

随意運動がクロスモーダルの同時性判断に与える影響

横山 正典*¹ 吉田 祥平*¹ 大良 宏樹*¹ 三宅 美博*¹

Effect of Voluntary Motion in inter-modal Simultaneity Judgment

Masanori Yokoyama*¹, Shohei Yoshida*¹, Hiroki Ora*¹, and Yoshihiro Miyake*¹

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.

Keywords : simultaneity, inter-modal, temporal order judgment, audiotactile, active touch

1. はじめに

私たち人や動物にとって、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。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時間的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、人と機械がインタラクションする上で重要な要素であり、これらの研究成果は、宇宙空間での操作や医療分野における遠隔操作からコミュニケーションロボット^[3]まで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)^{[4],[5]}や時間順序判断課題(TOJ; Temporal Order Judgment)^{[6],[7]}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)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^{[6],[8],[9]}。しかし、このようなPSSの非対称性は刺激の強度や注意^[10]、空間位置^{[9],[11]}に影響を受けることが報告されている。また視覚-聴覚の同時性知覚において、一定の視覚-聴覚の時間のずれに順応した後で視覚-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がシフトする結果も報告されている^[4]。この現象はlag adaptationと呼ばれ、視覚-触覚や聴覚-触覚でも実験により同様の結果が得られることが知られている^[8]。さらにボタンを押した時間とフラッシュが呈示された時間の同時性知覚においてもlag adaptationが観察され、ボタン押し動作よりも遅れたフラッシュ刺激呈示に順応した後のボタン押し動作の直後にフラッシュを呈示すると、ボタン押し動作よりもフラッシュ呈示が先行しているように知覚される錯覚も報告されている^[7]。

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、同時性知覚のメカニズムに随意運動が影響を及ぼすことを報告する先行研究もいくつか存在する。感覚系の同時性知覚に関する研究が進む一方で、同期タッピング課題^[12]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^{[13],[14],[15]}。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^[16]。この現象は、触覚刺激が聴覚刺激

*1: 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

*1: Tokyoinstitute of Technology, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering

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 [6],[8] と両者には差があるように思われる。負の非同期現象の生起メカニズムに関する仮説 [17],[18] もいくつか提案されてはいるが、いずれも感覚系の機能のみで議論するものであった。しかし、感覚運動連関における同時性知覚を議論する際には感覚系に加えて運動系も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視覚刺激が触覚刺激に先行したときに同時と知覚されるが [19]、視覚-触覚時間順序判断では逆の条件で PSS が生じることが報告されている [8]。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同時点に近い時間で同時と知覚するという結果も報告されている [20]。他にも能動的なボタン押し (active touch) と受動的な触覚刺激 (passive touch) 間の同時性判断の研究がなされており、受動的な触覚刺激が先行するときに同時と知覚されることが報告されている [21]。

以上に述べたように同時性の知覚に随意運動が何らかの影響を及ぼすことは報告されているが、同時性知覚にどのような影響があるかについて調べた研究は現在では数少ない。またそれぞれの先行研究の結果は一致していない部分も多く、随意運動が視覚-触覚の同時性知覚に及ぼす影響についてはまだ十分な理解がなされているとはいえない。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。また運動も含めた同時性判断に関するこれまでの研究では、主に感覚フィードバック制御による運動がとり上げられているが、タッピング課題のようなフィードフォワード制御の影響が大きい運動を採り上げているものほとんど存在しない。

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随意運動の有無 (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随意運動が聴覚-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、著者 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。

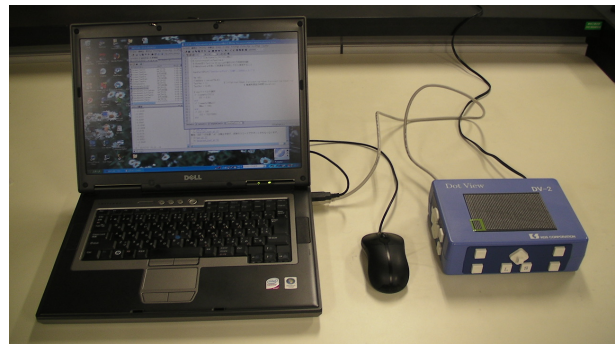


図 1 実験装置
Fig.1 Apparatus.

