

随意運動の時間長が聴体性感覚同時性知覚に与える影響

古里 真康*¹ 緒方 大樹*^{1,2} 横山 正典*¹ 三宅 美博*¹

Effect of Duration of Voluntary Movement on Audio-tactile Temporal Order Judgment

Masayasu Furusato*¹, Taiki Ogata*^{1,2}, Masanori Yokoyama*¹, and Yoshihiro Miyake*¹

Abstract – We investigated whether the duration of voluntary and involuntary movement affects simultaneous perception in a task in which participants judged which of auditory and tactile stimuli had been presented first. Just noticeable differences did not differ between VOLUNTARY and INVOLUNTARY conditions and between movement duration conditions. This result could be attributed to the fact that participants could not predict the duration in our experiment. In voluntary conditions, there were different between the point of subjective simultaneity under 900 ms and 1,500 ms duration conditions. This result suggests that by long 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、触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。TOJ 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、TOJ 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 [6-9]。Shi らは視体性感覚間 TOJ 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 [7]。また、横山らは聴体性感覚間 TOJ 課題において、随意運動あり、運動なしの条件に加えて、不随意運動ありの条件の3条件を比較することで、随意運動がある条件で JND が小さくなることから、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 [8, 9]。

これらの研究は、随意運動が同時性知覚に与える影響を明らかにしたが、そのメカニズムについては未だ明らかでない。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、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 [6]。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のが一時的に向上したことが考えられる。一方で、Correa らは、TOJ 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 [10]。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実験を行っており [8, 9]、その際随意運動が 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。

本研究では、随意運動がインターナルクロックテン

*1: 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

*2: 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: The University of Tokyo, Intelligent Modeling Laboratory

ポを変化させ、その結果、時間順序判断の分解能が変わる可能性について検討を行う。具体的には、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。また、時間的選択的注意の影響を排除するために、キューと刺激の提示時間間隔をランダムに変化させて、刺激提示時刻を予測できないように設定する。加えて、運動を行う時間が、主観的同時点を変化させるかについても観察する。

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

参加者は男女計 10 名 (平均 22.6 歳, 男性 8 名, 女性 2 名) であった。また、全員が右利きであり、健常な聴力を有し、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) は力覚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。力覚提示インターフェースは 1 ms の精度で制御された。Fig. 1 に力覚提示装置を示す。これらの刺激提示システムは 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。

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 $\pm 200, 90, 60, 30$ 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、力覚提示インターフェースを用いて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

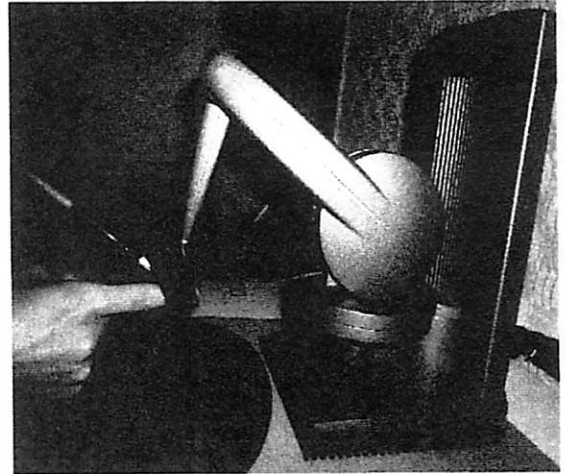


Fig.1 The device to present tactile stimuli and to move participants' arms.

意運動、不随意運動それぞれの運動時間長を 300, 900, 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、2 運動に関する条件 (随意運動、不随意運動) \times 8 SOA の値 ($\pm 200, 90, 60, 30$ 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: まず、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, 900, 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: まず、試行の開始を知ら

