

## 基礎論文

## ベクション感覚と平衡感覚刺激並存下の音像定位

崔 正烈\*<sup>1</sup> 寺島 英明\*<sup>1\*2</sup> 坂本 修一\*<sup>1\*2</sup> 岩谷 幸雄\*<sup>3</sup> 鈴木 陽一\*<sup>1\*2</sup>

Sound localization in the coexistence of visually induced self-motion and vestibular information

Zhenglie Cui\*<sup>1</sup> Hideaki Terashima\*<sup>1\*2</sup> Shuichi Sakamoto\*<sup>1\*2</sup> Yukio Iwaya\*<sup>3</sup> and Yōiti Suzuki\*<sup>1\*2</sup>

**Abstract** – In this study, we investigated the effect of self-motion perception induced by visual stimuli, i.e.vection and/or vestibular information on sound localization. To make an observer perceivevection we presented random dots which were moving laterally on a wide screen. To present vestibular stimuli we used a three-degree of freedom (3 DOF) motion platform which inclines right or left. Sound stimuli were presented behind the screen when an observer perceived self-motion induced by visual stimuli and/or the platform. The observer's task was to point the position of the sound image on the screen. Experimental results showed that perceived sound position shifted to the opposite direction of perceived self-motion induced by visual information, regardless of the direction of vestibular information. Moreover, this tendency was observed only one side of median sagittal plane; the side whose direction was same as that of the movement of visual information. The result indicates that the auditory spatial perception is changed by the self-motion due to the coexistence of visually induced self-motion and vestibular information.

**Keywords** : self-motion, vestibular, sound localization, spatial localization

## 1 はじめに

我々は、空間における非接触的な位置情報を取得する場合、視覚のみに頼らず、聴覚も積極的に利用している。例えば、空間内で音イベントが発生したときに、すぐに音の空間位置を把握し、その方向に顔を向けることができるが、これは、音が左右の耳に到達するまでの時間差 (interaural time difference: ITD) や音圧レベル差 (interaural level difference: ILD)、音信号の周波数スペクトルやそれらの両耳間差などを手掛かりにして行われると考えられている [1][2]。

こうした聴覚の手掛かりは、自己身体と音源との相対的な位置関係によって変化する。それにも関わらず、我々は、頭部や身体の偏移・移動が生じた場合においても、静止音源は静止聴覚対象物として同じ絶対位置に知覚するなど、空間における音源の大まかな位置や方向を知覚することができる。このことは、我々の聴空間知覚において、聴覚への入力情報と、自己運動の有無や方向及び動きに関する情報を統合して音像定位が行われることを意味する。

このような観点から、身体感覚と音像定位との関連

について、その密接なつながりを示す様々な研究報告が古くからなされている。例えば、Clarkら [3] は、観察者に垂直軸周りの回転加速度刺激を提示した場合、音源位置を回転方向とは逆方向に偏移して知覚すると報告した。Lesterら [4] は、回転するイスを用いた回転加速度刺激を実験参加者に与え、外部に設置したスピーカから聴覚刺激を提示して音像定位実験を行った。その結果、加速時には回転方向と逆方向に音像定位が偏移し、減速時には回転方向と同方向に音像定位が偏移することを示した。Lewaldら [5] の、比較的低速で回転する前庭刺激を提示した場合の音像定位実験からも、回転と同方向に音像定位が偏移することが示された。このほかにも、耳石器への刺激 [6] や頸筋への刺激 [7] によっても、音像定位に錯誤が生じるとの報告がなされており、聴覚手掛かりだけでなく、そのときの身体的手掛かりが統合されて、聴覚による空間定位が成立することが示唆されている。

ところで、自己の運動情報は、主に前庭感覚系や自己受容感覚系から得られるが、視覚系も大きな役割を果たしている。例えば、視野の広い範囲に一定方向に運動する視覚パターンを提示することによって、自己運動感覚 (ベクション [8]) が引き起こされる。これは、視覚系が自己身体運動を知覚する上で重要な役割を果たしていることを示している。ベクション生起時には、自分自身が実際には静止しているにもかかわらず、あたかも視覚刺激の運動とは反対方向に動くよう

\*<sup>1</sup>東北大学電気通信研究所\*<sup>2</sup>東北大学大学院情報科学研究科\*<sup>3</sup>東北学院大学\*<sup>1</sup>Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University\*<sup>2</sup>Graduate School of Information Sciences, Tohoku University\*<sup>3</sup>Tohoku Gakuin University

な感覚が生じる。つまり、実際の移動が伴わず、自己身体の移動情報だけを操作することができるため、聴覚手掛かりを一定に維持した上で、自己身体の移動情報の影響を調べることができる。

このような理由から、ベクション生起が聴覚による空間定位に及ぼす影響については従来から調べられてきた。例えば、Wallach[9]は、聴取者に自分自身の身体軸を中心に回転するヨーベクションを与えた場合、音像定位がどのように変化するかを調べた。その結果、回転ベクションの影響により、正中面の目の高さの位置に提示した音源を、頭上にシフトして知覚する傾向のあることを示した。Wallachは、正中面に提示した音が左右の耳に到達するまでのITDとILDは元々ほぼゼロであり、ベクション知覚時には、両者がほぼゼロになる位置が頭上と真下が変わるため、音像を頭上にシフトして定位したと考察した。崔ら[10]は、ベクション知覚時の頭部前方及び後方の音像定位を調べ、頭部後方の左右両方向の音像定位はベクション知覚の影響を受けやすく、音像を自己身体の運動方向へシフトして定位することを示した。Thurlowら[11]のベクション知覚時の音像定位の変化を調べた実験結果からも、広視野に運動する視覚刺激の提示によって自己運動感覚が生起され、それによって音像定位に錯誤が生じることが示された。

