



Title	Pulfrich奥行現象への解析幾何学的接近
Author(s)	中島, 義明
Citation	大阪大学人間科学部紀要. 1989, 15, p. 41-60
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/8002
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Pulfrich 奥行現象への解析幾何学的接近

中 島 義 明

1. Pulfrich の奥行現象とは？
2. Pulfrich effect と仮現運動
3. Pulfrich effect と眼球運動
4. モデルの作成
 - (1) X-Y 直交座標系の導入
 - (2) 左→右運動を右眼にフィルターを装着して観察した場合
 - (3) 右→左運動を右眼にフィルターを装着して観察した場合
 - (4) フィルター装着眼の左右差
 - (5) 運動 target が等速直線運動をしている場合の軌道
 - (6) 近地点への見かけのずれ距離
 - (7) 遠地点への見かけのずれ距離
 - (8) 近地点と遠地点へのずれ距離の差
 - (9) lag time Δt の測定
5. 要約

Pulfrich 奥行現象への解析幾何学的接近

1. Pulfrich の奥行現象とは？

おもりを糸の先につけて振子をつくり、観察者の前額平行面上を左右に反復往復運動させてみよう。この時、正面前方の一点を凝視しつつ、両眼でおもりの運動軌道を観察してみると、前額平行面上を弧を描いて反復往復運動する姿が見られる。次に、観察者の左眼の前に ND (neutral-density) フィルターを置き、右眼はそのままの状態にして、両眼で再びおもりの運動軌道を観察してみると、今度は奥行方向に楕円軌道を描いて時計方向に回転運動する姿が見られる。フィルターを右眼の前に置いてみると、運動方向が逆転し、反時計方向の回転運動となる。この、片眼へのフィルターの装着により、振子運動が回転奥行運動に見える現象は、Pulfrich stereophenomenon とか Pulfrich pendulum effect と呼ばれている。Pulfrich (1922) によるこの現象の記述から、彼の名が冠されているが、実際には、彼自身は後半生のある時期から片眼の視力を失っており、自分自身でこの現象を観察した第一発見者ではないようだ (Morgan & Thompson, 1975)。Pulfrich 奥行現象に関するこの種の情報は Morgan & Thompson (1975) の論文の末尾に付された historical note に詳しい。

この現象は、通常、次のように説明されている。フィルターを通して入力された信号の伝達は、フィルターを通さない場合よりも遅延し、この時間的遅延が空間的な網膜像差 (retinal disparity) に変換される。この考え方は、lag hypothesis と言われ、多くの支持を得ている (例えば、Alpern, 1968 ; Dodwell, Harker, & Behar, 1968 ; Julesz & White, 1969 ; Lee, 1970a ; Lit, 1949 ; Rogers & Anstis, 1972)。

上で言う、時間的遅延は、用いられるフィルター濃度が大なるほど単調に増加するという (Lit, 1949)。一口に遅延と言っても、それを引き起こす要因には 2 種類のものが考えられる。1 つは、刺激強度とその刺激が知覚されるまでの latency との間にみられる良く知られた反比例的な関係であり、もう 1 つは、暗順応眼に見られる反応速度の低下現象である (Standing, Dodwell, & Lang, 1968)。Pulfrich effect が反復して測定される際には、上の 2 つの要因は交絡してしまい、いずれか 1 つの要因が効果を持ったのか、両者が効果を持ったのかの区別をすることは、困難となる。それ故、本論文では、両要因に基づく時間差の加算されたものを指し、lag time と呼ぶことにする。

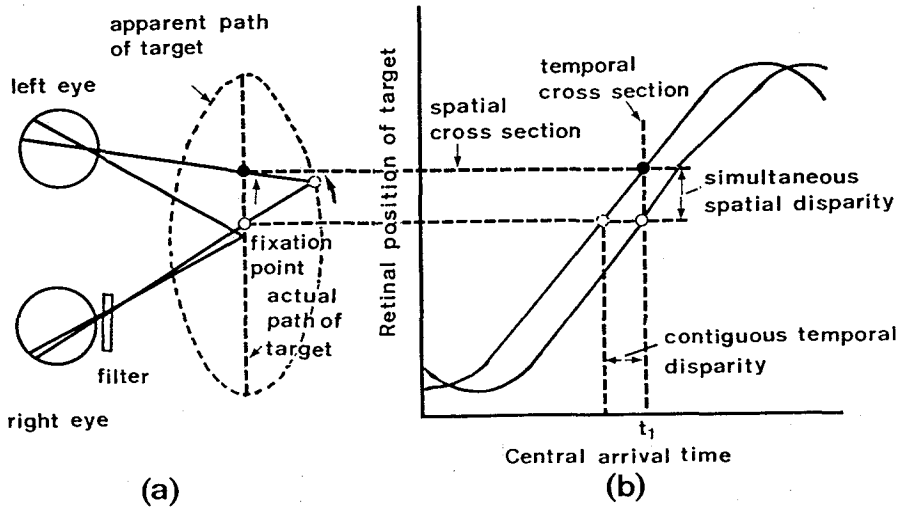


図1 lag hypothesis による奥行現象の説明図。(a)は時刻 t_1 における target の見かけの奥行位置を示す。(b)は時間の経過につれての見かけの奥行位置の変化をグラフで示したもの。詳細は本文参照。(Morgan & Thompson, 1975 より)

