

随意運動が異種感覚の同時性知覚に与える影響

古里 真康

Effect of Voluntary Movement on Cross-modal Temporal Order Judgment

Masayasu Furusato

Abstract – The purpose of this paper is to clarify the effect of the duration of voluntary and involuntary movement on simultaneous perception in a temporal order judgment task. Participants judged which of auditory and tactile stimuli had been presented first under the movement condition (VOLUNTARY and INVOLUNTARY) and movement duration condition (300, 900, 1500 ms). The just noticeable difference (JND) under the shortest duration condition was smaller than under the other duration conditions. JNDs did not differ between VOLUNTARY and INVOLUNTARY conditions. This result could be attributed to the fact that participants could not predict the duration in our experiment. The interaction between movement conditions and duration conditions was showed on the point of subjective simultaneities (PSSs). The PSSs shifted to the tactile-first-presented point as the duration decreased only in VOLUNTARY condition. These results suggest that at the beginning of voluntary movement, participants attended to tactile stimulus more than to auditory stimulus.

Keywords : Voluntary movement, Temporal order judgment, Audio-tactile

1. はじめに

人間は視覚や聴覚、体性感覚など異種感覚情報を統合し、環境を知覚している。そのためには、感覚間の情報処理時間の遅れを乗り越える必要がある。また、人間は環境に能動的に働き掛けながら感覚の統合を行っている。このような異種感覚統合のメカニズムを理解するためには、人間の時間知覚特性を調べる必要がある [1, 2]。複数の感覚情報が同時に起こったか否かに関する知覚を同時性知覚と呼ぶ。同時性知覚は時間的な異種感覚統合の基礎となると考えられる。この同時性知覚を調べる課題の一つとして時間順序判断課題 (Temporal Order Judgment; TOJ) がある [3]。この課題は提示された2つの刺激に対しどちらが先であったかを判断する課題である。時間順序判断課題より、時間分解能を表す指標である、刺激間のズレの弁別閾である丁度可知差異 (Just Noticeable Difference;

JND)、および、人間が最も同時であると知覚しやすい点である主観的同時点 (Point of Subjective Simultaneity; PSS) が得られる。ただし、時間順序判断課題を用いたこれまでの研究の多くは、受動的に外界の情報を受け取る状況で行われてきており [4, 5]、能動的に外界に働きかける際、同時性知覚がどのように変化するのか、また、そのメカニズムについては未だ多くのことが明らかでない。

最近、時間知覚に対して随意運動が影響を及ぼすことが明らかにされている [6–10]。Shi らは視体性感覚間時間順序判断課題において随意運動ありの条件となしの条件とを比較し、JND と PSS が変化することを示した [8]。また、横山らは聴体性感覚間の時間順序判断課題において、随意運動あり、運動なし、不随意運動ありの3条件を比較することで、随意運動がある条件で JND が小さくなることが、固有感覚情報ではなく随意運動そのものによることを示した [9, 10]。

Table 1 Predictions deduced by the hypothesis that voluntary movements enhance the effect of temporal selective attention on JNDs. (“○ “ means JND narrows. “× “ means JND does not narrow.)

Condition	Selective attention	
	High	Low
Voluntary movement	○	×
Involuntary movement	×	×

これらの研究は、随意運動が同時性知覚に与える影響を示したが、そのメカニズムについては未だ明らかでない。そこで、本研究では、随意運動が同時性知覚に影響を与えるメカニズムとして、随意運動が時間的選択的注意の効果を高めるという仮説、および、インターナルクロックテンポを変化させるという仮説を検討する。また、先行研究に見られなかった随意運動が主観的同時点に影響を与える現象について、より詳細に検討することを目的とする。

また、横山らは、随意運動あり、運動なし、不随意運動ありの3条件において、主観的同时点に差はないことを主張しているが [9,10]、横山らが設定した 900 ms 以外の運動時間長において、随意運動あり、不随意運動ありの条件間にて、注意の量が増加することにより、PSS に差があらわれる可能性がある。時間順序判断課題においては、注意を向けた刺激の方が処理速度が速くなり、PSS を変化させるという、Prior entry 効果が知られている [11]。この Prior entry 効果により、運動時間長が長い条件では、注意の量が運動時間長が短い条件に比べ増加し、横山らでは見られなかった PSS の変化が見られる可能性が考えられる。

具体的なアプローチを以下に示す。Correa らは、時間順序判断課題において、刺激の提示タイミングが予測できるとき、JND の値が小さくなると報告しており、これを時間的選択的注意の効果であるとしている [12]。横山らは、試行開始キューから刺激提示までを一定の時間間隔でのみ実験を行っており [9,10]、随意運動が JND を狭めた理由として、随意運動が時間的選択的注意の効果を高める可能性が考えられる。時間的選択的注意の影響を調べる際には、横山らの随意運動および不随意運動を 900 ms 間行う実験条件を [9,10]、キューと刺激の提示時間間隔をランダムに変化させ、刺激提示時刻を予測できないよう設定し、JND を観察する。これにより時間的選択的注意の影響を排除が可能であ

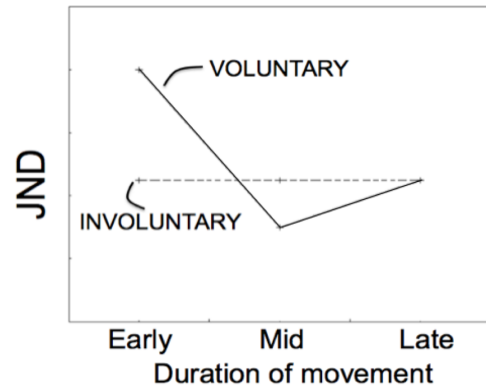


Fig.1 Predictions deduced by the hypothesis that voluntary movements slow the internal clock and the slowing is followed by the increase of the clock rate.

