

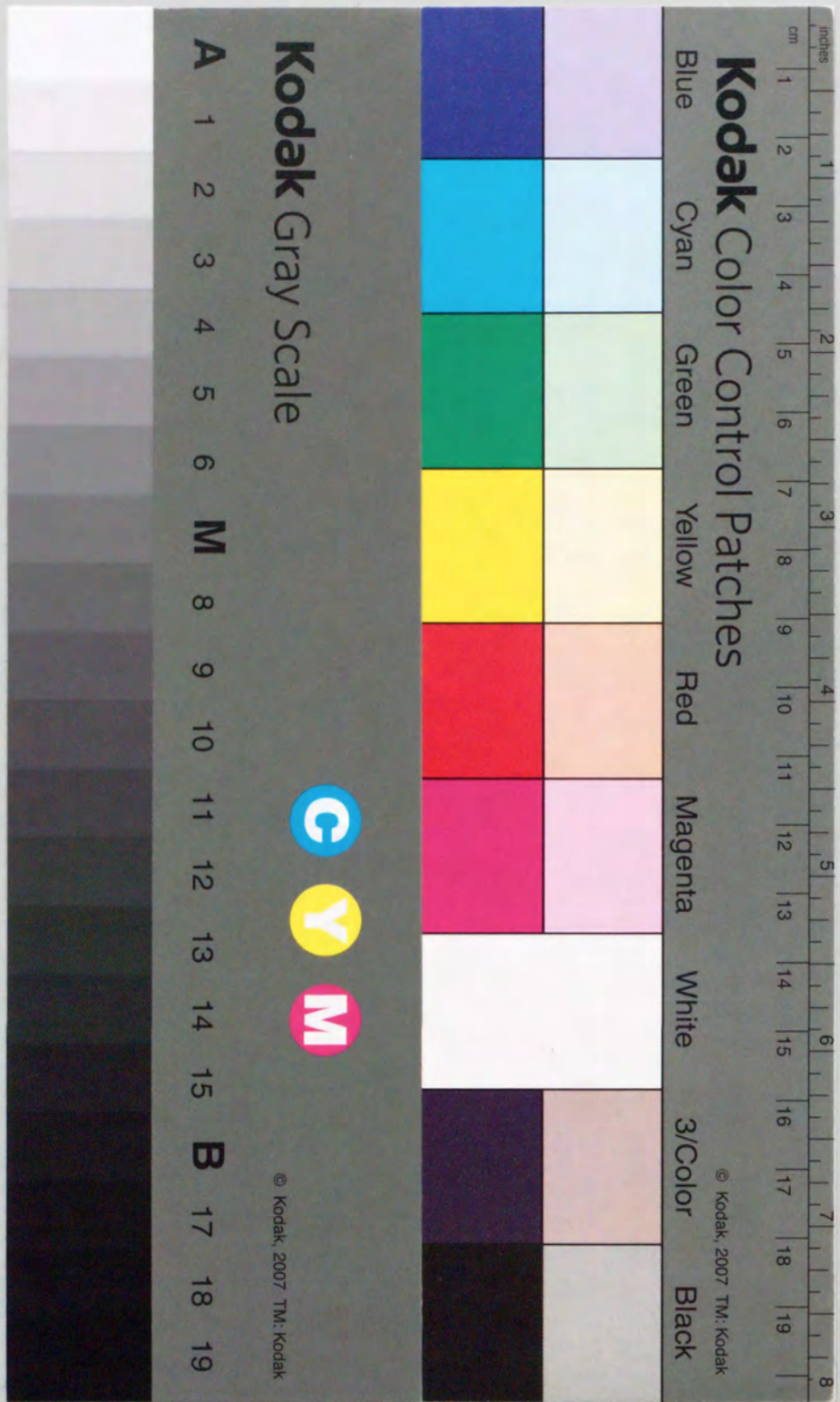


Title	網膜像の拡大による奥行き視：接近対象の主観的移動距離に及ぼす諸要因に関する研究
Author(s)	名手, 久貴
Citation	大阪大学, 2001, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3183734
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka



博士学位論文

網膜像の拡大による奥行き視

— 接近対象の主観的移動距離に及ぼす諸要因に関する研究 —

大阪大学大学院 人間科学研究科
行動学専攻
名手 久貴

①

博士学位論文

網膜像の拡大による奥行き視

— 接近対象の主観的移動距離に及ぼす諸要因に関する研究 —

大阪大学大学院 人間科学研究科
行動学専攻
名手 久貴

目次

1 章 序論	
1-1 日常生活の中の接近対象	1
1-2 我々を取り巻く様々なオプティック・フロー	1
1-3 理論的奥行き距離と主観的奥行き距離	6
1-4 接近対象の主観的移動距離に関する先行研究	9
1-4-1 奥行き方向の運動の検出	9
1-4-2 速度を検出する機構	14
1-4-3 二段階説による接近対象の移動距離の説明	17
1-4-4 接近対象の移動距離の処理に関する問題点	20
1-5 本研究の目的	21
2 章 接近対象の主観的移動距離と物理的移動距離	
2-1 実験 1	23
2-2 実験 2	32
2-3 実験 3	38
2-4 2章のまとめ	42
3 章 接近対象の移動距離知覚における処理メカニズムの検討	
3-1 実験 4	44
3-2 実験 5	51
3-3 3章のまとめ	62
4 章 接近対象の移動距離知覚における拡大運動情報と幾何学的情報の関係	
4-1 実験 6	64
4-2 実験 7	70
4-3 4章のまとめ	78
5 章 総合論議	
5-1 結果のまとめ	80
5-2 本研究から導かれる接近対象の移動距離知覚のモデル	82
5-3 本研究のモデルによる実験結果の説明	85
5-4 発展的問題	90
6 章 要約	94
References	97
Appendix	
謝辞	

目次

第一章 序論 1

第二章 1

第三章 1

第四章 1

第五章 1

第六章 1

第七章 1

第八章 1

第九章 1

第十章 1

第十一章 1

第十二章 1

第十三章 1

第十四章 1

第十五章 1

第十六章 1

第十七章 1

第十八章 1

第十九章 1

第二十章 1

第二十一章 1

第二十二章 1

第二十三章 1

第二十四章 1

第二十五章 1

第二十六章 1

第二十七章 1

第二十八章 1

第二十九章 1

第三十章 1

第三十一章 1

第三十二章 1

第三十三章 1

第三十四章 1

第三十五章 1

第三十六章 1

第三十七章 1

第三十八章 1

第三十九章 1

第四十章 1

第四十一章 1

第四十二章 1

第四十三章 1

第四十四章 1

第四十五章 1

第四十六章 1

第四十七章 1

第四十八章 1

第四十九章 1

第五十章 1

第五十一章 1

第五十二章 1

第五十三章 1

第五十四章 1

第五十五章 1

第五十六章 1

第五十七章 1

第五十八章 1

第五十九章 1

第六十章 1

第六十一章 1

第六十二章 1

第六十三章 1

第六十四章 1

第六十五章 1

第六十六章 1

第六十七章 1

第六十八章 1

第六十九章 1

第七十章 1

第七十一章 1

第七十二章 1

第七十三章 1

第七十四章 1

第七十五章 1

第七十六章 1

第七十七章 1

第七十八章 1

第七十九章 1

第八十章 1

第八十一章 1

第八十二章 1

第八十三章 1

第八十四章 1

第八十五章 1

第八十六章 1

第八十七章 1

第八十八章 1

第八十九章 1

第九十章 1

第九十一章 1

第九十二章 1

第九十三章 1

第九十四章 1

第九十五章 1

第九十六章 1

第九十七章 1

第九十八章 1

第九十九章 1

第一百章 1

1 章 序論

本書之目的在於探討...

第一章 序論

本章之目的在於探討...

第二章...

第三章...

第四章...

第五章...

第六章...

第七章...

第八章...

第九章...

第十章...

第十一章...

第十二章...

第十三章...

第十四章...

第十五章...

第十六章...

第十七章...

第十八章...

第十九章...

第二十章...

第二十一章...

第二十二章...

第二十三章...

第二十四章...

第二十五章...

第二十六章...

第二十七章...

第二十八章...

第二十九章...

第三十章...

第三十一章...

第三十二章...

第三十三章...

第三十四章...

第三十五章...

第三十六章...

第三十七章...

第三十八章...

第三十九章...

第四十章...

第四十一章...

第四十二章...

第四十三章...

第四十四章...

第四十五章...

第四十六章...

第四十七章...

第四十八章...

第四十九章...

第五十章...

第五十一章...

第五十二章...

第五十三章...

第五十四章...

第五十五章...

第五十六章...

第五十七章...

第五十八章...

第五十九章...

第六十章...

第六十一章...

第六十二章...

第六十三章...

第六十四章...

第六十五章...

第六十六章...

第六十七章...

第六十八章...

第六十九章...

第七十章...

第七十一章...

第七十二章...

第七十三章...

第七十四章...

第七十五章...

第七十六章...

第七十七章...

第七十八章...

第七十九章...

第八十章...

第八十一章...

第八十二章...

第八十三章...

第八十四章...

第八十五章...

第八十六章...

第八十七章...

第八十八章...

第八十九章...

第九十章...

第九十一章...

第九十二章...

第九十三章...

第九十四章...

第九十五章...

第九十六章...

第九十七章...

第九十八章...

第九十九章...

第一百章...

1-1 日常生活の中の接近対象

普段、ボールや車のような接近対象との衝突を避けるために、我々は回避、捕捉等の適切な行動をとる。例えば、野球の試合中、選手に向かってボールが飛んだ時のような場合が考えられる。選手にボールが飛ぶと、選手はボールの網膜像の拡大からボールが接近してくることを知覚する。また、車を運転する際、前方の車が接近してくるとドライバーは車間距離を適切に保つために、ブレーキをかけ自分の車のスピードを落とし前方車両との車間距離を広げる。さらに、狭い道路を通過中、前方から対向車両が接近すると、対向車両との奥行き距離を測りながら適切な位置でスピードを落とし、対向車両の通過に備えて道路の端に車を寄せる。

このように、普段、何気なく処理をしている接近対象の運動の特徴は、2次元運動ではなく3次元運動であるという点が挙げられる。対象が網膜と平行に移動する状態、つまり、対象が目の前を通り過ぎていくような状態では、対象の移動がそのまま網膜に投影されるため、対象の物理的な移動を対象の網膜像の移動と対応づけることが可能になる。これは、網膜に平行な対象の移動が2次元的な運動だからである。しかし、接近対象の網膜像の変化から、対象の物理的な移動と対象の網膜像の移動とを対応づけることが難しくなる。つまり、接近対象の運動が3次元運動であるがゆえに、3次元を2次元に記述する際に生じる不良設定という問題が生じるということである。このために、接近対象の運動は、網膜像の変化情報から複雑な情報処理を想定する必要がある。そこで、本研究では、接近対象の距離知覚を中心にして、対象の接近運動の処理メカニズムを明らかにしていくことを目的とする。

ところで、上記の野球の例と車の例では、両方とも対象が観察者に接近するという点では同じであるが、野球の選手はその場でとどまる一方、ドライバーは自分自身も移動しているという点が異なる。野球選手の例では、観察者がとどまっているため、観察者の網膜像は接近対象であるボールの像だけが変化する。一方、ドライバーの例では、観察者の網膜像は対向車の像の変化とともにドライバー自身の移動による網膜像の変化が付加される。このように観察者の移動と対象の移動とが組み合わせられると、様々に網膜像が変化する。次に、この点について議論を進めていく。

1-2 我々を取り巻く様々なオプティック・フロー

対象が接近運動を行うとそれに対応して対象の網膜像は拡大運動を行う。この網膜像の運動をオプティック・フローと呼ぶ。この節では、様々に分類されるオプティック・フロ

ーについて概観し、それぞれのオプティック・フローの要素間の関係について議論し、本研究で扱うオプティック・フローを限定する。

オプティック・フロー自体は外界の対象の運動によって生じる場合もあれば、観察者の移動や眼球運動によっても生じる。これらの組み合わせにより、さらに複雑なオプティック・フローが生じる。Gibson (1950)は、これらのオプティック・フローを5つのパターンに分類した (fig. 1)。

- (a) 安定した環境中に、観察者の眼球が運動する場合、安定した外界の環境が知覚される。
- (b) 観察者の眼球は静止しているが、外界の対象が前額平面上を移動する場合、安定した環境の中を対象が移動していくと知覚される。
- (c) 前額平面上を移動する対象を追視する場合、安定した環境の中を対象が移動していくと知覚される。
- (d) 安定した環境中で、観察者が頭を移動させる場合、安定した環境の中を自分自身が移動していると知覚する。
- (e) 観察者自身も静止し観察者の眼球も静止しているが、奥行き方向に対象が移動する場合、安定した環境の中を対象が奥行き運動を行うことが知覚される。

網膜上のオプティック・フローの分類は Koenderink (1986)も行っている。Koenderink (1986)の分類は、網膜上の相対運動により生じるすべてのオプティック・フローは発散(div)、回転(curl)、2つの剪断(def)という4つのパターンの組み合わせにより表現可能であるという Longuet-Higgins and Prazdny (1980)、Longuet-Higgins (1984)の研究を基礎にしている (fig. 2)。発散 (div) は網膜上のある光点の広がりであり、回転 (curl) は、回転角度であり、剪断 (def) はシアー変形する角度や変形していく軸の方向である。Koenderink (1986)は、網膜像の局所運動として移動、発散、回転、剪断をあげた。このうち発散、回転、剪断は外界の三次元構造情報をもつが、移動はもたないと考えられた。そして、発散、回転、剪断、移動の各要素の独立性が多数の先行研究で検討されてきた。(Kappers, van Doorn, & Koenderink 1994; Koenderink & van Doorn, 1975; Simpson, 1993; Te Pas, Kappers, & Koenderink, 1996a, 1996b)。

人が、これらのオプティック・フローの各要素を知覚する際、各オプティック・フロー要素はどのような関係にあるのだろうか。Te Pas et al. (1996b)は、拡大・回転・剪断が、移動と独立して検出されるのかどうか検討した。この実験では、拡大、回転、剪断それぞれ

