

遅延した自己身体像や視野映像が自己のものとして 感じられなくなる臨界遅れ時間*1

神谷 聖耶・葎田 貴子

東京工業大学 大学院理工学研究科
〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1 I1-36

1. 序 論

ヒトが何らかの目的にもとづき身体動作を行う際の行為と、その時観察される視覚的フィードバックの間に生じる時間遅れは、遠隔操作ロボットなどのリアルタイム制御システムのみならず、ヒトの身体や眼球運動など自己身体そのものの制御過程においても物理的には回避困難なことが多い¹⁾。これらの時間遅延は、ヒトの感覚・知覚系を順応させることで心理的に短くすることは原理的に可能である²⁾。しかしながら、比較的短時間の操作性や使用感が装置やシステム全体のユーザビリティを決定づける場合は、使用者に十分な順応時間が与えられるとは限らない。その場合、フィードバックの遅延に使用者が気づいてはいるものの、ある種の操作性、例えば、自分の身体を制御しているかのような使用感は損なわれず、作業効率も維持される臨界遅れ時間が分かると、遅れていても操作性やユーザビリティが損なわれないシステムの設計指標となり有利である。

このような使用感や自分の身体を制御しているかのような感覚の一つとして、主に身体リハビリテーションの文脈や哲学の観点から、身体は自分のものである感覚(ownership)や操作しているのは自分である感覚(sense of agency)という概念が提案されている³⁾。これらの感覚は従来の研究では四肢や自己身体そのものに対し

て検討されている⁴⁾。我々の一人称視野も視覚フィードバックの結果得られる成分を含むと考えられるので、視野に対してもある種のownershipやagencyが想定されるだろう。そこで、本研究では映像に映る我々の手腕に対してはownershipやagencyを、映像そのものについてはownershipを計測し、被験者が視覚的映像に対して自分自身の一人称的視野であるという感覚が測定できるか、さらにそこに映像の時間的遅延がどのように影響するかを検討した。加えて、被験者の眼球運動や手の軌道を記録し、自己身体感や自己視野感と被験者の身体行動の関連を検討した。

2. 手 法

2.1 装置

被験者は暗室で顎台で頭部を固定され(図1)、覆いによって机上の刺激(レゴブロック)を直接見ることが出来ない状態で、前方70cmに設置された視覚ディスプレイ(EIZO, T965, サンプリングレート60Hz)に映る映像を通してのみ刺激を視覚的に観察可能であった。被験者は刺激に手で接触可能で、その様子は被験者

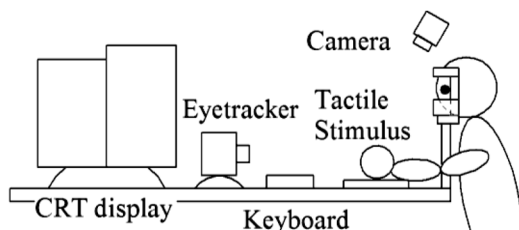


図1 実験装置概念図。

2013年夏季大会。

*1本研究はSCOPEの補助を受けた。

の頭上のカメラ (Point Grey Research, FL3-U3-13S2C-CS) で撮影され、PCを通じて一定の遅延を伴い視覚ディスプレイに表示された。

2.1.1 眼球運動の測定

アイトラッキングシステムが被験者の眼球運動を計測する目的で単眼に使用された (SR Research EyeLink CL2000, 画像処理方式, 空間解像度 0.01° , サンプリングレート 2000Hz)。サッカード検出のパラメータは、振幅, 加速度, 速度の閾値がそれぞれ 0.5° , $9500^\circ/\text{s}^2$, $30^\circ/\text{s}$ であった。

2.1.2 手の位置の測定

被験者の頭上のカメラで撮影された映像は、視覚刺激の取得以外に被験者の手の動きを記録する目的でも用いられ、被験者の利き手の人差し指付け根に貼付された円形のマーカ位置が Open CV の 2-1Hough 変換による円検出により事後的に抽出された。

2.2 課題

被験者は Block copying task を行った⁵⁾。課題の状況を図2に示す。卓上にブロックを設置可能なシートが設置され、シート内は Resource エリア, Model エリア, Workspace エリアの3つの領域に分けられている。Model エリアには8つのブロックが見本として配置された。見本の配置は試行ごとにランダムであった。Resource エリアには見本の複製に利用する12個のブロックが配置された。ブロックは赤, 黄, 青, 白の4色が各3個ずつであった。ブロックの設置位置は各試行間で変わらないものの、ブロックの色は試行間でランダムに変化した。Workspace エリアは被験者が見本の複製を作成する場所で、試行開始時にはこの位置にブロックはなかった。被験者の課題は、Workspace エ

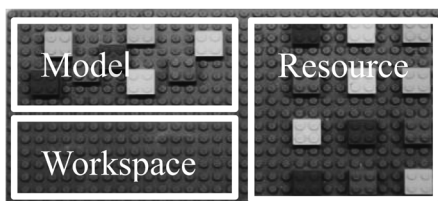


図2 刺激の配置と三つのエリア。

リアに Model エリアに存在する見本の複製を片手のみを用いて早く正確に作成し、見本の複製が完了したと判断した後、キーボードのスペースキーを押して試行を終了することであった。

