

回転運動する聴覚刺激が回転ベクション感覚に及ぼす影響

The effect of rotationally moving sound on the circular vection

崔 正烈* 柳生 寛幸*† 坂本 修一*† 岩谷 幸雄‡ 鈴木 陽一*†

Zhenglie Cui Hiroyuki Yagyū Shuichi Sakamoto Yukio Iwaya Yōiti Suzuki

1 はじめに

自己身体軸の偏位である自己運動の知覚は、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り、視覚誘導性自己運動感覚（ベクション [1]）が引き起こされることがある。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な感覚が生じる。つまり、実際の運動を伴わず、視覚刺激のみの操作で身体の移動感覚を誘発することが可能である。このため、ベクションによる自己運動感覚は、遊園地のアトラクションやドライビングシミュレーターなど、バーチャルリアリティ（Virtual Reality: VR）環境における自己運動感覚の提示に広く利用されている。

自己運動感覚の知覚過程は、一般的には、ある感覚モダリティ単体でのみ知覚されるのではなく、複数の感覚器からの情報を統合して知覚するマルチモーダルな感覚統合過程である。そのため、視覚情報の提示によって生起されるベクションを知覚することが、ほかの感覚モダリティの空間知覚に何らかの影響を及ぼす可能性が考えられ、従来から数多くの議論がなされている。

例えば、Wallach[2] は、聴取者に自分自身の身体軸を中心に回転する回転ベクションを与え、音像定位がどのように変化するかを調べた。その結果、ベクションの影響により音像定位に偏移が生じ、正中面の目の高さの位置に提示した音源が頭上にシフトして知覚される傾向のあることを示した。Carpenter ら [3] は、前庭感覚情報とベクションを生起する視覚情報の 2 種類の運動情報を同時入力した場合に、どのような運動方向が統合して知覚されるのかを調べた。その結果、前庭系の加速度感知が一定以上になるまでは、視覚情報によって生起される運動方向の方が優位であることを示した。Harris ら [4] 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、前庭刺激を加えることによって自己運動感覚が影響を受け、移動距離が実際よりおよそ 2 倍程度長く見積られることを明らかにした。Edwards ら [5] 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。崔ら [6] の、ベクション感覚と平衡感覚刺激並存下の音像定位を調べた研究からも、2 つの感覚刺激が並存する場合には、音像定位のずれという現象が顕著に表れることが示された。

一方、視覚刺激の提示によって生起される自己運動感覚ほどではないが、聴覚モダリティ単体によっても、自己運動感覚が生じることが報告されている。Lackner[7] は、実験参加者の身体軸周りを回転する実音源及びバーチャル音源を用いて自己運動感覚の有無を調べた。その結果、回転する音場によって、自己身体の回転感覚（回転聴覚ベクション）が生起される場合のあることを示した。この研究では、実音源とバーチャル音源のいずれの条件においても、回転する音像の移動方向と反対方向への回転聴覚ベクションが報告された。Sakamoto らの研究報告 [8] から、移動音像情報の提示によって、聴覚刺激の移動方向とは反対方向の自己運動が知覚される場合のあることが示された。

前述のように、ベクションを知覚することがほかの感覚モダリティの空間知覚に影響を及ぼすなど、入力された複数の感覚情報の時間的・空間的統合が行われるのであれば、運動する聴覚刺激の提示によっても、ベクション知覚そのものに何らかの影響を与える可能性が充分考えられる。近年、視聴覚刺激の提示を伴う VR システムが多いことを考えると、聴覚刺激の提示によるベクション知覚への影響を明らかにすることは、視聴覚に訴えて自己運動感覚を提示するための VR システムの構築に役立つと言えよう。そこで、本研究においては、回転する聴覚刺激が視覚によって誘導される自己回転運動感覚（回転ベクション）にどのような影響を及ぼすのかについて検討を行った。

聴覚刺激が自己運動感覚に及ぼす影響については、いくつかの議論がなされている。齋藤ら [9] は、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を用いて左右方向に運動するランダムドットを提示し、同時にバーチャル音像を提示した場合の自己運動の方向について調べた。そ

