

# 環境への能動的な働きかけは時間知覚を変容させる

## —異種感覚間の時間順序判断からの証明—

○緒方 大樹（東京大学，東京工業大学），西 惇宏（東京工業大学），  
横山 正典（東京工業大学），古里 真康（東京工業大学），三宅 美博（東京工業大学）

### Voluntary movement alters temporal perception: Evidence from temporal order judgment between cross-modal sensory inputs

○Taiki OGATA (The University of Tokyo, Tokyo Institute of Technology), Atsuhiko NISHI (Tokyo Institute of Technology), Masanori YOKOYAMA (Tokyo Institute of Technology), Masayasu FURUSATO (Tokyo Institute of Technology) and Yoshihiro MIYAKE (Tokyo Institute of Technology)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the effect of voluntary movement of self on temporal perception of cross-modal sensory information. In experiment 1, auditory-tactile temporal order judgment (TOJ) task in which participants judged which auditory and tactile stimuli presented earlier was performed under three movement conditions: voluntary or involuntary conditions in which participants performed the TOJ task with voluntary or involuntary finger movement respectively and no-movement condition in which participants performed the TOJ task without any movement. The results showed that voluntary movement shifted the Point of Subjective Simultaneity (PSS) to the points on which auditory stimulus had presented earlier than tactile one. Furthermore the temporal threshold of the TOJ task was lower under voluntary condition than that under the other conditions. In experiment 2, auditory-tactile TOJ under voluntary and involuntary conditions were performed in a condition where participants could not predict the timing when auditory and tactile stimuli would present. The PSSs were different between voluntary and involuntary conditions as same as in experiment 1 but the thresholds did not alter by voluntary movement. These results revealed that when people act voluntarily to environment, their temporal perception of cross-modal sensory information is altered. Furthermore, the results suggest that the decreasing of thresholds of TOJ by voluntary movement is caused by the increasing of selective temporal attention for stimuli but the shift of PSSs by voluntary movement is not related to the increasing of the attention.

#### 1. 背景・目的

人間は、主体的な自己として環境と関わり合い、その中で自己を取り巻く環境を知覚している。例えば、楽器を演奏するときやスポーツをするときなどは、環境からの情報を受動的に処理するだけではなく、積極的に、もしくは、能動的に環境へと働きかけながら、環境との相互作用を介して知覚を生成している。本研究は、このような人間の知覚における共創的な側面を、異種感覚間の時間順序判断を用いて明らかにすることを試みるものである。

人間は、複数の感覚入力を統合して知覚を行っているが、その際、複数感覚入力の同時性、もしくは、順序判断は非常に重要な役割を果たしていると考えられる。つまり、複数感覚入力の同時性と時間順序は、複数感覚入力の統合、および、それらの因果関係に関して非常に重要な手がかりであると予想される。

このような時間的統合において重要なことは、人間の主観的な同時性や時間順序判断は、物理的なそれらとは必ずしも一致しないということである<sup>1,2)</sup>。例えば、視覚刺激と聴覚刺激との時間順序判断においては、人

間は視覚刺激が聴覚刺激よりも数十ミリ秒早く提示されたときの方が、同時に提示されたときよりも同時であると感じやすい。また、聴覚刺激と体性感覚刺激では、体性感覚刺激が早く提示されたときの方が同時と感じやすい。一方で、ある閾値以内の時間間隔で2つの刺激を提示されたときには、それらの刺激の時間順序を判断することができなくなる。

これら、異種感覚の時間順序判断における主観的な同時点、および、閾値は一定ではなく、注意を向ける刺激<sup>3,4)</sup>、刺激提示位置などの空間的要素<sup>3,5-8)</sup>、および、刺激提示タイミングの予測<sup>9)</sup>によって変化することが知られている。

