

回転する聴覚刺激が回転ベクション感覚に及ぼす影響

崔 正烈^{†a)} (正員) 柳生 寛幸[†] (学生員)
坂本 修一[†] (正員) 岩谷 幸雄^{††} (正員)
鈴木 陽一[†] (正員)

The Effect of Rotationally Moving Sound on the Circular Vection

Zhenglie CUI^{†a)}, Member, Hiroyuki YAGYU[†], Student Member, Shuichi SAKAMOTO[†], Yukio IWAYA^{††}, and Yōiti SUZUKI[†], Members

[†] 東北大学電気通信研究所, 仙台市

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., Sendai-shi, 980-8577 Japan

^{††} 東北学院大学, 多賀城市

Tohoku Gakuin Univ., Tagajo-shi, 985-8537 Japan

a) E-mail: sai@ais.riec.tohoku.ac.jp

あらまし 本研究では、回転する聴覚刺激が回転ベクション感覚にどのような影響を及ぼすのかについて検討を行った。そのために、視覚刺激の回転半径と同じ距離に合成した複数のバーチャル音源を用いて回転音場を生成し、視覚刺激の回転方向と同位相あるいは逆位相で音刺激を提示した場合、自己回転運動感覚の強度と時間特性がどのように変化するかを調べた。その結果、音場の動く方向や速度に関係なく、運動する聴覚刺激を提示することにより、自己回転運動感覚が強まることを示した。

キーワード 回転音像, 回転聴覚刺激, ベクション, 回転ベクション

1. ま え が き

自己運動を伴う外界空間の知覚は、ある感覚モダリティ単体でのみ知覚されるのではなく、一般的には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、視覚によって生起される自己運動感覚であ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きた。

例えば、Wallach [1] 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た場合の音像定位を調べ、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。Harris ら [2] は、前進方向へのベクションと同方向の前庭刺激を与えた場合の空間知覚を調べ、ベクションを知覚することにより移動距離を実際より 2 倍ほど長

く見積ることを示した。Edwards ら [3] の研究からは、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が示された。崔ら [4] 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、二つの感覚刺激が並存する場合には、音像定位のずれが顕著に表れることが示された。

前述のように、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、ベクション知覚がほかの感覚モダリティの空間知覚に影響を及ぼすのとは逆に、運動する聴覚刺激の提示によって、ベクション知覚そのものにも何らかの影響を与える可能性が充分考えられる。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バーチャルリアリティシステムの構築に役立つと言えよう。しかし、聴覚刺激の自己運動感覚への影響については、自己運動の方向の変容を調べた研究 [5] や、重心動揺の誘導効果を調べた研究 [6] など、幾つかの議論がなされているものの、聴覚刺激の付加によって自己運動の度合い (ベクション強度) がどのように変わるのかについては明らかにされていない。

そこで、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かについて検討した。そのために、複数のバーチャル音源を用いて回転音場を生成し、視覚刺激の運動方向と同位相、若しくは逆位相で回転運動する聴覚刺激を提示した場合、ベクション強度がどのように変化するかを調べた。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 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、図 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) を経由して視覚刺激を提示した。一つのドットの大きさは $0.75 \times 0.75 \text{ deg}$ であり、色は緑 (65 cd/m^2)、密度は 20% に設定した。湾曲スクリーンは半円柱型であり、半径 1500 mm、高さは 2560 mm である。被験者の観察位置は、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 $-35 \sim 32 \text{ deg}$ である。ベクション強度をコントロールするため

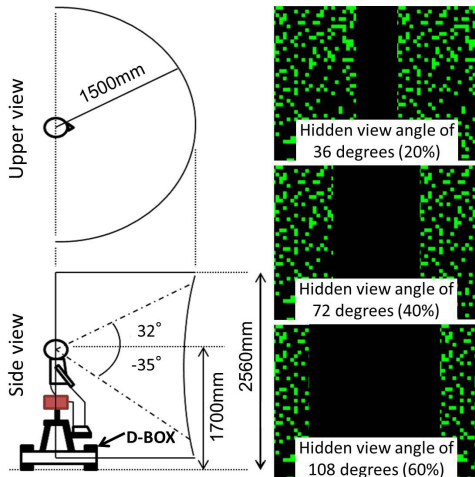


図1 実験環境と視覚刺激
Fig.1 Experimental environment and stimuli.

