

# 環境への能動的な働きかけにより変容する時間知覚について

西 惇宏

The alteration of temporal perception on voluntary movement

Atsuhiko Nishi

**Abstract** – The present study investigated temporal multimodal integration with voluntary movement. We studied the effect of action on temporal perception using a psychological experiment. Temporal order judgment (TOJ) task was used to measure the differences in point of subjective simultaneity (PSS) and just noticeable difference (JND). We purposed to distinguish the effect of voluntary movement and that of body movement itself. The present study also investigated whether or not effect of action on temporal perception was observed without tactile sensation, to clear the link between self-generated movement and the tactile sensation. In experiment 1, we conducted auditory-tactile TOJ task under three conditions: no-movement condition, involuntary condition, and voluntary condition, to distinguish the effect of voluntary movement and that of body movement itself. Results demonstrated involuntary movement and voluntary condition located PSS to the point where an auditory stimulus preceded to a tactile stimulus compared to no-movement condition. Furthermore, the shift on PSS of voluntary condition was larger than that of involuntary condition. JND of voluntary condition was smaller than those of the other two conditions. In experiment 2, we performed visual-auditory TOJ task under the same conditions at the experiment 1, to study the effect of action without tactile sensation. Results showed that the effect of voluntary movement on PSS was not observed unlike with the experiment 1. On the other hands, as with the experiment 1, we observed that voluntary movement decreased JND. These results revealed that voluntary movement excluded the sense of body movement alternates simultaneity of temporal perception. However, the alternation was restricted to temporal perception with tactile sensation. We also demonstrated the temporal resolution was improved regardless of sensory modality.

**Keywords** : Voluntary movement, Temporal order judgment, Cross-modal integration

## 1. 緒言

私たち人間は、複数の感覚器官によって、異なる種類の情報を取得し、そして得られた感覚情報を統合することで外界を把握する。また、随意運動のように、自己の運動を介して能動的に環境へと働きかけることは、得られる感覚情報を自ら変化させることである。人間にとって、自ら運動を行いながら同時に知覚を行うことは日常的であるが、ここで 1 つの問題が提起される。スポーツや楽器演奏などに代表されるように、複数の感覚情報に対して、時間的に精度の高い知覚を行うことを要求されつつも、運動も同時に行う場合がある。私たちはこのような場合において、自身の振舞い

によってさらに、得られる感覚情報が変化してしまうにもかかわらず、これによって大きく時間遅れを伴うことなく知覚を行っている。果たしてこのような対応はどのようにして可能となっているのか。運動を伴わない場合の知覚と運動中の知覚が異なっているのではないかと考えられる。本研究は、運動中の知覚について着目する。

最近、随意運動を行うことが知覚に及ぼす影響について報告がなされている [1–6]。例えば、複数の感覚情報が関わる知覚の時間的側面において、随意運動が影響を及ぼすことが確かめられている [4–6]。これらの研究は、運動を実施することが時間知覚を変化させることを示している。

Shi らは、視覚刺激と触覚刺激の時間順序判断 (Tem-

poral Order Judgment; TOJ) 課題を用いて、随意運動が異種感覚情報統合の時間知覚に及ぼす影響を明らかにすることを試みている [4]. この課題は、複数の種類用意されるわずかな時間差を伴って提示される 2 つの刺激に対して、どちらの刺激が先に提示されたかを判断する課題である。この課題からは 2 つの指標が得られる。1 つの指標は、提示された 2 つの刺激が同時であったと最も知覚され易い点である。このような、刺激の提示としては時間差を伴いながらも主観的には最も同時であったと知覚される点を、主観的同時点 (Point of Subjective Simultaneity; PSS) と言う。PSS は、物理的な同時点と差がない場合は、0 を示すが、異種感覚間の PSS は物理的な同時点とは異なることが知られている [4, 6–12]. また、もう 1 つの指標としては、2 つの刺激のずれに関する分解能であり、これを丁度可知差異 (Just Noticeable Difference; JND) と言う。これら PSS と JND という 2 つの指標は、Finney の報告によるものである [13]. Shi らは、随意運動中と運動をしていない時とでは、PSS、および JND が異なることを示し、能動的に運動を行うということが、時間知覚を変えるということを示唆した [4].

しかしながら、Shi ら [4] が示した随意運動の有無による比較では、能動的に環境へと働きかけることが時間知覚を変えたとは言いきれない。なぜならば、身体が動くことによって、身体部位の情報が生じ、その情報が情報統合に介入したことによって知覚が変わったという可能性を排除出来ないからである。それゆえ、身体の動きの影響を排除した上でも、随意運動が時間順序判断に影響を及ぼすかを明らかにする必要がある。

本研究では、聴触覚の TOJ 課題を用いて、運動による時間知覚への影響を、身体の動きによるものであるのか、あるいは、運動の随意性によるものであるのかを明らかにすることを試みる。具体的には、運動を伴わずに聴触覚 TOJ を行う条件、不随意運動を伴いながら聴触覚 TOJ を行う条件、および能動運動をしながら聴触覚 TOJ を行う条件といった 3 条件において実験を行う。3 条件の実施によって、運動を伴わない条件と不随意運動条件を比較することで、身体の動きによる知覚への影響を検討し、不随意運動条件と随意運動条件を比較することで、能動的に環境へと関わることの知覚への影響を検討する。

さらに、運動による時間知覚への影響を明らかにするに当たっては、知覚する感覚情報の種類についても考慮する。運動に関連する要素として身体の動きから生じる固有感覚のフィードバックと、運動の随意性から生じる遠心性コピーが考えられる。固有感覚は触覚と同じく体性感覚の区分の 1 つであり、そして体性感覚の中でも深部感覚に属するものである。また、遠心

