両眼視空間と物理的空間との対応関係¹ ——mapping function について——

慶応義塾大学

西 川 泰 夫²

両眼視空間は、与えられた静止物理空間を両眼で観察した時に成立する現象空間である。この視空間の幾何学的構造がいかなるものであるかは、視空間についての実験的検討を行なうてはじめて明らかになる。この実験は、従来、次のような状況下に行なわれる。静止物理空間としては最も簡単な構造を持つ空間で、通常完全暗室内に幾つかの微弱な明るさの小光点が水平面上に呈示される。これに対して、被験者は、その顔面は固定されているが、両眼を自由に動かして、与えられた刺激光点を十分に観察する。

このような両眼視空間に対して、Luneburg (1947) は、双曲線幾何学で記述される双曲空間の性格をもつという仮説を提出した。その後、このモデルに対して、理論的、実験的検討が、Hardy (1951), Blank (1953, 1957, 1958 a, b, 1959, 1961), Zajackowska (1956 a, b), Indow et al. (1962, 1963), Ishii (1961, 1965), Foley (1964, 1966) 等によって行なわれてきている。また、別個の観点からの検討も、Indow (1967, 1968), Matsushima & Noguchi (1967), Nishikawa (1967) によって行なわれている。

さて、これら両眼視空間を取扱う際の論点を考えてみると、次のような二つの問題点を含む。

1. 暗黒の中に小光点からなる刺激が与えられると、当然、闇の中に光点は一つの布置を形成し、その光点対間に空間構造が知覚される。第一の問題点は、この現象空間がいかなる幾何学的構造をもつかという点で、以下これを幾何学的構造の問題と呼ぶ。

2. 第二の問題点は、両眼視空間がいかなる幾何学で記述されるにせよ、それをユークリッド空間の中に表現

したものをユークリッド地図 (Euclidean map) と呼べば、このユークリッド地図と刺激布置との間に、どのような対応関係があるかという点で、以下これを mapping function の問題と呼び、本論文では主としてこの問題を取扱う。

対応関係を記述する座標系についての詳細は他の文献 (Indow et al., 1962, Fig. 1, Fig. 2; 西川, 1966, Fig. 1, Fig. 2) に譲るが、次のように規定する。刺激光点 Q の座標は、 $Q(r, \phi, \theta)$ で示す。左右の眼 (L, R) を原点にとる双極座標系を用い、 r は両眼視線の輻奏角、 ϕ は中心からの左右方向への偏角、 θ は仰角を意味する。なお、両眼あるいはその中点から光点 Q にいたる距離ではなく、輻奏角 r の用いられている点は注意を要する。輻奏角 r は、 Q の位置と観察者の瞳孔間距離によってきまる。一方、この光点 Q に対応する両眼視空間の中の知覚点 P の座標は、 $(P\rho, \phi, \vartheta)$ で示す。 ρ は原点から点 P 迄のユークリッド地図上の動径距離 (radial distance) を示し、 ϕ は正中線からの偏角、 ϑ は仰角を示す極座標表示である。

Luneburg (1947, 1948, 1950) のモデルは、その mapping function として、次のような三つの仮定をおいている。

$$\varphi = \phi \quad (1)$$

$$\vartheta = \theta \quad (2)$$

$$\rho = 2e^{-\sigma r} \quad (3)$$

これは、次のような事情にもとづいている。光点 Q が θ 一定なある平面上にある場合を考えよう。点 L, R, Q を通る一つの円が描けるが (ϕ を変化)、この円周上のすべての点に対して r は一定である。この円は、Vieth-Müller Circle (VMC) と呼ばれる。この円を $L-R$ 軸の廻りに回転 (ϕ を固定し、 θ を変化) して得られる半球が Fig. 1 の Vieth-Müller Torus (VMT) である。この L, R に左右の眼をおいて、この半球をみると、観察者には天球のように自分をとりまきはぼ一定の半径をもつ半球として見え、横線は水平な平行な円、縦線は垂直な

¹ 本研究に際して、いろいろ御指導いただきました慶応義塾大学印東太郎教授に、心からのお礼を申し上げます。また、本実験に参加下さった、慶応義塾大学松島恵子氏、寺田信之介氏、金沢浩明氏、吉田俊六氏、値賀沙紀子氏に感謝致します。

² 現在、上智大学文学部所属

平行な円のようにみえる，という一種の思考実験を行ない，Luneburg (1947, p. 27, 1950, p. 633) は，次のように考えたのである。

1) 視空間の幾何学的構造が何であれ，それをユークリッド地図に移すには，次の原則によるものとする．視空間がユークリッド空間であれば，当然，それをそのままユークリッド地図上に，すべての計量関係を保存して表現される．視空間が非ユークリッド空間の場合には，視空間における計量関係をすべて忠実にユークリッド地図上に表わすことは出来ないが，知覚された点が自己に対し視空間において占める方向は，常にそのままユークリッド地図の上に表わすという原則をおく．すると，上述の考察から．

