



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Visual Circleの解析による航空機の有視界着陸時における高度の錯視について : アンダーランディング現象解明の試み
Author(s)	山ノ井, 高洋; 山崎, 敏正; 梶川, 聡 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 119, 7-13
Issue Date	1984-02-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41842
Type	departmental bulletin paper
File Information	119_7-14.pdf



Visual Circle の解析による航空機の有視界着陸時における 高度の錯視について

—— アンダーランディング現象解明の試み ——

山ノ井高洋 山崎 敏正 梶川 聡* 河口 至商
(昭和 58 年 9 月 30 日受理)

On Visual Illusion of Height During Visual Approaches to Aircraft Landing by Means of Analysis of Visual Circle

— An Attempt to Elucidate "Underlanding" Phenomenon —

Takahiro YAMANOI, Toshimasa YAMAZAKI, Satoshi KAJIKAWA
and Michiaki KAWAGUCHI
(Received September 30, 1983)

Abstract

In spite of the recent development of ILS (Instrument Landing System), it is still recognized as a crucial problem that pilots tend to fly too low during visual approaches at night or in bad weather. This phenomenon is called "underlanding". In addition to this fact, "Visual Circle" experiments, in which one constructs apparent circles in a dark room, was planned to examine the Luneburg theory of binocular visual space.

By identifying the situation of night visual approaches to landing with that of Visual Circle experiments, a geometrical model which indicates the visual illusion of height is proposed. The analysis with this model is applied to Visual Circle data and the results of simulated experiments with approach lights. The tendency of height overestimation is obtained for specific observation distance. From these results, it is confirmed that the "underlanding" phenomenon appears inevitably during aircraft landings at night. Some remarks on a dynamic approach to the psychology of aircraft landing are made.

1. 序 論

近年、大型航空機の航行に関しては航法援助装置のめざましい進歩によって、ほとんど人間の操作を要しないまでになっている。しかし、中・小型機に関しては人間の判断による航行が主であり、特に離着陸時の視覚による判断は大型機にとっても重要である。ところが人間の視知覚は外界の空間をあるがままに認識している訳ではない。特に霧・夜間などの有視界飛行時には判断

の手掛かりとなる情報が極端に少なく、視覚によって認識された空間と外界の空間との差異は大きい。このような状況において航空機は目的地よりも手前に着陸すること（アンダーランディング現象）がしばしばあり、航空事故の一つとして知られている¹⁾。

霧・夜間などにおける空間知覚と同様に両眼視以外の視知覚的要因がほとんど排除された空間知覚について数理的に論じたものとして Luneburg²⁾の両眼視空間論がある。彼の理論の根拠となったものは、暗室中に光点刺激が配置された空間（物理空間）と視知覚によって認識された心理的空間（視空間）との間の対応関係に関する alley 実験である。その後、数多くの検証³⁾⁴⁾がなされてきたが、ほとんどが alley 実験の追試の範囲にとどまっている。理論的な方面から新保・山ノ井ら⁵⁾⁶⁾は parallel alley と distance alley のいずれに着目して非 Riemann 的視空間論を構成し、山崎・山ノ井・河口⁷⁾は alley 曲線の関数近似により数値実験の検証を行っている。alley 実験の手続き等の困難さを避けるため、人間の簡単な視覚経験に訴える心理実験を考案したのが Hagino and Yoshioka⁸⁾であり、その実験は Visual Circle 実験と呼ばれている。本論文では彼らの実験結果をもとに視空間の幾何学的解析を行う。またアンダーランディング現象解明のために荻阪らが行った心理実験のデータも合わせて解析する。さらに動的な取扱いに関しても言及する。

2. Visual Circle 実験データによる高度の錯視の解析

Visual Circle 実験とは、暗室内で両眼を含む水平面上に一定の距離を隔てた 2 光点 Q_0, Q_1 を提示し、他の光点 Q_i を Q_1 を中心とする半径 $\overline{Q_0Q_1}$ の円周上に位置するように被験者に並べさせる実験をいう (Fig. 1 参照)。

荻野らは $\overline{Q_0Q_1}$ を標準刺激として中心から 15 方向における比較刺激 $\overline{Q_1Q_i}$ ($i = 2, \dots, 16$) の長さが見かけ上 $\overline{Q_0Q_1}$ と等しくなるよう Q_i を指定する実験を、 Q_1 の距離 (observation distance) が被験者の前方それぞれ 200, 400, 600, 650, 930, 1200, 1500 (cm) として行った。結果として得られた