に、画面の正中面から外側にかけて、隠蔽範囲が20%、40%、60%の三つの黒塗りの視覚刺激を用意した。隠蔽範囲を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 3D Software: SiFASo) [7] 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。聴覚刺激としてレッドノイズを使用した。レッドノイズは、実環境での環境騒音の周波数特性に近い広帯域ノイズであり、被験者の周辺を回転する背景音の提示に適すると考えられる [8]。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 点に無相関のレッドノイズを配置し、SiFASo を用いて各音源から被験者までの頭部伝達関数を畳み込んで被験者の両耳にヘッドホンで提示した。頭部伝達関数は被験者ごとに測定したものを使用し、測定時の音源距離は 1.5 m であった。

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 点よりも 14 dB 高い。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やすい音場を実現した [8]。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。

実験が長時間に及ぶ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 [9] を参考に鉛直方向に 15 Hz の正弦波振動を、1.75 cm の振幅で与えた。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。

2.2 実験方法

被験者には、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、視覚刺激と同位相 (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、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 s 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、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 s 間提示した。被験者の作業課題は、ベクションの生起を申告してから 5 s に 1 回 (120 s で 24 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を基準に、0 以上の整数で回答させた。回答を促すために、固視点の色は 5 s に 1 回のタイミングで、赤から白色に 1 s 間変化するように設定した。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 5 名であった。

2.3 実験結果

被験者全員の、回転ベクションの平均強度を図 2 に示す。横軸は映像の隠蔽画角を、縦軸はベクション強度を表す。グラフから、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傾向が読み取れる。映像隠蔽画角 108 deg の条件について、試行回数ごとに、三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、図 3 に示す。グラフから、回転する聴覚刺激を提示した場合 (同位相と逆位相条件) のベクション強度が、静止条件の場合と比べて強くなる傾向が読み取れる。また、同位相条件でのベクション強度がより強くなる傾向も見取れる。

三つの映像隠蔽画角条件と四つの聴覚刺激条件、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 ($F(23, 92) = 8.280$, $p < .001$) ともに有意差が認められた。Ryan 法 ($p < .005$) による多重比較の結果、映像の隠蔽画角が大きいほどベクションの強度が小さくなるのが分かった。この結果は、映像の提示範囲が広いほど、

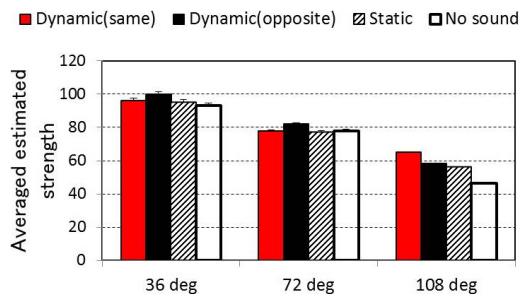


図 2 回転ベクションの平均強度

Fig. 2 Mean strength of circular vection.

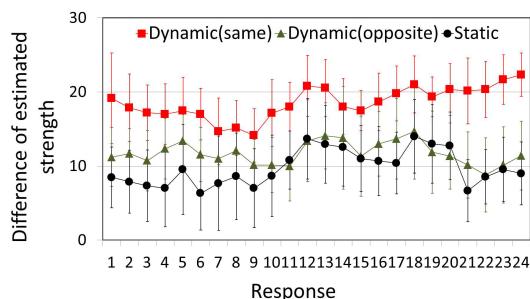


図 3 各試行ごとのベクション強度

Fig. 3 Averaged strength of circular vection of each trial.

