

# 能動運動が聴触覚同時性知覚に与える影響

東京工業大学大学院 ○横山 正典, 吉田 祥平, 大良 宏樹, 三宅 美博

## Effect of Active Movement in Audio-Haptic Simultaneity Perception

○ Masanori YOKOYAMA, Shohei YOSHIDA, Hiroki ORA, Yoshihiro MIYAKE Tokyo Institute of Technology

**Abstract:** The simultaneity between sensory modalities is important for multi-modal integration. In this research, we investigated the effect of voluntary motion in inter-modal simultaneity. PSS(point of subjective simultaneity)and JND(just noticeable differences) were measured in "active" condition(audio-tactile stimulus and mouse click) and "passive" condition(only audio-tactile stimulus). In both conditions, the tactile stimulus preceding the auditory stimulus was perceived as simultaneous, and the preceding amplitude in active condition was bigger than passive condition. Moreover,JND of active condition was smaller than passive condition. These results suggest that voluntary motion affects simultaneity perception for audio-tactile stimulus.

### 1 諸言

人や動物が自分の身の周りで起きた事象を的確に把握するためには、複数の感覚器から受容した情報を統合する脳機能が必要不可欠と考えられる。これまでに、感覚情報の統合によって複数の情報が同一の事象に属すると知覚されるためには情報間の時間的同時性が不可欠であることが報告されており<sup>[1]</sup>, 異種感覚間の同時性知覚過程を解明することで感覚情報統合の脳機能を理解するために重要な知見が得られると考えられる。また同時性知覚のメカニズムは、遠隔操作やコミュニケーションロボット<sup>[2]</sup>など幅広いシステムへの応用が期待されるものである。

異種感覚間での同時性知覚過程を調べるための課題として同時性判断課題 (SJ; Simultaneity Judgment)<sup>[3]</sup> や時間順序判断課題 (TOJ; Temporal Order Judgment)<sup>[4]</sup>がある。これまでに様々な条件下で実験が行われ、主観的同時点 (PSS; Point of Subjective Simultaneity) と刺激間のずれの弁別閾 (JND; Just Noticeable Difference) が調べられてきた。通常、視覚-聴覚間、視覚-触覚間の同時性判断においては視覚刺激、聴覚-触覚間では触覚刺激が先行したときに同時と知覚されることが知られている<sup>[4]</sup>。しかし、このような PSS の非対称性は注意<sup>[5]</sup>, 空間位置<sup>[6]</sup>などに影響を受けることが報告されている。

以上に述べたように同時性知覚に関する先行研究では感覚系の機能を中心に議論がなされてきた。しかしその一方で、同期タッピング課題<sup>[7]</sup>などを用いた感覚刺激と運動の同期メカニズムに関する研究も進められている<sup>[8]</sup>。同期タッピング課題とは、呈示される周期的な音にボタン押し動作を同期させるもので、この課題においてボタン押し動作が音に 20~50msec 程度先行する負の非同期現象 (Negative Asynchrony) と呼ばれる現象が観察されている<sup>[9]</sup>。この現象は、触覚刺激が聴覚刺激よりも先行したときに同時と知覚される点では時間順序判断と同様

だが、先行する大きさは負の非同期現象が 20~50msec に対して時間順序判断では十数 msec 程度<sup>[4]</sup>となっており、能動運動には PSS を物理的同時点から遠ざける効果があるように思われる。しかし VR の研究領域では、連続的な視覚フィードバックを有する能動運動が存在するときの視覚-触覚の時間順序判断では能動運動がないときより物理的同時点に近い時間で同時と知覚されるという結果も報告されている<sup>[10]</sup>。

以上に述べたように同時性の知覚に能動運動が何らかの影響を及ぼすことを報告する研究は存在するが、その数は少なく、またそれぞれの結果は一致していない部分も多い。また、聴覚-触覚間の同時性知覚における能動運動の影響にいたってはほとんど検討されていない。

そこで本研究では、聴覚-触覚の同時性判断課題を触覚刺激呈示に同期する能動運動の有無 (以下 active 条件, passive 条件とする) による 2つの条件下で実施し、各条件間の同時性判断の特性を比較することによって能動運動が聴覚-触覚の同時性知覚に及ぼす影響について考察する。

