

反射音が自己運動感覚に与える影響の考察

小鷹 研理[†] 尾形 哲也[†] 奥乃 博[†]

[†] 京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻

1. はじめに

自己運動感覚とは、自己が移動している時に得られる感覚であり、視覚や体性感覚に適当な刺激を与えることによって誘導されることが知られている¹⁾。しかし、聴覚を扱った研究例はわずかであり²⁾、他のモダリティーほど十分な知見が得られているとは言えない。聴覚と自己運動感覚の関わりを明らかにすることは、複数のモダリティーを統合した高度なVRシステム構築のうえで不可欠であり、同時に、人間の認知機構の解明にも貢献すると考えられる。

我々は、不動物からの反射音情報が自己運動感覚に大きな影響を与えると考える。視覚によって誘導される自己運動感覚 (vection) の研究では、局所的な視覚刺激よりも周辺的な刺激に対して、より大きな自己運動感覚が生起することが知られている¹⁾。これは、実世界において周辺部に位置する背景 (山や建物) が不動物であるために、それらの動きが相対的な自己の移動と解釈されやすいことが原因の一つとされている。自己の移動時に聴覚に入力される情報にも、直接音以外に不動物からの情報である反射音が多く含まれおり、不動物からの反射音情報によって、音源の局所的な動きに左右されない移動の手がかりが生まれることが期待できる。

本稿では、不動物からの反射音が自己運動感覚に与える影響について知覚実験を行ったので報告する。

2. 反射音による自己の移動に関する手がかり

音源から何らかの物体に反射した後到来する反射音は、直接音と比べて到達距離が長いので、聴覚には直接音とそれ自身の遅延 (かつ減衰) したものが入力される。これらが合成されると相互の干渉により、遅延時間によって決まる特定の周波数の倍数成分が強調される。そのため、反射物に対する距離が変化すると、それに伴い強調される周波数成分も移動する。このことは、壁などの反射物と自己との距離の変化を、強調される周波数の変化として知覚できることを示しており、我々は、この変化が聴覚によって誘導される自己運動感覚の重要な手がかりになると考える。実際、こうした自己と反射物との距離の変化によってピッチが上下する効果はカラーレーション (coloration) と呼ばれており、熟練した視覚障害者は、自己と障害物との距離を判断する際に、この効果を手がかりとしていることが報告されている (反射物との距離が約 2m 以内から知覚される)³⁾。また、音圧の大きな音源が高速で通り過ぎる時に生じるピッチ変化も、主に地面反射音に起因する同様の効果であり、健常者にも反射音を強調することで不動物との距離関係を認識できると考える。

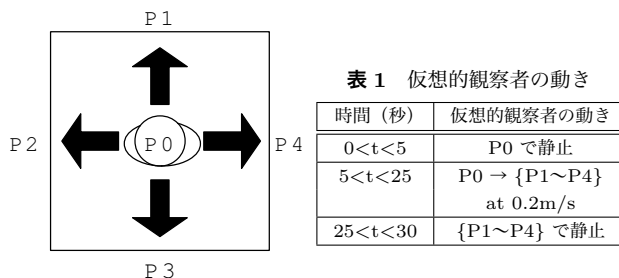


図1 仮想的観察者の初期位置

表1 仮想的観察者の動き

時間 (秒)	仮想的観察者の動き
$0 < t < 5$	P0 で静止
$5 < t < 25$	$P0 \rightarrow \{P1 \sim P4\}$ at 0.2m/s
$25 < t < 30$	$\{P1 \sim P4\}$ で静止

3. 実験概要

3.1 音像生成システム

実験で用いる刺激音作成にあたり、空間的な音像をシミュレートする MacOSX 上のプログラムを *max/msp/jitter* に よって作成した。このプログラムは、バイノーラル信号を出力とし、ヘッドホンによる聴取を対象としている。ある時刻における観察者の速度・位置と音源の位置から、音源から観察者までの到達距離と入射角が計算される。到達距離に従って音圧と遅延時間を線形に増減・伸縮させ、入射角から決定される HRTF (頭部伝達関数) を畳み込み、出力とする。反射音は、反射点を計算した後、同様の手法で一次反射音までシミュレートして求めた。ここで、名古屋大学板倉研究室が公開している HRTF⁴⁾ を用いた。