最近、能動運動時、つまり、自らの意思により運動を行いながら主体的に環境に働きかけているときと、そうでないときとでは、時間順序判断を含む時間の知覚の仕方が異なるとの報告がなされている<sup>10-14)</sup>。例えば、自分の腕を動かしながら視体性感覚時間順序判断を行うと、動かさないときと比べて主観的同時点と判断の閾値が変化する<sup>13)</sup>。

このことは、主体的に環境に働きかけているときと、受動的に環境を観察しているときとでは、異種感覚の

時間的統合過程とその結果として生成される知覚が異なることを示しているように見える。しかしながら、この研究では能動運動時の固有感覚情報の効果を排除していない。つまり、固有感覚情報という自己身体の状態に関わる感覚情報の効果によって、時間的知覚に変化が見られたのであれば、厳密にはそれは自己の主体性と環境の知覚の問題ではなく、単に、異種感覚の時間的な統合過程に、付加的な感覚情報が影響を及ぼしているに過ぎない。

そこで、本研究では、固有感覚情報の影響を排除した上でも、自己の能動的な環境への働きかけが異種感覚の時間的統合と知覚に影響を及ぼしうるか明らかにすることを目的とした。そのために、随意運動に加えて、外的に自己の身体の運動を誘導される不随意運動の条件を加えた時間順序判断 (Temporal Order Judgment: TOJ) 課題を行った。さらに、随意運動が TOJ 課題に影響を与えるメカニズムを明らかにするために、随意運動と感覚入力の時間的な予測の関係を考慮した TOJ 課題を行った。

## 2. 実験 1: 能動運動が時間順序判断に与える影響

### 2.1 参加者

参加者は 21 歳から 30 歳 (平均 23.6 歳) の 18 名 (女性 1 名, 男性 17 名) であった。全員右利きであり、聴体性感覚、および、身体の運動に関する障害はなかった。

### 2.2 装置と刺激

聴覚刺激は、2,000 Hz, 50dB の純音であった。体性感覚刺激は、強さ 3 N の矩形波であった。両刺激とも、提示時間は 15 ms であった。

聴覚刺激は、イヤホン (HP-RHF41; radius, Japan) を介して両耳に提示した。また、体性感覚刺激は、触覚提示装置 (PHANTOM<sup>®</sup> Desktop haptic device; SensAble Technologies, USA) を用いて提示した。また、同装置を用いて、右手人差し指の不随意的な運動を誘導した。

すべての装置の制御、および、データの記録は、触覚刺激装置専用のソフトウェア (OpenHaptics software development toolkit; SensAble Technologies, USA) を用いて開発したプログラムを搭載した PC により行われた。プログラムは、Visual C++ 2008 (Microsoft, USA) を用いて開発した。

### 2.3 課題と条件

実験課題は、わずかな時間差をおいて提示される聴覚刺激と体性感覚刺激の時間順序を判断することであ

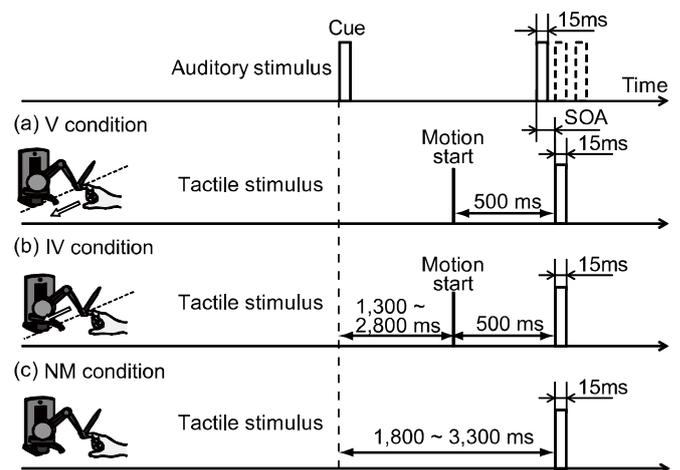


Fig. 1 Movement conditions and time sequences of voluntary/involuntary movement and auditory and tactile stimuli under the three conditions: Voluntary (V) condition, Involuntary (IV) condition and No-movement (NM) condition.