*東北大学電気通信研究所

†東北大学大学院情報科学研究科

‡東北学院大学工学部

の結果、知覚される自己運動の方向は、ベクション方向と聴覚刺激の移動成分がベクトル合成する方向を示した。この結果は、視覚と聴覚それぞれに起因する自己運動方向が統合された可能性を表している。清水ら[10]は、反復回転する広視野視覚刺激と、それに同期して音像が移動する聴覚刺激を同時に提示した場合の重心動揺への誘導効果を調べ、聴覚刺激の付加による重心動揺への誘導効果は、視聴覚刺激の同時提示によって単純に加算されるわけではなく、視聴覚刺激間に相互作用が存在し、その相乗的な誘導効果の大きさは同時に提示される視覚刺激の画角に依存し、視覚刺激の提示画角が広い場合に重心動揺への誘導効果も増加することを示した。

本研究では、広視野を回転運動する視覚刺激を用いて回転ベクションを生起させ、視覚刺激の運動と同位相、若しくは逆位相で回転運動する聴覚刺激の提示によって、知覚されるベクションの強度がどのように変化するかを調べる。そのために、視覚刺激の移動半径と同様の複数の音像を用いて回転音場を生成し、視覚刺激と同位相あるいは逆位相で音刺激を提示した。予想としては、ベクション方向と同方向に回転する聴覚刺激を提示した場合は、同じ方向に動く 2 つの刺激成分のベクトル合成によりベクション強度が強くなり[11][12]、逆に、反対方向への聴覚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、ベクション感覚の程度が弱まるのではないかと考えられる。実験 1 では、視覚刺激の回転速度と等速で音場を動かした場合、実験 2 では、音場速度への依存関係の有無を調べるために、音場の回転速度を視覚刺激の回転速度の 2 倍、あるいは半分に変えた場合について調べ、両者を比較した。

2 実験 1-等速回転運動する聴覚刺激の影響

2.1 目的

視覚刺激と同位相あるいは逆位相で等速回転運動する聴覚刺激が、回転ベクションにどのような影響を及ぼすのかについて検討した。

2.2 実験システム

回転ベクションを生成するための視覚刺激として、Fig.1 の右に示すランダム・ドット・パターンを用いた。被験者に比較的強い回転ベクション感覚を提示するために、周辺視野を広く覆う湾曲スクリーンを用い、背面から 2 台のプロジェクタ (Panasonic: PT-D5700L) を経由して、ランダム・ドット・パターンを提示した。1 つのドットは 0.75×0.75 deg の大きさであり、色は緑

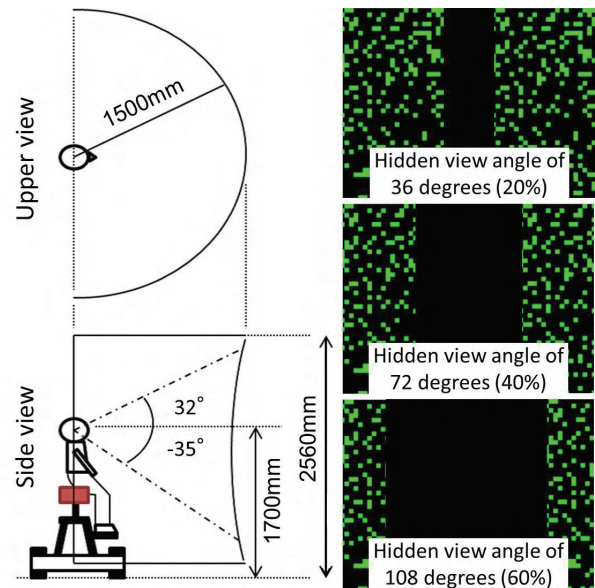


Fig. 1: Experimental environment.

(65 cd/m^2)、密度は 20 % に設定した。湾曲スクリーンは、半径 1500 mm、高さ 2560 mm の半円柱型であり、このスクリーンの全面にランダムドットを提示した。被験者の観察位置 (両目の中心) は、湾曲スクリーンの円弧の中心、床から高さ 1700 mm であり、方位角は 180 deg、仰角は $-35 \sim 32$ deg である (Fig.1 参照)。

湾曲スクリーンへ提示された映像の歪みを補正するために、オーサリングツール EON Professional[13] を用いて、スクリーン形状の逆特性を持った映像を生成し投影した。回転ベクションの強度をコントロールするために、ランダム・ドット・パターンの正中面から外側にかけて、隠蔽範囲が 20 %、40 %、60 % の 3 つの黒塗りの視覚刺激 (Fig.1 の右側参照) を用意した。隠蔽範囲を被験者の観察位置からの視野角に換算すると、36, 72, 108 deg になる。