図1は、lag hypothesis による Pulfrich 奥行現象の説明図である。(a)図は右眼の前にフィルターを置いたケースを上から見て描いたものである。右眼に投影された target 像(図中の白抜き丸印が投影されたもの)に関する信号はその同じ時左眼に投影された target 像に関する信号より時間的に遅れて中枢に伝達される。それ故、この遅れて中枢に到達した右眼の網膜像の信号と融合作用において用いられる左眼の網膜像の信号は、遅れ時間の間に黒丸印のところまで移動してしまった target の投影像に関するものとなろう。すなわち、時間的遅れにより、網膜像差が生み出されるというわけである。この網膜像差を通常の同時的な空間的網膜像差(simultaneous spatial disparity)と区別して contiguous temporal disparity と呼ぶこともある(Morgan & Thompson, 1975)。図1の(b)図は、上の関係を二次元座標上で示したものである。横軸は中枢へ到達する時間を表わし、縦軸は target の網膜上の位置を表わしている。それ故、垂直線で切られた時の2本の曲線の距離が、網膜上の同時的空間網膜像差に対応する量を示すことになる。他方、水平線で切られた時の2本の曲線の距離が、この同時的空間網膜像差に対応する contiguous temporal disparity を示すことになる。座標上の2曲線はフィルター濃度や target の物理的運動がいかなるものであるかにより異なった形状をとることになる。

2. Pulfrich effect と仮現運動

映画のような β -運動事態でも pulfrich effect が観察され得るという。すなわち, target の運動が, 連続した実際運動ではなく, 空間位置を異ならせる静止 target の点滅による仮現運動であっても, stroboscopic stereophenomenon とでも呼べるような pulfrich effect が生じることが知られている。しかし, この場合には, lag hypothesis ではどのように説明することになるのであろうか (Lee, 1970b)。

この場合, フィルターは, それぞれ非連続的な空間位置に提示されている target の情報伝達を遅延させはするが, 空虚部分の情報については取り扱いようがないことになる。それ故, ある時点において spatial disparity を生じさせる両眼もしくはいずれかの眼の網膜情報に欠落が生じる場合がある。このような時に, 非対応の部分との融合がうまく生じればよいが, そのようなことがなければ, 連続した奥行軌道が見かけ上生じることはあり得ないことになる。Morgan & Thompson (1975) によれば, 非連続 target の提示間隔がある程度短ければ, 奥行方向への見かけのずれは生起するが, 提示間隔がある限界を越えて長くなると, 生起しなくなるという。また, この限界は, フィルター濃度が増加するにつれ, より長い方向に移行するという。

これらのことより, 仮現運動には, "filling in" があるのだと考えられている (Morgan & Thompson, 1975 ; Morgan, 1976)。

3. Pulfrich effect と眼球運動

図1にみられたような lag hypothesis に基づく説明では, 眼は運動 target を追うのではなく, 正面前方の静止点を凝視しつつ運動 target を観察する事態が想定された。すなわち, 運動 target の像が網膜上を横切っていく条件が考えられた。しかしながら, 眼が運動 target を追視する場合にも, Pulfrich effect は生起するという (Gregory, 1966 ; Kirkwood, Ellis, & Nichol, 1969)。

しかし, この場合には, もし良い追視が保たれたのであれば, 運動 target の像は, フィルター装着眼においても, 他方の非装着眼においても, 中心窩に落ちたままであるから, 図1のような解釈は, そのままの形では, 成立し得なくなろう。Rogers, Steinbach, & Ono (1974) によれば, たしかに, 暗黒中で運動 target が追視された時は, 奥行方向へのずれは出現しなくなるという。しかし, 他方, 明所視のような背景刺激が存在する条件下においては, 見かけ上の奥行方向へのずれが出現するという。彼らはこれらの事実を次のように解釈している。両眼は実際の軌道を追視しており, このことにより target は前額平行面上で

運動しているという信号が発せられる。同時に、この時、背景刺激の像は網膜上を横切って動くことになる。フィルター装着眼では非装着眼に比べ、中枢への網膜情報伝達上の lag time が生ずるが、追視することにより網膜上を動く背景刺激に対して、この効果が及ぼされる。それ故、背景刺激に奥行方向のずれを伴った運動が出現する。しかし、この奥行方向へのずれを伴った背景刺激の運動に対して、Duncker (1929) の誘導運動と同様のメカニズムが作用する。すなわち、前額平行面上を運動する target の方に奥行方向のずれを伴った運動が誘導され、背景刺激自身は静止したところの安定したものとして「誤解釈」されるという。

Ono & Steinbach (1983) は、X-Y プロッターに取り付けられた発光ダイオードを運動 target とし、ランダム・ドット・パターンを背景刺激として、実際に眼球運動を測定し、前述の解釈の前提となっている、両眼が前額平行面上の実際の軌道を追視しているという点を、確認している。

