研究論文
光学 38, 5 (2009) 266-273
Received December 1, 2008; Revised February 12, 2009; Accepted February 23, 2009

重力方向知覚における視覚刺激の傾きと種類および身体の傾きの影響

根岸　一平・金子　寛彦・水科　晴樹

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　〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G2-3

Effects of Visual Tilt, Kind of Images and Body Orientation on the Perception of Gravitational Orientation

Ippei NEGISHI, Hirohiko KANEKO and Haruki MIZUSHINA

Department of Information Processing, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 4259-G2-3 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8502

We measured human perception of gravitational vertical while manipulating tilt of visual stimuli (scenic picture) and subject's body to investigate the integration mechanism of multi-modal information on gravitational vertical. Our results showed that effect of visual information affected the perception of gravity systematically. When the orientation of visual stimuli was close to the real gravity, perceived gravitational vertical varied with the orientation of visual information. On the other hand, when the orientation of visual stimuli was very different from the real gravity, the effect of visual stimuli was weaken. The effect of visual stimuli was stronger when subject's body was tilted than when it was upright. We also manipulated the strength of gravitational information in visual stimuli by replacing a picture with poor information of gravity (experiment 1) or by using low-pass filter (experiment 2). Stronger effect of visual stimuli was observed with stimuli with stronger information. These results cannot be explained with currently-proposed models (linear summation or vector summation models). We suggest that the strength of visual and non-visual information vary with their reliability or reality, and their contributions for the perception of gravitational vertical are determined by the strength of each information.

Key words: orientation perception, gravitational vertical, multi-modal integration

1. はじめに

われわれ人間は，前庭系からの情報によって重力の方向を知ることができる．これは，耳石にかかる重力を感覚毛が前庭神経へ伝えることによって直接的に重力の大きさを検知することができるためである．また，体性感覚系からの情報によっても重力の方向を知ることができる．例えば，人間がある姿勢をとった場合に，身体の各部位にかかる圧力の大きさによって重力の方向を知ることができるし，内臓器官から腹部の内側へかかる圧力によっても同様のことが可能である[1,2]．

身体が傾いたときに発生する力学的な情報による重力方向知覚の研究においては，比較的傾きが小さい（約 45° 以下）場合は身体の傾きを過大評価する傾向があることが知られ E-effect とよばれる．また一方，身体がある程度以上傾くとその傾きを過小評価する傾向があり，これは A-effect とよばれる．いずれにしても，必ずしも正確な重力方向を応答することができない[3,4]．また，重力方向知覚に関しては，測定方法の違いによって被験者の応答特性が異なることが知られている[4-7]．

これらの力学的情報に基づく直接的な重力知覚とは別に，直接には重力を検知することのできない器官からの情報も重力方向の情報として利用できる可能性をもっている．例えば，視覚系は重力そのものを検知することはできないが，一般的に網膜に映る像は重力の存在する現実世界

E-mail: ippei.negishi@ip.titech.ac.jp

を反映するために，網膜像からさかのぼって重力の方向を推定することが可能である．このため，視覚情報は重力の情報をもつと考えられる．

視覚情報が重力方向知覚に実際に影響する例としてVan Beuzekom ら[8]は，調整法によって1本の線分を知覚的な重力軸方向に合わせるタスクを被験者に課し，線分の周辺に呈示した視覚刺激の傾きによる被験者の応答への影響を調べ，その結果，周囲の刺激の傾きによって知覚された重力の方向が変化することを示した．このことは，視覚情報が重力方向の情報として働いていることを示している．

以上のように，重力方向の知覚は複数の異なる感覚情報によってもたらされる．すなわち，重力方向の知覚において異種感覚情報の統合が行われているということである．Jenkin らは，この情報統合機構に関して，視覚情報の示す方向と重力の示す方向と，身体が向いている方向の3つのベクトルの和によって知覚的な上下方向が決定されるとしている[9]．しかし，彼らの研究は重力方向の知覚を直接測定したものではなく，視知覚上での判断における上下方向を測定したものであるため，実際に被験者が知覚した重力方向は異なっているという指摘もある[10]．いずれにしても，視覚情報と前庭・体性感覚系情報の統合過程に関する研究は，十分に行われているとはいいがたく，その性質や機構が理解されているとはいえない．

そこで本研究では，重力方向の知覚における異種感覚間統合の過程，その中でも特に視覚刺激に用いる画像の種類の影響を明らかにすることを目的とした．奥行き知覚に関する情報統合の研究においては，絵画的手がかりや視差などの異なる手がかり間で情報を矛盾させ，知覚される奥行きを測定する手法[11–13]がしばしば用いられる．これと同様に，本研究においても，視覚情報が示す重力方向と視覚外情報が示す傾きを矛盾させて重力方向の測定を行い，重力方向の知覚において視覚情報がどの程度影響しているのかを調べ，異種感覚間統合の過程の性質と機構を推定した．今回は，問題の簡潔化のため，実際に身体が傾くことにより変化する情報をすべて視覚外情報とし，視覚情報と視覚外情報の統合について調べた．