性コピーは補足運動野から体性感覚野へと伝達される情報である [14, 15]. このように、自己の運動と体性感覚知覚の結びつきの強さが示唆されている。このため、運動による時間知覚の変化が観察された場合に、その変化は触覚知覚に限定されたものである可能性が考えられる。そこで、運動による時間知覚の変化については、異種感覚情報統合として触覚刺激を含まない場合もまた検証することによって、運動による時間知覚への影響の範囲が明らかになると考えられる。

そこで、本研究ではさらに、視聴覚の TOJ 課題においても聴触覚の TOJ と同様の 3 条件の実施と比較を行い、運動による時間知覚の変化について、感覚情報の種類との関係を明らかにすることも試みる。つまり、更なる目的として、運動による時間知覚への影響が、いずれの異種感覚情報の統合にまで観察されるかを明らかにすることである。

第 2 章では、実験 1 である聴触覚時間順序判断実験について述べる。第 3 章では、実験 2 である視聴覚時間順序判断課題について述べる。第 4 章では、実験 1 と実験 2 の比較を主として、総合考察を行う。最後に第 5 章では、結言を述べる。



Fig.1 The experimentation environment. Sinusoidal wave sound was presented through earphone. Haptic device was attached with participant's right index finger. Under the Involuntary condition, the haptic device moved participant's finger.

## 2. 実験 1 聴触覚時間順序判断実験

### 2.1 目的

運動による時間知覚の変化が、身体の動き、あるいは運動の随意性によるものであるのかを明らかにする。

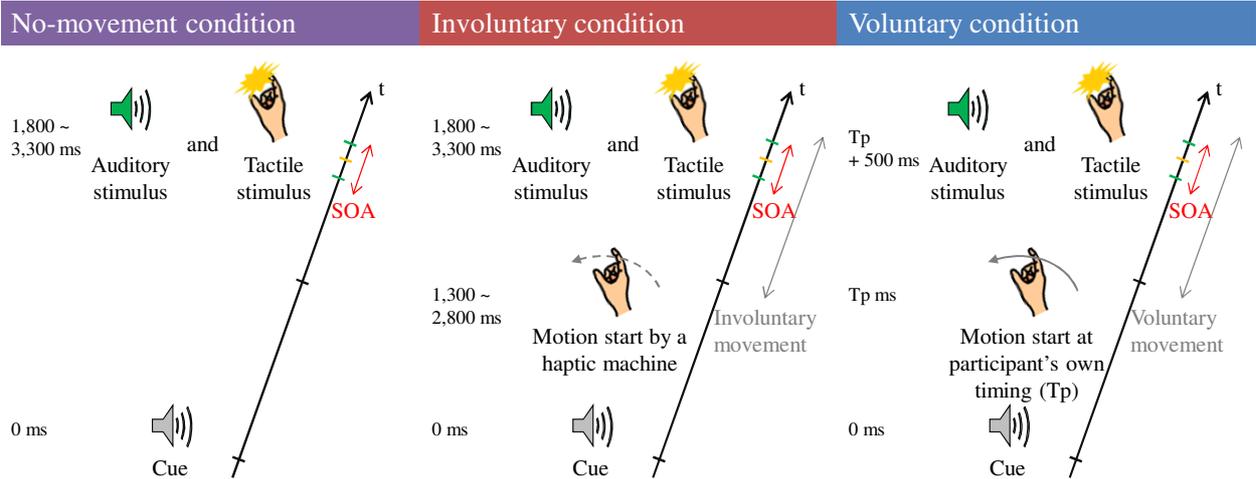


Fig.2 Schematic illustration of the auditory-tactile TOJ task under the three conditions: No-movement, Involuntary, and Voluntary condition. Under Involuntary condition, the haptic test device started to move the participant's right index finger 1,300 to 2,800 msec after the cue. Under Voluntary condition, the participants started to move their right index finger voluntarily at their own timing after the cue.

## 2.2 参加者

21 歳から 30 歳の右利きの男性 18 名 (平均 23.6 歳) が実験に参加した。全員、健全な聴力を有し、上肢の運動を遂行する上で障害はなかった。

## 2.3 装置と刺激

実験環境を Fig. 1 に示す。聴覚刺激として、高音の三角波 (2,000 Hz, 50 dB, 15 ms) をイヤホン (HP-RHF41; radius, Japan) を介して参加者の両耳に提示した。また、参加者の右手人差し指に力覚デバイスである PHANToM DESKTOP (SensAble Technologies) を装着した。触覚刺激として、力覚デバイスによって矩形波パルス (3 N, 15 ms) を右手人差し指の掌側に提示した。聴覚刺激と触覚刺激のどちらにおいても刺激提示における時間の誤差は 1 ms 以下であった。

力覚デバイスは触覚刺激の提示に加えて、人差し指の不随意運動にも使用された。不随意運動条件では、力覚デバイスが参加者の人差し指を屈伸方向へと運動させた。

これら全ての刺激提示は PC (HP xw4600/CT Workstation) 上の OpenHaptics Toolkit (SensAble Technologies) を組み込んだプログラム (Microsoft Visual C++ 2008 を用いて開発) によって制御した。

## 2.4 課題と条件

本研究の課題は、指の運動を伴った聴触覚の時間順序判断課題であった。本課題において参加者は、時間差をもって提示される聴覚刺激と触覚刺激について、

どちらが先に提示されたのかを回答した。聴触覚刺激は、触覚刺激を基準として、SOA (Stimulus Onset Asynchrony) だけずらした時刻に聴覚刺激が提示された。SOA は  $\pm 200$ ,  $\pm 90$ ,  $\pm 60$ ,  $\pm 30$ ,  $0$  ms の 9 条件であった。正の SOA は聴覚刺激が先に、また、負の SOA は触覚刺激が先に提示されることを意味する。また、指の運動としては、右手人差し指を完全に伸ばした状態から、掌の側へと曲げる運動を実施させた。

