両眼網膜視差を持たないステレオグラムの輝度変化に対する奥行反応¹

九州大学 下 野 孝 一²
ヨーク大学 大 野 侑 一

Perceived depth produced by luminance differences in the
two eyes with zero disparity

Koichi Shimono (*Department of Psychology, Faculty of Literature,
Kyushu University, Higashi-ku, Fukuoka 812*) and Hiroshi Ono
(*Department of Psychology, Faculty of Arts, York University, North
York, Ontario, Canada, M3J 1P3*)

We examined Kaufman, Bacon, and Barroso's (1973) finding that perceived depth covaries with relative luminance of the two half-fields of the stereogram. Five subjects were shown two sets of stereograms: one with three lines and another with random dots. In each trial, they reported the apparent depth plane produced by one of 15 different relative luminances of the lines or the mid portions of the random dots. The direction and the magnitude of perceived depth as a function of the relative luminance varied across subjects. It is argued that the stimulus should be considered as being Wheatstone-Panum's Limiting Case rather than that requires processing of binocular retinal disparity.

Key words: relative luminance, stereopsis, depth perception, Wheatstone-Panum's Limiting Case, zero disparity.

1838年, Wheatstone は水平方向のずれ(両眼網膜視差, binocular retinal disparity 以下, 網膜視差)を持った図形を両眼分離提示(dichoptic presentation)すると奥行印象が生じることを報告した。網膜視差によって引き起こされる, この奥行の知覚は両眼立体視(binocular stereopsis)と呼ばれている。一方, 網膜視差を持たない刺激を両眼分離提示しても奥行印象は生じると報告した一群の研究がある。例えば Wheatstone-Panum の限界条件(一方の眼に1つの網膜像を, 他方の眼に2つの網膜像を作る刺激配置——以下 W-PLC) (例えば Panum, 1940/1858) や, 両眼に提示された輪郭線間の明るさの差(例えば Foley, 1976; Kaufman, Bacon, & Barroso, 1973) が奥行をもたらす刺激条件として報告されている。これらの網膜視差がない刺激でも奥行印象が生じるという報告は, 一般に認められた両眼立体視の概念と明らかに矛盾する。

両眼立体視の枠組みから見た場合, これらの報告には検討すべき問題がある。網膜視差を持たない刺激条件において奥行印象が確かに得られるかという経験的問題と, (もし確かに観察されるとするならば)その条件下で得られた奥行印象を“両眼立体視”のカテゴリーに入れるべきかという理論的問題である。

理論的問題の前提として, まず経験的問題について考えてみよう。最近, いくつかの研究は, 今まで“両眼立体視”として考えられていた観察が明白なものではないことを示した。例えば, W-PLC がもたらす奥行印象は方向や量が一定ではなかった(Ono & Wade, 1985; Shimono & Ono, 1986)。また, Foley (1976) の報告した網膜視差のない刺激間の明るさの差が奥行をもたらすという現象も, その後の研究では確認されていない(Krol & van de Grind, 1986; Tam & Ono, 1987)。

網膜視差のない刺激間の明るさの差が奥行をもたらすという現象はまた Kaufman et al. (1973) によっても報告されている。彼らはステレオグラムの左右の単眼図形(half-field)を重ねたものを両眼で観察させ, さらに一方の眼においてのみ最初のステレオグラムの2つの単眼図形間の明るさの差を変化させたとき, 見えの奥行量はその明るさの差に依存して変化すると報告した。本研究の目的は, 網膜視差がなくても奥行知覚が生じるという

¹ 本研究は大野 侑一に対する the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada からの研究費(AO 296)によって援助されたものである。

² 現所属 東京商船大学社会科学教室。本論文をまとめるにあたり貴重な示唆をいただいた福岡教育大学中溝幸夫助教授, 北九州大学近藤倫明助教授, Canada York 大学の Wa Tam James 博士に感謝いたします。

報告の1つ, Kaufman et al. (1973) による報告を確かめることであった。さらに, Kaufman et al. (1973) の報告した現象を“両眼立体視”のカテゴリーに入れるべきかという理論的問題についても討論した。

