

随意運動が聴触覚の時間順序判断に与える影響

横山 正典*¹ 吉田 祥平*¹ 大良 宏樹*¹
野澤 孝之*² 緒方 大樹*³ 三宅 美博*¹

The Effect of Voluntary Movement in Audio-haptic Temporal Order Judgment

Masanori Yokoyama*¹, Shohei Yoshida*¹, Hiroki Ora*¹
Takayuki Nozawa*², Taiki Ogata*³, and Yoshihiro Miyake*¹

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. The preceding amplitude under Involuntary condition was smaller than under Passive condition and under Voluntary condition. The amplitude under Predictable condition was smaller than under Unpredictable condition. Moreover, JND under Involuntary condition was smaller than under Passive condition. JND under Voluntary condition was the smallest among all conditions. JND under Predictable condition was smaller than under Unpredictable condition. These results suggest that two types of prediction (using efference copy or proprioceptive information) in voluntary motion exist, and that these two types affect simultaneity perception for audio-haptic stimulus in different ways.

Keywords : simultaneity, inter-modal, temporal order judgment, audio-haptic, 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なく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。

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。これら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^[7]、空間位置^{[8],[9]}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

*1: 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

*2: 東京農工大学 共生科学技術研究院

*3: 東京大学 インテリジェント・モデリング・ラボラトリー

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

*2: Tokyo University of Agriculture and Technology, Institute of Symbiotic Science and Technology

*3: The University of Tokyo, Intelligent Modeling Laboratory

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 [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感覚系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 [10] 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が行われている [11],[12],[13]. 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 [14]. 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 [15],[16] がいくつか提案されてきたが, いずれも感覚系のみで議論するものであった.

しかしながら, 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 [17], 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 [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同時点に近い時間で同時と知覚するという結果が報告されている [18].

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しているが, 同時性知覚にどのような影響があるかについては未だ多くのことが明らかでない. 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影響を与えられられている [19]. 固有感覚情報は, 感覚刺激が運動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 [20]. 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

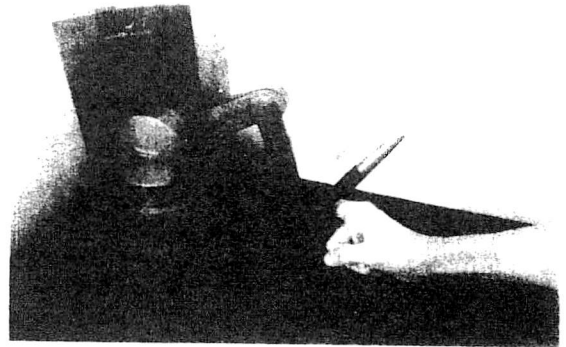


図1 実験装置
Fig.1 Apparatus.

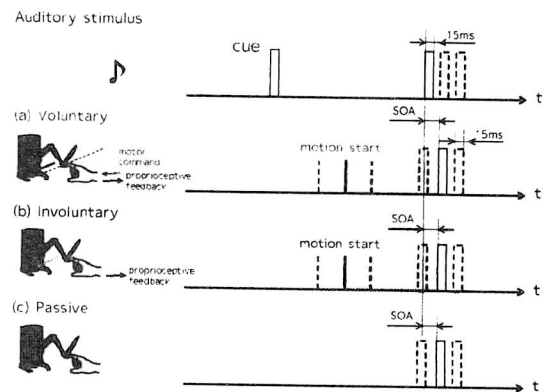


図2 Voluntary 条件, Involuntary 条件, Passive 条件
Fig.2 Voluntary, Involuntary and Passive condition.

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示唆しており [21], 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 [22]. 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 [23] ことから, ボタン押しなどの運動の際にも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 被験者

被験者は、24歳の健康で右利きの男性1人にボランティアとして依頼した。被験者は適正な聴力を有し、人差し指の運動を遂行する上での運動障害はなかった。

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1ms以下であった。また触覚刺激(3N, 15ms, 矩形型パルス)にはロボットアームであるPHANTOM DESKTOP(SensAble Technologies)を用いた。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。さらに被験者には実験中に遮音性の高いイヤーマフを着用させた。