2) ϕ が一定の点 Q は，視空間では同じ方向にみえると考えたのであるから， φ は一定になっているはずで， φ はそのまま ϕ に対応するものとする ((1)式)．

3) θ が一定の点 Q は，視空間では同じ面上にみえると考えたのであるから， ϑ は一定になっているはずで， ϑ はそのまま θ に対応するものとする ((2)式)．

4) r が一定の点 Q は，その方向が何であれ視空間において被験者から一定の距離にある点 P としてみえると考えたのであるから，ユークリッド地図上の ρ は， r にのみ依存する関数である ((3)式)．つまり，1)2)3) の仮定により， $Q(r, \phi, \theta)$ の ϕ, θ が一定で r だけが変化する場合， $P(\rho, \varphi, \vartheta)$ の φ, ϑ は一定で ρ だけが変化するはずで，しかも上記の考察から r が一定であれば， ϕ, θ のいかにかわらず，一定の距離に知覚されるのであるから，ユークリッド地図上の距離 ρ は，視空間の幾何学的構造が何であっても，現象的に知覚された光点迄の距離 (δ_0 と書き表わす) と一義的に対応していなければならない．そこで，Luneburg は， ρ を r だけの関数とおき，次の点を更に考慮して (3) 式を仮定したのである．それは，天球，ドームとしてみえる空に示される如く，両眼視空間は閉じた空間であり，境界を有すると

いう点である．そこで， $r=0$ なる無限遠点にいたる距離は，地図上では最大値を 2 とおき，距離 ρ を表わす尺度の単位を定義する．従って，漸近値をもつ (3) 式が採用される．また，パラメーター σ は，(3) 式より，

$$d\rho = -\sigma \rho dr$$

であるから， r の変化に応じた ρ の変化に対する感度を示すもので，各被験者に固有な奥行知覚精度を意味する定数である．

ところで，両眼視空間における自分から光点 P にいたる現象的距離 δ_0 は，1)~4) の仮定から，ユークリッド地図上の線素 (line element) を ds とすれば， δ_0 を適当な単位 C で表わすものとして， ρ との関係が，次のように書き表わされる (Indow, Inoue, & Matsushima, 1962, p. 15)．

$$\frac{\delta_0}{C} = \int_0^\rho ds = \frac{2}{\sqrt{-K}} \tanh^{-1} \left[\frac{\sqrt{-K}}{2} \rho \right] \quad (4)$$

ただし， K は，視空間の全曲率を示す．視空間全体を定曲率とおけるか否かを検討し，また，定曲率とおけるとすれば， K の符号 ($K < 0$, $K = 0$, $K > 0$) などを決定することは，第一の視空間の幾何学的構造の問題である．なお， δ_0 は，視空間における潜在的 (latent) な変数であるが，これは，判断を通して判断値 d として観察可能な量化された計量値を与える． d と δ_0 は比例関係にあると考えると，距離判断を規定する統一された単位 k によって，

$$d = k\delta_0$$

と書き表わせる．従って， d も (4) 式を通して ρ と結びついている．

さて式 (1)~(3) のような mapping function が，物理空間をみた時の内的現象世界を具象化し物理空間との対応づけを行なうのに妥当な仮説であるかどうか以下主題である．

目 的

本論文では，以下の二点について実験的検討を試みる．

1. ϕ を変化させて，mapping function 式 (1) の検討を目的とする．同時に，(1) 式は θ を含んでいないので， θ を変化させても (1) 式の関係は，不変に保たれるか否かの検討も行なう．

2. r を変化させて，mapping function (3) 式の検討を目的とする．また，(3) 式は ϕ や θ を含んでいないので， ϕ や θ を変化させた条件のもとで (3) 式の関係が不変に保たれるか否かの検討も行なう．

方 法

刺激布置 (Fig. 2)

ある θ の値をとる平面上に，次のような 3 光点を呈示する．被験者を原点とし，その正中線上に固定光点 $F(180, 0)$ を置く．ただし，単位は cm．この点は，全実験を

FIG. 1. Vieth-Müller Torus (Luneburg, 1950, p. 633, Fig. 11).

(A)

(B)

(C-1)

(D-1)

FIG. 3. 所定の偏角 (ϕ) (破線) に対する被験者の定めた偏角 (ϕ) (実線).

して Fig. 3(C-1) に示されるような破線で示す直線になる。明らかに実線で示す直線とは一致しない。 ϕ の過小評価がみられる。この過小評価量の尺度として角度 ϕ と ϕ の差 ($\phi - \phi$), すなわち, 所定の角度 ϕ と, その時の

各データを通る直線の中点線からの偏角 ϕ との差, を取り, 各 ϕ との関係のみてみよう。Fig. 3 (C-2) に示すように両者の間の関係は, 曲線関係にあり, ϕ の値が大きくなるほど過小評価が起っていることがわかる。また,

