

聴覚情報により誘起される自己運動感覚に関する一考察

An analytical investigation of self-motion perception induced by auditory information

坂本修一¹⁾, 長田祐介¹⁾, 鈴木陽一¹⁾, 行場次朗²⁾

Shuichi SAKAMOTO, Yusuke OSADA, Yōiti SUZUKI and Jiro GYOBA

1) 東北大学 電気通信研究所 / 大学院情報科学研究科

(〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)

2) 東北大学大学院文学研究科

(〒980-8576 宮城県仙台市青葉区川内)

Abstract: Self-motion perception (vection) is well known as a multi-modal information process influenced by visual, postural, and somatic information. In these kinds of information, the effect of visual information is quite large, because visual information provides a frame of spatial information. As auditory information also includes spatial information, it is highly likely that self-motion perception is influenced by auditory information as well as visual information. In this study, we generated moving sound images by using eight loudspeakers and investigated the relationship between auditory information and self-motion perception. Results showed that auditory information also induced self-motion. Moreover asymmetry between backward self-motion and forward self-motion was observed.

Key Words: auditory stimulation, self-motion perception, vection, body sway, forward-backward asymmetry

1. はじめに

我々人間の情報処理過程の多くは、複数の感覚器官から得られた情報を統合的に処理するマルチモーダル情報処理過程である。自己運動感覚もその一つであり、視覚、平行感覚、体性感覚の統合処理過程として知られている。しかし、自己運動感覚においては、これら3つの感覚情報が必ずしも全て必要というわけではない。特に視覚情報が自己運動感覚に及ぼす影響は、他の感覚情報からの影響に比べ非常に大きい。このことを如実に表している現象として、視覚情報のみにより自己運動感覚が誘起される視覚誘導性自己運動知覚すなわちベクションという現象が示されている。これは、外界と自己との空間情報を含んでいる視覚情報が、自己運動知覚において最も有力な情報源であることを示しているといえよう。

このように、視覚、平行感覚、体性感覚が自己運動感覚に与える影響については、既に様々な知見が得られているが、他の感覚情報が自己運動感覚に及ぼす影響についてはほとんど研究がなされていない。特に、視覚同様、自己と外部空間との空間的関係を入手できる聴覚と自己運動感覚との間には何らかの関係があると考えられるが、これを示す研究は非常に少なく^[1]、十分な知見が得られているとは言いがたい。今後、自己運動感覚までもを模擬した高精度バーチャルリアリティシステムを構築する上では、この知見は非常に有用であると考えられる。

そこで本研究では、聴覚と自己運動感覚との関係に着目し、聴覚情報のみを与えた場合においても自己運動感覚が誘起されるか否かを実験的に検討した。さらに、視覚におけるベクションとの差異を分析し、視聴覚情報が自己運動感覚に果たす役割について考察したので報告する。

2. 実験方法

本研究では、被験者に視覚情報を与えない状態で等速直線運動する刺激音を提示し、知覚された自己運動感覚を評定尺度法により回答させた。あわせて、知覚された自己運動の方向を前後左右斜め8方向および左右回転2方向の計10個の選択肢から回答させた。さらに、実験中の重心動揺を測定することにより、自己運動感覚の生起に伴う姿勢変動の有無を調べた。

被験者は健康な成人男女7名(男性5名,女性2名)である。実験は簡易無響室で行った。このような実験を行う場合、被験者が実際に自分自身が動くかもしれないという感覚を持った状態で実験を行うことが非常に重要となる。実験系に関する情報を事前に与えてしまうと、このような感覚を被験者に持たせることが困難となる。そこで、実験を通して実験系に関する情報は与えず、さらに入室前から実験中、退室までを通してアイマスクを着用させ、実験の手がかりとなる視覚情報を遮断した。