### 2 実験方法

#### 2.1 被験者

被験者は、若者 2人を含む 24歳の健康で右利きの男女 5人 (男性 4人, 女性 1人) にボランティアとして依頼した。いずれの被験者も適正な聴力を有し、ボタン押し動作を遂行する上での運動障害はなかった。

#### 2.2 実験装置と刺激

聴覚刺激として純音 (2000Hz, 50msec) をイヤホン (MHP-EP5; EMPRESS) を介して被験者の両耳に呈示した。刺激呈示の時間的誤差は 1msec 以下であった。また触覚刺激は active 条件では USB マウスを、passive 条件では 32 × 48 の行列上に 2.4mm 間隔で並べられた触

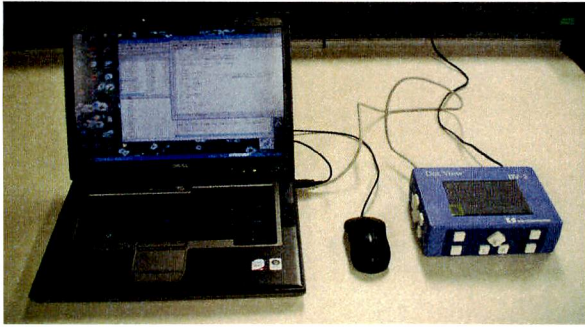


Fig. 1 Apparatus.

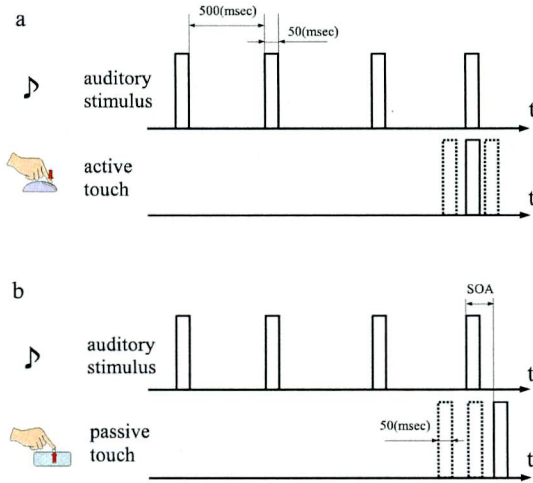


Fig. 2 Time course of the stimulus sequence on simultaneity judgments.

知ピンにより構成された触覚刺激装置 (DotView DV-2 ; KGS) を用いて呈示した。触知ピンの上下駆動範囲は約 0.8mm であった。駆動するピンの数は 32 本であった。触知ピンは連続で 1 秒間に 20 回以上の駆動が可能であった。これらの刺激呈示システムは PC (LATITUDE—D830 ; DELL) 上の psychophysics toolbox<sup>[11]</sup> を組み込んだ Matlab R2007b (Version 7.5 ; MathWorks) を用いて制御した。

実験環境として、実験中に聴覚刺激を阻害する恐れのある雑音を排除した部屋を使用した。さらに被験者には実験中に遮音性の高いイヤーマフの着用を義務付けた。

### 2.3 実験手順

聴覚の同時性判断課題は active 条件と passive 条件の 2 セッションで行われた。

active 条件 (Fig.2a) : 被験者は刺激呈示システムの前座りに、右手でマウスを握った。実験が開始されると、2

秒間の静止状態が続いた後に周期的な聴覚刺激が 4 回呈示され、4 回目にあわせてマウスの左クリック動作を人差し指で行った。その後、4 回目の聴覚刺激とタップ動作による触覚刺激間の同時性を二肢強制選択により判断した。また聴覚刺激の呈示周期は 500msec であったが、これは同期タッピング課題において動作を同期させやすいとされる周期<sup>[12]</sup> の範囲内であった。さらに本実験での聴覚刺激呈示回数は、音楽において動作を合わせ易いといわれる 4 回<sup>[13]</sup> に設定した。

