

随意運動が聴触覚間の時間順序判断に与える影響

横山 正典

The Effect of Voluntary Movement in Audio-Haptic Temporal Order Judgement

Masanori YOKOYAMA

Abstract – The simultaneity between sensory modalities is important for multi-modal integration. In this study, we investigated the effect of voluntary/involuntary motion and predictability of stimuli on audio-haptic temporal order judgment. PSS (Point of Subjective Simultaneity) and JND (Just Noticeable Differences) were measured under “Voluntary+Predictable” condition, “Voluntary+Unpredictable” condition, “Involuntary+Predictable” condition, “Involuntary+Unpredictable” condition, and “Passive” condition. Under each condition, when the haptic stimulus was presented before the auditory stimulus was presented, the two stimuli were more likely to be perceived as simultaneous. JND under Voluntary+Predictable condition was marginal and significantly smaller than under Involuntary+Predictable and Passive condition. And JND under Involuntary+Predictable condition was not significantly smaller than under Passive condition. These results suggest that the proprioceptive information does not affect temporal order judgment, and that the motor command in voluntary motion affects temporal order judgment for audio-haptic stimulus.

Keywords : simultaneity, temporal order judgement, inter-modal, audio-haptic, active touch

1. 緒言

人や動物にとって、自分の身の周りで起きた事象を的確に把握する能力は生命維持のためにはなくてはならないものであると考えられる。そしてこの能力は、複数の感覚器から受容した情報を統合する脳機能があってこそ実現可能なものと考えられる。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同時性が必要であることが報告されており^{[1],[2]}、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の重要な知見が得られると考えられる。

異種感覚統合の研究において、時間解像度や処理速度の異なる複数の情報が如何にして脳内で統合されるかが最大の関心であるといえる。この問題を解明するため、同時性知覚に影響を及ぼす要因についての研究が数多くなされてきた。異種感覚間での同時性知覚

過程を調べるための主な課題として同時性判断課題 (SJ; Simultaneity Judgment)^{[3],[4]} や時間順序判断課題 (TOJ ; Temporal Order Judgment)^{[5],[6]} がある。TOJ は学習障害の一つである「難読症」の原因を解明するための知見が得られる課題として期待されている。難読症の背景には、次々と入力される感覚信号の順序判断をする脳の機能に障害がある可能性があると言われてきているからである^[7]。TOJ や SJ の研究では主観的同時点 (PSS; Point of Subjective Simultaneity) や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-触覚間の順序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^{[5],[6]}。しかしながら、このような PSS の非対称性は刺激の強度や注意^[8]、刺激呈示位置^{[9][10]}に影響を受けることが報告されている。また視覚-聴覚の SJ において、一定の視覚-聴覚の時間のずれに順

応した後に視覚-聴覚刺激の同時性を測定すると、順応した時間のずれの方向に PSS がシフトし JND が拡大する結果も報告されている (lag adaptation)^[3]。

以上に述べたように同時性知覚に関するこれまでの研究では受動的に刺激を受容する状況における同時性知覚の特性を中心に議論がなされてきた。一方で、同期タッピング課題^[11]などを用いた感覚刺激と随意運動の同期メカニズムに関する研究が行われている^{[12],[13],[14]}。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課題である。この課題においてはボタン押し動作が音に 20~50ms 程度先行する負の非同期現象 (Negative Asynchrony) と呼ばれる現象が知られている^[15]。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 20~50ms に対して時間順序判断では十数 ms 程度^{[5],[6]}と両者には差がある。負の非同期現象の生起メカニズムに関しては仮説^{[16],[17]}がいくつか提案されてきたが、いずれも運動機能の影響による知覚の変化については考慮しないものであった。

感覚運動連関における同時性知覚を議論する際には運動機能の影響による知覚の変化について考慮する必要があると考えられる。聴覚-触覚以外にも、視覚刺激を用いたタッピング課題においては触覚刺激が視覚刺激に先行したときに同時と知覚されるが^[18]、視覚-触覚時間順序判断では視覚が先行する点に PSS が位置することが報告されている^[6]。一方で 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随意運動が存在するときの視覚-触覚の時間順序判断では随意運動がないときより物理的の同時点に近い時間で同時と知覚し、視覚フィードバックがない場合には運動ありの方がなしに比べて JND が狭まるという結果が Shi らによって報告されている^[19]。

この知見は同時性の知覚に随意運動が影響を及ぼすことを示唆しているが、随意運動におけるどのような機能が同時性知覚に影響を与えるのかについては未だ明らかでない。また、聴覚-触覚間の同時性知覚における随意運動の影響にいたってはほとんど検討されていないのが現状である。

ここで運動に起因し、同時性知覚に関連する要因として、運動指令の複製である遠心性コピーと、運動時の姿勢の変化を表す固有感覚情報が挙げられる。遠心性コピーは感覚野の活動に間接的に影響を与えると考えられている^[20]。固有感覚情報は、感覚刺激が運動



Fig.1 Apparatus.