2.3 実験手順

聴覚-触覚間の時間順序判断課題は随意運動(Voluntary)と受動運動(Involuntary)に予測の有り(Predictable)無し(Unpredictable)の組み合わせによる4条件と、運動無し(Passive)条件の合わせて5条件で行われた。Passive条件とVoluntary+Predictable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、Passive条件とInvoluntary+Unpredictable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タイミング予測の影響を観ることができる。

Voluntary条件(図2a):

被験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。実験が開始されると、2000msの静止状態が続いた後に試行の開始を知らせる音が呈示され、その後被験者は好きなタイミングで人差し指を動かした。Predictable条件では、スタート位置から水平方向に30mm移動した位置、Unpredictable条件では20mm, 25mm, 30mm, 35mm, 40mmのいずれかの位置で触覚が呈示され、それに合わせて音も呈示された。その後、被験者は

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 Onset Asynchrony)を導入した。触覚刺激と聴覚刺激の時間のずれは±90,60,30,0msの全7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。また、音が先行するSOAでは、指の運動速度を100mm/sであるとして推定した触覚刺激呈示時刻を基準に聴覚刺激を呈示した。また実際に生じた刺激間のずれを計測し、上の7種類のSOAのうち最も近い値に割り当てて2.4節で述べる順序判断比率のロジスティック曲線へのフィッティングを行った。

Involuntary条件(図2b):

実験が開始後、2000msの静止状態が続いた後に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人差し指を動かした。音が呈示されてから動き出すまでの時間は事前に行った実験の結果を基に決定された。また運動速度は事前に行った実験のVoluntary条件から得られたデータの分布を基に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条件と同じであった。

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1600~3100ms後に触覚が呈示された。

本実験では各35試行で構成された各条件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。また被験者の指の運動速度を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3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5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1085回であり、所要時間は約4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

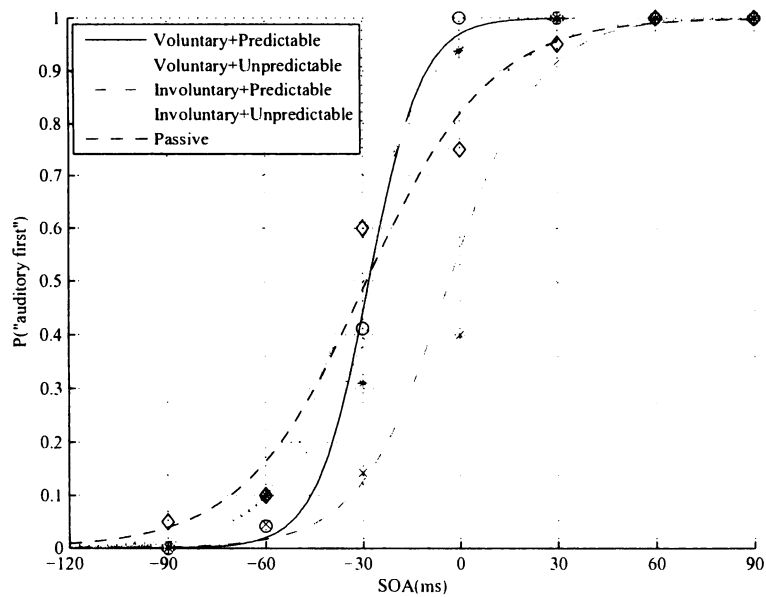


図3 各条件における心理物理曲線
Fig. 3 Psychometric function for each condition.

なるという prior entry effect^[7] の効果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

各 SOA に対して音が先だと答える頻度を被験者ごとに算出し、これをロジスティック曲線を用いて一般化線形モデルにより回帰した。回帰式として以下の式を用いた。

$$y = 1/[1 + \exp\{(\alpha - x)/\beta\}] \quad (1)$$

ここで α は主観的同時点 (PSS) の推定値である。また x は SOA である。ずれの弁別閾 (JND) は β を用いて以下のように推定される。

$$J\hat{N}D = (X_{P.75} - X_{P.25})/2 = \beta \log 3 \quad (2)$$

回帰の計算とグラフの表示には Matlab の statistics toolbox を用いた。

3. 結果

実験の予備的な結果を図 3 に示した。まず Voluntary+Predictable 条件で -28ms 、Voluntary+Unpredictable 条件で -33ms 、Involuntary+Predictable 条件で -3ms 、Involuntary+Unpredictable 条件で -22ms 、Passive 条件で -29ms と全ての条件において触覚先行よりも PSS が位置した。