日中の生活場面においては、凝視点を凝視した状態で振子を観察しようと、また、振子を追視してみようと、いずれの場合においても、Pulfrich effect は生起する。このことは、上述の解釈により十分に説明されている。この解釈は、前者の状態における奥行効果については、lag hypothesis を振子の網膜像の運動に適用し、後者の状態における奥行効果については、lag hypothesis を背景の網膜像の運動に適用したものである。これら両者の奥行効果の相対的性格を考える時、「Pulfrich 奥行効果の一般的特性」の吟味は、いずれか一方のケースにおける特性の吟味で十分であろう。それ故、本論文では、振子すなわち target の運動に lag hypothesis を適用したケースのみを取り上げることにする。

4. モデルの作成

Pulfrich の奥行効果は、その現象の明瞭性のため多くの人々の興味をひき、種々なる実験が試みられてきているが、現象生起の理論的説明については、上にみたように lag hypothesis によりほぼ確立済みとの感が深い。

以下、この lag hypothesis に基づき、生起現象が有すると思われるいくつかの特性を、果して数理的にも導くことが可能であるのかどうかを、予備的に吟味してみよう。

問題を一般化して述べるなら、両眼において入力刺激の伝達に時間差がある場合、 $v = f(t)$ の直線運動をする対象が、我々に如何なる運動として知覚されるのか、ということになる。そこで、まず、このような一般形のままで考察を進め、後に、 $v = f(t)$ に具体的な運動速度の変化型を示す式の内、計算の煩雑さを避けるため、最もシンプルな $v = w$ という等速運動の式を挿入することにしてみよう。

(1) X-Y直交座標系の導入

今、両眼のいずれかにフィルターをかけることにより、両眼の受ける刺激強度 S_1, S_2 が $S_1 > S_2$ という関係にあるとしよう。このとき、それぞれの刺激強度に対応して視覚中枢への情報伝達に要する時間が t_1, t_2 であるなら、

$$\left. \begin{array}{l} t_1 = g(S_1) \\ t_2 = g(S_2) \end{array} \right\} \quad (1)$$

と表される。このとき、 $g(X)$ は単調減少型をしたある関係を示している。また、

$$\Delta t = t_2 - t_1 > 0 \quad (2)$$

で表せる情報伝達時間における lag time Δt が生ずる。それ故、両眼からの網膜像が融合する際、そこで用いられる網膜像に関する情報は左右の眼で時間的に Δt ずれたものとなる。このことは、対象が運動している場合には、異なった時点に対応した網膜情報が用いられることを意味する。その結果、刺激対象が前額平行面内における二次元の運動であっても上述の情報の差異が、両眼視差と同様の働きを持つことにより、図2における (a),

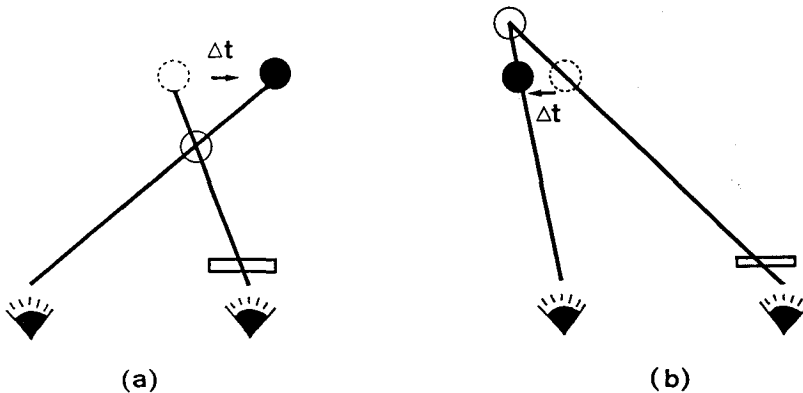


図2 右眼へのフィルター装着事態における Pulfrich 奥行現象。黒丸印は運動 target を示す。 Δt 前には、この target は点線丸印の位置に存在した。実線丸印は target の見かけの位置を示す。target の運動方向により (a), (b) の両者のケースが生じる。

(b) のいずれかのように、対象の見かけの位置が客観的な位置よりも奥行方向にずれることになるのである。

そこで、これらの関係を (X, Y) の 2 次元平面上で考えてみよう。左眼、右眼を結ぶ直線を X 軸とし、両眼間の中点を 0 点とする。この中点において直交する軸が Y 軸となる (図 3 参照)。

(2) 左→右運動を右眼にフィルターを装着して観察した場合

今、右眼にフィルターをかけた場合を取り上げてみよう。以下の話は図 3 を参照していただきたい。まず左眼を L 、右眼を R 、両眼距離を $2a$ ($a > 0$) とし、また、裸眼に inputs する時刻 t における運動 target の位置を $P(t)$ とする。 $P(t)$ にある target の網膜像と融合するフィルター装置眼における入力内容は、フィルター装着により伝達時間が Δt