る。Table 1 に随意運動が時間的選択的注意の効果を高めるといふ仮説が正しい場合に得られる結果の予想を示す。仮に、横山らの実験のように、課題中の刺激の時間的予測が可能である場合は、時間的選択的注意が高い状態であり、随意運動が JND を狭める結果になると考えられる。一方、課題中の刺激の時間的予測が不可能である実験設定では、課題中の刺激に対する時間的選択的注意が低い状態であり、随意運動が JND を狭める結果が見られないことが考えられる。

一方で、Wenke & Haggard は、随意運動後に時間間隔知覚が変化する理由として、人間が内的に保持していると考えられているインターナルクロックのテンポが随意運動直後、一旦遅くなり、その後、補償的に早くなるためであると報告している [7]。このことから、先行研究において随意運動が JND を変化させた理由も、インターナルクロックテンポの変化によって、同時性知覚の時間分解能が一時的に向上したためである可能性がある。随意運動がインターナルクロックテンポを変化させ、その結果、時間分解能が変わるという影響を調べる際には、試行開始キューから刺激提示時刻ま

での時間間隔について複数の条件を設定し、条件間で JND の値が変化するかどうかを観察する。Wenke & Haggard のインターナルクロック仮説から [7], Fig.1 のような仮説が考えられる。仮説に基づけば、随意運動開始直後、インターナルクロックテンポが遅くなると同時に JND が大きくなり、その一定時間後、補償的にインターナルクロックテンポが早くなり JND が小さくなることが考えられる。また、随意運動および不随意運動を 900 ms 行う条件にて、横山らと同様の結果が見られるはずである。

また、随意運動が主観的同時点に影響を与える現象を調べるために、横山らが設定した運動時間長 900 ms を含めた 3 条件の運動時間長における JND を観察する。もし、横山らが観察した 900ms の時間長以外の条件にて、PSS の変化が随意運動あり、および、不随意運動ありの条件間で見られるならば、随意運動が主観的同時点に影響を与える結果を得られる。

2. 運動の時間長を変化させた時の聴体性感覚時間順序判断課題

2.1 実験参加者

実験参加者は男女計 12 名 (平均 23.2 歳, 男性 10 名, 女性 2 名) であった。また、全員が右利きであり、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。

2.2 装置と刺激

聴覚刺激としてホワイトノイズ (50 dB, 15 ms) をイヤホン (MHP-EP5; EMPRESS) を介して参加者の両耳に提示した。刺激提示における時間の誤差は 1 ms 以下であった。また体性感覚刺激 (2 N, 15 ms, 矩形型パルス) は体性感覚に対する刺激提示インターフェースである PHANTOM DESKTOP (SensAble Technologies) を用いて右手の人差し指先端に提示された。体性感覚に対する刺激提示インターフェースは 1 ms の精度で制御された。Fig. 2 に体性感覚に対する刺激提示装置を示す。この刺激提示装置は PC (HP xw4600 / CT Workstation) 上の Open-Haptics Toolkit (SensAble Technologies) を組み込んだプログラム (Microsoft Visual C++ 2008 を用いて開発) を用いて制御した。不随意運動を行う際もこの装置を用いた。



Fig.2 The device to present tactile stimuli and to move participants' arms.

2.3 課題と条件

課題は聴体性感覚を用いた時間順序判断課題であった。聴体性感覚刺激の提示間隔は Target (ホワイトノイズによる聴覚刺激) の提示時刻を基準として、SOA (Stimulus Onset Asynchrony) だけずらした時刻に提示された。SOA は ± 200 , ± 90 , ± 60 , ± 30 ms の 8 条件であった。負の SOA は、体性感覚刺激が先行して提示されることを意味する。

また、自己の身体運動に関して、右腕の随意運動を行いながら時間順序判断課題を遂行する VOLUNTARY 条件、体性感覚刺激に用いた装置により右腕の不随意運動を伴いながら時間順序判断課題を遂行する INVOLUNTARY 条件の 2 条件を設定した。さらに、随意運動、不随意運動それぞれの運動時間長を 300 ms, 900 ms, および、1500 ms の 3 条件を設定した。

2.4 実験デザイン

実験デザインは、Fig. 3 のように、2 運動に関する条件 (随意運動, 不随意運動) $\times$ 8 SOA の値 (± 200 , ± 90 , ± 60 , ± 30 ms) $\times$ 3 運動の時間長 (300, 900, 1500 ms) の 3 要因 48 条件であった。

2.5 実験手続き

実験は防音室において実施された。参加者には、実験中は瞑目するよう教示をした。また、遮音性の高いイヤーマフを着用させた。提示されるどちらの感覚情報に注意を向けるかが、時間順序判断課題に影響を与