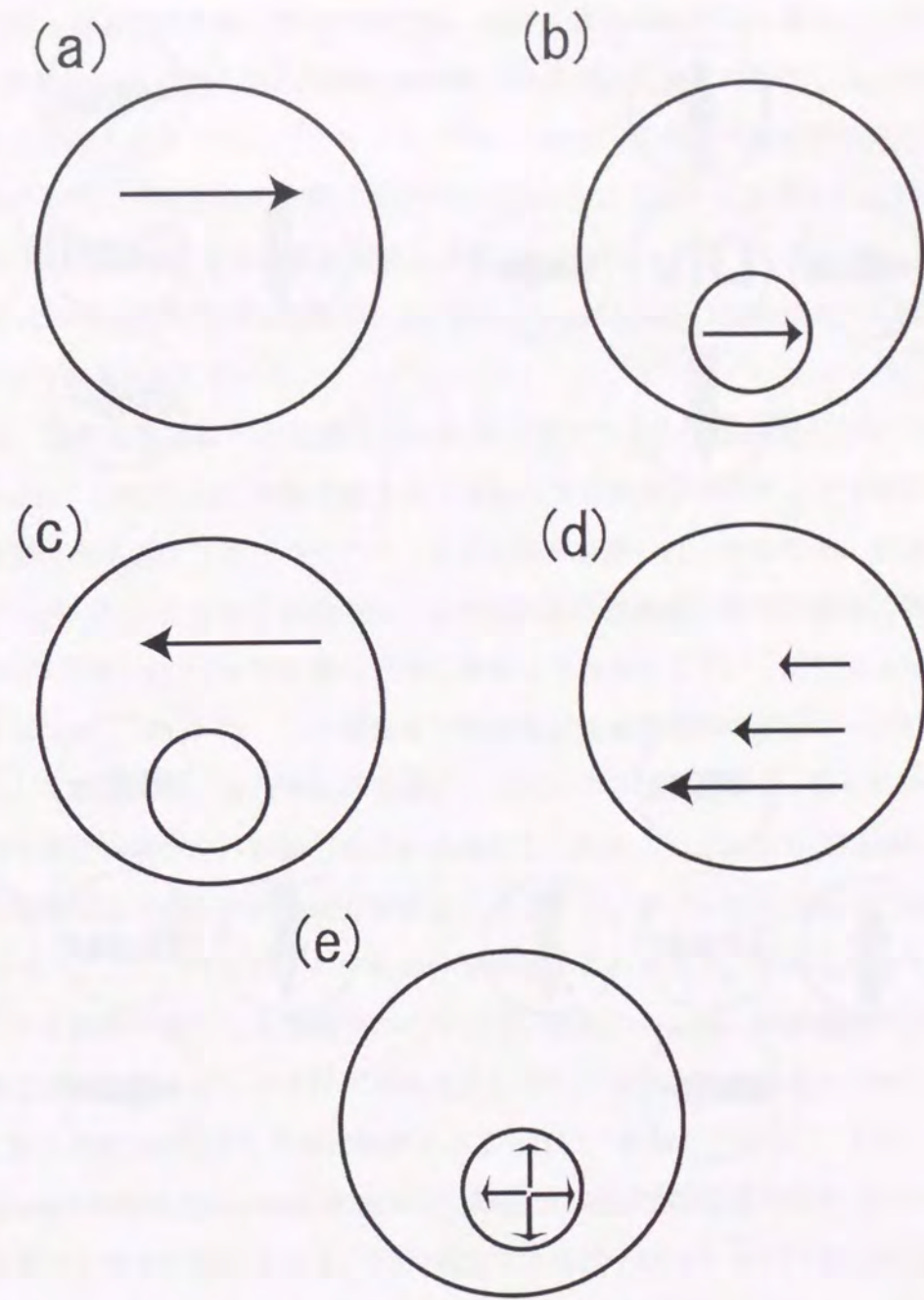


fig. 1 Gibson (1950)による光学的流動の分類

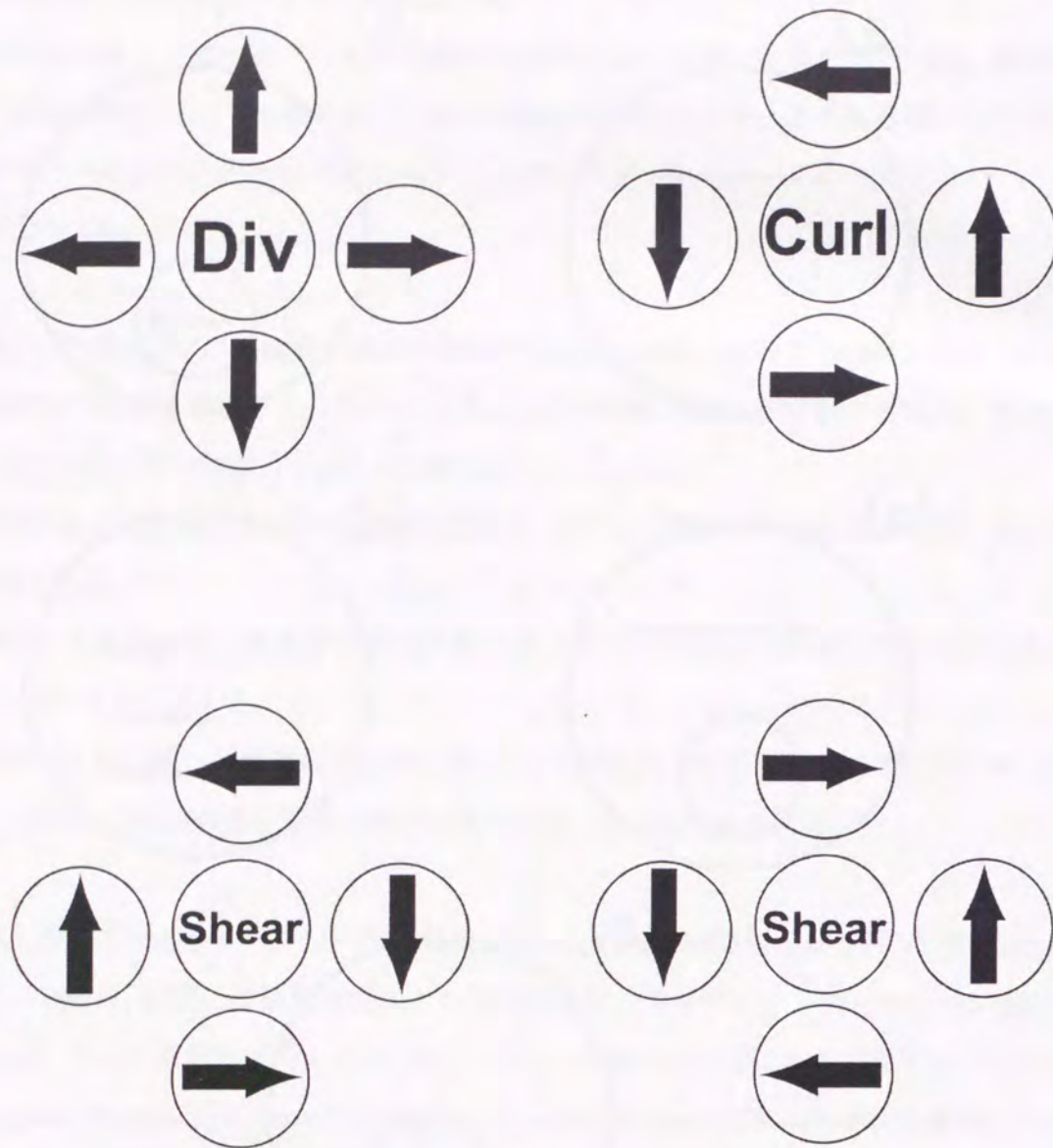


fig. 2 Longuet-Higgins and Pradny (1980) が提案した
4つの optic flow パターン

れの運動に移動運動を加えた運動をランダムドットが行った。回転刺激では、刺激が時計回りか反時計回りかを判断させ、拡大刺激では、刺激が拡大運動か縮小運動かを判断させた。そして、回転、拡大に加えられる移動運動は、条件ごとに速度が変化した。そして、各刺激にガウスノイズを加えて、ガウスノイズのレベルで、各刺激の閾値を測定したところ、高いノイズレベルで各運動が正確に検出可能であった。これらの結果から、Te Pas et al. (1996b)は、拡大、回転、剪断が移動運動とは独立して検出されるとした。また、Regan and Beverley (1985)は移動運動と回転が、De Bruyn and Orban (1990)は拡大と回転が独立しているという結果を示している。

このように、移動運動は拡大と分離されて知覚可能であるとする研究がある一方で、Duffy and Wurtz (1993)は、移動運動と拡大運動に相互作用が存在すると主張した。彼らは、拡大運動に水平運動をオーバーラップさせた刺激を用いた。その結果、拡大運動と水平運動をオーバーラップさせた刺激では、拡大運動と移動運動の両方が簡単に観察されるが、拡大の中心が見かけ上、水平運動の方向に移動してみられるという錯視がみられた。

Duffy and Wurtz (1993)は、この錯視を平行移動が観察者自身の運動から生じる感知信号の刺激として解釈され、自己移動の補償として拡大の中心が、本来、拡大の中心が移動すべき方向とは反対の方向へ移動したために生じると説明した。つまり、観察者の、右方向への眼球運動は左方向への網膜像の移動を引き起こし、自己の前進運動から生じる拡大運動と結びつくと、左方向へ拡大の中心の移動が生じるのである。移動を検出する機構と拡大を検出する機構が独立した機構であるならば、拡大の中心は、移動運動とオーバーラップさせる以前の位置を指し示すはずである。しかし、移動方向とは逆の方向にずれるので、移動と拡大が完全に独立した検出機構があるとはいきれなくなる。

また、Simpson(1988)は Koenderink(1986)や Regan(1986)は網膜像の拡大が他の運動やノイズから完全に分離され検出されるという完全フィルター説にたっていると批判し、拡大が他の運動やノイズから完全には分離されず、不完全な信号として検出されるという不完全フィルター説を提案している。Simpson(1988)は、速度の異なる二つの対象を接近させ、どちらが先に衝突するかを選択させた。そして、対象を拡大させる条件と、対象を拡大させながら x、y、z 軸を中心に回転させる条件を設け、速度の閾値を測度とする実験を行った。すると、結果は、純粋な網膜像の拡大に比べて、x、y、z 軸を中心に回転を加えながら拡大させた方の閾値が上昇した。これは、Simpson (1988) の不完全フィルター説を支持する結果であった。

このように、移動成分と拡大成分の関係についての先行研究は、両者が独立して処理さ

れるとする研究と、相互作用を認めている研究がある。網膜像上の局所運動の要素である移動、拡大、回転、剪断を検出する機能に特化した機構を持ち、それらが独立した処理を行うかどうかについて、今の段階ではコンセンサスが得られていない。

本研究で扱う接近対象は、Gibson (1950) のオプティック・フローの分類による(e)の場合や、Longuet-Higgins and Prazdny(1980)の拡大にあたる。日常生活においては、視線上を真っ直ぐに接近する対象というのはむしろまれな場合であり、たいていの場合、移動や回転という他のオプティック・フローと組み合わせられた場合の方が多い。しかし、上記で述べたように拡大と移動や回転のような他のオプティック・フローとの相互作用についてはまだ不明な点が多い。そこで、本研究では、観察者の視線に沿って接近する対象に限定して、接近対象の運動の知覚を検討する。

1-3 理論的奥行き距離と主観的奥行き距離

この節では、様々な奥行き視手がかりと主観的距離の関係について記述し、本来、算出不可可能な接近対象の移動距離について議論する。

対象が観察者に接近するとき、その対象の網膜像の変化から接近運動を知覚することは可能である (Beverley & Regan, 1979a) が、網膜像の変化から移動距離を知覚することは可能なのだろうか。この問題について考えると、接近対象の移動距離自体をその投影像から物理学的に算出可能かという問題と、心理学的に知覚可能かという二つの問題が生じる。

第一に、接近対象の移動距離を、その対象の投影像から物理学的に算出する時に生じる問題は、接近対象の運動が奥行き運動であるために不良設定問題が生じるということである。つまり、接近対象の移動距離を物理学的に計算しようとしても解が複数存在し、一意に解を定めることが不可能になる。その理由は次の通りである(fig. 3)。対象 O が、時間 T_0 の時点において観察者との距離 L_1 の位置から観察者の視線を観察者に向かって移動するとき、 T_1 秒後の観察者と対象の距離 L_2 は、 L_1 が判明していれば T_0 における網膜像と T_1 における網膜像の比較から算出することが可能である。しかし、距離 L_1 は対象の網膜像の変化から算出することが不可能なので、同様に、観察者と対象との距離(L_2)及び、対象の移動距離($L_2 \cdot L_1$)を算出することは不可能である (ただし、 T_0 における対象と観察者の距離 L_1 と T_1 における距離 L_2 の比率を算出することは可能である)。このように、接近対象の網膜像の拡大による手がかりだけでは、物理学的に奥行き移動距離を計算することは不可能である。

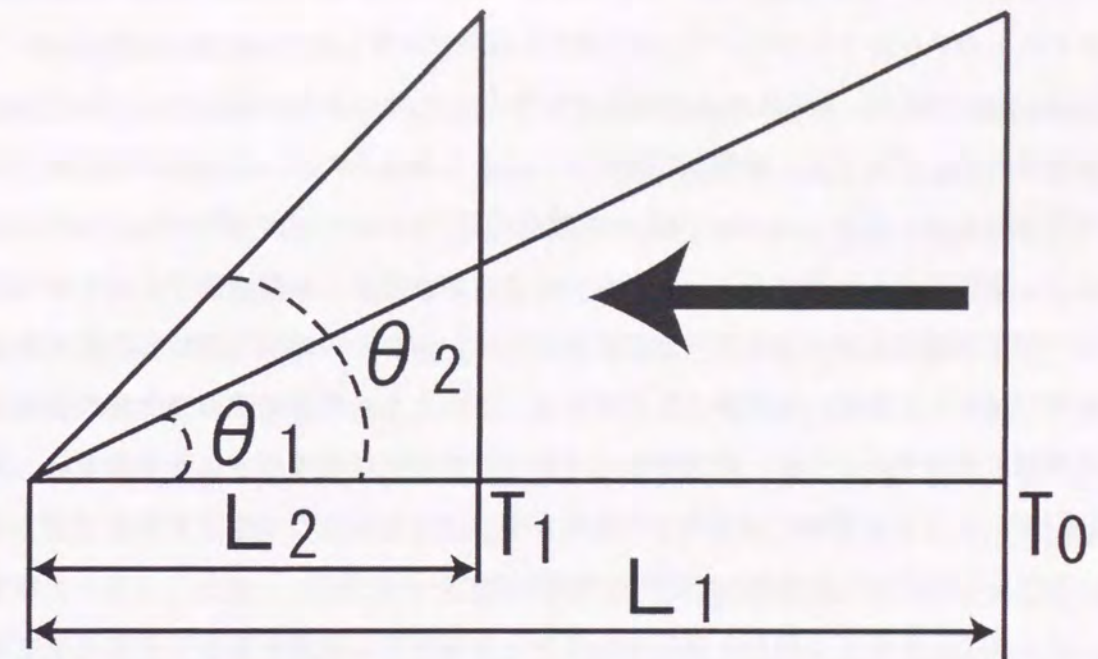


fig. 3 不良設定問題 L_1 の値が不明なため、 L_2 の値は不明である

第二に、心理学的な問題として、両眼視差や運動視差等の様々な奥行き視手がかりから我々は奥行き移動距離を正確に知覚することができるのであろうか。両眼視差、運動視差、輻輳角、調節はその手がかりの性質上、物理学的に正確な奥行き距離を算出することが可能である。しかし、運動視差に関する先行研究の結果(Ono, Rivest, & Ono, 1986)を見ると、人がそれらの手がかりを利用して正確な奥行き距離を知覚しているとはいえない。

Berkeley(1709)は、「距離はそれ自体の本性としては知覚不可能だけれども視覚によって知覚される。それゆえ、距離が視覚の中にもたらされるのは、それ自体が視覚という行為の中で知覚されるような、他の何らかの観念の媒介によってなのである。」と述べている。つまり、距離自体を知覚することはできないのだが、実際には両眼視差における両眼網膜像差や運動視差における対象間の速度差のように、何らかの距離に対応して変化する変数と経験が結合して距離の知覚がもたらされる。このとき、両眼網膜像差や運動視差における対象間の速度差のように、物理学的にそれ自体から距離が算出される事柄から、対象間の「重なり」のように簡単には物理学的距離が算出できないような手がかりに対しても我々は、それらの手がかりを媒介して距離を知覚することができる。

このように、すべての奥行き視手がかりから物理学的に距離を算出できるわけではなく、算出できる奥行き視手がかりにしても人は正確に奥行き距離を知覚できるわけではない。人は様々な奥行き視手がかりの変化に対応して奥行き距離の増減の知覚を行っている。そして、その主観的奥行き距離と物理学的距離の対応はみられるが一致しない場合や、奥行き視手がかりから物理学的距離が算出できない場合も存在する。