った。聴体性感覚を提示する時間間隔 (Stimulus Onset Asynchrony: SOA) は、0,  $\pm 30$ ,  $\pm 60$ ,  $\pm 90$ ,  $\pm 200$  ms の 9 条件を用意した。負の値は、体性感覚刺激が聴覚刺激に先行して提示されることを意味する。また、課題は、右手人差し指の随意運動を伴う条件 (Voluntary movement condition: V condition), 右手人差し指の不随意運動を伴う条件 (Involuntary movement condition: IV condition), および、自己の運動を伴わない条件 (No-movement condition: NM condition) のもと行われた (Fig. 1)。IV 条件は、外的に自己の身体運動を誘導される条件であるので、能動性は伴わないが固有感覚刺激は誘発される。つまり、V 条件と IV 条件とを比較することによって、固有感覚刺激の影響を排除したうえで、能動運動の影響を調べることができる。

### 2.4 実験計画

本実験の計画は、9 つの SOA 条件  $\times$  3 つの自己運動条件の 2 要因 27 条件であった。

### 2.5 手続き

実験は防音室にて執り行った。さらに、参加者にはイヤホンの上からイヤーマフを被るように指示した。また、椅子に腰かけ、右手の掌と人差し指の腹が左側に向くようにして、机の上に腕を置かせた。この状態で、右手人差し指の腹に装置の触覚提示部が来るよう、触覚刺激装置を装着させた。

Fig. 1 は各運動条件の 1 試行の運動と刺激提示の時間的な概要を示している。以下に、運動条件ごとの手続きを述べる。まず、V 条件においては、最初に試行の開始を示す聴覚刺激が提示された。その後、参加者は

任意のタイミングにおいて右手人差し指を右から左へと動かした。右人差し指の運動開始時点は、指が 10 mm 動いた時点とした。体性感覚刺激は、運動開始時点から 500 ms 後に提示された。聴覚刺激は、体性感覚刺激の提示時点を起点として、SOA だけずらした時点で提示された。その後、参加者は強制二択によりどちらの刺激が先に提示されたかを判断した。回答にはキーボードを用いた。

IV 条件における手続きは、以下に述べる点以外は、V 条件と同様であった。試行開始を示す聴覚刺激の

1,300 から 2,800 ms 後に、参加者の右人差し指を水平方向に右から左へと装置を用いて動かした。動かす速度は、76, 88, 100, 112, 124 mm/s の中から試行ごとにランダムで選んだ。人差し指の不随意運動開始の 500 ms 後に体性感覚刺激を提示した。

NM 条件においては、試行開始音の 1,800 から 3,300 ms 後に体性感覚刺激が提示された。この際、随意運動、および、不随意運動は伴われなかった。その他の手続きについては、V 条件、および、IV 条件と同様であった。

すべての条件において、参加者は聴覚刺激ではなく、体性感覚に注意を向けるよう指示された。また、試行中は常に目を閉じておくように指示した。

試行は、運動条件ごとに、9 つの SOA 条件が 5 回ずつ含まれる 45 試行を 1 ブロックとし、それを 1 運動条件あたり 5 ブロック行った。つまり、1 参加者あたり、675 試行を行った。ブロックの順序、および、ブロック内の試行順序はランダム化した。さらに、参加者間でカウンターバランスをとった。

参加者が課題に慣れるように、本試行の前に練習試行が執り行われた。試行間のインターバルは 2,000 ms であった。

## 2.6 解析手法

解析には、主観的同時点 (Point of Subjective Simultaneity)、および、TOJ の時間的閾値を示す指標である丁度可知差異 (Just Noticeable Difference: JND) を用いた。それぞれ、以下のように求められた<sup>15)</sup>。

