

身体運動に伴う遅延聴覚フィードバックの知覚順応

Perceptual Calibration to Delayed Auditory Feedback of Self-body Movement

樋田 浩一^{†‡}, 上野 佳奈子^{†‡}, 嶋田 総太郎^{†‡}
Koichi Toida, Kanako Ueno, Sotaro Shimada

[†] 明治大学 [‡] 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
[†] Meiji University [‡] Japan Science and Technology Agency, CREST
sshimada@isc.meiji.ac.jp

Abstract

Temporal contingency between self-body movement and its auditory feedback is crucial to perceive external auditory events. The present study examined whether delay detection of self-generated sound is affected by short-term exposure to delayed auditory feedback. The subject pressed a button with their right index finger and judged whether the auditory feedback delivered through a headphone was delayed or not, compared to the sensation of the finger movement. The range of auditory feedback delay was varied across 4 conditions. To calculate the point of subjective simultaneity (PSS), where the delay detection rate was 50 %, we have fitted a logistic function to the delay detection probability curve for each subject. The results showed that PSSs were significantly different from each other (Tukey-Kramer's HSD, $P < 0.01$). This indicates that PSS was modulated by the range of the delay used in the experiment; PSS became longer as the delay lengthened. However, this shift was no longer observed when the delay range with minimal delay of approximately 300ms was applied. We suppose that the perceptual delay in auditory feedback of a self-body movement is, to some extent, automatically recalibrated to the frequently exposed duration between self-body movement and the auditory feedback.

Keywords — Delayed auditory feedback, Motor-sensory, Temporal recalibration, Point of subjective simultaneity

1. はじめに

我々が外界との関わりのなかで活動する上で、身体運動に伴う外界からの感覚情報の統合処理は重要な役割を担っている。自らの身体運動と感覚情報を正しい組み合わせで対応付ける条件として、両者の空間的・時間的整合性が挙げられる。

時間的整合性に着目すると、身体運動に伴う体性感覚のフィードバックと聴覚刺激のフィードバックには、それぞれについて様々な遅延が伴う。

体性感覚の伝搬速度は平均して 50 m/s 程度であり^[1]、身体運動の部位が脳から離れるほど遅延が大きくなる。聴覚刺激は、音の発生源から常温空気中で約 340 m/s で伝わり、体内においては内耳の蝸牛における変換プロセスに約 40 μ s^[2]、脳への信号の伝搬に約 10 ms 要する。このように、身体運動とそれに伴う聴覚フィードバックの対応付けを行う際、脳が身体運動由来の体性感覚フィードバックを受け取る時刻と、聴覚フィードバックの信号が脳に入力される時刻は異なる。

実際の場合では、さらに遅延が増幅する場合が考えられる。道具の使用を想定すると、我々はその外部システムが持つ遅延に適応的に対処しないことには道具を使用できない。例えば楽器演奏においては、楽器から音が鳴るまでに遅延が存在する場合があるにも関わらず、演奏者はその遅延に適応して演奏することができる。

これらのことから、脳には、異なる時刻に入力される感覚情報を同一のイベントとして対応付ける何らかの方略が存在すると考えられる。特に道具の使用時には、多感覚統合が行われる際の時間的整合性の判断基準が変わると考えられる。

これまでに我々は、身体運動と聴覚フィードバックの遅延弁別閾値に着目し、自らの身体運動に伴う感覚フィードバックに遅延を伴う場合の知覚特性について調べてきた^{[3][4][5]}。本研究では、身体運動に伴う遅延聴覚フィードバックの遅延弁別閾値を求める実験を複数の実験条件幅で行い、外部システムの遅延に応じて遅延弁別閾が適応的に変動することを検証した。

2. 実験

身体運動は、既往の研究^[4]と同様に右手人差し指でスイッチを押す動作とし、スイッチの押下に伴ってパルス音を呈示する装置を用いた。パルス音にはエフェクタを用いて時間遅延を付加し、ヘッドフォンからモノラル信号で呈示した。

被験者はアイマスクを掛け椅子に座り、実験者の合図を受けて実験装置のスイッチを押す動作を行い、動作により呈示される聴覚刺激が遅れていると感じるか口頭で回答した(以下、非同時性判断と記す)。聴覚フィードバックの遅延時間は8水準とし、各水準はランダムな順序で呈示した(恒常法)。実験は各遅延水準各1回を含む8試行で1ブロックとし、8ブロック合計64試行とした。試行間の間隔(ISI)は10秒とした。遅延時間は、条件1として19~253 ms, 条件2として119~353 ms, 条件3として186~419 ms(以上全て33.3 ms 間隔), さらに遅延時間範囲の幅の影響を考慮し、条件4として19~119 ms(14.3 ms 間隔)の合計4条件とした。条件ごとの遅延時間の範囲を表1に示す。