のフィードバック情報であるかどうかを判断する際に使用されることが示唆されている^[21]。よってこれらの要因が感覚運動ループ内で重なりを持つ触覚情報処理の時間的側面に影響を及ぼす可能性は十分に考えられる。さらに、遠心性コピーと固有感覚情報は、刺激呈示タイミング予測に用いられる可能性がある。Libet らは、遠心性コピーが運動の 250ms 程度前から生じることを示唆しており^[22]、現在では運動結果の予測のために遠心性コピーを用いることができると考えられている^[23]。またボールキャッチング課題において視覚情報からボールの落下タイミングを予測可能であることが知られている^[24]ことから、ボタン押しなどの運動の際には固有感覚情報などを利用した触覚のタイミング予測が可能と考えられる。運動に関連する以上のような要因が同時性知覚に及ぼす影響について、十分に区別して分析することが望ましい。

そこで本研究では、随意運動が聴覚-触覚間の時間順序判断に与える影響の有無、さらに上記の 2 つの要因やそれらによる予測が聴覚-触覚間の時間順序判断に与える影響について明らかにする。

2. 実験方法

2.1 参加者

20代 (平均 26 歳) の参加者 8 名 (男性 7 名、女性 1 名) が本実験に参加した。参加者は全員右利きで適正な聴力を有し、上肢の運動を遂行する上での運動障害はなかった。参加者のうち 7 人が時間順序判断課題を行った経験がなかった。

2.2 実験装置と刺激

聴覚刺激としてホワイトノイズ (50dB, 15ms) をイヤホン (MHP-EP5; EMPRESS) を介して参加者の両

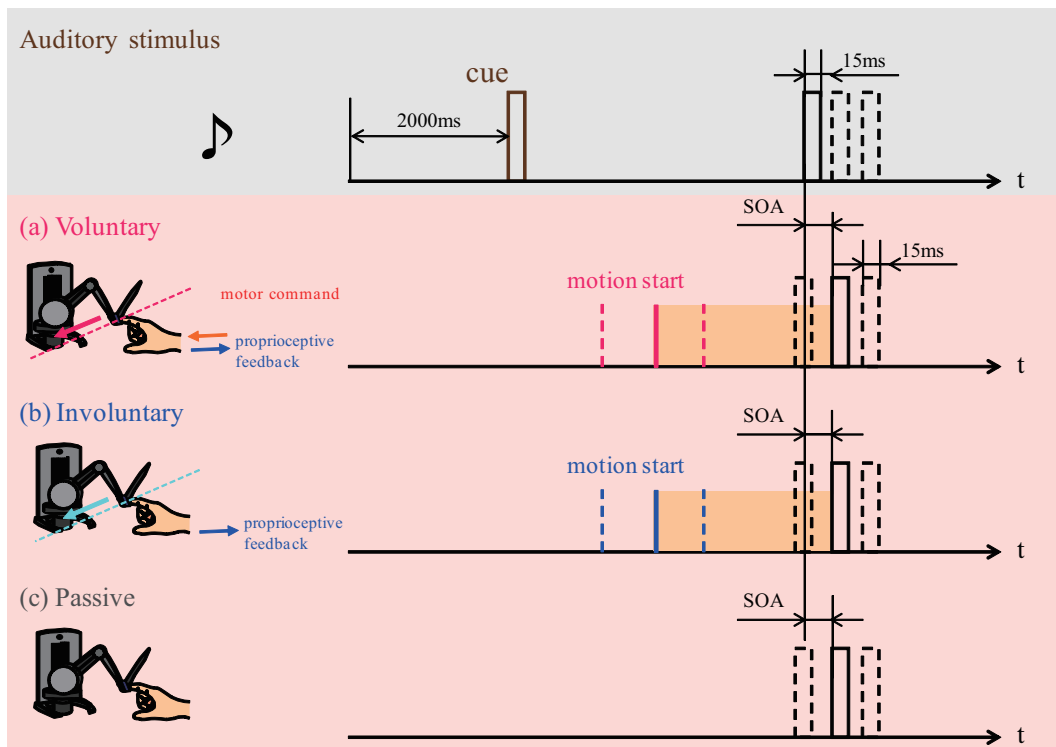


Fig.2 Voluntary, Involuntary and Passive condition.

耳に呈示した。刺激呈示における時間的誤差は 1ms 以下であった。また触覚刺激 (2N, 15ms, 矩形型パルス) はロボットアームである PHANToM DESKTOP (SensAble Technologies) を用いて右手の人差し指先端に呈示された。ロボットアームは 1ms の精度で制御することが可能であった。これらの刺激呈示システムは 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) 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。さらに参加者には実験中に遮音性の高いイヤーマフを着用させた。また参加者の運動の統制をとるために人差し指、手首を固定具により固定した。

2.3 実験デザイン

本実験の聴覚-触覚間の時間順序判断課題では随意運動+予測あり条件 (Voluntary+Predictable, 以下 V+P 条件と呼ぶ) と随意運動+予測なし条件 (Voluntary+Unpredictable, 以下 V+U 条件と呼ぶ) , 受動運動+予測あり条件 (Involuntary+Predictable, 以下 I+P 条件と呼ぶ) と受動運動+予測なし条件 (Involuntary+Unpredictable, 以下 I+U 条件と呼ぶ) , 運動無し条件 (Passive, 以下 PS 条件と呼ぶ) の合わせて 5 条件が用意された。PS 条件と V+P 条件を比較するこ

とで、随意運動が聴覚-触覚間の時間順序判断に与える影響の有無を確認でき、また Voluntary 条件と Involuntary 条件を比較することで運動指令の影響、PS 条件と I+U 条件を比較することで固有感覚情報の影響、そして Predictable 条件と Unpredictable 条件を比較することで固有感覚情報を用いたタイミング予測の影響を観ることができる。参加者のうち 7 人が予測の有無の条件も含めた 5 条件での実験に参加し、1 名は V+P, I+P, PS の 3 条件での実験のみに参加した。

Voluntary 条件 (図 2a) :

参加者は刺激呈示システムの前に座り、ロボットアームと人差し指を固定した。実験が開始されて最初に試行の開始を知らせる音が呈示され、その後参加者は好きなタイミングで上肢を動かした。Predictable 条件では、初期位置から水平方向に 10mm 移動した位置を上肢が通過した時刻を運動のスタートとし、スタート時刻から 900ms 経過後に触覚が呈示された。Unpredictable 条件では運動スタート時刻から 500ms, 700ms, 900ms, 1100ms, 1300ms のいずれかの時刻でランダムに触覚が呈示され、それに合わせて音も呈示された。その後、参加者は聴覚刺激と触覚刺激間の時間順序判断を「音が先であったか」どうかの二肢強制選択により判断した。聴覚刺激の呈示開始時刻には、触覚呈示時刻を基準としたずれ (SOA; Stimulus