FIG. 3. 過小評価量 ($\phi - \phi$) と偏角 (ϕ) との関係

この両者の関係を、両対数グラフ上にプロットしてみると、Fig. 3 (C-3) に示すように、目のこで直線の当てはめが可能である。従って、($\phi - \phi$) と ϕ との間には、べき関数 (power function) 関係、

$$\phi - \phi = C \phi^{1.48}$$

があることがわかる。なお、 C は、単位を規定する任意の定数である。

ところで一方、もし各データを通る直線が、各 ϕ ごとに x 軸上の同一点を通るように当てはめうるならば、それは、被験者の知覚上の位置は同じく物理的の原点と一致せず、この場合、後方にずれていることを意味する。それでは、Fig. 3 (A) (B) に示される x 軸上の各切片の値を平均して、この平均値を通して各 ϕ の各データに当てはまる直線を目のこで引いてみよう。その結果の 1 例として、Fig. 3 (D-1) の実線で示すような直線が得られる。これより、同じく直線の当てはめが可能であることがわかる。このような場合の各 ϕ 一定な方向を示すと、図中の破線で示される直線になる。明らかに実線で示す

直線とは一致しない。この場合も ϕ の過小評価がみられる。過小評価量として上記と同じ尺度を用い、各 ϕ との関係を見ると Fig. 3 (D-2) (D-3) のようになり同じ傾向を示している。ただし、べき数は、この場合の方が大きく、 ϕ に対する過小評価量が前者の場合より大きくなっていることを示している。

さて、それでは、結果として、Fig. 3 (A) (B) に示される結果をとるべきであろうか、Fig. 3 (D-1) に示される結果をとるべきであろうか、両者とも、目のこで直線の当てはめを行なったが、ほぼ同程度の当てはめがみられる。結論は、これらのデータのみからは一義的に下せない。今後改めて検討しなければならない問題点である。

なお、個人データについてみると、直線の当てはめが明確になされる場合や、直線とみるか曲線とみるか非常に微妙な例や、明らかに凹曲線、あるいは凸曲線の当てはめの可能な場合がある。これらを平均して図示すると、Fig. 3 に示すように直線の当てはめがなされる。ただし、知覚上の原点は、物理的の原点とは一致しない。しかしながら、各 ϕ に対して、 θ の変化に依存しない 1 本の直線の当てはめが可能である。いずれにしても、得られた結果は、必ずしも $\phi = \phi$ とはいえないことを示唆している。

2. 実験手続 2) より得られた距離の判断値の単位を統一する方法から示すことにする。被験者からの各 I_j 点迄のみの上の距離は、 OF , OI 間のみの上の距離を単位として量化されているので、 OF 間を単位とした時の判断距離を $d_{Ij}(F)$, OI 間を単位とした場合を $d_{Ij}(I)$ と書き表わすことにする。これらは、次のように、その距離を生み出す潜在的な距離 δ_{Ij} と、その時の判断の単位 e_F , あるいは e_I との積で表わされる。

$$d_{Ij}(F) = \delta_{Ij} e_F \left(= \frac{OI_j}{OF} \right) \quad (5)$$

$$d_{Ij}(I) = \delta_{Ij} e_I \left(= \frac{OI_j}{OI} \right) \quad (6)$$

これより (5) と (6) 式の比を取り、その値を C_{IF} と記すと、次のようになる。

$$C_{IF} = \frac{d_{Ij}(F)}{d_{Ij}(I)} = \frac{\delta_{Ij} e_F}{\delta_{Ij} e_I} = \frac{e_F}{e_I}$$

C_{IF} は、それぞれの単位の比になっていることがわかる。一方、可動光点 I_j は、 j が、3~6 段階の範囲に渡って変化するので、 j についての平均を取ることとする。その結果を $\bar{C}_{IF}$ で示す。

$$\bar{C}_{IF} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{d_{Ij}(F)}{d_{Ij}(I)} = \frac{e_F}{e_I} \quad (7)$$

(A) ちらばりの少ない例

(B) 特にちらばりの大きい例

FIG. 4. 距離判断の整合性

ただし, $n=3\sim 6$

この(7)の値を(6)の値に掛けると,

$$\begin{aligned} d_{Ij}(I) \times \bar{C}_{IF} &= \delta_{Ij} e_I \times \frac{e_F}{e_I} \\ &= \delta_{Ij} e_F \\ &= d_{Ij}(F) \end{aligned} \quad (8)$$

となり, OI_j 間の距離の単位がすべて OF 間の単位で統一されることがわかる. また, この(8)式の操作によって距離判断の一貫性をチェックすることが可能になる. 実測データ $d_{Ij}(I)$ に $\bar{C}_{IF}$ を掛けた結果と, 実測データ $d_{Ij}(F)$ とが完全に一致すれば, 距離の判断が首尾一貫していることを示す. この結果を図示すると Fig. 4 (A) (B) のようになる. この2例は, 原点を通る勾配 45° の直線からのデータのちらばりの少ない場合 (Fig. 4 (A)) と, 最もちらばりの大きい場合 (Fig. 4 (B)) とを示す.