まず、各 SOA に対して、聴覚が先行して提示されたとき回答した割合を求めた。次に、SOA を説明変数、聴覚先行と回答した割合を目的変数として、一般化線形モデルに基づき、ロジステック曲線により回帰した。回帰式は次の通りである。

$$y = \frac{1}{1 + e^{-\frac{\alpha - x}{\beta}}}$$

回帰によって得られる  $\alpha$ 、および、 $\beta$  を用いて、PSS と

JND は以下の式により定義される。

$$JND = \frac{(x_{0.75} - x_{0.25})}{2} = \beta \log 3$$

$$PSS = x_{0.5} = \alpha$$

$x_p$  は、回帰曲線上で  $p$  % の割合で聴覚を先行と回答する SOA を示している。

## 2.7 結果と考察

Fig. 2 に、PSS の平均値の結果を示す。1 要因参加者内の分散分析の結果、運動条件に有意差がみられた ( $p < 0.001$ )。そこで、Holm-Bonferroni 法により多重比較を行ったところ、V 条件と IV 条件 ( $p < 0.01$ )、V 条件と NM 条件 ( $p < 0.001$ )、および、IV 条件と NM 条件 ( $p < 0.01$ ) すべての間で有意差がみられた。

V 条件と IV 条件間に差が見られたことから、固有感覚情報ではなく、能動的に運動することそのものが主観的同時点に影響を与えることが示された。具体的には、能動運動は、聴体性感覚 TOJ において、より聴覚先行に刺激を提示した時に同時であると感じやすくさせることが明らかとなった。加えて、IV 条件と NM 条件との間にも PSS に差がみられたことから、固有感覚情報も主観的同時点を聴覚先行よりに移行させることが示された。

Fig. 3 は、JND の平均値の結果を示している。1 要因参加者内の分散分析の結果、運動条件に有意差がみられた ( $p < 0.001$ )。そこで、Holm-Bonferroni 法を用いた重比較を行った。結果、V 条件と IV 条件 ( $p < 0.01$ )、および、V 条件と NM 条件 ( $p < 0.001$ ) の間に有意差がみられた。IV 条件と NM 条件の間には有意水準 5 % において有意差が認められなかった。

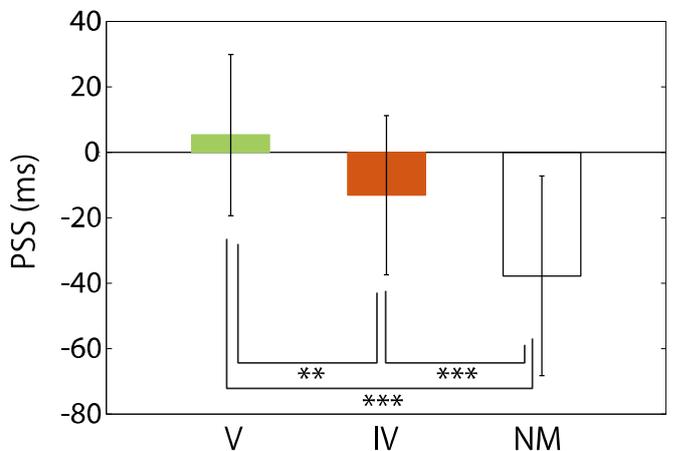


Fig. 2 Averages of PSSs under three movement conditions in experiment 1. The error bars shows the standard deviations between participants