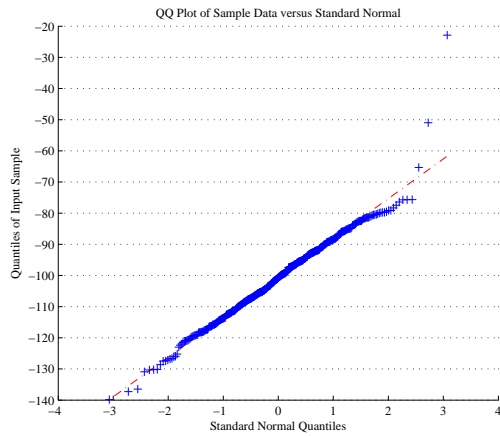


Fig.3 qqplot of motion velocity in Voluntary condition.

Onset Asynchrony) を導入した。触覚刺激と聴覚刺激の時間のずれは $\pm 200, \pm 90, \pm 60, \pm 30, 0\text{ms}$ の全 9 条件のうちのいずれかであった。ここで負の SOA は触覚先行を意味する。

Involuntary 条件 (図 2b) :

実験が開始後、試行の開始を知らせる音が呈示され、その後さらに 1300 ~ 2800ms 後にロボットアームが参加者の上肢を動かした。音が呈示されてから動き出すまでの時間範囲は本実験の参加者とは別の 2 人の参加者に対して事前に行った予備実験の結果を基に決定された。試行開始から刺激呈示までの時間はランダムで選択された。また Involuntary 条件での運動速度を決定するために、本実験の参加者とは別の 2 人の参加者に対して事前予備実験を行った。その Voluntary 条件から得られたデータに対しコルモゴロフ・スミルノフ検定を行ったところ、正規性が棄却されなかった ($p > 0.6$)。このことから上肢の運動速度の分布は平均 100.9mm/s、標準偏差 12.9mm/s の正規分布であることを仮定し、Fig.3 に示した予備実験のデータの Q-Q プロットの結果を基に 76mm/s、88mm/s、100mm/s、112mm/s、124mm/s のいずれかを試行毎に選択した。Predictable 条件、Unpredictable 条件の設定、順序判断方法、SOA については Voluntary 条件と同様であった。

Passive 条件 (図 2c) :

他の 4 条件と同じように、試行の開始を知らせる音が呈示され、その後さらに 2200 ~ 3700ms 後に触覚が呈示された。試行開始から刺激呈示までの時間はランダムで選択された。

上記の 5 条件における試行間のインターバルは全て

2000ms であった。

本実験では 7 人の参加者に対して各 45 試行で構成された各条件 5 ブロック、1 人の参加者に対して 4 ブロックが行われた。各条件のブロックの順番はランダムに決定した。また参加者の上肢の運動速度を 100mm/s に近づけるために本実験前に運動の練習を Prediction 有り無しそれぞれ 2 ブロックずつ行い、本実験中も Voluntary 条件のブロックの前には 5 ~ 10 試行の運動練習を行った。運動練習中は順序判断のための聴覚刺激は呈示されず、触覚のみが呈示された。さらに順序判断課題に慣れさせるために、本実験前に全条件 1 ブロックずつ練習を行った。所要時間は 1 ブロックが約 6 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 1530 回であり、所要時間は約 5 時間であった。

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 prior entry effect^[8] の影響を条件間で統制するために、実験中は常に触覚刺激に注意を向けるように教示した。

2.4 解析手順

Voluntary 条件においては、先行研究^[19] に従い、運動速度が 60mm/s ~ 140mm/s までのデータを有効データとした。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し、縦軸に聴覚刺激が先であると回答した割合、横軸に SOA を取りプロットした。また参加者の回答に対して、先行研究と同様の方法^[25] で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。回帰式として、以下の式を用いた。

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

また回帰によって得られる α および β を用いて、JND と PSS は以下のように推定される。

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

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

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

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

このとき、 x_p は聴覚刺激が先と回答した割合 (縦軸 y の値) が p の時の刺激間のズレの大きさ (x 軸の値) である。

Table 1 Mean and standard errors of the JND and PSS values (in ms) under the three conditions.

Condition	JND		PSS	
	Mean	Standard Error	Mean	Standard Error
Voluntary+Predictable	38.0	7.0	-18.3	4.6
Involuntary+Predictable	53.4	12.5	-23.2	6.7
Passive	63.1	17.3	-21.3	11.3