聴覚刺激の提示には、頭部運動感応型聴覚ディスプレイ (Simulation environment For Acoustic 3DSoftware: SiFASo)[14] を用いた。SiFASo は、頭外を回転移動する聴覚刺激を模擬し、ヘッドホンで提示することができる。本研究では、この SiFASo を EON Professional のプラグインとして用い、ヘッドホン (Sennheiser HDA200) で音刺激を提示した。音刺激は、半径 1500 mm で測定した被験者ごとの頭部伝達関数を畳み込んだレッドノイズを、仰角 0 deg の位置に、被験者の正面を 0 deg、真後を 180 deg として、方位角 120 deg 間隔で 3 点配置した。3 点から放射されるレッドノイズは音圧が異なり、1 点の音圧は他の 2 点の音圧よりも 14 dB 高い。1 点の音圧レベルが高くなるように背景音群の振幅に変化を与えることにより、全方向から同程度の音圧レベルで提示した場合よりも、聴覚刺激の回転を知覚し

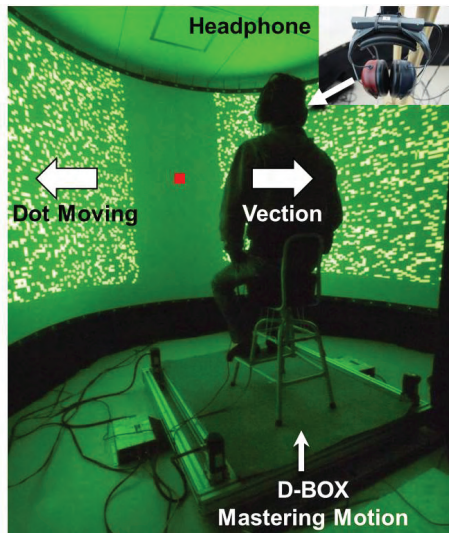


Fig. 2: Experimental environment.

やすい音場を実現した [15]. 被験者の頭部中心位置での A 特性音圧レベルは 70 dB とした.

実験が長時間に及び被験者への負担が増加することを避けるために、ベクションの潜時を短くすべく、先行研究 [16] を参考に、鉛直方向に 15 Hz の正弦波振動を与えた. 振動は、モーションプラットフォーム (D-BOX Technologies: D-BOX) を用い、実験開始から終了まで与え続けた. D-BOX と実験の様子を Fig.2 に示す.

2.3 実験方法

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い注視点を注目するように教示した. 視覚刺激は、被験者を中心に右回りの方向に、角速度 30 deg/s で回転させた. 聴覚刺激は、視覚刺激の回転方向に対し、同位相 (Dynamic(same)), 逆位相 (Dynamic(opposite)), 静止状態 (Static) と音なし (No sound) の 4 条件を設けた. 視覚刺激の 3 条件と聴覚刺激の 4 条件の組み合わせ計 12 条件を 3 回ずつ、合計 36 試行をランダムな順番で実施した.

回転ベクションの強度は、参照刺激ありのマグニチュード推定法 (ME 法) を用いて測定した. 実験に先立って、標準刺激として映像の隠蔽画角が 36 deg の視覚刺激を音なしで 120 秒間提示し、このときの自己運動の強度を 100 として記憶するように教示した. 視聴覚刺激は、自己運動を知覚するまで提示し続け、被験者がマウス中央のボタンをクリックして回転ベクションの生起を報告した後も、更に 120 秒間提示した. 被験者の作業課題は、回転ベクションの生起を申告してから 5 秒に 1 回、当該時刻での自己運動の強度を口頭で報告することであった. 報告は、事前に観察した標

準刺激のベクション強度 100 を基準に、0 以上の整数で回答させた. 回答回数は、回転ベクション生起後の 120 秒間行い、計 24 回となる. 回答を促すために、固視点の色は 5 秒に 1 回のタイミングで、赤から白色に 1 秒間変化するように設定した.