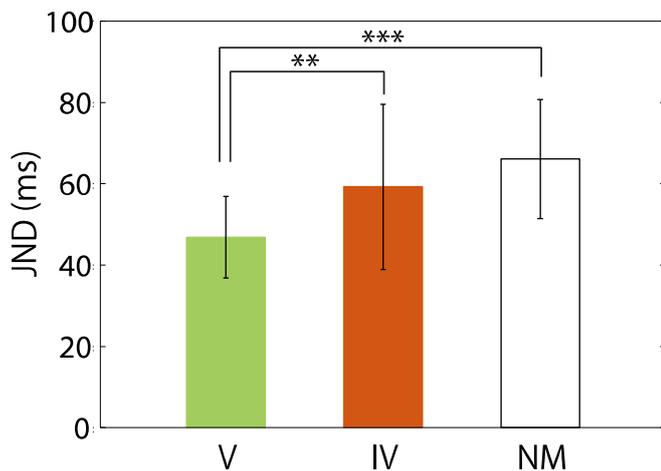


Fig. 3 Averages of JNDs under three movement conditions in experiment 1. The error bars show the standard deviations between participants

V条件とIV条件との間に差がみられたことから、固有感覚情報ではなく、主体的に運動することそのものが時間順序判断の閾値を下げることで、つまり、TOJの時間分解能を上げることが明らかになった。加えて、IV条件とNM条件の間に差が見られなかったことから、固有感覚情報には同様の効果はないことが示された。

以上、PSSとJNDの結果から、主体的に環境へと働きかけているときには、そうでないときと比べて異種感覚の時間的知覚が変化することが明らかとなった。このような変化が起こる原因として、一つに時間的選択的注意の効果が考えられる。時間順序判断課題において、刺激提示のタイミングが予想できるときは、JNDの値が小さくなる、つまり、順序判断の閾値が下がることが知られている<sup>9)</sup>。本実験においては、運動開始時点から体性感覚刺激提示時点まで一定の時間間隔であった。そのため、能動運動が時間的選択的注意の効果を高め、それゆえに時間順序判断に影響を及ぼした可能性が考えられる。次章ではこれらの仮説について検証するために行った実験について述べる。

### 3. 実験2：時間順序判断における能動運動と刺激提示タイミングの予測との関係

#### 3.1 参加者

参加者は10名（女性2名、男性8名、平均22.6歳）であった。全員右利きであり、聴体性感覚、および、運動に関する障害はなかった。

#### 3.2 装置と刺激

聴覚刺激は、50dBのホワイトノイズであった。体性感覚刺激は、強さ2Nの矩形波であった。両刺激とも、提示時間は15msであった。聴覚刺激はイヤホン

(HP-RHF41; radius, Japan)を介して提示した。その他の装置は実験1と同様であった。

#### 3.3 課題と条件

課題は聴体性感覚のTOJ課題であった。SOAは、±30, ±60, ±90, ±200msの8条件を用意した。負の値は体性感覚刺激が聴覚刺激に先行して提示されることを意味する。また、課題は、随意的な右前腕の運動を伴う随意運動条件 (Voluntary condition; V condition)、および、不随意的な右前腕の運動を伴う不随意運動条件 (Involuntary condition; IV condition)のもと行われた。さらに、前腕の運動開始から、体性感覚刺激の提示までの時間間隔に関して、300ms, 900ms, 1,500msの3条件を設定した。

#### 3.4 実験計画

実験計画は、8つのSOA条件×2つの自己運動条件×3つのインターバル条件の3要因48条件であった。

#### 3.5 手続き

手続きの多くは実験1と同様であった。以下では、実験1と手続きが異なるところを中心に述べる。

まず、V条件においては、試行開始を示す聴覚刺激が提示された後、参加者は任意のタイミングにおいて右前腕を右から左へと動かした。右前腕の運動開始時点は、体性感覚刺激装置を装着した指が10mm動いた時点とした。体性感覚刺激は、運動開始時点から300, 900ms、もしくは、1,500ms後のいずれかに、右手人差し指の腹に提示された。聴覚刺激は、体性感覚刺激の提示時点を開始点として、SOAだけずらした時点で提示された。

IV条件における手続きは、以下に述べる点以外は、V条件と同様であった。試行開始を示す聴覚刺激の700msから2,200ms後に、参加者の右前腕を水平方向に右から左へと装置を用いて動かした。動かす速度は、70, 80, 90, 100, 110mm/sの中から試行ごとにランダムで選んだ。右前腕の不随意運動開始の300, 900, もしくは、1,500ms後に体性感覚刺激を提示した。

