

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	運動物体知覚に与える重力情報の影響
Title(English)	
著者(和文)	三輪拓馬
Author(English)	Takuma Miwa
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11341号, 授与年月日:2019年12月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:金子 寛彦,山口 雅浩,小池 康晴,吉村 奈津江,永井 岳大
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11341号, Conferred date:2019/12/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

博士論文

運動物体知覚に与える  
重力情報の影響

令和元年 12月

指導教員 金子寛彦 教授

提出者 東京工業大学  
大学院総合理工学研究科  
物理情報システム専攻  
三輪拓馬

# 目次

## 第 1 章：序論

1.1	はじめに	3
1.2	重力の知覚	3
1.3	運動知覚と重力方向	5
1.4	重力方向情報の統合	8
1.5	本研究の目的	8

## 第 2 章：前額平行面上の等速度知覚における重力方向情報の影響

2.1	実験 1-1 前額平行面上の等速度知覚	11
2.2	実験 1-2 前額平行面上の等速度知覚への視覚情報の影響	14
2.3	実験 1-3 姿勢変化による前額平行面上の等速度知覚と視覚情報の影響	19
2.4	実験 1 考察	27

## 第 3 章：奥行き方向の等速度知覚における重力方向情報の影響

3.1	実験 2-1 接近運動における等速度知覚	29
3.2	実験 2-2 後退運動における等速度知覚	33
3.3	実験 2 考察	35

## 第 4 章：接近運動の等速度知覚における視覚情報の影響

4.1	実験 3 方法	40
4.2	実験 3 結果	42
4.3	実験 3 考察	44

## 第 5 章：接近運動の等速度知覚における過重力環境の影響

5.1	実験 4 方法	46
4.2	実験 4 結果	49
4.3	実験 4 考察	51

## 第 6 章：総合考察

6.1	方向情報が等速度知覚に与える影響	52
6.2	重力による等速度知覚への影響	54
6.3	本研究の課題	55

第 7 章：結論	57
謝辭	58
参考文献	59
研究業績一覽	62

## 第1章 序論

### 1.1 はじめに

地球上での日常生活における様々な場面で観察される物体の運動は、全て重力の影響を受けて変化する。例えば、落下する物体は重力の影響を受けて加速する、また、投げあげられた物体は重力の影響を受けて減速し、やがて静止し、さらに下方方向に加速する。これらの現象は、地球の重力が物体に作用し、地球の中心方向に向かう加速度を生じさせるためである。したがって、日常的に観察している物体の運動を効率的に処理するためには、重力による影響を考慮する必要がある。例えば、落下運動する物体に対して予測や行動をおこなう場合、重力の影響を考慮することによって、物体を正確に固定したり、軌道を予測したりすることができる。

### 1.2 重力方向の知覚

我々人間は、様々な情報から重力情報を得ている。まず、前庭感覚である。内耳にある感覚器官であり、直線加速度を検出することができる。内耳は球形嚢と卵形嚢と呼ばれる2つの耳石器を持っている。この内部に存在する耳石が直線加速度によって傾くことで、耳石とつながっている感覚細胞に信号が送られる。したがって、前庭感覚は直接的に重力加速度を検出できる感覚器官であるが、あくまで直線加速度を検出する器官であるため、重力と運動による加速度を区別することができない。そのため、前庭感覚は他の手がかりによって調整される必要がある。

次に体性感覚である。前庭感覚と異なり、内耳のような対応する感覚器が存在するわけではなく、皮膚への圧力、筋肉や関節の状態など、主に身体における力学的な感覚情報が体性感覚である(図1)。また、内臓感覚[1]や血管からの情報[2]が重力情報の知覚に寄与するという報告もあり、これらも体性感覚に含める場合がある。前庭感覚と体性感覚は、実験をおこなう際に切り分けることが困難であるため、まとめて前庭・体性感覚として扱う場合が多く、本研究でもそのようにして扱う。

そして、視覚からも重力情報を得ることができる。視覚情報それ自体は、網膜に映る光であるため、重力情報を含んでいるわけではないが、我々が観察する実環境は重力の影響を受けているため間接的に重力情報を得ることができる。例えば、空と地面といった固有の位置関係、樹木の幹、枝、葉や家の屋根と壁といった構造情報などの視覚的文脈から重力方向を推定できることが示唆されており(図2)[3]、このような視覚シーンの方向の偏りは”Visual polarity”として知られている[4]。

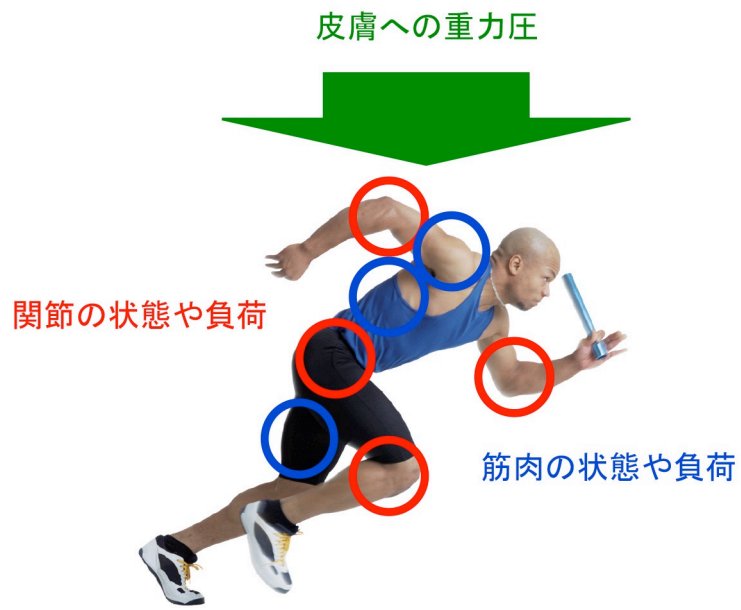


図1 体性感覚



図2 Visual polarity

### 1.3 運動知覚と重力方向

運動知覚が地球の重力による影響を考慮していることを示した研究がいくつか報告されている。例えば、重力方向は消失したターゲットの最後に見た位置の記憶に影響を与える。観察者が運動物体を観察している際、その物体が突然消失すると物体の最終位置の記憶が運動方向の前方にシフトする(図 3)[5]。この記憶位置のシフトは、上昇運動よりも落下運動で大きくなり、水平運動では、運動経路の下方にシフトすることが報告されている[6]。同様の事例が、物体の大きさによる暗黙的な重量の変化[7] や奥行き方向の運動[8]でも報告されている。

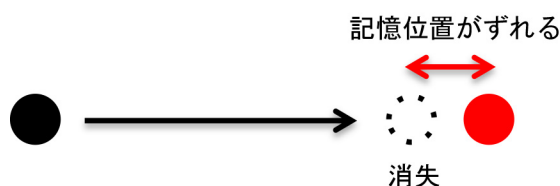


図 3 運動物体の最終位置の記憶のシフト

また、重力が運動知覚に影響を与えていることを示す証拠は、視覚情報に基づいた行動応答の研究でも見られる。Senot ら(2005)は仮想現実環境を用いて、前額平行面上で上下方向に運動する球を決められた位置で妨害する課題を用いた実験をおこなった[9]。球は加速、減速、等速のいずれかで運動した。実験結果は、下方向運動では加速、上方向運動では減速するときに成功率が高くなった。すなわち、観察者の応答タイミングが上方向運動では遅く、下方向運動では速くなることを意味している。彼らは、この観察者の応答は、「球が重力の影響をうけて運動する」という実環境での経験に基づいていると考察している。同様の事例は、実環境での実験[10,11]、前額平行面上の運動だけでなくある奥行き方向の運動においても[12]、報告されている。

上記の研究では、物理的な重力方向を実験条件としたため、人間の知覚系においては前庭感覚や体性感覚から推定される重力方向による運動知覚への影響を示しているが、既に述べたように重力方向は視覚情報からも推定することができる。Zago ら(2011)は、視覚的文脈が与える重力が、運動知覚へ影響することを報告している[13]。彼らは、バスケットコートを模した背景画像を用いて、前額平行面上で上下方向に運動する物体を観察者に妨害させる実験をおこなった(図 4)。実験の結果、背景画像内の重力方向が身体にかかる重力方向と一致しているかどうかに関わらず、背景画像内の重力方向と一致した運動方向、すなわち背景画像における上から下への運動のとき課題の成功率が高かった。この結果は運動知覚が視覚情報から推定される重力方向により変化したことを示している。

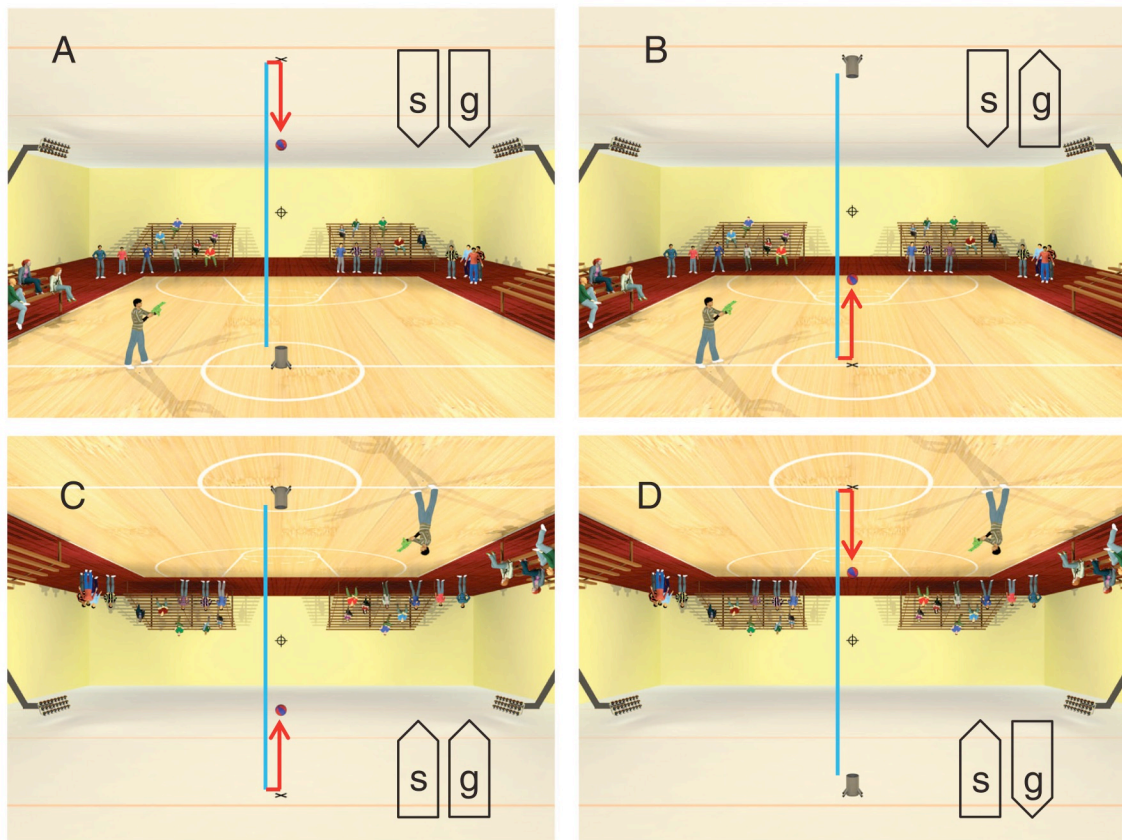


図4 Zago ら(2011)がおこなった実験[13]の刺激例(Figure.1 より引用)

しかし、以上の研究は運動物体の位置の記憶や運動物体への行動応答を指標としており、運動知覚を直接調べていなかったため、運動知覚自体が重力方向の情報によって影響を受けるかどうかは明らかであるとは言えない。我々がこれらのタスクをおこなう際には、必ずその運動物体を観察する必要があるが、その見えが重力方向情報によって影響を受けているかを調べた研究は少ない。Asano ら(2008)は、前額平行面上を上下方向、もしくは左右方向に平均速度と加速度をもった球が運動する刺激を観察者に呈示し、等速度運動に知覚される運動が持つ加速度を測定した[14]。その結果、観察者が等速度運動と知覚した運動は上方向に減速する運動、または下方向に加速する運動であった(図5)。左右方向は物理的に等速の運動を、つまり加速度0の運動を呈示したときにほぼ等速と知覚した。したがって、Asano らの結果では前額平行面上の垂直方向の運動においてバイアスが見られたということである。この研究では観察者は座って刺激を観察していたため、前額平行面の垂直軸は重力軸と一致していた。このことからこのバイアスは重力方向の情報によるものであると彼らは考察している。Calderone and Kaiser (1989)は、前額平行面上の垂直方向の運動において、加速度の弁別閾に異方性がないことを示している[15]。Asano ら(2008)と Calderone and Kaiser(1989)の研究はどちらも前額平行面上の運動刺激が加速して見えるか減速して見えるかのどちらかを観察者に応答するように求めていたが、研究の目的は異なっていた。



Asano ら(2008)は見えのオフセット，すなわち加速度ゼロと知覚される点を測定したが，Calderone and Kiser(1989)は正の加速度と負の加速度の閾値を測定した。人間の観察者は，典型的に運動加速度に対する感度が悪いことが報告されている。加速度弁別のウェーバー比は一般的に高く，刺激変調波形，周波数，呈示時間に応じて 17%から 290%の間となる。しかし，速度弁別のウェーバー比は 5%よりもよい(Zago ら(2009)のレビュー参照[16])。人間は加速度を直接的には正確に検出することができないが，連続する時間窓の速度を比較することによって加速と減速を知覚することができる[17]。したがって，加速度知覚のオフセットと感度は異なる問題であり，主観的な速度は重力の方向によって影響を受ける可能性がある。運動物体が加速しているかどうかの判断は，2点間の速度差を比較することから，知覚ではなく認知的なプロセスに基づくのではないかという意見も存在する。しかしながら，Brouwer ら(2002)は 300ms の呈示時間で運動物体の加速度弁別閾値を測定可能であることを示しており[18]，認知ではなく知覚的なプロセスに基づくことが示唆される。また，我々が普段知覚する世界は三次元の奥行きのある世界であり，奥行き方向の運動と前額平行面上の運動では網膜像の変化は異なる。例えば，前額平行面上の運動が網膜上の平行運動であるのに対して，接近運動は網膜上では拡大運動となる。しかしながら，奥行き方向の運動の速度が重力の方向によって影響を受けるかどうかは明らかではない。さらに，Asano ら(2008)は灰色の背景を使っていたため，視覚情報からの重力方向の影響は明らかにされておらず，前庭・体性感覚，Visual polarity，身体軸といった重力方向に関する情報を与える感覚信号が，運動知覚に寄与するためにどのように統合されるのかという疑問もある。

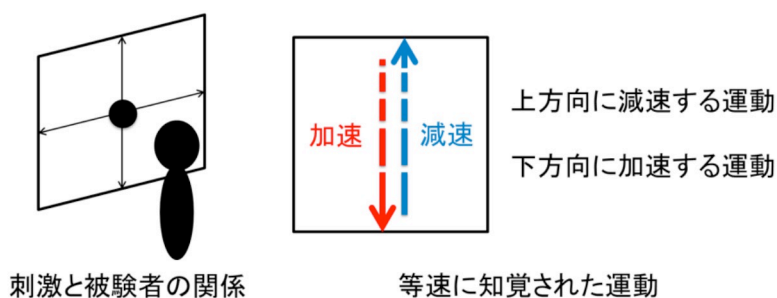


図 5 Asano ら(2008)の実験結果の要約

## 1.4 重力方向情報の統合

上述したように重力方向は様々な感覚情報から推定することができると考えられている。では、様々な感覚情報から推定される重力方向はどのように運動知覚に影響を与えるだろうか。重力方向あるいは上下方向の知覚は、前庭・体性感覚から得られる加速度信号, **Visual polarity**, 身体の長軸といった3つの感覚情報による多感覚統合処理によって決定されることが示唆されている[19-21]。例えば, Jenkin ら(2004)は, 観察者の姿勢と **Visual polarity** を操作し, 陰影のある刺激を用いて知覚される上方向を測定した[20]。その結果, 重力方向, **Visual polarity**, 身体の長軸の3つのベクトルによる重み付き線形結合によって, 知覚される上方向が決定されることが示された。線形結合の重みは, 各手がかりの信頼性に依存することが提案されている。同様の結果は主観的視覚的垂直(**SVV: subjective visual vertical**) [22-24]および進行方向の知覚(Fetsch ら (2010)のレビュー参照[25])で示されている。しかし, 重力方向の知覚が運動知覚の知覚バイアスにどのように影響するかについては明確に示されていない。考えられる説明の1つは, 上下方向知覚, **SVV**, 進行方向知覚に用いられる統合された方向情報が運動知覚のバイアスにも用いられているということである。また, 重み付き線形結合によるベクトル和は方向だけではなく大きさも変化する。身体に対する重力の大きさは, 姿勢の変化や視覚情報の変化に関わらず常に1Gであるが, ベクトル和によるこの大きさの変化が影響するかどうかについても先行研究では明らかではない。

## 1.5 本研究の目的

本研究では重力方向情報が運動知覚, とくに等速度知覚にどのような影響を与えるか明らかにすることを目的とした。まず, 等速度知覚におけるバイアスを測定するために, 前額平行面上の運動と奥行き方向の運動のそれぞれについて等速度運動に知覚される刺激の物理的加速度を測定した。様々な大きさの加速度を持つ運動物体を観察者に呈示し, 等速度と知覚する運動が持つ物理的加速度を測定し, 主観的な等速度運動点(**PSUM: point of subjective uniform motion**)を計算することにより, 運動知覚における重力方向の影響の指標とした。次に, 重力方向の情報が運動知覚へ影響する場合, 先に述べたように, 重力方向, **Visual polarity**, 身体の長軸の各信号が行動応答に影響することが示されているため, 異なる手がかりから推定される上下方向がどのように統合され, 運動知覚に影響を与えるのか調べた。

実験1では前額平行面上の運動における等速度知覚について, 前庭・体性感覚と **Visual polarity** からのそれぞれの重力方向情報とそれらの組み合わせの影響を調べた。まず, 前額平行面上を上下左右のいずれかの方向に運動する刺激を用いて, 前庭・体性感覚からの重力方向情報による運動知覚への影響を調べた。次に, **Visual polarity** による重力方向情報を持つ背景を用いて視覚からの重力方向手がかりの影響を調べた。そして, 観察者の姿勢を操作することで前庭・体性感覚と **Visual polarity** の重力方向情報の関係を変化させたと





きの等速度知覚への影響を調べた。実験 2 では奥から手前に接近する運動と手前から奥に離れていく運動の刺激を用いて前庭・体性感覚からの重力方向情報が奥行き方向の運動における等速度知覚に与える影響を調べた。実験 3 では接近運動における Visual polarity による重力方向情報を持つ背景を用いて視覚からの重力方向情報の影響を調べるとともに、観察者の姿勢を操作することで前庭・体性感覚と Visual polarity の重力方向情報の関係を変化させたときの奥行き方向の運動における等速度知覚への影響を調べた。実験 4 では遠心力発生装置を用いて重力と遠心力の合力により過重力を作り出し、身体にかかる重力の大きさが変化したときに接近運動における等速度知覚が影響を受けるか調べた。前庭・体性感覚からの重力方向情報だけではなく、身体にかかる加速度の大きさを操作することになるので実験 4 は実験 2 を拡張した実験となっている。これらの実験から、物体運動が網膜像として入力されたあと、様々な感覚からの重力方向情報がどのように影響して等速度知覚として生起するのか、そのメカニズムを考察した。

## 第 2 章 前額平行面上の等速度知覚における重力方向情報の影響

実験 1 では運動知覚における重力方向の影響、とくに加速度知覚（速度変化の知覚）におけるバイアスを測定するために、前額平行面上の運動において等速度運動に知覚される刺激の物理的加速度を測定することを第一の目的とした。様々な大きさの加速度を持つ運動物体を観察者に呈示し、等速度と知覚する運動が持つ物理的加速度を測定し、運動知覚における重力方向の影響の指標とした。第二の目的は、重力方向の情報が運動知覚へ影響する場合、その情報の起源による違いがあるか明らかにすることであった。先に述べたように、重力方向は、前庭感覚、体性感覚、視覚から得られ、行動応答による重力方向の影響を調べた研究においては、それぞれの感覚からの方向情報による影響が示されている。それらの方向情報による違いが運動知覚において見られるのか明らかにすることが目的である。

実験 1-1 では、前額平行面を上下左右のいずれかの方向に運動する刺激を用いて、前庭・体性感覚からの重力方向情報による運動知覚への影響を調べた。ここでは、背景刺激は一律な灰色であり、**Visual polarity** による重力方向情報は含まれなかった。実験 1-2 では **Visual polarity** による重力方向情報を持つ背景を用いて視覚からの重力方向情報の影響を調べた。実験 1-3 では観察者の姿勢を操作することで前庭・体性感覚と視覚の重力方向情報の関係を変化させたときの運動知覚への影響を調べた。具体的には、例えば観察者の姿勢を仰向けにすることで前額平行面と身体軸を重力軸から分離し、観察者の姿勢を横臥位にすることで身体軸のみを重力軸から分離することによりそれぞれの感覚による重力方向情報の関係を操作した。各実験における、身体方向、物理的な重力方向、背景内の重力方向、運動方向の組み合わせを表 1 に示す。例えば実験 1-3a では、観察者の身体方向に対して、重力方向は観察者のお腹から背中へ方向である。**Visual polarity** が示す下方向は身体方向を基準として上下左右の 4 方向が条件としてあり、運動方向も同様に身体方向を基準として上下左右の 4 方向があるということを表している。

