

垂直-水平錯視再考 — 観察者の俯瞰および仰視が錯視量変化に及ぼす影響 —

小原 宏基・川合 悟

はじめに

研究背景

物理的には同じ長さの線分にも関わらず、水平にある線分の上にもう一本の線分を垂直に立て、その長さを比較してみると、垂直線の方が明らかに水平線よりも長く見える。そして、垂直線を水平線の midpoint 付近に立てたときは、垂直線の長さははるかに長く知覚されるのに対して、水平線の endpoint 付近に立てると錯視は軽減され、ほぼ等しいまでの長さに知覚される。

この現象は、垂直-水平錯視 (Vertical-Horizontal Illusion, 以後, VHI)あるいは報告者にちなんで「Fick illusion」(Hilano & Yanaka, 2011; 北岡, 2010; Kinoshita, Tang, & Ishii, 2012; Murakami, Mizuno, Yamanaka, Huo, & Murakami, 2019)と呼ばれ、心理学の長い歴史において最も親しまれてきた「錯視」の一つである (Valentine, 1912a, b; Ritter, 1917; Suto, 1960; Morinaga, Noguchi, & Ohishi, 1962; Avery & Day, 1969; Stacey, 1969; Cormack & Cormack, 1974; 松田, 1997; 大山, 2005; 北岡, 2005, 2010)。中でも Künnapas (1955a, b, 1957a, b, c, 1959)は、VHIに関わる様々な要因と錯視量との関係を系統的に調べ、VHI研究の礎を築いた研究者といえる。しかし、彼らの精力的な研究にも関わらず、その発生機序については未だ不明な点が多い。近年に入り、認知科学が隆盛になると、錯視は「人間の視知覚機構の解明に重要な手がかり」と見なされ、VHIの現象および発生機序を説明する新たな知見が盛んに報告されるようになった (Prinzmetal & Gettleman, 1993; Craven, 1993; Fink, Marshall, Weiss, & Zilles, 2001; Howe & Purves, 2002; Wolfe, Maloney, & Tam, 2005; Yacoub, Harel, & Ugurbil, 2008; Charras & Lupiáñez, 2009, 2010; Hamburger & Hansen, 2010; Mamassian & de Montalembert, 2010; 川合, 2010; Marma, Bulatov, & Bulatova, 2015; 東山, 2012; Mikellidou & Thompson, 2013; 安岡・石井, 2014)。

本研究者たちも、視知覚機構解明を視野に入れ、VHIの刺激図形に関わる要因を操作し、観察者から得られる錯視量を手がかりに実験を行ってきた (小原・川合, 2020a, b)。その結果、(1)水平線上で垂直線を左右に動かすと、垂直線が長く知覚される錯視量は midpoint では最大で、midpoint と endpoint との間は小さくなり、endpoint では midpoint ほどではないが再

び増加する M 字型に変化し、これまでの midpoint が最大で endpoint に近づくにつれて小さくなる V 字型という知見とは異なること (Künnapas, 1955a)、(2)図形を回転させ、垂直方向と水平方向を入れ替えると錯視量変化が異なることによる垂直と水平軸の異方性が確認されたこと、(3)単眼視と両眼視では生じる錯視量に差がないことが明らかになった (小原・川合, 2020a)。また、実験室や刺激図形の明るさを操作すると、明所視での錯視量の変化に比べ、薄明視や暗所視での錯視量の変化が減少し、錯視が減弱されるなど新たな知見を報告した (小原・川合, 2020b)。

しかし、これらの実験では、刺激として用いた VHI 図形は、常に観察者の前額面に平行に提示された。つまり、図形上の二つの線分は、二次元 (縦横)平面上で位置や長さが変化していたことなる。しかし、我々の現実世界では、もう一次元、すなわち奥行 (前後)軸が存在しており、人間の視知覚機構の解明にアプローチするためには、奥行 (前後)要因と人間に知覚される長さとの関係について明らかにすることは極めて重要と考える。

そこで、奥行要因に着目した先行研究を振り返ってみると、von Collani (1985)は、逆 L 字図形を前額面 (90°)に対して観察者に近づく方向に $+37.4^\circ$ および $+57.3^\circ$ 傾け、水平位の基準線の長さ (100%)に対して垂直位にある調整線の主観的等価点 (以後, PSE)を測定した。その結果 90° での PSE が 93.4%で過大視がみられ、 $+37.4^\circ$ 傾けたときの PSE は 96.7%と過大視がやや減弱した。そしてさらに $+57.3^\circ$ まで傾けると PSE は 103.2%となり、逆に過小視に転じた (Figure 1 の□印)。それゆえ PSE と傾斜角度との関係は観察者側から前額面にかけて「右下がり」の変化プロフィールと捉えることができる。

また安岡・石井 (2014)は、逆 T 字図形 (Figure 1 の●印)および T 字図形 (Figure 1 の△印)を用いて、前額面 (0°)に対して観察側に 3 段階 ($+45^\circ$, $+30^\circ$, $+15^\circ$)、観察者から遠のく方向に 3 段階 (-15° , -30° , -45°)に傾け、各条件での PSE を測定した。結果はすべての範囲において調整線の方が過大視され、垂直線の実際の長さが基準線よりも短く評価された。全体として逆 T 字図形 (●: PSE = 93.1% ~ 96.4%)よりも T 字図形 (△: PSE = 91.2% ~ 94.5%)の方がより錯視が強く現れた。PSE と傾斜角度との関係を質的に捉えると、逆 T 字図形においては観察者側 ($+60^\circ$)から遠のく方向 (-60°)に

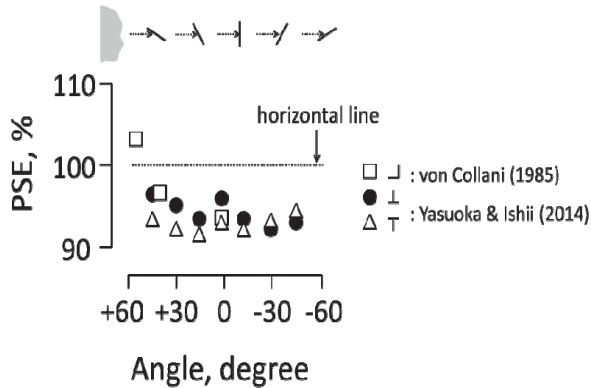


Figure 1 俯仰視角度の錯視量への影響 (von Collani(1985), 安岡・石井 (2014) の図を改変) 刺激図形を観察者に近づく (仰視) 方向あるいは遠ざかる (俯視) 方向に変化させたときの垂直線分の PSE。点線は水平線の長さを 100% としている。□ は L 字図形 (von Collani, 1985, p.552, Table 2), ● と △ はそれぞれ逆 T 字図形と T 字図形 (安岡 & 石井, 2014, p.34, Figure 4) の結果である。掲載はいずれも許可を得た。