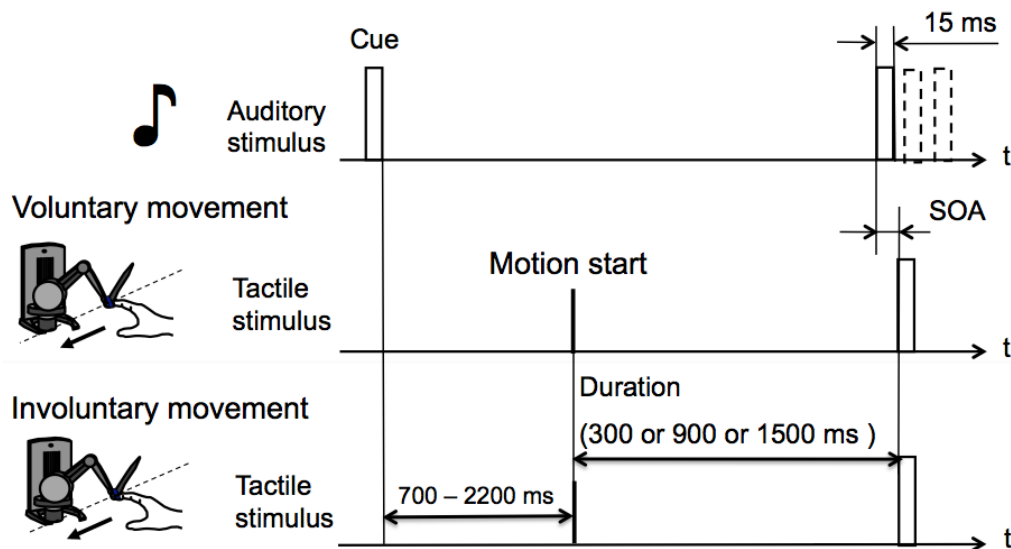


Fig.3 Schematic illustration of VOLUNTARY and INVOLUNTARY conditions. Under the VOLUNTARY condition, participants started to move their right arm voluntarily at their own timing. Under the INVOLUNTARY condition, the tactile test device moved the participant's right arm 1,300 to 2,800 ms. Under the VOLUNTARY and INVOLUNTARY conditions, the auditory stimuli were presented at 300, 900, or 1500 ms from onset of the arm movement.

えることが知られている [11]. そこで本実験では、右手人差し指に与えられる体性感覚に注意を向けるよう教示を行い、注意の効果を統制した。

VOLUNTARY 条件: 試行の開始を知らせるキューとして聴覚刺激 (15 ms のホワイトノイズ) が提示され、その後、参加者は自身のタイミングで右腕を動かし始めた。随意運動が 300 ms, 900 ms, 1500 ms のいずれかの長さだけ行われたとき、聴覚刺激と体性感覚刺激が提示された。その後、参加者はどちらの刺激が先に提示されたかについて強制二択で選択した。回答にはキーボードを用いた。運動の開始点は、右方向から左方向へと水平方向に 10 mm 移動した時点とした。

INVOLUNTARY 条件: 試行の開始を知らせるキューとして聴覚刺激 (15 ms のホワイトノイズ) が提示され、その後 700~2200 ms 後に体性感覚刺激に用いた装置が参加者の上肢を動かした。キューが提示されてから動き出すまでの時間間隔は 5 名の参加者で行った VOLUNTARY 条件での予備実験の結果に基づき、その値は試行ごとに範囲内でランダムに選択され

た。また、運動の速度についても予備実験の結果を基に、70 mm/s, 80 mm/s, 90 mm/s, 100 mm/s, 110 mm/s のいずれかを試行ごとに選択した。その他の手続きについては、VOLUNTARY 条件と同様であった。

本実験の構成は、300 ms, 900 ms, 1500 ms のいずれかの時間幅で随意運動を行う VOLUNTARY セッション、体性感覚刺激に用いた装置が参加者の指を動かし不随意運動を行う INVOLUNTARY セッションから成り、それぞれの試行数は 120 試行であった。各セッション内の 3 条件の運動時間長はランダムに設定されており、実験終了時に運動時間長 3 条件の試行数は同一になるように構成した。本実験前には INVOLUNTARY 条件の練習を 24~72 試行行い、VOLUNTARY セッションでは、毎回課題前に運動速度の練習が 24 試行 (SOA8 条件 × 運動時間長 3 条件) 行われた。運動速度を一定に保つ際には先行研究を基に 70 mm/s ~110 mm/s に合わせるように練習を行った [8]。VOLUNTARY および INVOLUNTARY セッションの 2 セッションを 1 ブロックとし、本研究では計 5~6 ブロックの実験を行い、ブロック間にて VOLUNTARY セッションと INVOLUNTARY セッションの順序はカウンターバランスを取った。

3. 結果

3.1 解析手順

VOLUNTARY 条件においては、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 [8]。また、VOLUNTARY 条件と INVOLUNTARY 条件間の運動開始時刻との時間間隔を同一にするため、VOLUNTARY 条件と INVOLUNTARY 条件のキューから運動開始時刻との間の時間間隔が 700 ms～2200 ms までのデータを有効データとした。さらに、先行研究に基づき、SOA=±200 ms において回答率が 70 % 以下である参加者、設定した最大 SOA である 200 ms よりも JND の数値が大きい参加者は、時間順序判断課題を正常に行うことができなかったと判断した [4,5,13]。これから、参加者の内 2 名 (男性 1 名, 女性 1 名) を解析対象から外し、実験参加者計 10 名を解析対象とした。

PSS と JND の算出方法 [14] 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した。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 α は、聴覚が先と応える割合が 50% になる SOA を示しており、この値が PSS の推定値である。また、回帰から得られる α および β を用いて、刺激間のズレの弁別閾値 (JND) と主観的同時点 (PSS) は以下の式のように定義される。

$$\text{JND} = \frac{(x_{0.75} - x_{0.25})}{2} \quad (2)$$

$$= \beta \log 3 \quad (3)$$

$$\text{PSS} = x_{0.5} \quad (4)$$

$$= \alpha \quad (5)$$

x_p は、 $p\%$ の割合で、聴覚が先と応える 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。