表 1 実験 1 における各方向のまとめ

実験	実験条件	「下」方向			運動方向
		身体方向	重力方向	Visual polarity	
実験 1-1		↓	↓	—	↕
実験 1-2		↓	↓	↕	↕
実験 1-3a		↓	⊙	↕	↕
実験 1-3b		↓	←	↕	↕

## 2.1 実験 1-1 前額平行面上の等速度知覚

実験 1-1 では、前額平行面上を運動する対象の知覚運動における前庭・体性感覚による重力方向情報の影響を調べた。視覚刺激として、上下左右の 4 方向いずれかに運動する対象をディスプレイに呈示し、等速度と知覚する運動が持つ加速度(加速度バイアス)を測定する実験をおこなった。運動方向によって知覚的等速度運動となる運動の加速度バイアスがどのように変化するか明らかにすることが目的であった。

### 2.1.1 実験方法

#### 2.1.1.1 視覚刺激

視覚刺激は PC(MacBook Pro, Apple)上で動作する数値演算ソフト(Matlab, MathWorks)およびフリーのアドオン(Psychophysics Toolbox)によって作成した動画であった。運動刺激は、一様なグレーの背景上を一定の平均速度と加速度を持って等加速度運動する半径 0.5[cm]の円であり、ディスプレイの中心を通るように上下左右の 4 方向のいずれかで運動した。背景の大きさは 28.6×28.6[cm]であり、視距離 38[cm]なので、視角 41.2[deg]だった。平均輝度は円が 1.33[cd/m<sup>2</sup>]、背景が 37.9[cd/m<sup>2</sup>]だった。運動の平均速度は 1.39[cm/s]であり、加速度は 6[cm/s<sup>2</sup>]から-6[cm/s<sup>2</sup>]の範囲で観察者の応答により上下法によって変化した。刺激の運動距離は、ディスプレイ上で 28.6[cm]であり、4 運動方向で同様だった。

#### 2.1.1.2 実験装置

刺激は解像度 1920×1080 でディスプレイ(RDT233WX-3D, 三菱電機, 60[Hz])上に呈示された。ディスプレイには, その端を隠すために, ディスプレイの端に沿って黒色の枠が取り付けられていた。観察者は, 両眼の中央位置がディスプレイ中央正面になる位置で頭部を顎台と額当てによって固定され, 正立した状態, すなわち身体の下方向が物理的な重力方向と一致した状態で刺激を観察した。視距離は 38[cm]だった。観察者が応答に用いるためのテンキーが用意された。実験は暗室中で行われ, 刺激以外は観察されなかった。

#### 2.1.1.3 観察者

9名の観察者が実験に参加した。うち1名は著者であり, 他8名は実験目的に対して naïve であった。観察者は全員視力正常もしくは矯正視力正常であった。

#### 2.1.1.4 実験手順

まず, 上下左右のどの方向から運動が出現するかを示す手がかりが呈示されていた。観察者のテンキーの押下により, 手がかりが消され, 手がかり方向の画面外から刺激の運動が開始された。観察者は刺激観察後, 刺激の運動が加速して知覚されたか減速して知覚されたかをテンキーで強制二択応答した。この応答に従って, 次のトライアルの加速度が決定された。1つの運動方向条件に対して,  $\pm 6\text{cm/s}^2$  を開始加速度とする刺激系列をそれぞれ 2つ, 全4つの刺激系列を1つの背景条件でおこなった。1つの系列は応答の正負(加速減速)すなわち加速度の修正方向が 6回反転することで終了した。観察者は試行間に自由に休憩をとることが可能だった。

それぞれのトライアルの応答を集計し, 各刺激加速度に対する知覚的加速/減速比率をプロットした心理物理関数を求め, その比率が 0.5 となる点より, 知覚的に等速度となる加速度と定義した。

### 2.1.2 実験結果

9人の観察者における運動方向毎の主観的な等速度運動点(PSUM: point of subjective uniform motion)の加速度における平均値を図 6a に示す。各棒グラフは, 身体方向を基準とした刺激の運動方向(右, 上, 左, 下)に対応しており, 例えば, 下の棒グラフは身体の頭から足方向に運動する物体の結果を示す。以降, 本論文では前額平行面上の運動方向を, 身体方向を基準として表す。数値は PSUM の加速度を表しており, 正符号は加速運動を観察したとき等速度運動に知覚したことを示す。加速度値の単位は  $\text{cm/s}^2$  である。図 6b は対になった運動方向間の PSUM の差分を示し, 図の縦軸がその差分を, 横軸が運動方向のセットを示している。

この結果から, 左右の運動方向において等速度運動に知覚する加速度はやや加速であるが, 両者に差がないことがわかる。また, 左右方向に対して上方向の運動のときにより減

速した運動（実際にはほぼ物理的に等速の運動）を等速度運動と知覚し、下方向の運動のときにより加速した運動を等速度運動と知覚している傾向が見られる。物理的等速である 0 との対応のある t 検定は、下方向の運動でのみ優位差を示した(上 :  $t=-0.024$   $df=8$   $p=0.98$ , 下 :  $t=-3.61$   $df=8$   $p=0.0069$ , 左 :  $t=-1.50$   $df=8$   $p=0.17$ , 右 :  $t=-2.12$   $df=8$   $p=0.067$ )。この結果をさらに統計的に検討するため、運動方向条件を要因とする分散分析(ANOVA)をおこなった。その結果、有意な主効果が認められた( $F(3,24)=6.15$   $p=0.0030$   $\eta^2=0.12$   $\omega^2=0.091$ )。また、Ryan 法による多重比較を、5%を有意水準としておこなった。その結果、上方向運動と下方向運動の結果に有意な差が認められた( $t=4.25$   $df=24$   $p=0.00028$ )。

以上の結果より、前額平行面上の垂直方向の運動において加速度バイアスがあることが明らかになった。この実験では観察者は座って刺激を観察していたため、前額平行面の垂直軸は重力軸と一致していた。したがって、このバイアスは前庭・体性感覚から得られる重力方向の情報による等速度知覚への影響を示していると考えられる。

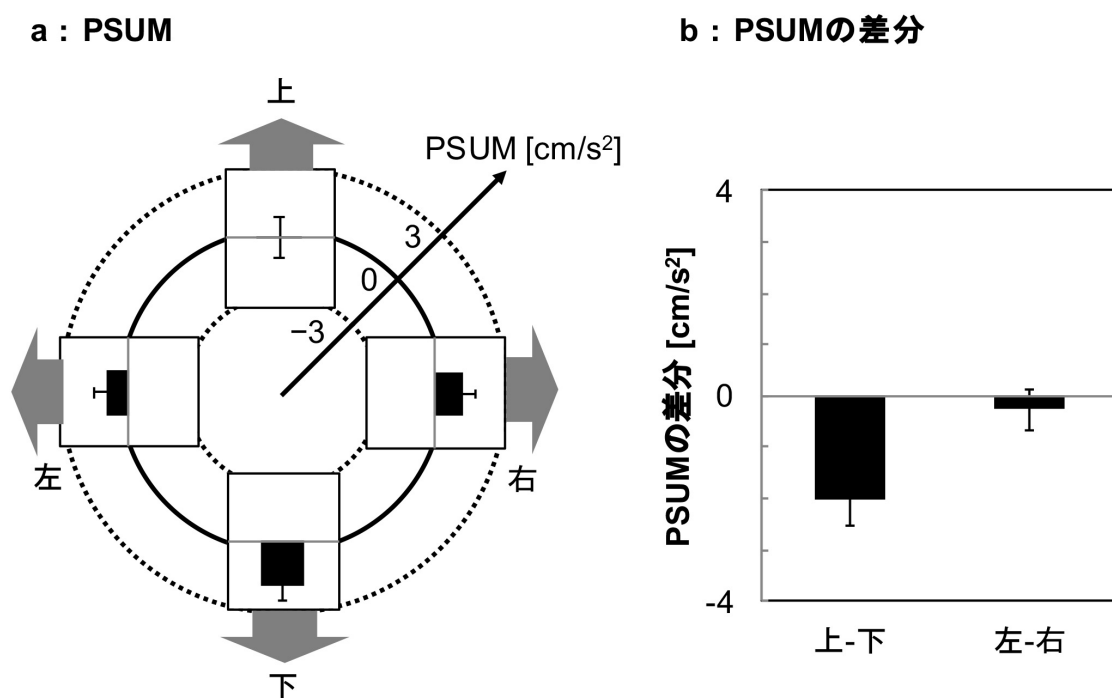


図6 実験 1-1 結果

## 2.2 実験 1-2 前額平行面上の等速度知覚への視覚情報の影響

実験 1-2 では、前額平行面上を運動する物体の PSUM に対する視覚情報による重力方向の影響を調べた。視覚刺激として、上下左右の 4 方向いずれかに運動する物体をディスプレイに呈示し、実験 1-1 と同様に等速度と知覚する運動が持つ加速度(加速度バイアス)を測定する実験をおこなった。この刺激を異なる重力方向を示す自然画像を背景刺激として呈示することで、Visual polarity による重力方向の変化によって知覚的等速度運動となる運動の加速度バイアスがどのように変化するか調べた。実験結果の予測を図 7 に示す。グラフの見方は図 6 と同様であり、色の違いは背景の正立、倒立の違いを示している。物理的重力方向と背景内の重力方向が一致するとき、実験 1-1 と同様に左右の運動方向の値に対して、上方向の運動では値が減少し、下方向の運動では値が増加する傾向が見られると考えられる。対して、それらの重力方向が反対方向であるとき、重力方向情報が対立するため、重力方向が一致している結果の値よりも上方向の運動では値が正に増加し、下方向の運動では値が負に増加する傾向が見られることが予測される。

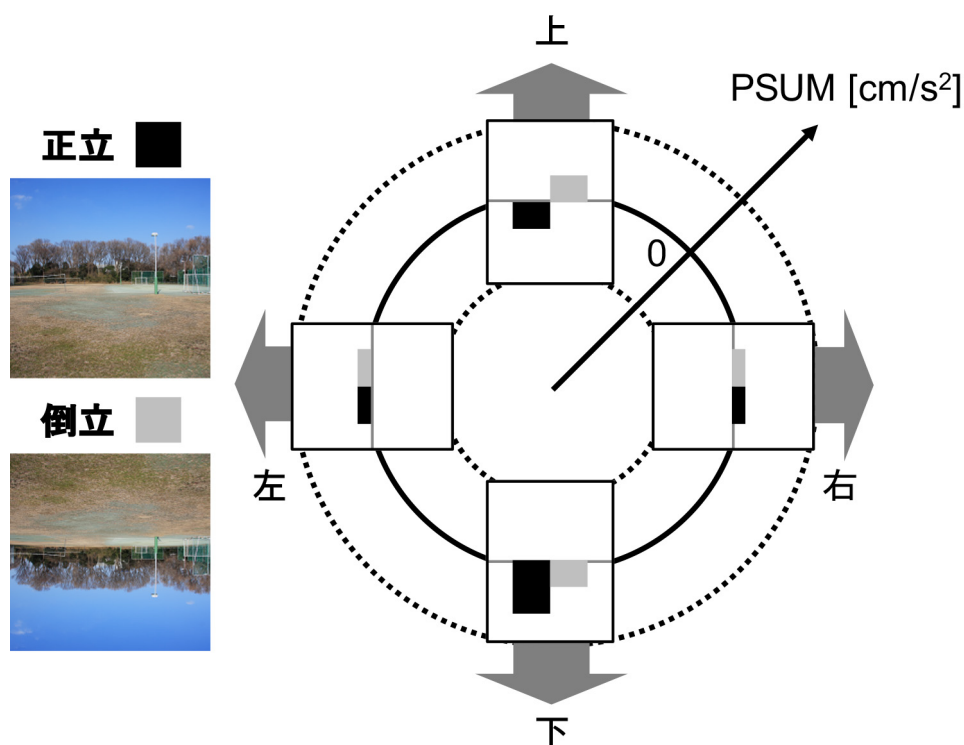


図 7 実験 1-2 の結果予測



### 2.2.1 実験方法

実験装置と観察者(9人)は実験1と同様だった。

運動刺激も、実験1-1と同様だった。背景刺激は図8(左の列)に示すような、実際の環境の風景をデジタルカメラを用いて撮影することにより作成した4種類のカラー画像(1080×1080[pixel])であった。背景の大きさは28.6×28.6[cm]であり、視距離38[cm]なので、視角41.2[deg]であった。平均輝度はGroundが58.0[cd/m<sup>2</sup>]、Roomが51.4[cd/m<sup>2</sup>]、Buildingが78.5[cd/m<sup>2</sup>]、Holeが47.6[cd/m<sup>2</sup>]だった。それぞれ、物理的な重力方向と写真中の視覚情報による重力方向が一致する正立背景と画像の水平軸で上下反転させて作成した倒立背景があった(図8)。身体方向、重力方向、Visual polarityによる方向、運動方向の関係を表1に示す。

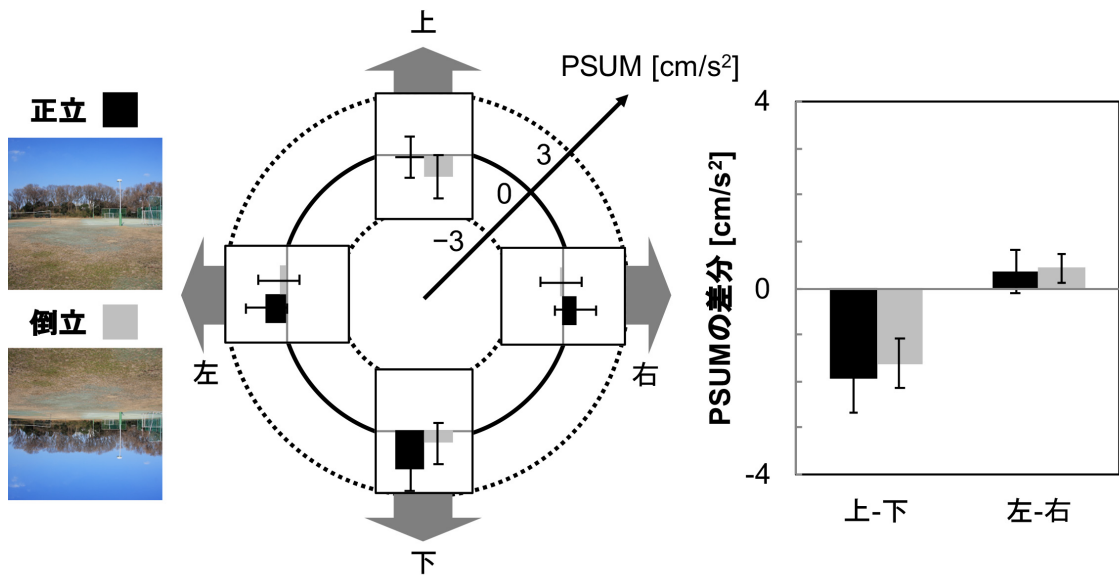
実験は背景条件毎におこない、背景条件内での実験手順は実験1と同様だった。背景条件の順番は各観察者でランダムな順番でおこなった。

### 2.2.2 実験結果

ほぼ全ての条件で平均値±2SD内に実験結果が含まれない観察者が1人いたため、外れ値として除外した。図8は各背景条件における運動方向と、背景刺激の正立、倒立の組み合わせに対するPSUMとPSUMの差分を示している。図2a~dはそれぞれ、Ground, Room, Building, Holeの背景条件の違いを示している。図6のように真ん中の円形の図は各運動方向のPSUMを示す棒グラフレーダーグラフ、右側の図はセットになった運動方向間のPSUMの差分を示すグラフである。両方のグラフでシンボルの色は背景刺激の方向を示す。

結果は、背景の正立条件では予測通り、実験1-1と同様に、左右の運動方向において等速度運動に知覚する加速度に差がなく、上よりも下の運動方向において等速度運動に知覚する加速度が正の方向に大きい傾向が見られる。しかしながら、背景の倒立条件では予測と異なり、正立条件の結果と同様の傾向を示した。さらに、4つの背景の種類による系統的な違いは結果には見られなかった。各背景条件のVisual polarityと運動方向(上, 下, 左, 右)の2要因ANOVAは全ての背景条件で運動方向の有意な主効果を示した(Ground (F(3,21)=7.06, p < 0.01  $\eta^2=0.089$   $\omega^2=0.070$ ), Room (F(3,21)=10.57, p < 0.01  $\eta^2=0.18$   $\omega^2=0.15$ ), Building (F(3,21)=4.68, p < 0.05  $\eta^2=0.16$   $\omega^2=0.12$ ), Hole (F(3,21)=4.52, p < 0.05  $\eta^2=0.093$   $\omega^2=0.066$ ))。交互作用はRoomの条件でのみ有意だった(F(3,21)=4.03, p < 0.05  $\eta^2=0.038$   $\omega^2=0.027$ )。Ryan法( $\alpha=0.05$ )による多重比較では、上方向と下方向の運動方向間に全ての背景種類で有意であることが示された(p < 0.05)。これらの結果は、実験1-1のようにPSUMが重力方向と身体の長軸に影響を受けていることを示唆している。

a : Ground



b : Room

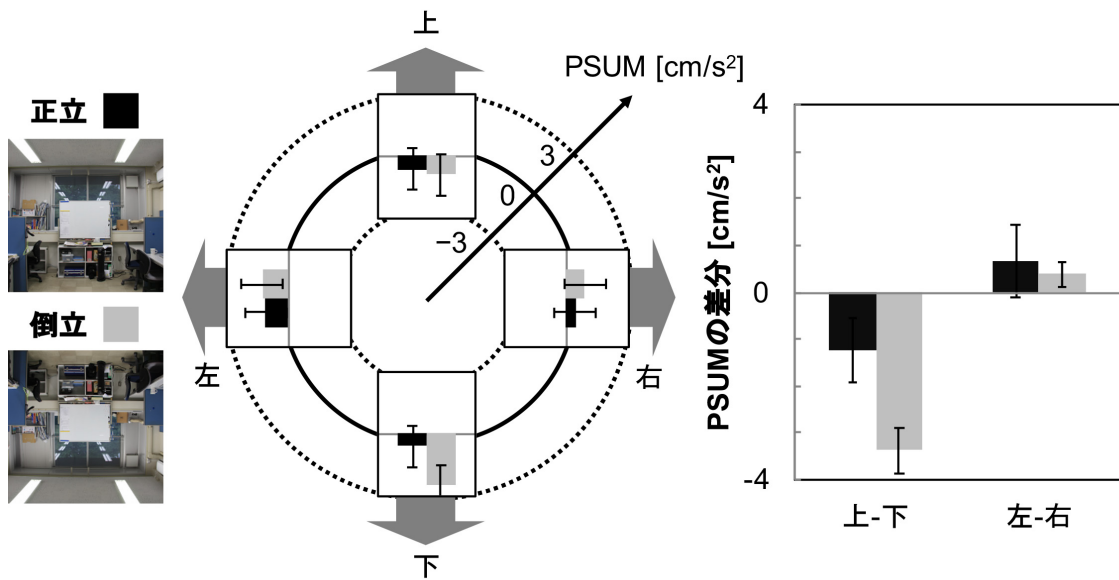
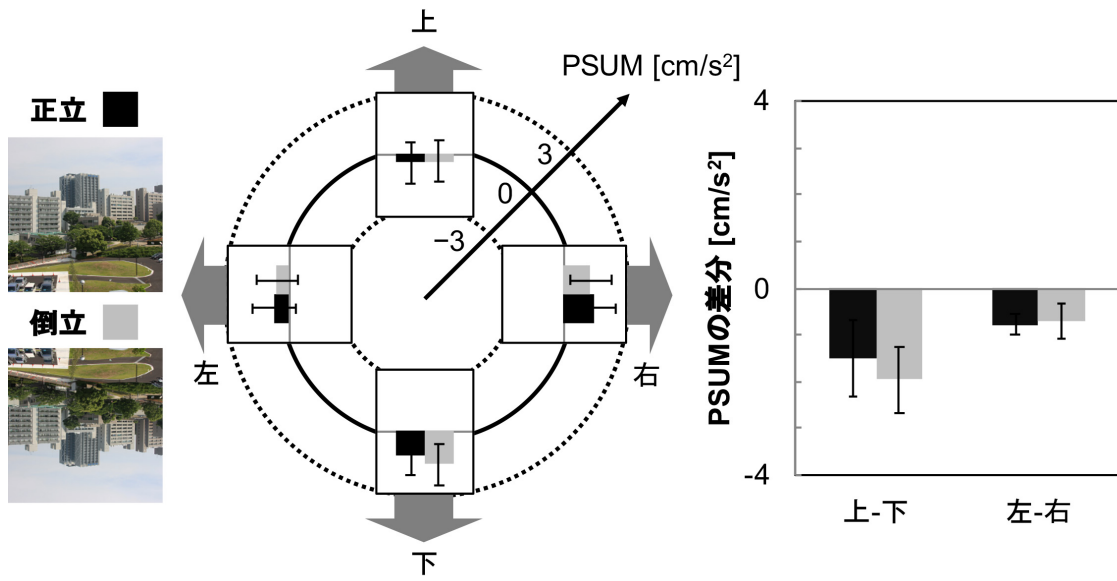