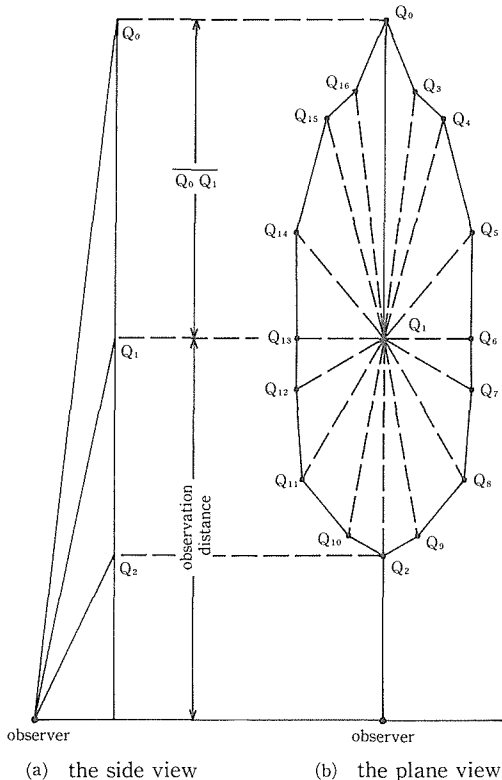


Fig. 1 Illustration of stimulus configuration (Visual Circle experiment)

∴ light stimulus

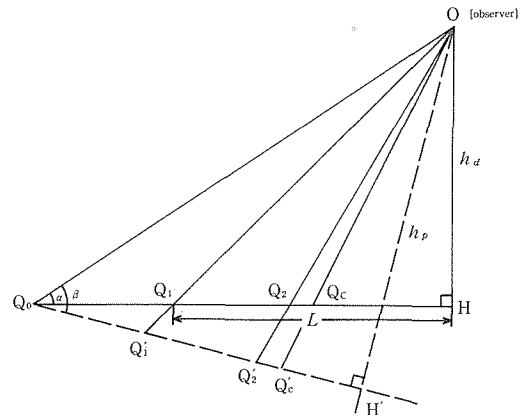


Fig. 2 The perspective mapping from physical space to visual space

α : physical angle of depression,

β : apparent angle of depression

$h_d = \overline{OH}$, $h_p = \overline{OH'}$, $l_1 = \overline{Q_0Q_1}$,

$l_2 = \overline{Q_1Q_2}$, $x = \overline{Q_0Q_c'}$

Visual Circle の一例を Fig. 1(b) に示す。これらはいずれの距離においても先の尖った卵形をしている。この実験は厳密には水平視と異なり、視線は光点が提示されている平面とわずかな角度をなし下方向視の実験となっている (Fig. 1(a) 参照)。この際、刺激の張る視角は立体視の規定要因として重要になっている。以下では Visual Circle 実験の結果を下方向視による錯視現象の影響とみなして幾何学的な解釈を与える。

航空標識は主として左右方向の平行線とそれに垂直な線分から構成されているので前後方向の長さの知覚が問題となる。従って Visual Circle 実験の結果についても主に Q_1Q_2 方向に注目する。標準刺激 $\overline{Q_0Q_1}$ の物理的長さを l_1 とし、これとみかけ上等しくなるように決められた比較刺激 $\overline{Q_1Q_2}$ の物理的長さを l_2 とする。物理空間における l_1 と l_2 が視空間においてそれぞれ l'_1 , l'_2 の長さとして知覚されたとすれば、視空間でこれらの長さは一致する。『視覚』によって物理空間の長さを測定する際には視角が重要な役割を演じているので長さの比を考慮すべきである。物理空間において l_1 , l_2 の張る視角を不変にする配景写像 f で、 $f(l_2)/f(l_1) = 1$ を実現するものは Q_0H' 上への射影に対応する。こうして比のみを考慮に入れるならば、物理空間の直線 Q_0H が視知覚によって Q_0H' として認識されていると見なすことができる (Fig. 2)。ここで見かけの俯角 β は一般に α とは異なる。