## 2.5 実験手順

実験条件は、運動無し条件、不随意運動条件、および随意運動条件の 3 条件を設けた (Fig. 2)。実験は、外部からの光を遮断した防音室の中で行われた。また、出来る限り静穏下での実験を遂行するために、参加者にはイヤホンに重ねてイヤーマフを着用させた。さらに、注意による時間知覚への影響 [7, 9, 10, 16] の統制をとるため、実験中は常に、触覚刺激へと注意を向けるようにと教示した。

3 条件に共通することとして、実験開始の Cue として聴覚刺激が提示された。Cue の提示の後には順序判断の対象となる聴覚刺激、触覚刺激が提示された。参加者は、キーボードのキー押しによって先に提示された刺激がどちらであるのかを回答した。回答の後、2,000 ms 後に、次の試行が開始された。

運動無し条件では、Cue の提示の後、1,800 から 3,300 ms の間、ランダムなタイミングで触覚刺激が提示され、さらに SOA の時間差を伴って聴覚刺激が提示された。

不随意運動条件では、Cue の提示の後、1,300 から

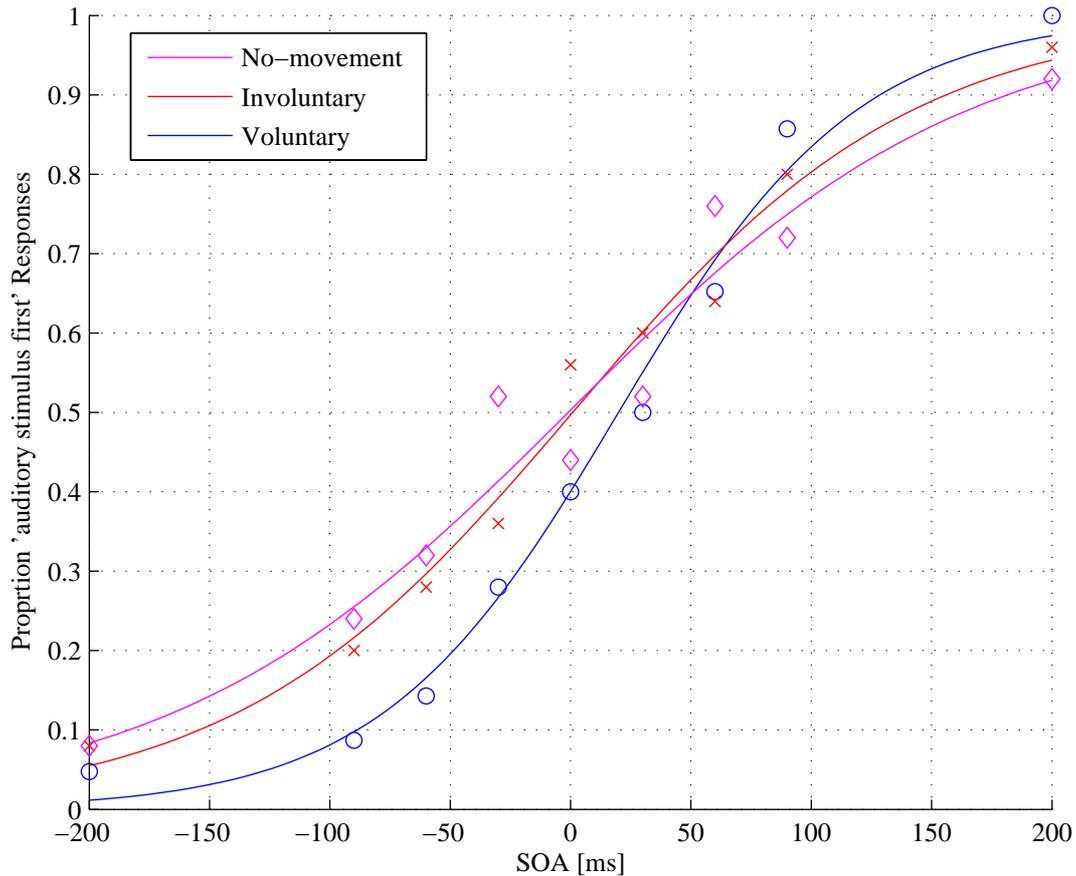


Fig.3 Average psychometric functions under the three conditions of one participant. Positive SOA values mean that auditory stimulus was presented before tactile one, and vice versa.

2,800 ms の間、ランダムなタイミングで力覚装置が参加者の右手人差し指を運動させた。それから 500 ms 後に、参加者の指が運動している間に触覚刺激が提示された。さらに SOA の時間差を伴って聴覚刺激が提示された。

随意運動条件では、Cue の提示の後、およそ 1,000 から 3,000 ms の間、参加者は彼らの任意のタイミングで人差し指の運動を行った。それから 500 ms 後に、参加者の指が運動している間に触覚刺激が提示された。さらに SOA の時間差を伴って聴覚刺激が提示された。

実験は、各 SOA 条件を 5 つずつ入れた 45 試行を 1 ブロックとし、条件毎に 5 ブロック行った。1 ブロック内での SOA の順序はランダムに並べた。また、本実験を開始する前に、能動的運動における指の運動の練習を 45 試行実施した。なお、指の運動の練習時には、順序判断を課さなかった。さらに、各条件における順序判断の練習を、本実験と同様の環境で 1 ブロックずつ実施した。すべての順序判断の練習、および本実験における運動条件の順序は参加者間においてカウン

ターバランスを取った。実験は途中の複数回の休憩も含めて約 3 時間を要した。

## 2.6 解析手法

随意運動条件においては、運動速度が参加者間で大きく異なってしまうことを防ぐため、先行研究に従い運動速度が 60 mm/s ~ 150 mm/s までのデータを有効データとした [17]。

1 名の結果を例として挙げながら (Fig. 3), PSS と JND の算出方法 [13] を以下に示す。まず、運動の条件、および時間間隔の条件ごとに、各 SOA に対して聴覚刺激が先であると回答した頻度を算出する。次に、縦軸に聴覚刺激が先に提示されたと回答した割合、横軸に SOA の値を対応づけプロットし、一般化線型モデルに基づきロジスティック曲線により回帰する。回帰式は次のとおりである。