2.3 手続き

9名の被験者が、東京工業大学ヒトを対象とする疫学研究等倫理委員会承認のインフォームドコンセントの下、実験に参加した。

各試行における視覚映像の遅延は、実時間から $50, 150, 250, 350, 500, 800\text{ms}$ の6条件であった。これら遅延条件の提示順序はブロック間でランダムであった。実験は全20ブロックで構成され、最初の4ブロックでは各試行終了後、映像に映る手に対する ownership と agency, および映像そのものに対する visual ownership に関して実験者により口頭で質問が実施された。質問は先行研究のものを⁴⁾、日本語化し本実験用に視覚用にも拡張したものを用いた。

3. 結果

3.1 作業時間

視覚ディスプレイに映像が提示されてから被験者がキーボードを押すまでの時間を、視覚画像の遅延に対してプロットした結果では (図3), 視覚的フィードバックの遅延の増加に比

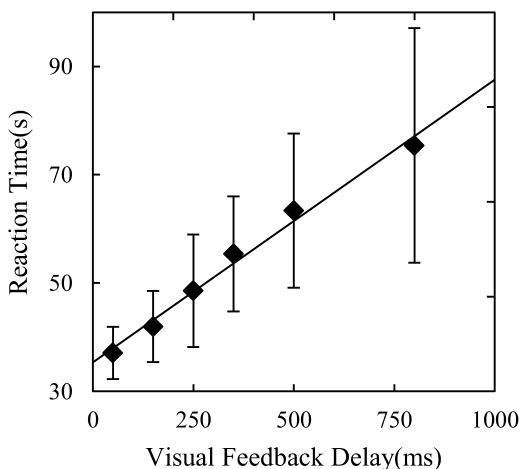


図3 映像の遅延時間に対するブロックコピー作業実施にかかった作業時間の関係。

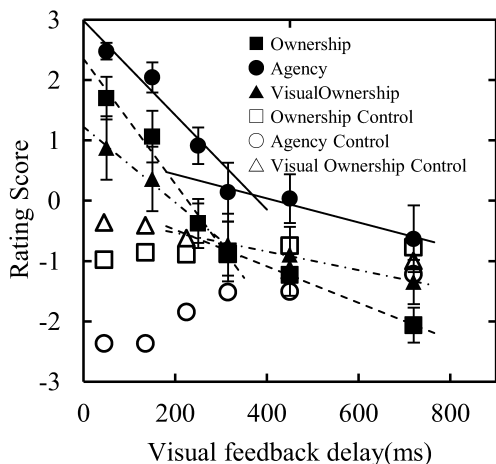


図4 映像の遅延時間に対し質問紙によるownership, agency, visual ownership の変化。

例して、試行時間が線形に増加した ($R^2 > 0.99$)。このことから、遅延の増加により課題の難易度は上がるものの遂行不可能になるほどのものではないことが示された。

3.2 質問紙

映像の中の手に対する自己身体感および映像そのものに対する自己視野感を質問紙によって評定した結果を、視覚画像の遅延に対してプロットしたものを図4に示す。横軸は視覚的映像の遅延を、縦軸は質問紙に対する被験者の回答の得点を示す。凡例は質問項目を示しており、凡例内部が白抜きのもは一種のダミーである統制質問項目、黒塗りのものが本実験でターゲットとした質問項目を示す。遅延が短いときは課題条件の得点は高く、統制条件の得点は低いものの、遅延が増加するにつれて課題条件の得点が低下し、統制条件との得点の差が見られなくなったり、関係が逆転したりする傾向がみられた。遅延が増加するにつれて課題条件における質問の得点の低下が見られたものの、遅延が350msを超えたところで低下率に変化が見られた。遅延が250ms以下の得点の近似直線と350ms以上の近似直線の交点を求めたところ、交点のx座標はownership, agency, visual ownership についてそれぞれ290ms, 359ms, 296msであった。このことは被験者の映像の

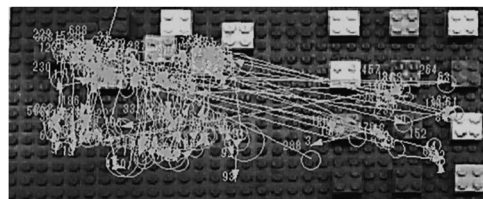


図5 スキャンパスの例。

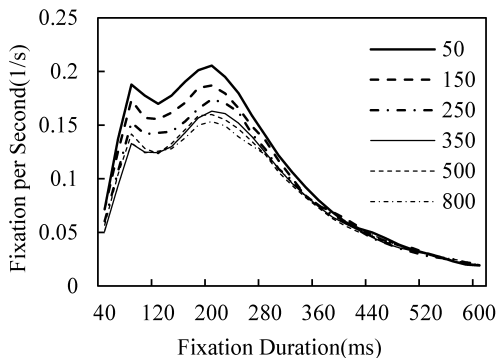


図6 固視時間の分布。

中の手に対する自己身体感覚のみならず、視覚映像そのものに対する自己視野感覚も約300～350msを境界としてモードの変容があることを示唆している。

3.3 スキャンパス

1被験者の1試行中のスキャンパスの代表例を図5に示す。ブロックコピー課題を実施した先行研究と同様に⁶⁾、被験者はResourceエリアとWorkspaceエリアとをModelエリアを経由して行き来するような視線の動作を繰り返していることが認められた。これは被験者が見本を確認しながら作業を行っていることを示唆しており、本研究で先行研究を追試できたことを示唆している。

