

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：37102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K00218

研究課題名(和文) 遅延順応による同時性知覚の変化は行為主体感をどう変容させるか

研究課題名(英文) Sense of agency after exposure to delayed sensory feedback: How does it covary with the change in perception of synchrony?

研究代表者

菅野 禎盛 (Sugano, Yoshimori)

九州産業大学・商学部・教授

研究者番号：90352103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：人と機械の相互作用においては感覚フィードバックの遅延が行為主体感(sense of agency: SoA)を大きく阻害する。一方、遅延をしばらく経験すると順応により遅延が実際より小さく感じられることが知られている(同時性知覚の再校正、temporal recalibration: TR)。本研究では、TRによる動作とフィードバックの同時性の知覚の再校正に伴ってSoAがどのように変化するのかを心理物理実験と信号検出理論による分析により明らかにすることを目的とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、工学的および医学的問題への基礎的なデータを提供できる点にある。工学的問題としては例えば、視覚、聴覚、触覚、などの複数の感覚でフィードバックが呈示されるマルチモーダルインターフェースや仮想現実環境におけるユーザ経験の改善が挙げられる。一方で医学的問題としては例えば、統合失調症や機能性運動障害の症状の治療あるいは緩和が挙げられる。これらの病では動作に対する行為主体感の変容が症状の一因であると言われている。フィードバック遅延への順応に伴う遅延の予測・校正能力の向上や行為主体感の変容を利用して症状を緩和する手段の開発につなげることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In the interaction between humans and machines, the delay of sensory feedback significantly inhibits the sense of agency (SoA). On the other hand, it is known that experiencing the delay for a while leads to perceptual adaptation, making the delay feel smaller than it actually is (temporal recalibration: TR). This study aims to investigate how the sense of agency changes with the recalibration of the perception of simultaneity between action and feedback through psychophysical experiments and analysis using signal detection theory.

研究分野：実験心理学

キーワード：行為主体感 順応 時間知覚 感覚運動協調

1. 研究開始当初の背景

人と機械の相互作用においては、機械からのフィードバックに遅延があると、行為主体感 (sense of agency: SoA) や没入感 (sense of immersion: SoI) が大きく阻害されることが知られている [1-3]。一方で知覚心理学的な知見として、フィードバック遅延をしばらく体験すると同時性知覚の再較正が生じ主観的には遅延が小さく感じられる「時間的再較正」と呼ばれる現象が知られている (temporal recalibration: TR) [4-6]。驚くべきことに、TR 後には遅延なしのフィードバックが運動より前に到来したように感じられる (図 1)。これは TR が同時性知覚だけでなく、行為主体感 (sense of agency: SoA) や行為没入感 (sense of immersion: SoI) といった動作意識をも大きく変容させることを示しており、フィードバック遅延によって阻害された SoA や SoI が TR によって回復する可能性を示唆している。一方、TR と非常に類似した現象として動作とその感覚フィードバックのタイミングが実際より接近して知覚される「意図による束ね」と呼ばれる現象が知られている (intentional binding: IB) [9]。IB と TR はともに、フィードバックが数百ミリ秒以上遅延すると弱まり [4, 5, 9]、行為主体感 (SoA) に強く影響される [10, 11] など、共通した特徴をもつ。IB と SoA の関係については多くの研究が行われており、両者の強い関連性が示されている [2, 9]。その一方、意外なことに TR と SoA を関連付ける研究は最近までほとんどなされていない [7, 8]。