本研究に用いた実験系を図1および図2に示す。8つの

スピーカ (Diatone DS-7) を被験者から 1 m の距離で等間隔に配置した。直線運動する刺激音を提示するため、音像方向は各スピーカから提示する刺激音の振幅の時間包絡を連続的に変化させることで、また音像までの距離は実際の音の距離減衰を模擬することで、仮想的に等速直線運動する音像を作成した。図 2 に示す電動リフトは、実験開始前及び終了後は足場と接しない位置に、実験中は重心の動揺を測定するため足場を固定する位置に設定し、実験開始時及び終了時に電動リフトをそれらの位置まで上下させた。実験開始直後の電動リフトで足場を固定する瞬間と、実験終了直後の電動リフトを下降させる瞬間は、電動リフトの上下動に伴い被験者の足場がぐらつくこととなり、被験者に上下方向の平衡感覚・体性感覚刺激が与えられる。このことで、被験者に実験中にも足場が動く可能性を誘起させ、より自己運動感覚が生じやすい状態にすることができると考えた。

刺激音として 2 種類の無相関なピンクノイズ (サンプリング周波数 32 kHz) を用い、各スピーカから単独提示した場合にスピーカから 1 m の距離において等価騒音レベル (L_{Aeq}) が 80 dB になるよう校正した。音像の運動方向は被験者の前後、後前、左右、右左の 4 種類で、音像の運動速度は 13.3 cm/s と 6.7 cm/s の 2 種類とした。音像が前後へ移動する場合を例として、移動音像の動きについて説明する。実験開始直後には、図 1 における SP3 と SP7 のそれぞれから、2 種類の無相関ピンクノイズが提示される。電動リフトが上昇し被験者足下の足場をぐらつかせると同時に、それぞれのピンクノイズが SP7 SP6 SP5, SP3 SP4 SP5 へと等速度で移動する。実験時間の 30 秒経過後、音像が停止し実験が終了する。なお、音像運動時の実験結果との比較のため、音像静止時、無音時における実験も行った。

被験者から得られたデータは、主観評価、客観評価の 2 種類である。主観評価には 0~4 の 5 段階の評定尺度を用いた。評定尺度評価においては、事前に運動方向が前後で速度が 13.3 cm/s の音像を提示し、その音像の動きが、静止音像に対して被験者のみが自己運動した時に発生したと想定させ、その時の自己運動の大きさを 4 (最大) と評価させた。また、自己運動感覚が全く生じなかった場合を 0 と評価させた。一方、客観評価には重心動揺計 (NEC EB1101) を使用して測定された被験者の前後方向および左右方向の重心動揺波形振幅の標準偏差を用いた。なお、これ以降この値を動揺偏差と呼ぶ。

実験条件は、音像運動条件 8 種類 (音像運動方向条件 4 種類 × 音像速度条件 2 種類)、音像静止条件、無音条件の計 10 条件で、各条件について 2 回の試行を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 音像の移動方向と自己運動感覚の方向に関する検討