passive 条件 (Fig.2b) : 被験者は右手の人差し指を触覚刺激装置の上に乗せ、左手でマウスを握り同時性判断の際に用いた。実験が開始されると、active 条件と同様に聴覚刺激が 4 回呈示され、4 回目にあわせて触覚刺激装置から触覚刺激が呈示された。聴覚刺激の呈示時刻に変化は与えず、聴覚刺激の呈示開始時刻には遅延 (SOA ; Stimulus Onset Asynchrony) が導入された。同時性判断の方法は active 条件と同様であった。聴覚に対する触覚の遅延時間は ± 200,100,80,60,40,20,0 の全 13 条件のうちのいずれかであった。本実験では先行研究と比べて SOA を細かく設定したが、これは両条件間で実験条件の統制を取るためである。

実験前に 26 回の練習試行が両条件で行われ、本実験では各 65 試行で構成された 4 ブロックが active, passive 両条件で行われた。各条件のブロックは交互に行った。所要時間は練習において 1 試行が約 3 分、本実験においては 1 試行が約 7 分であった。またブロック間では数分の休憩を設けた。練習も含めた全試行回数は 572 回であり、所要時間は約 2 時間程度であった。

実験中は、視覚刺激の影響を排除するために瞑目するよう教示した。また、注意を向けた感覚情報の方がもう一方よりも先行しているように感じやすくなるという priority effect<sup>[5]</sup> の効果を条件間で統制するために、実験中は常に聴覚刺激に注意を向けるよう教示した。

#### 2.3.1 解析手順

active 条件と passive 条件で各 SOA に対して同時だと答える頻度 “frequency of simultaneous” を被験者ごとに算出し、これをガウス関数を用いて最小二乗法により回帰した。回帰式として以下の式を用いた。

$$y = a \times \exp[-(x - x_0)^2 / 2\sigma^2] \quad (1)$$

ここで  $x_0$  は回帰曲線の平均で、主観的同時点である。また  $x$  は SOA である。さらに winter<sup>[14]</sup> らの定義に従い、 $\sigma$  は時間知覚精度に関するパラメータとし、これを JND である。回帰の計算とグラフの表示には Matlab のフリーの toolbox である EzyFit を用いた。

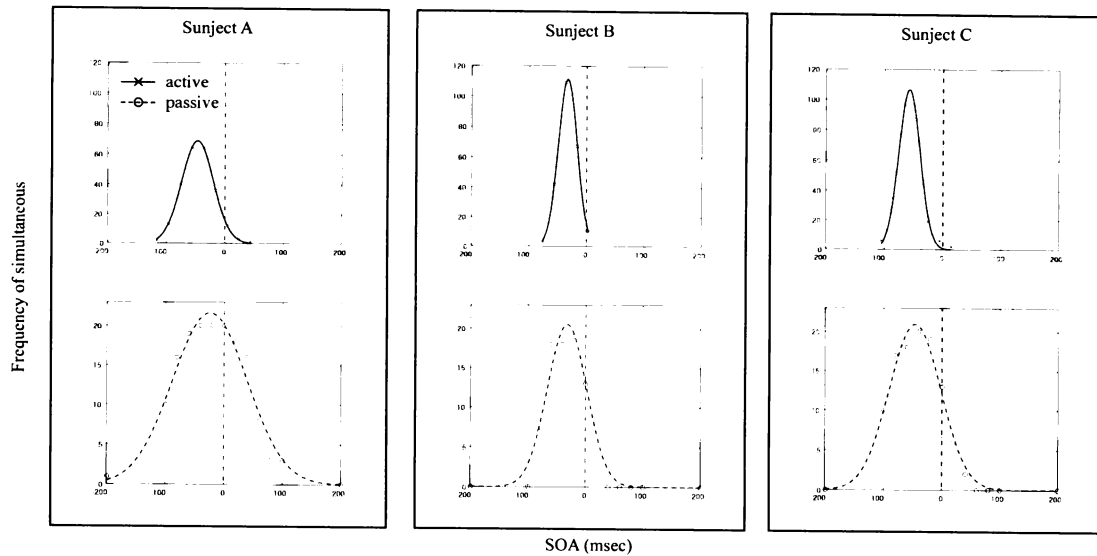


Fig. 3 PSS of each participant in two conditions.