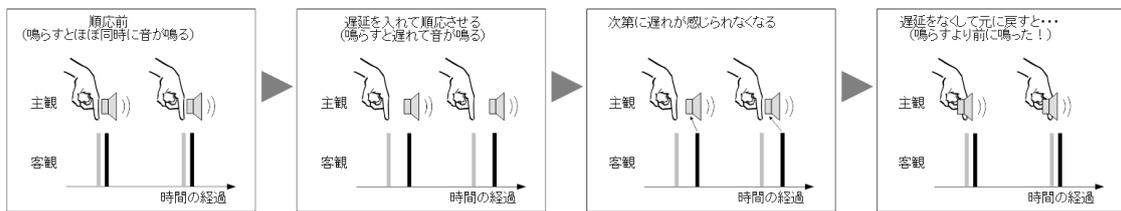


図 1 動作とフィードバックの同時性知覚の時間的再較正

2. 研究の目的

本研究では、動作に対する感覚フィードバックに遅延がある場合、遅延への順応に伴って行為主体感 (SoA) がどのように変化するかを心理物理実験によって系統的に明らかにすることを目的とした。具体的には、(1)遅延フィードバック刺激への順応の結果として生じる同時性知覚の変容 (TR) によってフィードバック刺激に対する SoA がどのように変容するのか (TR と SoA の関連性)、(2)SoA の変容が識別感度の変化として現われる知覚的処理の段階で生じているのか、それとも判断バイアスの変化のような認知的処理の段階で生じているのか (SoA 変容の処理レベル)、について信号検出理論に基づいた分析によって検討した。

3. 研究の方法

本研究では、任意のテンポもしくは外部信号に合わせて一定の時間間隔をとって指で打叩し続けるフィンガータッピング課題を応用して TR を誘導し SoA を測定した。この課題は元々 Knoblich と Repp [12, 13] によって開発されたものである。課題にはいくつかの変種があるが、典型的なものは以下のようなものである。まず、実験参加者が指でキーボードやタッチパッドなどの機器を打叩するとその動作に対する合図として光や音が呈示される (感覚フィードバック刺激)。実験参加者が一定の時間間隔で打叩を継続しているうちに、ある確率で当初は自分の動作によって制御されていたはずの感覚フィードバック刺激の呈示がいつの間にかコンピュータによる制御に変わってしまう。つまり、実験参加者が打叩しようがしまいが一定の時間間隔でフィードバック刺激が呈示される。実験参加者の課題は、コンピュータ制御に変わったかどうかを確信度とともに回答することである。本研究では、この Knoblich と Repp による実験課題に手を加え、動作に対する感覚フィードバック刺激を意図的に遅延させて呈示することで動作とフィードバックの同時性の知覚に時間的再較正 (TR) を引き起こす段階を追加した (図 2)。実験参加

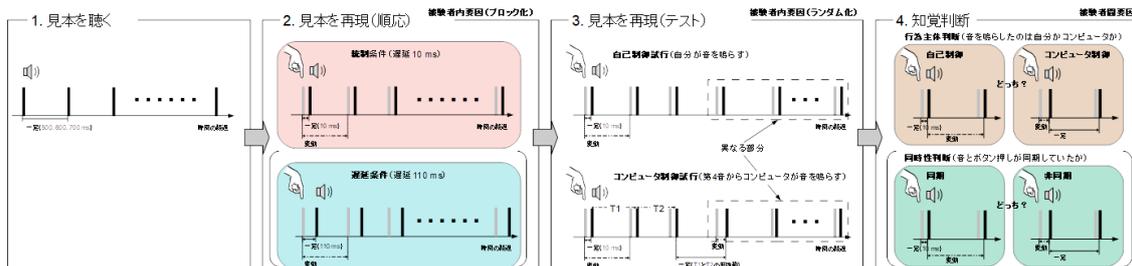


図 2 フィンガータッピング課題を応用した TR 誘導および SoA 測定 (実験 2 の場合)

者は見本音列を聴いた後、キー押しによって音を鳴らすことで見本音列を再現した。再現は2回続けて行われた。1回目の再現（順応段階）は必ずすべての音の呈示が実験参加者のキー押しによって制御された。ここでは音のタイミングに100ミリ秒の遅延が挿入される遅延条件と遅延がない統制条件とが設定された¹。2回目の再現（テスト段階）が実験の要点となる部分である。ここでは実験参加者が見本音列を再現している途中で音の制御がコンピュータに入れ替わる場合が50%の確率で生じた。そして実験参加者はキー押しとフィードバック音が同期していたかどうか（同時性判断：SJ）の判断か、もしくはフィードバック音が自分のキー押しによって制御されていたかどうか（行為主体判断：AJ）を3段階の確信度（例：確かに、多分、かも知れない）とともに回答する課題を行った。実験データを信号検出理論[14]により分析し識別感度と判断バイアスの指標を得た（図3）。