2. 実　験　1

実験1では，被験者の身体を傾けた場合と正立した場合について，風景画像に傾きを付加して呈示することで視覚情報と視覚外情報が示す重力方向を矛盾させた状態で重力方向知覚を測定した．その際の矛盾の大きさを制御して，重力方向の知覚がどのように変化するのかを調べた．また，視覚情報として方向に関する情報の強さが異なる2種類の画像を用いて，視覚情報の内容によって重力方向知覚に対する影響が異なるのかどうかを調べた．これらの結果より，視覚刺激のもつ方向情報の強さとその向きの変化に対する重力方向知覚の特性が明らかになると考えられる．

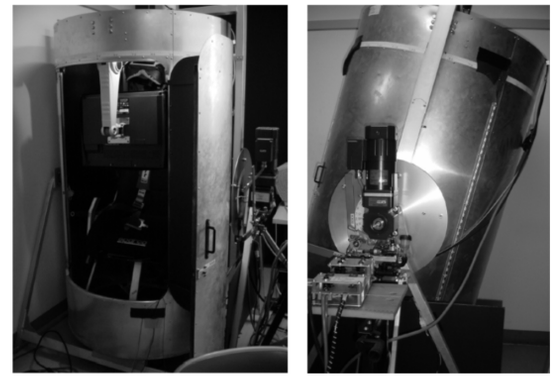


Fig. 1　The front view (left) and the side view (right) of the apparatus. Subject was seated in a rotatable drum and observed the visual stimuli presented on a LCD monitor in front of the head. The drum could be rotated about the roll axis of the subject. In the experiment, the facing direction of subject was the same as that of rotational axis of the drum.

2.1　実 験 方 法

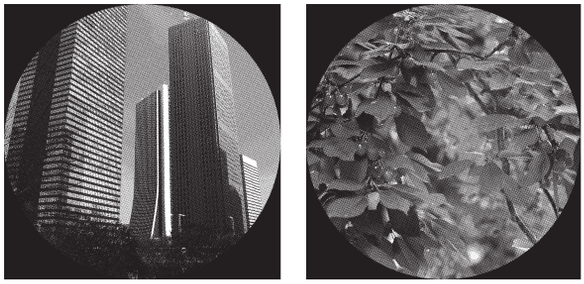
2.1.1　実 験 装 置

被験者はロール軸方向に回転可能なドラム（直径90 cm，長さ160 cm）内のシートに，ベルトとヘッドバンドで固定された．そして，そのドラムが傾くことで被験者の身体の傾きが制御された．シートおよびベルトはレーシングカー用のものを用いたため，通常のシートよりも強固に固定できた．また，ドラム内部はディスプレイからの光の反射を抑えるために黒く塗装されていた（Fig. 1）．

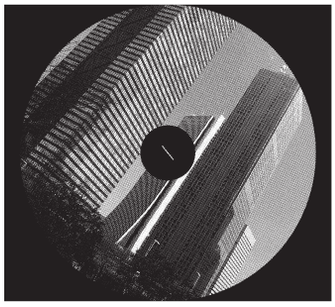
視覚刺激は，被験者の正面に設置した20インチの液晶ディスプレイ上に呈示された．ディスプレイの解像度は1600×1200ピクセルで，視覚刺激はその中心に呈示された．視距離は約25 cmであった．ディスプレイの枠が方向情報として作用することを防ぐために，ディスプレイは直径約28°の円形部分を切り抜いた黒い紙で覆われていた．

2.1.2　刺　　激

刺激はFig. 2に示すような，風景画像を円形（直径1200 pixel）に切り抜いたものであった．画像の大きさは，上記のディスプレイを覆った黒い紙の切り抜き部分の大きさと同一であった．刺激の種類は，画像中の方向情報の強さが違うと思われる2種類を用いた．一方の画像は建物が主となっており，画像中の多く含まれる垂直線がはっきりとした上下方向を示していた．この刺激を「Buildings」と



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Visual stimuli used in the experiment 1. “Buildings” stimulus contained rich information regarding the gravitational direction (left). “Berries” stimulus contained poor information regarding the gravitational direction (right). (b) Visual stimulus was presented with a short bar and on a black disk (center of the figure). Subjects aligned the bar to the direction of perceived gravity in each trial as the task. In the control condition, the response bar was presented without the surrounding picture to subjects.

よぶ．もう一方の画像は樹木の葉と実の部分を写したもので，光源情報や枝の伸びる方向など大まかな上下方向の情報を含むものの，画像中において上下方向がはっきりとはわからない．この刺激を「Berries」とよぶ．この「Buildings」と「Berries」は，予備実験において全部で6種類の画像をロール方向に回転させたものを呈示し，画像中の上下方向を応答させた結果，応答の分散の値がそれぞれ最小および最大となったものを選択した．