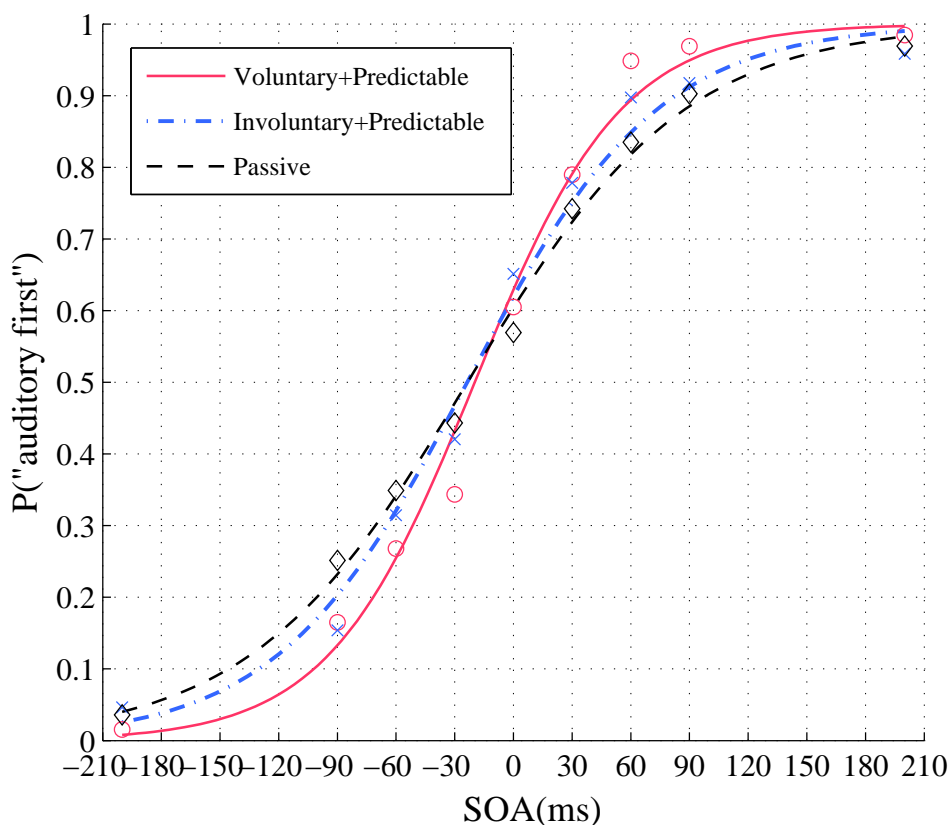


Fig.4 TOJ data and average psychometric functions across all subjects under the three conditions.

3. 結果

まず V+P, I+P, P の 3 条件の実験に参加した 8 人の参加者のデータを平均し回帰した心理物理曲線を Fig.4 に示す。また参加者ごとに回帰を行うことで JND および PSS を算出し、統計処理を行うことで得られた平均値および標準誤差を Table 1 および Fig.5, 6 に示す。Table 1 および Fig.6 から、PSS はすべての条件で負の値を取り、触覚刺激が聴覚刺激に対して 20ms 程度先行した。JND, PSS それぞれの結果に対して Freedman 検定を行ったところ、PSS では 3 条件間で有意な変化は観られなかった。JND では有意差

($p < 0.04$) が観られたため、Scheffe の一対比較法を用いて多重比較を行った。その結果 V+P 条件が I+P, PS 条件よりも弁別閾が狭いという有意傾向が観られた ($p = 0.08$)。

次に V+U 条件, I+U 条件も含めた 5 条件の実験に参加した 7 人の参加者のデータを平均し回帰した心理物理曲線を Fig.8 に、参加者ごとに回帰を行うことで JND および PSS を算出し、統計処理を行うことで得られた平均値および標準誤差を Table 2 および Fig.9, 10 に示す。JND, PSS それぞれの結果に対して Freedman 検定を行ったところ、PSS, JND 共に 5 条件間で有意な変化は観られなかった。

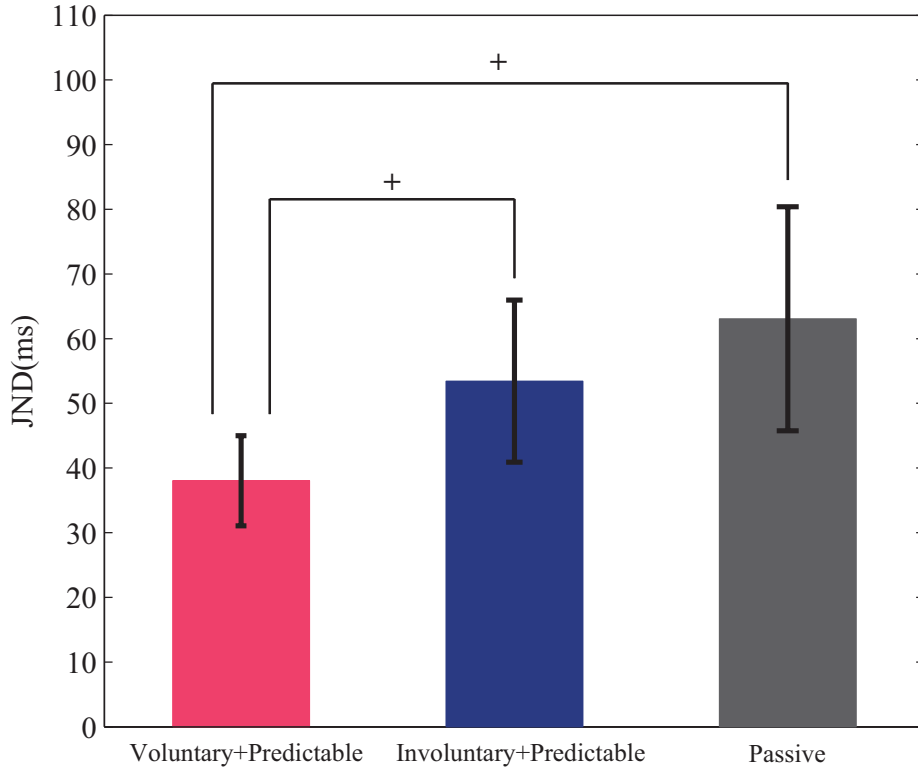


Fig.5 Just Noticeable Difference under the three conditions.

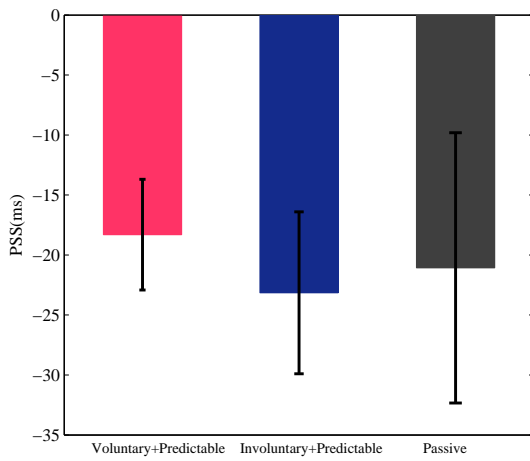


Fig.6 Point of Subjective Simultaneity under the three conditions.