残りの4名については, ほぼ Fig. 4 (A) と同じ結果で, Fig. 4 (B) は, むしろ例外である. なお, グラフは, 各 θ ごとに, 各 ϕ , 固定光点 I の呈示位置のちがいをこみにした結果をプロットしたものである. データのちらばりの方向とその程度は, 勾配 45° の直線からの各データの差の平均 (M) と, この直線からの各データの差の平方和を平均して平方根を取った値 (root-mean-square, RMS) とによって示される. ただし, $d_{Ij}(F)$ と $d_{Ij}(I)$ は, 被験者内では同一の単位ではかられているが, 被験者間では異なるので, M と RMS を $d_{Ij}(I) \times \bar{C}_{IF}$ の範囲 (上

FIG. 5. 判断距離 (d_{Ij}) と物理距離 (P) との対応関係

TABLE 1
距離判断の整合性の程度

Ss	M/R	RMS/R
S C	-0.005	0.046
S T	-0.015	0.059
Y N	-0.002	0.060
T I	-0.009	0.064
K M	-0.002	0.073
S Y	0.030	0.128
Mean ₁	-0.001	0.072
Mean ₂	-0.007	0.060

Mean₁: average 6 SsMean₂: average 5 Ss except SY

限と下限の差, R) で割った M/R と RMS/R を用いることにする. この結果は, Table 1 に示す通りである. なお, 各被験者に対して, θ に関しても平均した上で値を算出してある. また, (—) 符号は, データのちらばり方が勾配 45° の直線より下側にくることを示している.

3. 次に, (8) 式の操作による $d_{Ij}(F)$ と, そのそれぞれの実際の物理的距離 P との関係をみよう (Fig. 5). このグラフは, 全被験者のデータを, すべての条件をこみにして描いたものである. ϕ や θ のちがいでかなりばらつきをみせている. それ故, 視空間におけるみかけ上の距離 d と物理空間の物理的距離 P との関係を表わすのに, ϕ や θ の変化によらないで, その時の点のしめる位置に対する幅奏角 γ によって示すほうが適切であると思われる. このことより, ユークリッド地図上の距離 ρ を (3) 式にみられるように, γ のみの関数で示そうという意図がくみとれよう. このようなデータに対して, もし直線の当てはめがゆるされるならば, 図中の実線で示すような直線の当てはめが, 目のこによって可能である. この直線は, 原点を通らない. このことは, 知覚上の判断距離 d が 0 になっても, まだ物理的には 22.2 cm の距離をもち, 従って, 知覚上の被験者の位置は, 物理的の原点とは一致せず, 物理空間において, 上記の値だけ前方にずれていることを意味する. 一方, 視空間でのこの前方へのずれの量は, この直線が縦軸と交わる切片の値で示され, d の上で 0.14 である. なお, このグラフは, ϕ の変化をすべてこみにして描いてあるので, 前方へのずれは, 上記のずれの量を半径とする半円上の場所にあることになる. また, この結果から示される被験者自身の位置は, 角度調整の場合に得られた結果とは一致していない. この点も, 今後の検討を要する問題点である.

各被験者の Fig. 5 に関する自己定位のずれの量を示すと, Table 2 に示す通りである. ただし, d_0 は, 視空間における判断距離 $d_{Ij}(F)$ の上でのずれの値, P_0 は,

TABLE 2
原点からのずれの分量

Ss	d_0	P_0 cm
T I	0.10	15
Y N	0.10	15
S T	0.14	23
K M	0.15	24
S C	0.17	27
S Y	0.17	29
Mean	0.14	22.2

物理的距離 P の上でのずれの値を示している.

4. これからの論議に当たって, 次の点について検討しておく必要がある. それは, (4) 式によって, 判断距離 d とユークリッド地図上の距離 ρ との対応関係を検討することである. まず, (4) 式の右辺に含まれるパラメーター K (曲率) の値は, 本実験からは直接に求まらないので, 従来の alley 実験 (Indow et al., 1962, p. 22, Table 1) から得られている値 ($K = -0.20 \sim -0.60$) と, その絶対値がさらに大きい $K = -0.90$ の

FIG. 6. 各曲率 (K) の値に対するみえの上の動径距離 (d) とユークリッド地図上の動径距離 (ρ) との対応関係

(A) 上図 データのちらばりの小さい例
(B) 下図 データのちらばりの大きい例

FIG. 7. 判断距離 (d_{Ij}) と幅奏角 (γ) との関係

値とを用いることにする。次に、 ρ の値は、本実験の刺激布置から定まる γ の値 ($\gamma=0.032\sim\infty$) の範囲に対して、 σ の値を8とおき、(3)式を通して理論的に算出される値を使用する。なお、 σ の値を8とした理由は、次の通りである。 K の値の場合と同じく、従来の実験から求まっている σ の値を参照すると、最小値はほぼ10程度である。また、本実験のように γ の値の範囲が一定であると、 ρ は、 σ に依存し、 σ の小さい方が ρ は大きくなる。従って、いかなる σ の値をもつ被験者に対してもカバー出来るように、 σ の値は、最小に定めた。また、 γ の値の算出に当って、瞳孔間距離は6.2cmである。この結果、 ρ の最大値は、1.54である。このような K と ρ の値を(4)式の右辺に代入すると、現象的距離 δ_0/C が算出される。この時、単位 C をそれぞれの K の値ごとに、 δ_0 の値が、 $\rho=1.54$ のところで ρ と一致するように定めると、 δ_0/C を改めて d とおくことが出来る。この d は、それぞれの K の値のもとにおける上記の規定のもとでの理論的な判断距離に相当している。このような d と右辺に代入した ρ との関係を、それぞれの K の値ごとに図示すると、Fig. 6の実線で示される通りである。なお、図中の破線は、 $K=0$ の場合、すなわち、 $d=\rho$ の場合を示している。 K の値の絶対値が大きくなるほど、 d と ρ とのぐいさが大きくなっていくのがみられる。