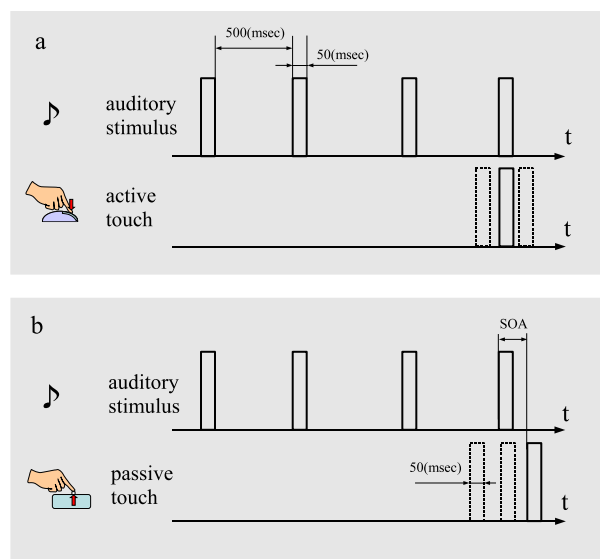


図 2 active 条件と passive 条件
Fig.2 active and passive condition.

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。刺激呈示における時間的誤差は 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。触知ピンは上下方向に駆動し、上限は約 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^[22] 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。

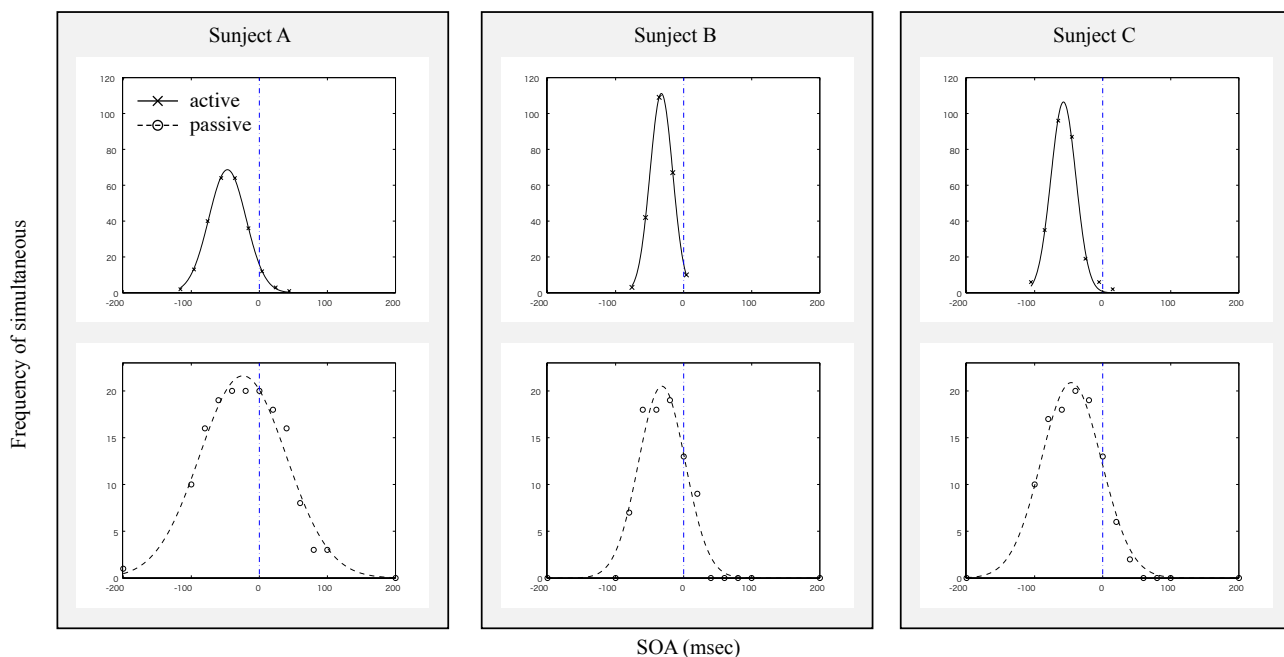


図3 両条件間における各被験者の PSS
Fig.3 PSS of each participant in two conditions.