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

$x$  は、聴覚が先であると実際に回答した割合である。また、回帰によって得られる  $\alpha$  は、聴覚が先と応える割合が 50% になる SOA を示しており、この  $\alpha$  を用いて PSS は以下の式のように定義される。

$$PSS = x_{50} = \alpha \quad (2)$$

また、回帰から得られる  $\beta$  を用いて、JND は以下の式のように定義される。

$$JND = \frac{x_{75} - x_{25}}{2} = \beta \log 3 \quad (3)$$

$x_p$  は、 $p\%$  の割合で、聴覚刺激が先と応える SOA の推定値を示している。つまり、JND は、聴覚が先と応える割合がそれぞれ 75%、および 25% となる SOA の差の 2 分の 1 と定義される。

## 2.7 実験結果

Table. 1 に全ての条件における PSS と JND の平均値と標準偏差を示す。さらに、Fig. 4 に全ての条件における PSS の平均値を、また、Fig. 5 に全ての条件における JND の平均値を示す。PSS と JND それぞれに対して 1 要因反復分散分析を行った。PSS ( $p < 0.001$ ) と JND ( $p < 0.001$ ) 共に条件間で有意差が認められた。さらに、いずれの条件間において有意差が存在するのかを明らかにするために Bonferroni-Holm 法を用いて多重比較を行った。

PSS では不随意運動条件と運動無し条件 ( $p < 0.001$ )、随意運動条件と運動無し条件 ( $p < 0.001$ ) および随意運動条件と不随意運動条件 ( $p < 0.01$ ) と全ての条件間で差が見られた。そして不随意運動条件は、運動無し条件よりも聴覚刺激先行側に PSS が変化した。随意運動条件は、運動無し条件と不随意運動条件よりもさらに聴覚刺激先行側へと PSS が変化した。

一方で JND については条件間においては、随意運動条件と運動無し条件 ( $p < 0.01$ )、随意運動条件と不随意運動条件 ( $p < 0.01$ ) の間に有意差が認められた。随意運動条件は運動無し条件よりも小さな値を示すだ

けでなく、不随意運動条件よりもまた、小さな値を示すことが確かめられた。

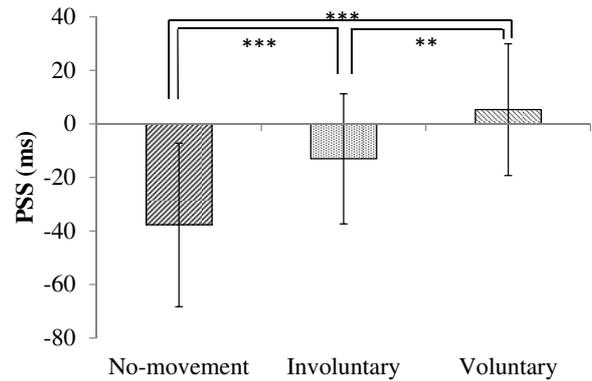


Fig.4 The mean PSSs under the three conditions. Error bars represent the standard deviations between participants. \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

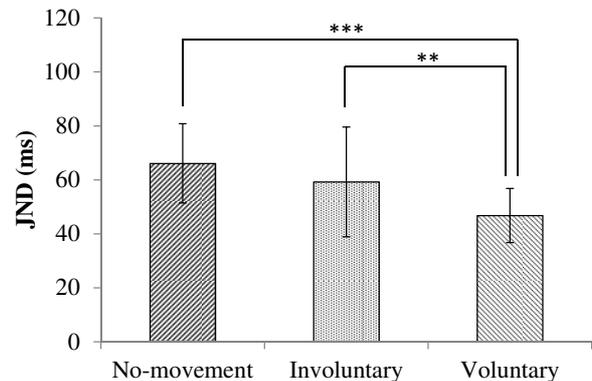


Fig.5 The mean JNDs under the three conditions. Error bars represent the standard deviations between participants. \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

## 2.8 考察

実験 1 では Fig. 4 に示されるように PSS の有意差は全ての条件間で見られ、運動無し条件よりも不随意運動条件が、さらに、不随意運動条件よりも随意運動条件において、PSS が聴覚刺激先行側へと変化した。

Table 1 Means and standard deviations of the PSS and JND values (in ms) under the three conditions. Positive values of PSS means auditory stimulus was presented before tactile one, and vice versa.

Condition	PSS		JND	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.
No-movement	-37.7	30.6	66.1	14.7
Involuntary	-13.1	24.3	59.2	20.3
Voluntary	5.3	24.6	46.8	10.0

このことより、聴触覚の時間順序判断における同時性に対しては、身体の動きと運動の随意性がともに影響を及ぼすことが明らかとなった。

PSS を変化させる要因として、注意による効果を示した研究 [7,9,10,16] によると、注意を向けられた刺激の方が、注意を向けられていなかった刺激よりも、先行して知覚され易くなると報告されている。実験 1 では 3 つの条件共に、触覚刺激に注意を向ける様にと教示を行ったが、その注意に当てられる負荷量が条件間で異なっていた可能性は考えられる。しかしながら、触覚知覚の反応速度は、注意の負荷量の差に依らず、一定であることが示されている [18]。したがって、PSS の変化は、注意による影響として考えるには難しいと思われる。

触覚知覚は、運動を伴うことで実際に物体が触れた時間よりも先行化することが報告されている [2]。異種感覚統合の様な複数の感覚を知覚する場合においても、運動が触覚知覚を先行化することが考えられる。さらに、これらの先行化は、身体の動きと運動の随意性のそれぞれがもたらすものであることも考えられる。

また、Fig. 5 に見られるように、随意運動条件において、運動無し、および不随意運動条件に比べ、JND が小さくなった。このことから、身体の動きだけではなく、運動の随意性も伴うことよって、聴触覚時間順序判断の精度が向上することが示された。