各試行の間には 2 分以上の休憩時間を設け、各被験者が 1 日に連続して行った実験時間は、最大 18 試行以内とした. 測定項目として、回転ベクションの強度を記録した. 実験参加者は、正常な視覚 (矯正含む) と聴覚を有する男性大学生 5 名である.

2.4 実験結果

被験者全員の、3 つの聴覚刺激条件と音なし条件とのベクション強度の差分を算出し、隠蔽視野角ごとに Fig.3~5 に示す. 横軸は回答回数を、縦軸はベクション強度の差分を表す.

グラフから、回転する聴覚刺激を提示した場合 (同位相条件と逆位相条件) は、静止条件の場合と比べて、ベクション強度が強くなる傾向が読み取れる. この傾向は、映像の隠蔽画角が大きいほど (Fig.5 の隠蔽画角 108 deg 条件) 顕著に表れる傾向にある. また、グラフから読み取る限り、映像の隠蔽画角が狭いほど (Fig.3 の隠蔽画角 36 deg 条件と Fig.4 の隠蔽画角 76 deg 条件) 逆位相条件でのベクション強度が強くなり、映像の隠蔽画角が広いほど (Fig.5 の隠蔽画角 108 deg 条件) 同位相条件でのベクション強度がより強くなるようにも読み取れる.

3 つの視覚刺激条件と 4 つの聴覚刺激条件、試行回数を被験者内要因として、3 要因の分散分析を行った. 分析の結果、視覚条件の主効果 ($F(2, 8) = 19.372, p < .001$), 試行回数的主効果 ($F(23, 92) = 8.280, p < .001$) とともに有意差が認められた. 聴覚刺激条件の主効果には有意傾向が見られた ($F(3, 12) = 2.638, p < .10$). 単純主効果における多重比較の結果、映像の隠蔽画角が大きいほど、回転ベクションの強度が小さくなること

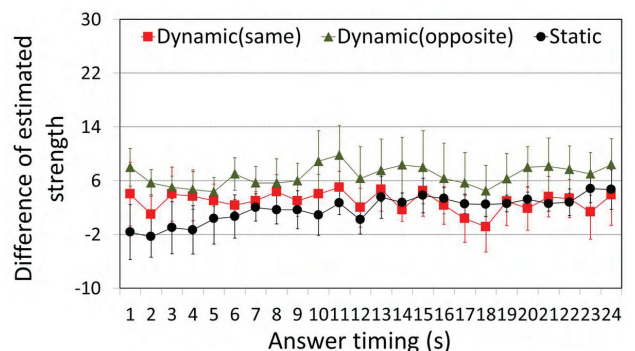


Fig. 3: Mean strength of circular vection (36 deg).

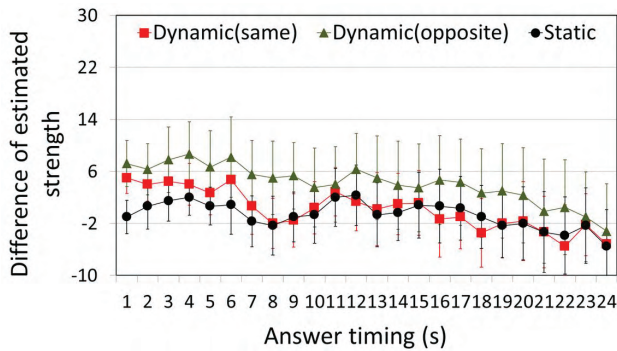


Fig. 4: Mean strength of circularvection (72 deg).

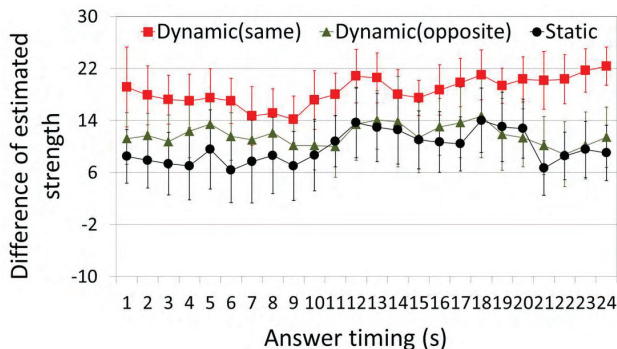


Fig. 5: Mean strength of circularvection (108 deg).