表 1 に、移動音像の方向と移動速度を変化させたときの、知覚された自己運動の頻度の変化を示す。表中の条件に示

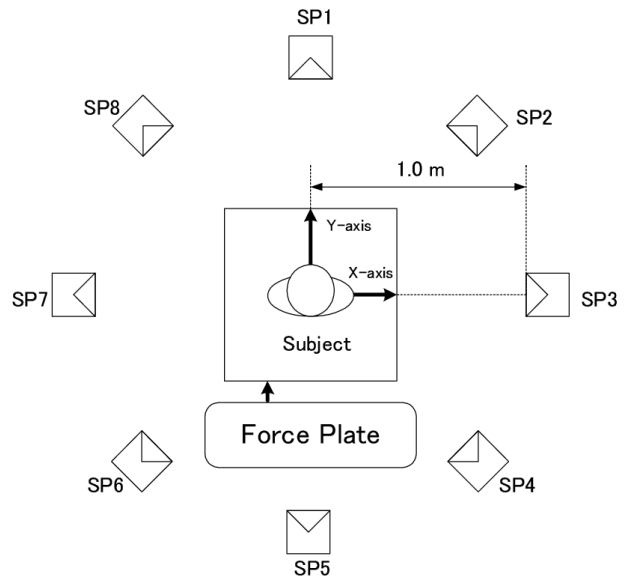


図 1 実験系の平面図及びスピーカの配置

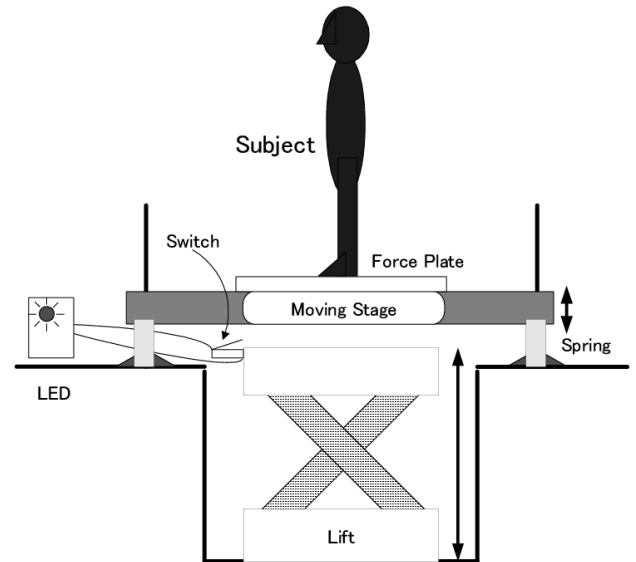


図 2 実験系の断面図及び電動リフトの配置

した「前」、「左」、「後」、「右」は音像の到来方向を示し、それぞれ「前後」、「左右」、「後前」、「右左」に音像が移動した場合を表している。また、灰色に示した部分は、知覚された自己運動方向が移動音像の方向と逆、もしくは逆の成分を含むことを示しており、音像を基準とした自己運動が誘起されている場合と考えられる。表を見ると、移動音像が存在する場合いずれかの方向に自己運動を知覚した回数が多くなっているのに比べ、無音もしくは音像静止条件では自己運動が知覚されなかった回数が多くなっている。さらに、自己運動が知覚された場合は、音像の移動方向とは逆方向に自己運動を知覚した回数が多くなっている。そこでまず、移動音像の有無が自己運動の知覚の有無に影響を与えているかを検討するために、移動音像の各方向において²分析を行った。その結果、全ての方向において、移動音像が存在する場合は、自己運動を知覚

表 1 知覚された自己運動方向の頻度 (全被験者の試行合計で示す)(単位: 回)

		知覚された自己運動の方向										自己運動 感覚なし
		前	左前	左	左後	後	右後	右	右前	左 回転	右 回転	
条件: 音像速度 (cm/s)	前: 13.3	3	2			1	1	1	1			5
	前: 6.7	6	1		1	1		1		1		3
	左: 13.3			7	1					2		4
	左: 6.7		1	6				1		3	1	2
	後: 13.3		1		3	6	1					3
	後: 6.7	1		1		9						3
	右: 13.3		1					5	2		2	4
	右: 6.7			1	1		2	2	3		3	2
	音像静止	2				2		1		1		8
	無音	1						1				12

した回数が有意に大きいという結果が得られた (前: $\chi^2_{(1)} = 5.14, p < .05$. 左: $\chi^2_{(1)} = 9.14, p < .01$. 後: $\chi^2_{(1)} = 9.14, p < .01$. 右: $\chi^2_{(1)} = 9.14, p < .01$). 一方, 無音条件においては, 自己運動知覚が無いという回答が有意に大きかった ($\chi^2_{(1)} = 7.14, p < .01$). 次に, 音像の各移動方向において, どの方向に自己運動が知覚されているかを残差分析で調べた結果, 音像の移動方向が前 後の場合は前方向の自己運動, 左 右の場合は左及び左回転方向の自己運動, 後 前の場合は後方向の自己運動, 右 左の場合は右, 右前及び右回転方向の自己運動が有意に多いという結果が得られた ($p < .05$). これらの結果は, 音像の移動方向に合わせた自己運動感覚が誘起されているということを示している. すなわち, 聴覚情報によっても自己運動感覚が誘起されるという予想を裏付ける結果となった.