実験 1 からは、身体の動きと運動の随意性のそれぞれが PSS へと影響を与え、触覚知覚を先行化させることと、両者を伴うことで JND へと影響を与え、時間分解能を向上させることが示された。

諸言で述べたとおり、運動と体性感覚知覚の結びつきが示唆されていることから [14,15]、実験 1 の結果はこれらの関係による可能性が考えられる。そこで続く実験 2 では、これらの自己の運動が時間順序判断に与える影響が、触覚を含む時間順序判断に限定されるのか、もしくは、触覚以外の感覚間の時間順序判断にも見られるのかを明らかにする。

### 3. 実験 2 視聴覚間順序判断実験

#### 3.1 目的

身体の動き、あるいは運動の随意性による時間知覚への影響が、触覚刺激を含まない場合にも観察されるかを明らかにする。

#### 3.2 参加者

21 歳から 25 歳の男女計 18 名 (平均 23.3 歳, 男性 14 名, 女性 4 名) が実験に参加し、その内、4 名の参加者が左利きであった。全員共に健常な視力、及び聴

力を有し、上肢の運動を遂行する上で障害はなかった。

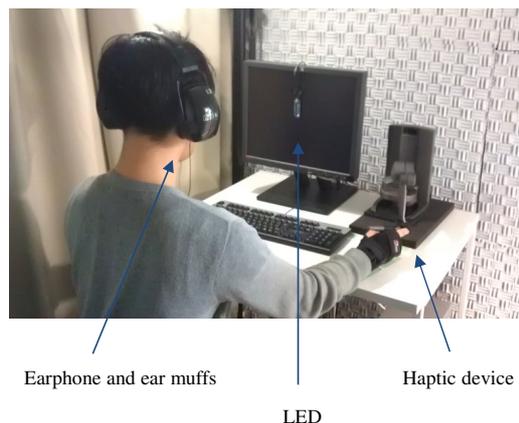


Fig.6 The experimentation environment. LED flash was generated 30 cm away from participants, and sinusoidal wave sound was presented through earphone. Haptic device was attached with participant's right index finger. Under the Involuntary condition, the haptic device moved participant's finger.

#### 3.3 装置と刺激

実験環境を Fig. 6 に示す。視覚刺激として LED (15 ms) を参加者の約 30 cm 前方から青色にて提示した。LED の発光は USB マイコンボード (PIC18F2550) によって制御し、刺激提示における時間の誤差は 1 ms 以下であった。一方、聴覚刺激としては、高音の三角波 (2,000 Hz, 50 dB, 15 ms) をイヤホン (HP-RHF41; radius, Japan) を介して参加者の両耳に提示した。聴覚刺激においても刺激提示における時間の誤差は 1 ms 以下であった。その他の装置については実験 1 と同様であった。

#### 3.4 課題と条件

本研究の課題は、指の運動を含めた視聴覚の時間順序判断課題であった。本課題において参加者は、時間差をもって提示される視覚刺激と聴覚刺激について、どちらが先に提示されたのかを回答した。視聴覚刺激の提示間隔は視覚刺激を基準として、SOA (Stimulus Onset Asynchrony) だけずらした時刻に聴覚刺激が提示された。SOA は  $\pm 200$ ,  $\pm 90$ ,  $\pm 60$ ,  $\pm 30$ , 0 ms の 9 条件であった。正の SOA は聴覚刺激が先に、また、負の SOA は視覚刺激が先に提示されることを意味する。指の運動は実験 1 と同様であった。

#### 3.5 実験手順

実験手順の多くは実験 1 と同様であった。実験 1 と異なる点としては、実験 1 において用いた触覚刺激の

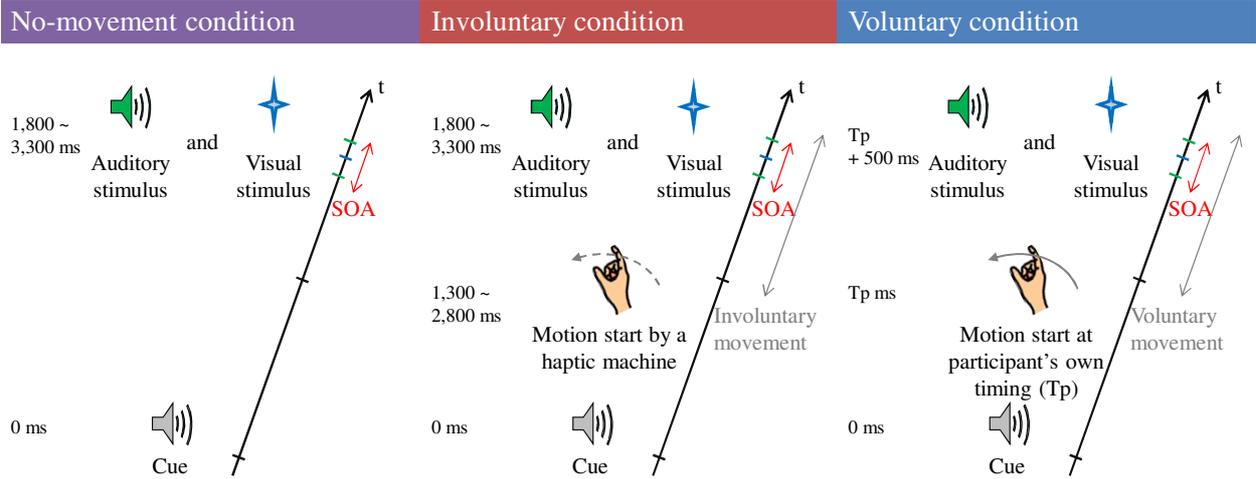


Fig.7 Schematic illustration of the visual-auditory TOJ task under the three conditions: No-movement, Involuntary, and Voluntary condition. Under Involuntary condition, the haptic test device started to move the participant's right index finger 1,300 to 2,800 msec after the cue. Under Voluntary condition, the participants started to move their right index finger voluntarily at their own timing after the cue.