以上の実験は、静穏環境を統制した防音室内で行い、聴覚の正常な右利き大学生63名(男性32名, 女性31名)が参加した。全ての実験に被験者の重複はない。条件2に参加した2名の男性被験者および条件3に参加した1名の女性被験者は、全ての試行において「遅れている」と回答したため、以降の解析対象からは除外した。

実験データは、遅延水準ごとに遅れていると回答した回数を記録し、その確率を計算した。実験条件ごとにロジスティック曲線へのフィッティングを行い、非同時性判断の確率が50%となる遅延時間を主観的同時点(Point of Subjective Simultaneity, 以下PSSと記す)として求めた。

3. 結果

各水準における全被験者の回答の平均から求めた非同時性判断の割合と遅延時間の関係を図1に示す。遅延時間幅が33.3 ms 刻みの条件1~3の回帰曲線は、曲率(傾き)が類似しており、ほぼ相似形を描いた。一方、遅延時間幅が14.3 ms 刻みの条件4は、他の曲線と比べて傾きが急峻となったが、有意差はなかった(Tukey-Kramer's HSD)。PSSは、条件1が136.3 ms, 条件2が208.9 ms, 条件3が309.1 ms, 条件4が89.1 msと異なり、全ての条件間で有意差が確認された(Tukey-Kramer's HSD, $P < 0.01$)。個人差の分析として、各被験者の非同時性判断曲線から求めたPSSと傾きの平均値と標準誤差を図2・図3にそれぞれ示す。

表1 各条件の遅延時間範囲

条件	遅延時間範囲 [ms]	水準間隔 [ms]	被験者数 (解析対象者数)	年齢 (平均±標準偏差)
1	19~253	33.3	12 (12)	20.8±1.4
2	118~353	33.3	26 (24)	21.3±1.3
3	186~419	33.3	13 (12)	20.8±1.7
4	19~119	14.3	12 (12)	21.0±1.5

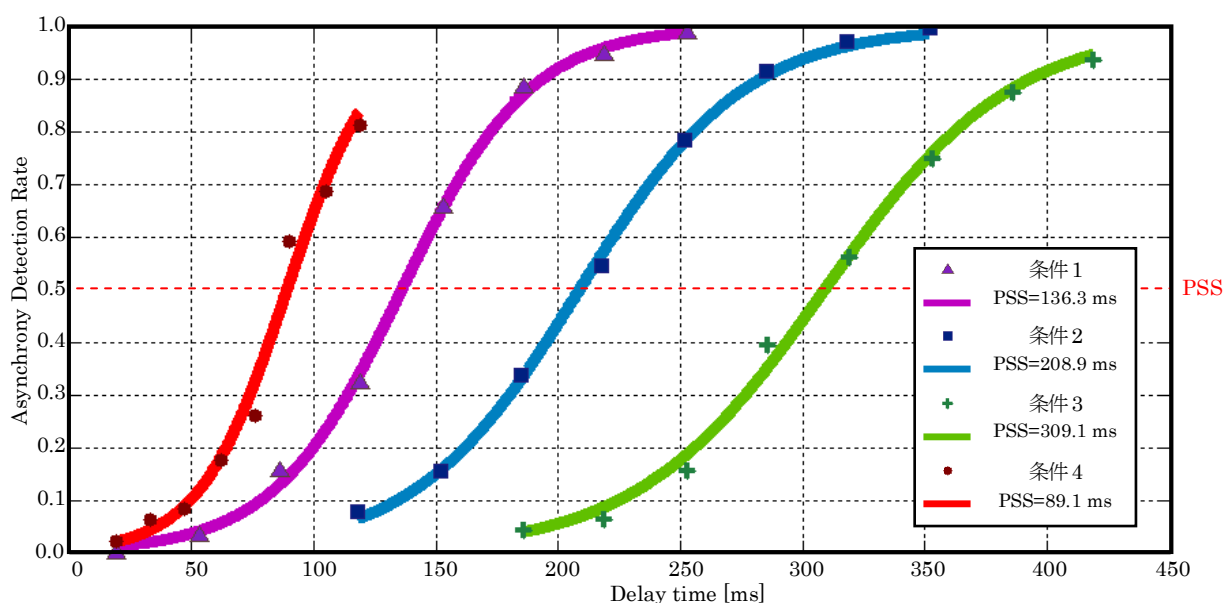


図1 全被験者の判断結果から求めた非同時性判断曲線

4. 考察

各条件の PSS が有意に異なることから、遅延弁別閾は呈示された遅延時間の範囲に応じて調整されることが示された。すなわち、呈示する遅延が大きいほど、PSS も大きくなる。

