

空間情報が聴触覚の時間順序判断に与える影響

田村 安希

The Effect of Spacial information on Audiotactile Temporal Order Judgment

Aki Tamura

Abstract – This paper describes the effect of the position where stimuli are presented on audiotactile temporal order judgment (TOJ). In experiment 1, to clarify the effect of field-of-vision and spatial redundancy on TOJ, participants judged which of auditory and tactile stimuli had been presented first under four conditions: Front-Same, Front-Different, Back-Same and Back-Different condition. “ Front ” and “ Back ” mean that stimuli were presented in front of and after participants respectively. “ Same ” and “ Different ” mean that stimuli were presented at the same and different position respectively. In experiment 2, to clarify the effect of peripersonal space on TOJ, stimuli were presented at farer position than in experiment 1. In experiment 1, the just noticeable difference under Different condition was smaller than under Same condition only in Back condition. In experiment 2, no difference was found. These results suggest that temporal resolution of TOJ becomes smaller by spatial redundancy within non-visual peripersonal space.

Keywords : temporal order judgment, audiotactile, non-visual, peripersonal space

1. 序論

人間は危険を回避して生存するため、手足が届く範囲では刺激に対して敏感に反応でき、感覚刺激に時間的なずれがあっても同一事象によるものであると知覚できる。しかし、遠くから届く刺激に同じような時間的なずれがあると同一事象によるものだと知覚できない。このように、感覚刺激が提示される空間によって同時性知覚が影響を受けることが知られているが、空間の情報が同時性知覚をどのように変えるのかそのメカニズムは未だ明らかになっていない。そこで、本研究では空間情報が同時性知覚に与える影響について検討する。

同時性知覚の研究において用いられる手法として、2つの刺激が連続的に提示し、どちらの感覚が先に提示されたかを答えさせる時間順序判断課題 (Temporal Order Judgement; TOJ) がある。この課題では、人間が最も同時と感じやすい主観的同時点 (Point of Subjective Simultaneity; PSS) と、時間窓の幅を表し時

間分解能の指標となるずれの弁別閾 (Just Noticeable Difference; JND) の2つを評価の指標としている。連続的に提示される2つの刺激が同時に提示されたとは知覚する時間的な範囲を同時性の窓とよび^[1]、この課題によって同時性の窓を調べることができる。

TOJ に影響を与える要因のひとつとして、刺激の提示位置の影響が検討されてきた。視聴覚間、視触覚間において、2つの感覚刺激を左右同側から提示した時 (Same 条件) より、左右反対側から提示した時 (Different 条件) の方が、JND が小さくなることが知られている^{[2][3]}。聴触覚間は刺激の提示位置による影響を受けないとされてきたが^{[2][4]}、Kitagawa らによって提示位置が聴触覚 TOJ にも影響を与えることが示された^[5]。この研究では、耳という自ら見ることができない身体部位に触覚刺激を提示し、頭の後方 200 mm の距離から聴覚刺激を提示した実験を行い、刺激が提示される空間によって、刺激提示位置が離れていると JND が小さくなる可能性が示されている。

空間は2つの要因によって分けられる。1つは視覚情報の有無によるもので、体の前のように視覚情報が得られる空間（以後、見える空間とする）と体の後ろのように視覚情報を得ることができない空間（以後、見えない空間とする）に分けられる^[6]。もう1つは身体からの距離によるもので、人間の手が届く範囲はペリパーソナルスペースとよばれ、その周囲はペリパーソナルスペース外である^{[7][8]}。先行研究では見えない空間かつペリパーソナルスペースから刺激提示を行っており、刺激提示位置が聴触覚 TOJ に影響を与えるのは、刺激提示位置が見えない空間にあるからなのか、ペリパーソナルスペースにあるからなのか、またその両方によるものなのかが明らかになっていない。

聴触覚統合において、見えない空間でのみ起こる現象としてコラビタ効果が見つかっている^{[9][10]}。聴覚刺激と触覚刺激それぞれに回答ボタンを割り当て早押しで答える課題において、聴触覚刺激が同時に提示されると聴覚に対して触覚が優位になり聴覚刺激への回答率が低下する現象である。これは、刺激を見えない空間から提示すると起こり、2種類の感覚刺激の位置が離れるとコラビタ効果は低下する。このように、見えない空間で刺激提示位置が聴触覚統合に影響を与えることが示唆される。

また、見えない空間の中でもペリパーソナルスペースでのみ見られる効果もある。聴触覚刺激を同時に提示し触覚の提示位置を早く正確に回答させる課題では、聴触覚の提示位置が左右に離れると回答に要する時間が長くなり、位置を間違えやすくなる^{[5][11]}。これは CCE（crossmodal congruency effect）と呼ばれており、聴覚刺激をペリパーソナルスペース外から提示するとこの効果は見られない。触覚弁別課題が聴覚刺激の位置によって変わることから、ペリパーソナルスペースでは刺激提示位置が聴触覚統合に影響を与えることが示唆される。

これまでの空間情報により刺激提示位置が聴触覚弁別に影響を与えるとした研究から、見えない空間やペリパーソナルスペースは聴触覚統合において特別な空間であると考えられる。そこで本研究では、聴触覚間の同時性知覚における刺激の提示位置の効果について、より詳細に明らかにしていくことを目的とする。具体的には、刺激提示位置が視覚刺激を得られない空間にあるためなのか、ペリパーソナルスペースにあるためなのか、もしくはその両方なのかを検討していく。

本研究の実験1では、刺激提示位置が見えない空間



Fig.1 Illustration of the haptic device.

にあると刺激提示位置が聴触覚 TOJ に影響を与えるか否かについて検討する。刺激提示位置がある空間の情報が聴触覚 TOJ に与える影響を検討する本研究において、触覚刺激は常に右手の人差し指に提示する。触覚刺激を手の皮膚上の同じ位置に提示しても、手が体の前にあれば触覚提示位置は見える空間になり、手が体の後ろにあれば触覚提示位置は見えない空間になる。そこで、見える空間と見えない空間のどちらにも移動できる手に触覚刺激を提示し、聴触覚 TOJ を行わせる。

次に実験2では、ペリパーソナルスペース内に刺激提示位置があることで、提示位置が聴触覚 TOJ に影響を与えるか否かについて検討する。実験2では見えない空間かつペリパーソナルスペース外から聴覚刺激を提示させ、聴触覚 TOJ を行わせる。実験1ではペリパーソナルスペース内から刺激を提示するため、実験1と2を比較することで、見えない空間とペリパーソナルスペースという空間情報が聴触覚 TOJ における提示位置の効果に与える影響を明らかにしていく。

本稿では、第2章で見える空間と見えない空間での刺激提示位置が聴触覚 TOJ に与える影響を検討するために行った実験1について述べる。第3章ではペリパーソナルスペース内外で刺激提示位置が聴触覚 TOJ に与える影響を検討するために行った実験2について述べる。第4章では本論文の結論を述べる。