対象の接近運動による奥行き視の場合も、対象の網膜像の変化だけから接近距離を物理的に計算することは困難である。しかし、パウワー(1977, 古崎訳, 1979)は、生後6日から20日の新生児であっても接近対象に対して奥行きを知覚することが可能であることを示している。生後4ヶ月未満の新生児では両眼視が不可能なことが知られているため(下条, 1992)、Bowerの実験で見られた新生児の奥行き視は両眼視が不可能な状態での奥行き視であると考えられる。このように網膜像の拡大により奥行きを知覚する場合、本研究では、物理学的には奥行き距離を算出できないが、人は日常的に網膜像の拡大から奥行きを知覚しているとする。

では、人は接近対象の移動距離を知覚可能なのであろうか。もし、知覚可能であれば、その値は物理学的に算出される移動距離と等しい値を知覚することができるのであろうか。本研究の第一の目的は、接近対象の物理学的に算出される移動距離と主観的移動距離を比較することにより、主観的移動距離の特性について検討することである。

1-4 接近対象の主観的移動距離に関する先行研究

本節では、接近対象の移動距離知覚に関連する、接近対象の検出、対象の接近速度、そして、直接に接近対象の移動距離を扱った研究を概観する。そして、それらの整合性及び問題点について検討する。

1-4-1 奥行き方向の運動の検出

Regan and Beverley (1978a, 1978b)は、Gibson (1950)の分類の(e)や、Koenderink (1986)、Longuet-Higgins and Prazdny (1980)の発散(div)にあたる拡大運動について、それを専門に処理する拡大検出器を想定し、その実在性を実験的に検討した。彼らは、まず、ディスプレイ上で振動する正方形を被験者に順応させた。この正方形の振動のさせ方は2種類であった(fig. 4)。一つは正方形の向かい合う二辺が反対方向に動き、もう一つは向かい合う二辺が同じ方向に動く。向かい合う二辺が反対方向に動く条件では、正方形の大きさが変化するように被験者は知覚し、向かい合う二辺が同じ方向に動く条件では正方形の位置が変化するように被験者は知覚する。すると、大きさが変化する正方形に順応した被験者の場合、位置の変化に対する感受性はほとんど変化していないのに対して、大きさの変化を検出する能力は低下していた。この結果から、Regan and Beverley (1978a, 1978b)は、位置の変化を感受するチャンネルとは独立した大きさ変化を感受するチャンネルの存在を示唆した。

しかし、この実験での信号はあくまで大きさ変化信号であり、大きさ変化から奥行きを知覚しているかどうかは明らかになっていない。この問題を解消するために、Beverley and Regan(1979a)は、残効を利用した実験を行った。Beverley and Regan (1979a)は、被験者に垂直方向の二辺だけが縮小する正方形と四辺が縮小する正方形という2種類の刺激に順応させた。そして、それらによる運動残効の持続時間を比較した結果、奥行き運動残効が消失するのにかかる時間の方が大きさ残効を消失させる時間よりも長かった。これらの結果から、Beverley and Regan (1979a)は大きさ変化残効と奥行き運動残効が異なった処理を受けていると主張した。

網膜像の拡大から、対象自身が拡大していると知覚する場合と対象が接近していると知覚する場合がありますが、どのような優先順位、もしくは場合分けを行って知覚しているかについての決定的な説明はない。Regan, Beverley and Cynader (1979)は、網膜像上で対象が拡大する場合、対象自身が拡大する場合と対象が接近する場合がありますが、実際には対象が接近していると解釈するケースが多いとした。その理由として、対象が接近する場合には、自分自身に危険が迫っているため、まず、大きさが変化してい

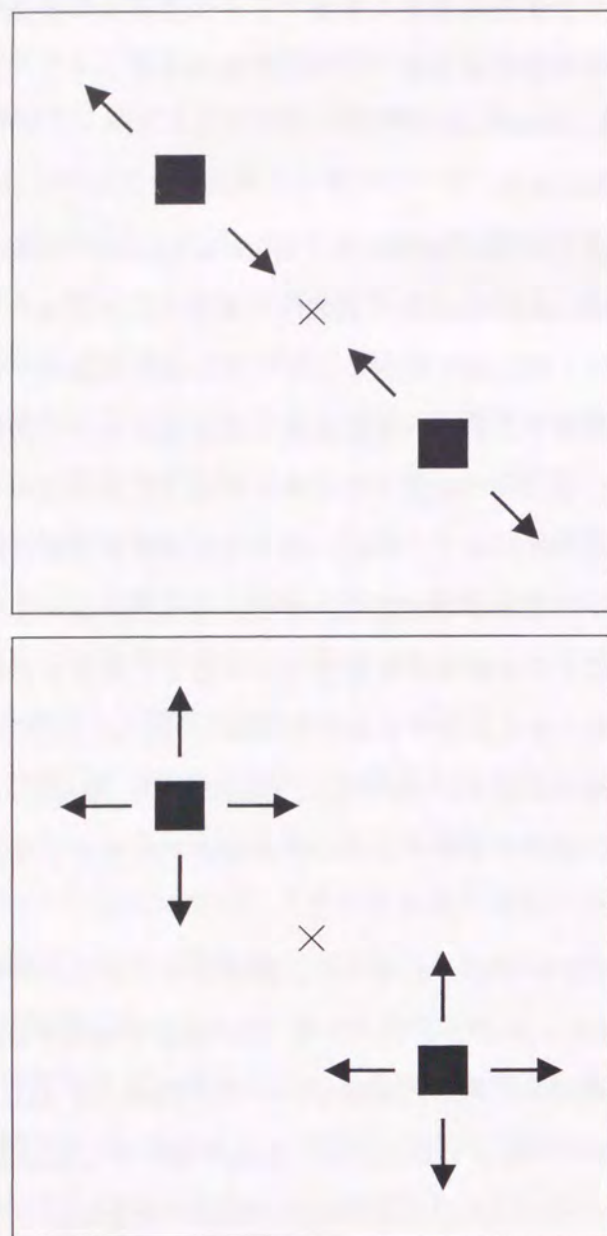


fig. 4 Regan (1978a)の実験で使用された刺激

ると解釈したのでは、手遅れになってしまうことが多いことを挙げた。

Beverley and Regan (1979a)は、それまでの一連の研究を基礎として、接近運動の検出モデルを提案した(fig. 5)。そのモデルは、方向選択性運動フィルター(unidirectional motion filter)、大きさ変化フィルター(changing-size filter)、奥行き運動ステージ(motion in depth stage)から成り立つ。このモデルにおいてフィルターという用語を使用した理由は、情報を受けとる段階(stage)というよりは、帯域通過フィルターのように情報を通過させるという意味を持たせるためであるとしている。方向選択性運動フィルターは、一定方向の運動にのみ活性化し、その反対方向には抑制をかける。このフィルターは、Levingston and Sekular (1975), Nakayama and Tyler (1981), Strommeyer, Kronauer and Madsen (1984)らによる方向選択性ニューロンや反対運動機構(opponent-movement mechanism)等の研究を基礎としている。

大きさ変化フィルターは、反対方向の複数の方向選択性フィルターから入力を受け、対象の相対運動信号を出力する。そこから出力される信号の内、一部は大きさ変化信号(changing size signal)として出力され、一部は奥行き運動ステージ(motion-in-depth stage)に出力される。奥行き運動ステージでは、対象の相対運動を奥行き運動信号として出力する。この、奥行き運動ステージの存在は、Regan and Beverley (1978a)の実験で明らかにされている。また、生理学的にも猫の18野(Regan & Cynader, 1979; Spileers, Orban, Gulyas & Maes, 1990)や猿のMST(Saito, Yukiie, Tanaka, Hikosaka, Fukuda & Iwai, 1986; Tanaka, Fukuda, & Saito, 1989; Tanaka & Saito, 1989)にこれらの奥行き運動に関わるとされる拡大運動に反応するニューロンが発見されている。

対象が観察者に接近するとき、奥行き運動ステージでは、左右のエッジの離反速度と上下のエッジの離反速度が式(1)を満たすとき最も奥行き運動を検出することができるとされている(fig. 6)。

$$\frac{|V_{lv} - V_{rv}|}{|V_{uh} - V_{lh}|} = \frac{D_h}{D_v} \dots\dots\dots (1)$$

V_{lv} 、 V_{rv} は、それぞれ、左右のエッジの速度であり、 V_{uh} 、 V_{lh} はそれぞれ上下のエッジの速度である。そして、 D_h 、 D_v は、それぞれ水平、垂直方向の距離を示す。つまり、左右エッジの離反速度と上下エッジの離反速度の比が接近対象の幅と高さの比に等しい時、網膜像の大きさ変化を検出する機構は奥行き運動を最も検出することができるとされている

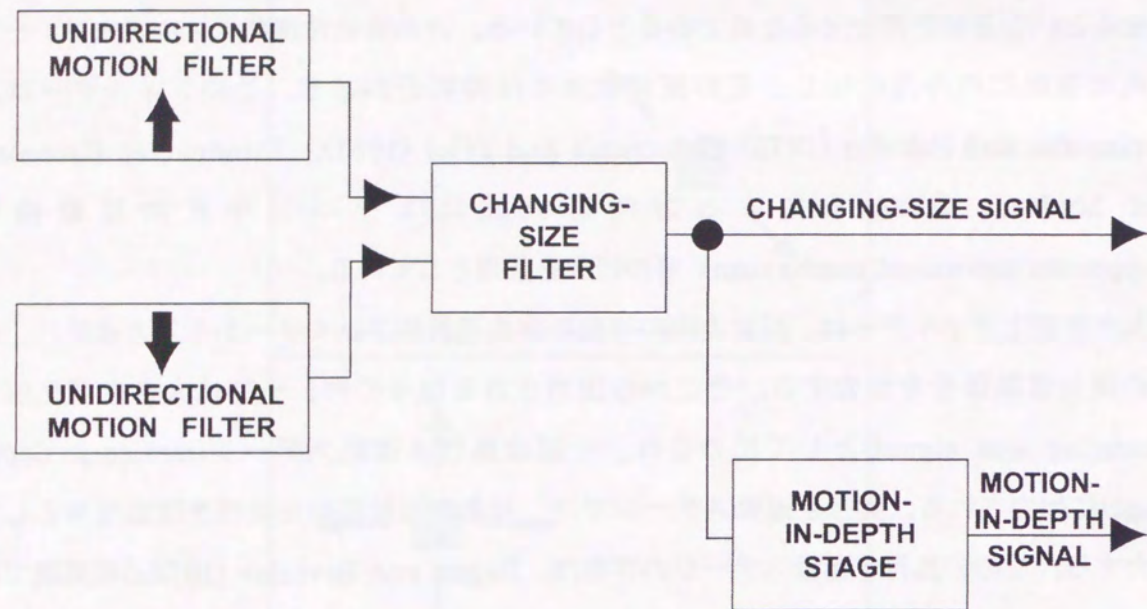


fig. 5 Regan & Beverly (1979)による網膜像の拡大による奥行き知覚のモデル

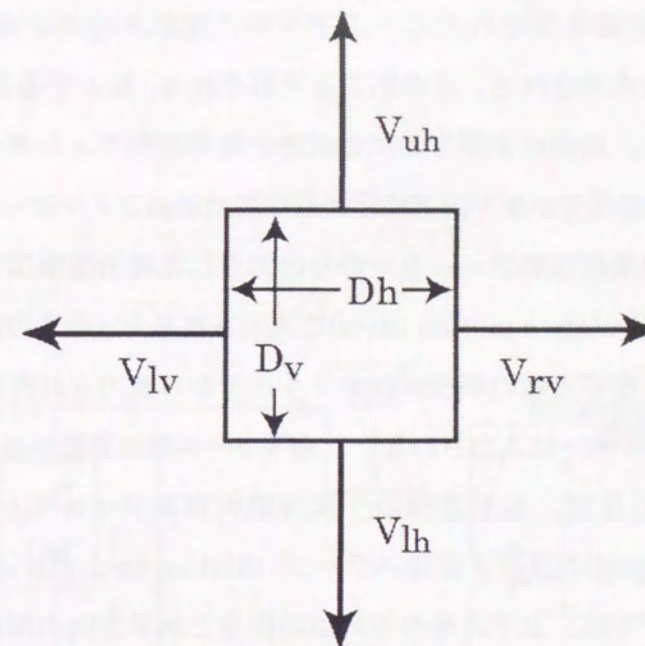


fig. 6 奥行き運動ステージにおける垂直方向と水平方向の相対運動の比較過程

(Beverley & Regan, 1980)。

その後、Regan and Hamstra (1993)は、以前の Beverley and Regan (1979a) のモデルを改良したモデルを提案した(fig. 7)。対象が観察者に接近すると、まず上部のエッジと下部のエッジの運動信号がそれぞれ、上下方向に選択的な局所運動フィルター (local motion filter) から出力される。その出力をそれぞれ a、b とすると、a、b は局所的な網膜像速度に比例する。同様に水平方向に選択的な局所運動フィルターにより左エッジの速度と右のエッジの運動信号が水平方向に選択的な局所運動フィルターから出力される。

そして、上下方向の局所運動フィルターから出力された局所運動信号が上下方向の一次元相対運動フィルター(relative motion filter)に入力されると、上下方向の相対運動が検出される。同じように、水平方向の局所運動フィルターから出力された運動信号が水平方向の一次元相対運動フィルターに入力されると、水平方向の相対運動が検出される。

その後、上下方向及び、水平方向の一次元相対運動フィルターからの相対運動信号(relative motion signal)が奥行き運動ステージ (Motion-in-depth stage) に入力される。奥行き運動ステージでは、上下方向の相対運動信号と水平方向の相対運動信号を比較し、両者が式(1)を満たすとき、最も大きく奥行き運動信号が出力される。

また、Regan and Hamstra (1993)のモデルを基礎にして、さらに、表面テクスチャーの要素を考慮したモデル(Gray & Regan, 1999)や両眼視差の変化率を考慮したモデル(Gray & Regan, 2000)などが提案されている。

1-4-2 速度を検出する機構

Regan らのモデルでは奥行き方向の運動検出までモデル化されているが、それ以外の運動速度や移動距離に処理については不明である。そこで以下では、接近対象の速度の知覚に関する先行研究を概観することにする。

一般的に速度は距離を時間で除した値である。しかし、人は主観的距離と主観的時間から速度を知覚するような機構を持つのではなく、色や明るさと同様に速度自体を直接知覚する機構を備えている(佐藤, 1999)。佐藤(1999)は、人が直接、運動を知覚する証拠として滝の錯視や運動知覚だけに障害を持つ脳損傷患者の例を挙げた。滝の錯視とは、長時間、滝の流れを眺め続けた後に運動を含まない静止した風景を観察すると滝の下方への運動とは逆に、静止風景が上方に運動して観察されるという運動残効現象の一種である。この時、静止風景全体は上方に運動して見えるが、風景中の個々の対象に注目するとその位置は変化しないことから、運動と位置の知覚は分離しているとした。