各試行において，これらの画像を，被験者の身体に対して時計回りに−30，−25，−20，−15，−10，−5，0，5，10，15，20，25，30，35，40，45°の16種類のいずれかに傾けて呈示した．画像の中心には直径7°の黒い円形部分があり，その中心に応答用刺激を呈示した（Fig. 2）．この刺激は，長さ約2.5°の線分であった．被験者はテンキーを用いてこれを回転させて，知覚される重力方向を応答した．回転の最小単位は1°であった．被験者に呈示される線分の傾きの初期値は試行ごとにランダムであり，また，線分にはアンチエイリアス処理を施したため，滑らかな直線に知覚された．

身体の傾きについては，身体を正立させたままの条件とロール方向に左15°傾けたものの2条件であった．

2.1.3 実験手順

まず，被験者の身体に左15°もしくは0°の傾きを与えた．この動作は1分以内で完了した．その後，2分以上経過してから最初の試行の視覚刺激を呈示した．被験者は，視覚刺激を観察しながら応答用刺激を用いて知覚される重力方向を応答した．応答に際して，制限時間は設けず，被験者が応答した時点で試行終了とした．画像の種類の2条件それぞれに対し，視覚刺激の傾き16条件の合計32条件に加え，画像を呈示せずに応答用刺激のみで重力方向を応答させる統制条件を加えた33条件をそれぞれ3回ずつ，合計99試行をランダムな順番で行い，これを1ブロックとした．同一ブロック中では身体の傾きは常に同じであった．

2条件の身体の傾きそれぞれについて，各被験者2ブロックずつ，合計4ブロックの実験を行った．ブロックの順序は身体の傾きが，「左15°，正立，正立，左15°」または「正立，左15°，左15°，正立」のどちらかであった．1ブロックに要した時間は被験者間での差はあったものの，おおむね20〜30分であった．被験者は9名で，全員裸眼視力または矯正視力正常であり，前庭系の疾病経験がないことを各人に確認した．

2.2 実験結果

Fig. 3に，被験者SOについての結果を示す．横軸は被験者の身体に対する視覚刺激の傾き，縦軸は被験者が応答した重力方向である．横軸，縦軸ともに時計回りを正の方向とした．また，太線で示した水平線は，統制条件の結果を示している．左のグラフは身体が正立している条件，右のグラフは左に15°傾いている条件の結果を示し，シンボルの違いは視覚刺激の条件の違いである．

Fig. 4に，身体が左15°に傾いた条件での統制条件の結果を示す．実際の重力方向を原点とし，正の方向は実際の傾き（15°）より身体軸の水平方向寄りに応答したことを示し，負の方向は身体軸の垂直方向寄りに応答したことを示す．多くの被験者において，統制条件において知覚された重力方向は実際の重力方向と有意に異なっていたが，身体の傾きを過大評価した被験者と過小評価した被験者が混在し，被験者間で一貫した傾向はみられなかった．しかし，実験1と実験2（後述するが統制条件の実験条件は実験1と全く同一であった）の両方に参加した被験者についてみると，被験者内で一貫した傾向を示していることから，被験者間での応答のばらつきは測定方法の問題ではなく被験者の個人差によるものだと考えられる．身体の傾きを過小評価した被験者においてはE-effectの効果はみられなか

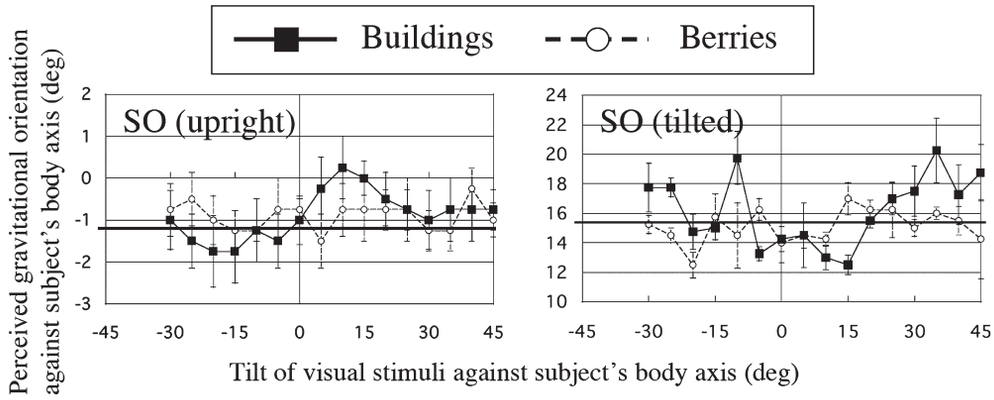


Fig. 3　Result of experiment 1 for subject SO. Symbol indicates the condition of visual stimulus. The horizontal thick line shows the result of control condition in which no visual stimuli was presented. The left and right panels show the results of upright and tilted body orientation conditions, respectively. Error bar shows standard error of the mean.