2. 見える空間と見えない空間での刺激提示位置の効果調べるための聴触覚 TOJ

2.1 実験計画

2.1.1 参加者

平均23歳の15名（男性10名、女性5名）が実験に参加した。参加者は全員右利きであり、聴覚、触覚に関して健常であった。14名はTOJを行った経験がなかった。

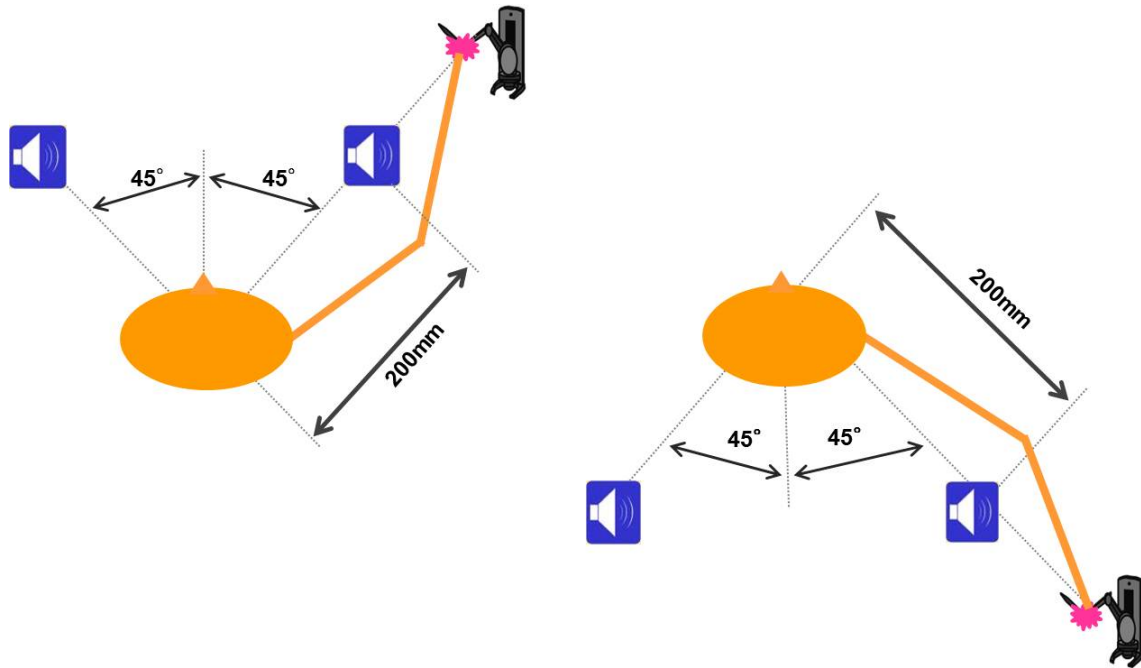


Fig.2 Schematic illustration of the experimental set up. The auditory stimuli were presented 200 mm from the centre of the body. The tactile stimuli were presented to the right index finger.

2.1.2 実験装置と刺激

聴覚刺激は、残響の影響が少ないとされるホワイトノイズ (50 dB, 15 ms) をスピーカ (MM-SPWD3BK, SANWA SUPPLY) より提示した。また触覚刺激 (3 N, 15 ms) は、Haptics Device である PHANTOM Desktop (SensAble Technologies) を用いて、参加者の右手人差し指に提示した (Fig. 1)。これらの刺激提示システムは、PHANTOM Desktop の動作保証のある PC (HP xw4600/CT Workstation) を用いて構築し、OS (Windows XP) 上で起動するアプリケーションである Visual C++ 2008 を用いて開発および制御を行った。また刺激提示の際に生じる時間誤差は、どちらの刺激も 1 ms 以下であった。

2.1.3 実験課題

本研究の課題は、聴触覚 TOJ であった。TOJ では、試行開始を告げる Cue の後に Target 刺激が提示された。Target 刺激には聴覚刺激と触覚刺激があり、一方の感覚刺激が提示され、それに合わせてもう一方の感覚刺激が若干のずれをもって提示された。参加者は、聴覚刺激と触覚刺激のどちらが先に提示されたかをキーボードにて回答した。

2.1.4 条件

実験条件は、以下の 4 条件 (Front-Same 条件, Front-Different 条件, Back-Same 条件, Back-

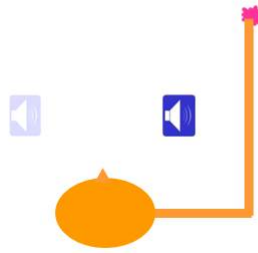
Different 条件) であった。

Front-Same 条件

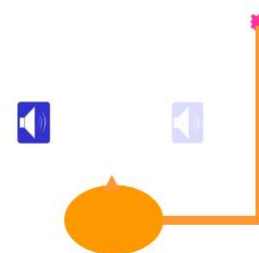
Front-Same 条件では、参加者は右腕を体の前方に伸ばした状態で課題を行った。Front 条件では、参加者の斜め 45° 前方の左右 2ヶ所、身体から 200 mm 離れた位置にスピーカを配置した。Cue として左右のスピーカより聴覚刺激が提示された後に、2 種類の感覚刺激が Target 刺激として提示された。このとき、Cue と Target 刺激の刺激提示時刻の間隔は、750 msec であった。1 番目の Target 刺激である感覚刺激の提示時刻を基準として、SOA (Stimulus Onset Asynchrony) だけずらした時刻に、2 番目の Target 刺激であるもう一方の感覚刺激が提示された。SOA は聴触覚 TOJ を行った先行研究に従って、-200, -90, -55, -30, -20, 20, 30, 55, 90, 200 ms の 10 種類を用いた。SOA が負の値ならば、触覚刺激が先に提示された^[4]。Target 刺激の聴覚刺激は参加者の右前方に設置したスピーカより提示された。触覚刺激は右前方に位置するスピーカのすぐ後ろに設置した触覚提示装置より、参加者の右手人差し指に提示された。聴覚刺激と触覚刺激ともに、身体の前方つまり、見える空間から提示された。また、聴覚刺激と触覚刺激ともに参加者の右側から提示されたため、感覚刺激の提示は左右は同側であった。

Front-Different 条件

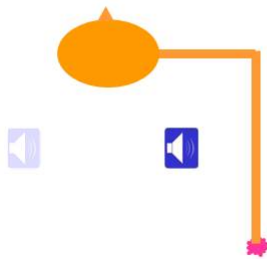
(a) Front-Same condition



(b) Front-Different condition



(c) Back-Same condition



(d) Back-Different condition

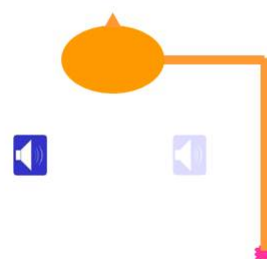


Fig.3 Four experimental conditions: (a) Front-Same condition under which participant's right finger was placed in the front and the auditory stimuli were presented from the right speaker, (b) Front-Different condition under which participant's right finger was placed in the front and the auditory stimuli were presented from the left speaker, (c) Back-Same condition under which participant's right finger was placed in the back and the auditory stimuli were presented from the right speaker, and (d) Back-Different condition in which participant's right finger was placed in the back and the auditory stimuli were presented from the left speaker.