方 法

本実験では刺激として, Kaufman et al. (1973) と同様, ランダムドットステレオグラム (random-dot stereogram 以下 RDS) と 2 組の 3 本の縦の線分からなる線ステレオグラムを使った。

装置 RDS と線ステレオグラムはコンピュータ (LSI 11/23) で制御された Grinell Graphic System によって CRT (Hitachi HM-2713) 上に提示された。被験者の角膜表面から, 眼の高さにある CRT の中央までの距離は 100 cm であった。偏光フィルターが左右両眼の前と左右の単眼図形の前に置かれた。そのとき輻輳距離は約 34 cm, 輻輳角は約 10.1° であった。被験者は調節と輻輳との不一致を調整するために -1.5 D のレンズを通して CRT を観察した。

刺激 (1) RDS の場合。まず $112(\text{横}) \times 256(\text{縦})$ 画素からなる網膜視差を持つステレオグラム (primary stereogram, 以下 P-ステレオグラム) を作った。画素の大きさは $3.2' \times 2.9'$, ステレオグラム全体の大きさは $6.0' \times 12.4'$ であった。ステレオグラムの中の網膜視差を持つ領域 (中心領域) は 56×56 画素からなる矩形 (大きさは $3.0' \times 2.7'$) であり, 網膜視差の大きさは $6.5', 13.0', 19.4'$ であった。次に P-ステレオグラムの左右の単眼図形 (以下 P-単眼図形) を重ねて, 網膜視差を持たないステレオグラム (new stereogram, 以下 N-ステレオグラム) の左右の単眼図形 (以下 N-単眼図形) を作った。この N-ステレオグラムが被験者に両眼分離提示された。N-単眼図形を作るときは 2 つの P-単眼図形の輝度を画素ごとに加算した。左右の N-単眼図形の平均輝度はいずれも 5.8 cd/m^2 であった。一方の N-単眼図形を作るときには, 左右の P-単眼図形の輝度の相対寄与率は 1 対 1 (2.9 cd/m^2 対 2.9 cd/m^2) に保った (Nc-単眼図形)。他方の N-単眼図形を作るときには, 一方の P-単眼図形の輝度を 0 から 5.8 cd/m^2 まで, 他方の P-単眼図形の輝度を 5.8 cd/m^2 から 0 まで等間隔で変化させ, 輝度が一定 (5.8 cd/m^2) になるように組み合わせた (Nv-単眼図形)。

(2) 線ステレオグラムの場合。刺激の作り方は RDS の場合と同じであった。 $6.5', 13.0', 19.4'$ の網膜視差を持つ P-ステレオグラムの左右の単眼図形 (縦の 2 本の線分) のうち, 左側の線分が重なるようにして N-ステレオグラムの単眼図形を作った (Kaufman et al., 1973, Fig. 1 を参照)。N-単眼図形の 3 本の線分の長さは $42.7'$, 幅は $6.5'$ であり, 左側と右側の線分の距離は

$65'$, 中央と右側の線分との角距離は P-ステレオグラムの網膜視差の大きさに対応していた。Nc-単眼図形の輝度は一定であり, 左側の線分では 5.8 cd/m^2 , 中央と右側の線分では 2.9 cd/m^2 であった。Nv-単眼図形の 3 本の線分のうち, 中央と右側にある線分の輝度が P-単眼図形の輝度の相対寄与率によって変化した (左側の 1 本の線分の輝度は一定であった)。

手続き RDS の場合も線ステレオグラムの場合も, 実験は 6 セッションから成り, それぞれのセッション内では P-ステレオグラムの網膜視差の大きさと Nv-単眼図形が提示される眼が一定であった。網膜視差の大きさの条件と Nv-単眼図形が提示される眼の条件の組み合わせは被験者間で変えられた。各セッションは 4 ブロックから成っており, それぞれのブロックでは 15 種類の N-ステレオグラム (Nv-単眼図形において P-単眼図形の輝度の相対寄与率が異なる) がランダムな順序で提示された。被験者は自由眼球運動下で刺激を観察した。