もし直線 Q_0H' が視空間の平面上にある直線に対応しているならば、Fig. 2 から見かけの高度は h_p となり、簡単な計算によって

$$h_p^2 = \frac{Ah_d^2}{Bh_d^2 + C} \quad (1)$$

が得られる。ただし、 $A = l_1^2(l_1 + l_2)^2$, $B = (l_1 - l_2)^2$, $C = \{L(l_1 - l_2) - 2l_1l_2\}^2$ であり、 h_d は物理的な高度、 l_1 , l_2 はそれぞれ標準刺激、比較刺激の物理空間での長さ、 L は被験者から点 Q_1 までの距離を表す。

(1) 式より見かけの高度 h_p と物理的な高度 h_d との関係調べるため、 h_p^2 を h_d^2 の関数として表したものが Fig. 3 である。 h_d と h_p の大小関係に従って

$$\text{高度過大視: } h_d < h_p \quad (h_d^2 < h_p^2)$$

$$\text{高度過小視: } h_d > h_p \quad (h_d^2 > h_p^2)$$

と定義すれば

$$h_0^2 = (L + l_1) \left(l_1 \cdot \frac{l_1 + 3l_2}{l_1 - l_2} - L \right) \quad (2)$$

を境界として高度過大視の領域と高度過小視の領域が存在する。ただし、 h_0 は $h_d^2 = h_p^2$ の時の物理的高度 (あるいは見かけの高度) を表す。また (1) 式の関数 h_p^2 は漸近線として $h_p^2 = A/B$ を持つが、この値 A/B は Uexküll ら⁹⁾, Gilinsky¹⁰⁾ が考えた距離の刺激項 (terminal threshold) に相当するものであり、高度に関する刺激項とみなすことができる。すなわち高度の弁別が可能な最大高度、あるいは刺激としての物理的な高度がそれ以上に増大しても感覚としての高度はそれ以上に増大しないような刺激閾値である。

$l_1 < l_2$ の時には (2) 式から $h_0^2 < 0$ となり常に高度過小視の傾向が現れる。これに対して $l_1 > l_2$ の場合には必ずしも高度過大視の傾向ばかりとは限らないことが予想される。なぜならば $l_1 > l_2$ の条件のもとでは h_0^2 の符号は観察距離と標準刺激・比較刺激の長さの相互関係によって決まるからである。従って一種の不安定な状態といえる。(1) のモデル式を用いて Visual Circle 実験のデータを解析した結果をまとめたものが Table 1 である。また、Fig. 4 は、 $\overline{Q_0H'}$ を含む平面、すなわち視線と俯角 β をなす平面 (Fig. 2) へ Visual Circle を配景射影したものの一例である。実線は

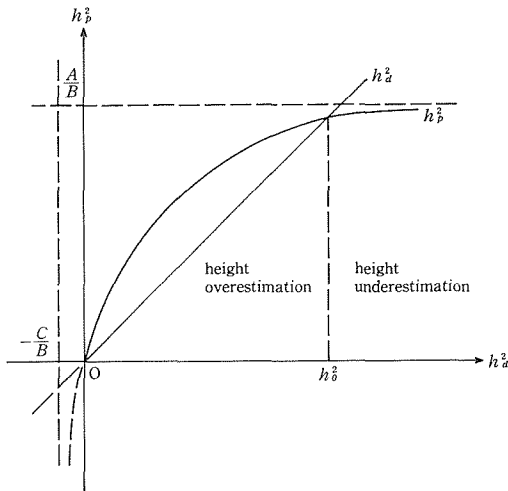


Fig.3 The relationship between physical height and apparent height

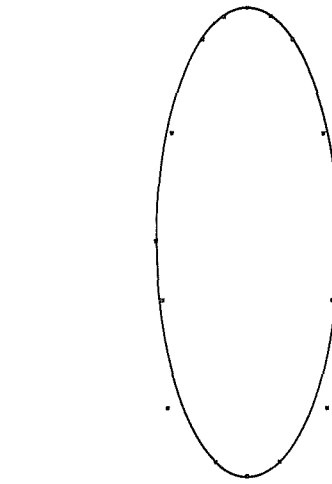


Fig.4 The perspective mapping of Visual Circle from physical space to visual space

$$x^2 + a^2(y - y_0)^2 = b^2 \quad (3)$$

なる近似楕円であり、視空間において円となるべきものであるが、これにより視覚における変換が決められる。なお、(3)式に含まれているそれぞれのパラメータ y_0 , a , b は Table 1 に示されている。