このように、物理的な自己運動を伴わない場合であっても、ベクションを知覚することにより、音空間知覚が変容される可能性のあることが明らかとなった。ところで、我々の実生活においては、一つの感覚情報のみではなく、複数の情報が同時並列的に入力されている。入力された複数の感覚情報は、時間的・空間的に統合され、脳内で一つの事象経験として空間知覚が行われる。このような多感覚刺激の入力によって知覚される自己運動感覚は、単一の感覚モダリティによる自己運動感覚とは異なる性質を持つ可能性が指摘されている。例えば、Harrisら[12]は、前進方向へのベクション知覚時に、同方向への前庭刺激を与えることによって、自己運動感覚がどのように変化するかについて調べた。その結果、前方への加速度を加えることによって自己運動感覚が影響を受け、移動距離を実際よりおよそ2倍程度長く見積ることを明らかにした。Edwardsら[13]は、ベクション知覚により、ベクションと同方向への加速度は感知しやすく、逆方向の加速度は感知し難くなる傾向のあることを示した。

以上のように、ベクション知覚による自己運動感覚と、前庭感覚刺激による自己運動感覚の間には、排他的或いは協調的な合成が行われるなど、何らかの相互作用のあることが言えよう。従って、このような相互作用によって生起される自己運動感覚の下で行われる

空間定位も、単一の自己運動感覚の場合とは異なる可能性が考えられる。本研究では、このような複数の刺激の並存下において、空間定位がどのような性質を持つのかについて検討した。具体的には、実験参加者に左右方向のベクションを知覚させ、更にベクション方向と同方向または逆方向の平衡感覚刺激を与えた場合、音像定位がどのように変化するかについて調べた。

予想としては、ベクション方向と同方向の前庭刺激を与えた場合は、同じ方向に働く2つの刺激成分のベクトル合成により、誘発される自己運動感覚が強調[14][15]され、音像定位の偏移が起りやすく、逆に、反対方向への前庭刺激を提示した場合は、相反する方向の2つの成分の働きにより、自己運動感覚の程度が弱まり、音像定位のシフトが起り難くなるのではないかと考えられる。

なお、「平衡感覚」は自己身体の運動や重力に対しての傾きを察知する働きであり、これには前庭への刺激以外に視覚も連携して働くと考えられる。本研究では、このような「平衡感覚」を生起させることが可能な入力情報を「平衡感覚刺激」と定義する。

## 2 実験1—右方向のベクション知覚

### 2.1 目的

右方向へのベクションを知覚する場合、ベクション方向と同方向或いは逆方向の平衡感覚刺激を提示し、複数の刺激の並存下で知覚される自己運動感覚が音像定位にどのような影響を及ぼすのか検討した。

### 2.2 実験環境

実験環境の概略を図1に示す。天井と床面、前後と左面を吸音材（平板ポリエステル不織布、密度32kg）で、右面は厚くて黒いカーテンで囲んだ空間内に、150インチの大型音響透過スクリーン（キクチ科学、Stewartサウンドスクリーン）を設置した。スクリーンには、前方に設置したプロジェクタ（PDG-DHT100JL: SANYO）を通して、ランダム・ドット・パターンを提示した。プロジェクタの騒音による音像定位への影響を排除するために、プロジェクタは完全に隔離された別の部屋に取り付け、騒音防止用ガラスを通して投射した。

実験参加者とスクリーンとの距離は100cm、目の高さは床面より137cmに設定した。1つのドットは $0.75 \times 0.75$  degの大きさであり、色は緑（ $65 \text{ cd/m}^2$ ）、密度は20%であった。ランダム・ドットを提示する領域はスクリーンの全面で、大きさは113（横） $\times$ 62（縦）degであった。ドットはスクリーンを向かって左の方向へ、一定の速度（15 deg/s）で移動させた。ランダム・ドットは、グラフィック・ライブラリAPIであるOpenGL[16]を使用して生成した。

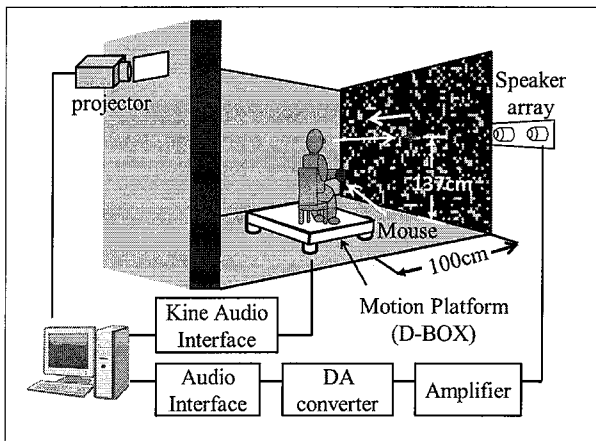


図1 実験環境  
Fig. 1 Experimental environment.

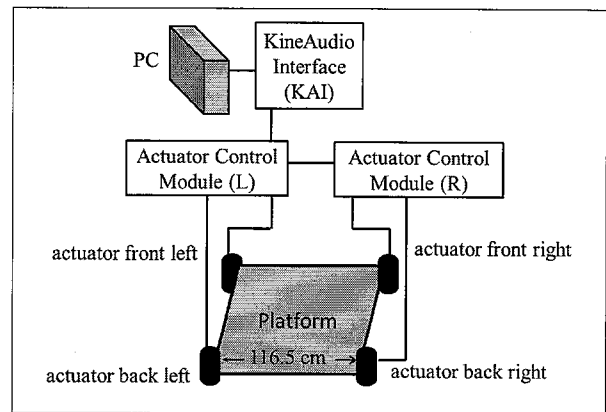


図3 D-BOXの構成  
Fig. 3 The configuration of the D-BOX.

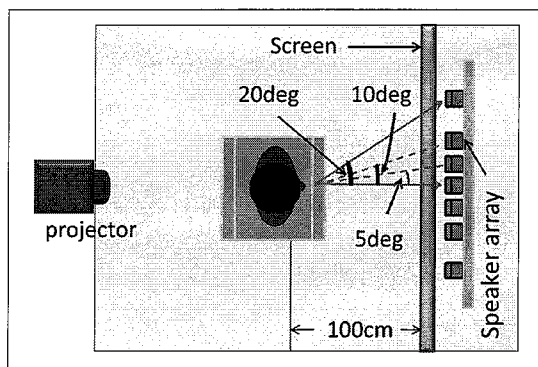


図2 設置したスピーカの様子  
Fig. 2 A state of the speaker array.