3.2 JND および PSS の結果

全ての条件における実験参加者より得た回答の回帰曲線を Fig.4 に、回帰曲線より得た条件ごとの実験参加者における JND の平均値を Fig.5 に、回帰曲線より得た条件ごとの実験参加者における PSS の平均値を Fig.6 に、JND および PSS をまとめた表を Table 2 に示す。

JND についてそれぞれ以下に示す。VOLUNTARY 条件においては、300 ms の運動時間長において 87.6 ± 56.1 ms であった。また、900 ms の運動時間長において 67.6 ± 32.2 ms, 1500 ms の運動時間長において 80.5 ± 34.2 ms であった。一方、INVOLUNTARY 条件においては、300 ms の条件において 92.2 ± 44.6 ms, また、900 ms の運動時間長では 75.0 ± 34.3 ms, 1500 ms の運動時間長において 68.6 ± 26.6 ms であった。

PSS についてそれぞれ以下に示す。VOLUNTARY 条件においては、300 ms 条件において 6.5 ± 53.6 ms, 900 ms 条件において -31.9 ± 45.5 ms, 1500 ms 条件では -79.2 ± 59.1 ms であった。INVOLUNTARY 条件においては、300 ms 条件において -21.1 ± 53.9 ms, 900 ms 条件では -36.3 ± 49.9 ms, 1500 ms 条件において -45.1 ± 53.1 ms であった。

JND, および、PSS の結果それぞれに対して、Kolmogorov-Smirnov 検定により正規性を、また、Bartlett 検定により等分散性を確認した。そこで、2 要因とも対応ありの二元配置分散分析を行った。

JND の分散分析の結果、運動時間長に主効果が見られると共に ($p=0.025$)、運動の条件 (VOLUNTARY 条件と INVOLUNTARY 条件) と運動時間長 (300 ms, 900 ms, 1500 ms) との間で交互作用に有意傾向が見られた ($p=0.074$)。さらに、運動時間長の主効果に対し下位検定を行ったところ、運動時間長 300 ms と 1500 ms 間 ($p=0.031$)、300 ms と 900 ms 間 ($p=0.011$) において有意差が確認された。

PSS の分散分析においては、運動時間長に主効果が見られると共に ($p=0.0001$)、運動の条件 (VOLUNTARY 条件と INVOLUNTARY 条件) と運動時間長との間で交互作用に有意差が見られた ($p=0.039$)。そのため、運動の条件と運動時間長との交互作用における単純主効果を調べた結果、1500 ms の運動時間長において VOLUNATRY 条件および INVOLUNTARY 条件に有意傾向があることを確認した ($p=0.053$)。さ

Table 2 Mean and standard errors of the JND and PSS values (in ms) under each condition.

Condition	JND		PSS	
	Mean	Standard Error	Mean	Standard Error
VOLUNTARY 300 ms	87.6	56.1	6.5	53.6
VOLUNTARY 900 ms	67.6	32.2	-31.9	45.5
VOLUNTARY 1500 ms	80.5	34.2	-79.2	59.1
INVOLUNTARY 300 ms	92.2	44.6	-21.1	53.9
INVOLUNTARY 900 ms	75.0	34.3	-36.3	49.9
INVOLUNTARY 1500 ms	68.6	26.6	-45.1	53.1