### 3 結果

回帰曲線の平均値は約 0.97 (標準偏差約 0.04) であった。各条件における被験者の SOA に対する同時性判断の頻度の典型例を Fig.3 (被験者 a,b,c) に示した。まず、Fig.3 のように active 条件、passive 条件のどちらにおいても触覚が先行したときに同時と知覚した被験者が 3 人いた。さらに、この 3 人はいずれも active 条件の方がさらに触覚が大きく先行したときに同時と知覚した。残りの 2 人の PSS は、他の 3 人に比べて active 条件で -2msec もしくは 44msec に位置した。全ての被験者において JND は active 条件で小さくなる傾向にあった。また、passive 条件における PSS は時間順序判断課題<sup>[5]</sup>を用いた先行研究のそれと比べて 10msec 程度大きい結果となった。

### 4 考察

本実験では聴触覚同時性判断課題において、触覚呈示に同期した能動運動の有無による PSS, JND の差を検証した。まず、passive 条件において PSS は時間順序判断課題<sup>[5]</sup>を用いた先行研究のそれと比べて 10msec 程度大きい結果となったが、この原因として聴覚刺激に注意を向けるように教示したことによる prior entry effect によるものが考えられる。本実験の予備的な結果は、5 人中 3 人 (被験者 a, b, c) は active 条件、passive 条件のどちらにおいても触覚が先行したときに同時と知覚し、active 条件の方がさらに触覚が大きく先行したときに同時と知覚するというものであった。これは同期タッピング課題の先行研究<sup>[9]</sup>と聴触覚の時間順序判断の先行研究<sup>[4]</sup>の結果の比較と一致する。

被験者 a, b, c を中心に考察すると、本実験の予備的

結果では能動運動が聴触覚同時性判断における PSS を変化させた可能性を示唆しているといえる。しかし一方で、これは active 条件の方が同時性知覚の精度が改善するという Shi らの実験結果<sup>[10]</sup>とは異なる。この差には外部刺激の予測機能が関与していると考えられる。

本研究の両条件では聴覚刺激を予測可能な刺激として与えているため、外部刺激の予測機能が働く。この予測機能によって active 条件での運動は力覚が聴覚刺激に先行するように実行され、結果として passive 条件よりもより触覚が先行した点に PSS が位置したと考えられる。一方 Shi らの実験では、視覚刺激を運動のフィードバックとして呈示しているため外部刺激の予測機能は働かず、視触覚情報と運動指令などの情報の比較により同時性を判断することで PSS がより物理的の同時点に近づくという結果が得られたと考えられる。

JND は active 条件が passive 条件よりも有意に小さかった。この原因の一つとして active 条件と passive 条件で SOA の条件の統制が取れていないことが挙げられる。しかし、先行研究<sup>[10]</sup>でも能動運動が加わった場合には JND が小さくなることが報告されており、たとえ active 条件と passive 条件で SOA の統制が取れたとしても結果に大きな変化はないと考えられる。もう一つの原因としては、active 条件の方がより同時性判断の際に使用できる情報量が多い点が挙げられる。これにより active 条件の方がより精確にずれの弁別を行うことができたと予測される。

本実験の passive 条件での SOA は、時間順序判断の先行研究のそれ<sup>[4]</sup>に比べて細かく設定された。これは、active 条件での触覚刺激呈示条件との差を小さくするためであったが、その結果 5 人の passive 条件における JND の平均

は約 58msec で、先行研究よりも十数 msec 程度大きかった。また active 条件において、周期的な聴覚刺激の呈示により被験者に予測的な運動を行わせることが前提であったが、被験者 d, e の PSS は -2msec もしくは 44msec に位置するという結果であった。以上のことから、トレーニングタスクの量やタスクの難易度の設定を改善する必要があると考えられる。

