU 条件においても有意に 0 より高かった。100ms 遅延のスコアとそれ以外の遅延条件のスコアを比べると, すべての体勢条件において, 100ms 遅延のスコアの方がそれ以外の遅延条件よりも有意に高かった。また, 300ms 遅延のスコアと 500ms 遅延のスコアを比べると, FD 条件と OD 条件, OU 条件において, 300ms 遅延のスコアの方が 500ms 遅延のスコアよりも有意に高かった。これらの結果から, 100ms 遅延と 300ms 遅延では運動主体感が生起するが, 遅延の増加に伴って運動主体感が減弱し, 500ms 遅延では生起しなかったことが言える。これらの結果は先行研究 (Ismail & Shimada, 2016) とも一致する。

また, これらの結果で特筆すべきは, 遅延条件ではスコア結果に有意差が見られるものの, 体勢条件間では見られないことである。すなわち, 実際の被験者の

手の体勢がバーチャルハンドの体勢と乖離していても時間的整合性があれば運動主体感が生起することが考えられる。

4.3 まとめ

本稿では, ロボットハンド錯覚において, 遅延 (時間的不整合) に加えて実際の手に対してバーチャルハンドの指先の方向および手の平の向きを変化 (空間的不整合) させたとき, 錯覚がどのように生起するかを行動実験によって調べた。その結果, バーチャルハンドの体勢や運動の時間的整合性等の視覚情報が実際の被験者の手の体勢や運動感覚と乖離すると, 身体保持感が生起しないことが示唆された。また, 運動主体感においては, 実際の被験者の手の体勢がバーチャルハンドの体勢と乖離していても時間的整合性があれば運動主体感が生起することが示唆された。

文献

- [1] S. Gallagher, (2000) "Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science" Trends in Cognitive Sciences, Vol. 4, No. 1, pp. 14-21.
- [2] M. Tsakiris, S. Schutz-Bosbach, S. Gallagher, (2007) "On agency and body-ownership: Phenomenological and neurocognitive reflections", Consciousness and Cognition, Vol. 16, No. 3, pp. 645-660.
- [3] M. Botvinick, J. Cohen, (1998) "Rubber hands 'feel' touch that eyes see", Nature, No.391, pp. 756-756
- [4] MR. Longo, F. Schuur, MP. Kammers, M. Tsakiris, P. Haggard, (2008) "What is embodiment? A psychometric approach", Cognition, No. 107, No. 3, pp. 978-998
- [5] M. Tsakiris, P. Haggard, (2005) "The rubber hand illusion revisited: Visuotactile integration and self-attribution", Journal of Experiment Psychology: Human Perception and Perform, Vol. 31, No.1, pp. 80-91
- [6] M. A. F. Ismail., S. Shimada, (2015) "Robot Hand Illusion under Delayed Visual Feedback: Relationship between the Senses of Ownership and Agency", PLoS PME, Vol. 11, No. 7: e0159619
- [7] R. Salomon, N. B. Fernandez, M. van Elk, N. Vachicouras, F. Sabatier, A. Tychinskaya, J. Llobera, O. Blanke, (2016) "Changing motor perception by sensorimotor conflicts and body ownership", Nature, Vol. 6, No. 25847