3. アンダーランディング現象の解明

高度過大視・高度過小視などの高度錯視は航空機着陸時の事故の一因となっているアンダーランディング現象の解明のために看過できない事実である。Mertens¹¹⁾ は滑走路上のいくつかの着陸援助設備に関してシミュレーションによる視覚実験を行っている。彼の実験によれば、ほとんどの被験者がグライドスロープ (Fig. 5(a)) 3°の角度を過大視して手前に降りるということである。また苧阪らは、下方向過大視の傾向から奥行距離の判断を誤まることによりアンダーランディング現象が起こりやすいとの推論を確認するため、実験室・屋外などで滑走路の縮尺模型を用いて種々の視覚実験を行っている¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。

以下に彼らの実験の一部を紹介する。実際に航空機がグライドスロープ 3°で着陸する様子を Fig. 5(a)に示す。Fig. 5(b)は滑走路真上より眺めた Calvert 型着陸進入灯の配列の様子である。Fig. 5(c)はFig. 5(b)における着陸進入灯の一番手前の部分を模擬化しそれらの光点列の視覚実験を行っている模式図である。実際には、水平方向に並ぶ点列を標準刺激として、その標準刺激と見かけ上等しい長さを標準刺激より手前の垂直方向に比較刺激としてとる実験と、標準刺激より奥の垂直方向にとる実験を行っている。実験場所についても、実験室ばかりでなく野外や滑走路全体の縮尺模型・フライトシミュレータなどの条件のもとで同様の実験を行っている。

これらの実験において、標準刺激を仲介として得られた前後2つの垂直方向の比較刺激 ($\tilde{l}_1$, $\tilde{l}_2$) は Visual Circle 実験における l_1 , l_2 と同等とみなせる。従って、苧阪らの実験データに対し

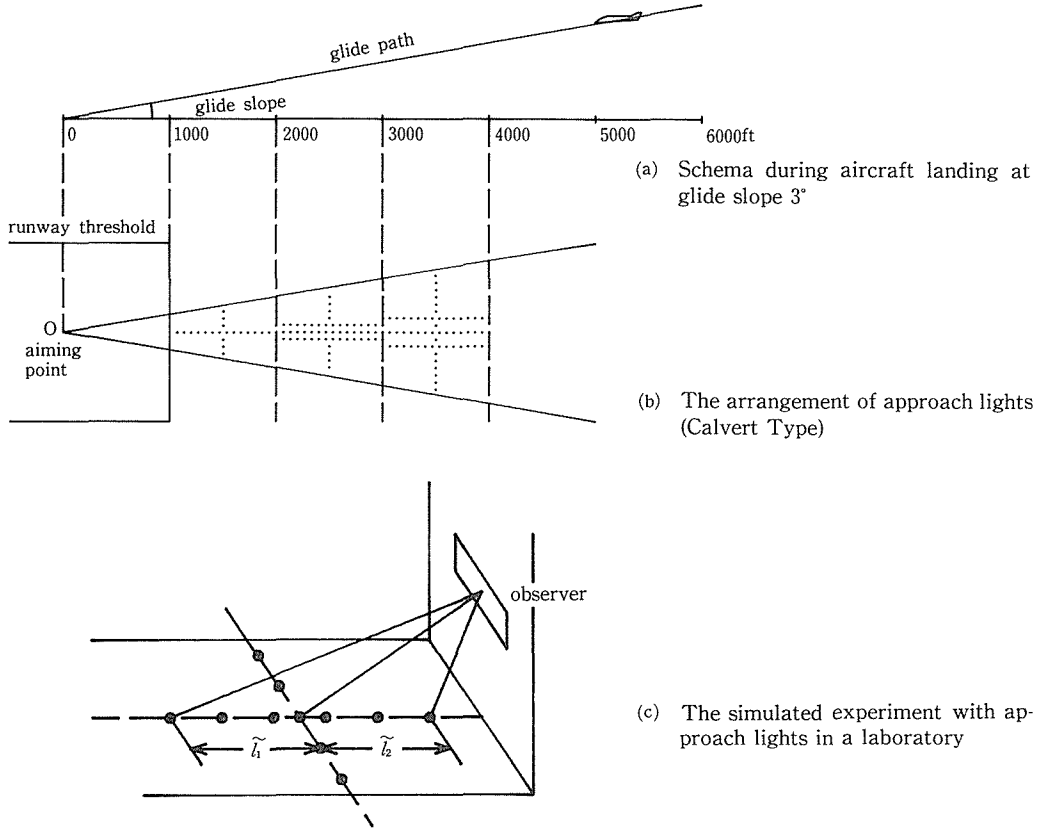


Fig.5 ILS (Instrument Landing System) and simulated experiment

ても見かけの高度 h_p などの諸量が導ける。その結果を Table 2 に示す。アンダーランディングの原因と思われる高度過大視の傾向が野外の実験における観察距離 65 m で見られる。