かけて「右下がり」の傾向を示しているが、 0° における錯視量の若干の減弱を反映して「右下がりの W 型」の変化プロフィールと捉えることができる。一方、T 字図形においては「右上がり」あるいは「W 型」のプロフィールと捉えることができる。

以上の先行研究からは、前額面付近 ($0^\circ \sim \pm 15^\circ$) では錯視が最も強く現れることは共有できる。しかしながら、前後に組織的に傾斜させたときの知見が少なく、また接点位置との関係性も、異なる錯視図形が用いられていることから、俯仰視角度の変化に対する錯視の現れ方がどのようになるのかを判断することは難しい。

このため、本研究の目的は、VHI 図形に対して俯仰視角度および接点位置の二要因を変化させたときの VHI に及ぼす質的および量的変化を検証する。俯仰視角度に対しては、VHI 図形の水平線を基準軸として、観察者の視軸に対して手前側へ傾けたり、奥側へ傾けたりすることによって、垂直線に三次元的要素を加えることにした。このことにより、観察者と水平線との距離を一定に保つことが可能であり、基準となる物理的な長さを一定に保つことができる。また、接点位置に対しては、提示する図形を逆 L 字—逆 T 字—L 字のように組織的に変化させた。

実験仮説は、先行研究の知見に基づき以下のように立てた。(1)調整される垂直線の錯視量は俯仰視角度の影響を受けるが、いずれの角度条件でも垂直線に過大視が生じる (安岡・石井, 2014; cf. von Collani, 1985)。次に、観

察者から等距離にある刺激は傾斜角度が同じなら、網膜に投影される像の長さも等しくなるので (von Collani, 1985), (2)傾斜の方向には影響を受けず、前額面 (0°) を軸とした対称的な錯視量変化を示す (安岡・石井, 2014) とした。また、二線の接点位置の影響については、観察者と水平線は常に等距離にあり、垂直線は水平線とは常に直角にあることから、錯視量の変化は V 字型パターン (Künnapas, 1955a) ではなく、(3)M 字型パターン (Marma et al., 2015; 小原・川合, 2020a, b) が維持されるとした。

方法

実験参加者

健康な成人 23 名 (男性 13 名, 女性 10 名; 平均年齢 20.83 ± 1.40 歳) が同意の上実験に参加した。実験参加者すべてにおいて、課題遂行のための知覚運動機能および視覚機能に支障はなかった。また日常生活において眼鏡やコンタクトを着用している実験参加者はそれらを着用して課題を行った。なお実験の仮説については知らなかった。本実験は帝塚山大学倫理委員会の承認 (29-32) を経て実験参加者に対して倫理的配慮の下に実施した。

実験環境

VHI 図形 Figure 2 に実験の概略図を示した。実験刺激 (VHI) の提示、操作およびデータの記録はパソコン (Windows 7) 上で行った (Figure 2-A)。Visual Studio 2012 (Microsoft 社製) を用いて、以下のように刺激提示、調整線の調整、各試行の記録ができるプログラムを作成した。刺激図形は、実験参加者 (Figure 2-C) の前に垂直に設置されたフルフラットなパソコン画面 (Figure 2-B; シャープ (株) 製, 15 inch 液晶カラーモニター, LL-T15G4-H, Japan) 上に提示された。基準線となる水平線の長さは 50 mm (172 pixel), 幅 3 mm (10 pixel) でパソコン画面の中央に水平位に提示された。

一方、実験参加者が長さを調整する垂直線 (幅 3mm) は、基準線を 5 等分した開始点のいずれかが基準線と同時に提示され、その点から垂直方向に線分を伸縮できるようにした。調整線の長さの調整はゲームコントローラ (Figure 2-E; 株式会社 HORIPAD FPS PLUS, Japan) を用いて実験参加者自らが容易に調整できるようにした。操作に不慣れた実験参加者も容易に理解し、また暗室でも容易に操作できるよう 3 操作で一試行が完結できるようにした (Figure 2-F)。すなわち、① ジョイスティック (左) に触れると図形表示と長さの調整開始、② [右○] ボタンで調整終了、③ [R1] ボタンで確定—一試行終了の 3 操作だった。[R1] ボタンの設定は、実験参加者が確認、再調整できるという意味だけでなく、指先からの能動触覚ではなく (Heller & Joyner, 1993; Heller, Calcaterra, Burson, & Green, 1997), 視覚からのフィードバックに最終的に依存するとい

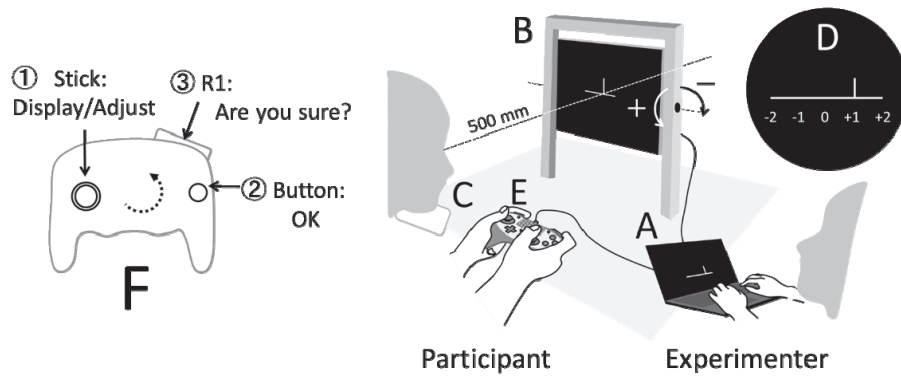


Figure 2 実験の概略図(右)とコントローラ(左) 実験は実験者のパソコン(A)ですべて制御された。刺激図形は chin-rest (C) に顎を載せた実験参加者から 500 mm の距離にある画面 (B) に表示された。基準となる水平線 (50 mm) 上の 5 つの接点位置 (D) のいずれかの点から任意の長さの垂直線が表示された。実験参加者はゲームコントローラ (E) のボタンとジョイスティックを操作 (F) して水平線と同じ長さになるように垂直線の長さを調整した。画面 (B) は刺激画面の水平線を回転軸として、垂直位 (0°) を挟んで、実験参加者に近寄る方向に 4 水準 ($+15^\circ$, $+30^\circ$, $+45^\circ$, $+60^\circ$), 遠ざかる方向に 5 水準 (-15° , -30° , -45° , -60° , -75°) に傾斜させた。図 2 に示すように、日常生活との関連では + の回転では、垂直線を斜め上から見下ろす (Depressing view) に当てはまり、- の回転では垂直線を斜め下から見上げる (Elevation view) に当てはまる。実験室はほとんど真っ暗 (6.0 lx) にできたが、刺激を含め 44.0 lx の照度は免れなかった。

う意味で重要だった。試行から得られた実験参加者のデータは、自動的に条件や実験参加者の情報とともに記録され、その後の分析に用いられた。ジョイスティックの移動方向と調整線の伸縮方向は一致させ 3 pixel/秒で描画させた。調整線の解像度は 5 pixel (1.45 mm) だった。なお、実験参加者の操作はすべて実験者用パソコン画面 (Figure 2-A) に表示させ、実験者が確認することができた。