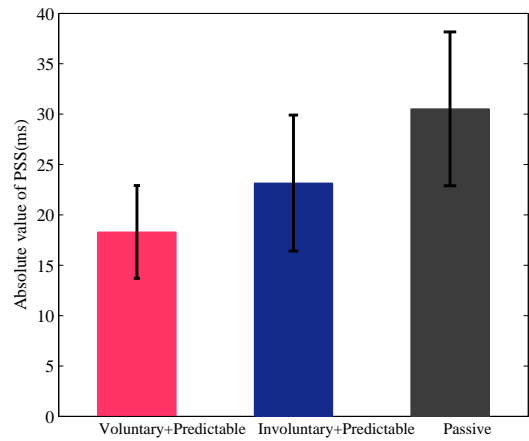


Fig.7 Absolute value of Point of Subjective Simultaneity under the three conditions.

4. 考察

本実験では聴覚-触覚の時間順序判断課題において、V+P条件、V+U条件、I+P条件、I+U条件、PS条件の全5条件におけるPSS、JNDの差を検証した。本実験結果はTable 2のように、全ての条件におい

て触覚が先行した点にPSSが位置した。このことから、聴覚-触覚間の時間順序判断では運動の有無に関わらず聴覚野の情報処理速度が体性感覚野のそれに比べて速いと考えられる。

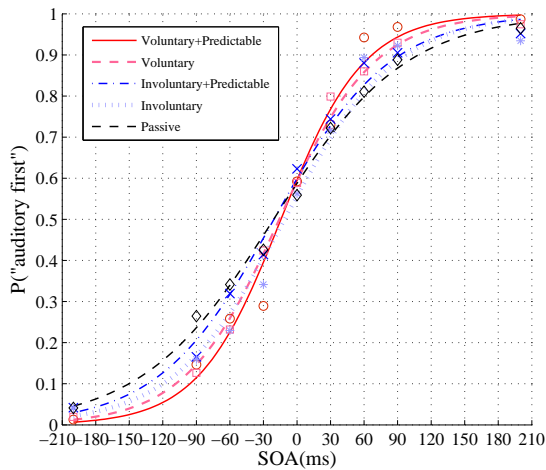


Fig.8 TOJ data and average psychometric functions across all subjects under the five conditions.

4.1 運動指令，固有感覚情報の影響

まず 8 人の参加者に対して行った 3 条件 (V+P, I+P, PS) の結果を観ると, V+P 条件の JND が他の 2 条件に比べて狭いという有意傾向が観られた (Fig.5). V+P と他の 2 条件で異なる点は運動指令の存在の有無であるので, 上記の結果から, 運動指令が聴覚-触覚間の時間順序判断における JND の減少に与えることが示唆された. この原因として運動指令のコピーである遠心性コピーを用いたフィードバック予測機構が挙げられる. つまり本実験の V+P 条件ではフィードバック予測の機能が働くことが考えられる. フィードバック予測において小脳は遠心性コピーを利用した感覚野への抑制信号を発生させるという仮説が提唱されている [20]. この感覚野への抑制信号が, 本実験の V+P 条件において聴覚, 触覚情報の強度を弱めると考えられる. 二つの感覚情報が弱められることにより, 同時と知覚されるための閾値を超える条件が厳しくなることで I+P, PS 条件よりも JND が狭まると考えられる (Fig.11 参照). 以上のように抑制信号が特定のタイミングの刺激のみを通すフィルタのような役割を果たし, その結果として JND が狭まったのではないかと. 小脳からの抑制信号の影響を受けた感覚情報が統合される部位としては TPJ (Temporal Parietal Junction) が挙げられる. TPJ はこれまでの研究で時間順序判断課題において重要であることが報告されている脳部位である [26].

本実験の結果は Shi らの先行研究 [29] におけるフィードバックなし条件の結果と同じ傾向であるが, V+P 条

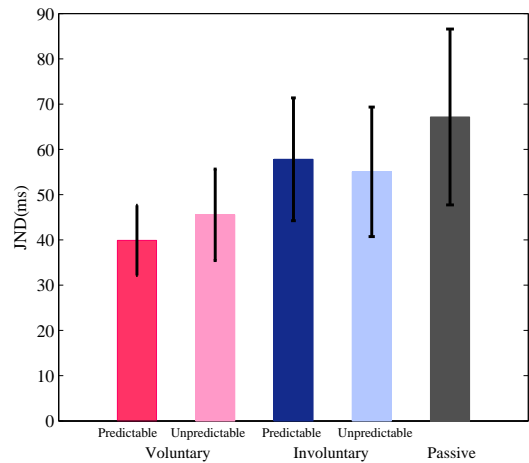


Fig.9 Just Noticeable Difference under the five conditions.

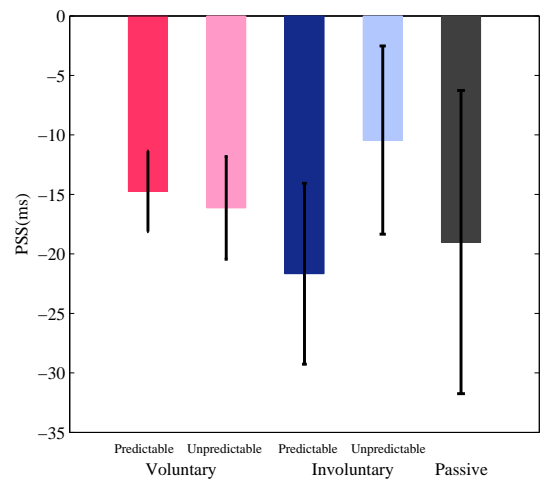


Fig.10 Point of Subjective Simultaneity under the five conditions.