実験は2つ実施された。実験1（対面実験）では同時性判断と行為主体判断を同じ実験参加者が同じ試行内で実施し（確信度評定は行為主体判断に対してのみ実施）、行為主体判断データに対してのみ信号検出理論による分析を行った[15]。実験2（オンライン実験）では、同じ実験刺激に対して同時性判断を行うグループと行為主体判断を行うグループとに実験参加者を分けることで2つの課題の間の干渉を無くし、さらに同時性判断に対しても信号検出理論による分析を適用できるように実験手続きを改良した[16]。コロナ禍[18]というやむを得ない事情があったものの、実験2では、本研究のように刺激呈示と反応取得に高い時間的精度が要求される実験であってもオンラインで実施可能かどうか、また対面実験で得られた結果を再現できるかどうかについても併せて検討した。実験1（対面実験）の実験参加者は筆者が勤務する大学の学生から募集し、実験制御用アプリケーションであるE-prime[19]上で動作する実験プログラムを用いて筆者の実験室にて実験を実施した。一方、実験2（オンライン実験）の実験参加者はクラウドワークス[20]上で募集した。オンライン実験の実験参加者は、実験実施用ウェブサイト(Inquisit)[21]から各自が所有するパーソナルコンピュータに実験実施用のアプリケーション(Inquisit Player)をダウンロードし、各自のパーソナルコンピュータ上でアプリケーションを動作させることで実験用プログラムを実行して実験を実施した。

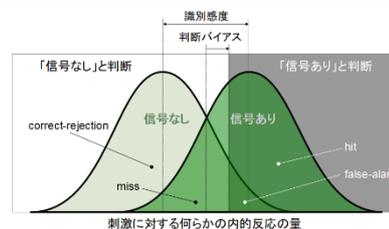


図3 信号検出理論による分析

4. 研究成果

実験1（対面実験）の結果、先行研究[7, 8, 17]の結果と同様に、最も同時である（SJ）もしくは最も自分の行為の結果である（AJ）と感じられる音のタイミングは、音の遅延に順応した場合はそうでない場合よりも遅くなった（図4左）。図4左からはSJとAJの両方で、赤い線によって表されている遅延条件の位置が青い線で表される統制条件よりも左へ、つまりより音がキー押しよりも遅れる方向に移動していることが分かる。さらにAJについて信号検出理論による分析を行った結果、そのような変化は識別感度の変化によるものではなく、判断バイアスの変化によるものであることが明らかになった（図4右）。一般的に、識別感

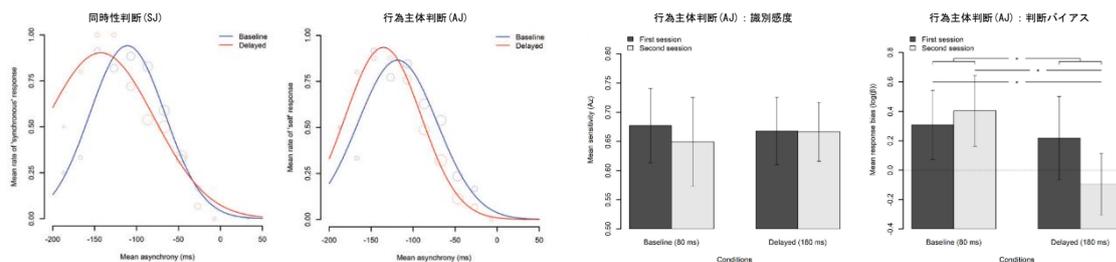


図4 実験1（対面実験）で得られた同時性判断（SJ）と行為主体判断（AJ）の分析結果。

（左）SJとAJをキー押しと音のずれに対してプロットしたもの（単純化のため後半の第2セッションのデータのみ表示）。（右）AJを信号検出理論で分析した結果得られた識別感度と判断バイアス（灰色が第2セッションのデータ）。Sugano(2021)の図を改変[15]。