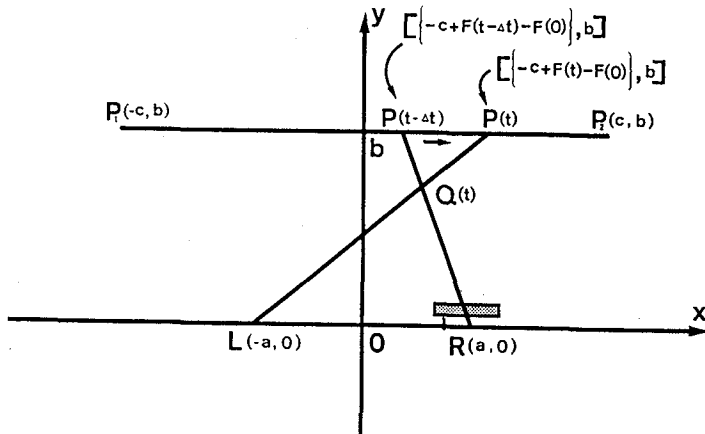


図 3 図 2-(a)のケースを座標表示した図。詳細は本文を参照。

だけ余分にかかっているのです、時刻 $(t - \Delta t)$ の時の位置すなわち $P(t - \Delta t)$ にある target の像となろう。また、両眼からの網膜像が融合して我々に 1 つの対象として知覚された運動 target の見かけの位置を $Q(t)$ とする。そして、直線運動する運動 target は、 $Y = b$ ($b > 0$) の直線上を Y 軸の左右に等しい距離だけ、左から右に 1 回運動するとしよう。この時の運動開始始点を $P_1(-c, b)$ 、運動終点を $P_2(c, b)$ とする ($c > 0$)。

この時の運動 target の運動速度 v を

$$v = f(t)$$

③

とすると、運動距離 S は

$$S = \int_0^t f(t) dt = F(t) - F(0) \quad (4)$$

となる（当然ながら、 $0 \leq S \leq 2c$ であるから、 $v=f(t)$ において、 t のとれる範囲には制限がつく）。それ故、運動 target が出発してから時間が $t+t_1$ たった時に融合が生起し、見かけの位置 $Q(t)$ が生じることになる。その際の左眼、右眼の網膜像を生じさせた運動 target の位置 $P(t)$ と $P(t-\Delta t)$ は、それぞれ下のようになる。

$$\begin{aligned} P(t) &\rightarrow [-c + \{F(t) - F(0)\}, b] \\ P(t-\Delta t) &\rightarrow [-c + \{F(t-\Delta t) - F(0)\}, b] \end{aligned}$$

そこで、直線 $LP(t)$ の方程式を求めてみる。2点 (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) を通る直線は、

$$\frac{Y-Y_1}{X-X_1} = \frac{Y_1-Y_2}{X_1-X_2} \quad (5)$$

の関係が成立するので、これを利用する。結果は、

$$Y = \frac{b}{\{-c + F(t) - F(0)\} + a} (X+a) \quad (6)$$

となる。同様に、直線 $Rp(t-\Delta t)$ の方程式を求めると、

$$Y = \frac{b}{\{-c + F(t-\Delta t) - F(0)\} - a} (X-a) \quad (7)$$

となる。⑥式と⑦式の交点が $Q(t)$ であるから、両式からその時の X 座標と Y 座標とを計算してみる。⑥式と⑦式より Y を消去すると、

$$\begin{aligned} &\frac{b(X+a)}{\{-c + F(t) - F(0)\} + a} \\ &= \frac{b(X-a)}{\{-c + F(t-\Delta t) - F(0)\} - a} \end{aligned} \quad (8)$$

⑧式を整理すると、

$$X = \frac{a \{F(t) + F(t-\Delta t) - 2F(0) - 2c\}}{F(t) - F(t-\Delta t) + 2 + a} \quad (9)$$

となり、X 座標が求められた。今度は、⑨式を⑥式に代入することにより、Y 座標を求める。

$$Y = \frac{b}{\{-c + F(t) - F(0)\} + a} \cdot \left[\frac{a \{F(t) + F(t-\Delta t) - 2F(0) - 2c\}}{F(t) - F(t-\Delta t) + 2 + a} + a \right] \quad (10)$$

⑩式を整理すると、

$$Y = \frac{2ab}{F(t) - F(t-\Delta t) + 2 + a} \quad (11)$$

となり、Y 座標が求められた。⑨式、⑪式において、パラメーター t を消去すれば、 $Q(t)$ の描く軌道を表す式が求まる。

(3) 右→左運動を右眼にフィルターを装着して観察した場合

次に、運動方向が逆になった場合を考えてみよう。この場合は先ほどと逆に、運動開始点が P_2 、運動終点が P_1 となる。従って、この時の t は運動 target が P_2 を出発し、 P_1 に達するまでの間をゼロから増加し続ける。この関係を、図 4 に、先ほどと同様の X-Y 座標により表示してある。

図 4 より、この場合の $P(t)$ と $P(t-\Delta t)$ の座標は、

$$\begin{aligned} P(t) &\rightarrow [c - \{F(t) - F(0)\}, b] \\ P(t-\Delta t) &\rightarrow [c - \{F(t-\Delta t) - F(0)\}, b] \end{aligned}$$