代わりに視覚刺激が用いられたことであった (Fig. 7). また、視線運動によって時間知覚が変動することが示されており [19], 本実験では参加者の視線運動による知覚への影響を取り除くため、固視点を設けた。固視点として赤色 LED を用いた。固視点の提示時間は 2,000 ms であった。その後、固視点が消されると同時に実験開始の Cue として聴覚刺激が提示された。Cue の提示の後には順序判断の対象となる視覚刺激、聴覚刺激が提示された。参加者は、キーボードのキー押しによって先に提示された刺激がどちらであるのかを回答した。回答に伴って再び固視点となる赤色 LED が発光し、次の試行が開始された。さらに、実験中は常に、視覚刺激へと注意を向けるようにと教示した。

### 3.6 解析手法

解析手法は実験 1 と同様であった。

### 3.7 実験結果

Table. 2 に全ての条件における PSS と JND の平均値と標準偏差を示す。さらに、Fig. 8 に全ての条件

における PSS の平均値を、また、Fig. 9 に全ての条件における JND の平均値を示す。PSS と JND それぞれにおいて 1 要因反復分散分析を行った。PSS については条件間間に有意差は見られなかった ( $p > 0.05$ )。一方で JND については条件間において有意差が見られた ( $p < 0.001$ )。さらに、いずれの条件間において有意差が存在するのかを明らかにするために Bonferroni-Holm 法を用いて多重比較を行った。随意運動条件は運動無し条件 ( $p < 0.01$ ) よりも小さな値を示し、さらに、不随意運動条件 ( $p < 0.01$ ) よりも、小さな値を示すことが確かめられた。

### 3.8 考察

実験 2 視聴覚順序判断実験では PSS は条件間に有意差が見られず、実験 1 聴触覚順序判断実験とは異なり運動による PSS への影響が消失した。一方、JND は実験 1 と同様、随意運動条件の値が他の条件と比較して有意に小さな値を示し、運動の能動性により順序判断の時間的な分解能が高まった。したがって随意

Table 2 Mean and standard deviations of the PSS and JND values (in ms) under the three conditons. Positive value of PSS shows auditory stimulus was presented before visual one, and vice versa.

Condition	PSS		JND	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.
No-movement	-2.4	38.6	66.1	12.5
Involuntary	2.1	37.7	68.5	13.6
Voluntary	5.4	24.7	55.7	8.8

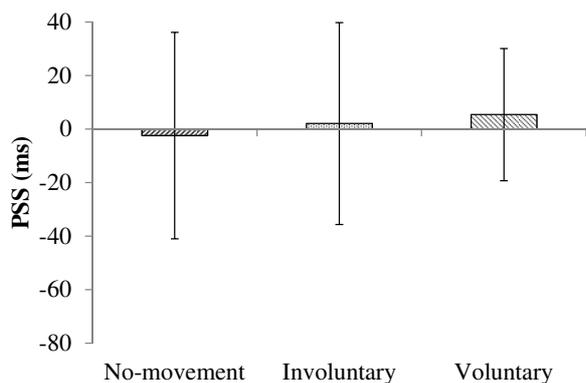


Fig.8 The mean PSSs under the three conditions. Error bars represent the standard deviations between participants.

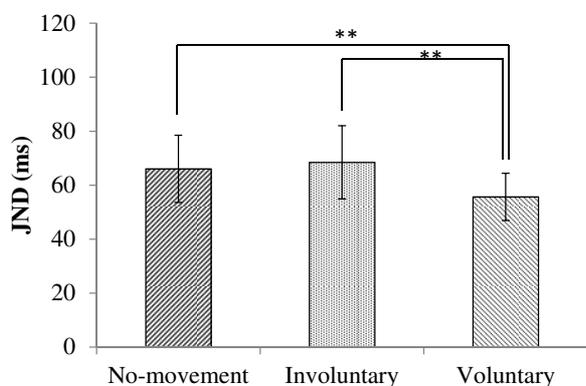


Fig.9 The mean JNDs under the three conditions. Error bars represent the standard deviations between participants. \*\* $p < 0.01$

運動による異種感覚情報統合の時間順序判断への影響は、PSSにおいては触覚に限定されたものであり、JNDについては、感覚の組合せに依らないことが明らかとなった。

触覚知覚を含まない実験2においてPSSの変動が観察されなかったことから、身体の動きと運動の随意性といった運動による時間知覚の同時性の変動は、触覚知覚に限定されたものであると示された。すなわち、身体の動きおよび運動の随意性は視覚知覚と聴覚知覚を加速または減速させることはないと考えられる。それゆえに、聴触覚間の統合において見られた触覚知覚の先行化は、触覚知覚の加速であると考えられる。

また、JNDについては、実験1と実験2のどちらにおいても、随意運動条件において小さくなり、異種感覚統合の時間分解能の向上が見られた。先行研究によると、補足運動野において時間知覚の処理を専門とした働きがあることが観察されており [20]、また、随意運動によって主観的に感じ取られる時間の長さが伸長されることが示されている [3]。これらの研究から、

感覚の種類に関わらず随意運動によって時間分解能の高まりが見られるのは、この補足運動野における時間知覚処理が、随意運動によって高速化するためである可能性が考えられる。

#### 4. 総合考察

本研究では、身体の動き、あるいは運動の随意性が時間知覚へと影響を与えるのかを明らかにすることと、運動による時間知覚への影響が触覚との結びつきによるものであるのか、あるいは触覚以外の感覚情報にも見られるものであるのかを明らかにすることを目的とした。そこで実験1として聴触覚順序判断課題を3種の条件で実施した。実験1からは、身体の動きと運動の随意性がそれぞれ、時間知覚の同時性へと影響を与えることが確認され、触覚知覚を先行化させた。さらに、身体の動きと運動の随意性の両方が伴った場合には、時間知覚の分解能の向上も見られた。次に、実験2として視聴覚順序判断課題を実験1と同様の3条件で実施した。実験2では身体の動きと運動の随意性による時間知覚の同時性への影響は消失した。他方、時間分解能は、実験1と同様、身体の動きと運動の随意性の両方が伴った場合に向上した。運動による時間知覚への影響は、同時性に関しては触覚知覚を含む時間順序判断に限定されたものであるが、分解能に関しては、随意運動のように能動的に環境へと働きかけることが、時間順序判断の精度を向上させるものであると示された。