音響透過型スクリーンの前方には、後述の平衡感覚刺激を提示するためのモーションプラットフォーム (D-BOX MASTERING MOTION: D-BOX) を設置し、その上に実験参加者が座るためのイスを設置した。スクリーンの背後には、スピーカを取り付けるための台を設け、床面から高さ 137 cm の位置に、7 個のスピーカを水平方向に並べて取り付けた (図 2 参照)。これらのスピーカは、直径 3 cm のソフトエッジタイプのユニット (ホシデン, 7N101) を小型の円筒形のプラスチックケースに取り付けたものである。スピーカの設置間隔は、実験参加者の頭部中心 (正中面) を基準として、左右それぞれ 0,  $\pm 5$ ,  $\pm 10$ ,  $\pm 20$  deg の位置に設置した (+はスクリーンを向かって右方向, -は左方向を指す)。

視覚刺激と音刺激の制御、及び D-BOX の制御用 PC (Precision T3500: DELL) には、24 チャンネルデジタル音信号の入出力が可能なオーディオ・インタフェース (HDSP MADI: RME) を搭載し、光ケーブルにより、DA コンバータ (M32-DA: RME) 及びパワーアンプ (MP-3016: 三島プランニング) と接続した。各々のスピーカからは、持続時間 200 ms, 音圧レベル 50

dB のホワイトノイズバーストを出力した。

### 2.3 平衡感覚刺激の提示

平衡感覚刺激の提示装置である D-BOX はプラットフォーム、アクチュエータ、アクチュエータ・コントロールモジュール、Kine Audio Interface (KAI) により構成される (図 3 参照)。プラットフォームは一边が 116.5 cm の正方形であり、その下の 4 本のアクチュエータの高さを制御することで床を傾斜させ加速度情報を提示する。PC と KAI は USB ケーブルにて接続され、PC は KAI をサウンドデバイスとして認識する。このため、PC より 4 ch の音声データを入力することで 4 本のアクチュエータの高さを制御できる。

実験に先立ち、実験参加者 (10 人) の平衡感覚の反応時間を求めるため、予備実験を実施した。D-BOX をランダムなタイミングで左右いずれの方向に傾け、身体が傾いたと感じ始めたら、素早くマウスのボタンを押すように求めた。そのときの全実験参加者の平均反応時間は  $524 \pm 66$  ms, 最も遅い反応時間は 635.2 ms であった。これから、平衡感覚刺激の提示より 635.2 ms 以降に音刺激を提示すれば、実験参加者全員が平衡感覚刺激を知覚した後に音像定位を行うことができると言える。本研究では、これより更に遅い 750 ms を音刺激の提示タイミングとした。そのときの D-BOX の傾斜角度は  $\pm 1.78$  deg であり (+は右方向, -は左方向を指す)、垂直方向の高さの変化量は 0.12 cm であった。

垂直方向の高さの変化量が充分小さいため、傾斜角度  $\pm 1.78$  deg までの D-BOX の傾く方向は、ほぼ自己運動の方向に近いと言える。しかし、小さいながらも傾き成分が生じる為、本研究では、後述する「身体を左右いずれの方向に傾けたまま静止する平衡感覚刺激条件」を設け、身体傾斜による体性感覚の影響を調べた。なお、予備実験は D-BOX の動作音の影響を排除するため、ヘッドホンを装着させホワイトノイズを提示して行った。

表1 実験条件  
Table 1 Experimental condition.

(S: Stop, M: Move, L: Left, R: Right, V: Vection)

条件名	ベクション	平衡感覚刺激	
		刺激の種類	方向
S	無し	なし	No
LS		傾けたまま静止 (自己運動無し)	Left
RS			Right
LM		傾ける動作 (自己運動有り)	Left
RM	Right		
SV	有り	なし	No
LSV		傾けたまま静止 (自己運動無し)	Left
RSV			Right
LMV		傾ける動作 (自己運動有り)	Left
RMV			Right

2.4 実験条件

本実験で使用した D-BOX は、床が傾く回転運動であるため、提示する平衡感覚刺激には左右への並進運動方向の成分だけでなく、身体が傾斜する成分も含まれる。並進運動方向の成分と、この傾斜による成分を分離するため、平衡感覚刺激の提示条件として、(1) 平衡感覚刺激なし、(2) 身体を左右いずれの方向に傾けたまま静止する平衡感覚刺激、(3) 左右方向の自己運動を伴う平衡感覚刺激の3種類を用意した。更に、各々の条件にはベクション有無の視覚刺激条件を加え、計10試行の実験条件を設けた(表1参照)。これにより、自己運動を伴う平衡感覚刺激を提示した場合の音像定位と、身体を傾けたまま静止する平衡感覚刺激を提示する場合の音像定位を比較することができ、身体傾斜による体性感覚の影響を分離することが可能となる。

なお、本研究では、ベクション無し条件として「視覚刺激無し」のみを設け、「視覚刺激の運動有り」かつ「ベクション無し」条件は用意しなかった。これは、我々が同じ実験環境にて行った先行研究[10]の結果から、視覚刺激が運動する条件においてもベクションによる自己運動を伴わない場合は音像定位のシフトが認められなかったこと、また、本研究の目的が、ベクションによる自己運動感覚が生じる場合の平衡感覚刺激の付加効果といった、複数の自己運動の相互作用を調べることにあることを考慮したためであった。

2.5 実験手順

実験参加者にはスクリーンの中央、目の高さの位置に設置した赤色の十字の注視点を注目するように教示した。ベクション条件では、実験参加者がマウスの中央のボタンをクリックしてベクション状態に入ったことを報告するまで、視覚刺激を左方向に流し続けた。

各試行開始の2s後(ベクション条件ではベクション状態に入って2s後)に、注視点の表示をなくし、平衡感覚刺激を提示した。更に750ms後に、音刺激を7つのスピーカの中からランダムに選択したひとつ

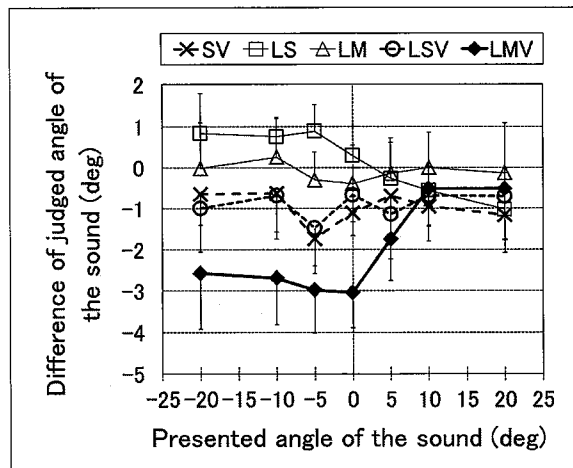


図4 実験結果 (平衡感覚刺激左方向)  
Fig. 4 The result of the experiment in shift to the left.