3.4 固視時間の分布

遅延時間条件ごとに固視時間の出現頻度を正規化し、三項平均した結果では(図6)、どの遅延時間条件においても、80msと220msにピークのある類似した分布が認められた。しかし、遅延条件間の違いに着目すると、遅延時間が50から350msまでの間は全体のグラフの傾向が同じ形状を保ったまま徐々に低下するが、遅延時間が350msを超えると、この低下が認

められなくなりグラフがほぼ重なることが分かる。これは350 ms以上の遅延では被験者が作業をより触覚情報に依存したものに變更し視覚情報の取得方略を変えるために、固視時間の分布に差がみられなくなった結果の反映と解釈される。

4. 考察と結論

映像の遅延時間が増加した際に、被験者の作業そのものが実行不可能になる例は見られなかった。しかし、被験者の自己身体感覚および自己感覚は300～350 msを境界としてモードの変化が認められた。このことは手を用いた自然な作業において、作業効率と作業中視覚的に観察される自己の手腕や視覚映像そのものに対する自己身体感覚は同一ではないことを示している。また、後者に関して300～350 ms以下の時間遅延を伴い動作する身体像は本人にとって自己の身体である一方、それ以上の遅延時間を伴う像は心理的には他者ないし非自己である可能性を示している。この値はゴムの手を用いた静的な視覚的身体像に関して自己身体感覚を検討した研究結果や⁷⁾、視覚と触覚間で比較的定常的な刺激の主観的同期を保つための臨界値とも矛盾しない⁸⁾。このことから、静的、動的によらず視覚的身体像が自己のものではなくなる臨界遅延時間が300～350 msであり、これが視覚と触覚の主観的同期と共通する高次脳機能に媒介されている解釈が考えられる。なお、視覚的映像の遅延の増加に伴い、被験者が実際の手の位置と視覚的に観察される手の空間的な位置が一致するよう身体制御を行うことで、モダリティ間の情報の時空間的不一致を補償している可能性があり、この種の身体制御限界がこの臨界遅れ時間である可能性もあるため、現在更なるデータ解析を行っている。

質問紙の結果は質問のカテゴリによらず、特に映像に映る手に対するownershipとvisual ownershipに類似した時間推移が見られた。今回の結果から両者の具体的な関係は明らかにすることはできないものの、我々の一人称視野に

関係した視覚フィードバックに対しても、手腕と類似した行為とフィードバックの時間関係が類推適応できる部分が示されたといえる。今後は古典的な眼球運動研究や頭部運動研究、例えば視野の安定と自己視野感ないしは自己身体感の対応や、今回技術的に条件設定不可能だったvisual agencyの検討を併せて、詳しい調査が必要であろう。

本研究では、手腕のみならず観察している映像に対しても自己身体感および自己視野感の計測に成功し、300～350 msがこれらの感覚が自己のものから他人ないし非自己のものへと変化する臨界時間遅れであることを、質問紙のみならず眼球運動指標によっても示した。この知見はリアルタイムにヒトが操作を行うシステムにおいて自分が操作しているような感覚を保つための設計指標の一つになると考えられるほか、質問紙に依らずセンサ類により自己身体感覚を推定した計測手法そのものも今後の応用が期待される。

文 献

- 1) T. Honda, M. Hirashima and D. Nozaki: Adaptation to visual feedback delay influences visuomotor learning. *PLoS ONE*, **7**, e37900, 2012.
- 2) D. W. Cunningham, A. Vincent and B. H. Tsou: Sensorimotor adaptation to violations of temporal contiguity. *Psychological Science*, **12**, 532–535, 2001.
- 3) S. Gallagher: Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, **4**, 14–21, 2000.
- 4) A. Kalckert and H. Ehrsson: Moving a rubber hand that feels like your own: A dissociation of ownership and agency. *Frontiers in Human Neuroscience*, **6**, 1–14, 2012.
- 5) D. H. Ballard, M. N. Hayhoe and J. B. Pelz: Memory representations in natural tasks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **7**, 68–82, 1995.
- 6) J. Pelz, M. Hayhoe and R. Loeber: The

- coordination of eye, head, and hand movements in a natural task. *Experimental Brain Research*, **139**, 266–277, 2001.
- 7) S. Shimada, K. Fukuda and K. Hiraki: Rubber hand illusion under delayed visual feedback. *PloS ONE*, **4**, 1–5, 2009.
- 8) W. Fujisaki and S. Nishida: Audio-tactile superiority over visuo-tactile and audio-visual combinations in the temporal resolution of synchrony perception. *Experimental Brain Research*, **198**, 245–259, 2009.