図 8a,b 実験 1-2 結果(Ground, Room)

c : Building



d : Hole

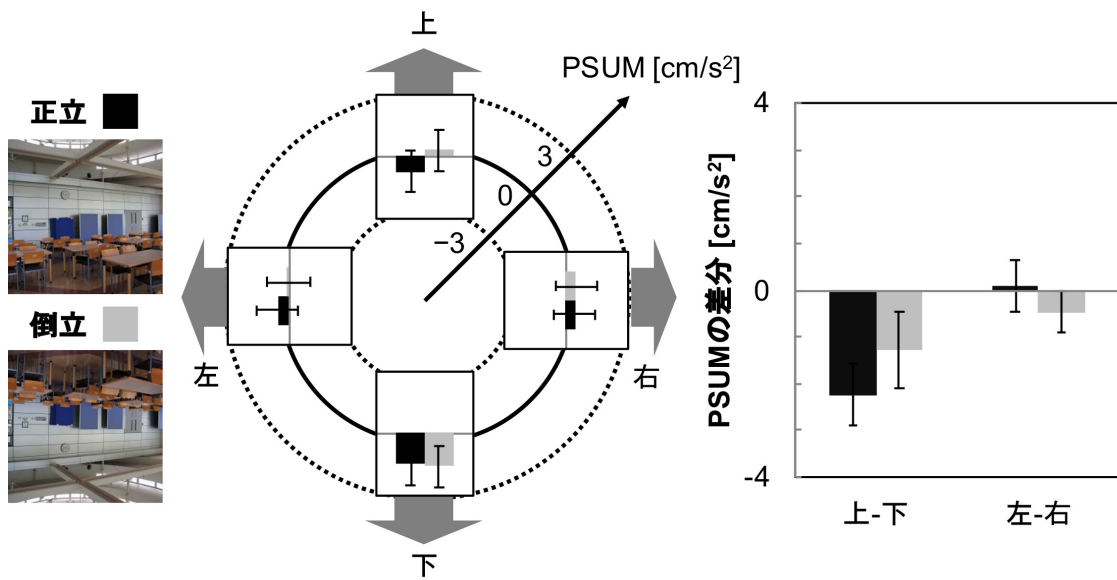


図 8c,d 実験 1-2 結果(Building, Hole)

視覚的な背景が視覚運動の推定におけるノイズとなったという解釈を検討するために、各条件の心理測定関数から加速バイアスの just noticeable difference (JND)を計算し、それを全ての観察者の実験 1 の結果と比較した。JND は、心理測定関数の 75%点と 25%点における加速度値の差分として定義した。図 9 は Visual polarity あり(実験 1-2)と Visual polarity (実験 1-1)の JND 比を示している。Ground の条件を除いて JND 比は 1 を超えており、ほとんどの場合、観察者は背景画像が呈示されているとき(実験 1-2)に加速度変化に対して高い JND を示していた。背景写真の小さな局所的物体または高い空間周波数が PSUM に影響を与え、その結果、上下方向の情報を提供する背景写真の方向による違いではなく、背景の種類による違いが生じるのではないかと考えられる。

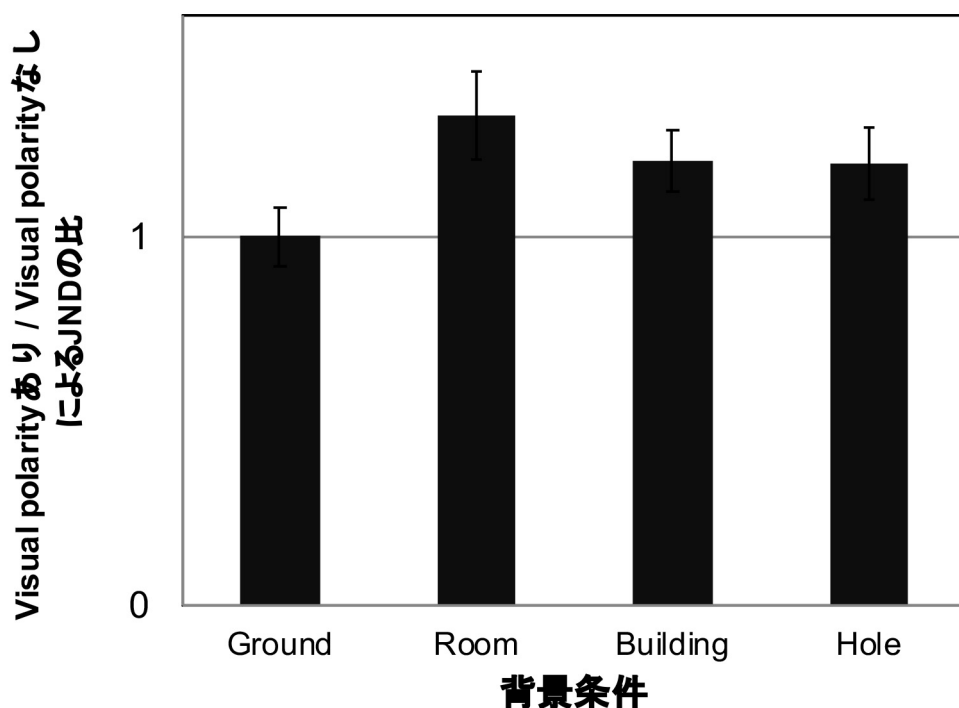


図 9 実験 1-2 の結果における背景の Visual polarity の有無による JND 比

この実験では、Visual polarity の影響は明らかにはならなかった。これは重力方向からの上下方向手がかりが Visual polarity よりも強いためである。身体の長軸と重力方向が分離されている場合、Visual polarity による影響が観察できるのではないかと考えられる。実験 1-3 では、観察者は仰向けもしくは身体の片側を下にして横たわることで重力方向と身体の長軸を分離し、この仮定を検証した。

## 2.3 実験 1-3 姿勢変化による前額平行面上の等速度知覚と視覚情報の影響

実験 1-2 の結果は、Visual polarity による方向情報は PSUM に影響を与えないことを示した。しかし、実験 1-2 では身体の長軸が重力方向と同軸であったことから、Visual polarity の影響がないと結論づけるのは時期尚早である。

実験 1-3 では、観察者の姿勢を操作することによって、重力方向、Visual polarity、身体方向の関係を変化させ、知覚される加速度に対する Visual polarity の影響を調べた。PSUM が 3 つの情報源に基づいた上下方向の影響を受けるならば、身体方向と重力方向が異なる方向となったときに Visual polarity の相対的な寄与が増加すると仮定した。

### 2.3.1 実験方法

#### 2.3.1.1 観察者

7名の観察者が実験に参加した。うち1名は著者であり、他6名は実験目的に対してナイーブであった。観察者は全員視力正常もしくは矯正視力正常であった。全員が実験 1-1 と 1-2 の両方に参加していた。

#### 2.3.1.2 視覚刺激

運動刺激は実験 1-1 と同様に上下左右のいずれかの方向に運動する円形物体であった。

背景刺激は実験 1-2 で用いた 4 種類の背景からグレー背景と同様の JND となる Ground を用いた(図 9)。正立と倒立に加え、正立を時計回りに 90 度回転させた CW90° と反時計回りに 90 度回転させた CCW90° の条件を加えた。また、Visual polarity のない条件(グレー背景)もおこなった。それ以外は実験 1-1 および実験 1-2 と同様だった。

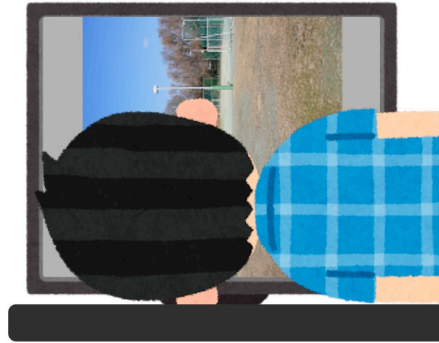
#### 2.3.1.3 姿勢条件

仰向けと横臥位の 2 つの姿勢条件でそれぞれ実験をおこなった。仰向け条件(図 10a)では、観察者を仰向けにすることで、実際の重力方向に対して身体方向と前額平行面を直交させた。横臥位条件(図 10b)では、観察者の左側を下にして横たわった状態にした。このとき、実際の重力方向と身体方向は直交するが、実際の重力方向は前額平行面と重なっていた。

a : 仰向け



b : 横臥位



c : 背景条件



正立



倒立



CCW90°



CW90°

d : 運動方向条件

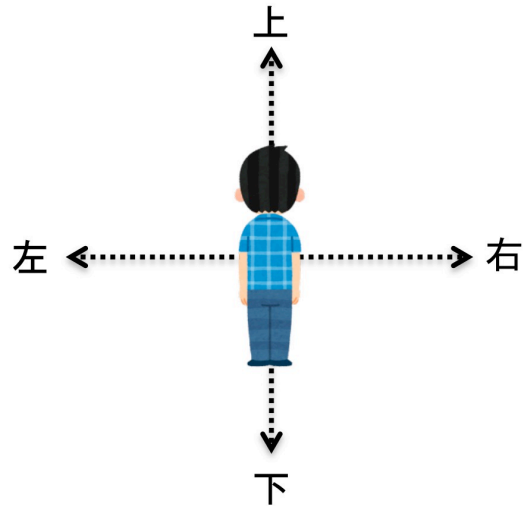


図 10 実験 1-3 における実験条件

#### 2.3.1.4 実験装置

用いたディスプレイは実験 1-2 と同様であったが、仰向け条件では、ディスプレイはベッドの上に固定し、横臥位条件では、ディスプレイはベッドの横に固定した。視距離は実験 1-1 と同じく 38[cm]であり、視点に対するディスプレイの相対位置が実験 1-1 と同様となる位置に観察者の頭部位置を調整した。

## 2.3.2 実験結果

### 2.3.2.1 仰向け条件の実験結果(実験 1-3a)

図 11 は仰向け条件における各背景条件の主観的な等速度運動が持つ加速度を示している。この結果は 7 人の観察者の平均である。

グレー背景では(図 11b), 実験 1-1 と同様に水平の左右運動方向間において等速度運動に知覚する加速度に差がなく, 垂直の運動方向間にバイアスが見られる。運動方向を要因とした ANOVA は, 有意な主効果を示した( $F(3,18)=8.11$   $p=0.0013$   $\eta^2=0.21$   $\omega^2=0.17$ )。Ryan 法による多重比較を, 5%を有意水準としておこなった結果, 上方向と下方向( $t=4.55$   $df=18$   $p=0.00025$ ), 上方向と左方向( $t=3.50$   $df=18$   $p=0.0026$ ), 上方向と右方向( $t=3.73$   $df=18$   $p=0.0015$ )の運動方向間に有意な差が認められた。仰向け条件では, 重力方向は身体方向と直交しているため, この上下の運動方向間に見られるバイアスは前庭・体性感覚からの重力方向によるものではない。仰向け条件における前額平行面の垂直方向と一致するのは身体方向のみであるため, このバイアスは身体の上下によって等速度知覚が影響された結果であると考えられる。

正立および倒立の背景条件の結果 (図 11c) は, グレー背景の結果と同様の傾向があるように見える。しかし, 主観的な等速度となる運動の加速度バイアスは, 正立条件よりも倒立条件で, 上方向で正に増加し, 下方向で負に増加した。これは実験 1-2 で示した予測と同様の傾向である。背景条件(正立, 倒立) × 運動方向(上, 下, 左, 右)の 2 要因 ANOVA は, 運動方向の有意な主効果を示し( $F(3,18)=8.11$   $p=0.0013$   $\eta^2=0.19$   $\omega^2=0.16$ ), 交互作用も認められた( $F(3,18)=4.19$   $p=0.021$   $\eta^2=0.038$   $\omega^2=0.027$ )。Ryan 法による多重比較を, 5%を有意水準としておこなった結果, 正立における運動方向において, 上方向と下方向( $t=5.78$   $df=36$   $p=0.0000014$ ), 上方向と左方向( $t=3.24$   $df=36$   $p=0.0026$ ), 上方向と右方向( $t=2.41$   $df=36$   $p=0.021$ ), 下方向と左方向( $t=2.55$   $df=36$   $p=0.015$ ), 下方向と右方向( $t=3.37$   $df=36$   $p=0.0018$ )に有意な差を示した。これらの結果は, 身体方向が重力方向と異なる場合, PSUM に対する Visual polarity の影響が大きくなることを示している。

CCW90° と CW90° の背景条件の結果は(図 11d), 運動方向が互いに反対の場合と比較して, 運動方向が Visual polarity と同じである場合, 主観的な等速度となる運動の加速度バイアスが大きいことを示している。例えば右方向の場合, CCW90° 条件よりも CW90° 条件の方で加速度バイアスが大きい。これは実験 1-2 で示した予測である重力方向と一致した方向の運動はより加速した運動を等速度と知覚し, 重力方向に反する方向の運動はより減速した運動を等速度と知覚する, という傾向と一致している。また, 上下の運動方向では背景に関わらず, 上下の運動方向間でバイアスが見られる。背景条件(CCW90°, CW90°) × 運動方向(上, 下, 左, 右)の 2 要因 ANOVA は, 運動方向の有意な主効果を示し( $F(3,18)=14.93$   $p<0.0001$   $\eta^2=0.30$   $\omega^2=0.26$ ), 交互作用も認められた( $F(3,18)=3.88$   $p=0.027$   $\eta^2=0.039$   $\omega^2=0.027$ )。Ryan 法による多重比較を, 5%を有意水準としておこなった結果, CCW90° における運動方向において, 上方向と下方向( $t=4.96$   $df=36$   $p=0.000017$ ), 上方向

と左方向( $t=3.43$   $df=36$   $p=0.0016$ ), 上方向と右方向( $t=4.45$   $df=36$   $p=0.000081$ )に有意な差を示した。また,  $CW90^\circ$  における運動方向において, 上方向と下方向( $t=5.11$   $df=36$   $p=0.000011$ ), 上方向と左方向( $t=5.32$   $df=36$   $p=0.0000056$ ), 上方向と右方向( $t=2.43$   $df=36$   $p=0.020$ ), 下方向と右方向( $t=2.67$   $df=36$   $p=0.011$ ), 下方向と左方向( $t=2.89$   $df=36$   $p=0.0065$ )に有意な差を示した。身体方向が重力方向と一致しない場合, Visual polarity の上下方向に沿った運動の PSUM が影響されることが示唆された。

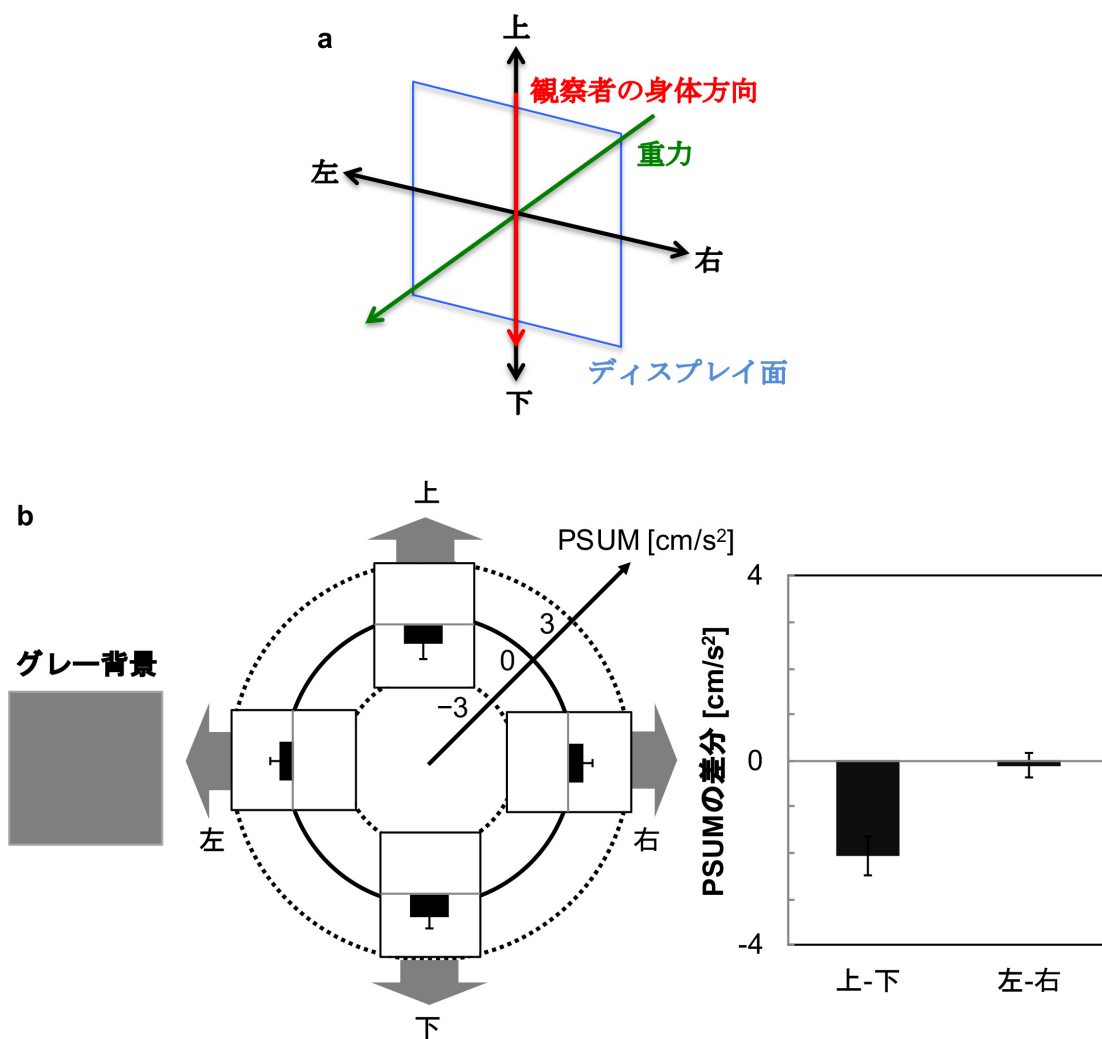
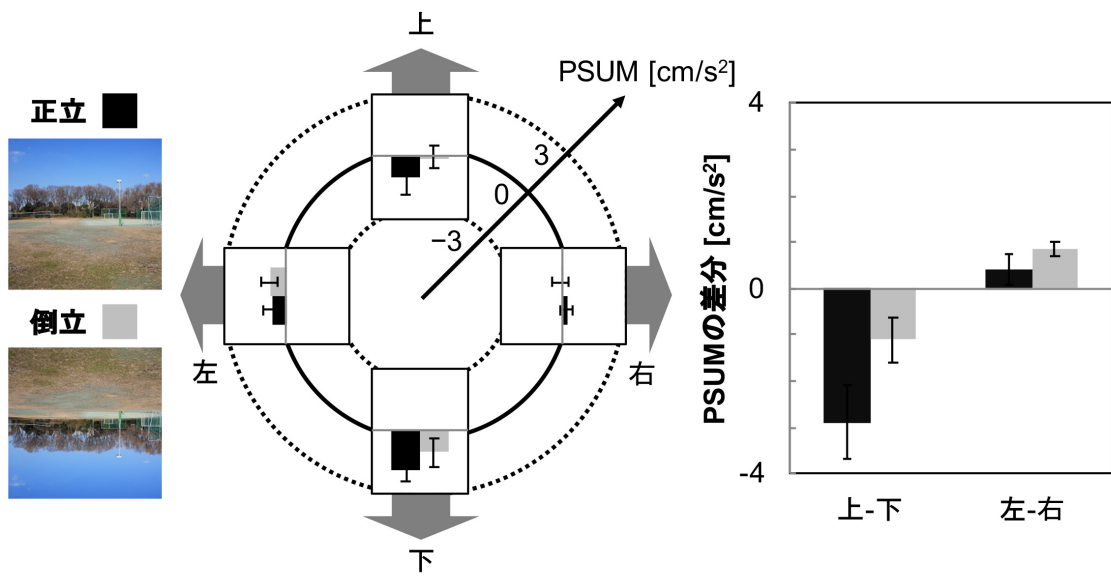


図 11a,b 実験条件の関係図と実験 1-3a 結果(グレー背景)



c



d

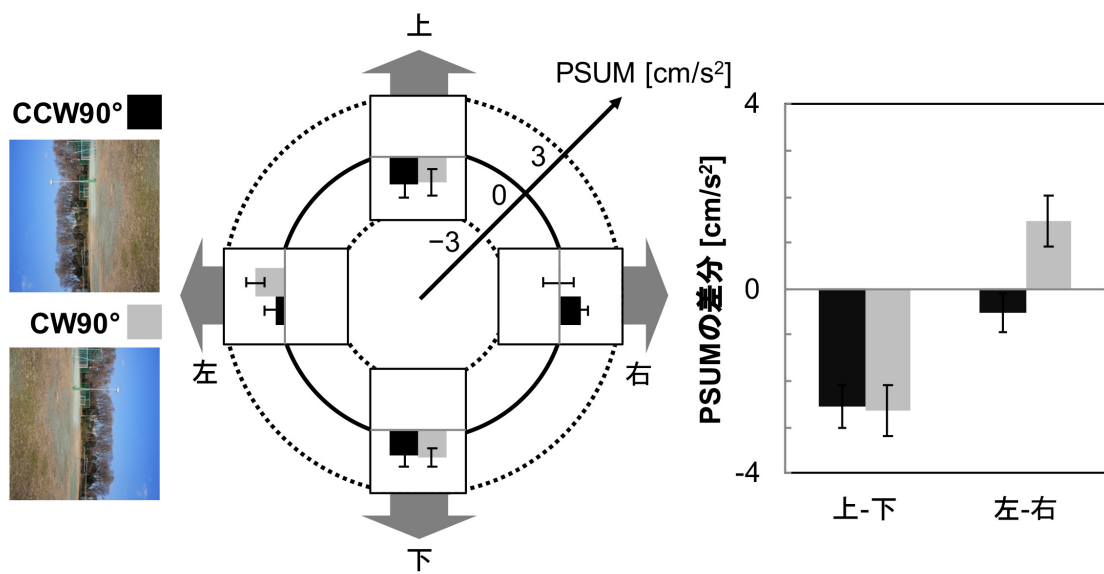


図 11c,d 実験 1-3a 結果(正立と倒立, CCW90° と CW90° )