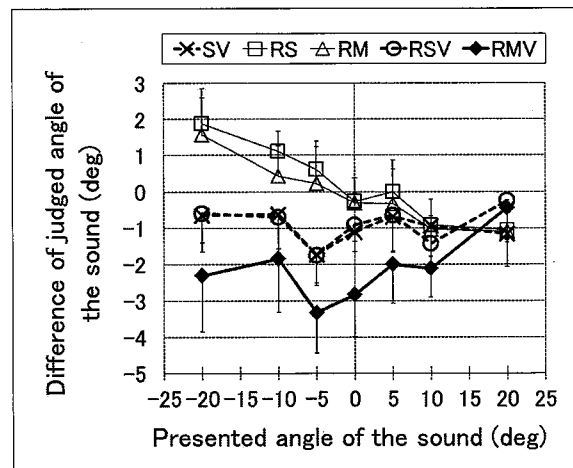


図5 実験結果 (平衡感覚刺激右方向)  
Fig. 5 The result of the experiment in shift to the left.

のスピーカより200ms間提示した。音刺激の提示が終わった後、すべての視覚刺激の表示をなくし、スクリーン上にマウスのカーソルを表示した。実験参加者には、マウスカーソルが表示されるまで視線や身体軸を変えないように教示した。作業課題は、画面に表れたマウスのカーソルを動かして、スクリーン上で音像の位置をポインティングすることであった。音像の位置をポインティングした後は、D-BOXの位置を初期位置に戻し、実験参加者がマウスの右ボタンをクリックして次の試行を開始した。試行は各スピーカの位置で10回ずつ、各セッションごとに70回で、全部で700回(スピーカ7個×10回×10セッション)行った。なお、回答用マウスは全員の利き手である右手で操作した。

ところで、平衡感覚刺激を提示するセッションでは、D-BOXを傾けるため、音刺激を提示するタイミングにおける観察者の頭部位置が正面のスピーカ(0deg)

より左右に若干ずれてしまう問題が生じる。このずれ幅は正中面より±3.72 cmであった。そこで、平衡感覚刺激を提示するセッションにおいては、D-BOXを左右方向へ3.72 cmずらして設置し、身体が傾いて音刺激を提示する際に頭部位置がちょうど正面の0 degのスピーカの位置に来るように調整した。実験参加者は、予備実験に参加した視力、聴力ともに正常な20～40代の成人男女10名であった。

## 2.6 実験結果

実験参加者全員が回答した音像位置の平均値(角度)と視覚・平衡感覚刺激なし条件(表1の条件名S)との差分を計算し図4と図5に示す。図4は、D-BOXを左方向へ傾けた場合であり、図5は右方向へ傾けた場合を表す。横軸は実音源の位置、縦軸は実験参加者がポインティングした角度の平均値と視覚・平衡感覚刺激なし条件との差を示す。縦軸の+方向はベクション方向(右)を指しており、-は視覚刺激の運動方向(左)を指す。

グラフから、ベクション条件における左右両方向への平衡感覚刺激が存在する場合、音像を「-」方向、即ち視覚刺激の運動方向(左)へシフトして定位することが読み取れる。そこで、音像定位角度のずれについて、自己運動条件(10種類)と音源位置(7箇所)を被験者内要因とした、2要因10×7水準の分散分析を行った。その結果、自己運動条件の主効果( $F(9, 81) = 4.016, p < .001$ )、音源位置の主効果( $F(6, 54) = 13.877, p < .001$ )、および自己運動条件と音源位置の交互作用( $F(54, 486) = 1.795, p < .001$ )に有意差が認められた。各音源位置における自己運動条件の単純主効果を検定したところ、音源位置-20 deg ( $F(9, 567) = 5.156, p < .001$ )、-10 deg ( $F(9, 567) = 3.275, p < .001$ )、-5 deg ( $F(9, 567) = 5.213, p < .001$ )、0 deg ( $F(9, 567) = 3.057, p < .005$ )で自己運動条件の単純主効果が有意であった。Ryan法による多重比較( $p < .05$ )の結果、音源位置-20 degではLMVとLS・RS・RM, RMVとLS・RS・RMに、音源位置-10 degではLMVとLS・RS・LM・RMに、音源位置-5 degではLMVとS・LS・RS・RM, RMVとS・LS・RS・LM・RMに、音源位置0 degではLMVとS・LS, RMVとLSの各組み合わせに有意差が認められた。即ち、ベクション感覚と平衡感覚刺激が並存する場合の方が、よりシフトした音像を知覚する現象が生じた。

## 2.7 考察

分散分析の結果、ベクション感覚と平衡感覚刺激が並存する場合の音像定位のシフト量が、他の条件と比べて有意に大きくなった。これは、ベクションを知覚している際に平衡感覚刺激を提示することによって、誘起される自己運動感覚が変化し、その変化が音像定

位に影響を与えたものと考えられる。

ベクション方向と逆方向の平衡感覚刺激を提示した場合(LMV条件)においても、音像定位のシフト量が有意に大きくなった。当初は、平衡感覚刺激の方向がベクション方向と逆の場合は、相反する2つの成分のベクトル合成により自己運動感覚が弱まると予想したが、むしろ自己運動感覚が強まる方向に働いたと言える。即ち、水平方向へのベクションを知覚している場合に関しては、平衡感覚刺激の方向に関係なく、刺激自体の存在が自己運動感覚を強める変化をもたらしたと考えられる。