となる。そこで、前と同様に、直線 $LP(t)$ の方程式を求めると、

$$Y = \frac{b}{c - \{F(t) - F(0)\} + a} (X + a) \quad (12)$$

また、直線 $RP(t-\Delta t)$ の方程式を求めると、

$$Y = \frac{b}{c - \{F(t-\Delta t) - F(0)\} - a} (X - a) \quad (13)$$

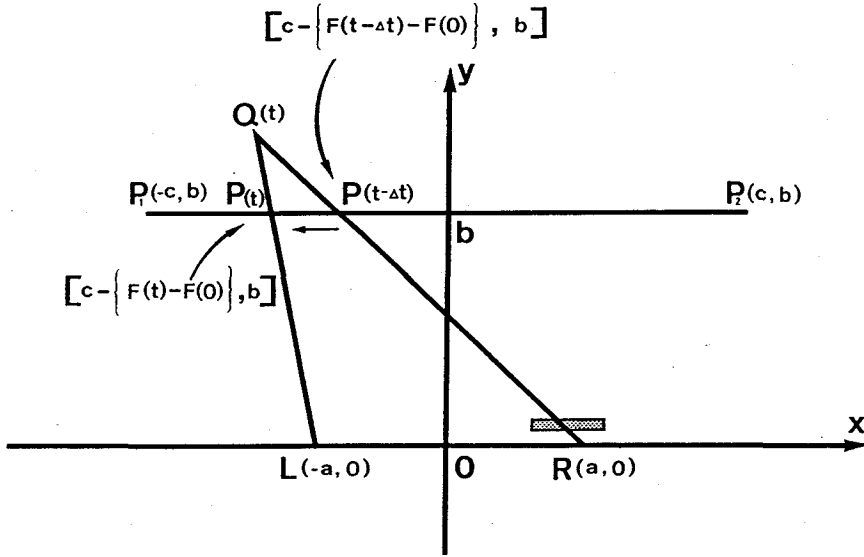


図4 図-2(b)のケースを座標表示した図。詳細は本文を参照。

となる。⑫式と⑬式により、両直線の交点である $Q(t)$ の座標を求めると、

$$X = \frac{a \{F(t) + F(t-\Delta t) - 2F(0) - 2c\}}{F(t) - F(t-\Delta t) - 2a} \quad (14)$$

$$Y = \frac{2ab}{F(t-\Delta t) - F(t) + 2a} \quad (15)$$

となる。⑭式、⑮式において、パラメーター t を消去すれば、target の運動の復路（先ほどの左→右を往路とすれば）において生ずる見かけの運動軌道を表す式が求まる。

(4) フィルター装着眼の左右差

フィルターを右眼に装着した場合は上で見てきたが、左眼に装着した場合にはどのようなのであろうか。この場合は、左眼からの情報伝達が、右眼のそれより Δt 遅れることになるから、図3、4において、それぞれ、今度は R と $P(t)$ 、 L と $P(t-\Delta t)$ が結ばれることになる。それ故、時刻 t における運動 target の見かけの位置を示す、それら2

直線の交点 $Q(t)$ は、フィルターを右眼に装着した時と比べて、刺激の客観的軌道である P_1, P_2 の前後に関して位置が逆になる。 $X-Y$ 座標上の式の表示において、この点を考慮にいれば、関係式の操作は、フィルターを右眼に装着した場合とまったく同様のやり方で行えばよいことになる。そのため、以下は省略する。当然のことながら、右眼と左眼とで、最初に仮定された⑤式の間数型やパラメーターの実現値が異なっていれば、 Δt の大きさは両者において同じものとはならない。

(5) 運動 target が等速直線運動をしている場合の軌道

今までの考察においては、 $f(t)$ なる一般型を用いて表してきた運動 target の速度変化式に、具体的な関係式を挿入することにより、見かけの軌道の具体的な形状についてみることにしよう。本論文では、最も簡単な等速直線運動の場合に言及するに止めるが、演算の複雑化を除けば、logic の進めは、他の関数式の場合も全く同様となることは、当初でふれた通りである。

等速運動を式で表すと、

$$f(t) = w \quad (16)$$

となる。 w は一定速度を示す定数である。この時、

$$F(t) = \int w dt = wt \quad (17)$$

そして、ここでは、 $F(0) = 0$ の場合を想定しているので、積分定数はゼロとなる。

そこで、今、左→右と等速で直線運動し（往路）、端点で方向を逆にし再び等速で直線運動する（復路）1 サイクルの運動を考えてみよう。まず、⑨式より往路における運動 target の見かけの位置 $Q(t)$ の X 座標を求めてみると、

$$\begin{aligned} X &= \frac{a \{wt + w(t - \Delta t) - 2 \cdot 0 - 2c\}}{wt - w(t - \Delta t) + 2a} \\ &= \frac{a(2wt - w\Delta t - 2c)}{w\Delta t + 2a} \end{aligned} \quad (18)$$

となる。この時、当然ながら、

$$0 \leq F(t) \leq 2c \quad (19)$$

であるから,

$$0 \leq t \leq \frac{2c}{w} \quad (20)$$

という制約が t には課せられよう。

次に, ⑪式より, $Q(t)$ の Y 座標を求めてみると,

$$Y = \frac{2ab}{wt - w(t - \Delta t) + 2a} = \frac{2ab}{w\Delta t + 2a} \quad (21)$$