### 2.3.2.2 横臥位条件の実験結果(実験 1-3b)

図 12 は横臥位条件における各背景条件の主観的な等速度運動が持つ加速度を示している。この結果は 7 人の観察者の平均である。

グレー背景では(図 12b), 重力方向は左方向の運動と一致し, 右方向の運動とは反対であるが, 左右の運動方向間にバイアスは見られない。一方で, 実験 1-1, 1-2, 1-3(仰向け)と同様に上下の運動方向間にバイアスが見られる。この場合, 下方向の運動は身体の下方向と一致し, より大きな加速バイアスを示した。運動方向を要因とした ANOVA は, 有意な主効果を示した( $F(3,18)=7.43$   $p=0.0019$   $\eta^2=0.23$   $\omega^2=0.18$ )。Ryan 法による多重比較を, 5%を有意水準としておこなった結果, 上方向とその他の運動方向間に有意な差が見られた(下方向 : ( $t=4.14$   $df=18$   $p=0.00061$ ), 左方向 : ( $t=3.85$   $df=18$   $p=0.0012$ ), 右方向 : ( $t=3.44$   $df=18$   $p=0.0029$ ))。

正立および倒立の背景条件の結果は(図 12c), 図 11c の結果と基本的に一致している。下方向の運動は加速度のより大きなバイアスを示した。正立条件と倒立条件の結果の違いでは, 下方向の運動の加速度バイアスは, 倒立条件で減少した。水平方向の運動については正立と倒立の背景条件間に違いはなかった。背景条件(正立, 倒立) × 運動方向(上, 下, 左, 右)の 2 要因 ANOVA は, 運動方向の有意な主効果のみを示した( $F(3,18)=5.41$   $p=0.0079$   $\eta^2=0.16$   $\omega^2=0.12$ )。Ryan 法による多重比較を, 5%を有意水準としておこなった結果, 上方向と下方向の運動方向間に有意な差が見られた( $t=4.00$   $df=18$   $p=0.00084$ )。

CCW90° と CW90° の背景条件の結果(図 12d)は, 運動方向が Visual polarity による重力方向と同じである場合, 加速度バイアスは反対の場合よりも大きい。また, 上下の運動方向では背景に関わらず, 上下の運動方向間でバイアスが見られる。背景条件(CCW90°, CW90°) × 運動方向(上, 下, 左, 右)の 2 要因 ANOVA は, 運動方向の有意な主効果を示した( $F(3,18)=4.03$   $p=0.026$   $\eta^2=0.18$   $\omega^2=0.13$ ), 交互作用も認められた( $F(3,18)=4.26$   $p=0.019$   $\eta^2=0.071$   $\omega^2=0.052$ )。Ryan 法による多重比較を, 5%を有意水準としておこなった結果, CCW90° における運動方向において上方向と右方向( $t=3.31$   $df=36$   $p=0.0021$ )に有意な差を示した。また, CW90° における運動方向において上方向と左方向( $t=3.51$   $df=36$   $p=0.0012$ )に有意な差を示した。仰向け条件のように, Visual polarity の垂直方向に沿って主観的な等速度の運動の持つ加速度バイアスに変化が見られた。これらの結果は, 身体方向と重力方向が異なる方向である場合, 前額平行面上の PSUM は, 身体方向もしくは重力方向に平行な Visual polarity の垂直方向に影響を受けることを示唆している。

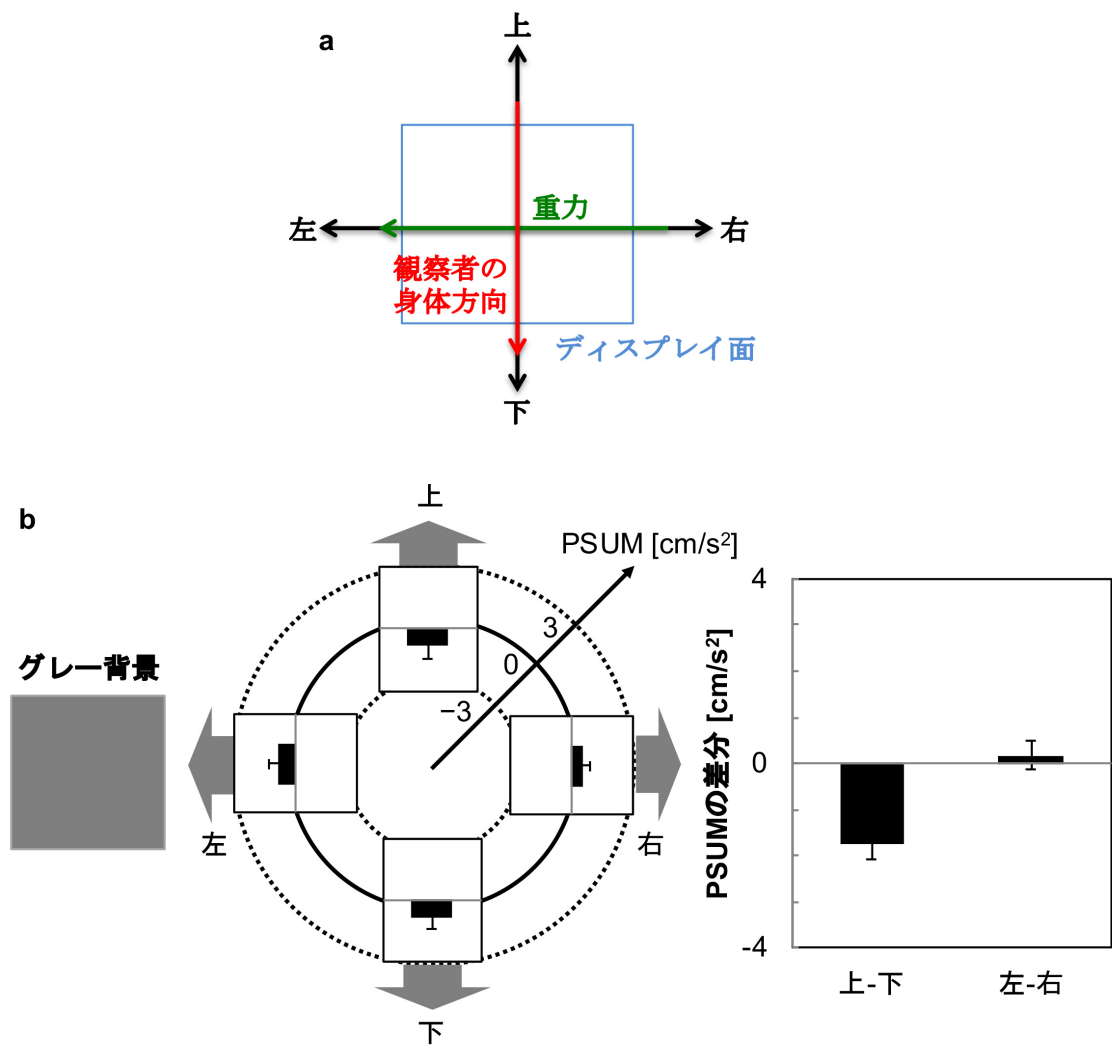
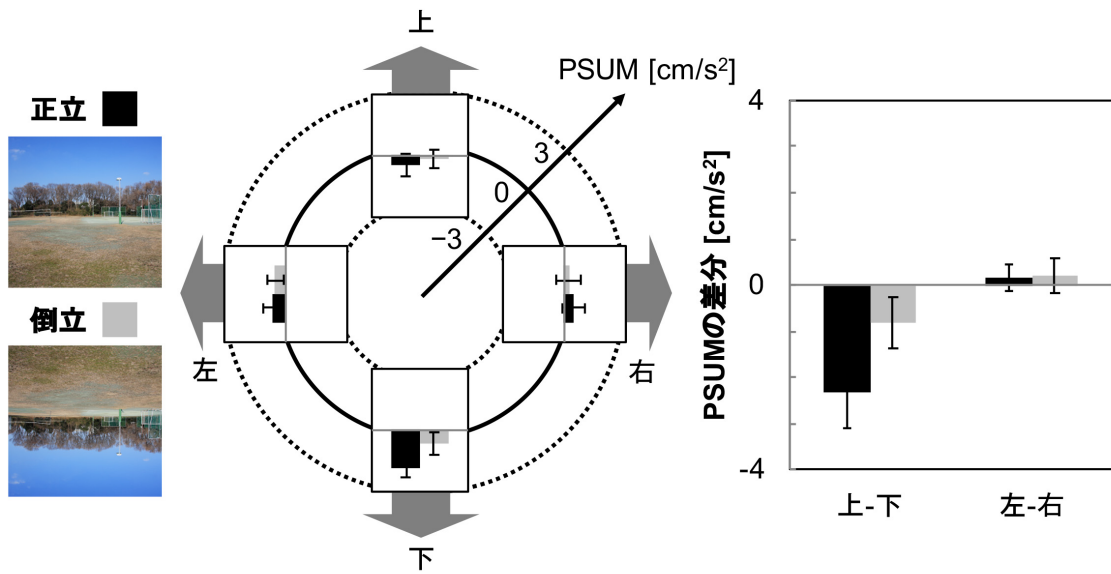


図 12a,b 実験条件の関係図と実験 1-3b 結果(グレー背景)

c



d

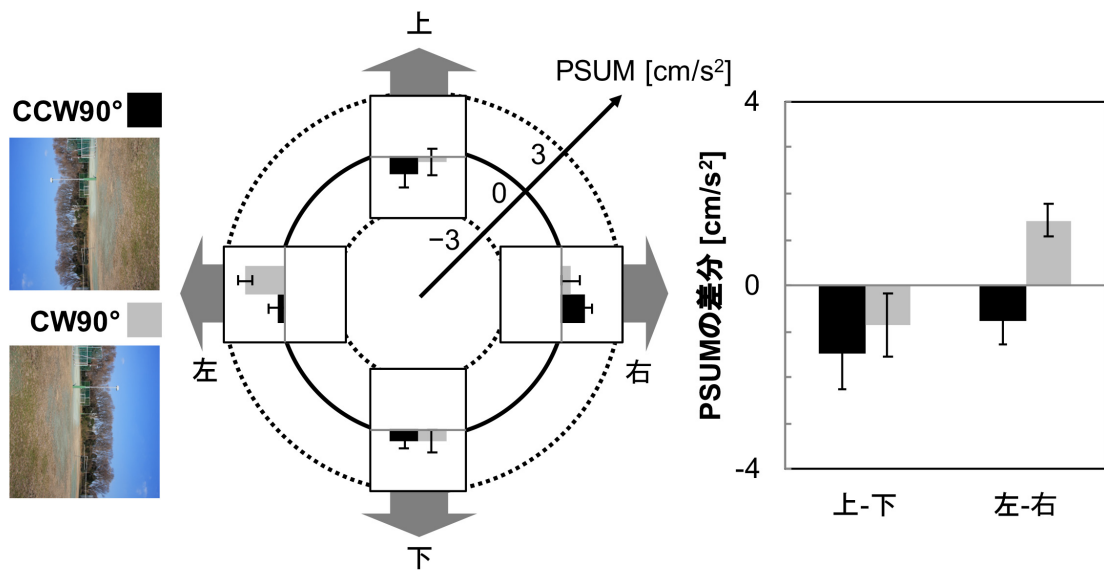


図 12c,d 実験 1-3b 結果(正立と倒立, CCW90° と CW90° )

## 2.4 実験 1 考察

実験 1 では、いくつかの手がかりによる上下方向の知覚が前額平行面上の等速度運動の知覚に影響するかどうか調べた。実験 1-1 は、主観的な等速度運動の加速度バイアスが運動方向に応じて変化することを示し、これは先行研究[14]と一致している。上方向の運動の場合、PSUM の加速度は負の方向に移動し、下向きの運動の場合はその逆であった。

実験 1-2 では、上下方向を提供する Visual polarity が PSUM に影響するかどうかを調べた。Visual polarity の影響はどの条件でも見ることはできなかった。しかし、結果は実験 1-1 と同様に垂直運動方向に沿った加速度バイアスを示した。これは重力方向と身体方向の影響が強く、Visual polarity による影響が見られなくなるためではないかと考えた。

そこで、実験 1-3 では、観察者は仰向けもしくは横臥位の姿勢になることで、身体方向と物理的な重力方向を異なる方向に分離した。この場合、倒立背景条件の PSUM の加速度バイアスは、正立背景条件の加速度バイアスと比較して減少した(図 11c と図 12c)。また、CCW90° 条件と CW90° 条件の結果には有意な差があった(図 11d と図 12d)。

実験 1-3 の結果は、運動知覚は、重力方向だけでなく Visual polarity によっても影響されることを示している。実験 1-3 では、背景の Visual polarity が PSUM のシフトに影響した。上方向と下方向の運動方向間の PSUM の差分は、正立の背景条件と倒立の背景条件の間で大きく、背景が 90° 回転したときに左右の運動方向でバイアスが発生した(CW90° と CCW90°)。Visual polarity は空間内の位置および構造情報を提供し、重力方向の手がかりを示す。例えば、空と地面、木や建物の方向、照明の位置等は重力方向に関する自然な手がかりを提供する。

さらに、身体の長軸に沿って、PSUM の加速度バイアスが生じることが示された。実験 1-3 における仰向け条件のグレー背景条件では、方向情報を視覚から得ることはできない。そして、物理的な重力の方向は、前額平行面に直交している。それにもかかわらず、上下の運動方向間に加速度バイアスが観察された。したがって、身体の長軸方向によって示される「下」方向[19]が運動知覚の加速度バイアスに影響することが示唆される。しかし、実験 1 で観察された身体の長軸に沿った加速度バイアスに関連する座標系が身体中心座標系、頭部中心座標系、網膜中心座標系のいずれであるかを結論づけることはできない。先行研究[26]では、SVV は、頭部中心座標系に基づいて重力知覚にアクセスすることが示唆されている。したがって、おそらく頭部中心座標系もしくは網膜中心座標系が、加速度バイアスに関連しているのではないだろうか。

実験 1-2 の結果は、Room 条件以外の背景条件で有意ではなかった。Room 条件ではバイアスは倒立の Visual polarity と反対の方向を示した。これらの結果は、この実験において PSUM のシフトに Visual polarity の影響がなかったあるいは非常に小さかったことを意味すると考える。そこで、重力方向と身体方向の両方からの上下方向の手がかりが非常に強く、Visual polarity の影響が抑制されたためであるという提案をおこなった。多くの先行研究(例えば[27-29])は、身体方向と重力方向が平行でない場合、Visual polarity や知覚的重

力方向などの視覚もしくは認知要因が垂直知覚に強く影響することを示している。いくつかの研究では人間の知覚処理の計算モデルとして、視覚情報、重力、身体方向からの方向手がかりを統合して知覚的な「上」の方向を決定することを提案している。重みの係数は姿勢によって変化し、実験 1 の結果から重力方向と身体方向によって示される運動方向と上下方向手がかりの関係は、Visual polarity の影響を増加もしくは減少させることができると考えられる。

実験 1 の結果は、重力方向、Visual polarity、身体方向からの上下の手がかりが PSUM に影響することを示し、これらの 3 つの手がかりの統合から得られる「下」の方向が運動知覚におけるバイアスを決定すると考えられる。3 つの信号を統合する上記のベクトル統合モデル[20, 21]は運動知覚における加速度バイアスの結果を説明することができる。しかし、このモデルに基づく「下」方向では、現在の結果の全てを説明することはできない。実験 1-2 では Visual polarity の影響は見られなかった。実験 1-3 の横臥位条件のグレー背景の結果では、身体方向に平行な運動方向に加速度バイアスが観察されたが、重力方向に平行な運動方向では加速度バイアスは観察されなかった。統合された方向信号が常に運動知覚に影響を与えるならば、これらの条件に何らかのバイアスが見られるはずである。手がかり間に大きな矛盾がある場合、いくつかの手がかりが破棄されるロバスト推定の感覚統合モデル[30, 31]も現在の結果を説明できる。このモデルでは、実験 1-2 では他の手がかりと大きな衝突がある視覚的手がかりが破棄されたように見え、実験 1-3 の横臥位条件では身体方向と大きな衝突がある重力方向手がかりが破棄されたように見えるため、現在の結果と一致する。さらに運動バイアスに用いられる知覚的な下方向と他の知覚に用いられる知覚的な下方向が類似しているかどうかを調査することが将来的には必要になるだろう。

## 第3章 奥行き方向の等速度知覚における重力方向情報の影響

実験1では前額平行面上の運動における等速度知覚への前庭・体性感覚と Visual polarity から得られる重力方向情報による影響を調べた。しかしながら、我々が普段生活する実環境は三次元空間であり、奥行きのある空間であるため、その中での運動知覚の特性を知ることが重要である。しかし、奥行き方向の運動における等速度知覚への重力方向情報の影響についてはほとんど調べられていない。そこで実験2では、奥行き方向の運動における等速度知覚が重力方向に影響を受けるか明らかにすることを目的とした。実験1と同様に等速度と知覚する運動が持つ物理的加速度を測定し、運動知覚における重力方向の影響の指標とした。実験1-3と同様に実際に身体の方角を変化させることによって身体にかかる重力方向を変化させ、同一の視覚刺激を呈示して実験を行うことで、前庭感覚および体性感覚からの重力方向の変化による運動知覚への影響を調べた。実験2-1では観察者に対して奥から手前に近づいてくる運動(接近運動)、実験2-2では観察者に対して手前から奥に遠ざかっていく運動(後退運動)について実験をおこなった。重力方向によって実験1と同様の影響を示すならば、重力方向と一致した方向の運動はより加速した運動を等速度と知覚し、重力方向に反する方向の運動はより減速した運動を等速度と知覚する、という傾向が見られると予測される。

### 3.1 実験2-1 接近運動における等速度知覚

実験2-1では、接近運動の等速度知覚における重力方向の影響を調べた。視覚刺激として、接近運動物体をシミュレートした刺激をディスプレイに呈示し、等速度運動と知覚する運動が持つ加速度(バイアス)を測定する実験をおこなった。刺激は、物体の大きさ(視角)変化と両眼視差変化を用いて接近運動をシミュレートしたものをを用いた[32]。この刺激を3つの異なる姿勢で観察し、重力方向の変化による等速度知覚の変化を調べた。

#### 3.1.1 実験方法

##### 3.1.1.1 視覚刺激

視覚刺激はPC(MacBook Pro, Apple)上で動作する数値演算ソフト(Matlab, MathWorks)およびフリーのアドオン(Psychophysics Toolbox)によって作成した動画であった。半径5.75[cm]の球が一定の平均速度と加速度で接近運動する様子をシミュレートし(図13)、リフレッシュレート60[Hz]のディスプレイ上に呈示した。この時、物体の大きさ(視角)および両眼視差の変化を計算、付加して呈示した。ただし、陰影情報は付加せず運動対称の輝度は常に一様、一定であった(片眼像:17.5[cd/m<sup>2</sup>])。運動のシミュレーション上の平均速度は32.5, 35.0, 37.5[km/h]の3条件があり、加速度は0, ±2.94, ±5.88, ±8.82[m/s<sup>2</sup>]の7条件であった。刺激の運動距離は、観察者から15.0[m]を始点距離、0.38[m]を終点距

離として全条件で一定であった。呈示時間は条件によって異なり、最小で 1.37[s]、最大で 1.65[s]であった。背景は一様な灰色であった(6.49[cd/m<sup>2</sup>])。

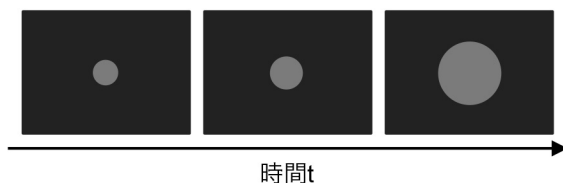


図 13 接近運動の視覚刺激例

### 3.1.1.2 身体方向条件

身体方向条件は仰向け、正立、うつ伏せの 3 条件があり、それぞれの条件で視覚刺激(接近運動)と身体の相対的な関係は常に一定であった。それぞれの条件における視覚刺激と身体との関係性を図 14 に示す。

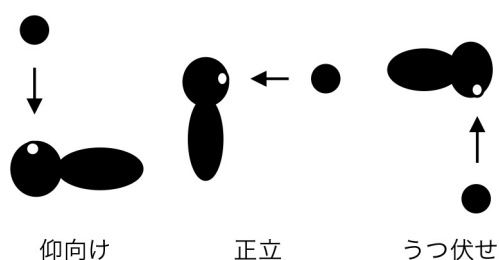


図 14 実験 2-1 における身体方向条件

### 3.1.1.3 実験装置

刺激は解像度 1920×1080 で偏光板方式の 3D ディスプレイ(RDT233WX-3D, 三菱電機, 60[Hz])上に呈示された。ディスプレイには、その端を隠すために、ディスプレイの端に沿って黒色の枠が取り付けられていた。観察者は、両眼の中央位置がディスプレイ中央正面になる位置で刺激を観察した。正立条件では観察者の頭部は、顎台と額当てによって固定された(図 15a)。仰向け条件ではベッドの上で仰向けに寝転がり、ベッド上に固定されたディスプレイを観察した(図 15b)。うつ伏せ条件ではベッドの上でうつ伏せに寝転がり、ベッドに空いた穴からベッドの下に固定されたディスプレイを観察した(図 15c)。3 つの身体方向条件のいずれにおいても視距離は 0.38[m]であり、視点に対するディスプレイの相対位置は同様であった。観察者が実験の応答に用いるためのテンキーが用意された。実験は暗室中で行われ、刺激以外は観察されなかった。