一方、傾斜による体性感覚は存在するものの自己運動感覚が生じない場合(LSVやRSV条件)は、ベクション感覚の有無に係らず、音像定位のシフトが見られなかった。少なくとも、今回の実験範囲内では、身体傾斜による成分そのものの音像定位への影響は無視できると考えられる。ベクション感覚のみが生じる条件(SV条件)においては、音像定位のずれが見られなかった。また、平衡感覚刺激を提示する自己運動条件においても、ベクション感覚が付加されない場合(LMとRM)は、同様に音像定位のずれは認められなかった。これらから、ベクション知覚と平衡感覚刺激の2つの自己運動感覚が並存する場合のみ、音像定位に何らかの影響を及ぼすことが分かる。

ベクション知覚と平衡感覚刺激並存による音像定位への有意な影響は、音源位置-20～0 degの場合のみ、即ち正中矢状面より左側の音源位置に対してのみ生じた。この理由として、ベクション知覚による自己運動の方向が右方向であったため、中央より右側への注意が働いていた可能性が考えられる。Rhodes[17]は、聴覚的手掛かりがあった位置に音刺激を提示した場合、音源位置の選択にかかる反応時間が短くなることを報告した。また、空間のある位置に、視覚的或いは聴覚的な注意を払うことによって、情報処理が素早く行われることは古くから知られている[18][19][20]。近年の北島ら[21]の研究からは、視覚的に空間のある位置への注意を払うことによって、音源定位にバイアスをもたらす可能性のあることが示された。本実験環境においても、ベクションを知覚する場合、注視点が自己身体と一緒にベクション方向へと動くように知覚されるため、ベクション方向側への注意が働いた可能性が充分考えられる。これにより、注意を向けた側の「感度」が向上され、自己運動による音像定位の偏移という知覚現象が起こり難かったかも知れない。

### 3 実験2 - 左方向へのベクション知覚

#### 3.1 目的

実験1では、ベクション知覚と平衡感覚刺激の並存下における音像定位を調べ、2つの自己運動感覚が並存する場合のみ音像定位のシフトが生じることを明らかにした。また、このような音像定位のずれは、正中矢状面の左側だけに生じることを示した。しかし、実験1では、すべての音像定位を実験参加者の利き手である右手によるマウスのポインティングによって計測した。このため、操作系の影響により、正中面より左側だけに何らかのバイアスがかかった可能性は否定できない。

そこで、実験2においては、この操作系による影響を排除するために、回答用デバイスを両手による操作が可能なジョイスティックに変更し、音像定位シフトの逆転現象（右側のみに音像定位のずれが生じる）が生じるかを調べた。そのため、操作系以外にも、視覚刺激の移動方向を実験1とは逆方向である右方向に変更し、実験1と同様の実験を行った。

#### 3.2 実験方法

実験環境は、ポインティング用マウスをジョイスティックに変えた以外は、実験1と同様であった。実験参加者は、ジョイスティックの左右のボタンを用いてスクリーン上に表れるマウスカーソルを動かすことができる。実験条件は、表1のうち、平衡感覚刺激がある4つの条件（LM, RM, LMV, RMV）とコントロール条件である刺激なし条件（条件S）で、計5つの条件に絞って実施した。実験参加者は、実験1に参加したうちの5人であった。

#### 3.3 実験結果

実験参加者全員が回答した音像位置の平均値（角度）と視覚・平衡感覚刺激なし条件（表1の条件名S）との差分を計算し図6に示す。横軸は実音源の位置、縦軸は実験参加者がポインティングした角度の平均値と視覚・平衡感覚刺激なし条件との差を示す。縦軸の+方向は視覚刺激の運動方向（右）を指しており、-はベクション方向（左）を指す。

グラフから、ベクション条件における左右両方向への平衡感覚刺激が存在する場合に、音像を「+」方向、即ち視覚刺激の運動方向（右）へシフトして定位することが読み取れる。実験1と同様に、音像定位位置のずれについて、自己運動条件（5種類）と音源位置（7箇所）を被験者内要因とした、2要因の分散分析を行った。その結果、自己運動条件の主効果  $F(4, 16) = 6.921, p < .005$ 、音源位置の主効果  $F(6, 24) = 827.900, p < .001$ 、および自己運動条件と音源位置の交互作用  $F(24, 96) = 2.911, p < .001$  に有意差が認められた。各音源位置における自己運動条件の単純主効

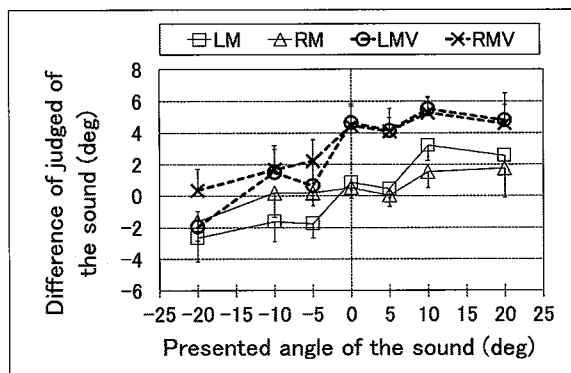


図6 実験2の結果

Fig. 6 The result of the experiment 2.