2.3 実験手順

聴触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 (図 2a): 被験者は刺激呈示システムの前に座り、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。マウスの左クリックが同時、右クリックが非同時とした。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 [23],[24] の範囲内であった。さらに音楽において 4 回の聴覚刺激のまとまりに一度動作を行うことが最適であることがいわれており [25]、本実験での聴覚刺激呈示回数も 4 回とした。

passive 条件 (図 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、聴触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、条件も多く

したが、これは active 条件の触覚刺激呈示条件との差を小さくするためである。

実験前に 26 回の試行が active 条件と passive 条件それぞれで練習として行われ、本実験では各 65 試行で構成された 8 ブロックが行われた。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 prior entry effect^[10] 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。

2.4 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、主観的同時点と呼ぶ。また x は SOA である。さらに winter^[21] らの定義に従い、 σ は時間知覚精度に関するパラメータとし、これを JND(just noticeable differences) と呼ぶ。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。

3. 結果

回帰曲線の r^2 値は平均約 0.97 (標準偏差約 0.04) であった。各条件における被験者一人ひとりの各 SOA に対する同時性判断の頻度を図 3 (被験者 a,b,c) に示した。まず、図 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 [8][10][11] 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随意運動の有無による 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 [8][10][11] 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 [16] と聴触覚の時間順序判断の先行研究 [6][8] の結果の比較と一致する。残り 2 人 (被験者 d、e) については active 条件において PSS が -2msec もしくは 44msec に位置した。これは被験者 d、e に対して active 条件で十分に予測的な運動が誘発されなかったことを意味しているといえる。また被験者 d、e のうち 1 人も active 条件の方が物理的同時点からより遠ざかった点に PSS が位置するという結果であり、これは被験者 a、b、c の結果と共通していた。

被験者 a、b、c を中心に考察すると、本実験の予備的な結果は随意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、本実験の予備的な結果は 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 [20] とは異なる。この差には運動のフィードフォワード制御とフィードバック制御の仕組みが関係していると考えられる。

現在では、動物の運動制御には運動後の感覚フィードバックを予測して運動を制御するフィードフォー

ド制御と感覚フィードバックを用いて運動を修正するフィードバック制御が存在し、この二つを組み合わせることによって素早く正確な運動が実現されていると考えられている [26]。この 2 つの制御メカニズムや両者の関係性については未だ明らかにされていない部分が多い [27]。しかし、前庭動眼反射のようにフィードフォワード制御のみによって実現される運動も報告されており、四肢や指においても 2 つの制御のうちどちらかが強く働く運動が存在すると考えられる。

2 つの制御手法で先行研究と本実験の予備的な結果における運動を分類すると、Shi らの研究では触覚刺激の呈示タイミングを正確に予測することができないのでフィードバック制御がより強く働く運動と考えることができる。また本研究の active 条件では聴触覚のどちらも予測可能なのでフィードフォワード制御がより強く働く運動であることが予想される。フィードフォワード制御による運動において、運動によって受容されることが予測可能な感覚フィードバックによる感覚野の活動は、運動の無い条件での感覚刺激に比べて低下し、知覚される刺激の強さも低下することが Blakemore らによって報告されており、仮説として随意運動が生じたときには小脳から感覚野へ運動指令のコピーである遠心性コピーが送られ、それによって感覚フィードバックによる感覚野の活動を抑えると考えられている [28]。本実験の active 条件でも同様の現象が生じている可能性があり、感覚野の活動の低下により感覚を統合する領野の活動も低下し結果的に同時性知覚の時間窓を曖昧にしていると考えられる。それに対し Shi らの実験では、感覚フィードバックにより感覚野の活動が高まることで感覚統合領野の活動も高まり、同時性の判断を明確に下すことが出来るのではない。

しかし一方で、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によると考えられる。しかし、先行研究 [20] でも随意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 条件でも各 SOA が平等に呈示されたとしても被験者が同時に感じることは考えにくい。もう一つの原因としては、これは active 条件の方がより正確に主観的同時点を判断できていたことを示しており、感覚フィードバックの予測によって同時性の時間窓が曖昧になったという仮説は考えにくい。つまり、触覚を含む異種感覚同時性判断に随意運動が加わる場合、感覚情報同士の同時性に加えて遠心性コピーとの同時性も関係してくるため、PSS の位置は運動のない同時性判断のときと比べて変化する。さらに遠心性コピーによって感覚野の活動も低下する

ので二つの感覚情報が同時と判断されるための閾値に達するためには遠心性コピーと二つの感覚情報のタイミングがそろそろ必要がある。よって active 条件では passive 条件と比べて PSS の位置が変化し、JND が小さくなるという現象が生じると考えられる。

本実験では 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り、予測的な運動が適切に誘発されなかった可能性がある。また passive 条件での SOA は、時間順序判断の先行研究のそれ [6],[8],[11] 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、上記の 2 人の JND の平均は 74.2msec で残りの 3 人の平均の 47.2msec と比べて大きくなっており、2 人は passive 条件において精確に同時性を判断できていなかった可能性がある。今後は先行研究と同様の SOA を用いた課題の設計をする必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では随意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 条件における聴覚同時性判断課題を行った。予備的な結果は 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 [19] 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 が生じるといった傾向が見られた。残りの 2 人に関しては、active 条件で触覚が十分に先行していない状態で同時と知覚しており、課題遂行中に予測的運動が誘発されなかったことが原因と考えられる。