実験1, 2より、時間知覚の分解能は感覚情報に依らず、運動は同様の効果を与えることが示されたが、時間知覚の同時性については、運動が影響を及ぼすものは触覚に特異的であることが示された。このことから、運動を伴う知覚を考慮する際の身体情報として特に触覚の重要性が示唆される。

以下では、運動による時間知覚への影響に関して2つの観点から考察を行う。第1に、感覚情報の伝達速度と処理時間の観点から考察を行う。そして第2に、因果関係の観点から考察を行う。第1の考察は、運動に関連して感覚情報の伝達速度と処理速度が変化することで、時間知覚が影響を受けることについて考察する。第2の考察は、運動によって主観的な因果関係の認識が変化することで、時間知覚が影響を受けることについて考察する。

##### 4.1 感覚情報の伝達速度と処理時間に基づく時間知覚の考察

知覚する感覚情報に加え、運動に関係する情報について考える。身体の動きによって求心的に発生する固

有感覚フィードバックと、随意的な運動によって発生する遠心性コピーを考える。遠心性コピーは、運動が随意的である場合にのみ発生する運動イメージであり、固有感覚フィードバックとは独立に発生する [15]。また遠心性コピーの働きとしては、運動軌道の予測 [14, 19]、および触覚知覚の強度を低減させることが知られている [17]。実験 1, 2 において随意運動が時間知覚の同時性と分解能へ影響を与えたメカニズムとして遠心性コピーが考えられる。時間知覚の同時性に関しては、遠心性コピーが触覚知覚を加速させたと考えられる。触覚知覚の加速については、遠心性コピーが体性感覚野に関係する活動であることから、触覚知覚の閾値を小さくし、その結果として、触覚の処理速度が速められたと考えられる。また、時間知覚の分解能に関しては、遠心性コピーは触覚知覚を含む時間順序判断に限定せず時間知覚の分解能を向上させた。分解能の向上は、遠心性コピーによる補足運動野の活動 [15] によって、補足運動野に内在する時間処理機構が加速したためである可能性が考えられる。

一方、身体の動きが時間知覚の同時性へと影響を与えたメカニズムとして固有感覚フィードバックが考えられる。時間知覚の同時性に関しては、固有感覚フィードバックは触覚知覚の先行化を促した。これは、深部感覚の筋活動によって、指表面に与えられる触覚知覚を鋭敏にさせたと考えられる。実際、運動に伴う筋活動と、力覚装置による反発刺激を受容する皮膚表面への刺激は、求心性の伝達経路を共有するため、応答を速めた可能性が考えられる。

能動的に環境へと働きかけることは、視聴覚情報間に関しては、運動を行うことで、求心性と遠心性の情報処理が追加されたとしても、時間知覚の同時性は変動させないことが示された。他方で、聴触覚情報間に関しては、求心性と遠心性の情報処理が同時に介入し、触覚知覚を先行化することによって同時性が変動することが示された。さらに、時間知覚の分解能に関しては、随意運動によってより鋭敏になることが示された。

#### 4.2 因果関係に基づく時間知覚の考察

本節では、因果関係から本実験を考察し、時間知覚を因果関係に基づいて考える。

私たちは外界から様々な感覚情報を知覚する。時にある感覚情報のまとまりを 1 つの事象として認識する。このことの繰り返しにより順序関係を伴いながら複数の事象を認識する。時に、複数の事象における順序関係の間に因果関係を見出す。このように、因果関係における根本的なものとして時間知覚が考えられる。すなわち、単純な時間知覚から複雑な因果関係が形作

られると考えることが出来る。

ただし、認知における因果関係とは主観的なものである。近年、この主観的な因果の把握が、感覚情報の提示方法や運動によって変化することが示されてきている [11, 21–23]。さらに、因果関係が時間知覚を変化させることも示されており、因果関係が見出される 2 つの事象は、因果関係を伴わない 2 つの事象よりも短い時間間隔で知覚されることが報告されている [24]。このことから、自らの振舞いによって主観的な因果関係が変化し、さらに、その因果関係の変化が時間知覚を変えてしまうということが考えられる。つまり、時間知覚から因果関係が形作られるだけでなく、因果関係もまた、時間知覚に影響を与えるのであると考えられる。

実験 1 のように、指の運動の後に指先へと刺激が提示されることは、日常的な振舞いとして、到達運動に類似している。一方で、実験 2 のように、指に運動の後に、音や光が提示されるといったことは、日常的な振舞いにおいて多く見られることではないと考えられる。したがって、実験 1 は実験条件に因果性が強いのに対し、実験 2 では因果性は弱いと考えられる。実験 1 における PSS の変動は、運動による因果関係の変化による影響も受けていると考えられる。

## 5. 結言

本研究では、能動的に環境へと働きかけることで、どのように時間知覚が変化するのかを明らかにすることを試みた。そこで、身体の動きと運動の随意性による時間知覚への影響を検討することと、これら運動による影響が及ぼす感覚情報の範囲の検討を目的とした。実験 1 では聴触覚間の時間順序判断課題を、実験 2 では視聴覚の時間順序判断課題を行った。実験 1 と実験 2 とともに順序判断に合わせて 3 種の条件として、運動無し条件、不随意運動条件、随意運動条件を行った。

時間知覚の同時性に関しては、身体の動きと運動の随意性がそれぞれ触覚知覚を先行化することが示された。他方、時間知覚の分解能に関しては、随意運動のように能動的に環境へと働きかけることが、感覚情報の組合せに依らず精度を向上させるものであると示された。