(1) RDS の場合。調整刺激として赤い縦の線分 ($9.6' \times 84.4'$) を N-単眼図形の中央付近に提示した。その線分は, 初めに網膜視差がゼロであるか, あるいは P-ステレオグラムの 2 倍の, 交差性か非交差性の網膜視差を持っていた。被験者はその線分を, 周辺領域から奥行方向に“より離れている方の”中心領域と同じ平面にくるように調整した³。被験者はまず, 調整刺激なしに CRT を観察し, 中心領域が周辺領域の手前に見えるか, 後ろに見えるか, あるいは同一面上に見えるかを口頭で報告した。その後, 被験者はコントロールボックスのボタンを押してスクリーン上に調整刺激を提示し, ジョイスティックを動かしてその刺激の網膜視差を, 見えの奥行に一致するように調整した。

(2) 線ステレオグラムの場合。調整刺激 ($6.5' \times 58.0'$ の線分) は中央の線分と右端の線分の間, 上方に提示された。ステレオグラムの線分の上端と調整刺激の下端は垂直方向に $7.3'$ 離れていた。被験者は調整刺激を, 知覚された 3 本の線分のうち左端の線分を含む面を基準として, 奥行方向に“より離れている方の”線分と同じ面上にくるように調整した³。また, 被験者はどの線分に合わせて調整したかを口頭で報告した。その場合, “中央の線分”, “右の線分”, あるいは“両方の線分” (2 本の線分が同一面に見えた場合) の 3 つのカテゴリーが使われた。

被験者 21 歳から 36 歳までの 4 名の男性と 1 名の女性が実験に参加した。彼らはステレオプシスに異常はなく, 視力は正常であった。

³ 被験者がしばしば中心領域が 2 つの面 (1 つは周辺領域の手前から後ろ, もう 1 つは周辺領域と同じ面) に見えると報告したのでこのような教示を行った。

結果と考察

結果の分析の目的は知覚された奥行と P-単眼図形の輝度の相対寄与率との関係を調べることであった。被験者の調整した奥行量が、一方の P-単眼図形の輝度の相対寄与率の関数としてプロットされた（その単眼図形の輝度が 0 であるとき、投影幾何学は見えの奥行が基準面より“後ろ”であることを、1.0 のときは“手前”であることを予測する）。同一の相対寄与率であっても、知覚された奥行量、奥行の方向がブロックごとに必ずしも

一定ではなかったもので、そのことを示すために一試行毎の奥行量がプロットされた。

まず、RDS に対する反応が分析された。被験者の反応には 2 つのタイプがあった。輝度の相対寄与率の変化に関して見えの奥行量が徐々に変わる連続的な変化タイプと階段状になる不連続変化タイプである。Fig. 1(a) と Fig. 1(b) はそれぞれ連続的な変化タイプと不連続的な変化タイプの典型的な例を示している（両者とも Nv-単眼図形が右眼に提示された場合の結果である）。各被験者がどのタイプを示したかを、P-ステレオグラムのそれぞれ

Fig. 1. RDS に対する反応の 2 つのタイプ。知覚された奥行が連続的に変化するタイプ (a) と不連続に変化するタイプ (b)。図中の記号 Δ は 1 つの試行の調整刺激の網膜視差量を示しており、 $\blacktriangle$, $\circ$, $\bullet$ はそれぞれ 2 試行, 3 試行, 4 試行で調整刺激の網膜視差量が等しかったことを示している。

れの網膜視差の大きさごとに, Nv-単眼図形が提示される眼, 輝度の相対寄与率の範囲 (0 から 0.5 までと 0.5 から 1.0) の各条件で調べた. その結果, 被験者 M. S. 以外の全ての被験者において, Nv-単眼図形がいずれの眼に提示されようとも反応のタイプは同じであった. 網膜視差が $6.5'$ のときは, 輝度の相対寄与率の範囲が 0 から 0.5 の場合には 3 名が, 0.5 から 1.0 の場合には 5 名が, $13.0'$ と $19.4'$ のときには 1 名が連続的变化を示した. 被験者 M. S. の反応は網膜視差が $6.5'$ であり, Nv-単眼図形が左眼に提示され, 輝度の相対寄与率の範囲が 0.5 から 1.0 であったときにのみ, 連続的变化タイプ, その他の場合は不連続的变化タイプであった.