3.2 音像の移動方向と自己運動の大きさに関する検討

図 3 に, 各条件における被験者の自己運動の評定尺度値を示す. 横軸に付記された文字は, 表 1 と同様に実験条件を示している. また, 音像移動条件 (Front, Back, Left, Right) では色の濃淡で音像の移動速度を表し, 濃色が 13.3 cm/s, 淡色が 6.7 cm/s の評定尺度値を示す. 図 3 から, 移動音像提示時には全ての被験者において自己運動が多く知覚される傾向が示された. 一方, 無音条件においては, subj. 5 以外はまったく自己運動が知覚されなかった. 詳細に分析するために, 前節と同様に音像の運動の有無 (音像移動条件, 音像静止条件, 無音条件) を要因とした 1 要因繰り返し測度計画に基づく分散分析を行ったところ, 音像の運動の有無による主効果が有意であった ($F_{(2,12)} = 4.06, p < .05$). さらに Tukey の HSD 検定 ($p < .05$) による多重比較検定の結果, 音像移動条件と無音条件間に有意な評定値の差が見られた. このことから, 聴覚情報が提示されることにより, 自己運動感覚が誘起されているという知見が裏付けられた. なお, 音像静止条件においても自己運動が知覚されている結果が得られているが, これは, 静止時の頭部の自然な動きにより音像の移動が発生し, この移動により自己運動が誘起されたとも考えられる.

図 3 では, 音像の移動が前 後の場合に誘起される自己運動に比べ後 前の場合に誘起された自己運動が大きい傾向が見られている. そこでこれを詳細に検討するために, 知覚された自己運動の方向も考慮し, 移動音像と逆方向 (斜めを含む) に自己運動が知覚された場合に "+1", 同方向 (斜めを含む) に知覚された場合に "-1", 音像の移動方向と垂直方向に知覚された場合に "0" を掛け合わせ, 前後の音像運動方向と音像移動速度を要因とした 2 要因繰り返し測度計画に基づく分散分析を行った. その結果, 音像運動方向の主効果のみが有意 ($F_{(1,6)} = 6.46, p < .05$) であった. これは, 音像運動方向が前 後の場合に比べ, 後 前の場合のほうが自己運動感覚が大きいことを示している.

自己運動感覚の前後非対称性は視覚のベクシオンにおいても見られる. しかし, 視覚では後進運動を示す視覚刺激よりも前進運動を示す視覚刺激において自己運動感覚

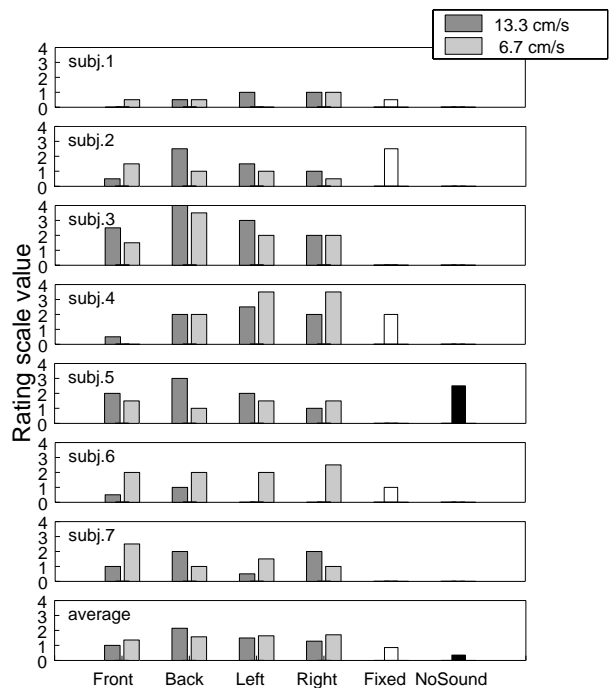


図 3 自己運動感覚の評定尺度値

が大きくなること示されている^[2]。これは、前進を示すような中心から外側へ移動する情報に対する感度の方が、後進を示すような外側から中心へと移動する情報に対する感度よりも高いためであると考えられている。一方、今回の実験で得られた結果はこれとは逆の傾向であった。このことは、視覚と聴覚による自己運動の情報が相補的に働いている可能性を示す興味深い結果ともいえる。

3.3 重心動揺データを用いた検討

図4, 図5に各条件において被験者から得られた重心動揺の動揺偏差を被験者前後方向, 左右方向に分けて示す。横軸に付記された文字, 及び音像移動条件(Front, Back, Left, Right)の色の濃淡は図3と同様である。図4, 図5から、いずれの条件においてもある程度の重心動揺が発生していることが示されているが、条件間の差異は小さい。音像の有無が重心動揺に与える影響を検討するために、音像の有無を要因とした1要因繰り返し測度計画に基づく分散分析を行ったが、被験者の前後方向, 左右方向の動揺偏差のいずれにおいても、音像の有無による有意な差異は得られなかった。