回転ベクションの強度が高まることを示している。

聴覚刺激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 ($F(6, 24) = 2.635, p < .05$)。聴覚刺激条件と映像隠蔽画角の交互作用における単純主効果を検定した結果、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静止条件の間には、有意差が認められなかった。

2.4 考 察

映像の隠蔽画角が狭く、ベクション強度が比較的高い場合は、聴覚刺激の有無に関係なく、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、聴覚刺激を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、聴覚刺激の有無が重要であり、聴覚刺激さえ存在すれば、回転に関係なく、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



図 4 回転ベクションの平均強度

Fig. 4 Mean estimated strength of circular vection.

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

実験 1 の結果、映像隠蔽画角が 108 deg の場合、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示された。しかし、この結果は視覚刺激と聴覚刺激が等速の場合であり、両者に速度差が生じる場合は、聴覚刺激の付加効果が変化する可能性が考えられる。そこで、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、視聴覚刺激の回転速度に相対的な速度差を設けた場合のベクション強度を調べた。

3.1 実験方法

視覚刺激は実験 1 と同様であった。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、2 倍速 (60 deg/s)、0.5 倍速 (15 deg/s) の計 3 条件を設けた。被験者は、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。

3.2 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、図 4 に示す。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。すなわち、回転音場の視覚刺激との相対速度が 0.5~2 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、また、聴覚刺激の速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。

4. 総合的考察

映像隠蔽画角が 108 deg の場合に限って、回転聴覚

刺激を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。これはベクション強度、あるいは視覚刺激の信頼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ることを示している。また、回転音場の速度を変えた場合も、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。視聴覚刺激の間に多少の不整合が存在したとしても、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 [6] は、ロール方向に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 (130 deg) 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。これは、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異なるものである。

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。また、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。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、視覚対象物と結びつき難く、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 [10] 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 [11] の研究によると、ジターによる自己運動感覚の増強は、前方のみならず、上下左右方向の自己身体の運動時においても生起する。本研究でも、聴覚刺激の運動方向に関係なく、運動する聴覚刺激を付加することが、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 (図 2) から、映像の隠蔽画角が広い場合に、音刺激に付加効果が有意に表れた。Ernst ら [12] が提案した最適重み付け (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。すなわち、映像の隠蔽画角が広いほど、聴覚モダリティ (音刺激) の信頼性が相対的に大きくなった可能性が考えられる。例えば、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 (強度) 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、今後被験者を増やして、更なる検討を行っていきたい。

謝辞 本研究は、文部科学省科研費特別推進研究 (19001004)、及び科研費基盤研究 A (24240016) の助成による。

文 献

- [1] H. Wallach, "The role of head movements and vestibular and visual cues in sound localization," *J. Exp. Psychol.*, vol.27, pp.339–368, 1940.
- [2] 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.
- [3] M. Edwards, S. O'Mahony, M.R. Ibbotson, and S. Kohlhausen, "Vestibular stimulation affects optic-flow sensitivity," *Perception*, vol.39, no.10, pp.1303–1310, 2010.
- [4] 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.
- [5] 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," *信学技報*, vol.104, no.526, pp.31–36, 2004.
- [6] 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," *信学論 (A)*, vol.J83-A, no.7, pp.912–919, July 2000.
- [7] Y. Iwaya and Y. Suzuki, "Rendering moving sound with the doppler effect in sound space," *Applied Acoustics*, vol.68, pp.916–922, 2007.
- [8] Y. Iwaya, "Sound space perception in virtual environments with head movements," *Proc. IWPASH*, 2009.
- [9] J. Schulte-Pelkum, B.E. Riecke, and H.H. Bühlhoff, "Vibrational cues enhance believability of ego-motion simulation," *International Multisensory Research Forum (IMRF)*, 2004.
- [10] S. Palmisano, B.J. Gillam, and S.G. Blackburn, "Global-perspective jitter improvesvection in central vision," *Perception*, vol.29, no.1, pp.57–67, 2000.
- [11] 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," *信学技報*, vol.108, no.182, pp.15–18, 2008.
- [12] M.O. Ernst and M.S. Banks, "Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion," *Nature*, vol.415, no.6870, pp.429–433, 2002.

(平成 25 年 9 月 9 日受付, 11 月 1 日再受付)