## 5 まとめ

本研究では能動運動が同時性判断に与える影響を調べるために active 条件と passive 条件における聴触覚同時性判断課題を行った。予備的な結果では 5 人中 3 人に active 条件、passive 条件どちらにも触覚が先行するときに同時と知覚されるという傾向が見られ、これは同期タッピング課題における負の非同期現象<sup>[9]</sup>と一致する。そして active 条件の方が passive 条件よりもさらに触覚が先行した位置に PSS が生じるという傾向が見られた。

JND は全被験者において active 条件の方が passive 条件よりも小さくなった。これらの現象をまとめると、active 条件では外部刺激の予測機能が PSS の位置を変化させ、さらに JND は同時性判断の際に使用できる情報量の多い active 条件の方が小さくなったと考えられる。

本実験では、active 条件と passive 条件で触覚刺激が異なり統制が取れていなかった。また active 条件と passive 条件における SOA の統制も取れなかった。今後はこれらの統制を取れるよう工夫していきたい。また本実験の passive 条件は感覚系のみでの同時性判断ではあったが、先行研究と比較すると聴覚刺激を周期的に与えている点で異なる。つまり本実験の passive 条件では聴覚刺激の呈示時刻を予測することが可能であり、これによって先行研究と異なる結果を生んでいる可能性があるため、今後調査を進めていきたい。また本実験では能動運動が聴触覚の同時性判断に影響を及ぼすことが示唆されたが、運動の中のどんな機能が同時性判断に影響を与えたのかについては今後明らかにしていく必要がある。

## 6 謝辞

本研究を進めるにあたり、実験装置の DotView DV-2 でご協力いただいた KGS 株式会社の関係者の方々に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Slutsky,D.A., Recanzone,G.H.: Temporal and spatial dependency of the ventriloquism effect; *Neuroreport*, **Vol.12**, pp.7-10 (2001).
- [2] Miyake,Y.: Interpersonal synchronization of body motion and the Walk-Mate walking support robot; *IEEE Transactions on Robotics*, (in press)(2009).
- [3] Fujisaki,W., Shimojo,S., Kashino,M., Nishida,S.: Recalibration of audiovisual simultaneity; *Nature neuroscience*, **Vol.7**, pp.773-778 (2004).
- [4] Zampini,M., Brown,T., Shore,D.I., Maravita,A., Röder,B., Spence,C.: Audiotactile temporal order judgments; *Acta Psychologica*, **Vol.118**, pp.277-291 (2005).
- [5] Spence,C., Shore,D.I., Klein,R.M.: Multisensory prior entry; *Manuscript submitted for publication* (2001).
- [6] Sugita,Y. Suzuki,Y.: Audiovisual perception: Implicit estimation of sound-arrival time; *Nature*, **Vol.421**, pp.911 (2003).
- [7] Stevens,L.T.: On the time sense; *Mind*, **Vol.11**, pp.393-404 (1886).
- [8] Takano,K., Miyake,Y.: Two types of phase correction mechanism involved in synchronized tapping; *Neuroscience Letters*, **Vol.417**, pp.196-200 (2007).
- [9] Dunlap,K.: Reactions to rhythmic stimuli, with attempt to synchronize; *Psychological Review*, **Vol.17**, pp.399-416 (1910).
- [10] Shi,Z., Hirche,S., Schneider,W.X., Müller,H.: Influence of visuomotor action on visual-haptic simultaneous perception:A psychophysical study; *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems*, (2008).
- [11] Brainard D.H.: *The Psychophysics Toolbox*; *Spat Vis*, **Vol.10**, No.4, pp.433-436 (1997).
- [12] Bartlett,N.R., Bartlett,S.C.: Synchronization of a motor response with an anticipated sensory event; *Psychological Review*, **Vol.66**, No.4, pp.203-218 (1959).
- [13] Repp. B. H.: Rate limits in sensorimotor synchronization with auditory and visual sequences: The synchronization threshold and the benefits and costs of interval subdivision; *Journal of motor behavior*, **Vol.35**, pp.355-370 (2003b).
- [14] Winter,R., Harrar,V., Gozdzik,M., Harris,L.R.: The relative timing of active and passive touch; *Brain Research*, **Vol.1242**, pp.54-58 (2008).