果を検定したところ、音源位置  $-5 \text{ deg}$  ( $F(4, 112) = 2.710, p < .05$ ),  $0 \text{ deg}$  ( $F(4, 112) = 6.893, p < .001$ ),  $5 \text{ deg}$  ( $F(4, 112) = 6.371, p < .001$ ),  $10 \text{ deg}$  ( $F(4, 112) = 7.627, p < .001$ ),  $20 \text{ deg}$  ( $F(4, 112) = 5.443, p < .001$ ) で自己運動条件の単純主効果が有意となった。Ryan法による多重比較 ( $p < .05$ ) を行った結果、音源位置  $-5 \text{ deg}$  ではRMVとLMに、音源位置  $0 \text{ deg}$  ではLMVとS・LM・RM, RMVとS・LM・RMに、音源位置  $5 \text{ deg}$  ではLMVとS・LM・RM, RMVとS・LM・RMに、音源位置  $10 \text{ deg}$  ではLMVとS・RM, RMVとS・RM, LMとSに、音源位置  $20 \text{ deg}$  ではLMVとS, RMVとSの各組み合わせに有意差が認められた。即ち、実験1と同様に、ベクション感覚と平衡感覚刺激が並存する場合の方が、音像定位のシフトが大きかった。

#### 3.4 考察

分散分析の結果、実験1と同様に、ベクション感覚と平衡感覚刺激が並存する場合の音像定位のシフト量が、他の条件と比べて有意に大きくなった。これは、ベクションを知覚している際に平衡感覚刺激を提示することによって、誘起される自己運動感覚が変化し、その変化が音像定位に影響を及ぼしたものと考えられる。

多重比較の結果、このベクション知覚と平衡感覚刺激による音像定位への影響は、音源位置が  $-5 \text{ deg} \sim 20 \text{ deg}$  と、主に正中矢状面より右側の音源位置の場合に対して生じた。即ち、実験1と逆方向のベクションを知覚する場合、平衡感覚刺激の付加による音像定位のシフト現象は、実験1とは反対側だけに表れた。以上のことから、この音像定位のずれは、操作系によるバイアスを受けたことによるものではないことが明らかとなった。ベクション知覚により、注視点が自己身体と同様にベクション方向へ移動するように知覚され、ベクション方向側への注意が働いた可能性が考えられる。

音像定位のずれが正中面より片側に生じた理由とし

て、片側の音空間が圧縮して表現されたことによる影響も考えられる。視覚研究においては、サッケード眼球運動の直前に、視空間自体が圧縮して表現されている可能性が指摘されている [22]。音空間知覚においても、頭部回転によって、視空間と同様の圧縮が生じる [23] 可能性が示唆されている。本研究においても、自分から遠ざかる方向のみに聴覚空間の変容が生じた可能性が考えられる。

#### 4 全体的考察

ベクション知覚と平衡感覚刺激が並存する場合は、ベクションのみや平衡感覚刺激のみの場合と比べて、音像を有意に視覚刺激の運動方向へシフトして定位した。この理由として、まずベクション知覚による音像位置の誤定位による影響を考える必要がある。

前述したとおり、ベクション知覚によって、音像定位に何らかの錯誤が生じる場合のあることは既に分かっており [9][10][11]、今回の実験においても、有意差は認められなかったものの、実験結果のグラフ（図4と5参照）からは、ベクション条件（条件名SV）の場合がベクションなし条件（LS, LM, RS, RM）と比べて、音像定位が偏位したようにも読み取れる。ただし、偏移の方向は、我々が同様の実験環境にて行った先行研究 [10] の結果と異なり、音像を視覚刺激の運動方向へシフトしているように読み取れる。しかし、先行研究では、基準音と刺激音との位置関係を回答させる課題（allocentric coordination）を用いて音像定位を調べており、今回の実験（egocentric coordination）とは空間定位に用いる参照枠が異なる。我々が行った同じ空間参照枠を用いた音像定位実験 [24] からは、ベクション知覚により音像を視覚刺激の運動方向へシフトして定位しており、今回の実験結果と一致している。

また、視覚が空間知覚や自己運動知覚を行う上で、大きな役割を果たしている [25] ことや、相矛盾する視覚・平衡感覚・体性感覚情報を任意に組み合わせた場合、視覚による自己運動情報に適合した知覚が生起すること [26] 等からも、今回の実験結果における音像定位の偏移は、ベクションという自己運動知覚を基軸に生起された現象であると言える。

実験結果より、少なくとも、平衡感覚刺激の方向に係らず、ベクション知覚時にこの平衡感覚刺激を付加することによって、誘起されるベクションの強度が増幅されたと考えることができる。それでは、なぜベクション知覚に平衡感覚刺激が付加された場合に、音像定位のずれという現象が顕著に表れたのだろうか。更に、なぜ平衡感覚刺激の提示方向がベクション方向と逆方向の場合においても、同様の音像定位のずれが生じたのだろうか。

Palmisano ら [27] は、前方への等速度運動と同時に上下左右へのジター（付加的ランダムな視点運動成分）を加えた場合、自己運動感覚の増強が生じると報告した。また、この付加的運動成分による自己運動感覚の増強は、周期的な視覚刺激の振動によっても生じることが明らかとなった [28]。中村ら [29] の研究によると、付加的な運動による自己運動感覚の増強は、上述した前方への自己運動の場合だけではなく、上下左右方向の自己身体の運動時においても生起する。更に、近年、視覚情報と平衡感覚情報との間に乖離が大きい状況においても、強力な自己運動知覚が誘導される事態が見いだされており [30]、本研究においても、平衡感覚刺激の方向に関係なく、刺激自体を付加することがジターと同様に自己運動感覚を強める役割を果たしているのではないかと考えられる。

音像定位のずれが正中面より片側のみが生じた理由としては、実験1の考察で述べたように、視覚的注意による影響が考えられる。注意によって感覚モダリティへの情報が素早く処理されることは古くから知られており [18][19][20]、聴空間知覚においても、空間のある位置に注意を払うことによって、音源定位のバイアスが引き起こされる場合のあることが報告されている [21]。また、視覚的注意空間と聴覚的注意空間が結合する場合のあることが示されており [31]、視覚的注意により音空間知覚に影響を及ぼす可能性は充分考えられる。本研究においても、ベクション知覚時に、注目点として提示した視覚刺激が自分自身と同じ方向に動くように知覚されるため、ベクション方向側への注意が払われた可能性がある。この注意のバイアスにより、ベクション方向側の音空間の処理感度が向上し、結果的に音像定位のずれが見られなかったのではないかと考えられる。