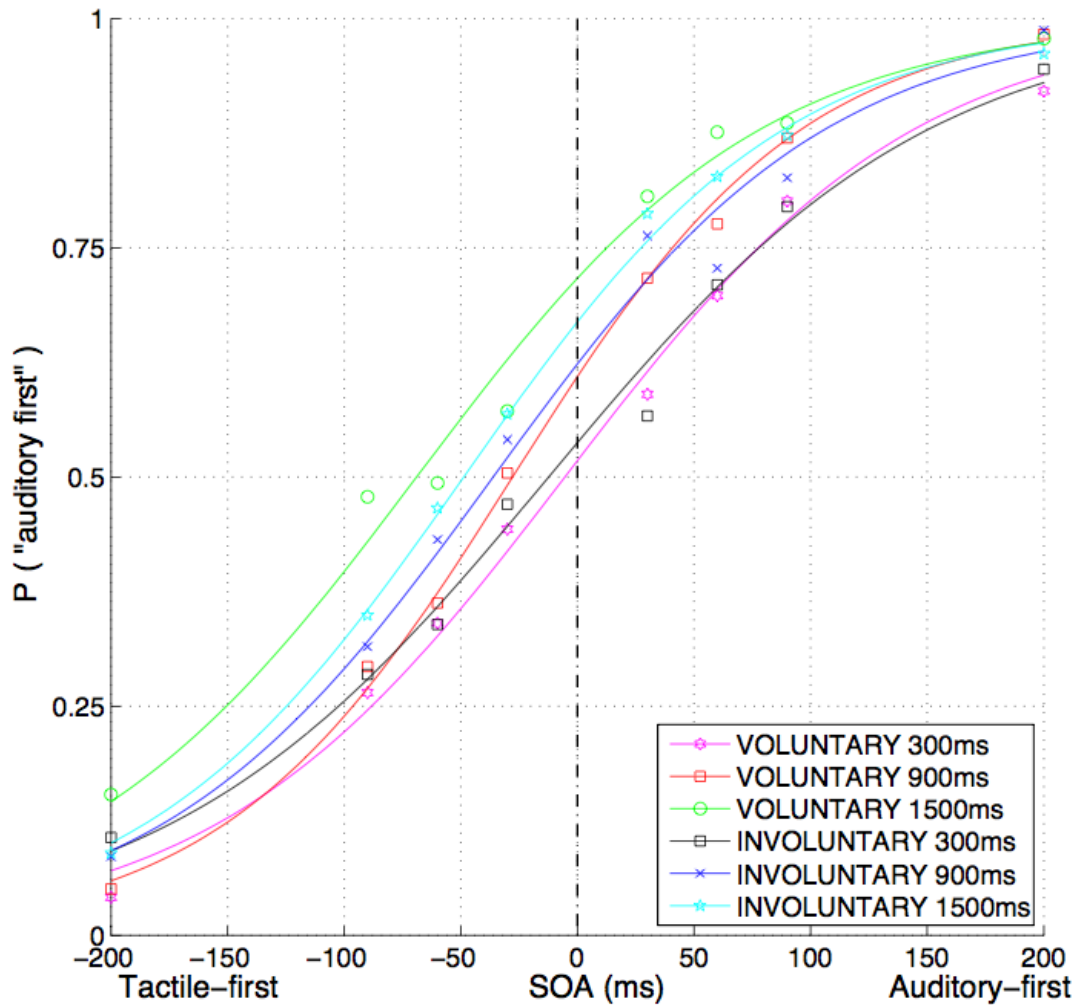


Fig.4 Averaged psychometric functions across all participants under each condition.

らに、VOLUNTARY 条件にて単純主効果が確認された ($p = 0.00001$)。この結果から、VOLUNTARY 条件における 3 条件の運動時間長に対しさらに多重比較を行った結果、運動時間長 300 ms と 1500 ms 間 ($p = 0.000001$)、300 ms と 900 ms 間 ($p = 0.014$)、お

よび、900 ms と 1500 ms 間 ($p = 0.003$)、すべてにおいて有意差が確認された。

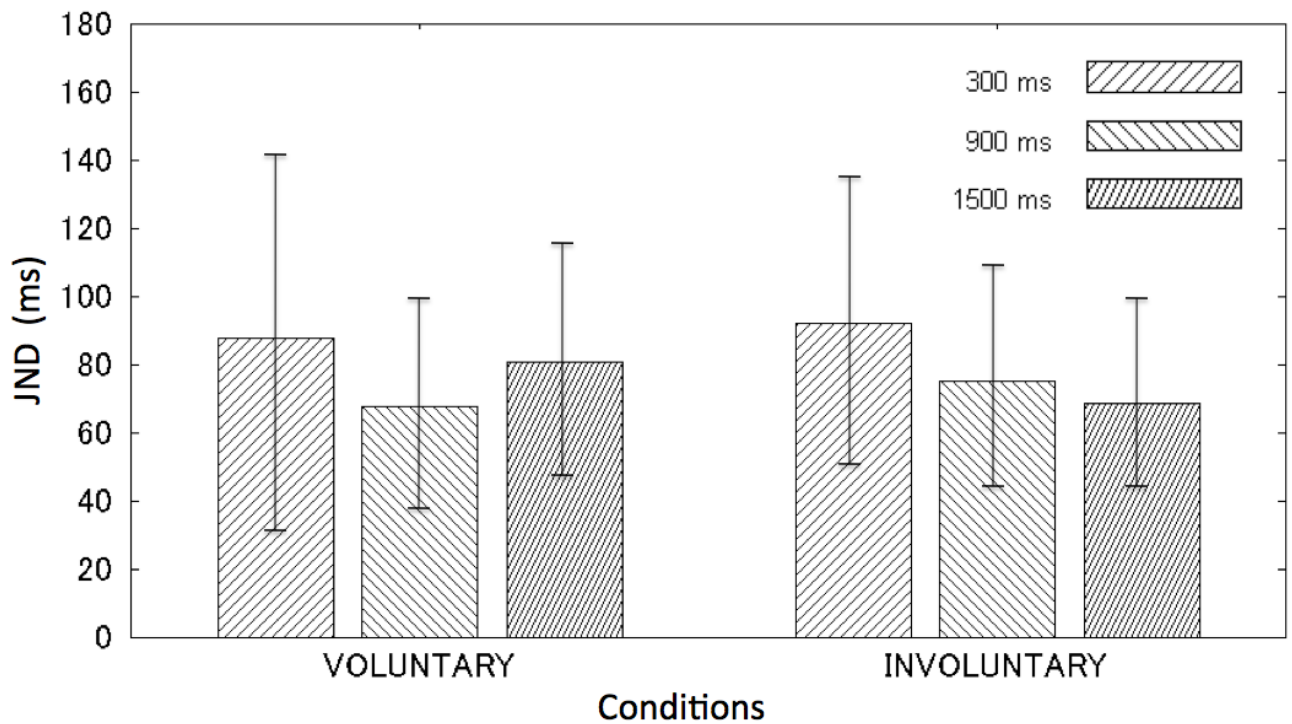


Fig.5 Averaged JNDs under each condition. Error bars mean standard errors between participants.