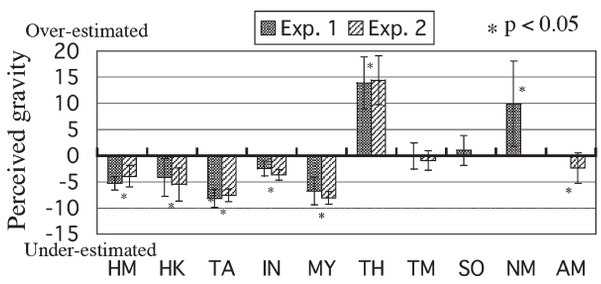


Fig. 4　Results of the control condition in experiment 1 and 2 for each subject. Vertical axis shows perceived gravitational direction (clockwise). Signed positive when body tilt is over-estimated. Black bar shows results for experiment 1 and hatched bar shows results for experiment 2. Error bar shows standard deviation within each subject. Asterisk indicates that the value is significantly different from 0. Subject SO and NM didn't conduct experiment 2 and AM didn't do experiment 1.

ったことになる．触覚での応答を用いた実験では，E-effect は全く観測されないという報告もあるが[14]，今回の実験はこれには該当せず，半数以上もの被験者においてE-effect が観測されなかった理由ははっきりしない．

重力方向と視覚刺激の示す方向の差が重力方向知覚に与える変化の大きさをみるために，Fig. 3 のグラフを，横軸の原点（0）を外界座標系での重力方向に，縦軸の原点（0）を統制条件の結果の値とすることで，横軸で視覚情報と視覚外情報の矛盾の大きさを，縦軸で視覚情報が重力方向知覚に与えた影響を直接示すように改め，全被験者の平均データをプロットしたものが Fig. 5 である．Fig. 5 の上 2 つのグラフは Berries 条件，下 2 つのグラフは Buildings 条件の結果で，左側が身体が正立した条件，右側が身体を左に 15° 傾けた条件になっている．グラフは全被験者の応答の平均を示しており，誤差棒は被験者間の標準誤差を示す．方向情報の強い画像（Buildings）条件では，画像の傾きの変化によって知覚された重力方向が変化した．変化の方向は，画像を呈示していない場合に比べて，呈示した画像の示す下向きの方向に近づいた．変化の大きさは，画像の傾きが±10〜20° の範囲では画像の傾きの増大とともに大きくなっていったが，画像の傾きがそれ以上大きくなると視覚刺激の影響が減少し，視覚刺激を呈示していない場合の重力方向知覚に近づく傾向がみられた．この傾向は，身体の傾きがある場合と正立の場合のどちらでもみられたが，身体が傾いている条件においてより顕著であった．以上のような傾向は，統計的にも確かめられた．身体が正立した条件と身体が左 15° に傾いた条件それぞれについて視覚刺激の種類（2 条件）と傾き（16 条件）の 2 要因で分散分析を行ったところ，両条件ともに視覚刺激の傾きの主効果（身体の傾きなし：$F(15, 120)=1.601$, $p<0.01$，身体の傾きあり：$F(15, 120)=15.80$, $p<0.001$）と，視覚刺激の種類と視覚刺激の傾きの交互作用（身体の傾きなし：$F(15, 120)=2.598$, $p<0.001$，身体の傾きあり：$F(15, 120)=25.72$, $p<0.001$）があり，Buildings の画像による単純主効果があったが，両条件ともに視覚刺激の種類による主効果はみられなかった．方向情報の弱い画像（Berries）条件については，身体の傾きの有無にかかわらず，視覚刺激の方向による重力知覚への明確な影響はみられなかった．

2.3　考　　察

実験結果から，視覚情報が重力方向知覚に影響していることがわかった．また，方向情報の強い画像と弱い画像の 2 つの結果を比較すると，当然ながら，視覚情報がもっている方向情報が強いほど，重力方向知覚における視覚情報の影響が強くなる傾向がみられた．しかし，今回の Berries 条件では視覚刺激の影響が全くみられなかったため，視覚刺激のもつ方向情報が大きくなるに従って重力方向知覚へ