音像定位のずれが正中面より視覚刺激の運動方向側に生じた理由として、片側の音空間が圧縮して表現されたことによる影響も一因として挙げられる。Teramoto ら [32] の研究によると、直線等加速度自己運動の場合、前進方向の自己運動時にのみ音像定位の偏移が生じる。Teramoto らは、前進方向への自己運動時には、進行方向側の音空間が圧縮して脳内に表現され、そのため前進方向側のみに音像定位の偏移が生じたと考察した。本実験においても、ベクション知覚と平衡感覚刺激という2つの自己運動情報の統合により、ベクション方向とは反対側の空間のみに音空間の「圧縮」が生じたかも知れない。ただし、Teramoto らの研究では、音空間の圧縮現象が前進方向側に、即ち、刺激の提示方向側で見られた。これに対して、本研究では音像定位のずれが自己運動の方向とは反対側のみに生じた。また、前進方向の場合と違って、音像を自己運動の方向



とは反対側にシフトして定位した。この理由についてははっきりしてないが、少なくとも、左右方向への自己運動の場合に関しては、自己運動の方向とは反対側の音空間が何らかの変容を引き起こしやすくなると言える。左右方向の場合は、自分から遠ざかる方向への音空間の「膨張」として脳内に表現されている可能性はないだろうか。

音空間知覚の偏位が正中面より片側のみに生じる理由として、片側の視空間の圧縮による影響も考えられる。Rossら[33]は、正中面を基準として左右の網膜位置に視覚刺激を提示し、視覚的定位誤差を調べた。その結果、サッケードの目標方向にて定位ずれが生じることが示唆された。この現象は「視空間の圧縮 (compression of visual space)」と呼ばれ、空間的非対称性の性質を持つことを示す[34][35]。その後の研究により、この空間定位の歪みは、運動刺激の前方の空間が後方よりも強く影響を受けること、また、サッケードが生じていない場合においても生起すること[36]が明らかとなった。本研究においても、ベクション知覚と平衡感覚刺激の統合により、ベクション方向とは反対側の視空間が変容して知覚された可能性が考えられる。ただし、本研究では、平衡感覚刺激が提示される場合に、なるべく視線や身体軸を変えないように教示した。そのため、注視点を固視した場合や注視点の表示をなくし平衡感覚刺激を提示して身体軸が傾く場合に、微小な眼球運動は生じうるもののサッケードを引き起こすような大幅な眼球運動は発生してないと考えられる。また、先行研究の「視空間の圧縮」とは異なり、本研究では音像を自己運動の方向とは反対側に偏移して定位した。可能性として、今回用いた音像定位の測定法が視空間へのマッピングであったため、自己運動の方向とは反対方向側の視空間が「膨張」され、音像定位がこの「膨張」方向へと引っ張られたかも知れない。これらの議論については大変興味深く、今後更なる検討が必要であろう。

## 5 まとめ

ベクション感覚と平衡感覚刺激といった複数の刺激の並存下において、音像定位がどのような性質を持つのかについて調べた。その結果、2つの感覚刺激が並存する場合のみ、音像定位のシフトという現象が生じることが分かった。また、このような音像定位のずれは、主にベクション方向と反対側の正中矢状面の片側に生じることを示した。

## 謝辞

本研究は文科省科研費補助金特別推進研究「マルチモーダル感覚情報の時空間統合 (19001004)」の助成

による。また、査読者(匿名)から、実験結果に対する視覚情報の影響の可能性に関し有益なコメントをいただいたことに感謝する。

## 参考文献

- [1] Jens Blauert: Spatial Hearing- The psychophysics of human sound localization; The MIT Press, (1996).
- [2] F. Asano, Y. Suzuki and T. Sone: Role of spectral cues in the median plane localization; The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 88, Issue 1, pp. 159-168 (1990).
- [3] B. Clark and A. Graybiel: The effect of angular acceleration on sound localization: the audiogravic illusion; The Journal of Psychology, Vol. 28, No. 1, pp. 235-244 (1949).
- [4] G. Lester and R. Morant: Apparent sound displacement during vestibular stimulation; The American Journal of Psychology, Vol. 83, No. 4, pp. 554-566 (1970).
- [5] J. Lewald and H.-O. Karnath: Vestibular influence on human auditory space perception; Journal of Neurophysiology, Vol. 84, No. 2, pp. 1107-1111 (2000).
- [6] A. Graybiel and J. I. Niven: The effect of a change in direction of resultant force on sound localization: the audiogravic illusion; Journal of Experimental Psychology, Vol. 42, No. 4, pp. 227-230 (1951).
- [7] J. R. Lackner: The role of posture in sound localization; Quarterly Journal of Experimental Psychology, Vol. 26, No. 2, pp. 235-251 (1974).
- [8] M. H. Fischer and A. E. Kornmüller: Optokinetic ausgelöste Bewegungswahrnehmungen und optokinischer Nystagmus; Journal für Psychologie und Neurologie (Leipzig), Vol. 41, pp. 273-308 (1930).
- [9] H. Wallach: The role of head movements and vestibular and visual cues in sound localization; Journal Exp Psychol, Vol. 27, pp. 339-368 (1940).
- [10] 崔正烈, 寺本渉, 坂本修一, 岩谷幸雄, 鈴木陽一: ベクションが頭部前後における水平方向の音像定位に及ぼす影響; ヒューマンインタフェース学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 41-48 (2012).
- [11] W. R. Thurlow and T. P. Kerr: Effect of a moving visual environment on localization of sound; The American Journal of Psychology, Vol. 83, No. 1, pp. 112-118 (1970).
- [12] L. R. Harris, M. Jenkin, and D. C. Zikowitz: Vestibular cues and virtual environments: choosing the magnitude of the vestibular cue; IEEE Virtual Reality Conference, pp. 229-236 (1999).
- [13] M. Edwards, S. O'Mahony, M. R. Ibbotson, S. Kohlhaagen: Vestibular stimulation affects optic-flow sensitivity; Perception, Vol. 39, No. 10, pp. 1303-1310 (2010).
- [14] J. Schulte-Pelkum, B. E. Riecke, H. H. Bühlhoff: Vibrational cues enhance believability of egomotion simulation; International Multisensory Research Forum (IMRF 2004).
- [15] B. E. Riecke, J. Schulte-Pelkum, F. Caniard, H. H. Bühlhoff: Towards lean and elegant self-motion simulation in virtual reality; IEEE Virtual Reality, pp. 131-138 (2005).
- [16] <http://www.opengl.org>.