$K=-0.20\sim-0.40$ の範囲では、 d と ρ との間に、線型関係があるとみなせないこともないが、 K の値の絶対値が大きくなるほど、線型関係にあるとはいえない。

さて、上記のような操作のもとに算出された d と、本

Fig. 7. Fig. 6 にもとづく動径距離 (ρ) と幅奏角 (γ) との関係

実験で(8)式の操作のもとに得られた実測判断距離 $d_{Ij}(F)$ との間には、どうなっているであろうか。実測データ $d_{Ij}(F)$ の距離の単位を、 d の単位と一致させることが可能である。それは、それぞれの K の値において d を算出する時に使用した単位 C の値を、 $d_{Ij}(F)$ に掛け合わせることによってなされる。この結果、 $d_{Ij}(F)$ は、Fig. 6の距離 d の上に乗る、同じくFig. 6の関係を充している。従って、 $d_{Ij}(F)$ と ρ とは、必ずしも線型関係にはない。そこで、次のような問題が生じる。(3)

式に仮定される内容の検討に当って、実測データ $d_{Ij}(F)$ をそのまま ρ の代りに用い、その時の r 値との関係から検討可能か否か、という問題である。何故なら、 $d_{Ij}(F)$ と ρ との間に、もし線型関係が各 K の値を通して想定されるならば、 K に依存しないで、実測データ $d_{Ij}(F)$ が ρ の代りにそのまま使用されうるからである。しかしながら、次に示される事柄より、必ずしも、 $d_{Ij}(F)$ と ρ との間に線型関係を想定する必要がないことが示される。まず、実測データ $d_{Ij}(F)$ とそれに対応する r との関係、を、片対数グラフ上に示すことにする。Fig. 7(A)(B) に示す結果が得られる。データのちらばりの少い例 (Fig. 7(A)) と、ちらばりの大きい例 (Fig. 7(B)) を示している。残りの被験者は、この両例のいずれかに近い結果を示している。いずれも、 $d_{Ij}(F)$ と r との間には、図中の目のこで当てはめた曲線が示すように、曲線関係がみられる。

では、これら実測データ $d_{Ij}(F)$ に対応する ρ と、同じ r との間にはどのような関係がみられるであろうか。Fig. 7(A)(B) に当てはめた曲線から $d_{Ij}(F)$ とその時の r の値を読み取り、 $d_{Ij}(F)$ の単位を、さきの単位変換の手続に従って、Fig. 6 の距離 d に合わせる。この結果をもとに、各 K の値ごとに Fig. 6 の関係を通して、逆に ρ の値を読み取ることが出来る。かくして、 $d_{Ij}(F)$ に対応する ρ の値が、各 K の値ごとに求まる。このような ρ と r との関係を図示すると、Fig. 7(C)(D) に示すような結果が得られる。なお、図中の実線で示す結果が、 ρ と r との関係、破線で示す結果が、単位を変換した $d_{Ij}(F)$ と r との関係を示している。残りの被験者についても、同じような関係が示されている。

三つの K の値を取り上げ、図示してあるが、 K の値が -0.90 になっても、曲線の形にはほとんど変化がないことは注目に値する。しかも、この結果は、Fig. 7(A)(B) の結果とほぼ同一の傾向を示し、ほとんど区別がつかない。これは、Fig. 7(A)(B) にみられる実測データ $d_{Ij}(F)$ と r との間の曲線関係は、曲率(K)には依存しない結果であることを意味している。従って、実測データ $d_{Ij}(F)$ と ρ との間に、各 K の値を通して、線型関係を必ずしも想定しなくとも、 $d_{Ij}(F)$ を ρ の代りに用いることが示唆される。今後、実測データ $d_{Ij}(F)$ を ρ と呼ぶことにする。そして(3)式に仮定される内容の検討に移ることにする。

5. 再び Fig. 7(A)(B) を取り上げる。上記の結果より、実測データによる ρ と r の関係を示している。明らかに両例ともそのほうで彎曲した曲線を目のこで当てはめることが可能であった。このような結果は、(3)式に仮定されている内容を必ずしも充していないことを示している。すなわち、(3)式は、

$$\ln \rho = -\sigma r + \ln 2$$

となり、片対数グラフ上で直線関係になるはずであるからである。また、このような結果は、Fig. 7(C)(D) より曲率の影響によるのではないことが示されているので、(3)式のような指数関数を考える限り、データを説明するのに、どのような修正式によってなされるかを検討しなければならない。