¹ 実験1（対面実験）では統制条件の音の遅延は実際には80ミリ秒、遅延条件の音の遅延は180ミリ秒に設定した。統制条件でも遅延があるのは動作と音のフィードバックが同時であると感じられるようにするためである（聴覚と触覚の知覚潜時の違いから、0ミリ秒では音が動作より先に呈示されたこと知覚されてしまう）。実験2（オンライン実験）では実験参加者の実験環境では音の出力に余分な遅延が入ることが事前に予想されたため、実験を制御するプログラムの上では統制条件の音の遅延は10ミリ秒に、遅延条件の音の遅延は110ミリ秒に設定した。実際の音出力の遅延を著者の所有するパーソナルコンピュータを使ってオシロスコープにより計測した結果、各条件での音の遅延は実験1と同程度になることを確認した。残念ながら、オンラインで参加した実験参加者の環境で遅延がどの程度であったかを測定することはできなかった。

度の変化は情報処理の比較的初期段階の知覚的なメカニズムによって引き起こされ、また判断バイアスの変化は情報処理の比較的後期の段階の知覚的ないしは認知的なメカニズムによって引き起こされると考えられる。これを踏まえれば、フィードバック遅延への順応に伴う AJ の変化が判断バイアスの変化によってもたらされたことは、それが比較的後期の情報処理によって引き起こされた現象であることを示唆している[15]。

実験 2（オンライン実験）では、おおむね実験 1（対面実験）の結果を再現することができ、比較的高い時間的精度が要求される実験であってもオンラインで実施可能であることを確認することができた。また大学生が実験参加者であった対面実験と異なり、幅広い年齢の実験参加者を集めることができ、実験参加者の多様性を広げることができた²。実験 2（オンライン実験）の結果、実験 1（対面実験）と同じく、フィードバック遅延へ順応することで最も同時であるないしは最も自分の行為であると判断する音の提示タイミングが統制条件よりも遅くなった（時間的再校正）。さらに、実験 1 では見られなかった、AJ で自分の行為であると判断する音の提示タイミングの幅が広がるという結果が得られた。信号検出理論による分析の結果からは、AJ の変化が識別感度と判断バイアスの両方の変化によるものであることが示された。AJ の識別感度の変化が見られたことは実験 1 とは異なるものの、判断バイアスの変化は実験 1 の結果に沿うものであった。また、SJ については識別感度と判断バイアスともに有意な変化は見られなかった。AJ の識別感度に変化が見られたことは、自分の行為であると判断する音の提示タイミングの幅が広がったことと強く関連しているものと思われる。これは、実験 1 と比べて実験 2 では提示する音の数を少し増やしたことで、より強く遅延への順応が生じたためかも知れない[18]。しかし確かな理由は不明である。

まとめると、自発的な行為（キー押しやボタン押し）の後に合図として提示されるフィードバック音を意図的に遅延すると、先行研究で示されているように、行為とフィードバック音の同時性の知覚が変化するだけでなく（時間的再校正）[4-6]、フィードバック音に対する行為主体感も変容する[7, 8]。本研究で明らかにされた新たな知見は、そのような行為主体感の変化が知覚的識別感度の変化によるものというよりはむしろ判断バイアスの変化によるものであるということである[15, 16]。これは、遅延への順応によってもたらされた行為主体感の変化が比較的後期の情報処理過程によって生じているものであることを強く示唆する結果である。