Front-Different 条件では、参加者は右腕を体の前方に伸ばした状態で課題を行った。Target 刺激の聴覚刺激は、参加者の左前方に設置したスピーカより提示された。触覚刺激は右前方に位置するスピーカのすぐ後ろに設置した触覚提示装置より、参加者の右手人差し指に提示された。聴覚刺激と触覚刺激ともに、身体前方つまり、見える空間から提示された。また、聴覚刺激は参加者の左側から、触覚刺激は参加者右側から提示されたため、感覚刺激の提示は左右反対側であった。

Back-Same 条件

Back-Same 条件では、参加者は右腕を体の後方に伸ばした状態で課題を行った。Back 条件では、参加者の斜め 45° 後方の左右 2ヶ所、身体から 200 mm 離れた位置にスピーカを配置した。Target 刺激の聴覚刺激は、参加者の右後方に設置したスピーカより提示された。触覚刺激は右後方に位置するスピーカのすぐ後ろに設置した触覚提示装置より、参加者の右手人差

し指に提示された。聴覚刺激と触覚刺激ともに、身体の後方つまり、見えない空間から提示された。また、聴覚刺激と触覚刺激ともに参加者の右側から提示されたため、感覚刺激の提示は左右は同側であった。

Back-Different 条件

Back-Different 条件では、参加者は右腕を後方に伸ばした状態で課題を行った。Target 刺激の聴覚刺激は、参加者の左後方に設置したスピーカより提示された。触覚刺激は右後方に位置するスピーカのすぐ後ろに設置した触覚提示装置より、参加者の右手人差し指に提示された。聴覚刺激と触覚刺激ともに、身体の後方つまり、見えない空間から提示された。また、聴覚刺激は参加者の左側から、触覚刺激は参加者右側から提示されたため、感覚刺激の提示は左右反対側であった。

2.1.5 手続き

実験中に聴覚刺激を妨害する恐れのある雑音を排除するため、防音室にて実験を行った。まず、手の位置の統制をとるため、参加者の右手の人差し指を固定具

にて固定した。次に、参加者とスピーカの距離、参加者と触覚提示装置の距離をそろえるために装置の位置決めを行った。Front 条件の装置の位置決めでは、参加者の右手に触覚提示装置を装着し右腕を体の前に伸ばした状態で、参加者から 200 mm 離れた斜め 45° 前方の 2ヶ所にスピーカを設置し、参加者の右前に位置するスピーカの後方に触覚提示装置を設置した。Back 条件の装置の位置決めでも同様に、触覚提示装置を装着した右腕を体の後に伸ばした状態で、参加者の斜め 45° 後方にスピーカと触覚提示装置を設置した。各ブロックの開始前には、参加者の姿勢と実験装置との距離を確認した。

聴覚刺激の Cue によって、試行の開始が知らされた。実験開始から 750 msec 後、Target となる感覚刺激が提示され、それに合わせてもう一方の感覚刺激が提示された。2 番目の感覚刺激の提示時刻は、10 種類の SOA の中からランダムに決定した。刺激が提示された後、参加者は聴覚刺激と触覚刺激のどちらが先に提示されたかを二肢強制選択により判断した。回答にはキーボードを用い、聴覚刺激が先ならば Z を触覚刺激が先ならば X を押して回答した。回答が完了してから 2000 ms 後に次の試行に移った。

参加者と実験装置の距離を一定に保つために、姿勢の確認後からブロック終了後まで、参加者には体を動かしたり傾けたりしないように教示した。また、実験中は瞑目した状態で課題を行ってもらった。2 種類の感覚刺激が提示されると、注意を向けているモダリティの感覚刺激がもう一方の感覚刺激より先に提示されたと感じやすくなる prior entry effect という効果が確認されている^[12]。条件間で統制をとるため、実験中は常に触覚提示装置を装着した右手の人差し指の指先に注意を向けるよう教示した。

実験 1 は、練習の 2 ブロックおよび本実験の 8 ブロック、計 10 ブロックで構成された。1 ブロック内において、Target の聴覚刺激が右のスピーカから提示される Same 条件と Target の聴覚刺激が左のスピーカから提示される Different 条件の 2 条件がランダムに提示された。参加者は実験中に姿勢を変えることはできないため、手を体の前にのばした状態で行う Front 条件と、手を体の後ろにのばした状態で行う Back 条件は、ブロック毎に分かれていた。そのため、練習では Front 条件ブロックと Back 条件ブロックを各 1 回ずつ行った。練習のブロックは、10 種類の SOA (-200, -90, -55, -30, -20, 20, 30, 55, 90, 200 ms) を 4 試

行ずつ行うため、80 試行 (2 条件 × 10 SOA × 4 試行) の TOJ で構成された。

本実験では、Front 条件のブロックと Back 条件のブロックを各 4 回ずつ行い、合計で 8 ブロック行った。本実験のブロックは、10 種類の SOA を 8 試行ずつ行うため、160 試行 (2 条件 × 10 SOA × 8 試行) で構成された。そのため、本実験で各参加者が行った全試行数は 1280 試行であった。

なおブロック内では、Target 刺激の聴覚刺激は左右のスピーカからランダム提示された。また、ブロック内の SOA はランダムに決定した。ブロックの順番に関しては、参加者間でカウンターバランスをとった。各ブロックの間は、任意で休憩を取ることができた。休憩を含む実験全体の所要時間は 3 時間程度であった。

2.2 結果

2.2.1 解析手順

10 種類の SOA に対し、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に提示されたと回答した割合、横軸に SOA をプロットした。また参加者の回答は、誤差が二項分布に従うと考えられるため、先行研究と同様の方法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^[13]。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 は以下の式のように定義した。

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

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

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

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

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 の時の刺激間のずれの大きさ (x 軸の値) である。

2.2.2 JND および PSS の結果

聴覚 TOJ において、SOA が 200 ms の条件つまり、聴覚刺激が触覚刺激よりも 200 ms 先行して提示される条件では、一般的に 90 % の確率で音が先であると回答できるとされている^[12]。しかし、15 名中 2 名の参加者は SOA が 200 ms で、聴覚刺激が先であると回答した割合が 75 % より低かった。そのため、先行研究の基準に従い^[14]、課題が適切に行えなかつ

Table 1 Mean and standard errors of the JND and PSS values (in ms) under each condition in experiment 1.