実験参加者用パソコン画面 (Figure 2-B) は、画面上に映る図形の水平線を回転軸として回転させることができた。実験参加者の視軸と垂直となる条件を 0° として、実験参加者側に 15° ずつ傾斜する方向 (+) に 4 水準、 15° ずつ遠ざかる方向 (-) に 5 水準に傾斜させた。実験参加者側が 1 水準 ($+75^\circ$) 少ないのは画面自体の制約による。なお、+ 側の見えは実験参加者が図形の垂直線を斜め上から見下ろすことになるので俯瞰条件 (Depression condition), 反対に - 側の見えはそれを斜め下から見上げることになるので仰瞰条件 (Elevation condition) と定義した。

要因の操作 俯仰瞰角度 (10 条件) および接点位置 (5 条件) の二要因を実験変数とした。画面が垂直の場合を 0° として、俯瞰条件は 4 水準 ($+15^\circ$, $+30^\circ$, $+45^\circ$, $+60^\circ$), 仰瞰条件は 5 水準 (-15° , -30° , -45° , -60° , -75°) とした。接点位置は 5 水準とし、基準線の左端点から -2 (-25 mm), -1 (-12.5 mm), 0 (中点), +1 (+12.5 mm), +2 (+25 mm) とした (Figure 3-D)。基準線と同時に提示される調整線の長さの初期値は、基準線よりも任意に短い線分 (50 mm 未満: 上昇系列) あるいは長い線分 (50 mm 以上: 下降系列) を提示し系列効果を相殺した。角度および接点位置に対して、基準線よりも短い上昇系列と長い下行系列をそれぞれ 2 試行ずつ実施し

た。結果、各条件を 4 試行行い、実験参加者の総試行数は 200 ($10 \times 5 \times 4$) 試行となった。なお角度条件は実験参加者間でカウンターバランスをとり、設定位置の提示については疑似ランダムな順序で与えた。

実験手続き

実験参加者は実験についての説明を受け、実験参加の同意を求められた。そして実験用の椅子に着席した。まず (1) 実験参加者の視軸が水平に保たれ、また姿勢が安楽に維持できるように背もたれの角度が調節された。次に (2) 足底が届き、参加者の視軸とパソコン画面の中心 (上の二本線の接点) が水平になるように、椅子の高さ、続いて実験参加者の顔前の chin-rest の高さが調整された (Figure 2-C)。次に (3) 眼球からパソコン画面までの距離 (500 mm) かつ視軸が基準線の midpoint に維持される位置に、椅子および chin-rest の前後および左右の微調整が行われた。

実験開始前に練習試行が行われ、コントローラの 3 操作 (Figure 2-F: 表示調整 → 終了 → 確定) が間違えることなく、また暗室 (44 lx 未満) でも操作できることを確認した。実験課題は、基準線 (50 mm) に対して、5 か所のいずれかの位置から提示される任意の長さの調整線を伸縮させ、同じ長さに調整することだった。実験参加者がジョイスティックに触れると、基準線と同時に調整線が 5 か所の接点のいずれかから提示された (Figure 2-D)。実験参加者は、調整線の長さが基準線と等しくなるようジョイスティックを前後に操作し、基準線と調整線の長さが等しいと判断した場合、右 O ボタンを押して試行を終えた。

一試行は 10 秒から 10 数秒程度と短時間であるが、単調な繰り返し試行であるため眼精および精神疲労等を配慮し、休息を入れ実験参加者の要望にも応じた。休息中は実験室の照度は 80 lx にした。実験時間は約 70 ~ 120 分程度

を要した。

錯視量の定義

パソコンに記録された調整線の長さから基準線 (50 mm)に対する主観的等価点 (PSE; %)を算出し、基準線 (100%)に対する錯視量 (錯視の強さ)とした。したがって、PSE = 100%のときは調整線と基準線が等しく錯視がないことを示す。基準線よりも PSE が小さく評価された場合 (PSE < 50 mm = 100%)が、「同じ長さの二本の直線のうち、垂直線が長く (過大に)見える」VHI 現象を捉えていることになる。逆に、PSE が長く評価された場合 (PSE > 50 mm = 100%)は、垂直線が短く (過小に)見えることになる。例えば、ある条件で 50 mm の基準線に対して調整された線分が 45 mm と 55 mm であったとすると、前者は VHI 現象を反映するので過大視と呼び量的には PSE = 90%と表記する。一方、後者は逆方向の現象となるので過小視と呼び PSE = 110%と表記する。

分析方法

Excel 処理されたデータを IBM SPSS Statistics 22 (Windows 7)によって記述統計および統計処理を行った。各条件 4 試行の PSE の平均値を代表値とし、各参加者のデータを条件ごとに錯視量をまとめた。仮説 1 (錯視の方向)、仮説 2 (俯仰瞰角度の影響)および仮説 3 (接点位置の影響)を検証するため、参加者の代表値に対して対応のある×対応のある二要因分散分析 (10 角度×5 接点位置)を実施した。統計の有意水準は 5% ($p < .05$)とした (竹原, 2013)。

Table 1 俯仰瞰角度別および接点位置別の錯視量 (%) の平均値および標準偏差

Observer's line of sight	Angle, degree		Contact Position				
			-2	-1	0	+1	+2
Elevation	+60	Mean	102.74	105.69	101.60	105.12	104.45
		SD	5.71	6.71	7.22	7.49	6.60
	+45	Mean	102.40	106.70	101.45	106.40	105.27
		SD	7.25	9.83	10.05	9.67	7.61
	+30	Mean	101.80	107.59	100.58	106.74	104.58
SD		7.87	11.52	12.05	10.95	7.88	
+15	Mean	100.43	106.79	99.29	106.19	103.02	
	SD	8.31	13.65	12.98	12.32	8.48	
Depression	Orthogonal 0	Mean	100.02	105.52	98.84	106.01	101.56
		SD	8.05	13.63	14.96	13.08	7.32
	-15	Mean	99.29	104.32	98.37	104.89	100.30
		SD	7.16	12.28	14.50	12.20	6.45
	-30	Mean	98.51	102.94	97.24	103.82	99.36
		SD	6.28	10.71	11.90	10.75	5.86
	-45	Mean	98.21	101.87	96.84	102.38	99.37
SD		4.59	8.44	9.06	8.66	4.47	
-60	Mean	98.36	100.80	97.28	101.16	99.26	
	SD	3.44	5.96	6.05	5.98	3.00	
-75	Mean	99.06	100.28	98.48	100.54	99.58	
	SD	1.67	2.99	2.96	2.79	1.37	