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 条件では遠心性コピーの仮説に代表される予測メカニズムが PSS の位置を変化させ、さらに感覚野の活動を低下させることで、同時と判断されるための感覚野の活動の閾値への到達が可能な同時性の時間窓が passive 条件よりも狭くなることが考えられる。

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が、今後は統制を取れるような工夫をしていきたい。また、active 条件と passive 条件における SOA の統制も取れなかった。今後は統制の取れる工夫を考えていきたい。本実験では同時性判断における随意運動の影響について調べた

が、passive 条件は感覚系のみ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。今後調査を進めていきたい。また本実験では随意運動が聴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未だ不明である。考察では運動の予測機能による影響と言う仮説を述べたが、今後は能動運動と受動運動における同時性判断の比較などを行うことで仮説を検証していきたい。

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] Meredith,MA.: On the neuronal basis for multisensory convergence: a brief overview; *Cognitive brain research*, **Vol.14**, pp.31-40 (2002).
- [3] Miyake,Y.: Interpersonal synchronization of body motion and the Walk-Mate walking support robot; *IEEE Transactions on Robotics*, (in press)(2009).
- [4] Fujisaki,W., Shimojo,S., Kashino,M., Nishida,S.: Recalibration of audiovisual simultaneity; *Nature neuroscience*, **Vol.7**, pp.773-778 (2004).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] Stetson,C., Cui,X., Montague,P.R., Eagleman,D.M.: Motorsensory recalibration leads to an illusory reversal of action and sensation; *Neuron*, **Vol.51**, pp.651-659 (2006).
- [8] Hanson,J.V., Heron,J., Whitaker,D.: Recalibration of perceived time across sensory modalities; *Experimental Brain Research*, **Vol.185**, pp.347-352 (2008).
- [9] Sugita,Y., Suzuki,Y.: Audiovisual perception: Implicit estimation of sound-arrival time; *Nature*, **Vol.421**, pp.911 (2003).
- [10] Spence,C., Shore,D.I., Klein,R.M.: Multisensory prior entry; *Manuscript submitted for publication* (2001).
- [11] Kitagawa,N., Zampini,M., Spence,C.: Audiotactile interactions in near and far space; *Experimental Brain Research*, **Vol.166**, pp.528-537 (2005).
- [12] Stevens,L.T.: On the time sense; *Mind*, **Vol.11**, pp.393-404 (1886).

- [13] Takano,K., Miyake,Y.: Two types of phase correction mechanism involved in synchronized tapping; *Neuroscience Letters*, **Vol.417**, pp.196-200 (2007).
- [14] Miyake,Y., Onishi,Y., Pöppel,E.: Two types of anticipation in synchronous tapping; *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, **Vol.64**, pp.415-426 (2004).
- [15] 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).
- [16] Dunlap,K.: Reactions to rhythmic stimuli, with attempt to synchronize; *Psychological Review*, **Vol.17**, pp.399-416 (1910).
- [17] Aschersleben,G.: Temporal control of movements in sensorimotorsynchronization; *Brain and Cognition*, **Vol.48**, pp.66-79 (2002).
- [18] Fraisse,P.: Time and rhythm perception; *Handbook of perception*, **Vol.8**, pp.203-254 (1978).
- [19] 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).
- [20] 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).
- [21] 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).
- [22] Brainard DH.; *The Psychophysics Toolbox*; *Spat Vis*, **Vol.10**, No.4, pp.433-436 (1997).
- [23] Noorden,V.L., Moelants,D.; Resonance in the Perception of Musical Pulse; *Journal of New Music Research*, **Vol.28**, No.1, pp.43-66 (1999).
- [24] 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).
- [25] 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).
- [26] Miall,R.C.,Weir,D.J., Wolpert,D.M., Stein,J.F.; Is the cerebellum a Smith predictor?; *Journal of motor behavior*, **Vol.25**, No.3, pp.203-216 (1993).
- [27] Kawato,M.; Internal models for motor control and trajectory planning; *Current opinion in neurobiology*, **Vol.9**, pp.718-727 (1999).
- [28] Blakemore,J.S., Wolpert,D.M., Frith,C.D.; Central cancellation of self-produced tickle sensation; *Nature Neuroscience*, **Vol.1**, pp.635-639 (1998).