Condition		Front		Back	
		Same	Different	Same	Different
JND	Mean	59.9	45.3	58.0	39.8
	Standard Error	7.3	5.4	8.9	4.7
PSS	Mean	-4.2	-21.3	-18.1	-19.4
	Standard Error	16.5	13.1	15.3	13.5

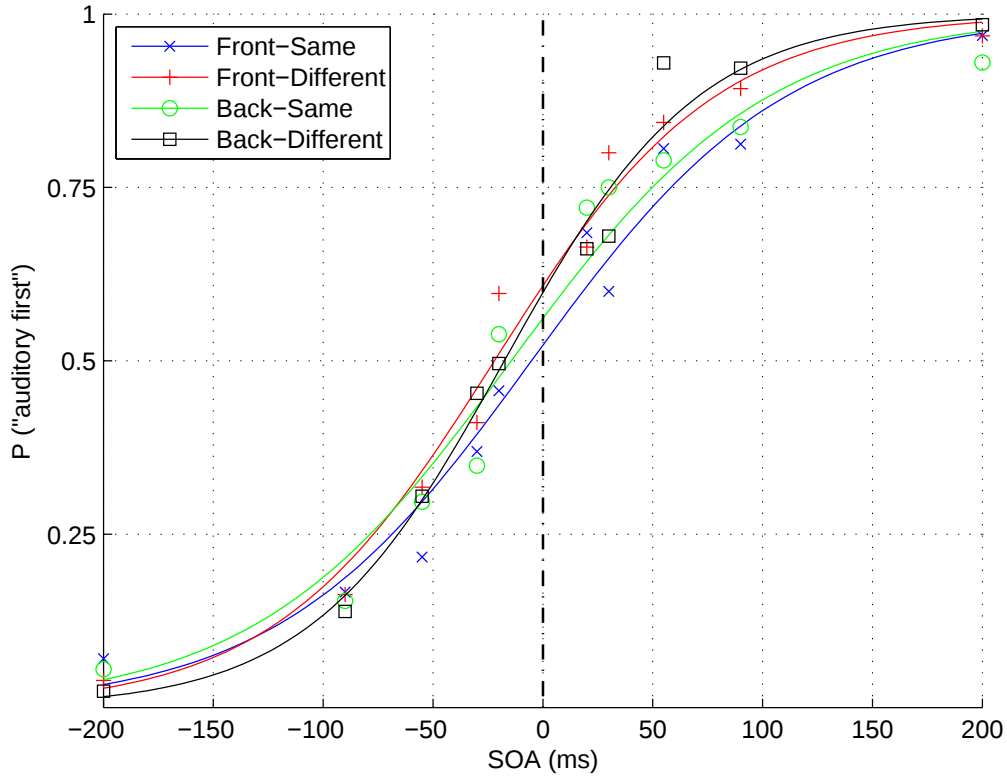


Fig.4 Averaged psychometric functions across all participants under each condition in experiment 1.

たと判断し，この参加者を除いた 13 名のデータを用いて以降の解析を行った．

有効なデータを取得できた 13 名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 を算出した．参加者間の平均値および標準誤差を Table 1 および Fig. 5 に示す．

JND は，正規性と等分散性が認められたため，対応のある因子 (Front 条件 vs. Back 条件) と対応のある因子 (Same 条件 vs. Different 条件) の二元配置分散分析を用いて検定を行った．その結果，Different 条件の方が Same 条件より 1% 水準で有意に JND の値

が小さくなることが確認された ($F(1,12) = 13.4, p < 0.01$)．しかし，Front 条件と Back 条件においては有意な差は見られなかった ($F(1,12) = 0.54, p = 0.48$)．また，交互作用も確認されなかった ($F(1,12) = 0.20, p = 0.66$)．

より詳細に検討するため，Bonferroni 補正法を用いた対応のある t 検定を行った．その結果，Back-Same 条件と Back-Different 条件で有意な差を確認した ($p = 0.044$)．しかし，Front-Same 条件と Front-Different 条件では有意な差が確認できなかった ($p = 0.25, \text{n.s.}$)．

また PSS は等分散性は認められたが，正規性が棄却されたため，Freedman 検定を行った．その結果，

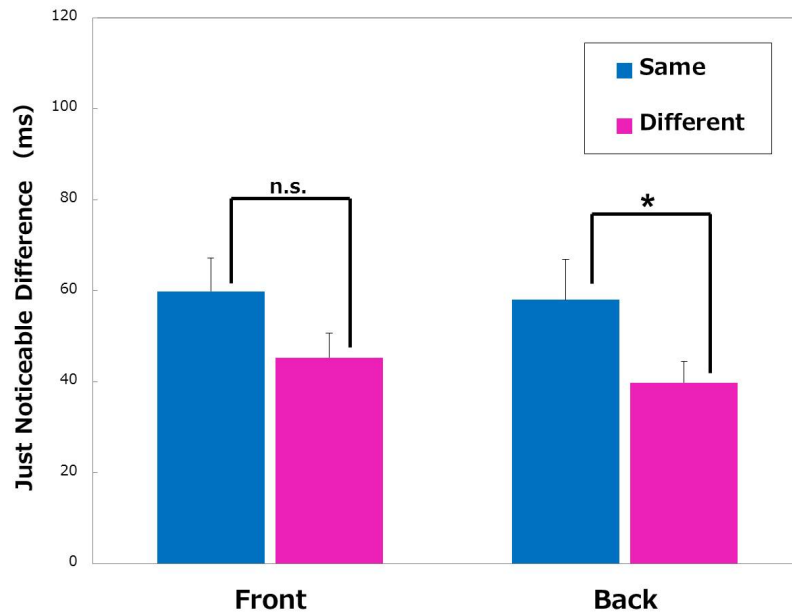


Fig.5 Averaged JNDs across participants. The error bars represent the standard errors across participants.

PSS は条件間において統計的な有意差が確認されなかった ($p = 0.29$, n.s.) .

2.3 考察

Front 条件においては, Same 条件と Different 条件で JND に有意差は確認されなかったが, Back 条件においては Same 条件の JND に比べ Different 条件の JND が 5 % 水準で有意に小さくなった. この結果は, 刺激の提示位置が TOJ において影響を与えることを示している. ペリパーソナルスペースにおいて見える空間と見えない空間を移動できる手に触覚刺激を与えた実験 1 では, Back 条件のみで JND に有意差が見られたことから, 見えない空間では刺激の提示位置が聴触覚 TOJ に影響を与えることが示された. 見えない空間かつペリパーソナルスペースでは, 刺激提示位置が離れていると時間窓が狭まり時間分解能が向上し, 聴触覚 TOJ の精度が高まると考えられる.