結果

Table 1 は、俯仰瞰角度および接点位置の各条件別の PSE (%)の平均値および標準偏差を示している。行に角度条件、列に接点位置の結果を示した。二要因分散分析 (10 俯仰瞰角度×5 接点位置)の結果からは、俯仰瞰角度 ($F(1.87, 41.15) = 7.45, p < .01$)および接点位置 ($F(1.99, 43.73) = 10.26, p < .01$)にはいずれも有意な主効果がみられた。また俯仰瞰角度と接点位置の交互作用効果についても有意差がみられた ($F(36, 792) = 2.75, p < .01$)。そこで単純主効果の検定を行うと、各角度条件において接点位置 0 と -1 および 0 と 1 の間に有意な差が認められた ($p < .05$)。多重比較 (Bonferroni 法)では、+60° と -45°、-60° および +75° のそれぞれとの間に、また +45° と -30°、-45° および -60° のそれぞれとの間に、+30° と -15°、-30° および -45° のそれぞれとの間に有意な差が認められた ($p < .05$)。次に接点位置については「-2」と「-1」および「-2」と「1」の間に、また「0」と「-1」および「0」と「1」の間に有意差が認められた ($p < .05$)。

Figure 3 は、Table 1 の結果をもとに、俯仰瞰角度および接点位置別に PSE (%)の変化パターンを示したものである。基準となる水平線 (100%)に対する、調整された垂直線の PSE (%)の平均値を角度別および接点位置別に示している。全体的にみると、俯瞰条件 (+15° ~ +60°)で過小視、仰瞰条件 (-15° ~ -75°)では過大視が強くなっている。中点と端点の間 (△および▲)では全体的に過小視が顕著であった。また端点 (□および■)や中点 (○)では、前額平面 (0°)付近を境として俯瞰条件で過小視、仰瞰条件で過大視を呈した。すなわち、図形の角度変

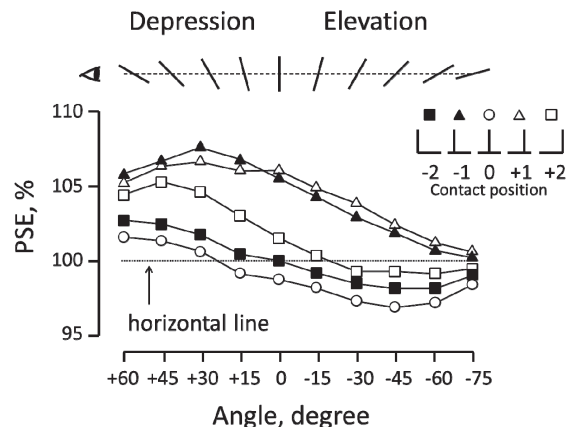


Figure 3 俯仰瞰角度別および接点位置別にみた PSE の平均値 (%) 基準線 (100%) に対する調整線の PSE (%)の平均値を俯仰瞰角度別および接点位置別に示している。縦軸に PSE (%)を、横軸には角度を示している。俯瞰条件 (+15° ~ +60°)で過小視が生じ、仰瞰条件 (-15° ~ -75°)では過大視が強くなっている。中点と端点の間 (△および▲)では全体的に過小視が際立ち、端点 (□および■)では、前額平面 (0°)を境に、俯瞰条件で過小視、仰瞰条件で過大視と逆転する。

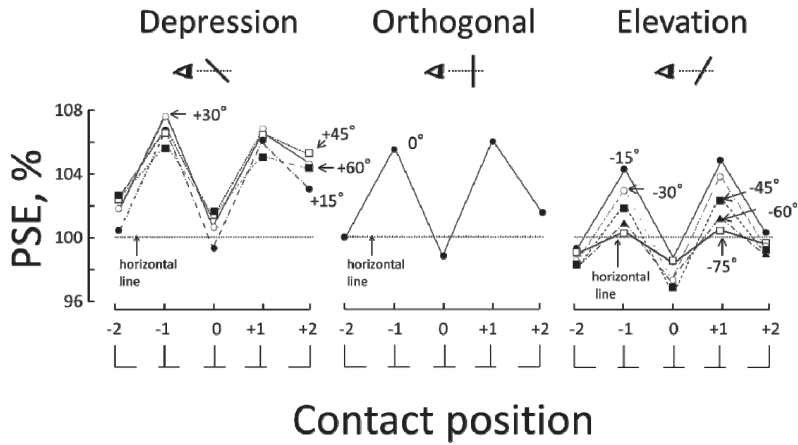


Figure 4 接点位置別・視線方向別にみた錯視量の平均値 (%) 基準線の長さに対する錯視の強さ (%) の平均値を接点位置別および視線の方向別に示している。俯瞰条件 (左; Depression) は 4 水準 (+15° ~ +60°) の各平均値, 仰瞰条件 (右; Elevation) は 5 水準 (-15° ~ -75°) の各平均値をそれぞれ示し, 直交条件 (中; Orthogonal) は 0° の平均値を示している。縦軸に PSE (%), 横軸には接点位置を示している。基準線では錯視が生じていない (0%)。基準線を下回ると垂直線を水平線よりも短く調整したことになり, 過大視が生じている。一方, 基準線を上回ると垂直線を水平線よりも長く調整したことになり, 過小視が生じている。いずれの視線方向においても, 接点位置に対して錯視の表れ方は M 字型の変化パターンが維持されていた。

化に対して, 知覚される長さは非対称的な変化を示した。

Figure 4 は, Table 1 を基に, PSE の平均値を接点位置別および視線方向別に示したものである。Figure 4 左は, 俯瞰条件における 4 水準 (+15° ~ +60°) の各平均値を, Figure 4 右は, 仰瞰条件における 5 水準 (-15° ~ -75°) の各平均値を, Figure 4 中は, 直交条件 (0°) での平均値を示している。

縦軸に基準線に対する PSE (%) を, 横軸には接点位置を示している。基準線では錯視が生じていないことを示している (0%)。そして, 基準線を下回ると垂直線は水平線よりも短く調整されたことになり, 過大視, つまり「同じ長さの二本の線分では, 垂直線が長く知覚される」VHI 現象を意味している。一方, 基準線を上回ると, 垂直線を水平線よりも長く調整したことになり, 過小視となる。いずれの図からも明らかのように, 錯視量は異なるものの, いずれの条件においても, 錯視量は接点位置に対して M 字型の変化パターンを示した。つまり各俯瞰条件において接点位置「+1」と「-1」が中点「0」や端点「+2」と「-2」よりも過小視の方向へ強く作用していた。

以上をまとめると, 基準線に対して知覚される長さ PSE は, 傾ける角度に有意に影響を受けたが, 傾斜の方向によって非対称性を示した (Figure 3)。すなわち, 観察者に対して近位に傾けるほど, PSE は水平線よりも大きくなり過小視が生じ, 反対に遠位に傾けるほど過大視が見られた。次に, 接点位置が知覚される長さ PSE に与える影響については, 俯瞰条件と仰瞰条件との間に錯視の強さに有意な差異は認められたものの, 観察者に対して近位に傾けても, 遠位に傾けても中点を底とする M 字型パターンは維持された。