この結果を受け、どれぐらいの遅延までならば調整できるかを明らかにするため、追加条件として、遅延時間範囲を 286~519 ms とした条件で同様の実験を実施した。しかし、被験者 4 名中 4 名が全ての試行において「遅れている」と回答したため、実験を打ち切った。以上のことから、遅延弁別閾が調整されるのは PSS が 300 ms 程度までの条件であることが示唆された。

各条件の PSS は呈示した遅延時間範囲のほぼ中央に位置することから、被験者には同時・非同時の回答を半々にするような調整作用がはたらき、非同時性判断の基準を変えた可能性も考えられる。実験終了後、被験者には実験趣旨を説明しデブリーフィングを行ったところ、呈示される刺激に非同時性判断を合わせたことを示唆する回答は得られなかった。このことから、遅延弁別閾の調整は自動的・無意識的な現象だと考えられる。

セッション内の PSS の推移を調べるために、全被験者の判断結果から求めた各ブロックの PSS を図 4 に示す。遅延時間範囲の大きい条件 2、条件 3 に着目すると、最初の 2~3 ブロックにおいて、PSS が遅延の大きい方向へシフトしている。このことから、遅延への調整は比較的速やかに行われていることが推察できる。

今回示された実験結果の妥当性について、時間的再調整 (Temporal Recalibration, 以下 TR と示す) に関する一連の研究と比較して考察する。視聴覚刺激条件については、一定の視聴覚刺激の時間ずれに順応した後で PSS を測定すると、順応した時間ずれの方向に視聴覚の PSS がシフトすることが示されている⁶⁾。同様の現象は身体運動と感覚(視・聴・触覚)フィードバック間にも生起することが報告されており⁷⁾⁸⁾、さらに、順応後に遅延のない状態を呈示すると、あたかも身体運動よりも先に感覚フィードバックが生起したような錯覚、すなわち因果性の

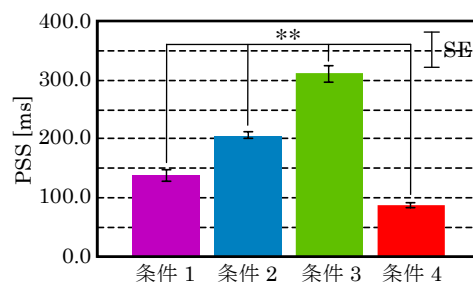


図 2 被験者ごとの主観的同時点の平均

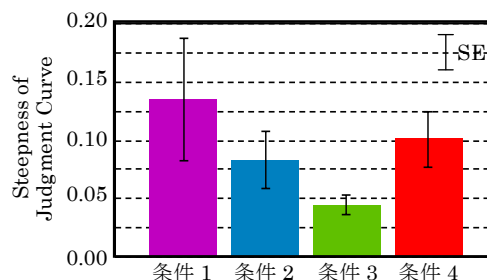


図 3 被験者ごとの判断曲線の傾きの平均

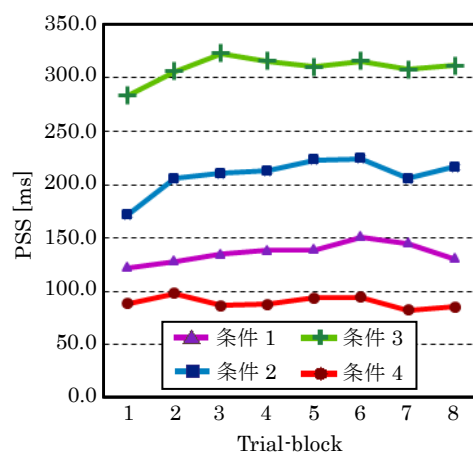


図 4 セッション内の主観的同時点の推移

逆転が生じることが複数の報告で示されている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。これらの研究では、テスト試行である非同時性判断タスクもしくは時間順序判断 (TOJ) タスクの前に、数分程度、遅延刺激を呈示する順応フェーズが設けられている。今回の実験は順応フェーズを設けていないが、セッション内で呈示した遅延時間幅に応じて PSS の調整が行われており、一種の TR 現象とも考えられる。

順応フェーズがない場合にも主観的同時点変動することは、本研究により新たに見出された現象であり、遅延に対して調整するはたらきの強さを示していると考えられる。この理由として、能動的運動と感覚フィードバックの間には強い因果関係あり、両者が知覚的に強く結びつきやすい (intentional binding) ことが挙げられる¹¹⁾¹²⁾。人