触覚モノモーダル TOJ においても, 触覚提示部位である手を体の前においた時と後ろにおいた時では JND が異なる^[15]. 触覚を含んだ TOJ においては, 刺激が提示される身体の皮膚上の位置ではなく, 刺激が提示される身体部位が存在する空間での位置が TOJ に関わることを示唆している.

クロスモーダル TOJ では, 感覚器官から入力された感覚情報はまずそれぞれの感覚野に届けられモダリティごとに処理される. その後, 人間が持っている外部座標系を利用して, 別々の感覚モダリティの刺

激提示位置が同じ座標上にマッピングされることで, 刺激提示位置の情報を得ることができる. マッピングされた 2 つの位置情報を比較し, 統合の時間窓の幅が決定される. 同じ場所から提示された別の感覚モダリティの刺激は脳内で処理されると同一事象に帰属しやすい^[4]^[16]. これはマッピングの位置が近く感覚統合の時間窓にある程度の幅が保たれているためである. しかし, マッピングの結果位置が離れている場合には, 統合の時間窓が狭められるため Different 条件では JND が小さくなる^[2]^[17].

しかしながら, 聴触覚間において常に刺激提示位置が座標へマッピングされ時間順序が判断されるならば, Front 条件でも刺激提示位置の影響を受けて JND に差ができるはずである. しかし, Front 条件において JND に有意差がないのは位置情報を処理する機構が体の前と後ろで異なるためである^[18]. TOJ に必要な位置情報は座標にマッピングすることで得られるが, この座標系は日常生活をおく中で獲得されたものであり, 一様ではない. 身体の前方部分に対応する座標は, 視覚情報が基準となり聴覚, 触覚を含めた自己受容感覚により形成されている^[19]. しかし, 体の後ろは視覚情報を得ることができないため, 身体の後方部分に対応する座標は視覚以外のモダリティによって形成されている. 実験 1 の Front 条件のように, 視覚刺激を含まない聴触覚の刺激を体の前から提示すると, その提示位置を座標上に明確にマッピングすることが

できない．そのため位置が離れていても，提示位置により TOJ が影響を受けることがないと考えられる．

本実験では見える空間の中でもペリパーソナルスペース内から刺激を提示したが，見える空間の中でもペリパーソナルスペース外から刺激を提示した Zampiniらの先行研究でも，JND に差はなかった^[4]．実験中は目を閉じた状態であり，課題には聴覚刺激と触覚刺激のみを用いたことから，実験中には視覚刺激は得られない．実験中の視覚情報の有無でなく，日常生活において視覚刺激を得られる空間か否かが聴触覚の時間統合に影響を与えると考えられる．見える空間はペリパーソナルスペース内外に関わらず，視覚の空間分解能が高く聴触覚の位置が空間統合に影響を与えにくいとされているが^[20]，聴触覚の時間統合においても聴触覚の位置が影響を与えないことが示唆される．

また，目が見えない人間での聴触覚 TOJ は刺激提示位置によって影響を受けることが示されている^[14]．目が見えない人間は位置を把握するために視覚以外の聴覚や触覚を利用しており^{[21][22]}，視覚以外のモダリティによって座標全体が形成されている．健常人の見えない空間と同様に，目が見えない人間に対する聴触覚刺激はマッピングが正確に行われ，提示位置によって時間窓が変化する結果が得られたと考えられる．

以上より，聴触覚刺激をペリパーソナルスペースから提示すると，見えない空間では刺激の提示位置が聴触覚 TOJ に影響を及ぼすことを示した．次に，聴触覚刺激を見えない空間から提示すると，ペリパーソナルスペースでは刺激の提示位置が聴触覚 TOJ に影響を及ぼすか否かについて検討する．そのため，見えない空間かつペリパーソナルスペース外から聴覚刺激を提示させ，聴触覚 TOJ を行わせる実験を行う．そして，見えない空間かつペリパーソナルスペース内に刺激提示位置がある実験 1 の結果との比較を行う．

3. ペリパーソナルスペース内外での刺激提示位置の効果を調べるための聴触覚 TOJ

3.1 実験計画

3.1.1 参加者

実験 1 に参加した者のうち，10 名（男性 6 名，女性 4 名，平均 23.5 歳）が実験に参加した．

3.1.2 実験装置と刺激

実験 1 と同様の実験装置を用いて刺激を提示した．

3.1.3 実験課題

実験 1 と同様の課題を用いた．

3.1.4 条件

実験条件は，以下の 2 条件（Far-Same 条件，Far-Different 条件）であった．

Far-Same 条件

Far-Same 条件では，参加者は右腕を体の後方に伸ばした状態で課題を行った．Far 条件では，参加者の斜め 45°後方の左右 2ヶ所，身体から 700 mm 離れた位置にスピーカを配置した．Target 刺激の聴覚刺激は，参加者の右後方に設置したスピーカより提示された．触覚刺激は右後方に位置するスピーカのすぐ前に設置した触覚提示装置より，参加者の右手人差し指に提示された．聴覚刺激は，見えない空間かつペリパーソナルスペース外部から提示された．また，聴覚刺激と触覚刺激ともに参加者の右側から提示されたため，感覚刺激の提示は左右同側であった．

Far-Different 条件

Far-Different 条件では，参加者は右腕を体の後方に伸ばした状態で課題を行った．Target 刺激の聴覚刺激は，参加者の右後方に設置したスピーカより提示された．触覚刺激は右後方に位置するスピーカのすぐ前に設置した力覚提示装置より，参加者の右手人差し指に提示された．聴覚刺激は，見えない空間かつペリパーソナルスペース外部から提示された．また，聴覚刺激は参加者の左側から，触覚刺激は参加者右側から提示されたため，感覚刺激の提示は左右反対側であった．

3.1.5 手続き

参加者とスピーカの距離，参加者と触覚提示装置の距離をそろえるために位置決めを行った．参加者の右手に触覚提示装置を装着し右腕を体の前に伸ばした状態で，参加者から 700 mm 離れた斜め 45°後方の 2ヶ所にスピーカを設置し，参加者の右後ろに位置するスピーカの前方に触覚提示装置を設置した．その他は，全て実験 1 と同様に行った．

実験 2 は，練習の 1 ブロックおよび本実験の 4 ブロック，計 5 ブロックで構成された．実験 1 と同様に，1 ブロック内において，Target の聴覚刺激が右のスピーカから提示される Same 条件と Target の聴覚刺激が左のスピーカから提示される Different 条件の 2 条件がランダムに提示された．練習のブロックは，10 種類の SOA（-200，-90，-55，-30，-20，20，30，55，90，200 ms）を 4 試行ずつ行うため，80 試行（2 条件 × 10 SOA × 4 試行）の TOJ で構成された．本実験のブロックは，10 種類の SOA を 8 試行ずつ行うため，160 試行（2 条件 × 10 SOA × 8 試行）で構成された．