考察

日常生活では, 対象を真横からみるだけでなく, 対象の上の方から視線をやや落として観察したり, 対象を持ち上げてやや下から見上げたりする。物理的に同じ長さの線分でも, 平面図形において異なる長さを知覚されたが, さらに, それを上から俯瞰したり, 下から仰瞰したりして, 三次元的な要素が加わると, 長さの見えにはどのような影響が表れるのだろうか。

日常生活において, 我々は, 知覚される見えを頼りに, 対象と自身との空間的関係を解釈していると考えられるので, 三次元的変化を加えたときの知覚される長さの組織的变化を見ることは, 人間の視知覚処理機構解明, 特に奥行知覚への手がかりになる可能性が期待される。

実験では, VHI が描かれた平面図形を観察者が俯瞰したり仰瞰したりしたときの錯視の表れ方や強さを系統的に測定するとともに, 二線の接点位置の影響も合わせて検討した。観察者と常に一定位置にある水平線を基準線として, これを軸に近位あるいは遠位の方向へ図形を傾斜させ, 各傾斜角度において, 水平線の長さと同じと知覚される垂直線分の PSE を測定した。

実験結果からは, 錯視量は傾斜角度に有意な影響を示しただけでなく, 傾斜の方向にも有意な影響を受け, 複雑な質的かつ量的変化を呈した (Figure 3)。すなわち, 観察者の近位へ図形を傾けた場合, 過小視が生じ, +45° から +30° 付近でその度合いがピークとなった。そして真横 (0°) から観察者から遠位へ図形を傾けていくと, 過小視は減弱し, -30° 付近で水平線と垂直線がほぼ同じ長さを知覚された。さらに遠位へ傾けると過大視が生じた。

結果, 先行研究 (安岡・石井, 2014) に基づいて設定した仮説 1「俯仰角度の影響は受けるが, いずれの角度条件

でも過大視が生じる」および仮説2「傾斜の方向には影響を受けず、前額面(0°)を軸とした対称的な錯視量変化を示す」は支持されなかった。一方、仮説3「接点位置に対する錯視量の変化パターンはM字型を示す」は支持された。すなわち、俯瞰条件と仰瞰条件では錯視の方向や強さに差異がみられるものの、傾斜方向に関わらず「M字型」の錯視量変化を示した(Figure 4)。この結果は同時にKünnapas(1955a)が報告した「V字型」パターンが俯瞰角度要因によるものではないことも意味していた(Marma et al., 2015; 小原・川合, 2020a, b)。なお、接点位置に対して中点を底とするM字型になるのかについての議論は先行研究を参照されたい(小原・川合, 2020a, b)。

俯仰角度が錯視に及ぼす影響

本研究結果から+60°から-30°付近まで傾斜角度の範囲で過小視、-45°から-75°にかけて過大視の傾向がみられ、観察者の近位から遠位にかけて「右下がり」の変化プロフィールが得られた(Figure 3)。この変化は接点位置の影響も受け、水平線の midpoint と端点の間(Figure 4の△印と▲印)でもっとも強く、端点(Figure 4の□印と■印)では中程度そして中点(Figure 4の○印)ではさらに角度の影響は緩やかだった。

刺激図形の線分の見えの長さが矢状方向への傾斜に左右されることについては、物理光学的観点から理論的に予想できたことである(von Collani, 1985)。つまり、Figure 5に示すように、線分の長さは図形平面が観察者の視軸と直交するとき以外、距離の影響だけでなく傾斜の影響も受け、角度の変化量に応じて網膜に投影される線分の長さは減少することになる($a > a'$)。この場合、観察者に近づけようと遠ざけようと、傾斜角度が等しければ網膜上に投影される長さは等しくなると考えられる。

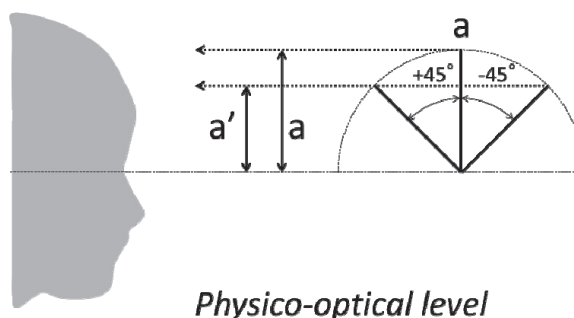


Figure 5 垂直線(a)の傾斜が網膜上に投射される長さ(a')に及ぼす影響(物理光学レベル) 物理光学レベルでは、網膜上で投射される垂直線(a)の長さ(a')は、傾斜角度に依存するが、その方向性には影響を受けない。

しかし、観察者が網膜像に投影されたこれら長さを処理し、解釈として出力された生物光学的な本研究結果からは、同じ角度変化量であっても、図形を近位に傾けるか遠位に傾けるかによって、知覚される線分の長さは前額面(90°)に対して非対称的な変化を示した(Figure 3)。つまり、知覚される長さは、傾斜の角度量だけでなく、その方向性を変数にもって変化していた。なお、この方向性が、線分の直接の傾斜を手がかりにしているのか、それとも刺激自体が発する光源(眼球の照度:38.0 lx 未満)によってわずかに認識できるパソコン画面の傾斜が手がかりになっているのかについては、本実験装置の限界から特定することはできなかった。

いずれにしても、俯仰角度に伴う錯視量変化の背景にある視知覚機構をどのように理解すればよいのだろうか。これについて安岡・石井(2014)は「遠近法理論: Perspective theory」(Woodworth, 1938; Stacey, 1969)を掲げ、「垂直方向に置かれた線分は遠方へと延びる奥行情報をもつため、水平方向の線分よりも遠くに位置している」という解釈が作用しているからとしている。実際には、この説だけでVHIの発生機序を説明することは難しく、観察者と対象との距離と見えに生じる「大きさの恒常性: Size constancy」(Thouless, 1931; Holway & Boring, 1941; Begelman & Steinfeld, 1971; von Collani, 1985)を組み合わせ、「遠くにあるものを大きく知覚する作用」の存在によってVHIが生じると説明される(Gregory, 1963, 1973; Girgus & Coren, 1975; Wolfe et al., 2005)。

このことを、まず観察者と対象に生じる光学物理的關係から説明する。Figure 6は、奥行手がかりの発生とその処理を模式的に示している。Figure 6上の図では、直交座標系の視空間に浮かぶ平面上のVHI図形の垂直線を極座標系をもつ観察者が観察しているところを示している。水平線に対して、Aは30°上側から、Bは真正面(0°)から、Cは30°下側から観察した例である。水平線は垂直線の下端で接し、観察者の視軸とは常に直交している。半円は矢状方向の視野範囲(135°)を示している。観察者は極座標系で対象の空間成分を処理するため、垂直線の上端と下端は観察者から等距離になく、結果的に視距離に差異(depth)が生じるとともに、Aでは上端が近位(点線)で下端が遠位(実線)という遠近関係が成立する。一方Bでは、逆に上端が遠位で下端が近位、またCにおいても上端が遠位、下端が近位という遠近関係が生じる。