が分かった。この結果は、映像の提示範囲が広いほど、回転ベクションの強度が高まることを示している [17]。

視覚条件と映像隠蔽画角の交互作用にも有意差が認められた ($F(6, 24) = 2.635, p < .05$)。視覚条件と映像隠蔽画角の交互作用における単純主効果の結果、映像隠蔽画角 108 deg 条件に限って、聴覚刺激条件間に有意差が認められた ($F(3, 36) = 6.467, p < .005$)。多重比較の結果、同位相及び逆位相条件の場合は、音なし条件の場合と比べて、ベクション強度が有意に高かった。同位相及び逆位相条件と Static 条件の間には、有意差が認められなかった。

2.5 考察

映像の隠蔽画角が狭く (36 deg と 72 deg)、ベクション強度が比較的強い場合は、聴覚刺激の如何に関係なく、回転ベクションの強度が変化しないことが分かった。また、映像隠蔽画角が 108 deg の場合に限って、動く音場を聴覚刺激として付加することにより、回転ベクションの強度が増加することが分かった。ただし、聴覚刺激の回転方向は、ベクション強度に影響を及ぼさなかった。これらから、ベクション強度への影響は、聴覚刺激の運動成分の有無が重要であり、運動する聴覚刺激さえ存在すれば、回転方向に関係なく、視覚情報と相互作用すると考えられる。ただし、この場合の視

聴覚間の相互作用は、視覚情報と聴覚情報の各運動方向への単純なベクトル加算によるものではない。

3 実験 2-聴覚刺激の相対的な速度差の効果

3.1 目的

実験 1 の結果からは、映像隠蔽画角が 108 deg の場合に限って、回転する聴覚刺激がベクション強度に影響を及ぼすことが認められた。また、聴覚刺激の回転方向は、ベクション強度に影響を及ぼさなかった。しかし、これらの結果は、視覚刺激と聴覚刺激が等速の場合であり、両者に相対的な速度差が生じる条件では、聴覚刺激そのものの強度が変わり得るため、聴覚刺激が回転ベクションに及ぼす影響も変わる可能性が考えられる。そこで、実験 2 においては、実験 1 で聴覚刺激の付加効果が表れた映像隠蔽画角 108 deg 条件に絞って、聴覚刺激と視覚刺激の回転速度に相対的な速度差を設け、回転ベクションの強度がどのように変化するかを調べた。

3.2 実験方法

実験方法は、実験 1 と同様であった。ただし、聴覚刺激は、同位相と逆位相の 2 条件を用意し、移動速度は、視覚刺激と等速 (30 deg/s)、2 倍速 (60 deg/s)、0.5 倍速 (15 deg/s) の計 3 条件を設けた。聴覚刺激の 2 方向と回転速度の 3 条件の組み合わせ、計 6 条件を 3 回ずつ、合計 18 試行をランダムな順番で実施した。被験者は、正常な視覚 (矯正含む) と聴覚を有する男性大学生 6 名 (そのうち 5 名は実験 1 と同じ被験者) であった。

3.3 結果と考察

被験者全員の、回転ベクションの平均強度を計算し、Fig.6 に示す。グラフから、回転音場の移動速度が変わっても、ベクション強度はそれほど変化しないことが読み取れる。

聴覚刺激の回転方向と速度条件で 2 要因の分散分析を行った。その結果、回転方向の主効果 ($(F(1, 5) = 0.991, n.s.)$ 、速度条件の主効果 ($(F(2, 10) = 1.011, n.s.)$) ともに有意差が認められなかった。即ち、回転音場の視覚刺激との相対速度が 0.5 倍から 2 倍の範囲内では、回転方向に関係なく、聴覚刺激の移動速度の相対的な変化が、回転ベクションの強度に有意な影響を及ぼさないことが分かった。このことは、回転する聴覚刺激の提示によるベクション強度への影響は、聴覚刺激そのものの存在が重要であり、聴覚刺激の回転方向はベクション強度にそれほど影響を及ぼさないこと、

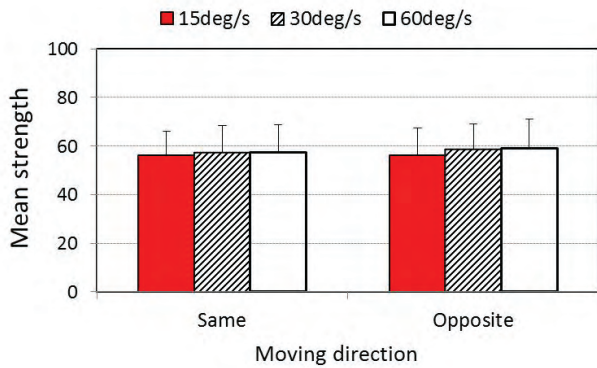


Fig. 6: Mean estimated strength of circular vection.