また Passive 条件と比べて Involuntary 条件は聴覚先行よりも PSS が位置したのに対し、Voluntary 条件は Involuntary 条件と比べて触覚先行よりも PSS が位置した。Predictable 条件と Unpredictable 条件では、Predictable 条件の方が PSS が聴覚先行よりも位置した。JND は Passive 条件の 21ms と比べて Voluntary+Predictable 条件の 9ms 、Voluntary+Unpredictable 条件の 13ms 、Involuntary+Predictable 条件の 15ms 、Involuntary+Unpredictable 条件の 18ms と全てで狭まる結果となった。さらに Voluntary 条件の方が Involuntary 条件よりも JND が狭まった。Predictable 条件と Unpredictable 条件では、Predictable 条件の方が JND が狭まった。

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、Voluntary+Predictable 条件、Voluntary+Unpredictable 条件、Involuntary+Predictable 条件、Involuntary+Unpredictable 条件、Passive 条件の全 5 条件における PSS、JND の差を検証した。

本実験の予備的な結果は、全ての条件において触覚が先行した点に PSS が位置し、Passive 条件と比べて Involuntary 条件は聴覚先行よりも PSS が位置した。この結果は固有感覚情報に PSS を聴覚先行よ

りに変化させる効果があることを示唆している。この原因の一つとして固有感覚情報により体性感覚野が賦活されることで触覚刺激に対する処理速度が向上することが挙げられる。また、別の原因として考えられるのがタイミング予測の効果である。固有感覚情報があることで被験者は刺激が呈示される時刻を予測することができ、その時刻に合わせて脳の活性状態を高めることができることで PSS が物理的ゼロ点に近いと考えられる。そして Predictable 条件の方が Unpredictable 条件よりもより正確なタイミング予測が可能のために、さらに物理的ゼロ点に近い PSS が得られた可能性が考えられる。また、Voluntary 条件は Involuntary 条件と比べて触覚先行よりも PSS が位置する結果であり、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 の関係と同じであった。これは随意運動によって、運動の結果として触覚が生じるという認知的な理解がトップダウンで影響することで触覚の知覚される時刻が遅くなったためと考えられる。先行研究でも、能動的なボタン押し動作時に触覚が知覚される時刻は実際の時刻よりも遅いことが報告されている^[24]。また、別の可能性として、遠心性コピーによるフィードバック予測が触覚の知覚される時刻を遅らせる効果を持つ可能性も考えられる。この PSS における Voluntary 条件と Involuntary 条件の関係は、Voluntary 条件の方が PSS が物理的同時点から遠ざかったという意味では Shi らの実験結果^[18]と異なるものである。しかしながら、視触覚の時間順序判断課題において PSS は視覚先行よりも位置しており、Shi らの結果も運動ありの方が PSS が触覚先行よりも変化した可能性がある。

JND については、Passive 条件と比べて他の全ての条件で狭まる結果となったが、これについても予測の効果が考えられる。予測の精度が高い Predictable 条件の方が Unpredictable 条件よりもより JND が狭まる結果となった。また、Voluntary 条件の方が Involuntary 条件よりも JND が狭まる結果となったが、これには運動指令による感覚フィードバック予測が関係している可能性がある。Voluntary 条件ではタイミング予測に加えてフィードバック予測の機能も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^[19]。この感覚野への抑制信号が、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。またタイミング予測にも JND を狭める仕組みが備わっていると考えられる。

上記の PSS と JND についての考察をまとめると、PSS の変化には各モダリティに対する処理速度の変化が大きく影響している可能性があり、また JND の変化について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メカニズムによるものと考えられ、これは主に予測機能による効果である可能性が考えられる。

以上の考察は予備的な実験結果に対する考察であり、現在確認できる差も被験者数を増やした際には見られない可能性もある。今後は被験者数を増やし、統計的な解析、検討を行っていきたい。