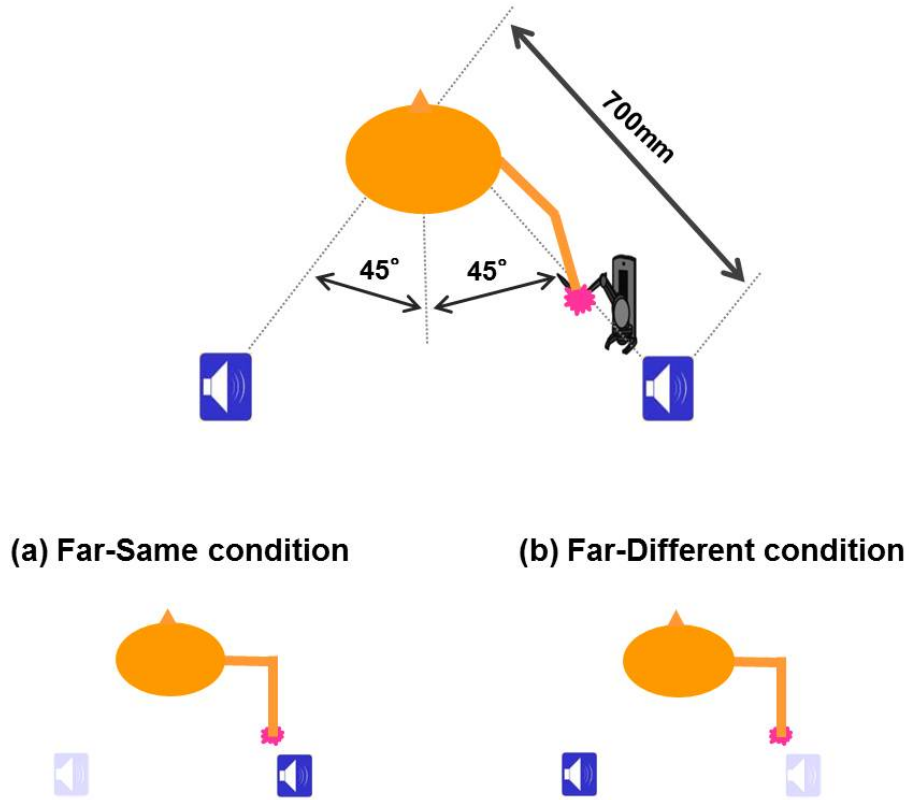


Fig.6 Schematic illustration of the set up in experiment 2. The auditory stimuli were presented 700 mm from the centre of the body. The tactile stimuli were presented to the right index finger. (a) Far-Same condition in which participant's right finger was placed in the back and the auditory stimuli were presented from the right speaker. (b) Far-Different condition in which the patient's right finger was placed in the back and the auditory stimuli were presented from the left speaker.

よって、本実験で各参加者が行った試行数は 640 試行であった。休憩を含む実験全体の所要時間は 1 時間程度であった。

3.2 結果

3.2.1 解析手順

実験 1 と同様の解析手順で行った。

3.2.2 JND および PSS の結果

先行研究の基準に従い^[14]、10 名が適切に課題を行えたと判断し解析を行った。実験 2 の参加者は全員実験 1 の参加者である。以降は、実験 1 における 10 名の Back-Same 条件での結果を Near-Same 条件の結果とし、Back-Different 条件での結果を Near-Different 条件の結果とする。有効なデータを取得できた 10 名の参加者のデータを平均し、回帰した心理物理曲線を Fig. 7 に示す。また、参加者ごとに回帰を行うことで JND および PSS を算出した。参加者間の平均値および標準誤差を Table 2 および Fig. 8 に示す。

JND は、正規性と等分散性が認められたため、対応のある因子 (Near 条件 vs. Far 条件) と対応のある因子 (Same 条件 vs. Different 条件) の二元配置分散分析を用いて検定を行った。その結果、Same 条件と Different 条件では、5 % 水準で有意に JND が小さくなることが確認された ($F(1,9) = 6.77, p < 0.05$)。Near 条件と Far 条件において有意差はなかったが ($F(1,9) = 0.31, p = 0.59$) が、交互作用が認められた ($F(1,9) = 12.8, p < 0.01$)。より詳細に検討するため、Bonferroni 補正法を用いた対応のある t 検定を行った。その結果、Near-Same 条件と Near-Different 条件で有意な差を確認した ($p = 0.027$)。しかし、Far-Same 条件と Far-Different 条件では有意な差が確認できなかった ($p = 0.73, \text{n.s.}$)。

また PSS は、Freedman 検定を行った結果、条件間において統計的な有意差が確認されなかった ($p = 0.29, \text{n.s.}$)。

Table 2 Mean and standard errors of the JND and PSS values (in ms) for each conditions in experimental 2.

Condition		Near		Far	
		Same	Different	Same	Different
JND	Mean	64.5	45.3	65.4	73.3
	Standard Error	0.9	2.2	5.4	3.7
PSS	Mean	-18.3	-34.6	-12.7	-19.8
	Standard Error	15.9	13.6	20.2	18.8

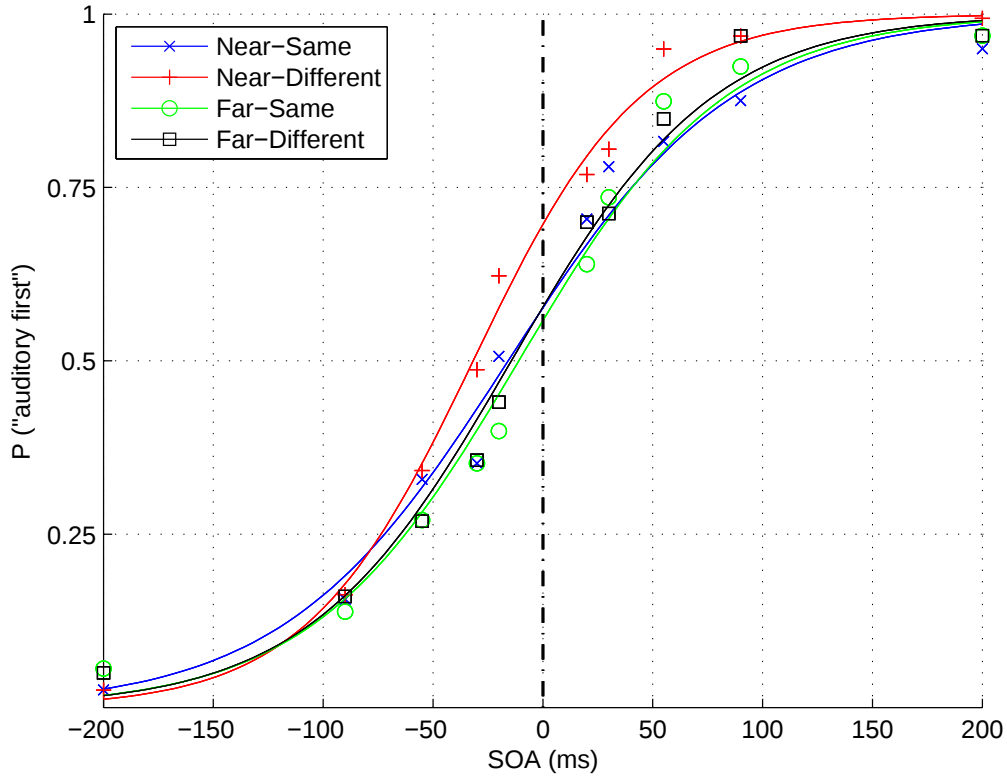


Fig.7 Averaged psychometric function across participants under each condition in experimental 2.