また、聴覚刺激の強度自体もベクション強度に影響を及ぼさないことを意味する。

ただし、今回の実験では、聴覚刺激の回転速度を視覚刺激の運動速度の2倍まで調べており、より大きな速度差が生じる場合は、聴覚刺激の強度がより強くなることが予想される。この場合、聴覚モダリティそのものの信頼性が高まり、信頼性の高い方に重み付け（イベント統合）[18]が発生しやすくなり、聴覚刺激の回転方向や回転速度がベクション強度へ何らかの影響を及ぼす可能性があるかも知れない。これらについては、今後更なる検討が必要となる。

4 総合的考察

映像隠蔽画角が108 degの場合に限って、動く音場を聴覚刺激として付加することにより、回転ベクションの強度が強まることが分かった。ベクション強度への影響は、聴覚刺激の運動成分の有無が重要であり、回転する聴覚刺激さえ存在すれば、その方向に関係なく、視覚情報と相互作用すると考えられる。また、回転音場の速度を変えた場合においても、これらベクション強度の増幅効果が保たれることが分かった。視覚刺激と聴覚刺激の間に多少の不整合が存在したとしても、これら視聴覚間の相互作用にそれほど影響を及ぼさないことを示す。

清水ら[10]は、ロール方向を回転運動する視聴覚刺激を提示し、重心動揺への誘導効果を調べた。その結果、視覚刺激の提示画角が広い条件(130deg)に限って、視覚刺激と同位相の聴覚刺激を提示した場合の重心動揺が若干大きくなると報告した。即ち、回転聴覚刺激による自己運動への影響は、視覚刺激の強度そのものが強いほど起こる可能性のあることを意味する。これは、本研究の実験結果とは若干異なる。本研究では、映像隠蔽画角が大きい場合、即ち、ベクション強度が比較的小さい条件に限って、回転する聴覚刺激の効果が表れた。

しかし、清水らの研究では視覚刺激を操作して重心動揺を誘起させたが、ベクションを生起する条件を統制したわけではない。即ち、視覚刺激の提示により、視覚刺激の運動方向とは反対方向の自己運動を生起した条件は設けていない。また、今回の実験結果が清水らの実験結果と異なる原因として、彼らの実験で使用した聴覚刺激の回転方向がロール方向であり、移動範囲も102 degほどの視野範囲内であったことが挙げられる。本研究で使用した聴覚刺激は、鉛直方向を回転軸とするヨー回転であったため、後頭部のような視野外も回転運動した。可能性として、視野外を回転運動する聴覚刺激は、視覚対象物との結びつきが難しく、視野内の聴覚刺激とは異なった付加効果を与えたことが考えられる。

Palmisanoら[19]は、前方への自己運動と同時に上下左右へ付加的ランダムな視点運動成分（ジター）を加えた場合、自己運動感覚の増強が生じると報告した。中村ら[20]の研究によると、ジターによる自己運動感覚の増強は、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運動時においても生起する。本研究においても、聴覚刺激の運動方向に関係なく、運動する聴覚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。

実験1の結果から、統計的な有意差は得られなかったものの、グラフから読み取る限り、映像の隠蔽画角が広いほど（Fig.5の隠蔽画角108 deg条件）、同位相の聴覚刺激を付加した場合のベクション強度が逆位相の場合よりも強くなるようにも読み取れる。Ernstら[18]が提案した最適重みづけ（optimal weighting）仮説によると、我々のマルチモーダル情報処理過程においては、複数のイベントに対して、信頼性の高い方に重み付けをして最適な統合を行うと考えられる。可能性として、聴覚刺激の回転速度を更に向上させ、聴覚モダリティそのものの信頼性を強め、聴覚モダリティへの重み付けが発生しやすくなった場合は、単純なジター的な役割ではなく、視覚刺激と同位相で運動する聴覚刺激の影響が更に顕著に表れるなど、回転運動する聴覚刺激がベクション感覚に異なった影響を及ぼす可能性はないだろうか。これらについては、今後更なる検討を行ってみたい。