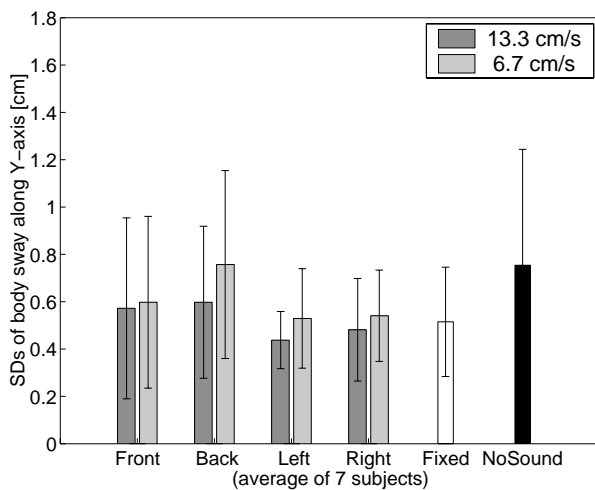


図4 被験者前後方向の動揺偏差

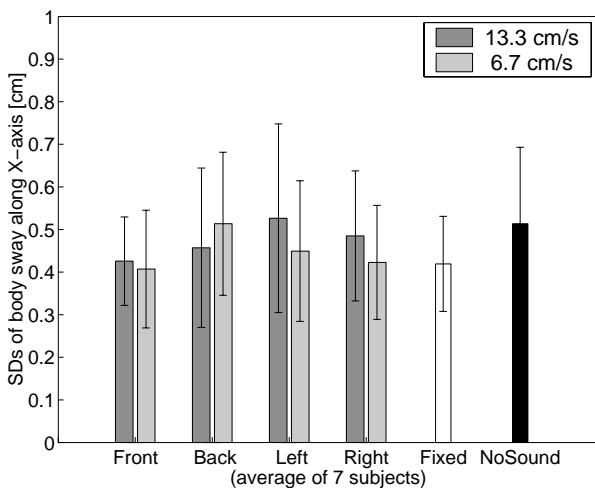


図5 被験者左右方向の動揺偏差

視覚のベクシオンでは、自己運動感覚の生起に伴い重心動揺の大きさが増大する結果が示されている^[3]。このことは、視覚による自己運動感覚の方が聴覚による自己運動感覚に比べ大きいことを示唆しているように思われる。

4. まとめ

本研究では、視覚情報と同様に空間情報を含む聴覚情報と自己運動感覚の相互作用に着目し、複数スピーカで模擬した移動音像を提示した際に自己運動感覚が誘起されるか否かについて検討した。その結果、移動音像の移動方向に基づいた自己運動感覚が知覚されるという結果が得られ、聴覚情報によっても自己運動感覚が誘起されることが示された。さらに誘起された自己運動感覚の大きさについて分析したところ、音像の移動方向が前後の際に誘起される自己運動感覚よりも、後前の際に誘起される自己運動感覚の方が大きいという前後非対称性が見られた。これは、視覚におけるベクシオンとは逆の前後非対称性であり、このことから自己運動知覚においては視覚情報と聴覚情報が相補的に作用している可能性を示しているといえる。この点についてはさらに詳細な検討を進めてゆきたい。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費補助金(基盤(C)(2): 課題番号 12650359, 基盤(B)(2): 課題番号 14350193)の補助を受けた。

参考文献

- [1]例えば Lackner, J. R. : Induction of illusory self-rotation and nystagmus by a rotating sound-field, Aviation, Space and Environmental Medicine 48, pp. 129-131, 1977.
- [2]Reinhardt-Rutland, A. H. : Asymmetry in forward and backward vection, Perceptual and motor Skills 54, pp. 870, 1982.
- [3]例えば竹田仰, 金子照之: 広視野映像が重心動揺に及ぼす影響, TV 学会誌 50, pp.1935-1940, 1996