情報の伝達速度を処理時間の観点から考えると、身体の動きから生じる求心性の情報と運動の随意性から生じる遠心性コピーが触覚知覚に限定して加速させると考えられる。また、求心性と遠心性の情報の両方によって、時間知覚の分解能を感覚情報の組合せに依らず向上させると示唆される。因果関係の観点から考えると、運動によって主観的な因果関係が変化し、さら

に因果関係によって時間知覚が変化することが報告されていることから、運動とその結果提示される刺激との間に因果関係が見出し易い聴触覚間の順序判断において同時性が運動によって変動したと考えられる。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、熱心にご指導頂きました三宅美博教授に心より感謝を申し上げます。また、審査をして頂きました中村清彦教授、古山宣洋准教授に感謝いたします。実験条件の決定や解析方法、論文の執筆方法などに関して多大なご指導を下さいました東京大学、兼、東京工業大学の緒方大樹助教、東京工業大学の小川健一朗助教、そして東北大学の野澤孝之助教に深く感謝いたします。また、研究活動を進める上でたくさんの助言を頂き公私ともにお世話になった三宅研究室の皆様、およびロボットインフォマティクス実践研究法で討議した皆様に深く感謝いたします。どうもありがとうございました。

#### 参考文献

- [1] Beer RD. Dynamical approaches to cognitive science. *Trends in Cognitive Science*, Vol. 4, pp. 91–99, 2000.
- [2] Yarrow K and Rothwell JC. Manual chronostasis: Tactile perception precedes physical contact. *Current Biology*, Vol. 13, pp. 1134–1139, 2003.
- [3] Park J, Schlag-Rey M, and Schlag J. Voluntary action expands perceived duration of its sensory consequence. *Experimental Brain Research*, Vol. 149, pp. 527–529, 2003.
- [4] Shi Z, Hirche S, Schneider WX, and Müller H. Influence of visuomotor action on visual-haptic simultaneous perception: A psychophysical study. In *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems*, pp. 65–70, 2008.
- [5] Borja R and Joan L. Proprioception improves temporal accuracy in a coincidence-timing task. *Experimental Brain Research*, Vol. 210, pp. 251–258, 2011.
- [6] Cowan MB and Harris LR. Temporal processing of active and passive head movement. *Experimental Brain Research*, Vol. 214, pp. 27–35, 2011.
- [7] Spence C, Shore DI, and Klein RM. Multisensory prior entry. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 130, pp. 799–832, 2001.
- [8] Sugita Y and Suzuki Y. Audiovisual perception: Implicit estimation of sound-arrival time. *Nature*, Vol. 421, p. 911, 2003.
- [9] Zampini M, Brown T, Shore DI, Maravita A, Röder B, and Spence C. Audiotactile temporal order judgments. *Acta Psychologica*, Vol. 118, pp. 277–291, 2005.
- [10] Zampini M, Shore DI, and Spence C. Audiovisual prior entry. *Neuroscience Letters*, Vol. 381, pp. 217–222, 2005.
- [11] Harrar V and Harris LR. The effect of exposure to asynchronous audio, visual, and tactile stimulus combinations on the perception of simultaneity. *Experimental Brain Research*, Vol. 186, pp. 517–524, 2008.
- [12] Vroomen J and Keetels M. Perception of intersensory synchrony: A tutorial review. *Attention, perception & psychophysics*, Vol. 72, pp. 871–884, 2010.
- [13] Finney DJ. Probit analysis a statistical treatment of the sigmoid response curve. *Cambridge Univ. Press*, 1952.
- [14] Blakemore S and Sirigu A. Action prediction in the cerebellum and in the parietal lobe. *Experimental Brain Research*, Vol. 153, pp. 239–245, 2003.
- [15] Christensen M, Lundbye-Jensen J, Geertsen S, Petersen T, Paulsen O, and Nielsen J. Premotor cortex modulates somatosensory cortex during voluntary movements without proprioceptive feedback. *Nature Neuroscience*, Vol. 10, pp. 417–419, 2007.
- [16] Kitagawa N, Zampini M, and Spence C. Audiotactile interactions in near and far space. *Experimental Brain Research*, Vol. 166, pp. 528–537, 2005.
- [17] Blakemore SJ, Wolpert DM, and Frith CD. Central cancellation of self-produced tickle sensation. *Nature Neuroscience*, Vol. 1, pp. 635–640, 1998.
- [18] Hanson JVM, Whitaker D, and Heron J. Preferential processing of tactile events under conditions of divided attention. *Neuroreport*, Vol. 20, pp. 1392–1396, 2009.
- [19] Morrone MC, Ross J, and Burr D. Saccadic eye movements cause compression of time as well as space. *Nature Neuroscience*, Vol. 8, pp. 950–954, 2005.
- [20] Macar F, Coull J, and Vidal F. The supplementary motor area in motor and perceptual time processing: fmri studies. *Cognitive Processing*, Vol. 7, pp. 89–94, 2006.
- [21] Stetson C, Cui X, Montague P, and Eagleman D. Motor-sensory recalibration leads to an illusory reversal of action and sensation. *Neuron*, Vol. 51, pp. 651–659, 2006.
- [22] Hanson JVM, Heron J, and Whitaker D. Recalibration of perceived time across sensory modalities. *Experimental Brain Research*, Vol. 185, pp. 347–352, 2008.
- [23] Cravo AM, Claessens PME, and Baldo MVC. The relation between action, predictability and temporal contiguity in temporal binding. *Acta Psychologica*, Vol. 136, pp. 157–166, 2011.
- [24] Dogge M, Schaap M, Custers R, Wegner D, and Aarts H. When moving without volition: Implied self-causation enhances binding strength between involuntary actions and effects. *Consciousness and Cognition*, Vol. 21, pp. 501–506, 2012.