実験室などの実験結果により高度の錯視が起きていることが以上のように考察された。しかし実際の着陸進入灯は等間隔平行線によって構成されている。従って、この進入灯を仮想的な視直線 Q_0H' 上へ射影した場合、その結果は等間隔とはならない。等間隔平行線の見かけの状態を推定することを考える。Fig. 2 において Q_0H' が見かけの平面上にある直線とする。滑走路上の点 Q_1 , Q_2 , Q_c の座標をそれぞれ l_1 , l_1+l_2 , $2l_1$ とし、これに対応する見かけの平面上の点を Q_1' , Q_2' , Q_c' , またその座標をそれぞれ 1, 2, x とする。複比の射影不変性により

$$(Q_0, Q_1; Q_2, Q_c) = (Q_0, Q_1'; Q_2', Q_c')$$

が成立する。従って

$$\frac{l_1+l_2-0}{2l_1-0} \cdot \frac{2l_1-l_1}{l_1+l_2-l_1} = \frac{2-0}{x-0} \cdot \frac{x-1}{2-1}$$

となり、これから

$$x = \frac{4l_2}{3l_2-l_1}$$

が得られ、 $\overline{Q_0Q_1'}$ と $\overline{Q_1'Q_c'}$ の比は $1 : (l_1 + l_2) / (3l_2 - l_1)$ となる。Visual Circle実験並びに苧阪らの実験データに対して、この比を求めたものが Table 1, Table 2 に示されている。パイロットはこの値が物理的に 1 となるべきであることを知っているので、この値により自分の高度を判断することになる。 $r = (l_1 + l_2) / (3l_2 - l_1) < 1$ なら高度が低い、 $r > 1$ なら高度が高いと直観的に判断しているとするならば、これらの判断は見かけの平面を基準にとっているはずであることから、Table 1 のデータからは 600 cm より遠方では高度が高いと感じていることになる。従って $h_0^2 > 0$ の状態ではさらに高度が高く感じられることになる。逆に 930, 1500 cm の点では見かけの平面を低く感じている上に高度を高く感じていることにより、錯視量が打ち消されるかあるいは不安定な状態であると言える。

Table 1 Calculated results from Visual Circle data

observation distance [cm]	200	400	600	650	930	1200	1500
calculated results							
l_1	50	50	100	50	100	100	100
l_2	55.17	55.97	81.30	41.87	65.32	83.15	68.57
h_d	2.90	5.24	8.15	8.15	11.99	15.13	18.62
h_p	2.34	3.48	29.29	34.03	10.32	76.98	9.39
the sign of h_0^2	—	—	+	+	—	+	—
r	0.91	0.90	1.26	1.22	1.73	1.23	1.60
y_0 [cm]	190.63	378.68	668.42	712.35	1176.93	1319.45	2087.70
a	0.39	0.33	1.11	1.39	0.18	1.59	0.131
b	23.32	23.76	33.14	17.88	26.43	32.83	31.66

l_1 : length of standard stimulus
 l_2 : length of comparison stimulus
 h_d : physical height
 h_p : apparent height
 r : ratio $\overline{Q_1'Q_c'}/\overline{Q_0Q_1'}$

y_0, a, b , are given in (3).

Table 2 Calculated results from Osaka's data

observation distance	209 [cm]	209 [cm]	65 [m]	97.25 [cm]	116.0 [cm]
calculated results					
l_1	17.45	18.30	11.62	5.92	5.55
l_2	18.88	18.66	10.02	6.45	5.92
h_d	29.93	29.93	9.30	13.93	19.83
h_p	19.79	26.70	18.04	7.96	11.59
the sign of h_0^2	—	—	+	—	—
r	0.93	0.98	1.174	0.921	0.94
remarks	two points	dot line	outdoor	miniature runway	
	laboratory				

The explanations of calculated results are depicted in Table 1.