件と PS 条件の差は本実験の方が小さい. これは V+P 条件における予測の精度の違いによるものと考えられる. Shi らの実験では, 視覚と触覚を用いた実験であることから, 視覚情報と遠心性コピーを結びつけることで正確な予測が可能であると考えられるが, 本実験では遠心性コピーのみからの予測となり, Shi らの実験に比べ運動時の予測の精度が低かったため, V+P 条件と PS 条件の差が小さかったと考えられる. また I+P 条件と PS 条件の間では JND に有意な差は観られなかった. このことから, 固有感覚情報と受動運動時の固有感覚情報を用いた刺激呈示タイミングの予測の 2 要因による効果はないことが示唆された.

次に PSS については, Fig.6 のように条件間に有意な差は観られなかった. しかしながら, PSS を物理的

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

Condition		JND		PSS	
		Mean	Standard Error	Mean	Standard Error
Voluntary	Predictable	39.9	7.8	-14.7	3.4
	Unpredictable	45.5	10.1	-16.1	4.3
Involuntary	Predictable	57.8	13.6	-21.7	7.6
	Unpredictable	55.0	14.3	-10.4	7.9
Passive		67.2	19.4	-19.0	12.7

ゼロ点からの距離として扱い、絶対値で再度解析すると、Freedman 検定における有意な差は観られなかったが、Fig.7 のように V+P 条件と PS 条件では V+P 条件の方が物理的ゼロ点に近いという結果が 6 人の参加者で得られた ($p = 0.4$)。この傾向は Shi らの先行研究^[19]におけるフィードバックあり条件の結果と一致している。ここで、López-Moliner らは、随意運動中の方が視覚情報の処理速度が高まることを示唆する結果を報告している^[27]。以上のことから、参加者が能動的に運動する際には、感覚情報に対する処理速度が高くなることが考えられる。本実験においては、随意運動によって聴覚野、体性感覚野それぞれの情報処理速度が限界値付近まで高まること、さらに各感覚野の処理速度の限界値が等しいと仮定すると、聴覚と触覚に対する処理速度の差が小さくなり PSS が物理的ゼロ点に近づくと考えられる。一方で、Haggard らは本実験結果と一致しない結果を報告している^[28]。Haggard らは、ボタン押しから 250ms 後に音が呈示され、参加者にボタン押し動作と音呈示の時間間隔を評価させる課題を行った。その結果は、能動的なボタン押し動作時には受動的なボタン押し動作時に比べて音呈示との時間間隔が短く知覚されるというものであった。この報告からは、本実験では V+P 条件の方が PS 条件に比べて触覚先行よりも PSS が位置するという結果となることが予測される。これは本実験や Shi らの結果とは異なる内容と言えるが、Haggard らの実験で用いている時間のずれは 250ms 程度であるのに対し本実験や Shi らの実験で対象にしているのは数十 ms 程度のずれである。このことから扱う時間的ずれの長さによって人の時間知覚特性が異なる可能性が考えられる。また本実験の PSS の結果は、同期タッピング課題の非同期量と時間順序判断課題の PSS の関係とも一致しないが、これは各課題で働く機能の違いによって

生じるものと考えられる。本実験の Voluntary 条件では運動中に呈示された刺激を知覚するための機能が主に関与すると考えられるが、同期タッピング課題は与えられた外部刺激に対して運動を同期させる課題であるため、時間順序判断課題よりも多くの機能が関与していると考えられる。よって同期タッピング中にタップ動作が音に数十 ms 先行する現象は、時間順序判断とは別の同期運動の制御に関わる機能によって実現されている可能性がある。

以上をまとめると、受動運動時の固有感覚情報とそれを用いた刺激呈示タイミングの予測の 2 要因による効果はないこと、運動指令が JND を狭める効果に関与していることが示唆された。

4.2 予測の影響

次に V+U, I+U 条件も加えた 5 条件の実験結果について考察する。上記で記述した通り V+P, I+P, PS 条件の比較では運動指令が JND の変化に関与することが示唆できたがさらに V+U, I+U 条件も加えて比較することで随意運動時の固有感覚の効果、運動指令のみの効果、さらに受動運動時の固有感覚情報のみの効果、固有感覚情報を用いた予測のみの効果について検討することができる。しかしながら結果では、全条件間に有意な差は観られなかった。よって上記の可能性については本実験では明らかにすることはできなかった。

この結果の原因のひとつとして実験設定の問題が挙げられる。本実験での Unpredictable 条件の結果は、刺激呈示タイミングが予測できないことにより、課題が困難になり全条件の中で JND が最も広くなった参加者と、逆に難しい課題に対して集中力が増すことで JND が最も狭かった参加者が混在した結果であった可能性が考えられる。実験後の内観報告では全条件の中で Unpredictable 条件が最も困難だったと回答した