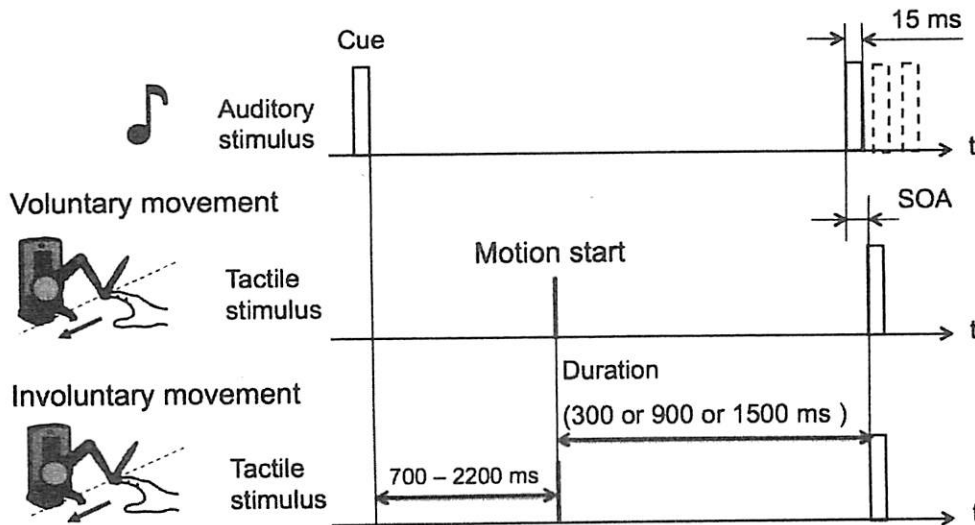


Fig.2 Schematic illustration of VOLUNTARY and INVOLUNTARY conditions. Under the VOLUNTARY condition, participants started to move their right arm voluntarily at their own timing. Under the INVOLUNTARY condition, the tactile test device moved the participant's right arm 1,300 to 2,800 ms. Under the VOLUNTARY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

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 後に力覚提示インターフェース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, 900, 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, 力覚提示インターフェース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 [7]. 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 [7]. 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つたと判断した [5, 12]. 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 8 名を解析対象とした.

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

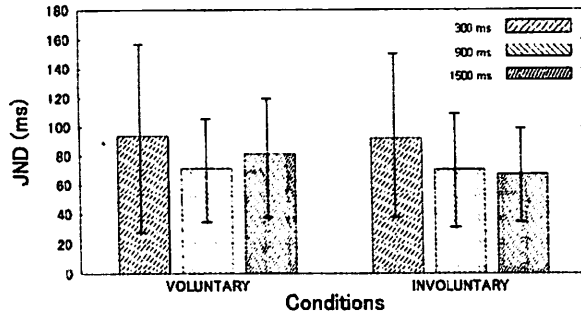


Fig.3 Averaged JNDs under each condition. Error bars mean standard errors between participants.

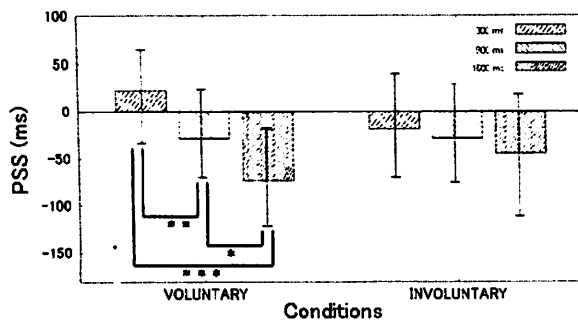


Fig.4 Averaged PSS under each condition. Error bars mean standard errors between participants.

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。

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

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

3.2 JND および PSS の結果

Fig. 3 に条件ごとの JND の平均値を示す。VOLUNTARY 条件においては、300 ms の運動時間長において 93.63 ± 61.87 ms であった。また、900 ms の運動時間長において 71.72 ± 35.13 ms、1500 ms の運動時間長において 81.10 ± 37.35 ms であった。一方、INVOLUNTARY 条件においては、300 ms の条件において 92.10 ± 49.49 ms、また、900 ms の運動時間長では 70.42 ± 34.86 ms、1500 ms の運動時間長において 67.42 ± 29.96 ms であった。

Fig. 4 に PSS の結果を示す。VOLUNTARY 条件においては、300 ms 条件において 21.75 ± 47.53 ms、900 ms 条件において -28.01 ± 41.87 ms、1500 ms 条件では -73.51 ± 56.45 ms であった。INVOLUNTARY 条件においては、300 ms 条件において -18.57 ± 58.84 ms、900 ms 条件では -28.26 ± 52.77 ms、1500 ms 条件において -44.06 ± 60.13 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た ($p=0.035$)。そこで、多重比較を行ったところ、それぞれの運動時間長の条件間において有意差は見られなかった。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 ($p=0.0008$)、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、運動時間長 300 ms において単純主効果が見られ、300 ms の運動時間長において VOLUNTARY 条件および INVOLUNTARY 条件に有意差があることを確認した ($p=0.040$)。さらに、VOLUNTARY 条件にて単純主効果が確認された ($p=0.0001$)。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 ($p=0.00001$)、300 ms と 900 ms 間 ($p=0.007$)、および、900 ms と 1500 ms 間、すべてにおいて有意差が確認された ($p=0.013$)。