120試行のV条件からなるブロックと同数のIV条件からなるブロックの2つのブロックを1セッションとし、1参加者あたり5から6セッション行った。ブロック内では、3つのインターバル条件と8つのSOA条件の計24条件がそれぞれ5回ずつ、ランダムな順序で行われた。1セッション内におけるV条件とIV条件のブロックの順序はランダムに定めた。また、試行順序は参加者間でカウンターバランスをとった。

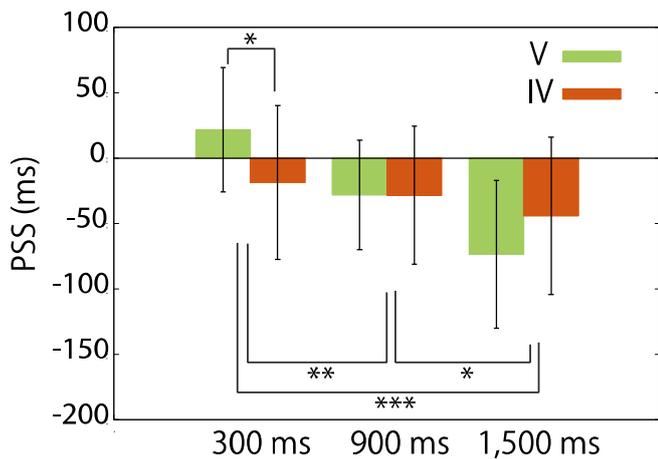


Fig. 4 Averages of PSSs under two movement conditions and three interval conditions in experiment 2. The error bars show the standard deviations between participants

### 3.6 解析手法

解析手法は、実験 1 と同様であった。

### 3.7 結果と考察

分析からは、TOJ 課題が上手く遂行できなかった 3 名の参加者のデータを除外した。

Fig. 4 は PSS の平均値である。2 要因参加者内分散分析の結果、インターバル条件に主効果 ( $p < 0.001$ ) が、また、運動条件とインターバル条件との間に交互作用がみられた ( $p < 0.05$ )。そこで、単純主効果検定を行った。インターバル 300 ms 条件における V 条件と IV 条件との間に有意差がみられた ( $p < 0.05$ )。また、V 条件におけるインターバル条件間に有意差がみられた ( $p < 0.001$ )。そこで、V 条件におけるインターバル条件間に対してライアン法を用いて多重比較を行った。300 ms 条件と 900 ms 条件との間 ( $p < 0.001$ )、300 ms 条件と 1,500 ms 条件との間 ( $p < 0.001$ )、および、900 ms 条件と 1,500 ms 条件との間 ( $p < 0.05$ ) に有意差が認められた。

以上の結果から、能動運動の PSS への影響は、時間的選択的注意とは関係がないことが示された。また、PSS への能動運動、および、不随意運動の影響は、運動開始時点から刺激提示時点までの時間間隔に依存することが明らかとなった。つまり、時間間隔が短くなるほど、より聴覚先行よりに 2 つの刺激を提示した時の方が主観的に同時と感じやすいことが示された。

Fig. 5 は、JND の結果を示している。2 要因参加者内分散分析の結果、運動条件、および、インターバル条件いずれにも主効果は見られなかった ( $p > 0.05$ )。また、交互作用も確認されなかった ( $p > 0.05$ )。