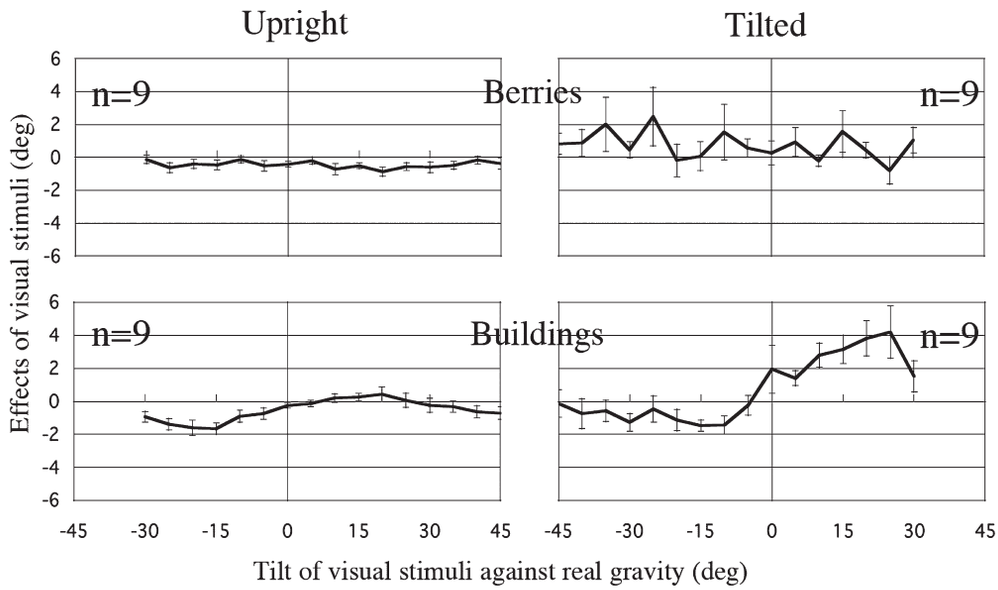


Fig. 5 Averaged results of experiment 1 across all subjects. Results of visual stimuli "Berries" (upper) and "Buildings" (bottom). Horizontal axis indicates the tilt of visual stimuli against real gravitational direction, and vertical axis indicates the difference of subjects' responses relative to the control conditions (no visual stimulus presented). Error bars show standard error of the mean.

の影響も大きくなっていくのか，それとも二値的に閾値以上の方向情報をもつ視覚刺激の影響は一定なのかといったことは，実験1の結果からは明らかではない．このことについては，実験2において段階的に情報量を変化させた視覚刺激を用いることで調べた．

また，視覚刺激が実際の重力方向から10〜20°程度傾いた条件で最も大きな変化がみられ，視覚刺激の傾きをそれ以上大きくしていっても増加し続けることはなく，むしろ減衰する傾向がみられた．もしも重力方向知覚に関する情報統合が各情報のベクトル足し合わせで表せる場合には，視覚刺激の傾きが90°のときに重力方向の変化量は最大値をとり，また単純な角度の重み付け線形足し合わせであった場合には，視覚刺激の傾きと重力方向知覚の変化量が正比例するはずである．しかし，視覚情報と視覚外情報の統合の性質を示すと考えられる今回のデータは，上記のいずれの説でも説明することができない．

視覚刺激の傾きがさらに大きい場合の知覚を調べるために，Buildingsの画像において，画像の傾きを拡張して補足実験を行った．補足実験では，−150，−120，−90，−60，−30，0，30，60，90，120，150，180°の12条件の画像の傾きを用いた．実験手順は実験1と同様で，被験者は3名であった．結果として，±10〜20°付近にみられたようなピークは他の傾きでは観察されず，このことから，知覚された重力方向の変化は±30°以内の限られた傾きにおいてのみみられると考えることができる．

3. 実　験　2

実験1では，異なった2種類の画像を視覚刺激として用いることで視覚刺激に含まれる方向に関する情報の強さを制御して実験を行った．その結果，一方では視覚刺激の方向によって重力方向知覚に変化がみられ，他方では視覚刺激による変化はみられなかった．この結果は，視覚刺激中の方向情報の強さに応じて，視覚刺激が重力方向知覚に与える影響の強さが変化していることを示すと考えることができる．しかし，この変化が視覚刺激のもつ方向情報の強さに対して段階的に大きくなっているのか，それともある閾値を境にして一定の変化が発生するのかは明らかではなかった．そこで，実験2ではその情報の強さを段階的に変化させることで，視覚刺激中の方向情報の強さの増加に伴う，視覚刺激の重力方向知覚への影響の大きさを調べた．ここでは，ガウス型のブラーフィルターを用い，ブラーの大きさによって視覚刺激中の方向情報の強さを段階的に制御した．

3.1 実験方法

実験装置，刺激形状など以下に記述する点以外に関しては実験1と基本的に同様であった．

3.1.1 視覚刺激

実験1と同様に，視覚刺激である風景画像と応答刺激を呈示した．ただしここでは，実験1で用いた方向情報の強い画像（Buildings）に，ガウスフィルターをかけてぼかしたものを用いた．ガウスフィルターのσの値は，3種類

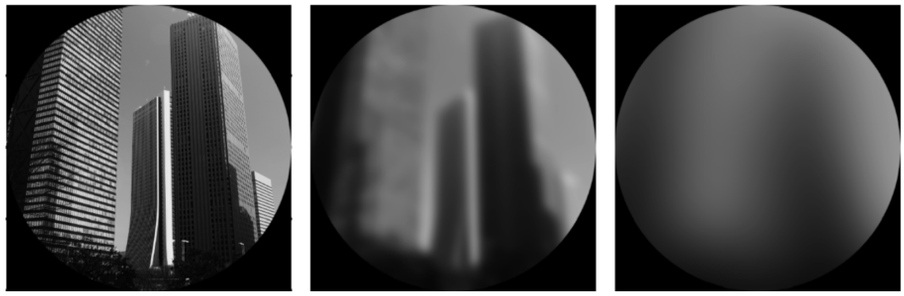


Fig. 6　Visual stimuli used in the experiment 2. “Sharp” stimulus was identical to “Building” stimulus used in the experiment 1 (left). “Moderate” (center) and “Blurred” (right) stimuli were made by applying a Gaussian low-pass filter to the “Sharp” stimulus. The variances of the Gaussian filters for “Moderate” and “Blurred” stimuli were 20 and 120 pixels, respectively.