さて、Fig. 5 で指摘したように被験者の位置は、物理的の原点とは一致せず、物理空間の上で、原点に対して前方にずれている。視空間の上でいえば、原点は、知覚上の被験者の位置より後方にあることが示されている。このことは、Fig. 8 の ρ と r との関係からも示される。なお、このグラフは、各 ϕ 、各 θ 、固定光点 I の呈示位置のちがいすべてを含めてプロットした結果である。データの

FIG. 8. 実測データにもとづく動径距離(ρ)と輻奏角(γ)との関係

TABLE 3
修正式における個人定数 (σ) と単位 (C) の値

Ss	C	σ
T I	2.20	25.0
Y N	2.20	27.1
S T	3.10	37.0
K M	3.60	41.9
S Y	3.00	42.6
S C	4.10	46.9

ちらばりの少い例 (Fig. 8 (A)) と、ちらばりの大きい例 (Fig. 8 (B)) とを示している。残りの被験者は、この両例のいずれかに近い結果である。

ところで、(3)式より、 r が大きくなるに従って、 ρ の値は、0に収束するはずであるが、Fig. 8の結果は、 r が大きくなると、 ρ のある値を持つ漸近線へ収束していくのがみられる。従って、距離 ρ は、ユークリッド地図上で、前方にずれた位置から測られていることがわかる。それ故、(3)式の内容を検討するためには、ユークリッド地図上の原点を、前方にずれた位置に合わせてやる必要がある。原点移動が必要である。そのため、このずれの量を Fig. 8 から推定することにする。 r が大きくなるにつれ、各データが接近していく漸近値を ρ の

値の上で読み取る。この値を ρ_0 とすると、各被験者について、その値は、たまたま Table 2 に示す d_0 の値と等しいことが判明した。このような移動量をもとに、原点移動を行ない、 r との関係を一対数グラフ上にプロットすると、Fig. 9(A) (B) に示される結果が得られる。データのちらばりの少い例 (Fig. 9(A)) と、ちらばりの大きい例 (Fig. 9(B)) とを示す。

残りの被験者の結果は、この両例のいずれかに近い結果である。これらに対して、目のこで直線の当てはめが可能である。なお、データのちらばりが、かなり大きいことは、 r が一定であっても ρ は一定にならないことを意味する。原点移動の結果、(3)式は、次のように書き換えられる。

$$\rho - \rho_0 = C e^{-\sigma r} \quad (9)$$

なお、 C は、 $(\rho - \rho_0)$ の値の単位を規定する定数であり、この場合、当てはめた直線と、 $\log(\rho - \rho_0)$ 軸との切片の値を示している。この(9)式の単位 C を(3)式の単位である 2 に一致させるには、この切片の値を改めて 2 とおき、 $(\rho - \rho_0)$ の目盛の値を読みなおすことによって行なわれる。被験者ごとの C の値は、Table 3 に示す通りである。

次に、この当てはめた直線から、 $(\rho - \rho_0)$ と r との値を読み取り、Fig. 8(A) (B) の実測データに重ね合わせてみよう。Fig. 8 の実線で示される曲線がそれである。実測データに良く当てはまっているのがみられよう。

6. (9)式に含まれる個人定数 σ の値についてみることにする。Fig. 9 の直線の勾配から求められるが、グラフは常用対数で目盛っているため、(9)式に合わせるには、自然対数への定数変換が必要である。その結果は、各被験者について、Table 3 に示す通りである。これらの値を、従来の alley 実験等から得られている σ 値 (Indow et al., 1962, p. 22, Table 1) と比較してみると、この結果はかなり大きな値を示している。

考察および結論

1. まず、 $\varphi = \phi$ という関係に対して、得られた結果は、所定の ϕ と被験者の定めた ϕ とが一致しないことより、このような対応関係にならないことが示される。しかしながら、各 ϕ に対して、その時のそれぞれのデータを通して、 θ の変化に依存しない 1 本の直線が当てはめられることより、被験者の定めた ϕ に対応する視空間における φ と、所定の ϕ との関係には、 θ は、影響をおよぼさないことがわかる。一方、この当てはめられた直線は、物理的の原点を通らず、 y 軸上か、あるいは、 x 軸上の 1 点に収束するのがみられる (Fig. 3 (C-1) (D-1))。これは、被験者の位置が、物理空間において、左右、あるいは、後方にずれていると考えられることを示している。そこで、原点を合わせ、所定の ϕ と被験者の定めた

(A) 上図直線の当てはまりが良い例

(B) 下図直線の当てはまりが良くない例

FIG. 9. 原点移動した動径距離 $(\rho - \rho_0)$ と輻角 (r) との関係

ϕ との関係を見ると、被験者の定めた ϕ 、すなわち、視空間における ϕ は、所定の ϕ より過小評価されているのがわかる。過小評価量と ϕ との間には、ベキ関数関係があることが示され、 ϕ が大きくなるにつれて、ますます過小評価が大きくなっている。