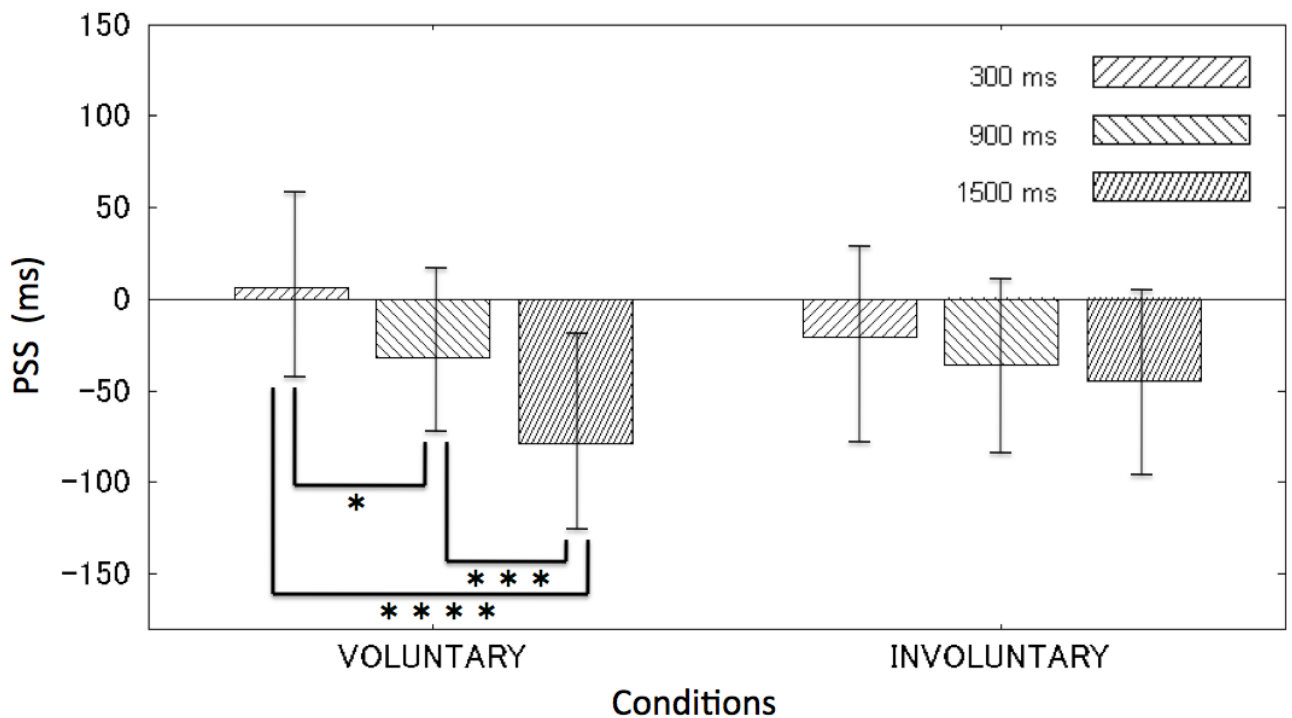


Fig.6 Averaged PSS under each condition. Error bars mean standard errors between participants.

4. 考察

随意運動、不随意運動ともに、運動時間長間で JND に有意差はなかった。一方、運動時間長そのものは主

効果が見られ、下位検定において、300 ms および 900 ms 間と、300 ms および 1500 ms 間にて JND に有意

差が見られた。PSS に関しては、随意運動と運動時間長の間で交互作用が見られ、随意運動条件における運動時間長の全条件間で有意差が見られた。

4.1 同時性知覚の時間分解能に対して随意運動が与える影響

本実験では、横山ら [9, 10] の研究結果と異なり、VOLUNTARY 条件と INVOLUNTARY 条件との間で有意な差は見られなかった。本研究で用いた体性感覚刺激提示装置 PHANTOM DESKTOP を用いた実験設定は、横山らと同様の実験設定であり、横山らの実験設定との差異は、課題中の刺激に対する時間的予測が出来るか否かのみである。つまり、装置のアームの抵抗およびアーム稼働時の振動は、本研究および横山ら両研究において同条件において実験がとりおこなわれた。したがって、本研究の結果が、アームの抵抗、あるいは、振動によるものでないと考えられる。すなわち、随意運動の効果は、刺激提示タイミングが予測可能であるときに限ることを意味する。したがって、本研究の結果は、横山らの実験で見られた随意運動が JND を狭める結果が、随意運動によりインターナルクロックテンポを変化させた結果によるものではないことを示唆している。つまり、本研究では排除した時間的選択的注意の効果が、随意運動によって高められていた可能性を示している。運動系には身体や外的な行動を予測するということが示されている [15, 16]。また、Wenke & Haggard は随意運動と刺激提示の予測が、時間間隔知覚を変化させると報告している [7]。さらに、Blakemore らは、運動予測が運動の結果を予測し感覚の減衰を導き時間の歪みに関与している可能性を示唆している [17]。本研究の結果は、随意運動と刺激の予測可能性との両方によって時間分解能が変化することを示唆するものである。

次に、Wenke & Haggard の結果とは異なる本研究では、随意運動がインターナルクロックテンポに影響をしなかった理由について考察を行う。第一に、Wenke & Haggard の実験デザインでは、随意運動直後の 450 ms から 850 ms 経過時、および、随意運動直後の 850 ms から 1250 ms の間にて音が提示される実験設定がなされており、随意運動によりインターナルクロックテンポが変容し時間分解能が影響を受けるという現象は、オペラントな随意運動特有の現象である可能性

が考えられる。第二に、Wenke & Haggard は、随意運動直後における時間分解能の変化を見ているが、本研究では、随意運動最中における時間分解能の変化を見ており、着目している現象が異なることが挙げられる。つまり、インターナルクロックテンポに影響を与えるのは、随意運動直後に限られた現象である可能性が考えられる。第三に、Wenke & Haggard は、体性感覚を用いたモノモーダルな条件にて時間分解能の変化をみており、本研究のクロスモーダルな条件とは異なる。つまり、この条件の違いによって、インターナルクロックテンポの影響が見られない可能性が考えられる。