3.2 実験手法

本研究では、以下に示す 2 つの実験を行った。被験者は、それぞれ 8 人ずつである。

3.2.1 実験 1

被験者は、暗室で椅子に着席し目を閉じた状態で、ヘッドホンによって 30 秒間の刺激音を 10 秒おきに繰り返して呈示される。図 1 に、刺激音においてシミュレートされている仮想空間の状況を示す。

前後左右に仮想壁が配置され、ピンクノイズである音源は常に仮想的観察者 (以下、「観察者」) の位置にある。すなわち、観察者が移動すれば音源は同時に移動し、観察者が静止すれば音源も静止する。壁の位置は中心からそれぞれ 4m の位置にあり、30 秒の間に表 1 に従った動きをする。なお、この実験では純粋に直接音と反射音の干渉の効果を調べるために、距離による音圧の減衰を行っていない。

マグニチュード推定法による評価を用いる。実験前に被験者に対して図 1 と表 1 を見せ、壁の位置に対する空間的イメージをあらかじめ持たせる。これは、不動物の存在を知らせることで、音像の変化を自己の移動と解釈させるためである。その後、移動方向が $P0 \rightarrow P1$ 、反射率が 0.2 である刺激音を呈示し、被験者自身が前の壁の方向に進んでいると想定させる。各刺激音に対する被験者の課題は、この基準音によ

An investigation about effects of reflected sounds on self-motion perception by Kenri Kodaka, Tetsuya Ogata, and Hiroshi G. Okuno (Kyoto Univ.)

表 2 判断された方向の総数と自己運動感覚の大きさ平均 (実験 1)

		解答された方向/magnitude average							
		前		後		左		右	
移動方向 × 反射率	前:0.2	7	2.4	6	2.2	2	0.1	0	0.0
	前:0.01	10	2.7	2	0.7	1	0.3	2	0.5
	前:0.0001	2	0.2	2	0.1	2	0.4	0	0.0
	後:0.2	3	1.1	8	2.2	3	0.9	2	0.2
	後:0.01	5	1.0	7	2.1	1	0.3	1	0.2
	後:0.0001	2	0.1	4	0.9	2	0.3	0	0.0
	左:0.2	0	0.0	0	0.0	13	6.1	2	0.5
	左:0.01	3	0.7	6	2.1	5	1.4	2	0.5
	左:0.0001	2	0.3	4	0.6	0	0.0	0	0.0
	右:0.2	0	0.0	0	0.0	1	0.2	15	6.3
	右:0.01	2	0.5	8	1.8	0	0.0	5	1.4
	右:0.0001	2	0.2	5	0.7	0	0.0	2	0.2
∞ m		3	0.3	0	0.0	3	0.5	1	0.1

表 3 判断された方向の総数と自己運動感覚の大きさ平均 (実験 2)

		解答された方向/magnitude average							
		前		後		左		右	
移動方向 × 壁の 近さ (m)	前:0	10	3.1	4	0.3	0	0.0	1	0.4
	前:1	7	1.0	3	0.7	2	0.4	1	0.1
	前:2	3	0.4	6	0.9	1	0.0	0	0.0
	後:0	9	3.1	4	0.9	1	0.2	2	0.4
	後:1	6	0.9	8	2.2	1	0.1	0	0.0
	後:2	5	0.6	2	0.3	2	0.3	0	0.0
	左:0	0	0.0	3	0.8	12	3.7	1	0.0
	左:1	6	0.9	5	0.4	4	0.3	0	0.0
	左:2	1	0.1	1	0.1	5	0.9	2	0.3
	右:0	0	0.0	5	1.0	1	0.3	10	2.9
	右:1	1	0.1	8	0.7	1	0.1	6	1.1
	右:2	0	0.0	7	1.1	0	0.0	2	0.3
∞ m		2	0.2	6	0.6	0	0.0	0	0.0

る自己運動感覚の大きさを 5 としたときの主観評価値 (0 以上の比例尺度) と、移動方向 (前後左右から 4 択) を解答することである。移動感覚が生じない時は大きさを 0 とし、方向は解答しない。刺激音の種類は反射率 4 種類 (0, 0.0001, 0.01, 0.2) × 移動方向 4 種類 (前後左右) の全 13 種類^{☆☆}で、各刺激音についてランダムに 2 回呈示する。