この JND の結果は、能動運動が TOJ の閾値に影響を

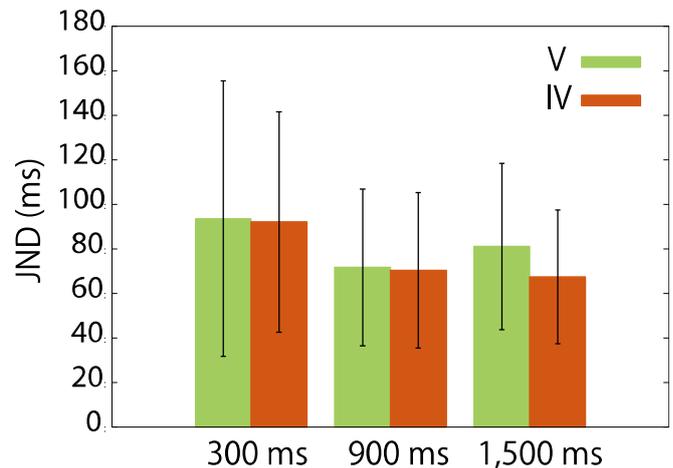


Fig. 5 Averages of JNDs under two movement conditions and three interval conditions in experiment 2. The error bars show the standard deviations between participants

及ぼすことは、時間的選択的注意と関係していることを示唆している。つまり、実験 1 において能動運動が JND を小さくした原因は、刺激提示タイミングへの時間的選択的注意を強め、そのために時間順序判断の分解能を高めたためと考えられる。

## 4. 総合考察

本研究では、固有感覚情報の影響ではなく、主体的に運動することが異種感覚の時間的な知覚に影響を及ぼすことを明らかにするために、随意運動を伴う、不随意運動を伴う、および、運動を伴わない 3 条件の下で、聴体性感覚の時間順序判断課題を行った。その結果、随意運動条件においては不随意運動条件よりも主観的な同時点が聴覚先行の時点に変化することが明らかとなった (Fig. 2)。また、時間順序判断の閾値が、不随意運動条件よりも随意運動条件において小さくなることを示された (Fig. 3)。以上の結果は、主体的に環境へと働きかけているときは、そうでないときは時間知覚が変化することを示している。また、順序判断の主観的同時点に影響を及ぼすということは、能動的に運動しているときと、そうでないときとは、刺激の順序、延いては、それらの因果関係に関して異なる認識を人間がしている可能性を示している。

さらに、能動運動が異種感覚の時間順序判断に及ぼす影響が、時間的選択的注意と関連しているか否かを明らかにするために、運動開始時点から刺激提示時点までのインターバルを試行ごとにランダムに変化させながら、聴体性感覚時間順序判断課題を行った。結果、主観的同時点に関しては随意運動条件と不随意運動条件との間に差が見られたが (Fig. 4)、その閾値においては条件間で差が見られなくなった (Fig. 5)。このことから、主観的同時点に関しては能動運動の影響は時

間的選択的注意とは関係がなく、また、閾値に関しては能動運動が刺激提示タイミングへの時間的選択的注意を高めるために変化することが示唆された。また、主観的同時点については、刺激提示タイミングまでのインターバルが短くなると、主観的同時点がより聴覚先行よりの時点に変化することが示された。

自己の運動に伴う環境の変化が、知覚に影響を及ぼすことはこれまでも報告されてきた<sup>16-18)</sup>。例えば、能動的に運動しながら行う触覚は、静的な触覚、もしくは、受動的な触覚よりも角度などの物体形状の認識に優れていると言われている<sup>16,18)</sup>。この自己の運動の知覚への影響は、自己の運動に基づく固有感覚情報や環境の変化に関するダイナミクスなど付加的な情報に基づくと考えられる。一方で、本研究では、自己の運動に伴う付加的な情報である固有感覚情報の影響を除いてもなお、能動運動が異種感覚の時間順序判断に影響を及ぼすことを明らかにした。つまり、本研究の結果は、異種感覚の時間的な知覚に対して能動運動が影響を及ぼすのは、それに伴う付加的な情報のためではなく、能動運動が異種感覚の時間的な統合過程に影響を及ぼしているためであることを示唆している。