結果が必ずしも $\varphi = \phi$ とはならない原因として、被験者自身の位置のずれの他にも考えなければならない点がある。まず、刺激光点の呈示方法そのものの問題点である。というのは、ある ϕ を指示するための固定光点 I は、唯一点だけであるので、丁度それと左右対称な位置の影響が無視出来ないからである。その結果、被験者のとる判断基準に影響を与えていると思われる。みえの角度を作るというよりは、点の対称性の方に着目して角度が定められ易いからである。実験後の被験者の報告によると、固定光点 I の y 軸上にそった反対側に対称点を想定し、その想定点と自分とを結ぶ仮想線上に、各 I_j 点を置き角度を作ることが可能であった。ただし、教示は、角度 $\angle FOI$ と $\angle FOI_j$ がみえの上で等しくなるように I_j 点の位置を定めよ、とのみ指示する。

このような基準のとり方に従えば、Fig.3 (A) (B) にみられるデータの系統的ずれに対するもう一つの説明が可能であろう。各データは、この対称位置を基準にして、それより手前の I_j 点は破線より下に、それより遠方では破線より上に、という関係にあることが、破線と実線との交叉関係からいえる。このため、被験者の位置が、必然的に左右にずれているようにみえるともいえる。更に、その他の判断基準として、次のようなとり方があることも判明した。一つには、 I, I_j 各点と正中線迄の y 軸方向での距離に注目して角度を作る仕方と、一つには、刺激布置全体を万遍なくみやり、個々の光点迄十分に目を走査して角度を作る仕方とがありうるということが判明した。このような基準のとり方によって個人差がデータの上にみられるが、それらを全条件をこみにして、全被験者を通して平均すると、各 ϕ ごとに、1 本の直線の当てはめが可能になる。

2. 次に、 $\rho = 2e^{-\sigma r}$ という関係に対して、本実験で得られる被験者自身から各光点にいたる判断距離 $d_{I_j}(F)$ と、この点のそれぞれの位置に対する輻奏角 r とによって検討がなされる。 $d_{I_j}(F)$ を用いることは、Fig.6, Fig.7 に示される結果から裏打される。一方、 d を r の関数として考えることは、まず、Fig.5 に示されるように、 d とそれに対応する物理的距離 P との対応関係をみた場合、 ϕ や θ のちがいがによってデータにかなりのちがいがみられること、しかしながら、同じ d に対して、 r との関係を見ると、Fig.7 (A) (B) に示されるような程度のデータのちががりであることより示唆される。このことは、同じくユークリッド地図上における関係に反映されている。さて、その結果は、Fig.7 (A) (B) に示される曲線関

係から、上記の関数系では、データの説明に不十分であることが示される。かつ、Fig.5 にみられるように、被験者自身の位置は、物理的原点とは一致せず、視空間において、前方へずれている。また、Fig.8 にみられるように、距離 ρ は、 r が大きくなっても 0 に収斂しないで、ある値の所へ漸近していく。それ故、 ρ は、ユークリッド地図上の原点からではなく、それより前方へずれた位置から測られていることがわかる。従って、 ρ と r との関数関係は、(3) 式のような関数系を考える限り、原点を合わせた上で検討がなされなければならない。原点を合わせるには、前方へずれた分量だけ後方へ移動させてやらなければならない。この移動量を ρ_0 とすると、上記の関数式は、次のように書き換えられる。

$$\rho - \rho_0 = 2e^{-\sigma r}$$

このような修正式のもとに、データへの当てはまりをみると、よい精度で当てはまっていることが判明した。この結果は、Fig.8 (A) (B) に重ね合わせた曲線で示されている。

また、各被験者の奥行知覚精度を示すパラメータ σ の値は、Table 3 に示すような値が求まるが、従来の alley 実験や 3 点 4 点実験から得られている値と比較してかなり大きいことがわかる。

引 用 文 献

- Blank, A. A., Hardy, L. H., Rand, G., Rittler, M. C., & Boeder, P. 1953 The geometry of binocular space perception. New York: Knapp Memo. Labo.
- Blank, A. A. 1957 The geometry of vision. *Brit. J. Physiol. Opt.* 14, 154—669; 222—235.
- Blank, A. A. 1958 a Axiomatics of binocular vision. The foundation of metric geometry in relation to space perception. *J. opt. Soc. Amer.*, 48, 328—334.
- Blank, A. A. 1958 b Analysis of experiments in binocular space perception. *J. opt. Soc. Amer.*, 48, 911—925.
- Blank, A. A. 1959 The Luneburg theory of binocular space perception. In S. Koch (Ed.) *Psychology, A study of science*, Study I, Vol. 1, 395—426.
- Blank, A. A. 1961 Curvature of binocular visual space, an experiment. *J. opt. Soc. Amer.*, 51, 335—339.
- Foley, J. M. 1964 Desarguesian property in visual space. *J. opt. Soc. Amer.*, 54, 684—692.
- Foley, J. M. 1966 Locus of perceived equidistance as a function of viewing distance. *J. opt. Soc. Amer.*, 56, 822—827.
- Hardy, L. H. 1951 Investigation of visual space. The Blumenfeld alleys. *Arch. Ophthalm.*, 45,