4. 考察

本研究では、聴体性感覚 TOJ 課題において、随意運動が JND の値を変化させ原因がインターナルクロックテンポの変化によるかを明らかにするため、随意運動、および、不随意運動の時間長に関して 3 つの条件

を設けて実験を行った。また、時間的選択的注意の影響を排除するために、時間順序判断課題の刺激提示時刻を予測できないように設定した。

まず、JNDの結果について考察を行う。本実験では、VOLUNTRY条件とINVOLUNTRYとの間で差は見られなかった。このことは、先行研究[10]で見られた随意運動によるJNDの値の減少が、随意運動が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。これは、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。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、Haggardら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[6]。また、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[14]。本研究の結果は同時性知覚においても、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。

一方で、運動の時間長に関しては、主効果が認められた。しかしながら、下位検定の結果は、時間長の3つの条件間で有意差が認められないものであった。Fig. 3より、VOLUNTRY条件とINVOLUNTRY条件とでは、運動時間長条件間で、JNDの値の変化する傾向が異なる。つまり、VOLUNTRY条件では900 ms条件のほうが1500 ms条件よりも値が小さいがINVOLUNTRY条件では、この逆の傾向となっている。このことが下位検定の結果に影響を及ぼした可能性がある。また、本実験において8名の実験参加者数が先行研究[4,10]と比べて少ないために交互作用に有意差が見られなかった可能性もあり、今後より多い参加者数で検討する必要がある。

次にPSSに着目すると、運動時間長の条件と運動の条件との間に交互作用が見られた。さらに、下位検定の結果、VOLUNTRY条件においてのみ、各運動時間長条件の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PSSの変化が見られなかったことを報告しているが[8,9]、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。Fig. 4から、900 msの条

件において、VOLUNTRY条件とINVOLUNTRY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、本研究の結果と横山らの結果は一致するものと言える。

時間順序判断課題においては、注意を向けた刺激のほう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]。VOLUNTRY-1500ms条件においてPSSがVOLUNTRY-900ms条件と比べてより体性感覚先行寄りに変化した理由として、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増し、結果としてPrior entry効果が現れた可能性がある。そのために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、VOLUNTRY-300msの条件では、PSSがより聴覚先行に変化した。これは聴覚刺激への注意が増加したことによること、もしくは、体性感覚刺激への注意が減少したことによることの2つの可能性が考えられる。前者のように聴覚刺激への注意が増加したならば、随意運動開始直後は、聴覚など体性感覚以外の情報に注意が向き、Prior entryの効果が引き起こされると考えられる。このことは、随意運動開始直後は、自己の運動により環境に変化が起こった可能性を人間が積極的に排除していることを示唆している。ただし、自己の運動と環境の変化を切り離すには、体性感覚刺激への注意量を減少させることによっても同じことを達成できると考えられる。しかしながら、本研究の結果からは以上のことを明らかにできない。これは今後の展望である。

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を明らかにするために、刺激提示タイミングが予測できない状況下における運動の時間長の効果を観察した。結果、随意運動と不随意運動の間で時間順序判断の時間分解能を意味するJNDに差は見られなかった。一方で、それぞれの運動の時間長に関しては差が見られた。また、主観的同時点であるPSSは、運動の条件と運動の時間長の条件の間で交互作用が見られ、随意運動時には、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した。以上の結果は、随意運動がJNDを狭めるためには、刺激提示タイミングが予測可能である必要があること、また、随意運動はその時間長によって、聴覚刺激と体性感覚刺激に向ける注意の大きさを変化させる可能性を示している。

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] D. Wenke, P. Haggard, (2009), How voluntary actions modulate time perception, *Exp Brain Res*, **196**, 311-318.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 横山正典, 吉田祥平, 大良宏樹, 三宅美博, (2010), 随意運動が聴触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.
- [10] 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.
- [11] C. Spence, C. Parise, (2010), Prior-entry: a review, *Conscious Cogn*, **19**, 364-379.
- [12] A. Vatakis, C. Spence, (2006), Temporal order judgments for audiovisual targets embedded in unimodal and bimodal distractor streams, *Neurosci Lett*, **408**, 5-9.
- [13] D. J. Finney, (1952), Probit analysis: a statistical treatment of the sigmoid response curve. University Press Cambridge, UK.
- [14] S. Blakemore, D. Wolpert, C. Frith, (1998), Central cancellation of self-produced tickle sensation., *Nat Neurosci*, **1**, 635-640.
- [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.