3.3 考察

聴覚刺激を見えない空間かつペリパーソナルスペース外から提示する Far 条件において，Same 条件と Different 条件において有意差が見られなかった．しかし，聴覚刺激を見えない空間かつペリパーソナルスペースから提示する Near 条件では，Same 条件と Different 条件において JND に有意差があった．Near 条件のみ JND に有意差が確認されたことから，見えない空間かつペリパーソナルスペースに聴覚刺激が提示されるときのみ，提示位置が TOJ に影響を与えることを示した．

実験 1 より，見えない空間では刺激提示位置が離れ

ていることによって聴覚 TOJ の精度が向上すると考察した．しかし実験 2 より，見えない空間の中でもペリパーソナルスペースでのみ刺激の提示位置が聴覚時間統合に影響を与えることが示された．JND が変化する要因としては，マルチモーダルニューロンのはたらきが考えられる．2 つ以上のモダリティに反応するマルチモーダルニューロンが Ventral premotor cortex (運動前野腹側) や Caudalmedial auditory belt cortex (尾内側聴覚野) に存在し [23] [24]，モノモーダル刺激よりもマルチモーダル刺激でより活性化する [25]．運動前野腹側に存在するマルチモーダルニューロンは，顔や腕への触覚刺激に対する受容野を持ち，触覚刺激

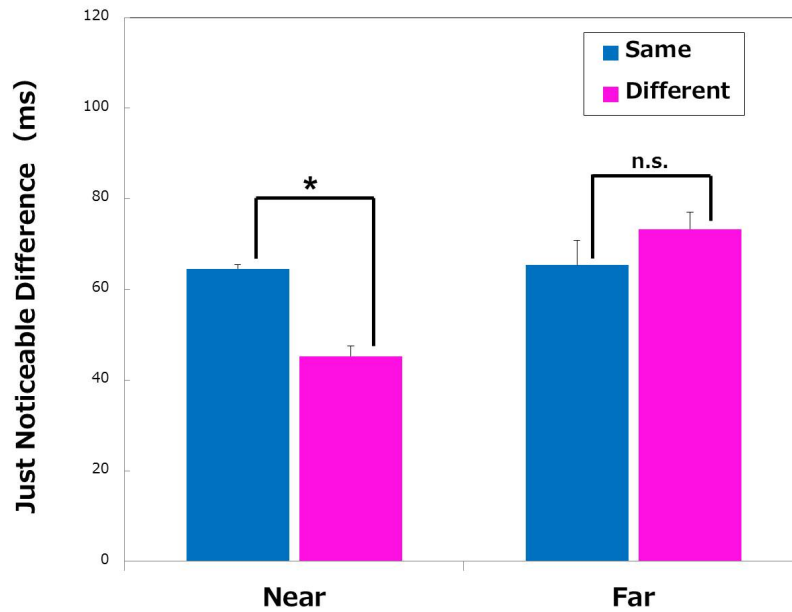


Fig.8 Averaged JNDs across participants in experiment 2 and under back condition in experiment 1. The error bars represent the standard errors across participants.

の提示位置から 300 mm 離して聴覚刺激を提示すると活性化したが、700 mm 離して聴覚刺激を提示すると活性化しない^[26]。このニューロンはペリパーソナルスペースでの感覚処理に関わっているため、見えない空間の中でもペリパーソナルスペースに提示される刺激は、ペリパーソナルスペースの外よりもはっきりと知覚することができる^[26]^[27]。見えない空間かつペリパーソナルスペースでは、刺激提示位置のマッピングによって位置が離れていると統合の時間窓が狭まるが、この時マルチニューロンが活性化していることで、時間窓を狭める効果が強調されると考えられる。

一方で、見えない空間かつペリパーソナルスペース外では、刺激の提示位置が聴覚の TOJ に影響を与えないことが明らかとなった。手はペリパーソナル外に届くことができないため、聴覚刺激がペリパーソナルスペース外から提示されるときは、両者が同一事象に属するものと知覚する必要性が低い。聴覚刺激がペリパーソナルスペース外から提示されることで、刺激が提示される空間が解離しているため、刺激の提示位置に関わらず統合の時間窓は一定に保たれていると考えられる。

以上より、聴覚 TOJ に刺激提示位置の効果が見られるのは、刺激提示位置が見えない空間にあり、かつペリパーソナルスペースにあるときに限定されることが示された。これは、聴覚の同時性知覚において、

見えない空間の中でもペリパーソナルスペース内は刺激の提示位置によって統合の時間窓が変化する空間であることを示唆する。

4. 結論

本研究では、聴覚 TOJ を用い刺激提示位置の効果について調べることで、刺激が提示される空間の情報が聴覚 TOJ に及ぼす影響について検討した。

実験 1 では、見えない空間に刺激提示位置があると、刺激提示位置が聴覚 TOJ に影響を与えるか否かを検討するため、見える空間と見えない空間を移動することのできる手に触覚刺激を提示し聴覚 TOJ を行わせた。聴覚刺激を見える空間から提示する Front 条件と見えない空間から提示する Back 条件それぞれにおいて、刺激を左右同側から提示する Same 条件と左右反対側から提示する Different 条件の 4 条件を行った。その結果、Front 条件では、Same 条件と Different 条件で JND における有意差はなかったが、Back 条件において Different 条件では Same 条件よりも JND が有意に小さくなった。ゆえに、見えない空間から刺激が提示されると、刺激提示位置が聴覚 TOJ に影響を及ぼすことが示された。

また実験 2 では、ペリパーソナルスペース内に刺激提示位置があると、刺激提示位置が聴覚 TOJ に影響を与えるか否かを検討するため、聴覚刺激を身体か

ら 700 mm 離れた位置から提示させる Far 条件において, Same 条件と Different 条件で聴触覚 TOJ を行った. 実験 1 では聴覚刺激を 200 mm から提示したので, 実験 1 の Back 条件での結果を Near 条件とし, 実験 2 の Far 条件と比較した. その結果, Far 条件では, Same 条件と Different 条件で JND における有意差はなかったが, Near 条件において Different 条件では Same 条件よりも JND が有意に小さくなった. ゆえに, ペリパーソナルスペースから刺激が提示されると, 刺激提示位置が聴触覚 TOJ に影響を及ぼすことが示された.