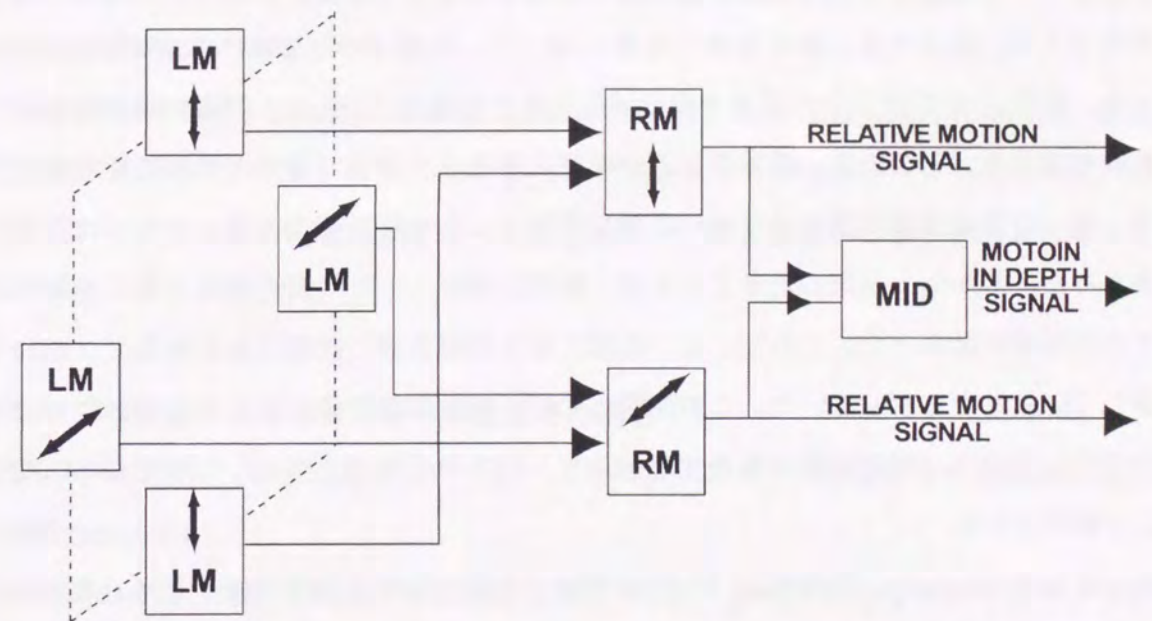


fig. 7 Regan and Hamstra (1993) による網膜像の拡大による奥行き知覚のモデル。

LM = local motion filter, RM = relative motion filter, MID = motion-in-depth stage

速度を知覚する脳内機構は、大細胞系（M 経路）が受け持つとされている（杉江, 1994; Zeki, 1993）。大細胞系は、網膜の M 型神経節細胞から、外側膝状体の M 層、V1 の 4B 層、V2 の thick stripe を中継し、MT に到達する経路である。MT の細胞の特徴は、刺激パターンの方位や形に選択をもたず、運動方向と運動速度に選択性をもつことである（平井, 1995）。このように、速度を知覚する脳内機構は、大細胞系から信号を受ける MT が受け持っているといわれている。

しかし、上記の速度知覚は対象が前額面と平行に移動する場合の速度を知覚する場合について述べたものである。では、3 次元的な奥行き運動の速度は、どのように抽出されるのであろうか。接近対象の接近速度の知覚について、相場(1977, 1991)は、実験的検討を行った。相場(1977)は二つの等速で接近する対象を観察者に提示し、両者の相対的な速さの判断を求めた。その結果、被験者は近い距離に存在する対象が速いとする判断が現れる場合、接近対象が基準の対象より近い距離に存在し、かつ接近速度の速いときには正答率が高かった。しかし、基準の対象よりも遠い距離に存在し、かつ接近速度の遅い対象に対しては正答率が低かった。これは、近い距離にある対象を遠い距離にある対象より速いと判断していたことを示していた。この原因として、被験者は対象の拡大率を手掛かりに課題を遂行しており、接近対象の接近速度として、拡大率を接近速度として知覚していたと解釈された。

Regan and Hamstra (1993)は、McKee (1981)の単一刺激提示法に従ってディスプレイ上に等速で接近する正方形を提示し、被験者に提示された接近する正方形の速度が「平均速度よりも速い」、もしくは「平均速度よりも遅い」のいずれかの判断を求めた。正方形には 8 種類の衝突時間と 8 種類の拡大率を組み合わせた結果、64 種類の接近パターンが存在した。そして、そのフィードバックが音声で被験者に伝えられた。

その結果、拡大率の増加とともに、被験者の平均速度よりも速いとする判断の割合が増加した。さらに、拡大率の変化と初期の拡大率が対応していたので、初期の拡大率が小さい正方形ほど平均速度よりも遅く、初期の拡大率が大きい正方形ほど平均速度よりも速いということが示唆された。この結果から、Regan and Hamstra (1993)は、人の視覚システムには拡大率を符号化する機構が備わっており、対象の接近速度はこの拡大率を直接符号化するシステムにより接近対象の速度を知覚していると主張した。

Bex and Makous (1997)、山崎・松田 (2000) は、縞模様の刺激を使用して、被験者に拡大・縮小運動の速度と一方向の運動を比較させた。その結果、拡大縮小運動と一方向の運動の主観的速度を比較したところ、拡大縮小パターンの主観的速度の過大視が見られた。

この結果の原因を Bex and Makous (1997)は以下のように説明した。拡大縮小運動を観察すると見かけ上奥行き運動として観察されるために、fig. 8 のように拡大縮小運動条件で提示された刺激は、垂直方向の運動(A)ではなく斜線方向の運動(B)として知覚される。その結果、網膜上に投影される実際の移動距離よりも単位時間あたりの移動距離が長く知覚されるために、主観的速度が過大視された。つまり、一方向のオプティック・フローの速度を判断する場合、被験者は、網膜上の光点の二次元的な移動速度でその速度を判断するが、拡大・縮小運動のオプティック・フローの速度を判断する場合、単純に網膜上の拡大縮小運動の二次元速度を判断するのではなく拡大縮小運動を奥行き運動として知覚した上で速度を判断しているのである。

Tanaka and Saito (1989)、Orban, Lagae, Raiguel, Xiao and Maes (1995)は、接近速度を抽出する脳内の機構として、MST がその役割を担っているとした。これらの先行研究の結果から、接近対象の接近速度も一次元の運動と同様に直接抽出されていると考えられている。

1-4-3 二段階説による接近対象の移動距離の説明

接近対象の検出、速度知覚について述べてきたが、ここでは接近対象の移動距離の知覚へ議論を進める。

接近運動を行う対象の奥行き移動距離を知覚する際、利用される手がかりとして大きさ距離不変仮説 (SDIH; size-distance invariance hypothesis) が先行研究 (Swanston & Gogel, 1986; Gogel & Eby, 1997; Gogel, 1998) において検討されてきた。SDIH は、静止対象の大きさの恒常性に関連した仮説であり、以下のような現象から考えられてきた。fig. 9 のように距離 (D_1 , D_2 , D_3) を様々に変化させ、それに対応して同じ視角 (θ) を持つ対象 S_1 , S_2 , S_3 を提示する。人が視角だけを頼りに大きさを判断しているのであれば、 S_1 , S_2 , S_3 はすべて同じ大きさとして知覚される。しかし、現実には、 S_1 , S_2 , S_3 の順で大きく知覚される。これは、被験者が知覚していたのは客観的な距離ではなく主観的な距離であるとした (松田, 1995)。SDIH は、対象の主観的距離と主観的サイズの比が一定であるという関係から、対象のサイズや観察者との距離を知覚しているという説である。

Swanston and Gogel (1986)は、対象の主観的サイズと主観的距離、物理的サイズと物理的距離の関係を式で表した。

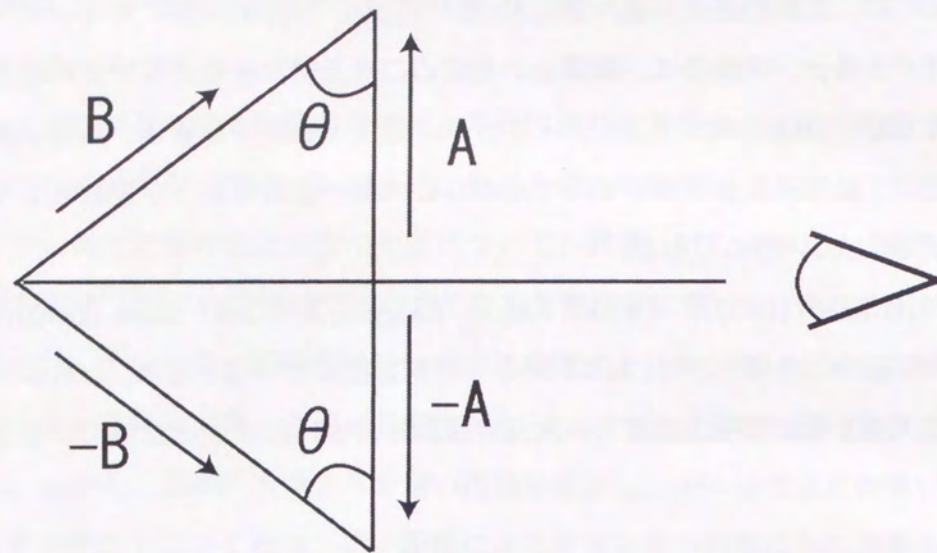


fig. 8 対象の網膜像の拡大速度の不一致の説明 (Bex & Makous, 1997)

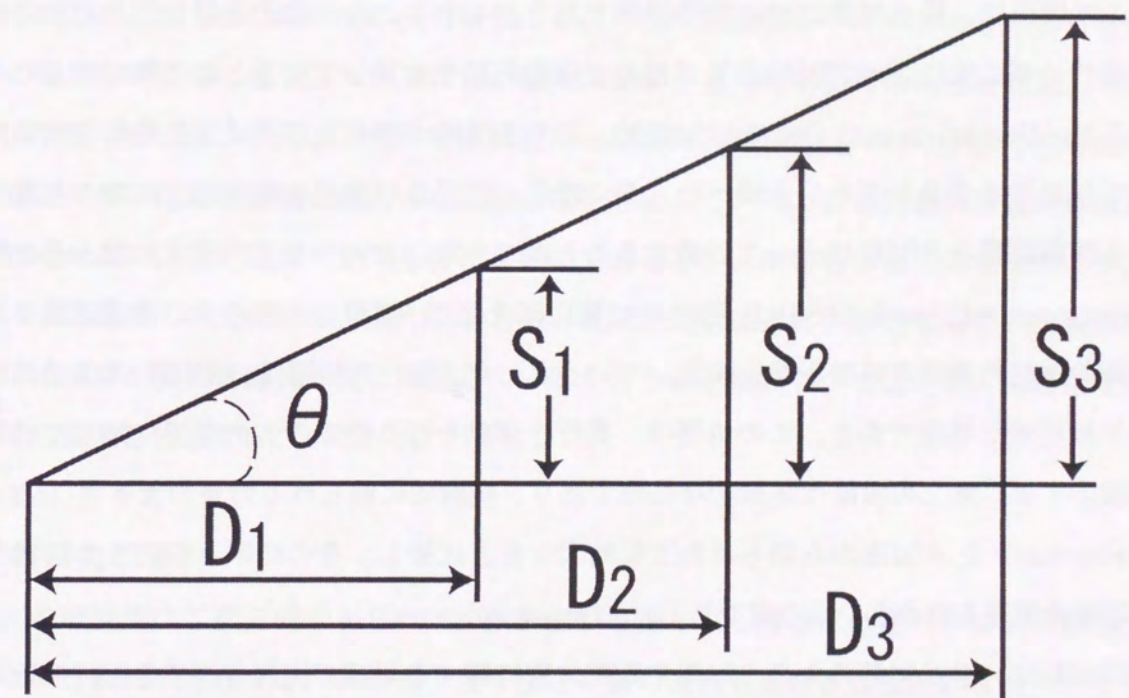


fig. 9 SDIHの知覚 D_1, D_2, D_3 と距離が増加するのに対応して、主観的サイズも S_1, S_2, S_3 と増加する

$$\frac{S'}{D'} = \frac{S}{D} = \tan \theta \dots\dots\dots (2)$$

(S' 主観的サイズ、D' 主観的距離、S 物理的サイズ、D 物理的距離)

(SがDに比べて小さいと、S/Dはラジアンにほぼ等しい) (Swanston & Gogel, 1986)

この関係は、静止対象についての関係である。しかし、人は接近運動を行う対象の接近前後サイズに比にこの SDIH を当てはめて移動距離を知覚しているという説が考えられた。そこで、Swanston and Gogel (1986)は、この SDIH が接近及び後退運動を行う対象についても当てはまるかどうかを調べた。その結果、接近及び後退運動を行う対象の主観的奥行き移動距離を SDIH によって予測することはできないということが示された。そこで、Swanston and Gogel (1986)は、二つの処理段階を経て、観察者は接近及び後退運動を行う対象の主観的奥行き移動距離を知覚しているとした。第一の段階は、SDIH による処理であり知覚的な処理である。この処理は、奥行き運動を行う対象の入力情報に対して感覚的に反応する。第二の段階は認知的な処理であり、経験的に得られる対象の大きさ (off size perception) と SDIH から得られた主観的大きさと比較し、その比率と SDIH から得られた距離の乗算を行うという処理である (off sized judgement)。

SDIH は、静止対象の大きさ知覚や距離知覚に関する研究で検討されてきた。接近対象の移動距離知覚において SDIH の処理を想定する場合、接近開始時と終了時のサイズ比を元にして移動距離を算出することになる。第二の段階である認知的処理で要求される情報は、知覚的処理で算出された値と人が内的に持っている対象の大きさとの比較である。そのため、二段階説による接近対象の移動距離知覚の説明は、接近開始時と終了時における対象のサイズを知覚していればよいことになる。このように、二段階説の説明では、接近対象の移動距離知覚の処理は接近開始時と終了時における対象の静止網膜像の比較であるということができる。

1-4-4 接近対象の移動距離の処理に関する問題点

ここまで、接近運動を行う対象の処理に関する先行研究として接近運動の検出、接近速度、移動距離についての研究を概観してきた。Beverley and Regan(1979a)や Regan and Hamstra(1993)の接近運動の検出モデル、また、相場(1975, 1977, 1991)や Regan and Hamstra(1993)らによる接近速度の研究では、接近運動や接近速度を検出する検出器を想

定し、接近運動を直接知覚するという立場から研究を行っている。

一方、Swanston & Gogel(1986)の二段階説による接近対象の移動距離の研究では、接近開始位置における網膜像と接近終了時の対象の位置におけるそれぞれの網膜像との比較と、対象の認知的大きさととの比較という対象の運動情報を利用しない (少なくとも運動検出器からの出力信号を利用しない) 考え方に立脚している。

このように接近対象の検出、速度知覚に関する先行研究では運動検出器からの信号を利用しているのに対し、距離知覚の先行研究では、対象の網膜像のサイズと対象の奥行き位置との幾何学的関係に注目しているため、運動検出器からの運動信号の利用を想定していない。物理学的には、距離、速度、時間は密接な関係にあるにもかかわらず、心理学的には、接近対象の距離と速度は異なった処理機構を想定している。接近対象の主観的移動距離に接近対象の主観的速度が効果を持たないのであろうか。本研究の第二の目的は、接近対象の移動距離の知覚に際し、SDIH を援用した二段階説以外に、接近運動という運動に起因する要素が移動距離の知覚に関連しているかどうかを検討し、接近対象の移動距離を決定する要因を特定することである。

1-5 本研究の目的

我々の網膜像は二次元的であるため、網膜像から得られる情報には奥行き情報が削除されるという制約が存在する。本研究で扱う接近対象の運動も奥行き運動という奥行き情報を含んだ運動であるため、その網膜像から得られる情報には奥行き情報が削除されている。しかし、対象が観察者に接近する際の網膜像の変化から、その対象が奥行き運動しているかどうかを判断することが不可能であるにもかかわらず、我々はその網膜像変化から奥行き運動を知覚している (Beverley & Regan 1979a; Beverley & Regan 1980; Regan & Beverley, 1978a, b)。さらに、我々は普段、利用している両眼視差や両眼視差の変化率、眼球運動から得られる情報が入力されていない状態であっても、網膜像の拡大情報から奥行き運動を知覚することが可能である。

では、接近対象の奥行き移動距離の知覚はどのような特性を持っているのだろうか。理論的には、物理学的に算出される値を知覚することが不可能であるにもかかわらず、現象的には物理学的に算出される値と同じものを知覚しているのか、もしくは、物理学的移動距離とはかけ離れた観察者独自の移動距離を知覚しているか不明である。前述の通り、本研究の第一の目的は、観察者が視線を接近する対象の移動距離を知覚するとき、物理学的に算出される接近対象の移動距離を性格に知覚することが可能なかどうかを検討する