## 5. 結論

聴体性感覚の時間順序判断課題を、能動運動を伴う条件、随意運動を伴う条件、および、運動を伴わない条件のもと行い、能動運動が異種感覚の時間順序判断を変化させることを明らかにした。具体的には、能動運動を伴うときは、主観的同時点がより聴覚を先行して提示した時点に移ること、また、順序判断の閾値が下がることが明らかとなった。さらに、この能動運動の影響は、閾値の低下に関しては能動運動が提示刺激の時間的選択的注意の効果を高めるために起こるが、主観的同時点の変化に関しては、時間的選択的注意とは関係がないことが示された。以上の結果は、主体的に環境に働きかけることにより、異種感覚の時間知覚が変化することを示している。

### 参考文献

- 1) Hanson, J.V., Heron, J., Whitaker, D., Recalibration of perceived time across sensory modalities. *Experimental Brain Research*. **185**, 347/352 (2008)
- 2) Zampini, M., Guest, S., Shore, D.I., Spence, C., Audio-visual simultaneity judgments. *Perception & Psychophysics*. **67**, 531/544 (2005)
- 3) Spence, C., Shore, D.I., Klein, R.M., Multisensory prior entry. *Journal of Experimental Psychology*. **130**, 99/832 (2001)
- 4) Zampini, M., Shore, D.I., Spence, C., Audiovisual prior entry. *Neuroscience Letter*. **381**, 217/222 (2005)
- 5) Lewis, P.A., Miall, R.C., Distinct systems for automatic and cognitively controlled time measurement: Evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology*. **13**, 250/255 (2003)
- 6) Santangelo, V., Spence, C., Crossmodal exogenous orienting improves the accuracy of temporal order judgments. *Experimental Brain Research*. **194**, 577/586 (2009)
- 7) Sugita, Y., Suzuki, Y., Audiovisual perception: Implicit estimation of sound-arrival time. *Nature*. **421**, 911 (2003)
- 8) Zampini, M., Shore, D.I., Spence, C., Audiovisual temporal order judgments. *Experimental Brain Research*. **152**, 198/210 (2003)
- 9) Correa, A., Sanabria, D., Spence, C., Tudela, P., Lupianez, J., Selective temporal attention enhances the temporal resolution of perception: Evidence from a temporal order judgment task. *Brain Research*. **1070**, 202/205 (2006)
- 10) Eagleman, D.M., Holcombe, A.O., Causality and the perception of time. *Trends Cognitive Science*. **6**, 323/325 (2002)
- 11) Haggard, P., Clark, S., Kalogeras, J., Voluntary action and conscious awareness. *Nature Neuroscience*. **5**, 382/385 (2002)
- 12) Moore, J., Haggard, P., Awareness of action: Inference and prediction. *Consciousness and Cognition*. **17**, 136/144 (2008)
- 13) Shi, Z., Hirche, S., Schneider, W.X., Muller, H., Influence of visuomotor action on visual-haptic simultaneous perception: A psychophysical study. In: 2008 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, Reno, USA (March 13-14), 65/70 (2008)
- 14) Ogata, T., Furusato, M., Yokoyama, M., Nozawa, T., Miyake, M., How voluntary movements affect cross-modal temporal perception. *SICE Annual Conference (SICE) 2011, Tokyo, Japan (September 13-18)*. 2581/2586 (2011)
- 15) Finney, D.J., *Probit analysis: a statistical treatment of the sigmoid response curve*. Cambridge University Press, Cambridge (1952)
- 16) Gibson, J.J. *The ecological approach to visual perception*. Houghton Mifflin Company, USA (1979)
- 17) Gibson, J.J., Observations on active touch. *Psychological Review*. **69**, 477/491 (1966)
- 18) Voisin, J., Lamarre, Y., Chapman, C.E., Haptic discrimination of object shape in humans: contribution of cutaneous and proprioceptive inputs. *Experimental Brain Research*. **145**, 251/260 (2002)