間が身体を動かすとき、運動野から筋肉へ動作指令が出るのと同時に、その情報が運動野から頭頂葉へ送られる(遠心性コピー)。この遠心性コピーの情報によって、運動に伴うフィードバックの到来時刻や様相について予測を立てることができる(フォワードモデル)と考えられている^{[3][13]}。フォワードモデルによる予測と実際の感覚フィードバックが時間的に一致していない場合、ずれが微小であればフォワードモデルの再学習が起こり、時間的整合性判断、すなわち同時性の判断範囲が変化すると考えられる。

身体運動に伴う聴覚フィードバックの PSS の値については、既往の研究において、最短約 40 ms と報告されており^[8]、この結果と比較すると、本実験の PSS は非常に大きい。これは、実験装置という外部システムを介したことに起因すると考えられる。視聴覚刺激の多感覚統合において、脳は音の時間遅れを補正することが報告されている^[13]。光と音を呈示する際、刺激の発生源が遠い場合に、音速の分だけ遅らせて呈示させた場合に両刺激を同時と判断することが確認され、脳は音の伝搬の時間遅れを計算に入れ視聴覚情報の統合を行っていることが示されている。本実験の結果は、このように音の時間遅れを加味した多感覚統合の情報処理プロセスの一例であると考えられる。道具などの外部システムを使用する場合、外部システムの遅延時間は未知数であることから、その遅延を探りつつ PSS を調整する適応的な方略が脳には存在すると考えられる。本実験の結果から、そのような遅延を伴う外部システムに適応的に対処できるのは、300 ms 程度の遅延までであると示された。

5. まとめ

身体運動に伴う聴覚について非同時性判断が起こる遅延時間を調べた結果、判断確率が 50 % となる遅延時間(PSS)は、呈示した遅延時間の範囲によって異なる結果が得られた。このことから、遅延弁別閾は呈示された遅延時間の範囲に応じて変化すること、すなわち我々は外部のシステムがもつ遅延に適応的に対処していることが示された。

参考文献

- [1] Kandel E, *et al.* (2000) "Principles of Neural Science, 4th Edition" Appleton&Lange.
- [2] Corey D P, *et al.* (1979) "Response Latency of Vertebrate Hair Cells" *Biophys J.*, vol. 26(3), pp.499-506.
- [3] Shimada S, *et al.* (2010) "Detection of Visual Feedback Delay in Active and Passive Selfbody Movements" *Exp Brain Res.*, vol.201, pp.359-364.
- [4] 樋田浩一 他 (2011) "視聴覚と運動の非同時性判断に関する研究" 日本認知科学会第 28 回大会発表論文集, pp.482-485.
- [5] Toida K, *et al.* (2012) "Perceptual Calibration to Delayed Auditory Feedback of Self-body Movement" *Seeing and Perceiving*, vol.25, pp.48.
- [6] Fujisaki W, *et al.* (2004) "Recalibration of Audio-visual Simultaneity" *Nat Neurosci.*, vol.7(7), pp.773-778.
- [7] Sugano Y, *et al.* (2012) "The Build-up and Transfer of Sensorimotor Temporal Recalibration Measured via a Synchronization task" *Front Perc Sci.*, vol.3(246).
- [8] Heron J, *et al.* (2009) "Effect before Cause: Supramodal Recalibration of Sensorimotor Timing" *PLoS One* vol.4(11), e7681.
- [9] Stetson C, *et al.* (2006) "Motor-sensory Recalibration Leads to an Illusory Reversal of Action and Sensation" *Neuron*, vol.51(5), pp.651-659.
- [10] 樋田浩一 他 (2012.3) "聴覚刺激と身体運動の同時性判断における順応に関する研究" 日本音響学会講演論文集, pp.627-628.
- [11] Haggard P, *et al.* (2002) "Voluntary Action and Conscious Awareness" *Nat Neurosci.*, vol.5(4), pp.382-385.
- [12] Tsakiris M, *et al.* (2003) "Awareness of Somatic Events Associated with a Voluntary Action" *Exp Brain Res.*, vol.149(4) pp.439-446.
- [13] Sciutti A, *et al.* (2010) "Predicted Sensory Feedback Derived from Motor Commands Does Not Improve Haptic Sensitivity" *Exp Brain Res.*, vol.200(3-4), pp.259-67.
- [14] Sugita Y, *et al.* (2003) "Audiovisual Perception: Implicit Estimation of Sound-arrival Time" *Nature*. vol.421(27), pp.911.