- [17] G. Rhodes: Auditory attention and the representation of spatial information; *Percept Psychophys*, Vol. 42, No. 1, pp. 1-14 (1987).
- [18] M. A. Bedard, F. El. Massioui, B. Pillon, J. L. Nandrino: Time for reorienting of attention: a premotor hypothesis of the underlying mechanism; *Neuropsychologia*. Vol. 31, No. 3, pp. 241-249 (1993).
- [19] L. M. Ward: Supramodal and modality-specific mechanisms for stimulus-driven shifts of auditory and visual attention; *Canadian Journal of Experimental Psychology*, Vol. 48, No. 2, pp. 242-259 (1994).
- [20] O. Hikosaka, S. Miyauchi, H. Takeichi, S. Shimojo: Multimodal spatial attention visualized by motion illusion; *Attention and Performance XVI*, Cambridge, MIT Press, pp. 237-261 (1996).
- [21] 北島律之, 山下由己男: 視覚的注意が音源定位に及ぼす影響; *心理學研究*, Vol. 69, No. 6, pp. 459-467 (1999).
- [22] J. Ross, M. C. Morrone, D. C. Burr: Compression of visual space before saccades; *Nature*, No. 386, pp. 598-601 (1997).
- [23] J. Leung, D. Alais and S. Carlile: Compression of auditory space during rapid head turns; *Proc Natl Acad Sci USA*, Vol. 105, No. 17, pp. 6492-6497 (2008).
- [24] 崔正烈, 寺本渉, 坂本修一, 岩谷幸雄, 鈴木陽一: 視覚誘導性自己運動知覚が音像定位に及ぼす影響; *日本バーチャルリアリティ学会第15回大会論文集*, pp. 22-25 (2010).
- [25] D. N. Lee and E. Aronson: Visual proprioceptive control of standing in human infants; *Perception and Psychophysics*, Vol. 15, No. 3, pp. 529-532 (1974).
- [26] J. R. Lishman, D. N. Lee: The autonomy of visual kinaesthesia; *Perception*, Vol. 2, No. 3, pp. 287-294 (1973).
- [27] S. Palmisano, B. J. Gillam, S. G. Blackburn: Global-perspective jitter improves vection in central vision; *Perception*, Vol. 29, No. 1, pp. 57-67 (2000).
- [28] S. Palmisano, D. Burke, R. S. Allison: Coherent perspective jitter induces visual illusions of self-motion; *Perception*, Vol. 32, No. 1, pp. 97-110 (2003).
- [29] 中村信次: 自己運動知覚における視覚運動の同期性の効果について; *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol. 108, No. 182, pp. 15-18 (2008).
- [30] 中村信次: 視覚誘導性自己運動知覚に及ぼす付加的刺激振動の効果—眼球運動条件下での検討; *日本音響学会聴覚研究会*, Vol. 40, No. 2, pp. 49-52 (2010).
- [31] M. J. Farah, A. B. Wong, M. A. Monheit, L. A. Morrow: Parietallobe mechanisms of spatial attention: Modality-specific or supramodal? ; *Neuropsychologia*, Vol. 27, No. 4, pp. 461-470 (1989).
- [32] W. Teramoto, S. Sakamoto, F. Furune, J. Gyoba, Y. Suzuki: Compression of Auditory Space during Forward Self-Motion; *PLoS ONE*, Vol. 7, No. 6, e39402 (2012).
- [33] J. Ross, M. C. Morrone & D. C. Burr: Compression of visual space before saccades; *Nature*, No. 386, pp. 598-601 (1997).
- [34] K. Matsumiya, K. Uchikawa: Apparent size of an object remains uncompressed during presaccadic compression of visual space; *Vision Research* No. 41, pp. 3039-3050 (2001).
- [35] K. Matsumiya, K. Uchikawa: The role of presaccadic compression of visual space in spatial remapping across saccadic eye movements; *Vision Research* No. 43, pp. 1969-1981 (2003).
- [36] 横井健司, 渡邊克巳: 視覚運動刺激による空間定位の時空間的歪み; *電子情報通信学会技術研究報告*, *ヒューマン情報処理*, Vol. 106, No. 143, pp. 7-12 (2006).

(2012年9月3日受付)

[著者紹介]

崔正烈 (正会員)



2004年九州大学大学院システム情報科学府博士後期課程修了。同年同大学COE 研究員・ユーザーサイエンス機構研究員を経て、2009年より東北大学電気通信研究所研究員。現在に至る。人工現実感環境生成法、人の感性・生体・心理特性に関する研究に従事。ヒューマンインタフェース学会、バーチャルリアリティ学会等の会員。博士(工学)。

寺島英明 (学生会員)



2011年東北大学工学部情報知能システム総合学科卒業。現在、東北大学大学院情報科学研究科博士課程前期2年の課程在学中。マルチモーダル知覚などの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会学生会員。

坂本修一 (正会員)



1997年東北大学大学院情報科学研究科修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。2000年から東北大学電気通信研究所。現在、同所准教授。博士(工学)。単語知覚過程に関する研究に従事するほか、近年ではマルチモーダル感覚情報処理過程に関する研究にも注力。日本音響学会、電子情報通信学会、日本バーチャルリアリティ学会、日本感性工学会等の学会会員。

岩谷幸雄 (正会員)



東北学院大学工学部教授。博士(情報科学)1993年東北大学博士課程前期課程修了。秋田大学助手、講師、東北大学准教授を経て現職。音空間のレンダリングと知覚過程の解明に従事。

鈴木陽一 (正会員)



1981年東北大学大学院工学研究科博士課程修了。現在、東北大学電気通信研究所教授。3次元音空間知覚と聴覚ディスプレイ、マルチモーダル知覚などの研究に従事。日本VR学会フェロー、評議員、米国音響学会フェロー。著書に音響学入門(コロナ社)など。工博。