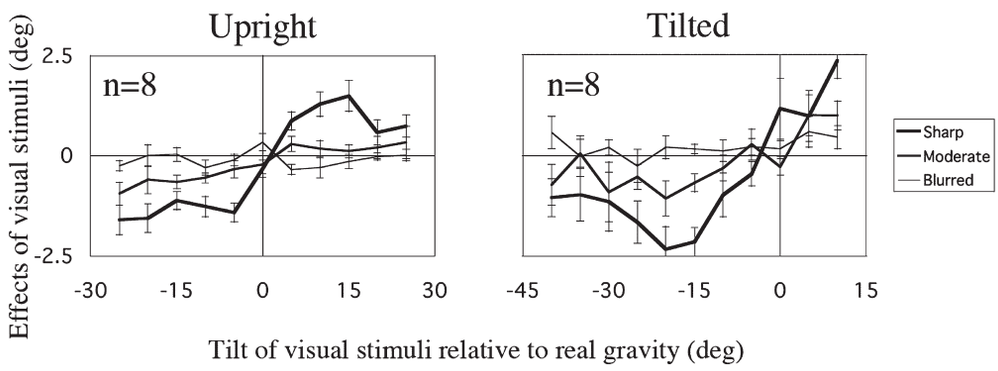


Fig. 7　Averaged results of experiment 2 across all subjects. The thickness of the line indicates the condition of visual stimulus: Sharp (thick), Moderate (middle) and Blurred (thin). Horizontal axis shows the tilt of visual stimuli relative to the real gravitational direction, and vertical axis shows the subjects’ responses for each condition of visual tilt relative to that for the control condition. Error bars indicate the standard error of the means among 8 subjects.

(0，20，120 pixel）を用いた．σ の値が小さいものから“Sharp”，“Moderate”，“Blurred” とした（Fig. 6）．刺激のサイズは実験 1 と同様であった．

視覚刺激の傾きは，被験者の身体に対して－25，－20，－15，－10，－5，0，5，10，15，20，25° の 11 条件であった．また，実験 1 と同様に，応答刺激のみを呈示する統制条件を行った．

3.1.2　実 験 手 順

被験者は 8 名で，全員裸眼視力または矯正視力正常であり，前庭系の疾患がないことを各人に確認した．8 名のうち 7 名は実験 1 にも参加していた．1 つのブロックでは視覚刺激の種類が 3 条件，視覚刺激の傾きが 11 条件の合計 33 条件をそれぞれ 3 回ずつの 99 試行に，統制条件を 6 試行加えた合計 105 試行をランダムな順序で行った．身体の傾きが正立した条件と左に 15° 傾いた条件それぞれに対して，4 名の被験者は身体の傾きが「左 15°，正立，正立，左 15°，左 15°，正立」または「正立，左 15°，左 15°，正立，左 15°，正立」の順序で 3 ブロックずつ，残りの 4 名の被験者は「左 15°，正立，正立，左 15°」または「正立，左 15°，左 15°，正立」の順序で 2 ブロックずつ行った．1 ブロックの試行に要した時間は，実験 1 と同じく 20～30 分程度であった．各試行内での実験手順は実験 1 と同様であった．

3.2　実験結果・考察

Fig. 7 に実験結果を示す．図の横軸と縦軸は Fig. 5 と同様で，それぞれ実際の重力軸に対する視覚刺激の傾き，被験者が応答した重力方向であり，横軸，縦軸ともに時計回りを正の方向とした．左のグラフは身体が正立した条件，右のグラフは左 15° の傾きのある条件の結果を示し，実線の太さの違いは刺激画像にかけたガウスフィルターの σ の値の大きさの違いを示す．

被験者の身体を左 15° に傾けた条件では，ぼかしのない刺激（Sharp）については，実験 1 の Buildings と同様に視覚刺激の傾きによって知覚される重力方向も変化したが，強いぼかしが付加された刺激（Blurred）については，実験 1 の Berries と同じように視覚刺激の傾きによる重力方向知覚の変化はみられなかった．弱いぼかしが付加された刺激（Moderate）の条件では，変化は小さいながらも

Sharp と同様の傾向がみられた．

被験者の身体が正立した条件では，視覚刺激による重力方向知覚への影響は身体が傾いている条件に比べて小さかった．この傾向は実験 1 と同様であった．また，Sharp 条件の刺激においてのみ視覚刺激による重力方向知覚の変化がみられ，Moderate 条件，Blurred 条件とフィルターの σ の値の大きさの増大とともに変化量は小さくなった．実験 1 と同様に，それぞれの身体の傾きの条件に対して視覚刺激の種類（3 条件）と傾き（11 条件）で分散分析を行ったところ，視覚刺激の傾きの主効果（身体の傾きなし：（$F(10,70)=7.088, p<0.001$，身体の傾きあり：$F(10,70)=13.19, p<0.001$）と，視覚刺激の種類と傾きの交互作用（身体の傾きなし：$F(20,140)=3.417, p<0.001$，身体の傾きあり：$F(20,140)=4.353, p<0.001$）がみられ，Sharp と Moderate の条件において刺激の傾きの単純主効果があった．両条件ともに，視覚刺激の種類による主効果はみられなかった．