となる。

⑬式より, X 座標はパラメーター t を含むので, t の変化につれて, 刻々と変わることが分かる。他方, ⑭式より, Y 座標はパラメーター t を含んでいないので, 常に一定となっていることが分かる。すなわち, $Q(t)$ のたどる見かけの軌道は, この場合, X 軸に平行な (ということは, 刺激の客観的運動軌道 P_1, P_2 に平行な) 直線となる。しかも, この場合, $Q(t)$ のたどる軌道は, P_1, P_2 に対して観察者に近づく側に位置する (図 3 参照)。

次に等速直線運動の復路における運動 target の見かけの位置 $Q(t)$ における X 座標を⑭式より求めてみよう。

$$\begin{aligned} X &= \frac{a \{wt + w(t - \Delta t) - 2 \cdot 0 - 2c\}}{wt - w(t - \Delta t) - 2a} \\ &= \frac{a(2wt - w\Delta t - 2c)}{w\Delta t - 2a} \end{aligned} \quad (22)$$

となる, この時, $0 \leq t \leq \frac{2c}{w}$ の制約がつくのは, 往路とおなじである。

この時の Y 座標を⑮式より求めると,

$$Y = \frac{2ab}{w(t - \Delta t) - w(t) + 2a} = \frac{2ab}{-w\Delta t + 2a} \quad (23)$$

となる。往路と同様に X 座標にはパラメーター t が含まれているが、Y 座標には含まれていない。すなわち、復路の $Q(t)$ も直線運動することが分かる。ただし、こちらの場合には、 $Q(t)$ の運動軌道は P_1, P_2 に対して観察者から遠ざかる側に位置する（図 4 参照）。

(6) 近地点への見かけのずれ距離

(5)の運動 target が等速直線運動をしている場合における、見かけの軌道のずれを考えてみよう。まず上例の往路にあたる、客観的運動軌道 P_1, P_2 に対して、観察者に近付く場合を取り上げる。

いま、この場合における、客観的軌道からのずれ距離を dn とすると、

$$dn = b - Y \quad (24)$$

また、この時の Y は ② 式であるから、

$$\begin{aligned} dn &= b - \frac{2ab}{w\angle t + 2a} \\ &= \frac{bw\angle t}{w\angle t + 2a} \end{aligned} \quad (25)$$

となる。

(7) 遠地点への見かけのずれ距離

次に、上例の復路にあたる、客観的運動軌道 P_1, P_2 に対して、見かけの運動軌道が観察者より遠ざかる場合を取り上げてみよう。

今、この場合における、客観的軌道からのずれ距離を df とすると、

$$df = Y - b \quad (26)$$

また、この時の Y は ③ 式であるから、

$$\begin{aligned} df &= \frac{2ab}{-w\angle t + 2a} - b \\ &= \frac{bw\angle t}{-w\angle t + 2a} \end{aligned} \quad (27)$$

となる。

(8) 近地点と遠地点へのずれ距離の差

②⑤式と②⑦式とを比べてみれば、 dn と df の大きさ関係は一目瞭然であるが、一応、式により証明しておく。

$$\begin{aligned} \frac{1}{dn} - \frac{1}{df} &= \frac{w\Delta t + 2a}{bw\Delta t} - \frac{-w\Delta t + 2a}{bw\Delta t} \\ &= \frac{2w\Delta t}{bw\Delta t} \\ &= \frac{2}{b} > 0 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\therefore \frac{df - dn}{dn \cdot df} > 0 \quad (29)$$

$$\therefore df > dn \quad (30)$$

となる。すなわち、遠地点への奥行ずれ量の方が、近地点への奥行ずれ量よりも大きくなるのである。

上の関係は、 $f(t) = w$ の特定の関数型の場合にのみにあてはまるものではなく、 $f(t)$ がいかなる型の関数であっても、一般的に適合する特性である。

すなわち、上例と同様に、近地点側へのずれ距離を dn 、遠地点側へのずれ距離を df とすると、⑪式より、

$$\begin{aligned} dn &= b - \frac{2ab}{F(t) - F(t - \Delta t) + 2a} \\ &= \frac{b \{F(t) - F(t - \Delta t)\}}{F(t) - F(t - \Delta t) + 2a} \end{aligned} \quad (31)$$

また、⑬式より

$$\begin{aligned} df &= \frac{2ab}{F(t - \Delta t) - F(t) + 2a} - b \\ &= \frac{b \{F(t) - F(t - \Delta t)\}}{F(t - \Delta t) - F(t) + 2a} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{dn} - \frac{1}{df} &= \frac{F(t) - F(t-\Delta t) + 2a}{b \{F(t) - F(t-\Delta t)\}} - \frac{F(t-\Delta t) - F(t) + 2a}{b \{F(t) - F(t-\Delta t)\}} \\
 &= \frac{1}{b} \cdot \frac{2 \{F(t) - F(t-\Delta t)\}}{F(t) - F(t-\Delta t)} \\
 &= \frac{2}{b} > 0 \\
 \therefore df > dn
 \end{aligned} \tag{33}$$

以上のように、近地点・遠地点への見かけのずれ量が等しくならないことが、一般的に成立することが分かる。そこで、今、近地点・遠地点を正中面内で測定する事態を考えてみるならば、この時の近地点・遠地点は、target が前額平行面上を振子運動している時のそれぞれ最大のふくらみ箇所を意味しよう。それ故、一般的に、Pulfrich 奥行現象では、振子運動が奥行方向にふくらみ「楕円軌道」を描くと記述されているが、厳密に言えば、「楕円に近似した軌道」の表現がより適切であろう。