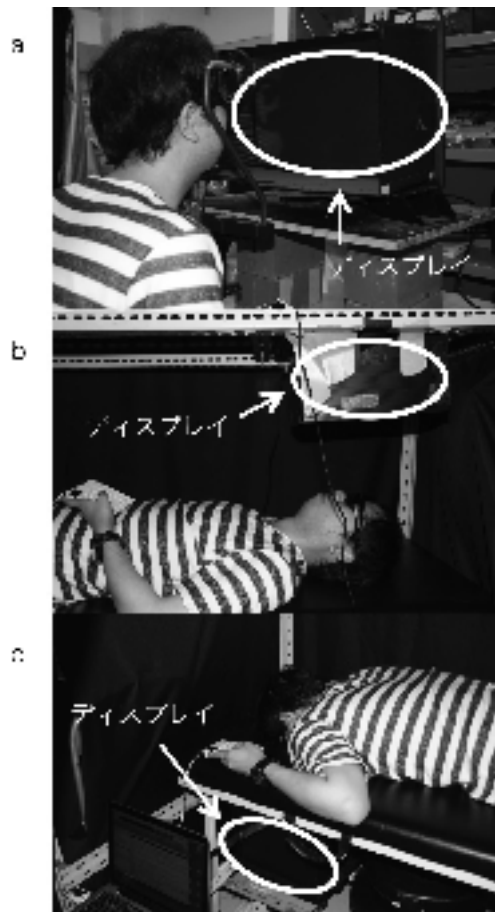


図 15 各身体方向条件における実験の様子

#### 3.1.1.4 観察者

7名の観察者が実験に参加した。うち1名は著者であり、他6名は実験目的に対してナイスであった。観察者は全員視力正常もしくは矯正視力正常であった。

#### 3.1.1.5 実験手順

観察者のテンキーの押下により刺激が自動的に開始され、刺激観察後、刺激の運動が加速して知覚されたか減速して知覚されたかをテンキーで強制二択応答した。実験は21条件(3(平均速度)×7(加速度))の各刺激に対して10試行ずつ、合計210試行を1セッションとし、それを身体方向条件毎におこなった。刺激の呈示順は各セッション内でランダムであった。身体方向条件の順番は観察者毎にランダムにおこなった。観察者は試行間に自由に休憩をとることが可能だった。

実験1と同様に、それぞれのトライアルの応答を集計し、各刺激加速度に対する知覚的加速/減速比率をプロットした心理物理関数を求め、その比率が0.5となる点より、知覚的に等速度となる加速度と定義した。

### 3.1.2 実験結果

平均速度条件と身体方向条件のそれぞれの組み合わせに対する主観的な等速度運動点 (PSUM: point of subjective uniform motion)を図 16 に示す。横軸の1つのまともりは各平均速度条件に対応し、縦軸は PSUM を表している。マイナス符号は減速を示す。1つのまともりの中のプロットバーの色の違いは身体方向条件の違いを示している。この結果は観察者7名の平均であり、誤差棒は標準誤差を示す。

この結果から、まず、正立条件のときと比較して、仰向け条件およびうつ伏せ条件のときに、PSUM が負に大きいことがわかる。そして、全条件において、負の加速度の運動を等速度運動として知覚しており、平均速度の増大とともに、PSUM も負に増大していることがわかる。

この結果を統計的に検討するため、平均速度(3条件)×身体方向(仰向け, 正立, うつ伏せ)の2要因分散分析(ANOVA)をおこなった。その結果、平均速度( $F(2, 12) = 14.43$   $p=0.0006$   $\eta^2=0.19$   $\omega^2=0.16$ )と身体方向 ( $F(2, 12) = 5.78$   $p=0.017$   $\eta^2=0.095$   $\omega^2=0.073$ )のそれぞれの条件について有意な主効果が見られ、交互作用も有意であった( $F(4, 24) = 4.62$   $p=0.0066$   $\eta^2=0.023$   $\omega^2=0.017$ )。また、Ryan 法による多重比較を、5%を有意水準としておこなった。その結果、仰向けにおける 32.5[km/h]と 37.5[km/h]( $t=3.97$   $df=36$   $p=0.00033$ )、正立における 32.5[km/h]と 37.5[km/h]( $t=3.53$   $df=36$   $p=0.0012$ )、うつ伏せにおける 32.5[km/h]と 37.5[km/h]( $t=6.07$   $df=36$   $p=0.0000006$ )、35[km/h]と 37.5[km/h]( $t=5.00$   $df=36$   $p=0.000015$ )の平均速度間に有意な差が見られた。また 35[km/h]における仰向けと正立( $t=2.57$   $df=36$   $p=0.015$ )、37.5[km/h]における仰向けと正立( $t=2.67$   $df=36$   $p=0.011$ )、正立とうつ伏せ( $t=4.45$   $df=36$   $p=0.000080$ )の姿勢間に有意な差が見られた。

観察者全員の平均データに対して、物理的等速度運動、すなわち加速度 0 と統計的に有意な差があるかどうかを調べるため、各条件において t 検定をおこなった。その結果、全条件において統計的に有意な差が見られた。

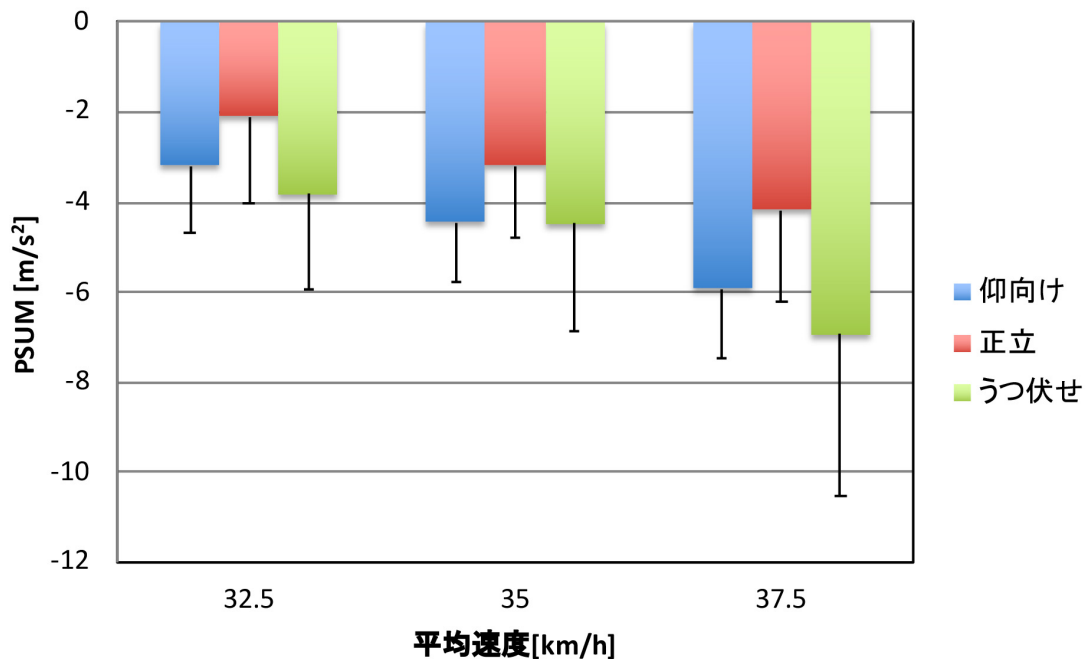


図 16 実験 2-1 結果

### 3.2 実験 2-2 後退運動における等速度知覚

実験 2-2 では、後退運動の知覚における重力方向の影響を調べた。後退運動物体は実験 2-1 と同様に物体の大きさ(視角)変化と両眼視差変化を用いてシミュレートした刺激をディスプレイに呈示し、等速度運動と知覚する運動が持つ加速度(加速度バイアス)を測定する実験をおこなった。身体方向条件、実験装置、実験手順は全て実験 2-1 と同様であった。

#### 3.2.1 実験方法

##### 3.2.1.1 視覚刺激

視覚刺激は実験 2-1 と同様に PC(MacBook Pro, Apple)上で動作する数値演算ソフト(Matlab, MathWorks)およびフリーのアドオン(Psychophysics Toolbox)によって作成した両眼視差が付加された動画であり、半径 5.75[cm]の輝度が一様(片眼像: 17.5[cd/m<sup>2</sup>])な球が、一定の平均速度と加速度を持って後退運動する様子をシミュレートした。運動の平均速度は 27.5, 30.0, 32.5[km/h]の 3 条件あり、加速度は 0, ±3.92, ±7.84, ±11.76[m/s<sup>2</sup>]の 7 条件であった。刺激の運動距離は、観察者から 0.38[m]を始点距離、10.0[m]を終点距離として全条件で一定だった。呈示時間は条件によって異なり最小で 1.07[s], 最大で 1.27[s]だった。背景は一様な灰色であり(6.49[cd/m<sup>2</sup>])、実験中に変化することはなかった。

##### 3.2.1.2 観察者

6 名の観察者が実験に参加した。うち 1 名は著者であり、他 5 名は実験目的に対してナイ

ーブであった。観察者は全員視力正常もしくは矯正視力正常であった。5名のうち2名は実験 2-1にも参加していた。

### 3.2.2 実験結果

平均速度条件と身体方向条件のそれぞれの組み合わせに対する PSUM を図 17 に示す。プラス符号は加速を示す。横軸の1つのまとまりは各平均速度条件に対応し、縦軸は PSUM を表している。1つのまとまりの中のプロットバーの色の違いは身体方向条件の違いを示している。この結果は観察者6名の平均であり、誤差棒は標準誤差を示す。

この結果から、まず、全ての条件で正の加速度の運動を等速度運動と知覚していることがわかる。そして、概ね、仰向け条件、正立条件、うつ伏せ条件の順に、PSUM が正に大きい傾向があることがわかる。

平均速度(3条件)×身体方向(仰向け, 正立, うつ伏せ)の2要因分散分析(ANOVA)をおこなった。その結果、平均速度( $F(2, 12) = 20.46$   $p=0.0003$   $\eta^2=0.18$   $\omega^2=0.16$ )と身体方向( $F(2, 12) = 4.15$   $p=0.049$   $\eta^2=0.12$   $\omega^2=0.088$ )のそれぞれの条件について有意な主効果が見られ、交互作用は認められなかった。しかしながら、Ryan 法による多重比較を、5%を有意水準としておこなったところ、平均速度条件では条件間で有意な差が見られたが(32.5[km/h]と 35[km/h]( $t=2.78$   $df=10$   $p=0.020$ ), 32.5[km/h]と 37.5[km/h]( $t=6.38$   $df=10$   $p=0.000081$ ), 35[km/h]と 37.5[km/h]( $t=3.60$   $df=10$   $p=0.0048$ )), 身体方向条件では条件間に有意な差は見られなかった。また、観察者全員の平均データに対して、物理的等速度運動と統計的に有意な差があるかどうかを調べるため、各条件において t 検定をおこなった。その結果、有意な差があったものを図 17 に\*, \*\*印で示す。

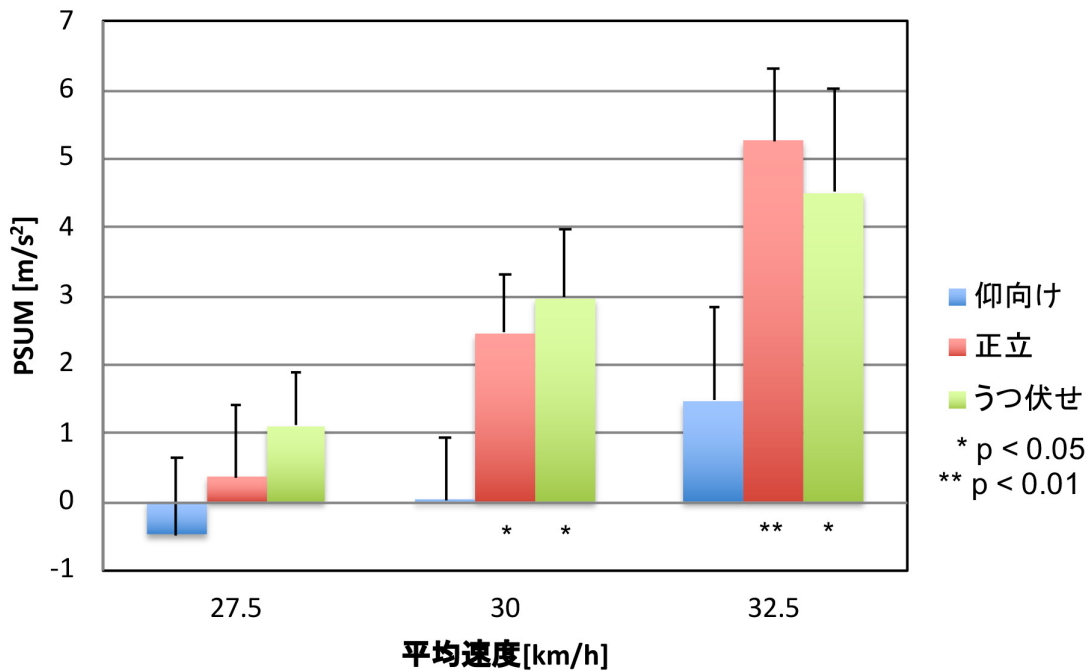


図 17 実験 2-2 結果

### 3.3 実験 2 考察

実験結果から、奥行き方向運動に対する等速度知覚が、身体方向の変化による重力方向と奥行き運動の関係の変化によって影響を受けることが示された。そして多くの条件において、運動方向が重力方向と一致しているとき、より加速した運動を等速度運動と知覚し、運動方向が重力方向と反対のとき、より減速した運動を等速度運動と知覚していた。例えば、うつ伏せのときの後退運動は重力方向と一致した方向に運動しており、正立のときと比較して PSUM が正に増加した。また、うつ伏せのときの接近運動と仰向けの際の後退運動は重力方向と反対の方向に運動しており、正立のときより PSUM が負に増加した。このバイアスは、実験 1 で見られた重力方向情報による等速度知覚へのバイアスと同様の傾向を示しており、前額平行面運動と奥行き方向運動で、等速度知覚が重力方向情報によって与えられるバイアスの傾向は大きく変わらないことが示唆される。

しかし、接近運動における仰向け条件の際の結果は、上述のような重力方向との対応による傾向とは異なるものであった。すなわち、正立条件に対して PSUM が負に増加したときに、等速度と知覚された(図 16)。この理由の 1 つとして、観察者の身体に対しての影響の度合い、危険度とも呼べるようなものが影響していると考えた。今回の実験で用いたような自身へ向かってくる接近運動する物体を観察したとき、「危険である」、「避けよう」という判断がされたとき、その物体速度を実際よりも速く知覚させることで、より素早くその運動に対して行動をおこなうことができると考えられる。実環境中で加速運動が想定される仰向けでの接近運動を観察した場合、この危険度による影響が他の身体方向条件よ

りも大きかったことで重力方向との対応による傾向とは異なる結果となったのではないだろうか。Ono and Kitazawa(2010)も同様の考えを提案し、その影響を検討している[33]。彼らは 2 つの画像を用いた仮現運動刺激を用いて、移動物体の時間知覚について調べており、観察者に対して衝突が予想される運動経路のとき知覚時間が短くなるということを報告している。

危険度による影響により、今回の実験結果の説明が可能であるか調べるため、補足実験をおこなった。実験 2-1 の正立条件において球の軌道を左右にそれぞれ 20[cm]平行移動させた条件を追加し、平均速度 35[km/h]の接近運動条件のみで実験をおこなった。観察者自身の正面の軌跡上の運動は、観察者に衝突するため危険度が高く、左右に平行移動した軌跡上の運動は、頭の左右を通過し、衝突しないので、危険度は低いと解釈されると予想される。観察者は 7 名であり、うち 2 名が実験 2-1 に参加していた。その他の条件や環境は実験 2-1 と同様であった。

実験結果を図 18 に示す。これは、球の運動軌道条件に対する PSUM である。マイナス符号は減速を示す。観察者によって応答の傾向が 2 つに分かれたため、それぞれのグループの結果を横軸の 1 つのまとまりに分けた。左は、上記の危険度による応答の予測と矛盾のない応答をした A グループ、右は、危険度による予想と矛盾する応答をした B グループである。縦軸は図 16, 17 と同様に、PSUM を表している。1 つのまとまりの中のプロットバーの色の違いは球の運動軌道条件の違いを示している。この結果は A グループが観察者 4 名、B グループが観察者 3 名の平均であり、誤差棒は標準誤差を示す。

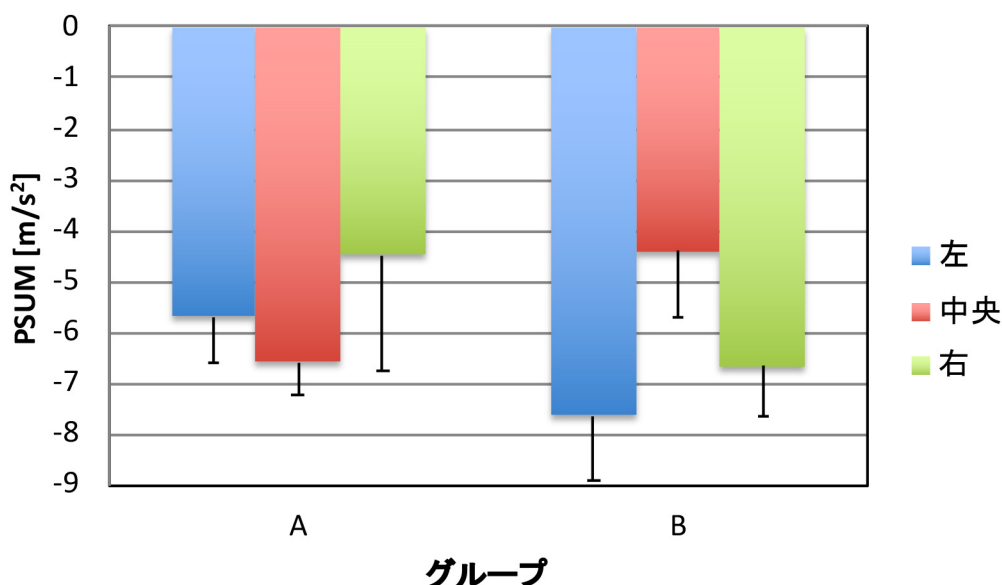


図 18 危険度による PSUM の変化

この結果から、A グループでは球の衝突が想起されると考えられる中央軌跡条件で左右軌跡条件と比較して、より減速した運動を等速度運動と知覚していたが、逆に B グループでは左右条件のときに中央条件よりも減速した運動を等速度運動と知覚していたことがわかる。統計的な解析として、グループ毎に、右軌道と左軌道の条件は同等とみなし、それらの結果を平均した。そして、その値と中央の値が統計的に異なるか確かめるため、t 検定をおこなったところ両方のグループでそれぞれ有意傾向が見られた(A : (t=-2.55 df=3 p=0.084), B : (t=3.62 df=2 p=0.069))。

補足実験 1 の結果、危険度の違いによって等速度知覚が変化する人とならない人がいる可能性があることがわかったが、補足実験の観察者の内 A グループに含まれる 2 名のみが実験 2-1 に参加しており、実験 2-1 で見られた結果、すなわち仰向けの接近運動における重力方向との対応による傾向の違いが、危険度によるものなのか明らかとは言えない。そこで、補足実験 1 に参加した観察者について、実験 2-1 との対応を個別に検討し、グループの違いによって結果に違いがあらわれるか調査した。実験 2-1 をおこなっていない観察者、A グループ 2 名、B グループ 3 名、計 5 名には新たに実験 2-1 とほぼ同様の実験(補足実験 2)を、平均速度 35[km/h]の条件のみをおこなった。実験 2-1 に参加した観察者 2 名については、実験 2-1 のその条件の結果を用いた。

補足実験 2 の結果を図 19 に示す。この結果を見ると、補足実験 1 において危険度の違いによって等速度知覚が変化した A グループは、実験 2-1 と同様の傾向を示したが(図 16)、危険度の違いによって等速度知覚が変化しなかった B グループでは、仰向け条件において等速度と知覚される運動の加速度は、正立、うつ伏せ条件と比較して正に増大した。これらの傾向は、実験 2-1 で見られた重力方向との対応による傾向とは異なる影響が、危険度によるものであるという考えと定性的に矛盾しない。しかしながら、統計的な解析として身体方向条件を要因とした ANOVA をグループ毎におこなった結果、両方のグループで有意な差は認められなかった(A : (F(2, 6) = 2.31 p=0.18  $\eta^2=0.16$   $\omega^2=0.075$ ), B : (F(2, 6) = 3.36 p=0.14  $\eta^2=0.17$   $\omega^2=0.090$ ))。