ことであるが、加えて、観察者の接近対象の移動距離が物理学的に算出される移動距離と異なるのであれば、観察者はどのような移動距離を知覚するのかについても検討する。

また、接近対象を観察者が知覚する際には、接近開始時の網膜像のサイズと接近終了時の網膜像のサイズの比率や、接近対象の網膜像のサイズの時間的微分、接近対象の観察者までの衝突時間など、様々な変数が想定される。さらに、これら接近対象運動から得られる情報以外に、接近対象のサイズと距離に注目し、静止対象における SDIH を援用した二段階説のように拡大開始時の大きさと拡大終了時の大きさの比較という幾何学的な計算から求められる情報も考えられる。

これら、対象の接近に伴う様々な網膜像の情報のうち、被験者はどの情報（もしくは複数の情報）を利用して接近対象の移動距離を知覚しているのか、また、人の視覚情報処理系のどのような経路を経て接近対象の移動距離が知覚されているのか不明である。本研究の第二の目的は、接近対象の主観的移動距離を決定する網膜像の情報を特定することである。さらに、本研究で行う実験から、接近対象の網膜像の変化情報が視覚の情報処理系のいかなる経路を経て処理されているのかについて明らかにし、接近対象の主観的移動距離の処理モデルを提案する。

まず、2章では、主に第一の目的である接近対象の主観的移動距離と物理学的に算出される値との比較を行う。次に、3章では、第二の目的である接近対象の移動距離を知覚するメカニズムを検討する。さらに、4章では、接近対象の運動から得られる情報と接近前後の網膜像から得られる幾何学的情報との関係について検討する。そして、これらの一連の実験から示唆される接近運動の移動距離の知覚に関する処理モデルを提案し、検討してゆくことにする。

2 章

接近対象の主観的移動距離と物理的移動距離

2-1 実験 1

目的：

実験 1 は、対象が観察者に向かって接近する際に発生する対象の網膜像の拡大から予想される理論的移動距離と、主観的には対象が空間内をどの程度移動したのかという主観的移動距離を比較し、それらの値が異なるかどうかについて検証した。

被験者：正常視力を持つ成人男性 2 人、女性 3 人 (22 才～40 才: 平均年齢 26.4 才)

装置：

刺激はパーソナルコンピューター(Epson 社製 Endeavor Pro 500-L)で作成し、CRT 21inch ディスプレイ (NANA O 社製 FlexScan T960, 垂直周波数 60Hz, 解像度 1600 × 1200) で提示した。なお、刺激は 19.8 cm × 14.8 cm の黒いウィンドウ内に提示した。

刺激：

本実験では、式(3)¹に従って等速で接近するようにシミュレートした 2 つの正方形を継続的に提示した。

$$\tan \theta_t = \frac{\tan \theta_0}{1 - \frac{t}{T_0}} \dots \dots \dots (3)$$

(対象の網膜像のサイズ： θ_t 、対象の接近開始時の網膜像のサイズ： θ_0 、対象と観察者の衝突時間： T_0 、時間： t) (Regan & Hamstara, 1993)

式(3)に示されるように、網膜像のサイズは時間経過と反比例の関係にある (fig. 10)。そして、式(3)には、時間と網膜像のサイズしか含まれておらず、距離に関する変数は含まれていない。つまり、式(3)では、対象の観察者からの距離の変化ではなく、時間の経過と共に変化する網膜像のサイズを記述している。2 次元平面であるディスプレイ上で、対象の接近という 3 次元運動をシミュレートする場合、接近開始時の対象と観察者の距離を一

¹ APPENDIX 参照

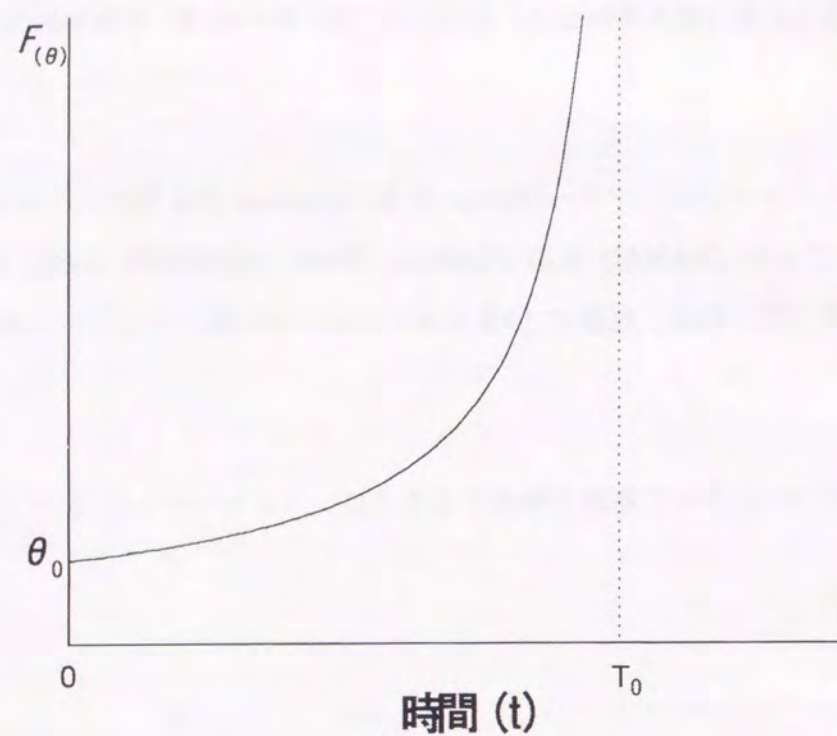


fig. 10 式(3)に従って拡大する接近対象のサイズ変化

意に決定することができないため、式(3)のように 距離情報を含まない関数が有効である。式(3)に従って拡大する2つの正方形は、以下のように提示された。

被験者がキーを押すと、ウィンドウの上から9.9cm、左から7.4cmの位置に中心がくるように第一の白い正方形(FAS)が出現した(fig. 11, 12)。正方形は、その場で0.3sec静止した後、2.0sec間、接近した。その後、0.3sec間静止した後、正方形は消失し、1.0sec間、ウィンドウ内に、何も映されていない状態が続いた。そして、第2の白い正方形(SAS)がFASと同じ位置に出現し、FASと同様に0.3sec静止した後、2.0sec接近し、0.3sec間静止した後、消失した。そして、1.0sec間のブランク画面が表示された後に被験者が課題を行った。FASには、拡大開始時のサイズ²が一辺0.2°、0.3°、0.4°である3種類の正方形が用いられた。3種類のFASは、 $T_0 = 3.0\text{sec}$ で式(3)に従って2.0sec拡大し、それぞれ一辺0.6°、0.9°、1.2°の正方形になった。SASもFASと同じく、拡大開始時のサイズが一辺0.2°、0.3°、0.4°である3種類の正方形が用いられた。3種類のSASは、 $T_0 = 3.0\text{sec}$ で式(3)に従って2.0sec拡大した。その結果、SASの終了サイズは、それぞれ0.6°、0.9°、1.2°になった。FASとSASは同じサイズの正方形であることも異なるサイズの正方形であることもあった。FASとSASのそれぞれの条件を組み合わせた結果、合計9種類の刺激が作られた(table 1,2)。

手続き：

被験者の課題は、FASの移動距離を100としたときのSASの移動距離を評価することであった。被験者は、刺激提示終了後にウィンドウ内に現れる数値記入欄に評価した値をキーボードの10キーで入力した。1ブロックに9種の刺激がランダム順に提示され、これを10ブロック繰り返した。その結果、被験者は90試行に反応した。なお、休憩は試行間で任意に取るよう教示された。被験者は、チンレストで頭を固定されながら、ディスプレイから200cm離れた位置で刺激を単眼で観察した。

結果と考察：

接近対象の主観的移動距離と物理学的移動距離

FASの初期サイズに関して3つのグループに分割し、それぞれのグループ内で分析を行った(fig. 13)。各グループについて、SASの初期サイズが0.2°、0.3°、0.4°である時

² 今後、断りのない限り、サイズと記すときは正方形の一辺の長さを示す。

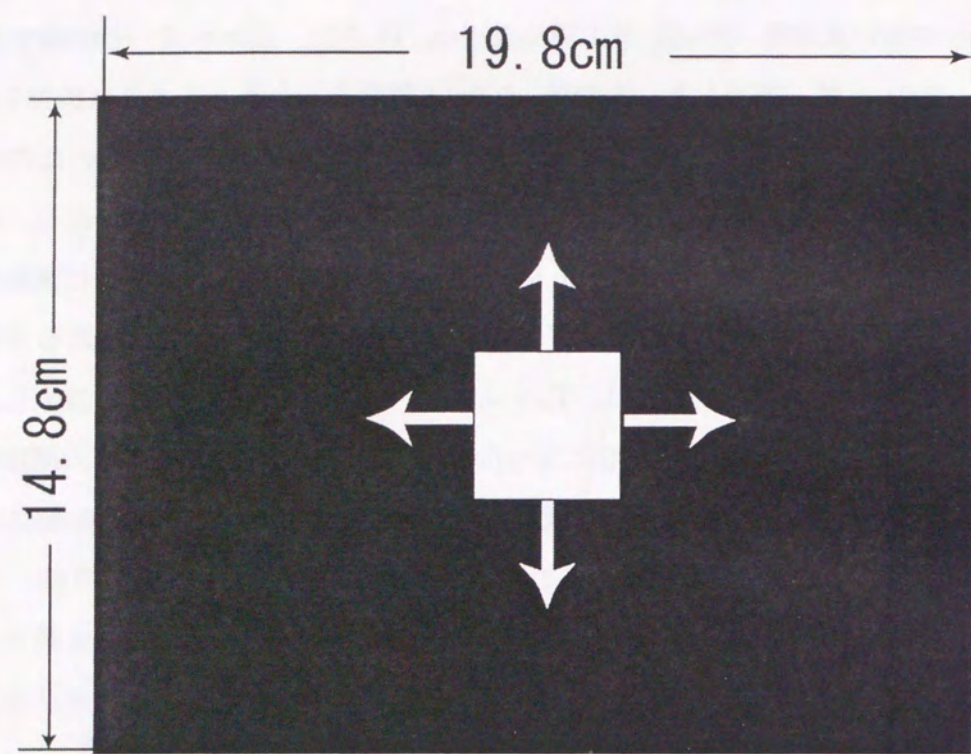


fig. 11 実験1の刺激例

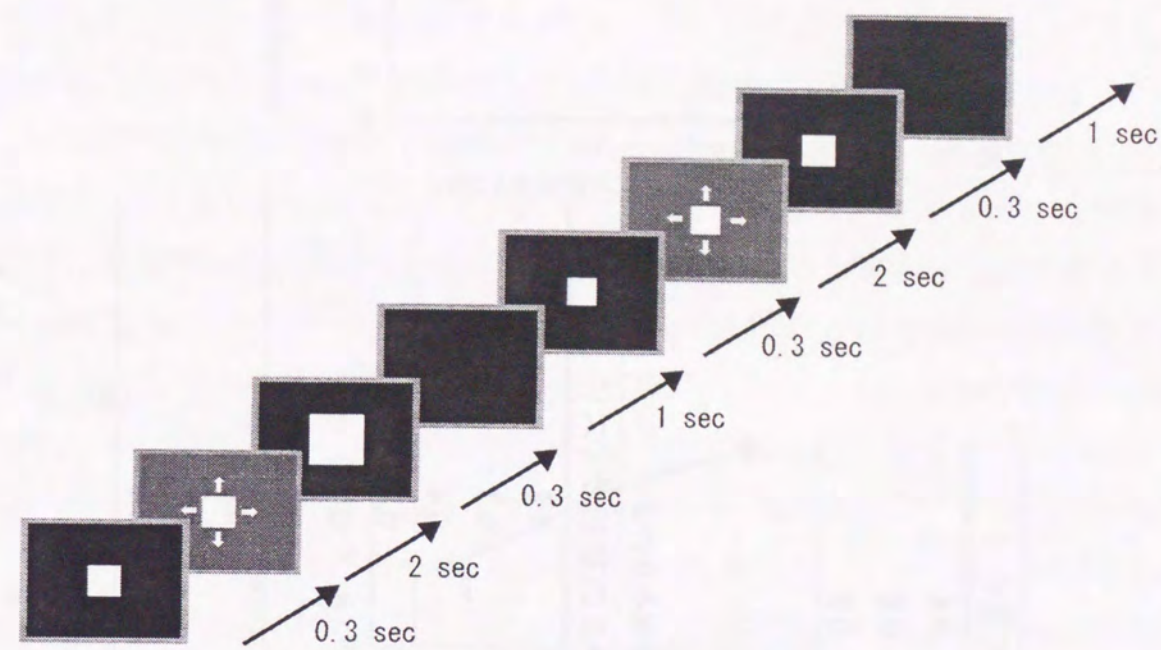


fig. 12 実験1の刺激シーケンス

table 1 実験1で使用したFASとSASの属性

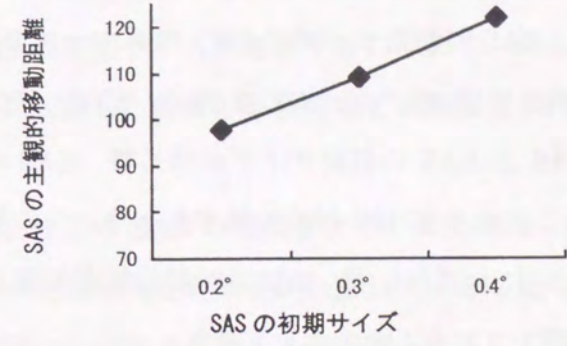
初期サイズ(°)	終了サイズ(°)	拡大量(°)
0.2	0.6	0.4
0.3	0.9	0.6
0.4	1.2	0.8

* いずれも、提示時間は3.0sec、衝突時間は2.0secであった。

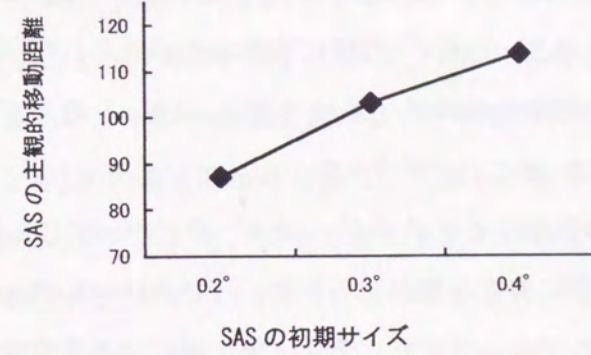
table 2 実験1で使用したFASとSASの組み合わせ

FASの初期サイズ(°)	SASの初期サイズ(°)
0.2	0.2
0.2	0.3
0.2	0.4
0.3	0.2
0.3	0.3
0.3	0.4
0.4	0.2
0.4	0.3
0.4	0.4

(A)



(B)



(C)

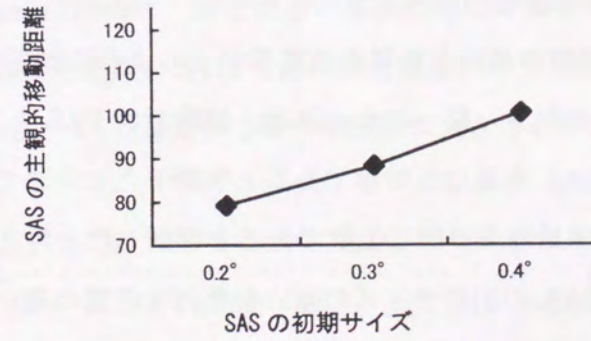


fig. 13 実験1で得られたSASの主観的移動距離。(A)(B)(C)は、それぞれFASの初期サイズが0.2°, 0.3°, 0.4°の時のSASの主観的移動距離を示す