われわれの RDS に関するデータは, 見えの奥行は P-単眼図形の輝度の相対寄与率によって連続的,あるいは不連続的に変化することを示した. 連続的变化は P-ステレオグラムの網膜視差が小さい場合, 不連続的变化は, 網膜視差が大きい場合によく観察された. このことは Kaufman et al. (1973) に報告された結果と矛盾はしない (Kaufman et al., 1973, Fig. 5 及び Fig. 6 を参照). ただし, これらの結果から Kaufman et al. (1973) のように, “見えの奥行の関数の形がステレオグラムの網膜視差に依存して変化する” (p. 46) とは言いきれな

い. というのはわれわれの結果では, 見えの奥行の変化の関数のタイプが, 網膜視差の大きさによって変化しない被験者が見られたからである. たとえば, 被験者 K. S. と M. S. の反応は網膜視差の大きさに関わらず不連続タイプであり, 被験者 J. T. のそれは連続的变化タイプであった.

次に線ステレオグラムに対する反応が分析された. 分析の方法は RDS に対するものと同様であった. 線ステレオグラムに対する反応には Fig. 1 に示したようなタイプと同様に, 連続的变化タイプと不連続变化タイプが見られた. 分析の結果, 各被験者の反応には, 被験者 M. S. の $6.5'$ に対する反応(連続的の反応)と K. S. の $13.0'$ と $19.4'$ に対する反応(不連続的の反応)を除いて, 各網膜視差で両方のタイプの反応が見られた. しかしながら, これらの両タイプの反応には, それぞれ見えの奥行の方向が RDS に対する反応と異なる 2 つの反応があった. 見えの奥行の方向が, 投影幾何学の予測と反対である反応と, 見えの奥行が一定でない反応である. Fig. 2(a) において, 奥行を持つ線分は, 常に左側の基準線より後ろに定位されている. 反応は連続的变化をしているが, 輝度の相対寄与率が 1.0 のとき奥行の方向は投影幾何学の予測と反対の方向である. Fig. 2(b) において,

Fig. 2. 線ステレオグラムに特有な 2 つの反応. 奥行をもって知覚される線分の奥行の方向が, 投影幾何学の予測と反対方向である反応 (a) (この図の場合, 輝度の相対寄与率が 1.0 のとき, 見えの奥行は手前と予測される) と, 輝度の相対寄与率と同じとき, より離れて知覚される線分の奥行の方向が試行間で反対である反応 (b) (この図の場合は 1.0 付近のとき). 図中の記号の意味は Fig. 1 と同様である.

奥行量は不連続的变化をしているが、1.0 付近のとき、線分は類似の奥行量で手前に見えたり、後ろに見えたりしている。Fig. 2(a) と (b) に示すような反応は、それぞれ網膜視差が 6.5' のとき 1 名と 3 名、13.0' のとき 2 名と 1 名、19.4' のとき 3 名と 2 名が示した。さらに線ステレオグラムの結果の特徴は、輝度の相対寄与率が 0 か 1.0 付近では、基準線に対してより大きな奥行を持つ線分が必ずしも常に同一の線分ではなかったことである。つまり、相対寄与率が同じであっても、試行によっては中央の線分のほうがより奥行を持って見えたり、右側の線分の方がより奥行を持って見えたりしたのである。

本実験の結果は、輝度の相対寄与率の変化が見えの奥行に影響を及ぼしているという点では Kaufman et al. (1973) のそれと一致する。しかし、相対寄与率の変化に伴う見えの奥行量、あるいは奥行方向の変化の仕方は彼らの報告と一致するものばかりではなかった。この不一致は、Kaufman et al. (1973) では被験者が 2 名であったために、彼らの結果が P-単眼図形間の輝度の相対寄与率を変化させた時の奥行反応タイプの一部しか反映していないからであろう。