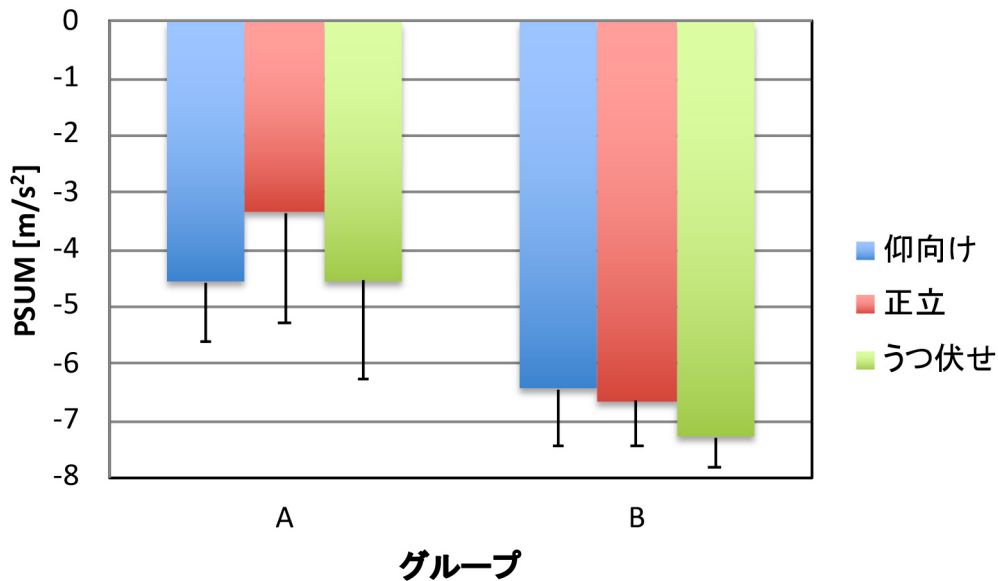


図 19 身体方向における PSUM への危険度の影響

接近運動刺激を用いた実験 2-1 では全条件において負の加速度の運動を等速度運動と知覚し、平均速度が増加すると、PSUM が負に増大した。また、後退運動刺激を用いた実験 2-2 では反対にほとんどの条件において正の加速度の運動を等速度運動と知覚し、平均速度が増加するとより PSUM が正に増大した。これらの結果は、重力による影響ではなく、奥行き運動における手がかりが距離によって急激に変化することが大きな原因だと考えられる。奥行き運動の速度知覚は運動対象の視差(輻輳)変化と大きさ(視角)変化手がかりに大きく依存すると考えられる。本実験では、片眼に映る画面上の球の視角  $\theta$  は次の式で求められる。

$$\theta \cong \frac{s}{d} \text{ [rad]} \quad (1)$$

$d$  は物体距離、 $s$  は物体サイズである。また、視差(輻輳角)  $\omega$  は、

$$\omega \cong \frac{I}{d} \text{ [rad]} \quad (2)$$

の式で計算することができる。I は眼間距離である。式(1)、(2)と実験 2-1、2-2 で用いた刺激の運動距離範囲、大きさ、眼間距離を用いて、それぞれの実験における視角と輻輳角の変動の様子を図 20 に示す。これより大きさ変化と視差変化の両方が距離に反比例して変化することがわかる。そのため接近運動では、物体距離 3[m]あたりまで視角や視差の変化が小さく、そこから大きく変化し、その後それらの変化が緩やかになった。このため各手がかりの知覚的变化が、距離によるそれら手がかりと奥行き運動量との対応の変化を完全には補正できず、各手がかりの物理的变化に直接依存するため、接近運動では運動物体の知覚が加速運動になり、後退運動では逆に減速運動と知覚されたのではないだろうか。



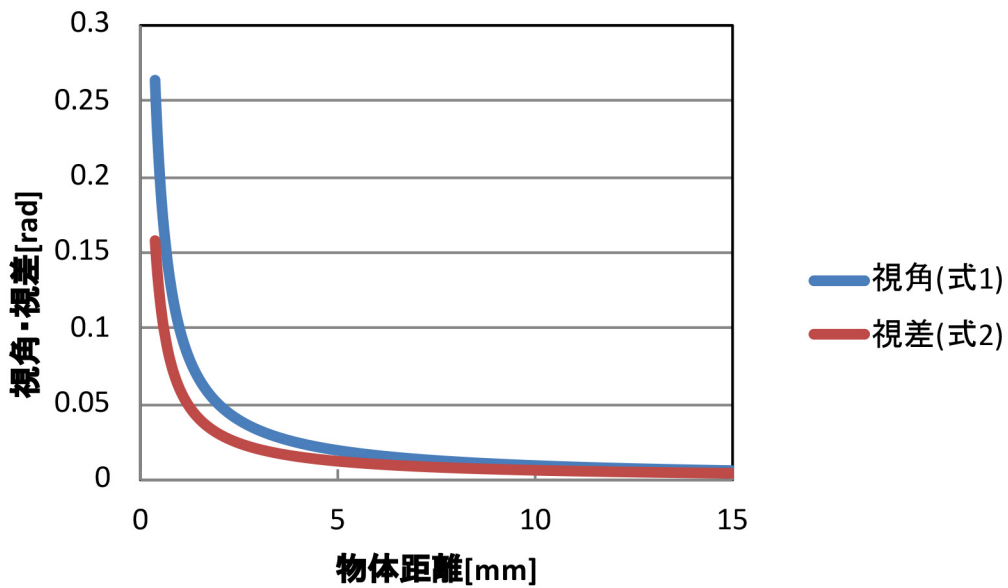


図 20 本実験の物体移動距離における視角と視差の変化

実験 2 の結果から奥行き方向の運動の等速度知覚において、身体に対する重力方向が影響することが示された。通常的环境において重力加速度の影響がない、重力方向と直交した運動方向における知覚的等速度運動対象の持つ加速度と比較して、多くの条件において、重力方向と運動方向が一致している場合には、より加速した運動を等速度運動と知覚し、重力方向と運動方向が反対の場合にはより減速した運動を等速度運動と知覚した。しかし、重力方向と運動方向が一致した接近運動のときのみ、この傾向とは異なる知覚を示した。そして、補足実験を行った結果、等速度知覚は重力方向だけでなく危険度によっても影響されると考えられた。

## 第4章 接近運動の等速度知覚における視覚情報の影響

実験2の結果、奥行き方向の運動における等速度知覚に前庭・体性感覚からの重力方向情報が影響を与えることが示唆された。実験3では、前庭・体性感覚に加え、Visual polarityからの重力方向情報が入力されたときに、接近運動の等速度知覚が影響を受けるか明らかにすることを目的とした。実験2と同様に、実際に身体の方角を変化させることによって身体にかかる重力方向を変化させ、同一の視覚刺激を呈示して主観的な等速度運動点(PSUM: point of subjective uniform motion)を測定する実験を、Visual polarityによる重力方向情報を持つ様々な背景でおこなうことで身体方向とVisual polarityからの重力方向情報の等速度知覚への影響を調べた。実験1および実験2の結果から、前庭・体性感覚からの重力方向情報の前額平行面運動および奥行き方向運動の等速度知覚へのバイアスは同様の傾向を持つことが示された。したがって、奥行き方向運動における等速度知覚へのVisual polarityの影響も実験1で見られたバイアスと同様の傾向、Visual polarityの示す重力方向と一致した方向の運動はより加速した運動を等速度と知覚し、Visual polarityの示す重力方向に反する方向の運動はより減速した運動を等速度と知覚する傾向が見られると予想される。身体方向条件と実験装置は実験2-1と同様である。

### 4.1 実験3方法

#### 4.1.1 視覚刺激

視覚刺激はPC(MacBook Pro, Apple)上で動作する数値演算ソフト(Matlab, MathWorks)およびフリーのアドオン(Psychophysics Toolbox)によって作成した動画であった。

運動刺激は、半径 5.75[cm]の球が一定の平均速度と加速度で接近運動する様子をシミュレートしたものであり、リフレッシュレート 60[Hz]のディスプレイ上に呈示した。この時、物体の大きさ(視角)および両眼視差の変化を計算、付加して呈示した。運動の平均速度は 35.0[km/h]であり、加速度は 0,  $\pm 1.96$ ,  $-3.02$ ,  $-5.88$ ,  $-7.84$ ,  $-9.8$ [m/s<sup>2</sup>]の7条件であった。刺激の運動距離は、観察者から 15.0[m]を始点距離、0.38[m]を終点距離として全条件で一定であった。呈示時間は条件によって異なり最小で 1.37[s]、最大で 1.65[s]であった。

背景刺激は、実際の環境の風景をデジタルカメラで撮影後、そのまま眼間距離である 6[cm]平行移動させてもう一度撮影することにより得られる左眼用画像と右眼用画像の2枚から作成した3Dの自然画像(1920×1080[pixel]だった。重力方向に沿った(下向きで撮影した)画像(下方向)、反対方向の(上向きで撮影した)画像(上方向)、重力方向に直交する方向で撮影した画像(水平方向)の3つの方向の撮影条件があり、それぞれ2種類ずつの計6画像があった(図21)。



図 21 実験 3 背景刺激

#### 4.1.2 観察者

5名の観察者が実験に参加した。うち1名は著者であり、他4名は実験目的に対してナイスであった。観察者は全員視力正常もしくは矯正視力正常であった。

#### 4.1.3 実験手順

観察者のテンキーの押下により刺激が自動的に開始され、刺激観察後、刺激の運動が加速して知覚されたか減速して知覚されたかをテンキーで強制二択応答した。実験は加速度7条件の各刺激に対して10試行ずつ、身体方向条件毎におこない、これを背景毎におこなった。刺激の呈示順は各身体方向条件内でランダムだった。身体方向条件と背景条件の順番は観察者毎にランダムにおこなった。観察者は試行間に自由に休憩をとることが可能だった。得られた観察者の応答から、実験2と同様にPSUMを求めた。

## 4.2 実験 3 結果

身体方向条件と背景条件のそれぞれの組み合わせに対する PSUM を図 22 に示す。横軸の 1 つのまとまりは各背景条件に対応し、縦軸は知覚的等速度運動が持つ加速度を表している。マイナス符号は減速を示す。1 つのまとまりの中のプロットバーの色の違いは身体方向条件の違いを示している。この結果は観察者 5 名の平均であり、誤差棒は標準誤差を示す。

実験 3 では背景の種類と背景内の Visual polarity が示す方向に対応関係がないため、そのまま解析をおこなうことができない。そこで、まず背景の種類によって等速度知覚が変化しているかを解析し、変化がなければ背景の種類について平均化することにした。背景内の視覚的文脈が示す方向毎に身体方向(仰向け, 正立, うつ伏せ)×背景の種類(2 種類)の ANOVA をおこなった。その結果、どの背景方向においても背景の種類の有意な主効果は見られず、交互作用も認められなかった(上(背景の種類):  $F(1, 4) = 1.36$   $p=0.31$   $\eta^2=0.050$   $\omega^2=0.011$ , 上(交互作用):  $F(2, 8) = 0.25$   $p=0.79$   $\eta^2=0.0011$   $\omega^2=-0.0030$ , 水平(背景の種類):  $F(1, 4) = 0.0064$   $p=0.81$   $\eta^2=0.0028$   $\omega^2=-0.035$ , 水平(交互作用):  $F(2, 8) = 1.50$   $p=0.28$   $\eta^2=0.032$   $\omega^2=0.0092$ , 下(背景の種類):  $F(1, 4) = 0.021$   $p=0.89$   $\eta^2=0.0012$   $\omega^2=-0.050$ , 下(交互作用):  $F(2, 8) = 0.047$   $p=0.95$   $\eta^2=0.0014$   $\omega^2=-0.026$ )。解析の結果から、背景の種類によって等速度知覚が変化しないことが示されたため、背景の種類の結果を観察者毎に平均化した。この結果を図 23 に示す。グラフの見方は図 22 と同様である。

まず、全条件において PSUM が負の加速度であることがわかる。これは実験 2 の接近運動の結果と同様の傾向である。また、仰向けとうつ伏せで正立よりも負に大きい加速度のときに等速度と知覚する傾向が上と水平の背景を呈示しているときに見られるがこの身体方向の変化による傾向も実験 2 の接近運動で見られた傾向と同様である。しかしながら、Visual polarity が示す方向によっては一貫して変化がないように見える。身体方向(仰向け, 正立, うつ伏せ)×背景方向(上, 水平, 下)の ANOVA は身体方向の有意な主効果のみを示した( $F(2, 8) = 12.95$   $p=0.0031$   $\eta^2=0.032$   $\omega^2=-0.024$ )。Ryan 法による多重比較を、5%を有意水準としておこなった結果、仰向けと正立( $t=2.57$   $df=8$   $p=0.033$ )、正立とうつ伏せ( $t=5.09$   $df=8$   $p=0.00094$ )の身体方向間に有意な差が示された。

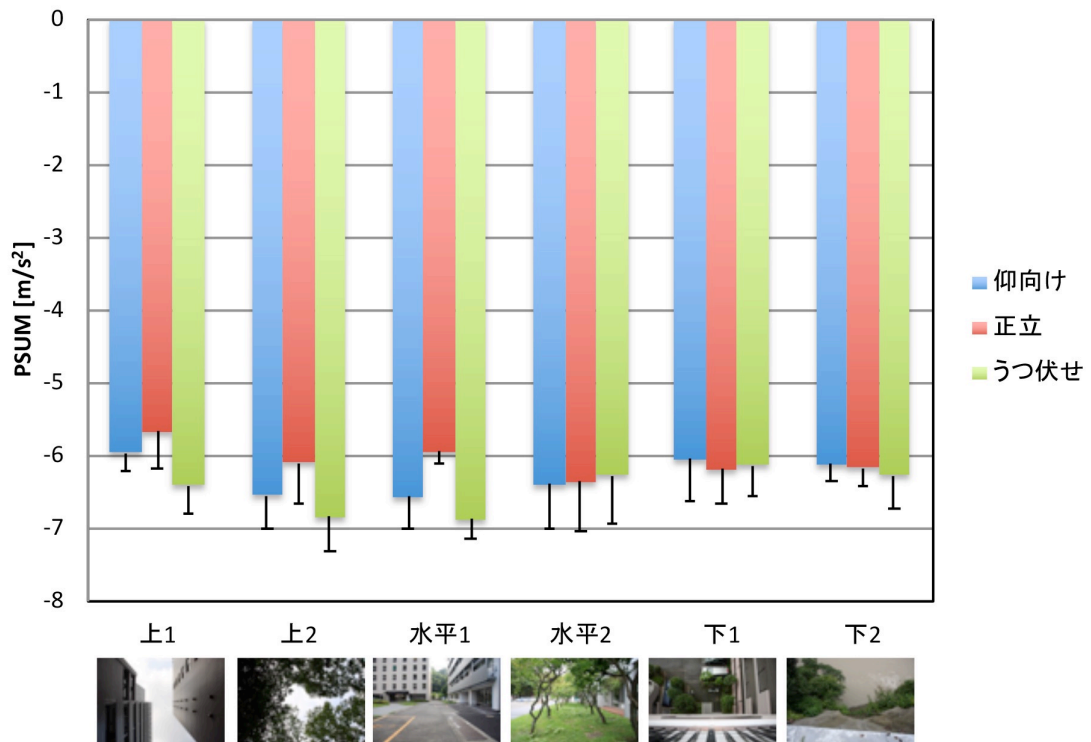


図 22 背景 6 条件における身体方向条件毎の PSUM

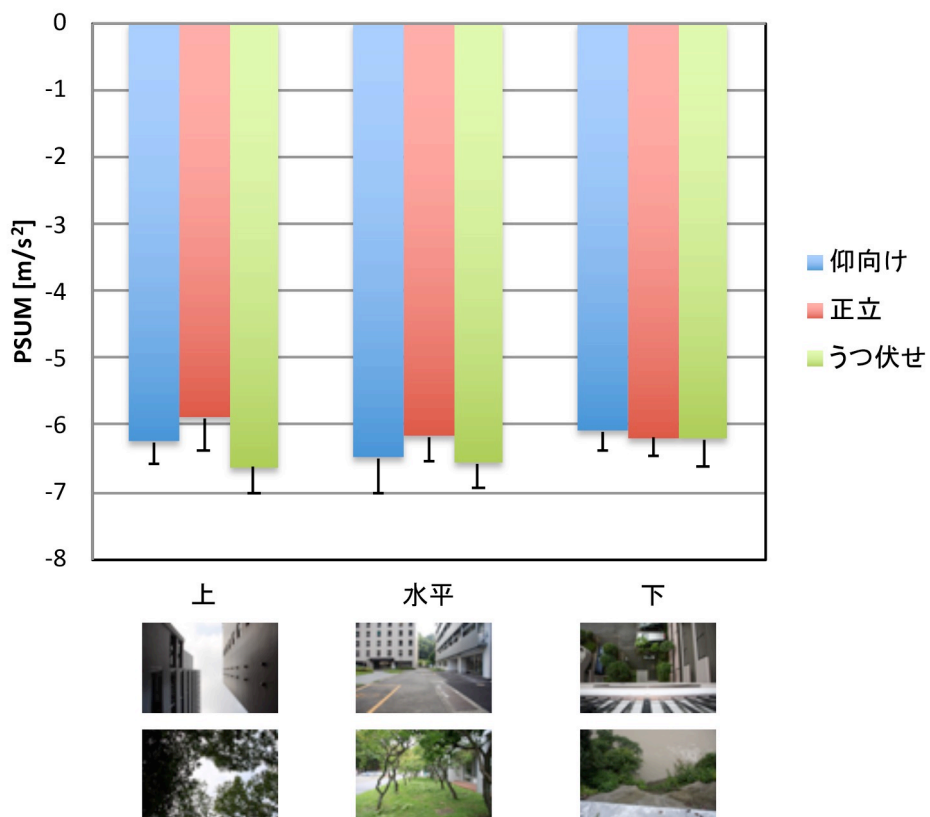


図 23 背景方向における身体方向条件毎の PSUM

### 4.3 実験 3 考察

実験 2 の接近運動で見られた身体方向の変化による等速度知覚へのバイアスが実験 3 でも同様に見られた。正立よりもうつ伏せのときに PSUM が負方向に大きくなるのは、うつ伏せにおける接近運動が重力に反する運動となり重力加速度によって物体運動が減速することが想定されるためである。正立よりも仰向けの際に PSUM が負方向に大きくなるのは、実験 2 で考察をおこなった危険度による影響だと考えられる。

Visual polarity による方向情報は、接近運動の等速度知覚には影響を与えなかった。水平方向の視覚シーンにおいて Visual polarity は固有の位置関係や構造情報等から前額平行面上における方向情報を提供する[4]が、奥行き方向に一意的な方向を決定付ける情報は自然界には存在しない。重力軸と視線方向が一致する方向の視覚シーンでは空あるいは地面の存在が奥行き方向の情報となりうると考えたが、明確な差は見られなかった。また、今回の実験では両眼視差を付与していたため、両眼視差の勾配から方向情報を得ることができたが、視差勾配の情報からは一意的な方向情報を得ることはできない。したがって、視覚情報は奥行き方向の情報を持たない可能性がある。序論の重み付き線形和において先行研究として紹介した上下方向知覚や SVV の研究では、前額平行面上の変化となる Visual polarity のロール方向の変化について様々な議論がなされているが、奥行き方向の変化となるピッチ方向の変化についてはほとんど研究がないため、今後検討する必要がある。

また、重みの変化によっても結果を説明できるかもしれない。前額平行面上の運動と奥行き方向の運動で用いられる奥行き方向の運動において、身体方向は奥行き方向とは常に直交しているため、身体の上下の情報は奥行き方向運動の等速度知覚への影響が非常に小さいと考える。したがって、奥行き方向運動の等速度知覚に影響を与えるのは、前庭・体性感覚からの方向情報と Visual polarity からの方向情報であるが、Visual polarity からの方向情報は重力に影響を受けた実環境の方向情報から推定していることが示唆されているため[4]、基本的には前庭・体性感覚が示す重力方向と Visual polarity が示す重力方向は一致するはずである。そのため、前庭・体性感覚からの重力方向情報の信頼性が高いとき、Visual polarity による方向情報は、奥行き運動においては重みが非常に低い、あるいは用いられない可能性がある。そのため、実験 1 と異なり、仰向けやうつ伏せといった身体方向が重力方向と直交している身体方向条件においても、等速度知覚にバイアスは見られなかったのではないだろうか。Visual polarity による方向情報が用いられるかどうかは、前庭・体性感覚への入力が非常に小さくなる、微小重力環境での実験によって調べることができる。しかしながら、微小重力環境における前額平行面運動において Visual polarity が行動応答に影響を与えることが報告されているが[34]、奥行き方向の運動での研究はまだないため、今後検討していく必要がある。

## 第5章 接近運動の等速度知覚における過重力環境の影響

実験 2 の結果から奥行き方向の運動における等速度知覚は、前庭・体性感覚からの重力方向情報に影響を受けることが示唆された。前庭・体性感覚は身体にかかる力の方向だけではなく大きさも検出することができる。身体にかかる重力の大きさを操作したとき、前庭・体性感覚からの大きさの情報の変化によって奥行き方向運動の等速度知覚は影響を受けるだろうか。本章で述べる実験 4 では前庭・体性感覚からの重力の大きさの情報の変化によって、接近運動の等速度知覚が影響を受けるか明らかにすることを目的とした。同一の視覚刺激を異なる姿勢、異なる重力環境で観察し、重力方向と重力の大きさの変化によって知覚的等速度運動となる運動のバイアスがどのように変化するか調べた。実験結果の予測を図 24 に示す。横軸が環境重力条件、縦軸が主観的な等速度運動点 (PSUM: point of subjective uniform motion) を示しており、色の違いが姿勢の違いを示している。正立条件では環境重力が増加しても奥行き方向の運動には影響しないため、PSUM は環境重力条件によっては変化しないと考えられる。一方で、仰向け条件では環境重力が増加することで、奥行き方向の運動にかかることが想起される重力加速度も増加するため、PSUM が負に増加することが予測される。

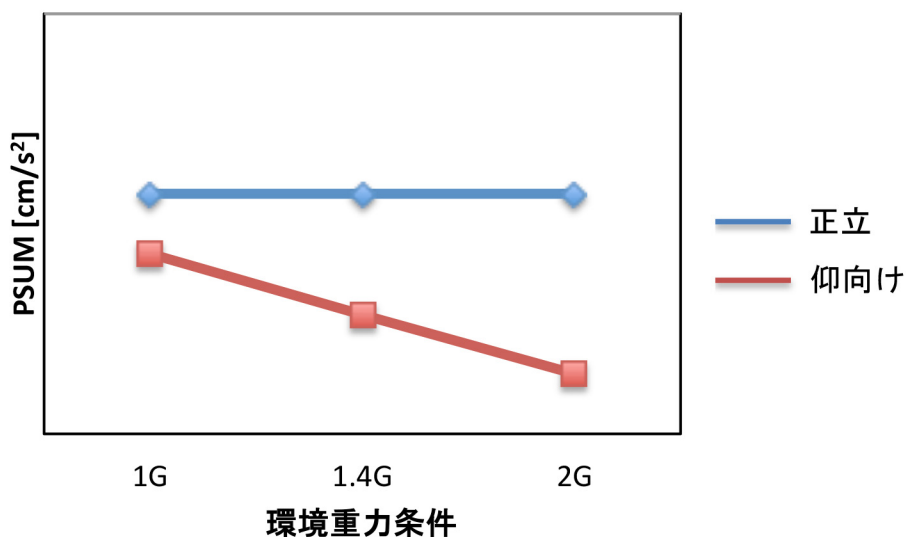


図 24 実験 4 の結果予測

## 5.1 実験 4 方法

### 5.1.1 視覚刺激

視覚刺激は PC(MacBook Pro, Apple)上で動作する数値演算ソフト(Matlab, MathWorks)およびフリーのアドオン(Psychophysics Toolbox)によって作成した動画であった。半径 5.75[cm]の球が一定の平均速度と加速度で接近運動する様子をシミュレートし、リフレッシュレート 60[Hz]のディスプレイ上に呈示した。この時、物体の大きさ(視角)および両眼視差の変化を計算、付加して呈示した。ただし、陰影情報は付加せず運動対称の輝度は常に一樣、一定であった。運動の平均速度は 32.5, 35.0[km/h]の 2 条件があり、加速度は 0,  $\pm 2.94$ ,  $\pm 5.88$ ,  $\pm 8.82$ [m/s<sup>2</sup>]の 7 条件であった。刺激の運動距離は、観察者から 15.0[m]を始点距離、0.38[m]を終点距離として全条件で一定であった。呈示時間は条件によって異なり最小で 1.37[s]、最大で 1.65[s]であった。背景は一樣な灰色であった。