また、本研究の統計結果において、VOLUNTARY 条件かつ INVOLUNTARY 条件の運動時間長の主効果の下位検定にて、300 ms と 900 ms、および、300 ms と 1500 ms の条件間に有意差が認められたことに着目する。これは、運動時間長そのものが JND に影響を与えることを示しており、先行研究では見られていない知見である。しかしながら、なぜ運動時間長そのものが JND に影響を与えるかについては、本研究ではわからない。今後の課題である。

4.2 主観的同時点に対して随意運動が与える影響

PSS では、運動時間長と運動の条件との要因間に交互作用が見られた。さらに、下位検定の結果、VOLUNTARY 条件においてのみ、各運動時間長の条件間に有意差が見られた。つまり、随意運動中の時間順序判断では、運動の時間長が長くなるに従い、PSS が聴覚先行寄りから体性感覚先行寄りへと変化することが明らかとなった。加えて、不随意運動では運動時間長とのこのような関係はないことが示された。横山らは不随意運動条件および随意運動条件時において PSS の変化が見られなかったことを報告しているが [9, 10]、随意運動の時間長が 900 ms と定められていたためと考えられる。背景で述べた Prior entry 効果 [11] を考慮すると、横山らは、感覚モダリティに対する注意量が PSS に対して影響の少ない運動時間長条件を観察していたと言える。Fig. 5 から、900 ms の条件において、VOLUNTARY 条件と INVOLUNTARY 条件間で PSS の差が、300 ms、および、1500 ms それぞれの条件と比較して小さくなっている。よって、本研究の 900 ms における結果と横山らの結果は一致するも

のと言える。また、本研究の 1500 ms の運動時間長における PSS において、VOLUNTARY 条件と INVOLUNTARY 条件間で有意傾向が見られていることから、感覚モダリティに対する注意量によって、随意運動が聴体性感覚における主観的同時点に影響を与える可能性が考えられる。

次に、VOLUNTARY 条件において、運動時間長が長くなるほど PSS が体性感覚先行寄りに変化した現象に着目する。これは、随意運動の時間長が長くなるに従い体性感覚への注意が減少し、体性感覚の処理速度が遅くなるという Prior entry 効果の可能性がある。そのために、運動時間長が長くなるほど、より体性感覚先行寄りに PSS が変化したと考えられる。一方、運動時間長の中で、VOLUNTARY-300 ms 条件にのみ、0 に近い値ではあるものの PSS が聴覚先行に変化する現象が見られた。この現象は、聴覚刺激が時間的に先行することにより聴体性感覚間の同時性が保たれることを意味している。先行研究では、聴体性感覚の同時性は体性感覚が時間的に先行することにより保たれることが知られており [4]、VOLUNTARY-300 ms における PSS の結果は、PSS が聴覚先行に変化するほど、体性感覚への注意が強く向けられていることを示している。

さらに、VOLUNTARY 条件および INVOLUNTARY 条件における PSS について比較、検討する。INVOLUNTARY 条件では、運動時間長の各条件間における統計的有意差は見られなかった。それに対し、VOLUNTARY 条件では、運動時間長が長くなるほど聴覚先行に PSS が偏り、運動時間長の各条件間全てにおいて有意差が見られた。つまり、Prior entry 効果 [11] を考慮すると、随意運動時と不随意運動時において、運動時間長が変動する際、体性感覚に対する注意量の振る舞い、および、処理速度の振る舞いが異なる可能性が考えられる。具体的には、不随意運動時には、運動時間長が長くなるに従い、体性感覚に対する注意量および処理速度に変化はない可能性が考えられる。一方、随意運動時には、運動時間長が長くなるに従い、体性感覚に対する注意量が減少し、体性感覚の処理速度が遅くなる可能性が考えられる。これは、随意運動時と不随意運動時では、運動時間長が変化する条件において、聴体性感覚の感覚情報統合のメカニズムが異なることを示している。

4.3 主観的同时点および時間分解能との対応性の示唆

VOLUNTARY 条件の PSS および JND との対応性を検討する。VOLUNTARY 条件では、随意運動の時間長が長くなるほど PSS が体性感覚先行寄りに偏る結果が見られる。これは Prior entry 効果により [11]、随意運動の時間長が長くなるほど体性感覚の処理速度が遅くなることが考えられる。この PSS の体性感覚先行への変化が見られる一方、JND は運動時間長が長くなるほど減少するといった一貫した傾向をもつ変化は見られなかった。この傾向により、随意運動最中の聴体性感覚の時間順序の分解能が変化するメカニズムは、体性感覚の処理速度の低下に依存しない可能性が考えられる。これは、聴覚の処理速度の高まりに依存する可能性があることを意味している。また、この VOLUNTARY 条件の JND および PSS との非対応性は、INVOLUNTARY 条件の結果とは異なる。この JND および PSS の対応性の違いからも、随意運動時と不随意運動時では、運動時間長が変化する条件において、聴体性感覚の感覚情報統合のメカニズムが異なる可能性が考えられる。しかしながら、Spence らは [11]、JND と PSS 間に関係性はなく別の現象として観察されるものであると主張しており、JND と PSS 間の関係性の有無は現在も議論は収束しておらず、明らかでない。これは今後の課題となる。