身体の傾きの有無による視覚刺激の影響の違いを明確にするため，実験 2 の結果に対して被験者の身体に対する視覚刺激の傾き（11 条件）と，視覚刺激の種類（3 条件），身体の傾きの有無（2 条件）の 3 要因で分散分析を行ったところ，被験者の身体の傾きの主効果はみられなかったが，身体の傾きと視覚刺激の傾きの交互作用（$F(10,70)=3.741, p<0.001$）と，さらに視覚刺激の種類を加えた 3 つの要因の交互作用（$F(20,140)=1.467, p<0.001$）は有意であったことから，統計的にも身体の傾きの違いにより視覚刺激の影響力が変化することが確認できた．また，Fig. 7 をみると，Moderate 条件の結果がおおむね Sharp 条件と Blurred 条件の間の値になっていることから，視覚刺激中の方向情報の強さの変化に応じて視覚刺激が重力情報に及ぼす影響の大きさが段階的に変化していたと考えられる．すなわち，実験 2 のようにガウスフィルターを用いて画像中の方向情報を曖昧にした場合も，実験 1 のように画像そのものを変えて方向情報の量を変化させた場合と同様に，視覚刺激がもつ方向情報が強いほど重力方向知覚に与える影響が大きいという同様の結果になった．

4. 総 合 考 察

実験の結果から，視覚情報と身体の傾きに関する視覚外情報の統合において，以下のような特性があると考えられる．まず，視覚情報の影響力は，その視覚情報がもつ情報の強さに依存する．これは視覚刺激が Buildings や Sharp 条件で，Berries や Moderate，Blurred 条件よりも大きな変化がみられたことと一致する．

次に，視覚情報の影響力はその情報の強さのみで決定されるものではなく，画像の傾きと実際の重力方向の関係によって変化する．このことは，実験 1 と実験 2 の結果に対して行った分散分析において，視覚刺激の傾きと視覚刺激の種類の交互作用が有意であったことからも裏づけられる．知覚における情報統合においてしばしば用いられる maximum-likelihood-estimation（MLE）では，おのおのの情報の信頼性が統合過程における各情報の寄与率を決定しているとされるが[15–17]，今回の実験結果をこの MLE に当てはめて解釈すると，画像の傾きが実際の重力方向に対して十分に小さいときは，視覚外情報による重力方向と視覚情報が示す重力方向の差が少ないので，視覚情報の信頼性は高くなると判断され，結果として知覚される重力方向は画像の示す重力方向に近づくと考えられる．また，画像の傾きがある程度の大きさの範囲においては，画像の傾きの増加に伴って知覚される重力方向の変化も大きくなる一方，画像の傾きと実際の重力方向があまりにもかけ離れている場合には，視覚情報は実世界の重力方向を反映していない“画像”であり，重力方向の情報として適切ではないと判断されて情報の強さが低下すると考えられる．そして，視覚刺激に含まれる方向情報の強さは，視覚系以外の重力方向の情報との関係によって決定されていると考えられる．これは，今回の実験結果で，同じ傾きをもつ視覚刺激を呈示した場合でも身体の傾きの有無によって結果が異なったことから推測される．例えば，今回の実験では，正立していた条件よりも身体が傾いていた条件のほうが視覚刺激の影響を強く受ける結果になった．これは，われわれは普段多くの場面で正立した状態にあり，受動的に身体を傾けられるといった状況は稀であるので，身体が傾いていた条件では身体が傾いているということはわかっていても，傾きの量については曖昧になり，前庭系や体性感覚系など視覚系以外の情報の信頼性が小さくなり，結果として視覚情報の影響が相対的に大きくなったためではないだろうか．また，今回の実験では，被験者は受動的に身体の傾きを受けたが，身体を能動的に傾けた場合は，受動的に傾けた場合に比べて傾きの知覚が正確になる[8]ので，視覚刺激が重力方向知覚に与える効果は小さくなることが予想される．MLE においては，信頼性はおのおのの情報を単体で呈示した場合の知覚の分散の関数となっているので，今後これらの仮説を検証するために，各情報にノイズを加えて（視覚情報であれば画像にノイズを，体性感覚情報であれば振動等）信頼性を制御した実験を行う必要がある．

統制条件，すなわち視覚刺激が呈示されない条件下では，重力方向知覚に被験者間で一貫した傾向がみられなか

った（Fig. 4）が，Fig. 5 や Fig. 7（身体が傾いたことによりバイアスが除去されている）においてグラフが原点について点対称の形状を示していることから，視覚刺激による重力方向知覚の変化はこのバイアスされた方向を基準に変化していることがわかる．つまり，これらのグラフは，線形足し合わせやベクトル足し合わせ等のモデルでは説明することのできない重力方向知覚における情報統合独特の特性を反映していると考えられる．また．身体が傾いたことによるバイアスは視覚刺激によらずに存在し，知覚される重力方向は身体が傾いたことによるバイアスと視覚刺激による変化分を単純に足し合わせたものによって決定されると考えられる．