Figure 6の下の図は、網膜上での二線の関係を示している(Rock & Heimer, 1957; Pearce & Matin, 1969; Begelman & Steinfeld, 1971)。中心視野がより遠位(実線)、周辺視野がより近位(点線)の遠近関係が生じていることを模式的に示した。水平線の長さは一定に投影されるので同じ長さで示している。Aでは垂直線の存在する前額平面が水平線の存在する前額平面よりもより近位に、Bお

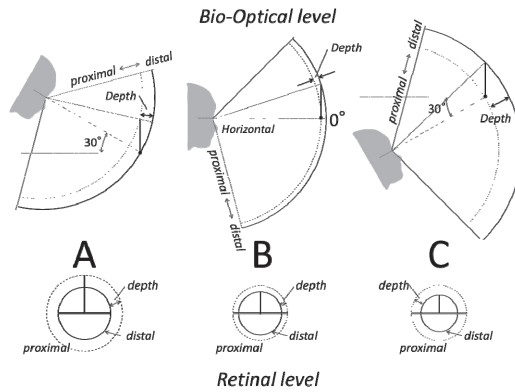


Figure 6 奥行きがかりと見えの長さの処理モデル（上：生物光学レベル，下：網膜処理レベル）図は、直交座標系の視空間に浮かぶ平面図形上の垂直線を極座標系をもつ観察者が観察しているところを模式的に描いている。一定の長さの水平線に対して、Aは30°上側、Bは真正面（0°）、Cは30°下側から観察しているときの例である。水平線は垂直線の下端で接し、観察者の視軸とは常に直交している。半円は矢状方向の視野範囲（135°）を示している。観察者は極座標系で処理するため、垂直線の上端と下端は観察者から等距離になく視距離に差異（depth）が生じ、かつAでは上端が近位（点線）で下端が遠位（実線）、Bでは逆に上端が遠位で下端が近位、Cにおいても上端が遠位、下端が近位という遠近手がかりが生じる。下図は、網膜上に投射された二線の関係を模式的に示している。網膜上では中心視野が遠位（点線）、周辺視野が近位（実線）の遠近関係が生じ、垂直線の存在する前額面がAでは水平線の存在する前額面よりも近位に、BおよびCでは逆に遠位に投射される。これらの情報に基づき大きさの重みづけが行われる。

よびCでは逆に遠位に投射される。その後、大きさの恒常性が機能し、これら奥行および遠近情報に基づいて垂直線の長さが重みづけされ、異なる長さに知覚される。

このモデルに基づいて、今回の実験結果（Figure 3）を見てみる。まず、俯瞰条件（+60°～+15°）の場合、水平線より垂直線は観察者に近づくことになる。このため、垂直線に大きさの恒常性が作用し水平線より短く見える錯視（過小視）が働くことになる。角度が0°と俯瞰条件（-15°～-75°）の場合、水平線より垂直線は観察者から遠ざかることになり、同様に垂直線に大きさの恒常性が作用し水平線より長く見える錯視（過大視）が働くことになる。これらの予想と実験結果（Figure 3）を照らし合わせてみるとほぼ一致する。

また、安岡・石井（2014）の実験結果（Figure 1）も振り返ってみると、逆T字図形（●）とT字図形（△）に生じる錯視の強さの差異についても概ね説明が可能となる。すなわち直線が水平線の上側に伸びる逆T字図形と下側に伸びるT字図形とでは、垂直線と水平線との遠位関係が逆転し、俯瞰条件ではT字図形での垂直線は水平線よりも遠位となり逆T字図形のそれは近位となる（Figure 6-A）。それゆえ逆T字図形の垂直線よりもT字図形の垂直線により強い大きさの恒常性が作用し錯視（過大視）が強くなる。一方、俯瞰条件ではT字図形での垂直線は水平線よりも近位となり、逆T字図形の垂直線のそれは遠位となる（Figure 6-C）。それゆえ大きさの恒常性の影響は逆T字図形の垂直線よりもT字図形の垂直線で弱まる。安岡・石井（2014）の両図形の結果は概ねこのモデルに当てはまっているといえる（cf. -15°条件）。

以上をまとめると、VHI図形を観察者の矢状面上に前後に傾けて観察させたとき、垂直線に対する錯視量は角度の影響を受けるだけでなく、傾斜の方向にも影響を受け、結

果、非対称的な変化を示すことが明らかになった。この背景には、物理光学的には同じ長さの垂直線であっても（Figure 5）、観察者を中心とする極座標系に依存する網膜上では、消失点を原点として生じる垂直線と水平線の奥行き関係を手がかりに、長さの重みづけがなされるためと推察した（Figure 6; Holway & Boring, 1941）。

日常生活において、我々は対象を上から見下ろしているという「俯瞰」感覚や下から見上げていう「仰視」感覚を知覚することができるが、その手がかりとして、本研究で得られた俯仰角度とその方向から導きだされる主観量変化がこれらの感覚に関与している可能性が示唆された。つまり、俯仰角度によって得られる変化関数が「どこから対象を眺めているか」という俯仰感覚を可能にしているのではないだろうか。

本実験の限界と今後の展望

日常では対象を真横から観察するだけでなく、視線をやや落として俯瞰したり、やや見上げて仰視したりしながら対象と関わることの方がむしろ多いといえる。それゆえ本実験結果は、VHIにおいて不十分だった俯仰角度と錯視の関係性を120°の視野角度の範囲（+60°～-75°）で組織的に充足した点で意義があったといえる（von Collani, 1985; 安岡・石井, 2014）。

さらに、本結果はVHIの解明だけでなく、日常の視知覚機構、特に俯仰角処理の解明にも貴重な手がかりとなる可能性があり意義が深いと思われる。なぜならば、本実験では、VHIの錯視量を測定していることは事実ではあるが、同時にこのパラダイムは、一定の長さの水平線が、矢状方向の様々な角度から観察者にはどの程度の長さを知覚されるか、その変化の程度を組織的に測定したことも事実だからである。そして得られた錯視量の変化プロフィールは、

視軸の方向性と角度変化量のいずれにも感受性をもった関数であったため、この関数が「どの高さから俯瞰あるいは仰視しているか」を知覚するための手がかりの可能性を示唆した。

幾何学的錯視図形において錯視が顕著に現れる背景には、三→二→三次元問題（石井，2006），すなわち直交三次元の世界の情報に存在する対象を、二次元の極座標系である網膜像で処理し、さらにその生物光学的情報からまた三次元世界を再構築すること（藤田，2007）が関わっているからではないだろうか。それゆえ、三次元情報に関与する俯仰視処理に関する知見は有用な手がかりになると考えられる。