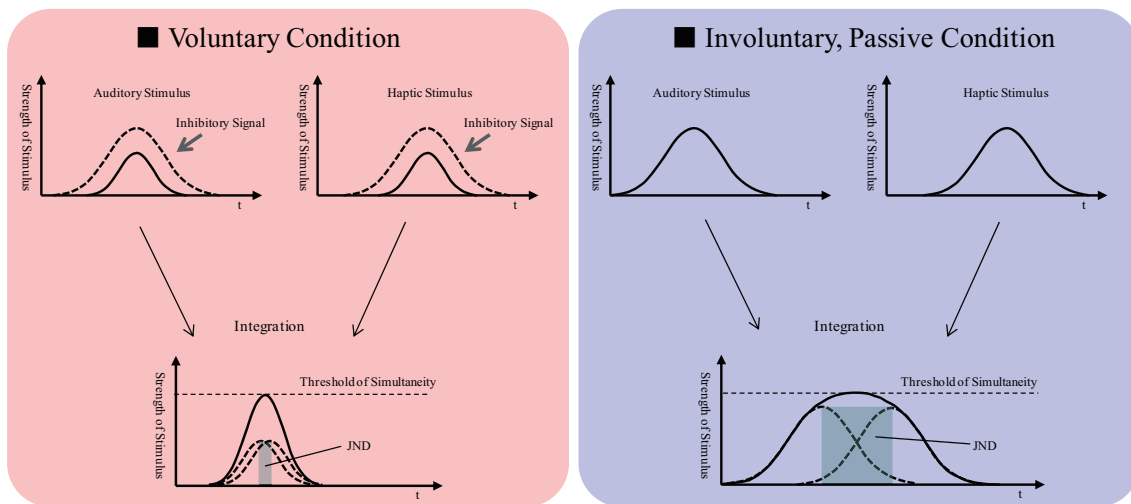


Fig.11 Hypothesis about the changes of JND between V+P, I+P, and PS condition.

参加者と最も容易だったと回答した参加者がそれぞれ1人ずついた。Predictable条件でも十数回に1回程度Unpredictableな条件を混ぜることにより、各条件におけるタスクへの集中力の統制をとることで本実験での問題点を解決できると考えられる。

4.3 実験系の設定

先行研究では、運動速度が速いほどJNDが拡大することが報告されている^[29]。

本実験では、2人の参加者に対して事前に行った予備実験からVoluntary条件での各試行の上肢の平均運動速度分布を平均100.9mm/s、標準偏差12.9mm/sの正規分布と仮定し、Involuntary条件での運動速度条件を決定した。本実験結果では、各参加者のVoluntary条件における上肢の運動速度の分布に対してコルモゴロフ・スミルノフ検定を行ったところ、正規性が棄却されなかった($P > 0.1$)。このことからInvoluntary条件における運動速度の分布を正規分布を基に決定したことは妥当であったと言える。またこの結果より、各参加者のVoluntary条件における上肢の運動速度とInvoluntary条件での運動速度のデータに対してF検定を行ったところ、6人の参加者において等分散性が棄却された。さらに、等分散性が棄却されなかった2人の参加者に対してはt検定、残りの6人に対してはWelchの検定を用いてVoluntary条件とInvoluntary条件での運動速度の平均値の差の検定を行った。その結果、3人の参加者ではVoluntary条件とInvoluntary条件で運動速度の平均値に有意差はなかった($P > 0.3$)。

本実験の参加者合計のVoluntary条件における運動速度分布は平均109.7 mm/s、標準偏差24.2mm/sで

あり、Involuntary条件の運動速度の基準とした予備実験の分布よりも平均が大きく標準偏差が大きかった。先行研究^[29]より平均速度が速いほどJNDが大きくなることが予想され、標準偏差が小さいほど刺激呈示タイミングの予測の精度が高いと考えられる。以上のことから、さらに運動速度の統制がとれれば本実験において得られた結果がより顕著になったと考えられる。

また実験後の内観報告では、4人の参加者が「Voluntary条件での運動の難易度が高かった」、「運動に注意が向いてしまった」などの回答をしており、Voluntary条件における課題の難易度が他の条件に比べて高かった可能性がある。今後は運動練習の時間を増やすなどの対策を行うと、本実験で観られた結果がより顕著に観られるようになると考えられる。

5. 結論と展望

本実験では聴覚-触覚時間順序判断課題において、V+P条件、V+U条件、I+P条件、I+U条件、PS条件の全5条件におけるPSS、JNDの差を検証した。本実験の結果は、全ての条件において触覚が先行した点にPSSが位置した。このことから運動の有無に関わらず聴覚-触覚間の時間順序判断において、聴覚情報の処理速度が触覚情報の処理速度よりも速いことが示唆された。また8人の参加者の実験結果から、V+P条件はI+P条件、PS条件と比べてJNDが狭いという有意傾向が得られた。この結果から運動指令がJNDの変化に関与することが示唆された。JNDの変化の原因の一つとして、V+P条件における運動指令のコピーを用いたフィードバック予測機構がJNDに直接作用

する可能性が挙げられる。この場合フィードバック予測機能には特定のタイミングの刺激のみを通すフィルタのようなしくみが備わっていることが考えられる。しかしながら本実験結果の原因として lag adaptaion の可能性も考えられる。これまでに随意運動を含んだ視覚-触覚の時間順序判断において lag adaptation が存在することが報告されている^[30] 随意運動を含んだ時間順序判断における lag adaptaion は運動指令やフィードバック予測が関与しており、運動を含まない場合の lag adaptaion とメカニズムが異なるという説明も可能である。この可能性については随意運動を含んだ場合の lag adaptaion が運動を含まない場合の時間順序判断に影響を及ぼすかどうかを調べることで検証することができる。I+P 条件と PS 条件で JND に有意な差が観られなかったことから、固有感覚とそれによる予測は聴覚-触覚間の時間順序判断に影響を与えないことが示唆された。また、PSS については3条件間で有意な差は観られなかった。このことから随意運動は PSS に影響を与えないことが示唆された。

Unpredictable 条件では、予測ができないことにより、課題遂行が困難になった人と逆に集中力が増すことで課題を容易にこなした人が混在する結果となった。よって本実験では随意運動時の固有感覚の効果、運動指令のみの効果、さらに受動運動時の固有感覚情報のみの効果、固有感覚情報を用いた予測のみの効果については明らかにならなかった。Predictable 条件でも十数回に1回程度 Unpredictable な条件を混ぜることにより、各条件におけるタスクへの集中力の統制をとることで本実験での問題点を解決できると考えられる。