3.2.2 実験 2

実験 2 では、反射率を 1.0 に固定し、中心から各壁までの距離を可変にする。また、clipping area (音圧が最大となる範囲) を 2m とし、距離によって音圧を減衰させる。観察者の動きと音源の種類、位置、被験者の課題は実験 1 と同一である。先に呈示される基準音は壁の近さ 0m で P0 → P1 の音像とする。ここで壁の近さとは、観察者が各方向へ 4m 移動した後の、壁までの距離とする。刺激音の種類は、壁の近さ 4 種類 (∞ m, 2m, 1m, 0m) × 移動方向 4 種類の全 13 種類で、各刺激音についてランダムに 2 回呈示する。

4. 実験結果と考察

表 2, 3 に、それぞれの実験における、各条件の刺激音に対して被験者が解答した方向の総数と、自己運動感覚の主観評価値の平均を示す。表 2 より、高い反射率では、観察者の移動方向と被験者の答えた移動方向が合致する傾向にあることが分かる。また、反射率が下がると、方向合致率と主観評価値が下がり、自己運動感覚無しと解答する頻度が高くなる。

以上を詳細に解析するために、各刺激音の移動条件に対応する方向の主観評価値を測定値とし、移動方向条件 4 水

☆ 音圧の大きさは正規化している。

☆☆ 反射率 0 の刺激音は、前後左右で音像が変化しないため実質 1 種類となる。

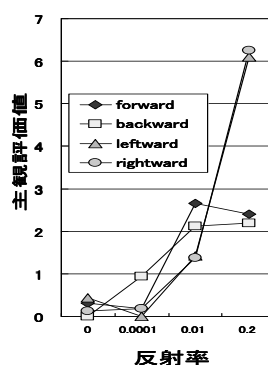


図 2 シミュレートされた方向に対する主観評価値 (実験 1)

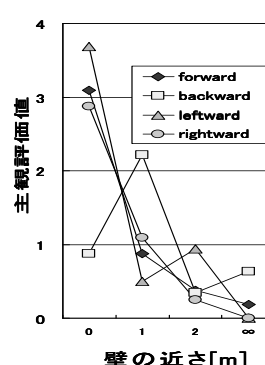


図 3 シミュレートされた方向に対する主観評価値 (実験 2)

準、反射率条件 4 水準の 2 要因分散分析 (被験者間計画) を行った。この結果、図 2 が示したように、反射率の主効果 ($F(3,21)=34.66, p<.01$) と、反射率×移動方向の交互作用 ($F(9,63)=4.94, p<.01$) に有意差が得られた。主効果により、反射を強調することによって、シミュレートされた方向に対する自己運動感覚が増大することが示された。また、交互作用は主に、左右の識別に比べて前後の識別に散らばりが見られることに起因している。両耳間時間差が生まれにくい前後の移動では、方向の手がかりが周波数特性の違いのみとなる。実験で用いた HRTF は特定の個人から測定されたものであり、頭部の形状の個人差が影響したためと考えられる。

実験 2 についても、壁の近さに関して反射率とほぼ同様のことが言える。各刺激音の移動条件に対応する方向の主観評価値を測定値とし、移動方向条件 4 水準、壁の近さ条件 4 水準の 2 要因分散分析 (被験者間計画) を行った結果、壁の近さの主効果 ($F(3,21)=18.30, p<.01$) と、壁の近さ×移動方向の交互作用 ($F(9,63)=3.69, p<.01$) に有意差が得られた。図 3 と合わせて、反射音によって自己運動感覚が生起するには、反射板との距離の近さが必要条件となることが分かった。

5. まとめ

移動によって生じる直接音と反射音の干渉を仮想的にシミュレートし、反射音の大きさと反射板の近さが自己運動感覚に与える影響を実験によって調べた。その結果、それらの要因が、シミュレートされた移動方向に対する自己運動感覚の増大に寄与することが分かった。この結果は、反射音が自己の移動における空間的認識に対して重要な役割をなす可能性を示唆している。今後は、反射音と自己運動感覚の関係について、視覚を含めた考察を行っていく予定である。

本研究の一部は、科研費 基盤 (A)No.15200015 の支援を受けた。実験に御協力頂いた研究室の皆様に感謝します。

参考文献

- 乾, 安西編: 認知科学の新展開 4 イメージと認知, pp96-102, 岩波書店
- 例えば, 鈴木他: “直線上移動仮想音源が直線上自己運動感覚に与える影響について”, 音講論集, 春, pp533-534, 2003.
- <http://staff.aist.go.jp/yoshikazu-seki/CD/CD10/manual-j.html>
- <http://www.itakura.nuee.nagoya-u.ac.jp/HRTF/>