5. おわりに

本研究では、随意運動が聴体性感覚時間順序判断を変化させるメカニズムについて検討した。

実験は、随意運動最中に時間順序判断課題を行う VOLUNTARY 条件、および、不随意運動最中に時間順序判断課題を行う INVOLUNTARY 条件による 2 条件を設定し、先行研究との比較のため、運動の時間長を 300 ms, 900 ms, 1500 ms の 3 条件を実験中ランダムに指定されるよう設定した。この実験から、聴体性感覚における同時性知覚の特性である、聴体性感覚の時間順序の分解能を示す JND と、人間の主観的同时点をあらわす PSS を観察した。この同時性知覚の変化を、刺激提示タイミングが予測できない状況下の運動時間長ごとに観察し、時間的選択的注意の効果、および、インターナルクロックテンポの変化による効

果を検討した。

主な結果を以下に示す。

1. 随意運動と不随意運動の間において、聴体性感覚の時間順序の分解能に有意差は見られなかった。
2. 運動時間長の 300ms と 900ms 条件間、および、300ms と 1500ms 条件間において、聴体性感覚の時間順序の分解能に有意差が見られた。
3. 主観的同時点は、運動の条件と運動時間長の要因間で交互作用が見られ、VOLUNTARY 条件下では、運動時間長が長くなるに従い、主観的同時点が聴覚先行寄りから体性感覚先行寄りへと変化した。

それに対する結論を以下に示す。

1. 随意運動が聴体性感覚の時間順序の分解能に影響を与えるメカニズムは、時間的選択的注意によるものであると考えられる。
2. 随意運動、不随意運動に関わらず同時性知覚の時間分解能が落ちる可能性がある。
3. 随意運動の時間長が長くなるに従い、体性感覚に対する処理速度が遅くなり、体性感覚の注意量が主観的同時点に影響を与えていることが考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり必要な環境を整えて頂き、熱心なご指導を頂きました三宅美博准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申し上げます。また、本研究における実験条件、解析方法、および、論文の執筆方法などに関して多くのご指導を頂きました、東京工業大学総合理工学研究科所属、兼、東京大学インテリジェント・モデリング・ラボラトリーの緒方大樹様に深く感謝いたします。

また、予備実験における参加者を快諾して下さい、研究方針等で数多くの助言を頂くなど、三宅研究室の皆様には公私共に大変お世話になりました。有り難うございました。

また、お忙しい中、長時間に渡る本実験・予備実験

に参加して下さいました実験参加者の皆様には心より感謝申し上げます。有り難うございました。

その他、研究を進めて行く上で私を支えて頂きました周りの方々に感謝申し上げます。有り難うございました。

参考文献

- [1] D. A. Slutsky, G. H. Recanzone, (2001), Temporal and spatial dependency of the ventriloquism effect, *Neuroreport*, **12**, 7-10.
- [2] M. A. Meredith, (2002), On the neuronal basis for multisensory convergence: a brief overview, *Cogn Brain Res*, **14**, 31-44.
- [3] I. J. Hirsh, (1959), Auditory perception of temporal order, *J Acoust Soc Am*, **31**, 759-767.
- [4] M. Zampini, S. Guest, D. I. Shore, A. Maravita, B. Röder, C. Spence., (2005), Audiotactile temporal order judgments, *Acta Psychologica*, **118**, 277-291.
- [5] V. Occelli, C. Spence, M. Zampini, (2008), Audiotactile temporal order judgments in sighted and blind individuals, *Neuropsychologia*, **46**, 2845-2850.
- [6] J. Park, M. Schlag-Rey, J. Schlag, (2003), Voluntary action expands perceived duration of its sensory consequence, *Exp Brain Res*, **149**, 527-529.
- [7] D. Wenke, P. Haggard, (2009), How voluntary actions modulate time perception, *Exp Brain Res*, **196**, 311-318.
- [8] Z. Shi, S. Hirche, W. X. Schneide, H. Müller, (2008), Influence of visuomotor action on visual-haptic simultaneous perception, A psychophysical study, Proc. of Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, 65-70.
- [9] M. Yokoyama, S. Yoshida, H. Ora, K. Nozawa, T. Ogata, Y. Miyake, (2010), The effect of voluntary movement in audio-haptic temporal order judgment task, Proc. of 4th International Symposium on Measurement, Analysis and Modelling of Human Functions, Prague, Czech, 113-118.
- [10] 横山正典, 吉田祥平, 大良宏樹, 三宅美博, (2010), 随意運動が聴体性感覚の時間順序判断に与える影響, 第22回自律分散システム・シンポジウム資料, 15-20.
- [11] C. Spence, C. Parise, (2010), Prior-entry: a review, *Conscious Cogn*, **19**, 364-379.
- [12] A. Correa, D. Sanabria, C. Spence, P. Tudela, J. Lupiariez, (2005), Selective temporal attention enhances the temporal resolution of visual perception: evidence from a temporal order judgment task, *Brain Res*, **94**, 202-205.
- [13] A. Vatakis, C. Spence, (2006), Temporal order judgments for audiovisual targets embedded in unimodal and bimodal distractor streams, *Neurosci Lett*, **408**, 5-9.
- [14] D. J. Finney, (1952), Probit analysis: a statistical treatment of the sigmoid response curve. University Press Cambridge, UK.
- [15] D. M. Wolpert, R. C. Miall, (1996), Forward models for physiological motor control, *Neural Netw*, **9**, 1265-1279.
- [16] P. M. Bays, D. Wolpert, (2007), Computational

principles of sensorimotor control that minimize uncertainty and variability., *J Physiol*, **578**, 387-396.

- [17] S. Blakemore, D. Wolpert, C. Frith, (1998), Central cancellation of self-produced tickle sensation., *Nat Neurosci*, **1**, 635-640.