本実験では Passive 条件以外の全ての条件で聴覚先行の SOA については運動速度を 100mm/s として聴覚刺激呈示時刻の推定値を計算しているが、実際の速度は試行ごとに異なるため、それにより実際の SOA の呈示回数には偏りが生まれている可能性がある。今後は運動の距離ではなく時間を固定することで SOA を完全に制御できる実験系へ変更する予定である。また本実験では全てのデータを有効データとして解析を行ったが、運動速度が早いほど JND が拡大することが知られており^[25]、運動速度の範囲を絞った解析も行う必要があると考えている。

5. まとめ

本実験では聴覚-触覚時間順序判断課題において、Voluntary+Predictable 条件、Voluntary+Unpredictable 条件、Involuntary+Predictable 条件、Involuntary+Unpredictable 条件、Passive 条件の全 5 条件における PSS、JND の差を検証した。本実験の予備的な結果は、全ての条件において触覚が先行した点に PSS が位置し、Passive 条件と比べて Involuntary 条件は聴覚先行よりも PSS が位置した。この説明として、固有感覚、もしくはタイミング予測によって体性感覚野が賦活され処理速度が増す可能性が考えられる。また、Voluntary 条件は Involuntary 条件と比べて触覚先行よりも PSS が位置する結果となったが、これは運動の結果として触覚が生じるという認知的な理解がトップダウンで影響することで触覚の知覚される時刻が遅くなったためと考えられる。もうひとつの可能性として、運動指令によるフィードバック予測の効果として触覚が知覚される時刻が遅くなる可能性も考えられる。JND について

は、Passive 条件と比べて他の全ての条件で狭まる結果となったが、これについても予測の効果が考えられる。タイミング予測の精度が高い Predictable 条件の方が Unpredictable 条件よりもより JND が狭まる結果となっている。また、フィードバック予測が可能な Voluntary 条件の方が Involuntary 条件よりもさらに JND が狭まる結果となった。これらの結果から、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。

以上の考察は予備的な実験結果に対するものであり、現在確認できる差も被験者数を増やした際には見られない可能性もある。今後は被験者数を増やし、統計的な解析、検討を行っていききたい。

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] Spence,C., Shore,D.I., Klein,R.M.: Multisensory prior entry; *Manuscript submitted for publication* (2001).
- [8] Sugita,Y., Suzuki,Y.: Audiovisual perception: Implicit estimation of sound-arrival time; *Nature*, **Vol.421**, pp.911 (2003).
- [9] Kitagawa,N., Zampini,M., Spence,C.: Audiotactile interactions in near and far space; *Experimental Brain Research*, **Vol.166**, pp.528-537 (2005).
- [10] Stevens,L.T.: On the time sense; *Mind*, **Vol.11**, pp.393-404 (1886).
- [11] Takano,K., Miyake,Y.: Two types of phase correction mechanism involved in synchronized tapping; *Neuroscience Letters*, **Vol.417**, pp.196-200 (2007).
- [12] Miyake,Y., Onishi,Y., Pöppel,E.: Two types of anticipation in synchronous tapping; *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, **Vol.64**, pp.415-426 (2004).
- [13] 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).
- [14] Dunlap,K.: Reactions to rhythmic stimuli, with attempt to synchronize; *Psychological Review*, **Vol.17**, pp.399-416 (1910).
- [15] Aschersleben,G.: Temporal control of movements in sensorimotor synchronization; *Brain and Cognition*, **Vol.48**, pp.366-379 (2002).
- [16] Fraisse,P.: Time and rhythm perception; *Handbook of perception*, **Vol.8**, pp.203-254 (1978).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [19] Blakmore, S. J., Wolpert D. M., Frith, C. D.: Central cancellation of self-produced tickle sensation; *Nature Neuroscience*, **Vol.1**, pp.635-640 (1998).
- [20] Guillaume, P.; *Imitation in Children*; University of Chicago Press, (1971).
- [21] 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).
- [22] 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).
- [23] Zago, M., Lacquaniti F.; Cognitive perceptual and action-oriented representations of falling objects; *Neuropsychologia*, **Vol.43**, No.2, pp.178-188 (2005).
- [24] Haggard, P., Clark, S., Kalogeris, J.; Voluntary action and conscious awareness; *Nature Neuroscience*, **Vol.4**, pp.382-385 (2002).
- [25] Vogels, I. M.; Detection of temporal delays in visual-haptic interfaces; *Human factors*, **Vol.46**, No.1, pp.118-134 (2004).