(9) lag time Δt の測定

lag time Δt を求める式が②⑤式もしくは②⑦式より得られる。

②⑤式より、

$$\Delta t = \frac{2a \cdot dn}{w(b - dn)} \tag{34}$$

また、②⑦式より

$$\Delta t = \frac{2a \cdot df}{w(b + df)} \tag{35}$$

となる。

③④式と③⑤式における a は、右眼と左眼との間の距離の半分を示す。また、 b は、刺激 target が運動する前額平行面と観察者との間の距離を示す。 w は、実験者が設定したところの、等速直線運動をする刺激 target の客観的運動速度を示し、定数である。 dn と df は未知数であるが、それぞれ、実験的に測定値として求めることが可能である。

例えば、図 3 or 4 における P_1 , P_2 間を、等速直線運動で往復運動する運動 target の提示は、メカニカルな装置では困難を極めるかもしれないが、エレクトロニカルな装置

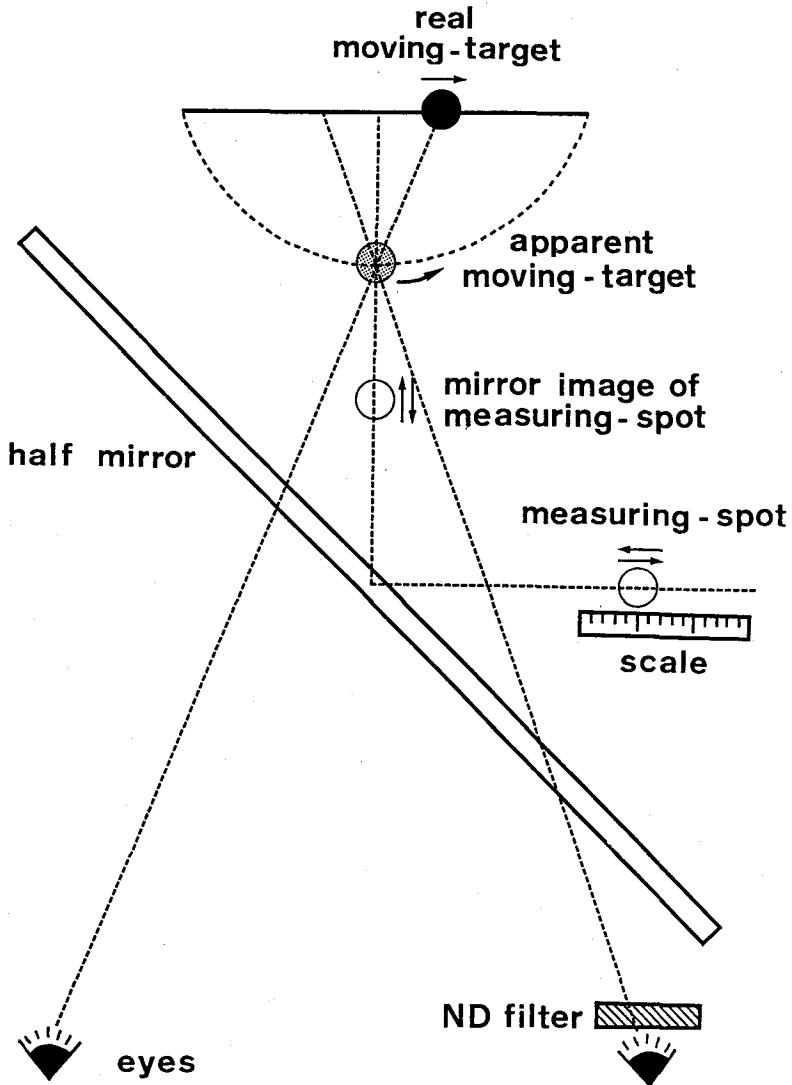


図 5 運動 target の見かけの奥行位置を測定するための装置を模式的に示した図。説明は本文参照。

では容易に実現できる。手軽には、最近のパソコンのディスプレイ画面を用いればよい。また、この画面と観察者との間にハーフミラーを前額平行面に対し45°の位置に置けば、奥行方向に映像上移動可能な測定用スポットを左右方向への移動で実現できる。このようにして、見かけの奥行距離の測定が可能となろう。図5にその模式図を示しておく。

③4式と③5式が成立することは、dn と df は互いに独立ではなく、以下の関係が存在することになる。

$$\frac{2a \cdot dn}{w(b-dn)} = \frac{2a \cdot df}{w(b+df)} \quad (36)$$

$$dn(b+df) = df(b-dn)$$

$$\therefore df = \frac{bdn}{b-2dn} \quad (37)$$

これより、dn の測定結果から df の値を予測することが可能となる。この予測値と df の実測値との一致度の程度により、lag hypothesis に基づく上のモデルの妥当性が吟味され得よう。

5. 要 約

片眼に ND フィルターを取り付け、両眼で正面前方の凝視点を凝視しつつ、前額平行面上で振子運動をする物体を観察すると、この物体は、見かけ上、奥行を有する楕円軌道を描く。この Pulfrich 現象として知られる奥行効果は、フィルター装置眼から視覚中枢への情報伝達が、裸眼の場合より、時間的に遅延し、さらに、この時間的遅延が空間的な網膜像差に変換されるという、lag hypothesis により、説明されている。