4. 着陸時の視知覚に対する動的取扱いに関する二・三の注意

Visual Circle 実験において被験者並びに刺激点は静止したものとして扱われている。しかしながら、航空機の着陸時には滑走路上の進入灯とパイロットの相対的位置関係は時々刻々と変化する。また、刺激の時間的な微小変化に対して人間の感覚は鋭敏であることから動的な実験と解析が必要である。今後の課題として、そのいくつかの注意を書き留めておく。

被験者が動く場合、空間知覚の重要な手掛かりとして運動視差がある。運動視差とは被験者の位置変化に伴う静止刺激の見かけの動きの方向に関する時間的な変化をいう。航空機が滑走路に近づくパイロットの視野にはいる様々な対象は着陸地点から放射状に遠ざかっていくように見え

る。これらの刺激点の流動パターンにベクトル場に対応させ、運動視差に対して数学的な定式化を行ったのが Gibson et al.¹⁶⁾¹⁷⁾ である。彼は各々のベクトルの大きさを観察者から刺激点(滑走路にある着陸進入灯の光点列)への視線とグライドパスとのなす角度 δ の時間的変化 $d\delta/dt$ としている。さらに Koenderink and van Doorn¹⁸⁾による、より一般的な状況のもとでの運動視差のベクトル場の局所的構造の研究がある。また Visual Circle 実験などのデータに対して、これらの動的な取扱いを行うことも必要であると思われる。

5. 結 論

Visual Circle 実験に着目し、物理空間の直線を視空間の直線に対応させるものとして配景写像をとり、視空間の直線上での Visual Circle などの対応関係を求めた。さらに、この直線が見かけの水平面上にあるとの立場から高度の錯視の可能性が示され、その際の諸条件について検討を加えた。また、航空機の夜間有視界着陸は Visual Circle の応用例と見なせることから、航空機のアンダーランディング現象の説明を試みた。動的な取扱いが今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) 荻阪良二：サイコロジー No. 29 (1982), p. 6.
- 2) Luneburg, R.K. : Mathematical Analysis of Binocular Vision. Princeton Univ. Press, 1947 : Courant Anniversary Volume, New York Univ. Press, New York, 1948, p.215 : J. Opt. Soc. Am., 40(1950), p.627.
- 3) 西川泰夫：慶大大学院社会学研究科紀要, 7 (1966), p. 11.
- 4) 石井克己：九大文学部 40 周年記念論文集 (1966), p.235.
- 5) 新保 勝, 山ノ井高洋：北大工学部研究報告, 87 (1978), p.169.
- 6) Shimbo, M. Yamanoi, T. and Kawaguchi, M. : Proc. Int. Conf. on Cybern. Soc., '78, I (1978), p. 394.
- 7) 山崎敏正, 山ノ井高洋, 河口至商：北大工学部研究報告, 112 (1983), p. 95.
- 8) Hagino, G. and Yoshioka, I. : Perception & Psychophysics, 19 (1976), p. 499.
- 9) Uexküll, J.v. and Kriszat, O. : Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen. Ein Bilderbuch unsichtbarer Welten (1933).
- 10) Gilinsky, A.S. : Psychol. Rev., 58 (1951), p. 460.
- 11) Mertens, H.W. : Perceptual and Motor Skills, 45 (1977). p. 1331 : Aviation Space and Environmental Medicine, 49(1978), p.457 : ibid., p.1043.
- 12) 谷口正子, 荻阪良二, 木田光郎, 三輪武次, 古賀一男, 鈴木初恵, 野間聖明：環研年報, 30 (1979), p.75.
- 13) 古賀一男, 荻阪良二, 木田光郎, 三輪武次, 谷口正子, 鈴木初恵, 野間聖明, 中野美雅：同上, 30 (1979), p. 80.
- 14) 谷口正子, 荻阪良二, 木田光郎, 三輪武次, 古賀一男, 鈴木初恵, 野間聖明：同上, 31 (1980), p.72.
- 15) 古賀一男, 荻阪良二, 木田光郎, 三輪武次, 谷口正子, 野間聖明, 中野美雅：同上, 31 (1980), p.78.
- 16) Gibson, J.J. : The Perception of the Visual World. Houghton Mifflin Company, The Riverside Press, Cambridge, 1950.
- 17) Gibson, J.J. et al. : Amer. J. Psychol., 68 (1955), p. 372.
- 18) Koenderink, J.J. and van Doorn, A.J. : Optica Acta, 22 (1975), p. 733 : J. Opt. Soc. Am., 66 (1976), p. 717.