本研究の成果は感覚統合のメカニズムを解明するための知見の一つとして役立つと考えられる。また、ヒューマンインターフェースの品質評価基準の一つとしても応用可能と考えられる。

6. 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導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。また審査していただきました中村清彦教授、小池康晴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農工大学の野澤孝之助教、東京大学の緒方大樹様に深く感謝いたします。また、武藤ゆみ子様、大良宏樹様には研究を進めるために必要なことを本当にたくさん教えていた

きました。ありがとうございました。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深く感謝いたします。特に研究テーマについて相談に乗ってくれたり、予備実験の参加者を何度も務めてくれた沖津君、西君、吉田君に深く感謝いたします。最後に、二年間の研究生生活を支えてくれた家族に心より感謝いたします。どうもありがとうございました。

参考文献

- [1] Slutsky,D.A., Recanzone,G.H.: Temporal and spatial dependency of the ventriloquism effect; *Neuroreport*, **Vol.12**, pp.7-10 (2001).
- [2] Meredith,MA.: On the neuronal basis for multi-sensory convergence: a brief overview; *Cognitive brain research*, **Vol.14**, pp.31-40 (2002).
- [3] Fujisaki,W., Shimojo,S., Kashino,M., Nishida,S.: Recalibration of audiovisual simultaneity; *Nature neuroscience*, **Vol.7**, pp.773-778 (2004).
- [4] Stone,J.V., Hunkin,N.M., Porrill,J., Wood,R., Keeler,V., Beanland,M., Port,M., Porter,N.R.: When is now? Perception of simultaneity; *Proceedings. Biological science*, **Vol.268**, pp.31-38 (2001).
- [5] 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).
- [6] Hanson,J.V., Heron,J., Whitaker,D.: Recalibration of perceived time across sensory modalities; *Experimental Brain Research*, **Vol.185**, pp.347-352 (2008).
- [7] Martino,S.D., Espesser,R., Rey V., Habib,M.: The " temporal processing deficit " hypothesis in dyslexia: New experimental evidence; *Brain and Cognition*, **Vol.46**, pp.104-108 (2001).
- [8] Spence,C., Shore,D.I., Klein,R.M.: Multisensory prior entry; *Manuscript submitted for publication* (2001).
- [9] Sugita,Y. Suzuki,Y.: Audiovisual perception: Implicit estimation of sound-arrival time; *Nature*, **Vol.421**, pp.911 (2003).
- [10] Kitagawa,N., Zampini,M., Spence,C.: Audiotactile interactions in near and far space; *Experimental Brain Research*, **Vol.166**, pp.528-537 (2005).
- [11] Stevens,L.T.: On the time sense; *Mind*, **Vol.11**, pp.393-404 (1886).
- [12] Takano,K., Miyake,Y.: Two types of phase correction mechanism involved in synchronized tapping; *Neuroscience Letters*, **Vol.417**, pp.196-200 (2007).
- [13] Miyake,Y., Onishi,Y., Pöppel,E.: Two types of anticipation in synchronous tapping; *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, **Vol.64**, pp.415-426 (2004).
- [14] Müller,K., Schmitz,F., Schnitzler,A., Freund,H., Aschersleben,G., Prinz,W.: Neuromagnetic Correlates of Sensorimotor Synchronization; *Journal of Cognitive Neuroscience*, **Vol.12**, pp.546-555 (2000).
- [15] Dunlap,K.: Reactions to rhythmic stimuli, with

- attempt to synchronize; Psychological Review, **Vol.17**, pp.399-416 (1910).
- [16] Aschersleben,G.: Temporal control of movements in sensorimotorsynchronization; Brain and Cognition, **Vol.48**, pp.66-79 (2002).
- [17] Fraisse,P.: Time and rhythm perception; Handbook of perception, **Vol.8**, pp.203-254 (1978).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] Blakmore, S. J., Wolpert D. M., Frith, C. D.; Central cancellation of self-produced tickle sensation; Nature Neuroscience, **Vol.1**, pp.635-640 (1998).
- [21] Guillaume, P.; Imitation in Children; University of Chicago Press, (1971).
- [22] Libet, B., Gleason, C. A., Wright, E. W., Pearl, D. K.; Time of conscious intention to act in reaction to onset of cerebral activity(readiness-potential).the unconscious initiation of a freely voluntary act; Brain, **Vol.106**, pp.623-642 (1983).
- [23] Morrone, M. C., Ross, J., Burr, D.; Saccadic eye movements cause compression of time as well as space; Nature Neuroscience, **Vol.8**, pp.950-954 (2005).
- [24] Zago, M., Lacquaniti F.; Cognitive perceptual and action-oriented representations of falling objects; Neuropsychologia, **Vol.43**, No.2, pp.178-188 (2005).
- [25] Finney, D. J.; Probit analysis : a statistical treatment of the sigmoid response curve; Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, (1952).
- [26] Davis, B., Christie, J., Rorden, C.; Temporal Order Judgments Activate Temporal Parietal Junction; The Journal of Neuroscience, **Vol.29**, pp.3182-3188 (2009).
- [27] López-Moliner, J., Linares, D.; The flash-lag effect is reduced when the flash is perceived as a sensory consequence of our action; Vision Research, **Vol.46**, pp.2122-2129 (2006).
- [28] Haggard, P., Clark, S., Kalogeras, J.; Voluntary action and conscious awareness; Nature Neuroscience, **Vol.4**, pp.382-385 (2002).
- [29] Vogels, I. M.; Detection of temporal delays in visual-haptic interfaces; Human factors, **Vol.46**, No.1, pp.118-134 (2004).
- [30] Stetson, C., Cui, X., Montague, P. R., Eagleman, D. M.; Illusory reversal of action and effect; Neuron, **Vol.51**, pp.651-659 (2006).