### 5.1.2 実験装置

実験は入間航空自衛隊空医学実験隊空間識科所有のフライトシミュレータによっておこなわれた。実験装置の写真を図 25 に示す。この装置は人間が乗るコックピットが実際の重力方向の周りに水平回転運動をすることにより遠心力を発生する。フライトシミュレータ回転時の回転方向と遠心力の関係を図 26 に示す。図 25 における大きな暗い灰色の四角い箱が図 26 における回転軸である。コックピットは回転軸を中心に等速円運動をおこなうため観察者には回転軸とは反対の方向に遠心力が発生することになる。またそのコックピットはヨー方向、ロール方向、ピッチ方向の各方向に自由に傾きを制御できるため、人間にかかる力の方向を変えることができた。この装置の制御は専属のオペレータによっておこなわれた。

実験はこのフライトシミュレータの遠心力発生装置によって 1G と異なる重力環境を実現しておこなわれた。重力環境のシミュレート方法を図 27 に示す。まず、コックピットが等速円運動をするように装置を制御することにより、観察者に対して一定方向の遠心力を与えた。これによって、観察者の体には実際の重力 1G と遠心力の 2 つの力の合力がかかっていた(図 27 左)。この状態で、観察者の身体の長軸の方向が合力の方向と同じになるようにコックピットを傾けることで、観察者の身体の長軸の方向に対して 1G 以上の力を発生させた(図 27 右)。

刺激はコックピット内に設置されている液晶プロジェクターによってコックピット内部の曲面状のスクリーンに解像度 800×600 で呈示された。両眼立体視をおこなうためにアナグリフ方式で刺激を呈示した。観察者は赤青メガネを装着するか、観察者自身のメガネに赤と青のフィルタを貼り付けて実験をおこなった。観察者はベルトによって椅子に固定され、目線の高さがスクリーンの中央と同じ高さになるように調整された。観察者とスクリーンとの間の視距離は 0.95[m]であった。観察者の応答はテンキーによって取得された。



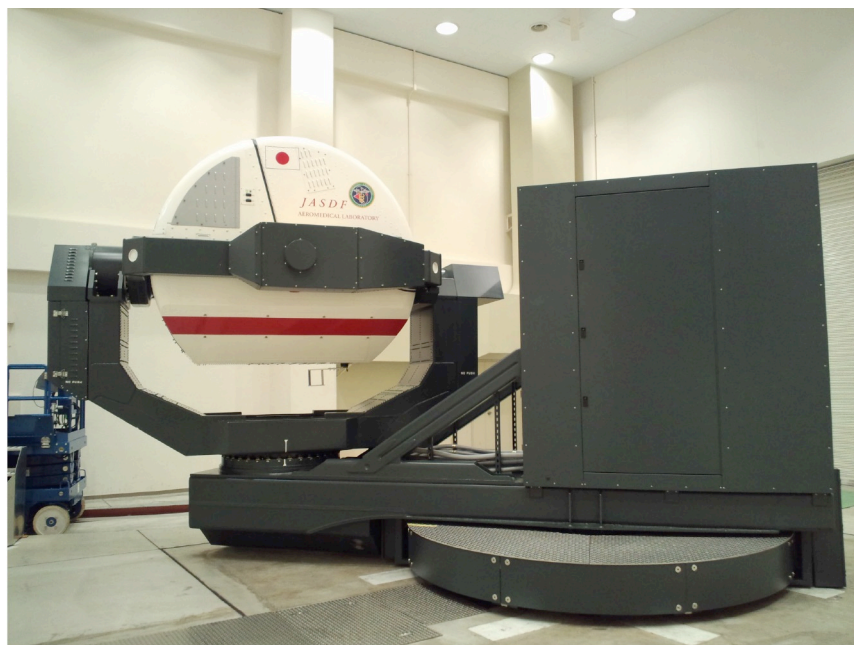


図 25 フライトシミュレータ

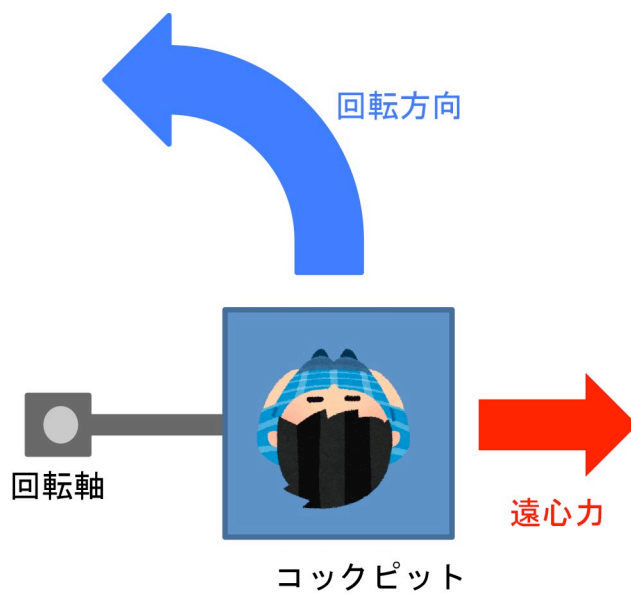


図 26 フライトシミュレータ回転時の略図

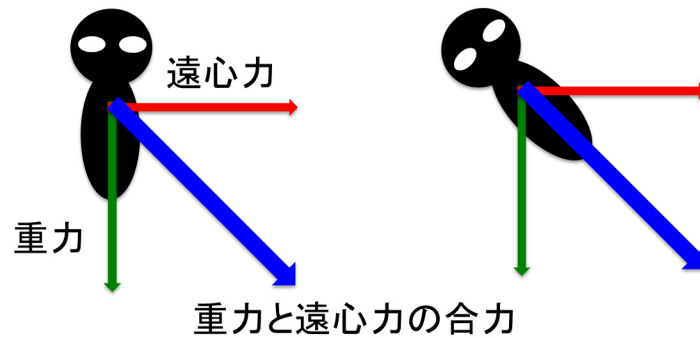


図 27 過重力環境のシミュレート方法

### 5.1.3 身体方向条件と重力環境条件

身体方向条件は仰向け、正立の 2 条件があり、重力環境は 1.0G, 1.4G, 2.0G の 3 つの重力環境があった。それぞれの条件で視覚刺激(接近運動)と身体の相対的な関係は常に一定であった。それぞれの条件における視覚刺激と身体、重力方向との関係性を図 28 に示す。

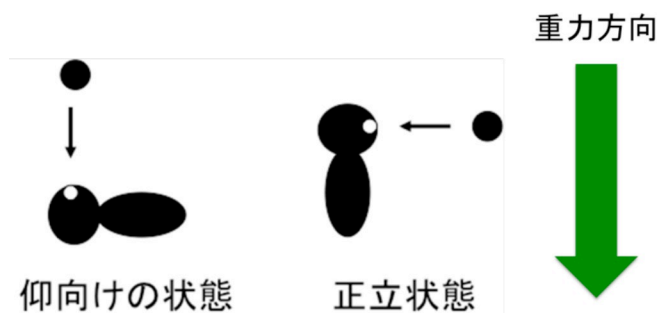


図 28 実験 4 における身体方向条件と重力方向

### 5.1.4 観察者

5 名の観察者が実験に参加した。うち 1 名は実験内容を知っていたが、他 4 名は実験目的に対してナイーブであった。観察者は全員視力正常もしくは矯正視力正常であった。

### 5.1.5 実験手順

実験の際の注意として、観察者は頭部を横方向に回転しないように教示された。これはコックピットが回転運動をしている最中に、頭部を横方向に回転させた場合、前庭感覚器に大きな慣性力が働き、乗り物酔いの感覚が生じるためであった。また、重力環境を変化させるためにコックピットを回転させるもしくは停止させる、等速度回転の速度を変化させる等の観察者にコックピットの速度変化による加速度がかかる場面では観察者はヨー方向やピッチ方向への回転運動を知覚することがあり、それによる乗り物酔いの可能性があることや、重力が増加した条件では血液が体の下方にたまりやすく、貧血を起こしやすく

なることなどを注意し、体調不良となった場合、即座に装置オペレータに伝えるように事前に観察者に説明をおこなった。

観察者のテンキーの押下により刺激が自動的に開始された。刺激観察後、刺激の運動が加速して知覚されたか減速して知覚されたかをテンキーで強制二択応答した。実験は 14 条件(2(平均速度)×7(加速度))の各刺激に対して 6 試行ずつ、合計 84 試行を 1 セッションとし、それを身体方向条件、重力環境条件毎におこなった。実験は、重力環境をランダムに変化させるのは装置の都合上時間がかかり、かつ観察者への負担が大きいことから、各条件 2 試行、合計 28 試行を 1 ブロックとして、正立状態で 1.0G、1.4G、2.0G の順番でおこなったあと、仰向け状態で 1.0G、1.4G、2.0G の順番で休憩を挟みながら 3 ブロックおこなわれた。刺激の呈示順は各ブロック内でランダムであった。使用した実験施設では、過重力環境(今回の実験では 1.4G、2.0G)は連続しておよそ 2 分以内にすることが推奨されていたため、それを守るように条件設定をした。また、重力環境や身体方向を変化させる際は実験者から観察者に事前に連絡をおこなった。

得られた観察者の応答から、各条件において刺激の運動が加速して知覚されたと答えた割合を算出した。それを身体方向条件と平均速度条件の組み合わせ毎に、刺激の持つ加速度を変数としてプロットし、知覚確率曲線を求めた。その知覚確率曲線に対してロジスティック関数をフィッティングし、知覚的等速度運動、すなわち加速に知覚されたと答えた割合が 0.5 のときの刺激加速度を求めた。その値を、実験 2-1 と同様に等速運動と知覚したときの加速度と定義した。

## 5.2 実験 4 結果

平均速度条件と身体方向条件、重力環境条件のそれぞれの組み合わせに対する PSUM を図 29 に示す。横軸は重力環境条件を示し、縦軸は PSUM を表している。マイナス符号は減速を示す。プロットバーの色の違いは身体方向条件と平均速度条件の組み合わせの違いを示している。各パネルは観察者 5 名それぞれの結果を表している。

この結果から、重力環境の違いによる観察者間での一貫した傾向は見受けられず、実験 2 と異なり身体方向条件の違いによる一貫した傾向も見られなかった。減速運動を等速度運動と知覚する傾向は実験 2 と同様に見られた。

この傾向は、統計的にも示された。平均速度(32.5[km/h], 35[km/h])×身体方向(正立, 仰向け)×重力環境(1G, 1.4G, 2G)の 3 要因 ANOVA をおこなった結果、平均速度のみに有意な主効果が見られた( $F(1, 4) = 17.58$   $p=0.014$   $\eta^2=0.083$   $\omega^2=-0.067$ )。身体方向や重力環境の有意な主効果は見られず、交互作用も認められなかった。

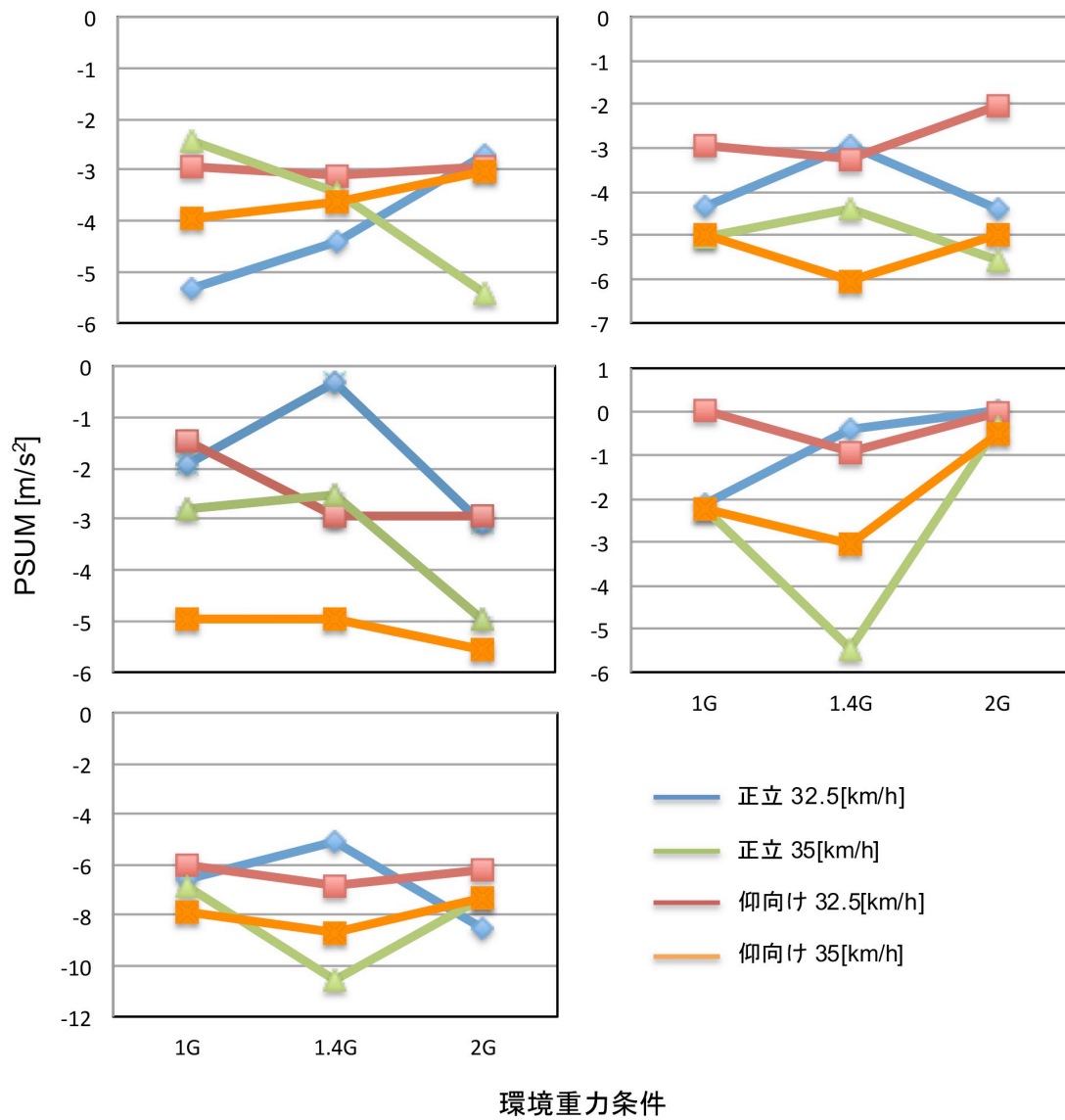


図 29 各重力環境条件における条件毎の PSUM

### 5.3 実験 4 考察

実験 2 の接近運動における結果と同様に平均速度が増加すると、減速運動を等速運動と知覚するという結果が得られた。しかしながら、実験 2 の接近運動の正立と仰向けの結果で見られた身体方向間における等速度知覚への一貫した傾向は見られなかった。実験 4 では実験 2 とは異なり、頭部が固定されていなかった。実験 2 でも指摘したが、接近運動では真正面の軌道と斜めの軌道では知覚が変化する。そのため、運動刺激である球と頭部の関係が刺激呈示毎に異なったことが、身体方向による影響において一貫した傾向が見られなかったことの原因の 1 つと考えられる。

また、重力環境の違いによる一貫した変化も見られなかった。実験 4 の条件である重力環境の大きさ、特に過重力というのは普段 1G の世界で生活している我々にとって、異常状態であると捉えることができる。そのため、前庭感覚や体性感覚からの重力情報を無視した、もしくは過小評価した可能性が考えられる。しかし、過重力環境下での前額平行面上での運動知覚を調べた研究[35]では、重力の大きさによって加速度バイアスが大きくなったという結果が得られている。このことから重力の大きさに関する情報が無視されていたとは考えにくい。接近運動の運動検出閾値が約 1' であるのに対し、前額平行面上の運動における検出閾値は 10' 以下であることが示されている[36,37]。また過重力環境においては、眼球調節機能の失調や視力、視覚の差異閾の低下等の現象がおこることが報告されている[38]。このことから、異常状態の重力情報は過小評価されるが、額面平行面上の運動の場合はその影響が現れるが、奥行き運動の場合は重力環境の変化による知覚の変化が小さく、弁別閾値を下回ったために、結果に表れなかったという説明が可能である。

## 第6章 総合考察

実験1では、前庭・体性感覚からの重力方向情報と Visual polarity が示す方向情報が前額平行面上の運動における等速度知覚にどのような影響を与えるかを検討した。その結果、前庭・体性感覚からの重力方向情報によって前額平行面上の上下の運動方向にバイアスが見られることが確認された。また、重力方向と身体方向が分離するときに前額平行面上の運動において Visual polarity が示す垂直方向に沿った運動の等速度知覚が変化することが示された。

次に、前額平行面運動から拡張し、奥行き方向の運動においても等速度知覚が重力方向情報に影響を受けるか調べた。まず、実験2では、奥行き方向運動である接近運動と後退運動において前庭・体性感覚からの重力方向情報が等速度知覚に影響を与えるかを検討した。その結果、奥行き運動においても前庭・体性感覚からの重力方向情報によって等速度知覚にバイアスが見られることが示されたが、接近運動においては身体に対しての影響の度合いと考えられる危険度による影響も見られた。さらに、Visual polarity が示す方向情報によって奥行き運動である接近運動の等速度知覚が影響されるかを実験3で調べた。しかしながら、接近運動の等速度知覚においては Visual polarity が示す方向情報による影響を示すようなバイアスは見られなかった。

実験4では前庭・体性感覚から得られる重力の方向情報に加えて、身体にかかる重力の大きさの変化による感覚情報の変化によっても、奥行き運動である接近運動の等速度知覚が影響されるかどうかを検討した。その結果、接近運動の等速度知覚においては重力の大きさの変化による影響を示すような一貫した傾向は見られなかった。

### 6.1 方向情報が等速度知覚に与える影響

実験1の結果から、座位における前額平行面上の運動における等速度知覚において、上下の運動方向間にバイアスが見られた。また、実験3の結果から、奥行き方向の運動における等速度知覚において、身体方向の変化によるバイアスが見られた。実験1でバイアスが見られた座位における前額平行面上の垂直方向と重力方向は同軸であり、実験3でバイアスが見られた仰向け姿勢とうつ伏せ姿勢における奥行き方向運動も重力方向と同軸であった。これらのことから、物体運動の等速度知覚が身体にかかる重力の方向に影響を受けることが示唆される。序論で述べたように、身体にかかる重力の方向は前庭感覚および体性感覚から得られるため、物体運動の等速度知覚は前庭・体性感覚からの重力方向情報に影響を受けるということである。

また、実験1で見られた座位における前額平行面上の垂直方向は身体方向とも同軸である。実験1-3でおこなった仰向けと横臥位の結果から、重力方向と身体方向が分離しているときに、身体方向と同軸となる前額平行面上の運動方向間にバイアスが見られたことから、

前額平行面上の運動における等速度知覚は身体方向の上下によっても影響を受けることが示唆される。一方で、奥行き運動における等速度知覚も身体方向の上下によって影響を受けるだろうか。今回の実験結果からは結論を出すことはできないが、おそらくは影響しないのではないだろうか。身体方向の上下というのは、それだけでは空間内における方向情報を持っていない。前額平行面上の運動では前額平行面と身体方向が常に重なるため、身体方向の上下と同軸となる運動の等速度知覚が影響を受けると考えられる。しかし、奥行き運動は身体方向とは常に直交するため、身体方向の上下は奥行き運動の等速度知覚に影響を与えないと考える。

実験 1 の結果から、身体方向と重力方向が分離しているとき、前額平行面上の運動における等速度知覚において **Visual polarity** が示す垂直方向に沿った運動方向間でバイアスが見られた。したがって、前額平行面上の運動における等速度知覚が **Visual polarity** による方向情報に影響を受けることが示唆される。一方で、実験 3 の結果から奥行き運動である接近運動における等速度知覚では **Visual polarity** による方向情報の異なる背景間では変化が見られなかった。身体方向と重力方向が一致する座位の身体方向条件だけでなく、身体方向と重力方向が分離している、仰向けとうつ伏せの身体方向条件においても、**Visual polarity** が示す方向情報の異なる背景間では一貫して変化がなかった。したがって、奥行き運動における等速度知覚は **Visual polarity** による方向情報によっては影響を受けないか影響が非常に小さい、あるいは **Visual polarity** は奥行き方向の情報を持たないと考えられる。