のそれぞれの評価値の平均値を求めたところ、FAS の初期サイズが 0.2° のグループでは 97.9、109.2、122.0 であり、FAS の初期サイズが 0.3° のグループでは 87.3、103.2、113.8 となり、FAS の初期サイズが 0.4° のグループでは 79.2、88.3、100.6 であった。FAS の初期サイズに関わらず、FAS と SAS の初期サイズが同じ時、SAS の主観的移動距離³は、FAS と SAS が同じであることを示す 100 付近の値であった。この結果は、理論的には一意に決定することができないにも関わらず、被験者が同じ軌道を通る接近対象の移動距離を同一の移動距離として知覚していることを示していた。

FAS の初期サイズが 0.2° のグループにおける、SAS の主観的移動距離に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、SAS の初期サイズの間には有意な差が見られた ($F(2,98)=32.93, p<.01$)。テューキー法による下位検定の結果、SAS の初期サイズが 0.2° と 0.3°、0.2° と 0.4°、0.3° と 0.4° の間に有意な差が見られた(いずれも、 $p<.01$)。これらの結果から、SAS の初期サイズが 0.2°、0.3°、0.4° と増加するにつれて、SAS の主観的移動距離が増加していることが示された。

同様の結果が、FAS の初期サイズが 0.3°、0.4° のグループにも見られた。すなわち、両グループとも、SAS の間に有意な差が見られた。 ($F(2,98)=43.43, p<.01$; $F(2,98)=35.24, p<.01$)。さらに、いずれのグループでも、テューキー法による下位検定の結果、SAS の初期サイズが 0.2° と 0.3°、0.2° と 0.4°、0.3° と 0.4° の間に有意な差が見られた(いずれも、 $p<.01$)。これらの結果も、SAS の初期サイズが、増加するにつれて、SAS の主観的移動距離が増加していることを示していた。

FAS と SAS の接近開始時の奥行き位置を被験者がどのように知覚したのかについては、次の 2 つのケースが考えられる。第一のケースは、被験者が FAS と SAS の初期サイズが異なるために、FAS と SAS を異なる対象であると判断したケースである。この時、被験者は FAS と SAS の接近開始地点が同じ位置であると判断したと考えられる。第 2 のケースは、被験者が FAS と SAS の初期サイズの違いを奥行き位置の違いと判断した場合である。この場合、被験者は、初期サイズが小さい正方形を初期サイズが大きい正方形よりも奥に存在すると判断したと考えられる。このように、2 つのケースが考えられるため、それぞれのケースに分けて統計的検定により得られた主観的移動距離の差について考察する。

第一のケースでは、同一 FAS グループ内の全ての SAS は、提示時間、移動速度が等しい。ゆえに、被験者が理論値と同じ移動距離を知覚できるのであれば、同一 FAS グループ

³ 被験者の反応は、FAS 移動距離に対する SAS の主観的相対移動距離であるが、今後断りの

内の SAS の初期サイズが変化しても被験者は同じ移動距離であると判断することが予想される。しかし、SAS の初期サイズが増加するにつれて、SAS の主観的移動距離が増加した。これは、被験者の知覚した対象の移動距離と理論値とは同一の移動距離ではないことを示している。

第 2 のケースでは、全ての SAS の観察者までの衝突時間 (式(3)中の T_0) が等しいことと初期サイズが小さい正方形ほど観察者から離れていることから、初期サイズが小さい正方形ほど接近速度は速いと判断されることが予想される。これは、接近開始時の初期サイズが小さい SAS ほど観察者から離れていて、接近速度が速いことを意味していた。もし、被験者が理論値と同じ値を知覚できるのであれば、提示時間はどの SAS でも同一であるため、同一 FAS グループ内の SAS の初期サイズが小さくなるに従って被験者は SAS の移動距離を長いと判断することが予想される。しかし、実際には予想とは逆に、SAS の初期サイズが大きくなるに従って、SAS の移動距離が長いと判断された。

このように、FAS と SAS の接近開始時の奥行き位置を被験者がどのように知覚したのかについて分類した 2 つのケースとも、接近対象の主観的移動距離が理論的に算出される値と一致しないことが示された。

SAS の移動距離の決定要因

次に、二段階説から予想される値と本実験の結果が一致するか否かを検討する。Swanston and Gogel (1986)は、接近対象の主観的移動距離を予測する式として式(4)を提案した。 D_c は対象の接近距離、 D'_f は対象の接近開始時の主観的奥行き距離、 θ_f は接近開始時の網膜像の大きさ、 θ_n は接近終了時の網膜像の大きさを示す。

$$D_c = D'_f \times \frac{(\theta_n - \theta_f)}{\theta_n} \dots \dots \dots (4)$$

本実験の初期サイズが 0.2° の SAS の移動距離 ($D_{c(0.2)}$) を(4)から求めると、式(5)(6)が導かれる。

ない限り SAS の主観的移動距離と記す。

$$D_{c(0.2)} = D'_{f(0.2)} \times \frac{0.6-0.2}{0.6} \dots\dots\dots (5)$$

$$D_{c(0.2)} = \frac{2}{3} D'_{f(0.2)} \dots\dots\dots (6)$$

本実験の初期サイズが 0.4° の SAS の移動距離 ($D_{c(0.2)}$) を(4)から求めると、式(7)(8)が導かれる。

$$D_{c(0.4)} = D'_{f(0.4)} \times \frac{1.2-0.4}{1.2} \dots\dots\dots (7)$$

$$D_{c(0.4)} = \frac{2}{3} D'_{f(0.4)} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、0.2° の SAS と 0.4° の SAS が同一の対象であると被験者が知覚した場合、両方の SAS の奥行き位置が等しいため、

$$D'_{f(0.2)} = D'_{f(0.4)} \dots\dots\dots (9)$$

(6)(8)(9)から

$$D_{c(0.2)} = D_{c(0.4)} \dots\dots\dots (10)$$

となる。

また、0.2° の SAS と 0.4° の SAS が異なる対象であると被験者が知覚し、対象の大きさに比例して、0.2° の SAS が 0.4° の SAS よりも遠方に配置されているとすると

$$D'_{f(0.2)} = \frac{2}{3} D'_{f(0.4)} \dots\dots\dots (11)$$

(6)(8)(11)から

$$D_{c(0.2)} = \frac{2}{3} D_{c(0.4)} \dots\dots\dots (12)$$

となる。

被験者が二段階説に従って実験 1 の課題を行うと仮定すると、式(10)、式(12)から、初期サイズが 0.2° の SAS の移動距離は初期サイズが 0.4° の SAS の移動距離と等しい、もしくは長いと被験者が判断すると予想される。しかし、実験 1 の結果は、式(10)、式(12)から予想される値とは一致せず、初期サイズが 0.2° の SAS の主観的移動距離は初期サイズが 0.4° の SAS の主観的移動距離よりも短いという結果が得られた。この結果は、Swanston and Gogel(1986)が提案した二段階説に従って、被験者が接近対象の移動距離を知覚していなかったことを示している。

また、すべての SAS の衝突時間や提示時間は同一であったので、時間に関わる要因が SAS の主観的移動距離を決定していたとは考えられない。では、対象の接近運動による主観的移動距離を規定する要因はなにか。すべての FAS に対し、SAS の初期サイズが増加するにつれて主観的移動距離が増加していることから (fig. 13)、一つの要因として初期サイズが考えられる。しかし、SAS の拡大終了時のサイズと拡大開始時のサイズの差である拡大量も、SAS の初期サイズの増加につれて増加しているため拡大量も主観的移動距離を決定している可能性がある。この接近対象の主観的距離の決定要因の問題については、3章で検討する。

2-2 実験 2

目的 :

Beverly and Regan(1979b) は接近対象のサイズが 1.5° を超過すると奥行き運動の検出閾が急激に上昇すると報告した。そこで、実験 1 では拡大後の正方形の最大サイズを 1.2° に設定した。実験 2 では、この奥行き運動検出閾が急激に上昇するとされる 1.5° を超えたサイズの接近対象を提示した場合、観察者が実験 1 と同様に奥行き運動を知覚することが可能か、また、実験 1 とは異なった奥行き移動距離を知覚するかどうかを検討した。具体的には、FAS または SAS の終了サイズが 1.5° を超過する条件と超過しない条件を設け、両者の間に差が認められるかどうかを検討した。

被験者 : 正常視力を持つ成人男性 2 人、女性 3 人 (22 才~40 才: 平均年齢 26.4 才) 実験 2 に 3 加した被験者は、すべて実験 1 と同じ被験者であった。

装置：実験1と同じであった。

刺激：

FAS と SAS の2つの接近する正方形が断続的に提示された。刺激の提示位置、シーケンス、提示時間は実験1と同じであった(fig. 12)。そして、実験1と同様、全てのFASとSASは、等速で接近するように、式(3)に従って拡大した。FASには、拡大開始時のサイズが一辺0.4°、0.6°、0.8°である3種類の正方形が用いられた。3種類のFASは、 $T_0 = 3.0\text{sec}$ で式(3)に従って2.0sec拡大した結果、それぞれの正方形の終了サイズは1.2°、1.8°、2.4°になった。SASもFASと同じく、拡大開始時のサイズが一辺0.4°、0.6°、0.8°である3種類の正方形が用いられた。3種類のSASは、 $T_0 = 3.0\text{sec}$ で式(3)に従って2.0sec拡大した。その結果、それぞれの正方形の終了サイズは1.2°、1.8°、2.4°になった。実験1と同様、FASとSASは同じサイズの正方形であることも異なるサイズの正方形であることもあった。FASとSASのそれぞれの条件を組み合わせた結果、合計9種類の刺激が作られた(table 3, 4)。

手続き：

観察距離が100cmであった点を除いて、実験1と同じであった。被験者の課題は、FASの移動距離を100としたときのSASの移動距離を評価することであった。

結果と考察：

実験1と同じようにFASの初期サイズに関して3つのグループに分割し、それぞれのグループ内で分析を行った。SASの初期サイズが0.4°、0.6°、0.8°である時のそれぞれの被験者の評価の平均値を求めたところ、FASの初期サイズが0.4°のグループでは97.7、108.1、112.5でありFASの初期サイズが0.6°のグループでは、90.6、100.6、109.2でありFASの初期サイズが0.8°のグループでは86.7、95.9、98.7であった(fig. 14)。

FASの初期サイズが0.4°のグループにおける、SASの主観的移動距離に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、SASの間に有意な差が見られた($F(2,98)=19.97, p<.01$)。テューキー法による下位検定の結果、SASの初期サイズが0.4°と0.6°、0.4°と0.8°の間に有意な差が見られた(いずれも、 $p<.01$)。これらの結果とSASの初期サイズが0.4°、0.6°、0.8°の主観的移動距離の平均値から、SASの初期サイズが0.4°、0.6°、0.8°と増加するにつれて、SASの主観的移動距離が増加していることが示された。

table 3 実験2で使用したFASとSASの属性

初期サイズ(°)	終了サイズ(°)	拡大量(°)
0.4	1.2	0.8
0.6	1.8	1.2
0.8	2.4	1.6

*いずれも、提示時間は3.0sec、衝突時間は2.0secであった。

table 4 実験2で使用したFASとSASの組み合わせ

FASの初期サイズ(°)	SASの初期サイズ(°)
0.4	0.4
0.4	0.6
0.4	0.8
0.6	0.4
0.6	0.6
0.6	0.8
0.8	0.4
0.8	0.6
0.8	0.8

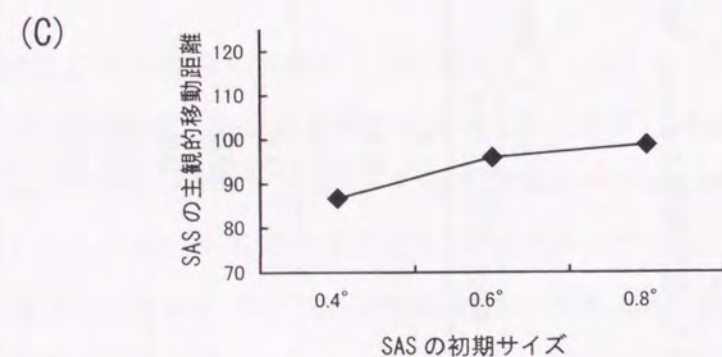
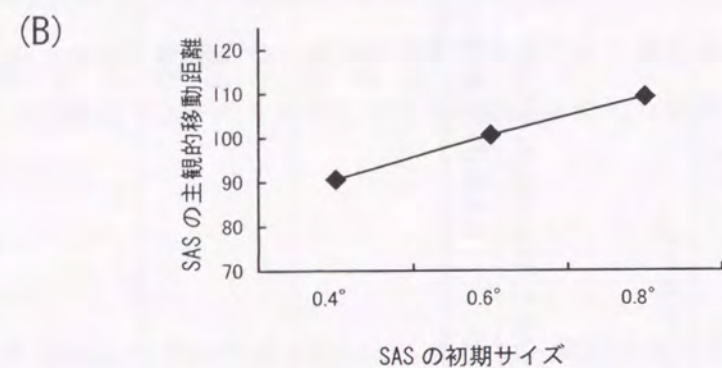
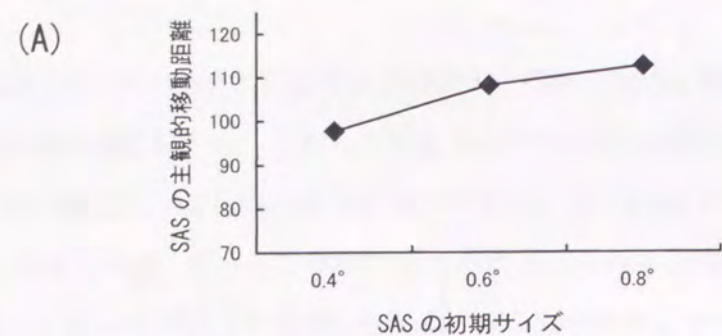


fig. 14 実験2で得られたSASの主観的移動距離。(A)(B)(C)は、それぞれFASの初期サイズが0.4°, 0.6°, 0.8°の時のSASの主観的移動距離を示す

FASの初期サイズが0.6°のグループに関して、SASの主観的移動距離に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、SASの間に有意な差が見られた($F(2,98)=27.18, p<.01$)。テューキー法による下位検定の結果、両グループともにSASの初期サイズが0.4°と0.6°、0.4°と0.8°、0.6°と0.8°の間に有意な差が見られた(いずれも、 $p<.01$)。これらの結果とSASの初期サイズが0.4°、0.6°、0.8°の主観的移動距離の平均値から、SASの初期サイズが0.4°、0.6°、0.8°と増加するにつれて、SASの主観的移動距離が増加していることが示された。

FASの初期サイズが0.8°のグループに関して、SASの主観的移動距離に関する一要因被験者内計画の分散分析を行ったところ、両グループともにSASの間に有意な差が見られた($F(2,98)=14.53, p<.01$)。テューキー法による下位検定の結果、SASの初期サイズが0.4°と0.6°、0.4°と0.8°の間に有意な差が見られた(いずれも、 $p<.01$)。これらの結果とSASの初期サイズが0.4°、0.6°、0.8°の主観的移動距離の平均値から、SASの初期サイズが0.4°、0.6°、0.8°と増加するにつれて、SASの主観的移動距離が増加していることが示された。

実験1と同様、同一FASグループ内のSAS間においてSASの初期サイズに有意な差が見られ、SASの初期サイズの増加に従って主観的移動距離の平均値が増加していることから接近対象の主観的移動距離が理論的に算出される値と一致しないことが示された。またこの結果は、1.5°を超えると直ちに奥行き運動が知覚できなくなるというわけではないことも示唆している。