- 53—63.
- Indow, T., Inoue, E., & Matsushima, K. 1962 An experimental study of the Luneburg theory of binocular space perception. (1) The 3- and 4-point experiments, (2) The alley experiments. *Jap. psychol. Res.*, **4**, 6—24.
- Indow, T., Inoue, E., & Matsushima, K. 1963 An experimental study of the Luneburg theory of binocular space perception. (3) The experiments in a spacious field. *Jap. psychol. Res.*, **5**, 10—27.
- Indow, T. 1967 Two interpretations of binocular visual space; Hyperbolic and Euclidean. *Annals J. Ass. Philosophy of Sci.*, **3**, 51—64.
- Indow, T. 1968 Multidimensional mapping of visual space with real and simulated stars. *Percep. & Psychophysics*, **3**, 1(B), 45—53.
- Ishii, K. 1961 Studies on the correlation between various perceptual constancies. *Bull. of Fac. of Lit. of Kyushu Univ.*, **7**, 291—319.
- Ishii, K. 1965 Studies on the correlation between various perceptual constancies (II). *Bull. of Fac. of Lit. of Kyushu Univ.*, **9**, 335—362.
- Luneburg, R.K. 1947 *Mathematical analysis of binocular vision*. Princeton Univ. Press.
- Luneburg, R.K. 1948 Metric methods in binocular visual perception. *Courant Anniversary Volume*. 215—240.
- Luneburg, R.K. 1950 The metric of binocular visual space. *J. opt. Soc. Amer.*, **40**, 637—642.
- Matsushima, K., & Noguchi, H. 1967 Multidimensional representation of binocular visual space. *Jap. psychol. Res.*, **9**, 85—94.
- 西川泰夫 1966 両眼視空間の幾何学的表現に関する歴史的考察 慶応義塾大学大学院社会学研究科紀要 **7**, 11—22.
- Nishikawa, Y. 1967 Euclidean interpretation of binocular visual space. *Jap. psychol. Res.*, **9**, 191—198.
- Zajackowska, A. 1956a Experimental test of Luneburg's theory. Horopter and alley experiments. *J. opt. Soc. Amer.*, **46**, 514—527.
- Zajackowska, A. 1956b Experimental determination of Luneburg's constants σ and K . *Quart. J. exp. Psychol.*, **56**, 66—78.

—1969. 3. 31. 受稿—

THE RELATION BETWEEN BINOCULAR VISUAL SPACE AND PHYSICAL SPACE —AN EXPERIMENTAL STUDY OF MAPPING FUNCTIONS—

YASUO NISHIKAWA

Department of Psychology, Keio University

ABSTRACT

The aim of this paper was to test experimentally the mapping functions in the Luneburg's model. In particular, Eq. (1) and (3) were explored in detail.

$$\varphi = \phi \quad (1)$$

$$\vartheta = \theta \quad (2)$$

$$\rho = 2e^{-\sigma\gamma} \quad (3)$$

where φ , ϑ and ρ respectively denote an azimuth angle, an angle of elevation, a

radial distance in the Euclidean map. ϕ , θ and γ respectively denote a bipolar azimuth, an angle of elevation, a bipolar parallax in the physical space. Six Ss participated in the experiment. In a dark room, three light points were presented on the plane of given θ ; F was fixed on the line $\phi=0$ and I was fixed at the position of a given ϕ (Fig. 2). The S was asked to adjust I_j so as to match its azimuth angle to that of I . For a given

I, I_j was presented with 3~6 different radial distances. If Eq. (1) holds, then the adjusted positions of I_j are to be on the same straight line of the given angle ϕ . In so far as I is fixed, I_j were found to be on the same straight line irrespective of the radial distance and also of θ . However, the straight line was not the one expected in all the case of I having different values in ϕ . Either a set of straight lines converging to a point on the y axis or a set of straight lines converging to a point on the x axis can be fitted to the data (Fig. 3). The S was also asked to assess the apparent radial distance to I_j in terms of ratio to the apparent radial distance to I or to F . Let d_{I_j} be the scaled radial distance. As a function of r , d_{I_j} was found

to be not in the form of Eq. (3) (Fig. 7(A) (B)). Then, the relation between the apparent radial distance d_{I_j} and the radial distance ρ on the Euclidean map was made explicit for the various values of K , that is, Gaussian curvature of the visual space (Fig. 6). Through the relationship, d_{I_j} was converted to ρ and still it was found that ρ is not related with r as is assumed in Eq. (3) (Fig. 7(C)(D)). It became clear, however, the data are fitted irrespective of ϕ and θ by the equation

$$\rho - \rho_0 = 2e^{-\sigma r} \quad (4)$$

as is shown in Fig. 8. The value of σ estimated through Eq. (4) was too large compared with the value obtained in previous studies by the 3- and 4-point experiments and the alley experiments.