本文中で用いてきた「方向情報の強さ」というものに関して，次のように考える．実験 1 での Buildings 条件と Berries 条件の結果の違いは，線分の垂直/水平成分との対比効果によるものである可能性もあるし，実験 2 で行ったようなフィルターによる画像の空間周波数のスペクトルの変化，ほかにも今回の実験では制御しなかったが視覚刺激の大きさや視距離，明るさや色などさまざまな要素が重力方向知覚に影響する可能性が考えられる．また，画像を風景としてとらえた場合の上下方向といったような，もっと高次な認知的なレベルでの情報量の違いが考えられる．視覚刺激が重力方向の情報となるためには，視覚刺激が外界を反映しているという仮定が必要なので，これらの要素によって視覚刺激のリアリティーが変化すると考えられるからである．視覚刺激中のどの要素が重力方向知覚に影響しているのかについては，今回の研究の範囲を超えるが，非常に興味深い問題であり，今後の重要な課題となる．

5. ま　と　め

本研究では，被験者の身体の傾きと，重力方向の情報を含む視覚刺激の傾きを変化させ，重力方向知覚を測定した．その結果，重力方向知覚は視覚刺激の影響を受けたが，身体を傾けた条件ではより大きな視覚刺激の効果がみられた．また，視覚刺激中の方向情報の量を変化させたところ，視覚刺激による重力方向知覚は視覚刺激中の方向情報の強さによって連続的に変化した．また，重力知覚の変化は視覚刺激の傾きの変化に対して単調増加ではなく，一度増大した後に 10〜20° 付近をピークにして減衰する傾向がみられた．これは，視覚刺激の傾き量が小さいときには，視覚情報が重力方向を反映していると判断されて方向情報として用いられるが，傾き量が大きくなると，視覚情報が重力方向を反映しているとは解釈されずに，方向情報として用いられなくなるということを示唆している．これらの結果から，重力方向知覚における情報統合では，シーンの状況に応じて各情報の知覚に対する影響力が決定されていると考えられる．

文　　献

1) 日本視覚学会編：“視覚と他感覚との統合”，視覚情報処理ハンドブック（朝倉書店，2004）pp. 507-510.
2) M. Trousselard, P. Barraud, V. Nougier, C. Raphel and C. Cian: “Contribution of tactile and interceptive cues to the perception of the direction of gravity,” Cognit. Brain Res., **20** (2004) 355-362.
3) I. P. Howerd: “Visual orientation to gravity,” *Human Visual Orientation* (John Wiley and Sons, New York, 1982) pp. 427-430.
4) J. Carriot, P. DiZio and V. Nougier: “Vertical frames of reference and control of body orientation,” Clin. Neurophysiol., **38** (2008) 423-437.
5) N. Daddaoua, P. W. Dicke and P. Thier: “The subjective visual vertical in a nonhuman primate,” J. Vision, **8**, No. 3 (2008) 19: 1-8.
6) K. Jaggi-Schwarz and B. J. M. Hess: “Influence of dynamic tilts on the perception of earth-vertical,” Exp. Brain Res., **149** (2003) 340-350.
7) S. Keusch, B. J. M. Hess and K. Jaggi-Schwarz: “Direction specific error patterns during continuous tracking of the subjective visual vertical,” Exp. Brain Res., **155** (2004) 283-290.
8) A. D. Van Beuzekom, W. P. Medendorp and J. A. M. Van Gisbergen: “The subjective vertical and the sense of self orientation during active body tilt,” Vision Res., **41** (2001) 3229-3242.
9) H. L. Jenkin, M. R. Jenkin, R. T. Dyde and L. R. Harris: “Shape-from-shading depends on visual, gravitational, and body-orientation cues,” Perception, **33** (2004) 1453-1461.
10) R. T. Dyde, M. R. Jenkin and L. R. Harris: “The subjective vertical and perceptual upright,” Brain Res., **173** (2006) 612-622.
11) M. J. Young, M. S. Landy and L. T. Maloney: “A perturbation analysis of depth perception from combinations of texture and motion cues,” Vision Res., **33** (1993) 2685-2696.
12) E. B. Johnston, B. G. Cumming and A. J. Parker: “Integration of depth modules: Stereopsis and texture,” Vision Res., **33** (1993) 813-826.
13) 坂野雄一，金子寛彦，松宮一道：“両眼視差と遠近法情報の統合過程における視距離と過去の経験の影響”，光学，**33** (2004) 110-121.
14) M. Barnett-Cowan and L. R. Harris: “Perceived self-orientation in allocentric and egocentric space: Effects of visual and physical tilt on saccadic and tactile measures,” Brain Res., **1242** (2008) 231-243.
15) M. S. Landy, L. T. Maloney, E. B. Johnston and M. Young: “Measurement and modeling of depth cue combination: In defense of weak fusion,” Vision Res., **35** (1993) 389-412.
16) M. O. Ernst and M. S. Banks: “Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion,” Nature, **415** (2002) 429-433.
17) J. M. Hillis, M. O. Ernet, M. S. Banks and M. S. Landy: “Combining sensory information: Mandatory fusion within, but not between senses,” Science, **298** (2002) 1627-1630.