実験1では、FASの初期サイズが0.2°、0.3°、0.4°の3種のグループすべてにおいて、3種のSASの初期サイズ間(0.2°、0.3°、0.4°)のすべてにおいて有意な差が見られた。一方、実験2では、FASの初期サイズが0.6°のグループにおいて、3種のSASの初期サイズ間(0.4°、0.6°、0.8°)に有意な差が見られた。しかし、FASの初期サイズが0.4°、0.8°のグループでは、0.6°と0.8°のSASの初期サイズ間に有意な差が見られなかった。このように実験1ではすべてのSASの初期サイズ間に有意な差が見られたが、実験2では一部のSASの初期サイズ間に有意な差が見られなかった。

この結果は、観察距離を短くしてSASのサイズを大きくしたことにより、実験1のSASに比べ被験者がSASの移動距離を安定して知覚しづらくなったことを示唆している。従って、Beverley and Regan(1979b)が指摘し奥行き方向の運動の検出閾が急激に上昇するとされる1.5°を超過したSASの主観的移動距離が、それ以下のSASの主観的移動距離に比べ、安定して知覚しづらくなっていたことが示唆された。

2-3 実験3

目的:

実験2では、一部のSASの終了サイズが、奥行き運動の検出閾が急激に上昇するとされる 1.5° を超過していた。しかし、そのようなSASに対しても、SASの終了サイズが 1.5° を超過しない実験1と同じ傾向の主観的移動距離を知覚していることが示された。しかし、一部のSAS間に有意な差が見られなかったことから、実験1のSASよりやや判断が不明確になったことが示唆された。そこで、実験3では、接近対象の大きさが主観的移動距離に与える効果を検討する。具体的には、FASとSASの初期サイズを実験2に比べ2倍にした。その結果、全てのFAS、SASは 1.5° を超えていた。

被験者: 正常視力を持つ成人男性2人、女性3人(22才~40才: 平均年齢26.4才) 実験3に参加した被験者は、実験1、2に参加した被験者とすべて同じ被験者であった。

装置: 実験1と同じであった。

刺激:

2つの接近する正方形(FAS、SAS)が断続的に提示された。刺激の提示位置、シーケンス、提示時間は実験1と同じであった(fig. 12)。そして、実験1と同様、全てのFASとSASは、等速で接近するように、式(3)に従って拡大した。FASには、拡大開始時のサイズが一辺 0.8° 、 1.2° 、 1.6° である3種類の正方形が用いられた。3種類のFASは、 $T_0 = 3.0\text{sec}$ で式(3)に従って 2.0sec 拡大した結果、それぞれの正方形の終了サイズは 2.4° 、 3.6° 、 4.8° になった。SASもFASと同じく、拡大開始時のサイズが一辺 0.8° 、 1.2° 、 1.6° である3種類の正方形が用いられた。3種類のSASは、 $T_0 = 3.0\text{sec}$ で式(3)に従って 2.0sec 拡大した。その結果、それぞれの正方形の終了サイズは 2.4° 、 3.6° 、 4.8° になった。実験1と同様、FASとSASは同じサイズの正方形であることも異なるサイズの正方形であることもあった。FASとSASのそれぞれの条件を組み合わせた結果、合計9種類の刺激が作られた(table 5,6)。

手続き:

被験者の課題は、FASの移動距離を100としたときのSASの移動距離を評価すること

table 5 実験3で使用したFASとSASの属性

初期サイズ($^\circ$)	終了サイズ($^\circ$)	拡大量($^\circ$)
0.8	2.4	1.6
1.2	3.6	2.4
1.6	4.8	3.2

*いずれも、提示時間は 3.0sec 、衝突時間は 2.0sec であった。

table 6 実験3で使用したFASとSASの組み合わせ

FASの初期サイズ($^\circ$)	SASの初期サイズ($^\circ$)
0.8	0.8
0.8	1.2
0.8	1.6
1.2	0.8
1.2	1.2
1.2	1.6
1.6	0.8
1.6	1.2
1.6	1.6

であった。観察距離が 50cm であった点を除いて、実験 1 と同じであった。

結果と考察：

実験 1 と同じように FAS の初期サイズに関して 3 つのグループに分割し、それぞれのグループ内で分析を行った。SAS の初期サイズが 0.8° 、 1.2° 、 1.6° である時のそれぞれの評価値の平均値を求めたところ、FAS の初期サイズが 0.8° のグループでは 98.2、107.7、107.1、FAS の初期サイズが 1.2° のグループでは、94.5、99.7、105.3、FAS の初期サイズが 1.6° のグループでは 94.4、93.3、101.7 であった。(fig. 15)。

FAS の初期サイズが 0.8° のグループにおける、SAS の主観的移動距離に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、SAS の間に有意な差が見られた($F(2,98)=7.93$, $p<.01$)。チューキー法による下位検定の結果、SAS の初期サイズが 0.8° と 1.2° 、 0.8° と 1.6° の間に有意な差が見られた(いずれも、 $p<.01$)。これらの結果は、初期サイズが 0.8° の SAS の主観的移動距離が、初期サイズが 1.2° の SAS の主観的移動距離よりも短いこと、初期サイズが 0.8° の SAS の主観的移動距離が、初期サイズが 1.6° の SAS の主観的移動距離よりも短いことを示していた。

FAS の初期サイズが 1.2° のグループに関して、SAS の主観的移動距離に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、両グループともに SAS の間に有意な差が見られた($F(2,98)=7.76$, $p<.01$)。チューキー法による下位検定の結果、SAS の初期サイズが 0.8° と 1.6° の間に有意な差が見られた(いずれも、 $p<.01$)。これらの結果は、初期サイズが 0.8° の SAS の主観的移動距離が、初期サイズが 1.6° の SAS の主観的移動距離よりも短いことを示していた。

FAS の初期サイズが 1.6° のグループに関して、SAS の主観的移動距離に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、SAS の間に有意な差が見られた($F(2,98)=4.77$, $p<.05$)。チューキー法による下位検定の結果、SAS の初期サイズが 0.8° と 1.6° 、 1.2° と 1.6° の間に有意な差が見られた(いずれも、 $p<.01$)。これらの結果は、初期サイズ 0.8° の SAS の主観的移動距離が、初期サイズ 1.2° の SAS の主観的移動距離よりも短いこと、初期サイズ 1.2° の SAS の主観的移動距離が、初期サイズ 1.6° の SAS の主観的移動距離よりも短いことを示していた。

実験 1 では、FAS の初期サイズが 0.2° 、 0.3° 、 0.4° の 3 種のグループのすべてにおいて、3 種の SAS の初期サイズ間 (0.2° 、 0.3° 、 0.4°) に有意な差が見られた。しかし、SAS の初期サイズを実験 1 の 2 倍 (0.4° 、 0.6° 、 0.8°) にした実験 2 では、FAS の初

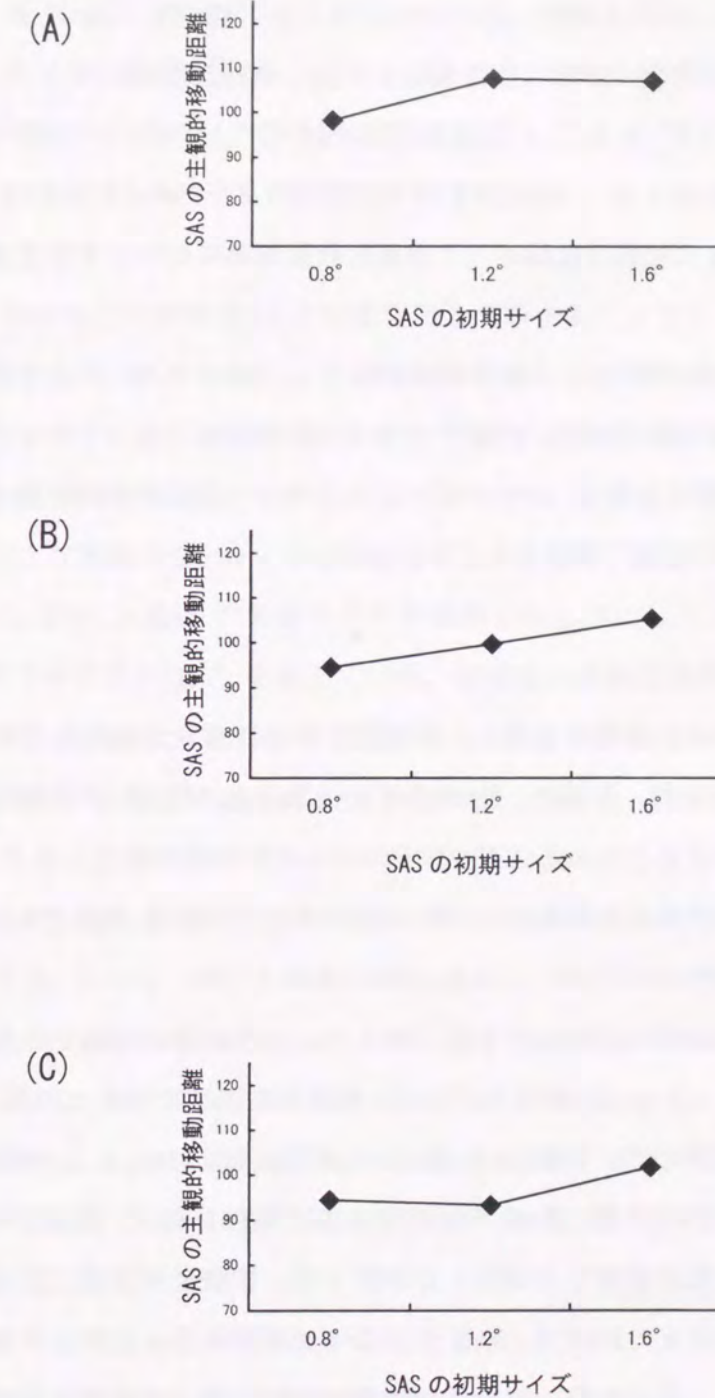


fig. 15 実験 3 で得られた SAS の主観的移動距離。(A) (B) (C) は、それぞれ FAS の初期サイズが 0.8° 、 1.2° 、 1.6° の時の SAS の主観的移動距離を示す

期サイズが 0.4° グループ内の SAS 初期サイズ 0.6° と 0.8° 、FAS の初期サイズが 0.8° グループ内の SAS の初期サイズ 0.6° と 0.8° という 2 つの SAS 間の主観的移動距離に有意な差が見られなかった。

SAS の初期サイズを実験 2 の 2 倍にした実験 3 では、FAS の初期サイズが 0.8° グループ内の SAS 初期サイズ 1.2° と 1.6° 、FAS の初期サイズが 1.2 グループ内の SAS 初期サイズ 0.8° と 1.2° 、 1.2° と 1.6° 、FAS の初期サイズが 1.6° グループ内の SAS 初期サイズ 0.8° と 1.2° という 4 つの場合において、主観的移動距離について有意差が見られなかった。

このように、実験 1 から実験 3 へと観察距離を短くし、SAS のサイズを大きくするに従って、SAS の主観的移動距離が安定した値ではなく不安定な値になっていくことが示唆された。なぜ、観察距離を短くし SAS のサイズを大きくすると主観的移動距離が不安定な値になるのかについては総合論議で考察することにする。

2-4 2 章のまとめ

本章では、対象が観察者に接近する際、人は対象の移動距離を正確に知覚することが可能かどうかについて検討した。さらに、Beverley and Regan (1979b) が指摘した奥行き運動の検出閾が急激に上昇するとされる 1.5° 以上のサイズの対象が接近したときでも、観察者の主観的移動距離に対する反応傾向が、 1.5° 以下のサイズの対象が接近する場合と同一であるかについて検討した。

実験 1 では、対象が観察者に向かって接近するとき、その対象の理論的な移動距離と対象の主観的移動距離が等しいかどうかを検討した。被験者に接近する 2 つの正方形 (FAS、SAS) を断続的に 2 回提示した。被験者は、FAS の移動距離を 100 とした時の SAS の相対移動距離を判断した。その結果、SAS の初期サイズの増加と共に、被験者の SAS に対する移動距離が長くなった。実験 1 で提示した刺激では、被験者が FAS と SAS が同一の対象であると判断した場合と、FAS と SAS が異なる対象であると判断した場合が想定された。いずれの場合でも、接近対象の理論的な対象の移動距離と被験者の主観的な移動距離が一致しないことが示唆された。

接近対象の主観的移動距離が、いかなる要因により決定されているのかについて本実験の結果から検討すると、接近対象の初期サイズと共に対象の接近終了時のサイズから接近開始時の初期サイズの差である拡大量も変化した。初期サイズ、拡大量のどちらの要因が接近対象の主観的移動距離を決定しているのかについては 4 章で検討する。

実験 1 では、FAS 及び SAS の最大値は 1.2° であった。これは、接近対象のサイズが 1.5° を超過すると接近運動等の奥行き運動の検出閾が急激に上昇するという先行研究 (Beverley & Regan, 1979b) によるものである。実験 2 では、急激に検出閾が上昇するとされる 1.5° を超えた接近対象が提示された場合、その接近対象の主観的移動距離が実験 1 と異なった傾向を示すのかどうかを検証した。

実験 2 の FAS と SAS のサイズは実験 1 の 2 倍になった。その結果、一部の FAS と SAS に 1.5° を超えるサイズの正方形が提示された。被験者の課題も実験 1 と同じく、FAS の移動距離を 100 とした時の SAS の移動距離を判断することであった。実験 2 の結果は、ほぼ実験 1 と同じく SAS の初期サイズの増加と共に SAS の主観的移動距離が長くなったことを示していた。しかし、実験 1 と異なり、一部に有意差が見られない条件が見られた。この結果は、SAS のサイズを大きくしたことにより、被験者が SAS の移動距離を安定して知覚することが困難になったことを示唆していた。

実験 3 では、FAS と SAS の初期サイズを実験 2 の 2 倍にした。その結果、すべての FAS と SAS の終了サイズが 1.5° を超えていた。被験者の課題は実験 1、2 と同じであった。実験 3 の結果、実験 2 に比べ、有意差が見られない条件の数が増加した。このように実験 1 から実験 3 へと SAS のサイズを大きくするにつれて、被験者が SAS の移動距離を安定して知覚することが困難になっていく傾向がみられた。この傾向は、Beverley and Regan (1979b) の 1.5° を超える接近対象の奥行き運動の検出閾値が急激に上昇するという結果と一致する。しかし、奥行き運動の検出閾値は、接近対象のサイズが 1.5° を超えると急激に上昇する (Beverley & Regan 1979b) が、接近対象の移動距離知覚では、急激に変化するのではなく、徐々に安定性が崩れていくことが示唆された。

ただし、実験 1、2、3 を通して FAS の初期サイズがいずれの場合でも、FAS と SAS の初期サイズが同じ時、SAS の主観的移動距離は、100 に近い値を示していた。この結果は、理論的には一意に決定することができないにも関わらず、被験者が同じ初期サイズの奥行き距離を同一のものとして知覚していることを示していた。また、同じ軌道を通る同じ対象は、同じ距離を移動したと正しく知覚されることも示していた。

本章で行った実験から、観察者が接近対象の移動距離を知覚するとき、観察者は物理学的に算出した距離とは異なる距離を知覚することが示された。また、観察者が知覚した接近対象の移動距離は一定していることも示された。しかし、接近対象の網膜像のサイズが大きくなるにつれて、接近対象の主観的移動距離が不安定になる傾向がみられた。

... (faint text) ...

... (faint text) ...

3章

接近対象の移動距離知覚における処理メカニズムの検討

... (faint text) ...