そこで、本論文では、lag hypothesis に基づいた簡単な解析幾何学的モデルが構成され、この現象の有するいくつかの特性の数理的導出が可能であるのかどうか、最もシンプルな運動である等速運動について吟味がなされた。その結果、target の運動方向による奥行効果の差、フィルター装着眼の左右差による奥行効果の差、近地点・遠地点における奥行距離の差が、target の座標表示の下で明らかにされた。さらに、lag time の算出式が導かれ、併せて、そこで用いられる実測値の一つの測定事態が示唆された。最後に、近地点への見かけのずれ量と遠地点への見かけのずれ量との間の関係式が導出され、この式を用いることにより、lag hypothesis に対する妥当性を吟味するための一つの方法が提示された。

引用文献

- Alpern, M. 1968 A note on visual latency. *Psychological Review*, **75**, 260-264.
- Dodwell, P. C., Harker, G. S., & Behar, I. 1968 Pulfrich effect with minimal differential adaptation of the eyes. *Vision Research*, **8**, 1431-1443.
- Duncker, K. 1929 Über induzierte bewegung. *Psychologische Forschung*, **12**, 180-225.
- Gregory, R. L. 1966 *Eye and brain*. World University Library.
- Julesz, B., & White, B. J. 1969 Short-term memory and the Pulfrich phenomenon. *Nature*, **222**, 639.
- Kirkwood, B., Ellis, A., & Nichol, B. 1969 Eye movement and the Pulfrich effect. *Perception and Psychophysics*, **5**, 206-208.
- Lee, D. N. 1970a Spatio-temporal integration in binocular kinetic space perception. *Vision Research*, **10**, 65-68.
- Lee, D. N. 1970b A stroboscopic stereophenomenon. *Vision Research*, **10**, 587-593.
- Lit, A. 1949 The magnitude of the Pulfrich stereo-phenomenon as a function of binocular differences of intensity at various levels of illumination. *American Journal of Psychology*, **62**, 159-181.
- Morgan, M. J. 1976 Pulfrich effect and the filling in of apparent motion, *Perception*, **5**, 187-195.
- Morgan, M. J., & Thompson, P. 1975 Apparent motion and the Pulfrich effect. *Perception*, **4**, 3-18.
- Ono, H., & Steinbach, M. J. 1983 The Pulfrich phenomenon with eye movement. *Vision Research*, **23**, 1735-1737.
- Pulfrich, C. 1922 Die stereoskopie im dienste der isochromen und heterochromen photometrie. *Naturwissenschaften*, **10**, 533-564, 569-574, 596-601, 714-722, 735-743, 751-761.
- Rogers, B. J., & Anstis, S. M. 1972 Intensity versus adaptation and the Pulfrich stereo-phenomenon. *Vision Research*, **12**, 909-928.
- Rogers, B. J., Steinbach, M. J., & Ono, H. 1974 Eye movements and the Pulfrich phenomenon. *Vision Research*, **14**, 181-185.
- Standing, L. G., Dodwell, P. C., & Lang, D. 1968 Dark adaptation and the Pulfrich effect. *Perception and Psychophysics*, **4**, 118-120.

THE ANALYTIC-GEOMETRICAL APPROACH TO THE PULFRICH STEREOPHENOMENON

Yoshiaki NAKAJIMA

When a pendulum swinging in the fronto-parallel plane is viewed binocularly with a neutral density filter in front of one eye, the pendulum appears to swing in approximately elliptical path. This illusion is called the Pulfrich stereophenomenon.

The transmission of the signal from the filtered eye is delayed compared with the nonfiltered eye. This lag time creates a binocular disparity which induces the apparent depth effect. This explanation is known as "lag hypothesis".

There are two situations in which the Pulfrich stereophenomenon is produced. One is the situation in which the eyes fixate a stationary point and the image of target moves across the retina and the background stimuli do not move. The other is the situation in which the eyes follow the moving target with smooth eye movements which place the image of the target on the foveas of both eyes and make the images of the background stimuli move across the retina. In the former situation, the lag hypothesis applies to the target image moving across the retina, in the latter, it applies to the background image moving across the retina. Although there is the difference in the retinal image which produces effective retinal disparity, there seems to be nothing wrong with lag hypothesis itself.

Therefore, this paper aims to approach to the Pulfrich stereophenomenon through the analytical-geometrics on the basis of the lag hypothesis and investigate whether this mathematical approach could reveal the characteristics concerning the Pulfrich stereophenomenon, considering the simplest case in which the target moves at the constant speed on a straight line.

The results obtained showed the effect of motion direction and the effect of filtered eye (right or left) on the Pulfrich stereophenomenon. And it was also shown that there was the difference between the apparent near and far depths from the midpoint of the real motion track. Furthermore, the equation to calculate the lag time was derived and, since the equation contains the experimental value, one experimental situation to measure this value was presented. Finally, the equation showing the relationship between the near and far depths was derived and one method to test the validity of the lag hypothesis was presented using this equation.