しかしその一方で、俯仰視角度要因の重要性に言及するためには、本実験結果の限界と不十分さにも触れておかなければならない。第一に、本実験では、矢状面に広がる観察者の視軸と垂直線との様々な相対的位置関係について、すべてを網羅していない点である。俯仰視角度要因を明らかにするためには、矢状面に発生する観察者と垂直線との相対的な位置関係を配慮する必要がある。第二に、刺激図形をパソコン画面で表示する際に微量の光源により画面の傾斜角度が錯視量に影響した可能性を払拭できなかった点である。光源を使った長さの調整を行わせる実験装置について刺激線分のみの情報に完全に依存できる装置が望まれる。

また本結果は、これまでの結果（cf. 小原・川合，2020a, b）と比較した際、角度が 0° のときの錯視量について齟齬がみられる。これは実験中画面の傾き角度などは実験参加者に伝えてはいないが、実際に画面を傾けて実験を行っていることから、実験参加者が無意識的に傾きを認識しようとする心の働きが影響を与えている可能性が考えられる。

結論として、刺激図形と観察者の視軸間で生じる俯仰視角度変化は三次元解釈に寄与するため錯視量の現れ方や強さに大きく影響することが本研究から明らかになった。それゆえ、俯仰視角度要因には十分に留意して実験環境を整える必要がある。そして、実験装置についても傾きにより直線の動きに若干の違和感を覚える可能性があるため、このことは今後の検討事項である。

要約

Vertical-Horizontal Illusion (VHI)の錯視の現れ方や強さへの俯仰視角度および接点位置の影響を検証した。逆T字やL字を含む(5水準)VHI図形が、フラットなパソコン画面上に提示され、水平線を回転軸として、観察者の矢状面に 15° ごとに遠位5水準 ($+15^\circ \sim +75^\circ$)、近位4水準 ($-15^\circ \sim -60^\circ$) に傾斜させた。23名の実験参加者は、垂直線の開始点を含む水平線が提示された後、コントローラで水平線と同じ長さになるように垂直線分を調整するように求められた。各条件でのVHIのPSEが

測定された。結果は、有意な接点位置の影響がみられ、傾斜の方向に関係なく中点では最大で、中点と端点との間は小さくなり、端点では中点ほどではないが再び増加するM字型を示した。この結果は先行研究と一致した(Marma et al., 2015; 小原・川合, 2020a, b)。俯仰視角度による錯視量変化も有意で非対称性を示した。すなわち、俯仰視角度が大きくなるほど過小視が生じ、仰視角度が大きくなるほど過大視が生じた。非対称性の発生機序について物理光学および生物光学的側面から考察した。

引用文献

- Avery, G. C., & Day, R. H. (1969). Basis of the horizontal-vertical illusion. *Journal of Experimental Psychology*, 81(2), 376-380.
- Begelman, D. A., & Steinfeld, J. (1971). Retinal vs. phenomenal determinations of the horizontal-vertical illusion. *Journal of General Psychology*, 85, 77-85.
- Charras, P., & Lupiáñez, J. (2009). The relevance of symmetry in line length perception. *Perception*, 38, 1428-1438.
- Charras, P., & Lupiáñez, J. (2010). Length perception of horizontal and vertical bisected lines. *Psychological Research*, 74, 196-206.
- Cormack, E. O., & Cormack, R. H. (1974). Stimulus configuration and line orientation in the horizontal-vertical illusion. *Perception & Psychophysics*, 16(2), 208-212.
- Craven, B. J. (1993). Orientation dependence of human line-length judgments matches statistical structure in real-world scenes. *Proceedings of the Royal Society of London, B*, 253, 101-106.
- Fick, A. (1851). De errore optico quodam asymmetria bulbi oculi effecto, Koch, Marburg.
- Fink, G. R., Marshall, J. C., Weiss, P. H., & Zilles, K. (2001). The neural basis of vertical and horizontal line bisection judgments: An fMRI study of normal volunteers. *NeuroImage*, 14, S59-S67.
- 藤田 一郎 (2007). 第6章 二つの目で見ると、「見る」とはどういうことか、脳と心の関係をさぐる (pp.155-199)化学同人。
- Girgus, J. S., & Coren, S. (1975). Depth cue and constancy scaling in the horizontal-vertical illusion: The bisection error. *Canadian Journal of Psychology*, 29, 59-65.
- Gregory, R. L. (1963). Distortion of visual space as inappropriate constancy scaling. *Nature*, 199, 678-680.
- Gregory, R. L. (1973). A discussion of G. H. Fisher's "Towards a new explanation for the geometrical illusions: apparent depth or contour proximity?" and the inappropriate constancy-scaling theory. *British Journal of Psychology*, 64, 623-626.
- Hartline, H. K. (1940). The nerve messages in the fibers of the visual pathway. *Journal of the Optical Society of America*, 30, 39-247.
- Hamburger, K., & Hansen, T. (2010). Analysis of individual variations in the classical horizontal-vertical illusion. *Attention Perception & Psychophysics*, 72(4), 1045-1052.