以上より本研究では, 聴触覚の同時性知覚において, 見えない空間の中でもペリパーソナルスペース内でのみ, 刺激提示位置が離れると統合の時間窓が狭めることを明らかにした. 見えない空間かつペリパーソナルスペースでは聴触覚の刺激提示位置が座標に正確にマッピングされ, 同時にマルチニューロンが活性化することで, 刺激提示位置が離れていると時間窓を狭める効果が起こりやすいと考えられる. また, 見える空間では視覚の空間分解能が高く, 聴触覚の刺激の位置が聴触覚の空間統合だけでなく時間統合にも影響を与えないことも示唆される. 時間知覚に空間の情報が関わっていることを示すこの研究は, 感覚統合のメカニズム解明に寄与する知見の一つとなるであろう.

謝辞

本研究を進めるにあたり, 必要な環境を整え熱心なご指導をいただきました, 三宅美博准教授に心より感謝申し上げます. また, 本稿の審査員をお引き受け下さいました中村清彦教授, 古山宣洋准教授に深く感謝いたします. 研究を進めるにあたり数多くの助言をいただきました東京大学の緒方大樹氏に深く感謝いたします. また, 実験にご協力いただきました参加者の方々にも, この場を借りて御礼申し上げます. 研究生活をおくるうえで, 公私共にお世話になった三宅研究室の皆様に深く感謝します. 最後に, 私の学生生活を支えてくれた父, 母, 祖父, 祖母, 妹に心より御礼申し上げます. ありがとうございました.

参考文献

- [1] 大山 正, 和氣 典二, 菊地 正, 今井 省吾, 2007, 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック Part2, 誠信書房, 7
- [2] Spence, C., Baddeley, R., Zampini, M., James, R., Shore, D.I., 2003. Multisensory temporal or-

- der judgments: when two locations are better than one. *Perception & Psychophysics* 65, 318-328.
- [3] Zampini, M., Shore, D.I., Spence, C., 2003. Audiovisual temporal order judgments. *Experimental Brain Research* 152, 198-210.
- [4] Zampini, M., Brown, T., Shore, D.I., Maravita, A., Roder, B., Spence, C., 2005. Audiotactile temporal order judgments. *Acta Psychologica* 118, 277-291.
- [5] Kitagawa, N., Zampini, M., Spence, C., 2005. Audiotactile interactions in near and far space. *Experimental Brain Research* 166, 528-537.
- [6] Zampini, M., Torresan, D., Spence, C., Murray, M.M., 2007. Auditory-somatosensory multisensory interactions in front and rear space. *Neuropsychologia* 45, 1869-1877.
- [7] Rizzolatti, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., 1997. The space around us. *Science* 277, 190-191.
- [8] Farne, A., Ladavas, E., 2002. Auditory peripersonal space in humans. *Journal of Cognitive Neuroscience* 14, 1030-1043.
- [9] Occelli, V., O'Brien, J.H., Spence, C., Zampini, M., 2010. Assessing the audiotactile Colavita effect in near and rear space. *Experimental Brain Research* 203, 517-532.
- [10] Hecht, D., Reiner, M., 2009. Sensory dominance in combinations of audio, visual and haptic stimuli. *Experimental Brain Research* 193, 307-314.
- [11] Lloyd, D.M., Merat, N., McGlone, F., Spence, C., 2003. Crossmodal links between audition and touch in covert endogenous spatial attention. *Perception & Psychophysics* 65, 901-924.
- [12] Spence, C., Shore, D.I., Klein, R. M., 2001. Multisensory prior entry. *Journal of Experimental Psychology General* 130, 799-832.
- [13] Finney, D.J., 1953. *Probit analysis: a statistical treatment of the sigmoid response curve*. University Press, Cambridge, England. 256
- [14] Occelli, V., Spence, C., Zampini, M., 2008. Audiotactile temporal order judgments in blind and sighted individuals. *Neuropsychologia* 46, 2845-2850.
- [15] Kobor, I., Furedi, L., Kovacs, G., Spence, C., Vidnyanszky, Z., 2006. Back-to-front: improved tactile discrimination performance in the space you cannot see. *Neuroscience Letters* 400, 163-167.
- [16] Senkowski D, Schneider TR, Foxe JJ, Engel AK 2008, Crossmodal binding through neural coherence: implications for multisensory processing. *Trends Neuroscience* 31, 401-409.
- [17] Zampini, M., Shore, D.I., Spence, C., 2003. Multisensory temporal order judgments: the role of hemispheric redundancy. *International Journal of Psychophysiology* 50, 165-180.
- [18] Viaud-Delmon, I., Brugger, P., Landis, T., 2007. Hemineglect: take a look at the back space. *Annals of Neurology* 62, 418-422.
- [19] 伊藤宏司, 1995, 身体システム論 ヒューマンロボティクスによる運動の学習と制御, 東京大学出版会, 64-65.
- [20] Murray, M.M., Molholm, S., Michel, C.M., Helsenfeld, D.J., Ritter, W., Javitt, D.C., Schroeder, C.E., Foxe, J.J., 2005. Grabbing your ear: rapid auditory? somatosensory multisensory interactions in low-level sensory cortices are not constrained by stimulus alignment. *Cerebral Cortex* 15, 963-974.
- [21] Welch, R.B., Warren, D.H., 1980. Immediate perceptual response to discrepancy. *Psychological*

Bulletin 88, 638-667.

- [22] Ernst, M. O., Bank, M. S., 2002 Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature* 415, 429-433.
- [23] Graziano, M.S., Reiss, L.A., Gross, C.G., 1999. A neuronal representation of the location of nearby sounds. *Nature* 397, 428-430.
- [24] Fu, K.G., Johnston, T.A., Shah, A.S., Arnold, L., Smiley, J., Hackett, T.A., Garraghty, P.E., Schroeder, C.E., 2003. Auditory cortical neurons respond to somatosensory stimulation. *Journal of Neuroscience* 23, 7510-7515.
- [25] Stein, B. E., Meredith, M. A., 1993. The merging of the senses. Cambridge, MA: MIT Press.
- [26] Graziano, M.S., Taylor, C.S., Moore, T., 2002. Complex movements evoked by microstimulation of precentral cortex. *Neuron* 34, 341-351.
- [27] Ho, C., Santangelo, V., Spence, C., 2009. Multi-sensory warning signals: when spatial correspondence matters. *Experimental Brain Research* 195, 261-272.