これらの方向情報は、どのようなメカニズムによって等速度知覚に影響を与えるのだろうか。最も単純なのは、序論でも紹介した上方向知覚の研究において、Jenkin ら(2004)が提案した重み付け線形和のモデルである[20]。前庭・体性感覚、**Visual polarity**、身体方向からそれぞれ得られる方向情報が方向ベクトルとして重み付け線形和で統合され、統合されたベクトル和が等速度知覚に影響を与えるというモデルである。しかし、このモデルでは、前額平行面運動と奥行き運動の等速度知覚が同じメカニズムによって影響されるとするならば、今回の結果を説明することができない。前庭・体性感覚からの方向情報によって、前額平行面運動と奥行き運動の等速度知覚がそれぞれ影響を受けることを示す結果が得られたが、**Visual polarity** からの方向情報による等速度知覚への影響は前額平行面運動では示されたが、奥行き運動では示されなかったためである。この点については、**Visual polarity** が z 方向、つまり奥行き方向の要素を持たないと仮定すると説明が可能となる。実験 3 の考察でも述べたように、**Visual polarity** は視覚シーン内の特異な位置関係や構造情報といったシーンの方向の偏りから上下方向の手がかりを提供することが示唆されているが[4]、奥行き方向においては明らかではない。視覚シーン内の両眼視差の勾配からも方向情報を得ることができるが一意的な方向情報ではない。そのため、視覚情報が運動物体に対して奥行き方向に関する有効な手がかりを有さないことは十分に考えられる。また、前額平行面運動において重力方向と身体方向が一致しているとき、**Visual polarity** の影響が見られなかった。この点については、ロバスト推定の考えを導入することで説明が可能であ

る。これらの点を含め今回の実験結果を説明できるモデル式を以下に提案する。

$$\mathbf{up} = k_v \mathbf{u}_v + k_g \mathbf{u}_g + k_b \mathbf{u}_b \quad (3)$$

$$|\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_b| < \alpha \Rightarrow k_v = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_v = (x_v, y_v, 0) \quad (5)$$

$\mathbf{up}$  が統合されたベクトル和であり， $\mathbf{u}$  は各手がかりの示す重力方向， $\mathbf{k}$  は各手がかりの重み付け係数であり， $\alpha$  は任意の定数である。添え字は各方向手がかりであり，それぞれ  $v$  は Visual polarity， $g$  は前庭・体性感覚， $b$  は身体の長軸である。前庭・体性感覚からの手がかりが示す重力方向と身体方向が近い方向であるとき Visual polarity の重みが 0 となり(4)，Visual polarity による手がかりが示す重力方向は奥行き方向の情報を持たないこと(5)を条件式としている。これらの条件式を満たすのであれば，式(3)は，今回の実験 1 から 3 の結果を全て説明することが可能である。

## 6.2 重力による等速度知覚への影響

前額平行面運動および奥行き方向の運動に関わらず物体運動の等速度知覚は，得られる重力方向情報の起源に関わらず，その方向にバイアスが存在する場合，同様の傾向を示した。すなわち，得られた重力方向情報の下方向と一致する運動方向では，より加速した運動を等速度運動と知覚し，上方向と一致する運動方向では，より減速した運動を等速度運動と知覚していた。この特性は，定性的には自然環境下での運動物体の加速，減速の傾向と概ね対応している。例えば，実際の自然運動物体が下方向に運動する場合，重力に従う運動となるため加速，上方向の運動のときは重力に抗う運動となるため減速することが想定される。この自然環境における運動物体の運動方向による加減速の違いと，本研究で得られた運動方向による等速度と知覚される運動が持つ加速度の違いとの対応は，我々が運動物体を観察するとき，重力加速度の存在する実環境における運動を知覚の基準，すなわち等速度としていることを示唆している。人間は同じ刺激にさらされ続けるとそれに適合することが知られている。例えば赤色の刺激を見続けると赤色に対する感度が低下し，赤色が知覚されづらくなる。同じように，我々は常に重力の存在する環境にさらされているため，重力に対して適合し，下方向への加速度，重力加速度に対する感度が低下しているのではないだろうか。これによって，重力加速度が加わった自然な運動以外の運動に対する感度を上げている可能性が考えられる。

しかしながら，今回の結果から得られた等速度と知覚する加速度は重力加速度と定量的には一致していないことに注意する必要がある。これは，おそらく物体運動における等速度知覚が物理的な重力の影響をそのまま反映していないことを示している。序論で紹介した物体運動の最終位置の記憶に関する研究として，物体の大きさによる影響が検討されている[7]。結果として，物体が大きくなると記憶位置の変位に対する重力の影響が大きくなることが示され，知覚が物理的原理そのものではなく物理的原理の主観的もしくは



経験的側面によって影響されると考察している。また、我々が実際に観察する物理的な運動では、物体の形状等によって生じる揚力などの影響で、重力加速度では落下しないことがしばしばあることも関係しているかもしれない。実際、物体運動の記憶位置の変化は、物体の形状によっても影響されることが示唆されている[39]。

実験4で検討した重力の大きさの変化による奥行き運動の等速度知覚への影響については、今回の結果からは分からなかったが、逆に重力が存在しなくなる、あるいは非常に小さくなる微小重力環境では物体運動の等速度知覚はどのようになるだろうか。前額平行面上の運動においては、視覚に基づく行動応答の研究において、微小重力環境で **Visual polarity** による影響が見られている[34]。また、方向知覚における斜め効果を調べた研究では[40]、微小重力環境で視覚的、触覚的方向情報を全て排除した場合、身体方向を基準として斜め効果が見られることが報告されている。したがって、前額平行面上の運動における等速度知覚は、微小重力環境によって前庭・体性感覚からの重力方向情報が消失しても身体方向や **Visual polarity** からの方向情報によって影響されると考えられる。一方で、奥行き方向運動に関しては、上述のように身体方向と運動方向が直交することから、身体方向の上下は奥行き運動には影響しないと考えられる。したがって、**Visual polarity** による方向情報が奥行き運動における等速度知覚に影響しない場合は、接近運動と後退運動の運動方向の違いによるバイアス以外は見られないのではないだろうか。

### 6.3 本研究の課題

本研究により、運動物体の等速度知覚は、前庭・体性感覚、**Visual polarity**、身体方向からの方向情報を条件付きの重み付け線形結合したベクトル和によってバイアスされることが示された。また、上下方向知覚[20]、SVV[22-24]、進行方向知覚[25]といった応答を調べた先行研究では、ベクトル和の方向の変化が知覚に影響されることは示されていたが、ベクトル和の大きさの変化については明らかではなかった。重力の大きさは1Gの環境であれば、姿勢の変化や視覚情報の変化によらず常に1Gであるため、ベクトル和の方向に対して1Gの影響がある可能性も考えられたが、実験の結果からベクトル和の大きさの変化によって等速度知覚がバイアスされることが示された。しかしながら、これらの結果には課題が残っていると考えられる。

まず、今回提案したモデル式において、身体方向と重力方向が近しいときに **Visual polarity** の重みが0となる条件式を加えたが、この条件式の適用な範囲などを詳しく検討する必要があるだろう。実験1-2において重力方向と身体方向が一致しているときに **Visual polarity** による影響が見られなかったが、上下方向知覚の研究[20]では **Visual polarity** の影響が見られている。本研究との違いは **Visual polarity** のロール回転の角度である。先行研究では重力方向と身体方向に対して90°の回転であったが、本研究では180°の回転だった。そのため、**Visual polarity** の重みが0となるのは重力方向と身体方向が一致しており、かつ **Visual polarity** の方向が大きく異なるときである可能性がある。

次に、実験結果を統合されたベクトル和ではなく、それぞれの方向情報によって個別に影響されたとする説明が可能であるため、前額平行面上の運動において運動方向の条件を増やす必要があるだろう。例えば、仰向けにおける CW90° の条件では、各方向情報手がかりの下方向は身体方向では視野の下方向、Visual polarity では視野の左方向であるためベクトル和は、左下方向を指すことが予想される。バイアスの変化はこの方向で最大となるはずであるが、今回の実験における運動方向は上下左右の 4 方向であったため左方向と下方向の両方にバイアスが生じた。そのため、今回の結果だけではベクトル和ではなく身体方向と Visual polarity のそれぞれに等速度知覚がバイアスされていた可能性を否定することができない。運動方向を増やすことで、ベクトル和の方向にバイアスが最大となることを示す必要があるだろう。

また、奥行き方向の Visual polarity について検討を行う必要があるだろう。既に何度か述べているように、奥行き方向の Visual polarity が方向手がかりとして用いられるかどうかについてはほとんど議論されてこなかった。まずは、もっとも直接的である上下方向の知覚において身体方向と Visual polarity のピッチ角を変化させたときにどのような知覚変化がみられるかを調べるのが重要であると考えられる。

## 第7章 結論

1. 前額平行面上の運動における等速度知覚において、前庭・体性感覚からの重力方向情報が影響を与えるかを検討した。その結果、前庭・体性感覚からの重力方向情報による影響が示された。

2. Visual polarity による方向情報を持った背景画像を用いることによって、Visual polarity が示す方向情報が前額平行面上の運動における等速度知覚に影響を与えるか検討した。その結果、身体方向と重力方向が一致している場合は、Visual polarity による方向情報の影響は見られないが、身体方向を変化させることで重力方向と身体方向が分離した場合は、Visual polarity による方向情報の影響が見られた。

3. 奥行き方向の運動における等速度知覚において、前庭・体性感覚からの重力方向情報が影響を与えるか検討した。その結果、前庭・体性感覚からの重力方向情報による影響が見られたが、接近運動においては身体に対しての影響の度合いによる影響も見られた。

4. 奥行き方向の運動である接近運動における等速度知覚において、Visual polarity が示す方向情報が影響を与えるか検討した。その結果、接近運動における等速度知覚には Visual polarity が示す方向情報による影響は見られなかった。

5. 奥行き方向の運動である接近運動における等速度知覚において、重力の大きさの変化が影響を与えるか検討した。その結果、重力環境の変化による重力の大きさの変化は接近運動における等速度知覚に変化を示さなかった。

6. 上記 1~4 の項目で述べた結果から、重力方向と身体方向が一致している場合は Visual polarity の重みが 0 となり、Visual polarity は奥行き方向の情報を持たないという条件付きで、物体運動における等速度知覚は様々な感覚からの方向情報による重み付きのベクトル和の方向と大きさによって影響されることが示された。

## 謝辞

本研究をおこなうにあたり，指導教員である金子寛彦先生には多大なご支援を頂きました。お忙しい中，相談事があればすぐに時間を当てて頂けたことに，大変感謝しております。また，学会の発表や投稿論文の執筆に置いて，根気強く指導して頂くとともに，温かく励まして頂きました。この場をお借りしまして厚くお礼申し上げます。

小池康晴先生，山口雅浩先生，渡邊淳司先生，吉村奈津江先生，永井岳大先生にはお忙しい中，到達度審査，公聴会および最終審査の場で私の研究の審査をしていただきありがとうございました。本論文をまとめるにあたり皆様には多くのご助言を頂きました。深く感謝いたします。

過重力環境でも実験をおこなうにあたっては，自衛隊入間基地航空医学実験隊空間識科の皆様にご協力いただきました。最先端の装置による実験は大変貴重な経験ともなり，深く感謝いたします。

金子研究室の皆様には，研究報告会などで貴重な意見を頂いたことに感謝いたします。また，時間のかかる実験が多い中，本論文の実験に参加して頂き，ありがとうございました。特に，門野泰長君にはプログラムから実験まで様々なご助言を頂きましたことを深く感謝いたします。また，助教である久方さんには学会の発表や投稿論文の執筆において多くの助言を頂きましたことを深く感謝いたします。

最後に，長い間暖かく支えて下さった両親に心よりお礼申し上げます。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] Trousselard M, Barraud P, Nougier V, Raphel C, Cian C: Contribution of tactile and interoceptive cues to the perception of the direction of gravity; *Cognitive Brain Research*, vol. 20(no. 3), 355-362 (2004)
- [2] Vaitl D, Mittelstaedt H, Baisch F: Shifts in blood volume alter the perception of posture; *International Journal of Psychophysiology*, vol. 27(no. 2), 99-105 (1997)
- [3] Runeson S: The distorted room illusion, equivalent configurations, and the specificity of static optic arrays; *Journal of Experimental Psychology*, vol. 14(no. 2), 295-304 (1988)
- [4] Howard IP: *Human visual orientation*; York University, (1982)
- [5] Freyd JJ: Dynamic mental representations; *Psychological Review*, vol. 94(no. 4), 427-438 (1987)
- [6] Hubbard TL: Cognitive representation of motion: evidence for friction and gravity analogues; *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, vol. 21(no. 1), 241-254 (1995)
- [7] Hubbard TL: Target size and displacement along the axis of implied gravitational attraction: Effects of implied weight and evidence of representational gravity; *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, vol. 23(no. 6), 1484-1493 (1997)
- [8] Nagai M, Kazai K, Yagi A: Larger forward memory displacement in the direction of gravity; *Visual Cognition*, vol. 9(no. 1-2), 28-40 (2002)
- [9] Senot P, Zago M, Lacquaniti F, McIntyre J: Anticipating the effects of gravity when intercepting moving objects: differentiating up and down with non-visual cues; *Journal of Neurophysiol*, vol. 94(no. 6), 4471-4480 (2005)
- [10] Lacquaniti F, Maioli C: Adaptation to suppression of visual information during catching; *Journal of Neuroscience*, vol. 9(no. 1), 149-159 (1989a)
- [11] Lacquaniti F, Maioli C: The role of preparation in tuning anticipatory and reflex responses during catching; *Journal of Neuroscience*, vol. 9(no. 1), 134-148 (1989b)
- [12] Le Séac'h AB, Senot P, McIntyre J: Egocentric and allocentric reference frames for catching a falling object; *Experimental Brain Research*, vol. 201(no. 4), 653-662 (2010)
- [13] Zago M, Scaleia BL, Miller WL, Lacquaniti F: Coherence of structural visual cues and pictorial gravity paves the way for interceptive actions; *Journal of Vision*, vol. 11(no. 10), 1-10 (2011)
- [14] Asano T, Kaneko H, Mizushina H: Uniform motion perception is produced by

motion with acceleration in the direction of gravity, (2008)

[15] Calderone JB, Kaiser MK: Visual acceleration detection: effect of sign and motion orientation; *Percept Psychophys*, vol. 45(no. 5), 391-394 (1989)

[16] Zago M, McIntyre J, Senot P, Lacquaniti F: Visuo-motor coordination and internal models for object interception; *Experimental Brain Research*, vol. 192(no. 4), 571-604 (2009)

[17] Werkhoven P, Snippe HP, Toet A: Visual processing of optic acceleration; *Vision Research*, vol. 32(no. 12), 2313-2329 (1992)

[18] Brouwer AM, Brenner E, Smeets JB: Perception of acceleration with short presentation times: Can acceleration be used in interception?; *Perception & Psychophysics*, vol. 64(no. 7), 1160-1168 (2002)

[19] Mittelstaedt H: Origin and processing of postural information; *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 22(no. 4), 473-478 (1998)

[20] Jenkin HL, Jenkin MR, Dyde RT, Harris LR: Shape-from-shading depends on visual, gravitational, and body-orientation cues; *Perception*, vol. 33(no. 12), 1453-1461 (2004)

[21] Harris LR, Herpers R, Hofhammer T, Jenkin M: How Much Gravity Is Needed to Establish the Perceptual Upright?; *PLoS ONE*, vol. 9(no. 9), 1-7 (2014)

[22] De Vrijer M, Medendorp WP, Van Gisbergen JA: Shared computational mechanism for tilt compensation accounts for biased verticality percepts in motion and pattern vision; *Journal of Neurophysiology*, vol. 99(no.2), 915-930 (2008)

[23] Vingerhoets RAA, Medendorp WP, Van Gisbergen JA: Body-tilt and visual verticality perception during multiple cycles of roll rotation; *Journal of Neurophysiology*, vol. 99(no. 5), 2264-2280 (2008)

[24] Clemens IA, De Vrijer M, Selen LP, Van Gisbergen JA, Medendorp WP: Multisensory processing in spatial orientation: An inverse probabilistic approach; *Journal of Neuroscience*, vol. 31(no. 14), 5365-5377 (2011)

[25] Fetsch CR, DeAngelis GC, Angelaki DE: Visual-vestibular cue integration for heading perception: applications of optimal cue integration theory; *European Journal of Neuroscience*, vol. 31(no. 10), 1721-1729 (2010)

[26] Fraser LE, Makooie B, Harris LR: The subjective visual vertical and the subjective haptic vertical access different gravity estimates; *PLoS One*, vol. 10(no. 12), e0145528 (2015)

[27] Bringoux L, Nougier V, Marin L, Barraud PA, Raphel C: Contribution of Somesthetic Information to the Perception of Body Orientation in the Pitch Dimension; *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 56(no. 5), 909-923 (2003)

- [28] Mittelstaedt H: Interaction of eye-, head-, and trunk-bound information in spatial perception and control; *Journal of Vestibular Research*, vol. 7(no. 4), 283-302 (1997)
- [29] Trousselard M, Cian C, Nougier V, Pla S, Raphel C: Contribution of somesthetic cues to the perception of body orientation and subjective visual vertical; *Perception & Psychophysics*, vol. 65(no. 8), 1179-1187 (2003)
- [30] Landy MS, Maloney LT, Johnston EB, Young M: Measurement and modeling of depth cue combination: in defense of weak fusion; *Vision Research*, vol. 35(no. 3), 389-412 (1995)
- [31] Knill DC: Robust cue integration: a Bayesian model and evidence from cue-conflict studies with stereoscopic and figure cues to slant; *Journal of Vision*, vol. 7(no. 7), 1-24 (2007)
- [32] 日本視覚学会(編): 視覚情報処理ハンドブック; 朝倉書店, 東京 (2000)
- [33] Ono F, Kitazawa S: The effect of perceived motion-in-depth on time perception; *Cognition*, vol. 115(no. 1), 140-146 (2010)
- [34] McIntyre J, Zago M, Berthoz A, Lacquaniti F: Does the brain model Newton's laws?; *Nature Neuroscience*, vol. 4(no. 7), 693-694 (2001)
- [35] 浅野拓也, 金子寛彦, 乾多久夫, 緒方克彦: 異なる重力環境下での物体運動の知覚における加速度バイアス; 第56回日本宇宙航空環境医学会大会, (2010)
- [36] Hills BL: Some studies of movement perception, age, and accidents; *Transport and Road Research Laboratory [TRRL] Report*, SR-137, (1975)
- [37] Legge GE, Campbell FW: Displacement detection in human vision; *Vision Research*, vol. 21(no. 2), 205-213 (1981)
- [38] 加藤孝義: 特殊空間における心理学的行動; *Artes Liberales*, no. 35, 41-53 (1984)
- [39] Nagai M, Yagi A: The pointedness effect on representational momentum; *Memory & Cognition*, vol. 29(no. 1), 91-99 (2001)
- [40] Lipshits M, Bengoetxea A, Cheron G, McIntyre J: Two reference frames for visual perception in two gravity conditions; *Perception*, vol. 34(no. 5), 545-555 (2005)

## 研究業績一覧

### 原著論文

- 1) 三輪拓馬,金子寛彦, 奥行き方向の運動知覚における重力方向の影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.22(no.4), 545-552 (2017)
- 2) T. Miwa, R. Hisakata, H. Kaneko, Effect of the gravity direction in the environment and Visual polarity and body direction on the perception of object motion, Vision Research, vol.126, 12-23 (2019)

### 国際学会

- 1) T.Miwa, H.Kaneko, Effects of body orientation and gravitational direction in visual information on the motion perception of an approaching object, The 11 th Asia-Pacific Conference on Vision, 2015.7.12, Singapore, (2015)

### 国内学会・研究会

- 1) 三輪拓馬,金子寛彦, 接近物体における運動知覚の身体方向による変化, 電子情報通信学会 2013 年総合大会, 2013.3.21, 岐阜大学 (電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ特別企画学生ポスターセッション予稿集, p.153) (2013)
- 2) 三輪拓馬,金子寛彦, 身体方向が接近物体に対する運動知覚に与える影響, 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, 2013.7.13, 新潟国際情報大学 (信学技報, vol.113, no.128, pp.17-20) (2013)
- 3) 三輪拓馬,金子寛彦, 重力環境の違いが接近運動物体に対する運動知覚に与える影響, 日本視覚学会 2014 年冬季大会, 2014.1.23, 工学院大学 (VISION, vol.26, no.1, p.51) (2014)
- 4) 三輪拓馬,金子寛彦, 重力情報の変化による接近運動知覚への影響, 第 9 回 JAXA 宇宙環境利用科学委員会 「宇宙環境へ適応するための感覚-運動ゲインコントロール」 ワーキンググループ会合, 2014.3.7, ホテルリゾーピア熱海 (2014)
- 5) 三輪拓馬,金子寛彦, 視覚からの重力方向情報が接近物体に対する運動知覚に与える影響, 日本光学会年次学術講演会 2014, 2014.11.7, 筑波大学東京キャンパス文京校舎 (日本光学会年次学術講演会 講演予稿集, 7aC8) (2014)
- 6) 三輪拓馬,金子寛彦, 身体方向と視覚からの重力方向情報が接近物体の運動知覚に与える影響, 日本視覚学会 2016 年夏季大会, 2016.8.17, 朱鷺メッセ (VISIOM, vol.28, no.3, p.119) (2016)
- 7) 三輪拓馬,久方瑠美,金子寛彦, 前額平行面上の運動知覚における実際の重力方向と背景中の重力方向の影響, 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, 2017.10.23, 京都テルサ (信学技報, vol.117, no.259, pp.23-25) (2017)



8) 三輪拓馬,久方瑠美,金子寛彦, 姿勢変化により前庭・体性感覚と視覚の重力方向情報の関係が変化したときの前額平行面上の運動知覚, 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, 2018.10.23, 京都テルサ (信学技報, vol.118, no.262, pp.31-34) (2018)