- Heller, M. A., & Joyner, T. D. (1993). Mechanisms in the haptic horizontal-vertical illusion: evidence from sight and blind subject. *Perception & Psychophysics*, 54(4), 422-428.
- Heller, M. A., Calcaterra, J. A., Burson, L. L., & Green, S. L. (1997). The tactual horizontal-vertical illusion depends on radial motion of the entire arm. *Perception & Psychophysics*, 59(8), 1297-1311.
- Hilano, T., & Yanaka, K. (2011). New optical illusion by animating judd illusion using scalable vector graphics. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP-2011)*, 401-404.
- 東山 篤規 (2012). 体と手がつくる知覚世界, 勁草書房.
- Holway, A. H., & Boring, E. G. (1941). Determinations of apparent visual size with distance variant. *American Journal of Psychology*, 54, 21-37.
- Howe, C. Q., & Purves, D. (2002). Range image statistics can explain the anomalous perception of length. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(20), 13184-13188.
- 石井 雅博 (2006). 騙される脳 バーチャルリアリティと知覚心理学入門, 日本バーチャルリアリティ学会 VR 心理学研究委員会 (編) (pp.27-39) 講談社.
- 川合 悟 (2010). PC-EYE: 人間の「眼」をもつコンピューター, 一視覚機構の理解をより深めるために一, 日本応用心理学会第 77 回大会抄録集, 81.
- Kinoshita, Y., Tang, Z., & Ishii, M. (2012). Horizontal Vertical Illusion by Touch. *i-Perception*, 3, 633.
- 北岡 明佳 (2005). 2.1:幾何学的錯視, 錯視の科学ハンドブック 後藤 卓男・田中 平八 (編) (pp.56-100) 東京大学出版会.
- 北岡 明佳 (2010). 1 ものの大きさや傾きが変わって見える錯視 一幾何学的錯視一 1.5 フィック錯視と上方の過大視, 錯視入門 (pp.10-11) 朝倉書店.
- Künnapas, T. M. (1955a). An analysis of the "Vertical-Horizontal illusion." *Journal of Experimental Psychology*, 49(2), 134-140.
- Künnapas, T. M. (1955b). Influence of frame size on apparent length of a line. *Journal of Experimental Psychology*, 50(3), 168-170.
- Künnapas, T. M. (1957a). The Vertical-Horizontal illusion and the surrounding field. *Acta Psychologica*, 13, 35-42.
- Künnapas, T. M. (1957b). The Vertical-Horizontal illusion and the visual field. *Journal of Experimental Psychology*, 53(6), 405-407.
- Künnapas, T. M. (1957c). Interocular differences in the vertical-horizontal illusion. *Acta Psychologica*, 13, 253-259.
- Künnapas, T. M. (1959). The Vertical-horizontal illusion in artificial visual fields. *The Journal of Psychology*, 47, 41-48.
- Mamassian, P., & de Montalembert, M. (2010). A simple model of the vertical-horizontal illusion. *Vision Research*, 50(10), 956-62.
- Mamassian, P., & Landy, M. S. (2001). Interaction of visual prior constraints. *Vision Research*, 41, 2653-2668.
- Marma, V., Bulatov, A., & Bulatova, N. (2015). Psychophysical Study of Vertical-Horizontal Illusion. *Proceedings of 37th International Conference of Biomedical Engineering*, 19(1), 70-73.
- 松田隆夫 (1997). 3 形と大きさの知覚, 視知覚 (pp.81-135) 培風館.
- Mikellidou, K., & Thompson, P. (2013). The vertical-horizontal illusion: Assessing the contributions of anisotropy, abutting, and crossing to the misperception of simple line stimuli. *Journal of Vision*, 13(8), 1-11.
- Morinaga, S., Noguchi, K., & Ohishi, A. (1962). The horizontal-vertical illusion and the relation of spatial and retinal orientations. *Japanese Psychological Research*, 4(1), 25-29.
- Murakami, Y., Mizuno, T., Yamanaka, Y., Huo, M., & Murakami, S. (2019). The Fick illusion increases toe-clearance when going up stairs. *The 28th International Meeting of Physical Therapy Science in Korea*, 15.
- 小原 宏基・川合 悟 (2020a). 垂直・水平錯視再考 一接点位置, 向きおよび単眼・両眼視が錯視量変化に及ぼす影響一, 基礎心理学研究, 38(2), 214-226.
- 小原 宏基・川合 悟 (2020b). 垂直・水平錯視再考 一明所視, 薄明視および暗所視が錯視量変化に及ぼす影響一, 帝塚山大学心理科学論集, 3, 13-20.
- Oppel, J. J. (1855). Über geometrisch-optische Täuschungen, Jahresbericht des physikalischen Vereins zu Frankfurt am Main, 37-47.
- 大山 正 (2005). 1.1: わが国における「錯視」研究の歴史, 錯視研究の意義, 錯視の科学ハンドブック 後藤 卓男・田中 平八 (編) (pp.2-14) 東京大学出版会.
- Pearce, M. D., & Matin, L. (1969). Variation of the magnitude of the horizontal-vertical illusion with retinal eccentricity. *Perception & Psychophysics*, 6, 241-243.
- Prinzmetal, W., & Gettleman, L. (1993). Vertical-horizontal illusion: One eye is better than two. *Attention Perception & Psychophysics*, 53(1), 81-88.
- Ritter, S. M. (1917). The vertical-horizontal illusion: An experimental study of meridional disparities in the visual field. *The Psychological Monographs*, 23(4), i-115.
- Rock, I., & Heimer, W. (1957). The effect of retinal and phenomenal orientation on the perception of form. *American Journal of Psychology*, 70, 493-511.
- Shipley, W. C., Nann, B. M., & Penfield, M. J. (1949). The apparent length of tilted lines. *Journal of Experimental Psychology*, 39, 548-551.
- Stacey, B. G. (1969). Explanations of the horizontal-vertical illusion and the foreshortening of receding horizontals. *Life Sciences*, 8, 1237-1246.
- Suto, Y. (1960). Study on the interdependence of the horizontal-vertical illusion and the divided illusion: I. *Japanese Psychological Research*, 2, 81-93.
- 竹原 卓真 (2013). 増補改訂 2 要因の分散分析をすべてカバー, SPSS のススメ (1), 北大路書房.
- Thompson, J., & Schiffman, H. R. (1974). The effect on the magnitude of the horizontal-vertical illusion of horizontal retinal eccentricity. *Vision Research*, 14(12), 1463-1465.
- Thouless, R. H. (1931). Phenomenal regression to the "real" object. *British Journal of Psychology*, 22, 216-241.
- Valentine, C. W. (1912a). Psychological theories of the

- horizontal-vertical illusion. *British Journal of Psychology*, *5*, 8-35.
- Valentine, C. W. (1912b). The effect of astigmatism on the horizontal-vertical illusion and a suggested theory of the illusion. *British Journal of Psychology*, *5*, 308-330.
- von Collani, G. (1985). Retinal projection or size constancy as determinants of the horizontal-vertical illusion? *Perceptual and Motor Skills*, *61*, 547-557.
- Woodworth, R. S. (1938). *Experimental psychology*. New York: Holt.
- Wolfe, U., Maloney, L. T., & Tam, M. (2005). Distortions of perceived length in the frontoparallel plane: Tests of perspective theories. *Perception & Psychophysics*, *67*, 967-979.
- 安岡 晶子・石井 雅博 (2014). 奥行情報を含む垂直水平錯視の検討, 2014 年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, 33-34.
- Yacoub, E., Harel, N., & Ugurbil, K. (2008). High-field fMRI unveils orientation columns in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*, 10607-10612.

The Vertical-Horizontal Illusion Revisited: Quantitative Variation Resulting from an Observer's Depressing/Elevating View

Hiroki OHARA and Satoru KAWAI

Abstract

Effects of viewing angle and contact position on the Vertical-Horizontal Illusion (VHI) were examined using five types of VHI figures with different contact positions, including an inverted-T and L figure. Each figure presented on a flat monitor was inclined in the sagittal plane, around the horizontal line, and in the range of +60-degrees and -75-degrees by 15-degree step. Twenty-three adults were then requested using the game controller to adjust the vertical line as to be the same length (PSE) as that of the horizontal line. The PSEs for each participant was collected for 5 x 10 (contact position x view angle) conditions. Results indicate a significant effect of contact position with such M-shape profile, regardless of direction of inclination, as with strong overestimation in the midpoint, mild overestimation in the endpoint, and rather underestimation between them, supporting the previous studies (Marma et al., 2015; Ohara & Kawai, 2020a, b). The effect of viewing angle was also significant with such asymmetric profile as with strong underestimation mainly in the depressing views, while weak overestimation around the elevating view. A significant interaction effect seems to be due to the specificity of the mid-point's behavior. The mechanism for the asymmetry profile is interpreted from the viewpoints of physical-optics as well as biological-optics.

Keywords: Vertical-Horizontal Illusion; Viewing angle; Depressing view; Elevating view