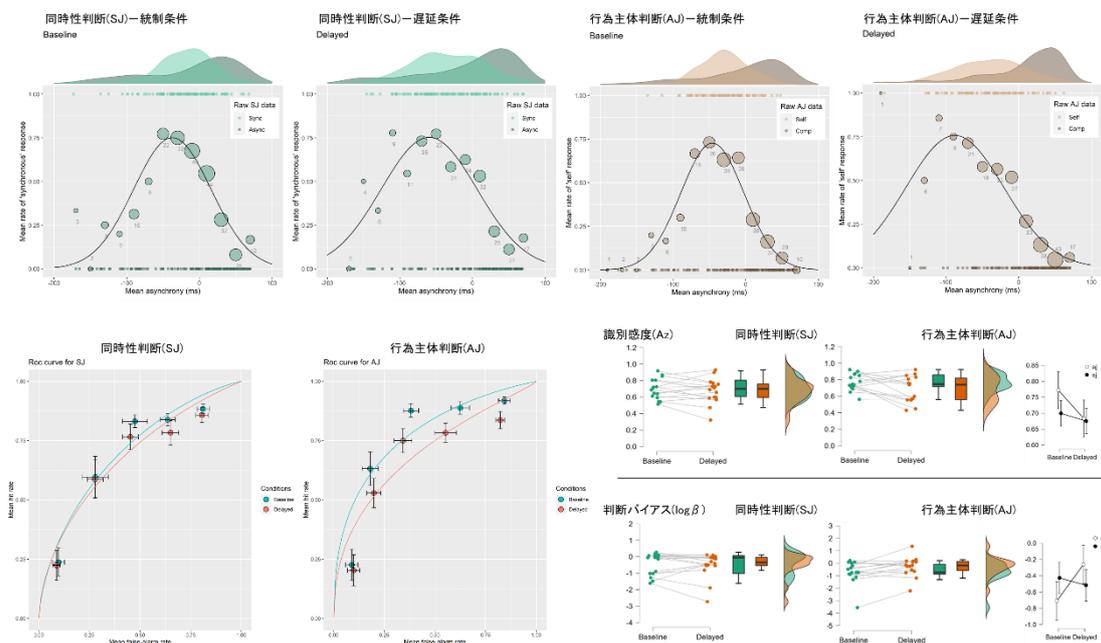


図 5 実験 2（オンライン実験）で得られた同時性判断（SJ）と行為主体判断（AJ）の分析結果。（上段）SJ と AJ をキー押しと音のずれに対してプロットしたもの。（下段）SJ と AJ を信号検出理論で分析した結果得られた ROC 曲線（左）および実験参加者ごとの識別感度と判断バイアス（右）。菅野(2022)の図を改変[16]。

² 実験参加者の年齢と性別は、18人が参加した実験 1（対面実験）では平均 20.2 才（19 才～22 才）で女性が 4 人、31人が参加した実験 2（オンライン実験）では平均 38.7 才（21 才～56 才）で女性が 13 名であった。