5 まとめ

回転する聴覚刺激が、回転ベクションにどのような影響を及ぼすのかについて検討を行った。その結果、音場の動く方向や速度に関係なく、動く音場を聴覚刺激として提示することにより、回転ベクション感覚が増加

することが示された。また、この現象は、回転ベクションが比較的弱い場合に限って生じることが示された。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究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。

参考文献

- [1] M. H. Fischer and A. E. Kornmüller, “Optokinetic ausgelöste Bewegungswahrnehmungen und opto-kinetischer Nystagmus”, *Journal für Psychologie und Neurologie (Leipzig)*, Vol. 41, pp. 273-308 (1930).
- [2] H. Wallach, “The role of head movements and vestibular and visual cues in sound localization”, *Journal Exp Psychol*, Vol. 27, pp. 339-368 (1940).
- [3] T. R. Carpenter-Smith, R. G. Futamura, D. E. Parker, “Intertial acceleration as a measure of linear vection: An alternative to magnitude estimation”, *Perception and Psychophysics*, Vol. 57, No. 1, pp. 35-42 (1995).
- [4] L. R. Harris, M. Jenkin, and D. C. Zikovitz, “Vestibular cues and virtual environments: choosing the magnitude of the vestibular cue”, *IEEE Virtual Reality Conference*, pp. 229-236 (1999).
- [5] M. Edwards, S. O'Mahony, M. R. Ibbotson, S. Kohlhausen, “Vestibular stimulation affects optic-flow sensitivity”, *Perception*, Vol. 39, No. 10, pp. 1303-1310 (2010).
- [6] 崔正烈, 寺島英明, 坂本修一, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, “ベクション感覚と平衡感覚刺激並存下の音像定位”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 18, No. 1, pp. 27-35 (2013).
- [7] J. R. Lackner, “Induction of illusory self-rotation and nystagmus by a rotating sound-field”, *Aviation space and environmental medicine*, Vol. 48, No. 2, pp. 129-131 (1977).
- [8] S. Sakamoto, Y. Osada, Y. Suzuki, J. Gyoba, “The effects of linearly moving sound images on self-motion perception”, *Acoustic Science & Technology*, Vol. 25, No. 1, pp. 100-102 (2004).
- [9] 齋藤英之, 坂本修一, 鈴木陽一, 行場次郎, “視聴覚刺激の移動方向が自己運動方向知覚に与える影響”, *電子情報通信学会技術研究報告, HIP, ヒューマン情報処理*, Vol. 104, No. 526, pp. 31-36 (2004).
- [10] 清水俊宏, 矢野澄男, “広視野視覚刺激と聴覚刺激の同期提示による重心動揺への誘導効果”, *電子情報通信学会論文誌 A*, Vol. J83-A, No. 7, pp. 912-919 (2000).
- [11] J. Schulte-Pelkum, B. E. Riecke, H. H. Bühlhoff, “Vibrational cues enhance believability of ego-motion simulation”, *International Multisensory Research Forum (IMRF 2004)*.
- [12] 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).
- [13] EON Professional: <http://www.eonreality.com/productsprofessional.html>.
- [14] Y. Iwaya, Y. Suzuki, “Rendering moving sound with the doppler effect in sound space”, *Applied Acoustics*, No. 68, pp. 916-922 (2007).
- [15] Y. Iwaya, “Sound space perception in virtual environments with head movements”, *Proc. IW-PASH*, (2009).
- [16] J. Schulte-Pelkum, B. E. Riecke, H. H. Bühlhoff, “Vibrational cues enhance believability of ego-motion simulation”, *International Multisensory Research Forum (IMRF)*, (2004).
- [17] F. Lestienne, J. Soechting, A. Berthoz, “Postural readjustments induced by linear motion of visual scenes”, *Experimental Brain Research*, Vol. 28, pp. 363-84 (1977).
- [18] M. O. Ernst, M. S. Banks, “Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion”, *Nature*, Vol. 415, No. 6870, pp. 429-433 (2002).
- [19] 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).
- [20] 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).