本実験結果が示すように、輝度の相対寄与率の変化に対する奥行反応の関数には幾つかのタイプが見いだされた。両眼立体視の理論にとって、同一の網膜視差に対しては見えの奥行が同一の方向、類似の量を持っていることは自明のことであるから、このような反応の多様性は両眼立体視の理論では説明することは困難である。むしろ、この反応の多様性は W-PLC に関する実験結果（例えば、Gettys & Harker, 1967; Ono & Wade, 1985; Shimono & Ono, 1986）と一致している。

本実験においては一方の P-単眼図形の輝度の寄与率がゼロであるとき、提示された刺激は W-PLC としての刺激配置を含んでいる⁴。またゼロでない場合、視覚系がより輝度の低い画素、あるいは線分を検出できないと仮定すると、W-PLC の条件は満たされる。一般に W-PLC は両眼立体視の融合理論、つまり投影幾何学による予測と一致する奥行を生むと考えられていた（例えば、Ogle, 1962）。もし、その考えを受け入れるならば、本実験結果も、Kaufman et al. (1973) の結果も投影幾何学の予測と矛盾しているので、それぞれの実験に使われた刺激配置を W-PLC と解釈することは困難である（Kauf-

man et al., 1973 を参照）。しかし、最近の研究結果によると W-PLC のもたらす奥行の方向も量も一定ではないことが明らかにされている（Gettys & Harker, 1967; Ono & Wade, 1985; Shimono & Ono, 1986）。本実験結果もまた見えの奥行の量も方向も一定にはならないことを示した。これらのことは本実験で得られた奥行が、W-PLC によるという解釈と矛盾しない。

Ono & Wade (1985) は W-PLC が常に一定の奥行をもたらすわけではないのは、視覚系が網膜視差以外の奥行手がかり、たとえば、眼球運動手がかりや遮蔽手がかりを利用するためであると指摘している。同様の議論が本実験結果にも適用できる。Kaufman et al. (1973) が観察した奥行は提示された刺激の持つ“網膜視差”が処理されたものではなく、その刺激が含む W-PLC によってもたらされたものであろう。

引用文献

- Foley, J. M. 1976 Binocular depth mixture. *Vision Research*, **16**, 1263-1267.
- Gettys, C., & Harker, G. 1967 Some observations and measurements of the Panum's phenomenon. *Perception & Psychophysics*, **2**, 387-395.
- Kaufman, L., Bacon, J., & Barroso, F. 1973 Stereopsis without image segregation. *Vision Research*, **13**, 137-147.
- Krol, J. D., & van de Grind, W. A. 1986 Binocular depth mixture: an artefact of eye vergence? *Vision Research*, **26**, 1289-1298.
- Ogle, K. N. 1962 The optical space sense. In H. Davson (Ed.), *The eye*. Vol. 4. New York: Academic Press. Pp. 211-417.
- Ono, H., & Wade, N. 1985 Resolving discrepant results of the Wheatstone Experiment. *Psychological Research*, **47**, 135-142.
- Panum, P. L. 1940 *Physiological investigations concerning vision with two eyes*. (Trs. by C. Heubsher) Hanover, N. H.: Dartmouth Eye Institute. (*Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen*. 1858 Kiel: Schweser.)
- Shimono, K., & Ono, H. 1986 Occlusion as a cue for the depth in Wheatstone-Panum's Limiting Case. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, Supplement, **27**, 346.
- Tam, W. J., & Ono, H. 1987 Zero horizontal disparity in binocular depth mixture stimuli. *Vision Research*, **27**, 1207-1210.

⁴ RDS の場合、一方の眼で P-単眼図形を、他方の眼で N-単眼図形を観察したとき、中心領域の画素のうち確率的には 50% が W-PLC としての刺激配置となる。