<引用文献>

- [1] Wegner, D. M., & Wheatley, T. (1999). Apparent mental causation- Sources of the experience of will. *American Psychologist*, 54(7), 480-492.
- [2] Engbert, K., Wohlschläger, A., & Haggard, P. (2008). Who is causing what? The sense of agency is relational and efferent-triggered. *Cognition*, 107(2), 693-704.
- [3] Morice, A. H. P., Siegler, I. A., & Bardy, B. G. (2008). Action-perception patterns in virtual ball bouncing: Combating system latency and tracking functional validity. *Journal of Neuroscience Methods*, 169(1), 255-266.
- [4] Stetson, C., Cui, X., Montague, P. R., & Eagleman, D. M. (2006). Motor-sensory recalibration leads to an illusory reversal of action and sensation. *Neuron*, 51(5), 651-659.
- [5] Heron, J., Hanson, J. V. M., & Whitaker, D. (2009). Effect before cause: supramodal recalibration of sensorimotor timing. *PloS One*, 4(11), e7681. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0007681>
- [6] Sugano, Y., Keetels, M., & Vroomen, J. (2010). Adaptation to motor-visual and motor-auditory temporal lags transfer across modalities. *Experimental Brain Research*, 201(3), 393-399.
- [7] Timm, J., Schönwiesner, M., Sanmiguel, I., & Schröger, E. (2014). Sensation of agency and perception of temporal order. *Consciousness and Cognition*, 23, 42-52.
- [8] Imaizumi, S., & Asai, T. (2015). Dissociation of agency and body ownership following visuomotor temporal recalibration. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 9(35), <https://doi.org/10.3389/fnint.2015.00035>
- [9] Haggard, P., Clark, S., & Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. *Nature Neuroscience*, 5(4), 382-385.
- [10] Rohde, M., Greiner, L., & Ernst, M. O. (2014). Asymmetries in visuomotor recalibration of time perception: Does causal binding distort the window of integration? *Acta Psychologica*, 147, 127-135.
- [11] Rohde, M., Greiner, L., & Ernst, M. O. (2014). Asymmetries in visuomotor recalibration of time perception: Does causal binding distort the window of integration? *Acta Psychologica*, 147, 127-135.
- [12] Repp, B. H., & Knoblich, G. (2007). Toward a psychophysics of agency: Detecting gain and loss of control over auditory action effects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(2), 469-482.
- [13] Green, D. M., & Swets, J. A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics*. Wiley New York.
- [14] Green, D. M., & Swets, J. A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics*. Wiley New York.
- [15] Sugano, Y. (2021). Audiomotor Temporal Recalibration Modulates Decision Criterion of Self-Agency but Not Perceptual Sensitivity. *Frontiers in Psychology*, 12(580441), <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.580441>
- [16] 菅野禎盛 (2022). 遅延聴覚フィードバックへの順応は行為主体感をどのように変化させるか (3) -オンライン実験による検討, 日本心理学会第86回大会講演論文集.
- [17] Sugano, Y., Keetels, M., & Vroomen, J. (2012). The build-up and transfer of sensorimotor temporal recalibration measured via a synchronization task. *Frontiers in Psychology*, 3(246). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00246>
- [18] 滝島雅子 (2020-07-01). “「新型コロナウイルス」関連のことば ～「コロナ禍」の使い方～”. NHK 放送文化研究所. https://www.nhk.or.jp/bunken/research/kotoba/20200701_4.html (参照: 2023-05-02).
- [19] <https://pstnet.com/products/e-prime/>
- [20] <https://crowdworks.jp/>
- [21] <https://www.millisecond.com/>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshimori Sugano	4. 巻 12:580441
2. 論文標題 Audimotor Temporal Recalibration Modulates Decision Criterion of Self-Agency but Not Perceptual Sensitivity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpsyg.2021.580441	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 菅野禎盛
2. 発表標題 遅延聴覚フィードバックへの順応は行為主体感をどのように変化させるか（3） - オンライン実験による検討
3. 学会等名 日本心理学会第86回大会（ハイブリッド）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅野禎盛
2. 発表標題 遅延聴覚フィードバックへの順応は行為主体感をどのように変化させるか（2） 行為主体感の時間窓と同時性の時間窓の関係
3. 学会等名 日本心理学会第84回大会（オンライン）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅野禎盛
2. 発表標題 遅延聴覚フィードバックへの順応は行為主体感をどのように変化させるか タッピング課題と信号検出理論による検討
3. 学会等名 日本心理学会第82回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshimori Sugano
2. 発表標題 How does an exposure to delayed auditory feedback (DAF) change a sense of agency?
3. 学会等名 第10回多感覚研究会 (co-sponsored by Tohoku Universal Acoustical Communication Month 2018 satellite Event "Multisensory Seminar") (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅野禎盛
2. 発表標題 遅延聴覚フィードバックへの順応に伴う行為主体感の変化
3. 学会等名 日本基礎心理学会第37回大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Research Yoshimori Sugano Official Web Site https://yoshimorisugano.wordpress.com/research/
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------