... (faint text) ...

... (faint text) ...

... (faint text) ...

3-1 実験 4

目的：

実験 1 では、接近対象の主観的移動距離は、理論値と一致しないことが示された。主観的移動距離を決定している要因として、初期サイズ、接近終了時の対象の網膜像のサイズから接近開始時の対象の網膜像のサイズの差である拡大量が考えられた。しかし、接近対象の主観的移動距離を決定しているのが初期サイズか拡大量か不明であった。そこで、実験 4 では、接近対象の主観的移動距離が対象の初期サイズによって決定されているか、もしくは網膜像の拡大量によって決定されているのかを検討する。

実験 4 では、実験 1 と同じく拡大する 2 つの正方形が断続的に提示される刺激が用いられた。実験 1 では SAS の初期サイズの増加につれて拡大量が増加するというように、SAS の条件間で初期サイズと拡大量に対応していた。しかし、実験 4 では、同一 FAS グループ内の SAS は初期サイズが同じで拡大量が異なるように操作された。

もし、異なる初期サイズの正方形の拡大に対しても、被験者が拡大量により移動距離を判断することが可能なのであれば、SAS の拡大量の増加に伴い、SAS の主観的移動距離が増大していくであろう。一方、初期サイズに決定されているのであれば、SAS の拡大量が増加しても SAS の主観的移動距離は変化しないことが予想される。

被験者：正常視力を有する成人男性 3 人、女性 1 人（22 才～36 才：平均年齢 26.5 才）

装置：実験 1 と同じであった。

刺激：

刺激の提示位置、シーケンスは実験 1 と同じであった(fig. 12)。但し、FAS と SAS の接近時間は 3sec であった。そして、実験 1 と同様、全ての FAS と SAS は、等速で接近するように、FAS と SAS は式(3)に従って拡大した。

FAS と SAS の初期サイズの組み合わせは 6 グループ存在した ($(0.20^\circ, 0.30^\circ)$ 、 $(0.20^\circ, 0.40^\circ)$ 、 $(0.30^\circ, 0.20^\circ)$ 、 $(0.30^\circ, 0.40^\circ)$ 、 $(0.40^\circ, 0.20^\circ)$ 、 $(0.40^\circ, 0.30^\circ)$) (table 7,8,9)。実験 1 と異なりこの組み合わせからは、FAS と SAS が同じ初期サイズの組み合わせは除外されていた。初期サイズが 0.20° 、 0.30° 、 0.40° である 3 つの FAS の拡大終了時のサイズはそれぞれ 0.50° 、 0.60° 、 0.70° であり、拡大量は全て 0.30° であった。一方、SAS は、一つの初期サイズにつき 6 種の衝突時間が設

table 7 実験4で使用したFASの属性

初期サイズ(°)	終了サイズ(°)	衝突時間(sec)
0.20	0.50	5.00
0.30	0.60	6.00
0.40	0.70	7.00

* 提示時間はいずれも3.0secであった。

* 拡大量はいずれも0.30°であった。

table 8 実験4で使用したSASの属性

初期サイズ(°)	終了サイズ(°)	拡大量(°)	衝突時間(sec)
0.20	0.29	0.09	10.00
0.20	0.30	0.10	9.00
0.20	0.32	0.12	8.00
0.20	0.35	0.15	7.00
0.20	0.40	0.20	6.00
0.20	0.50	0.30	5.00
0.30	0.43	0.13	10.00
0.30	0.45	0.15	9.00
0.30	0.48	0.18	8.00
0.30	0.53	0.23	7.00
0.30	0.60	0.30	6.00
0.30	0.75	0.45	5.00
0.40	0.57	0.17	10.00
0.40	0.60	0.20	9.00
0.40	0.64	0.24	8.00
0.40	0.70	0.30	7.00
0.40	0.80	0.40	6.00
0.40	1.00	0.60	5.00

* 提示時間はいずれも3.0secであった。

Table 9 実験4で使用したFASとSASの組み合わせ

グループ	FASの初期サイズ(°)	SASの初期サイズ(°)
1	0.20	0.30
2	0.20	0.40
3	0.30	0.20
4	0.30	0.40
5	0.40	0.20
6	0.40	0.30

定されたため、一つの同じ初期サイズに、6種の異なる終了サイズを持つSASが存在した。

次に、0.20°、0.30°、0.40°の3種の初期サイズでは、のSASについて記述する。初期サイズが0.20°のSASの拡大終了時のサイズは0.29°、0.30°、0.32°、0.35°、0.40°、0.50°の6種類存在し、それぞれのSASの拡大量は0.09°、0.10°、0.12°、0.15°、0.20°、0.30°であった。SASの初期サイズが0.30°の正方形の拡大終了時のサイズは0.43°、0.45°、0.48°、0.53°、0.60°、0.75°の6種類で、それぞれの拡大量は、0.13°、0.15°、0.18°、0.23°、0.30°、0.45°であった。最後に、SASの初期サイズが0.4°の正方形の拡大終了時のサイズは0.57°、0.60°、0.64°、0.70°、0.80°、1.00°の6種類で、その時の拡大量は、0.17°、0.20°、0.24°、0.30°、0.40°、0.60°であった。

FASとSASの初期サイズが一定であるFASとSASのグループが6種作成され、一つのグループにつき6パターンのSASが存在した結果、合計36種類の刺激が作成された。

手続き:

実験1と同じであった。被験者は一つの刺激につき10回、合計360試行に反応した。観察距離は200cmであった。

結果と考察:

同一グループ内のSASは初期サイズが等しく、拡大量が変化するので、以下の分析では、同一グループ内のSASに対する被験者の反応を比較した。

グループ(1)において、SASの主観的移動距離の平均値に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、SASの拡大量の間に有意な差が見られた($F(5,195)=44.35, p<.01$)。同様に、グループ(2)からグループ(6)のすべてのグループでも、SASの拡大量の間に有意な差が見られた($F(5,195)=41.84, p<.01$; $F(5,195)=39.55, p<.01$; $F(5,195)=41.26, p<.01$; $F(5,195)=28.75, p<.01$; $F(5,195)=35.38, p<.01$)これらの結果とSASの拡大量の増加に従ってSASの主観的移動距離が増加していることから(fig. 16)、被験者は課題の判断に際して、拡大量で判断していたことが示された。

FASが同じ大きさであるとき、SASの拡大量が大きい条件ほど、衝突時間も長かった。その結果、本実験では衝突時間が増大するほど、被験者は移動距離を長く判断した。しかし、衝突時間が被験者の移動距離判断に影響しないことが実験1の結果から示されているため、本実験に使用された対象の接近による衝突時間が、接近対象の移動距離判断に利用されているとは考えられなかった。

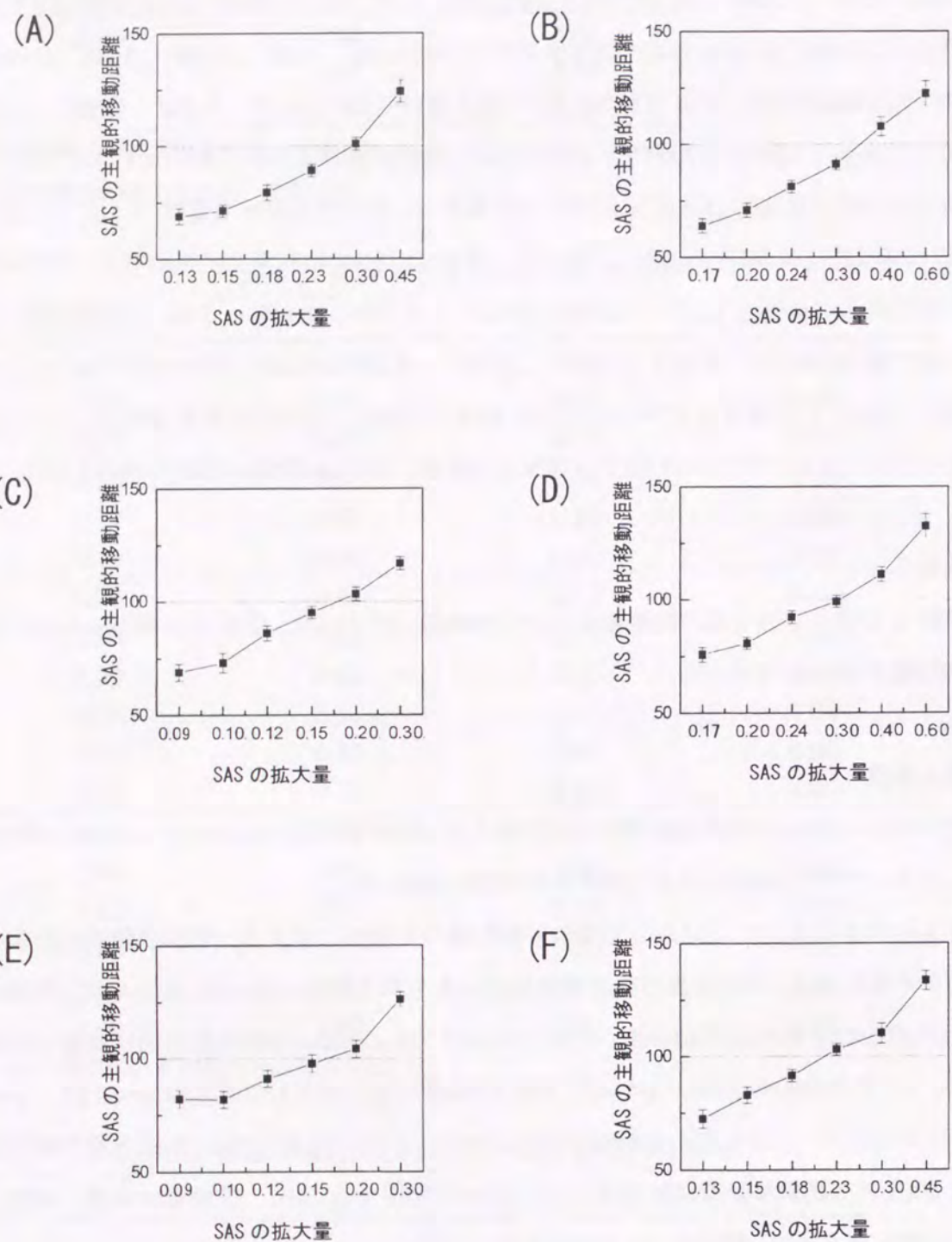


fig. 16 SASの拡大量に対するSASの主観的移動距離。(A), (B), (C), (D), (E), (F)は、それぞれ、グループ(1), (2), (3), (4), (5), (6)と対応する。縦線は、標準誤差を示す。

FAS と SAS の正方形の拡大量が同じである組み合わせは、それぞれのグループ内に 1 個ずつ、合計 6 個存在した。つまり、それぞれのグループにおける SAS の拡大量が 0.3° の刺激である。グループ 1 から 6 におけるこれらの刺激における SAS の主観的移動距離は、それぞれ 100.8、91.1、116.8、99.1、126.1、110.1 であった (fig. 17)。これら 6 個の SAS に対する主観的移動距離に関して、一要因被験者内計画の分散分析を行った。その結果、6 個の SAS の主観的移動距離に有意な差が見られた ($F(5, 195) = 15.98, p < .01$)。テューキー法による下位検定の結果、グループ 3 とグループ 1、2、4 の間に (いずれも $p < .01$)、グループ 5 は、グループ 1、2、4 の間に (いずれも $p < .01$)、グループ 6 はグループ 2、5 の間 (いずれも $p < .01$) に有意な差が見られた。拡大量が等しい FAS と SAS の組み合わせにおける下位検定の結果と fig. 17 から、グループ 3、5、6 がグループ 1、2、4 よりも主観的移動距離が長いことが示されていた。本来、接近対象の主観的移動距離が拡大量によって決定されるのであれば、FAS と SAS の拡大量が 0.30° である拡大量が等しい組み合わせの間に有意な差が見られないはずである。なぜ、このような差がみられたのであろうか。

グループ 3、5、6 とグループ 1、2、4 との相違点は、前者が FAS の初期サイズより SAS の初期サイズが大きく、後者は FAS の初期サイズより SAS の初期サイズが小さいという点である。そして、前者のグループの方が、後者のグループに比べ SAS の主観的移動距離を長く知覚する傾向がみられた。これは、被験者が、FAS と SAS の初期サイズの大きさから奥行き位置を考慮するというように、FAS と SAS の初期サイズと奥行き位置の幾何学的関係を利用した結果、生じたものと考えられる。被験者は、FAS の初期サイズが SAS の初期サイズよりも大きい、つまり、FAS が SAS よりも手前に存在すると判断したため、FAS と SAS が同じ拡大量であれば、遠方に存在する SAS の移動量を大きいと判断したと考えられる。事実、FAS の初期サイズが SAS よりも大きいグループの内、FAS と SAS の初期サイズの差が最大になるグループは他のグループよりも有意に SAS の主観的移動距離が長いと判断されたグループ 5 であった。反対に、FAS の初期サイズが SAS より小さいグループの内、FAS と SAS の初期サイズの差が最大になるグループ 2 は他のグループよりも有意に SAS の主観的移動距離が短いと判断された。これらの結果は、接近対象の初期サイズが移動距離に効果を持つことを示していた。

さらに、fig. 18 から FAS と SAS が同じ拡大量になる場合だけでなく、それ以外の SAS についても、FAS の初期サイズが大きいグループは小さいグループの SAS よりも、SAS の主観的移動距離が大きいことが示唆された。そして、接近対象の初期サイズによる幾何

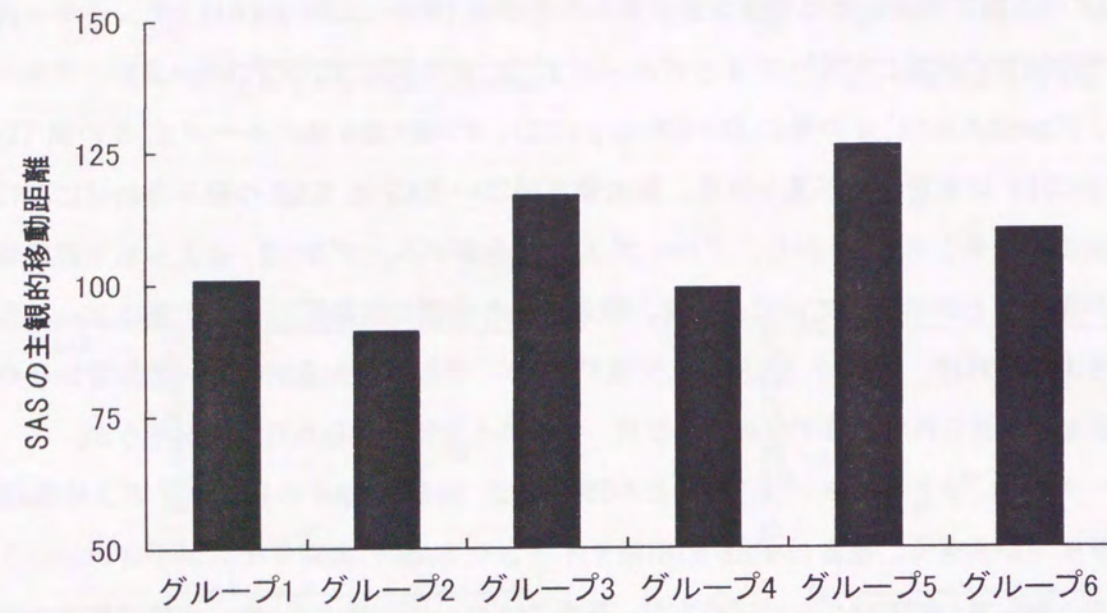


fig. 17 FASとSASの拡大量が等しい条件におけるSASの主観的移動距離

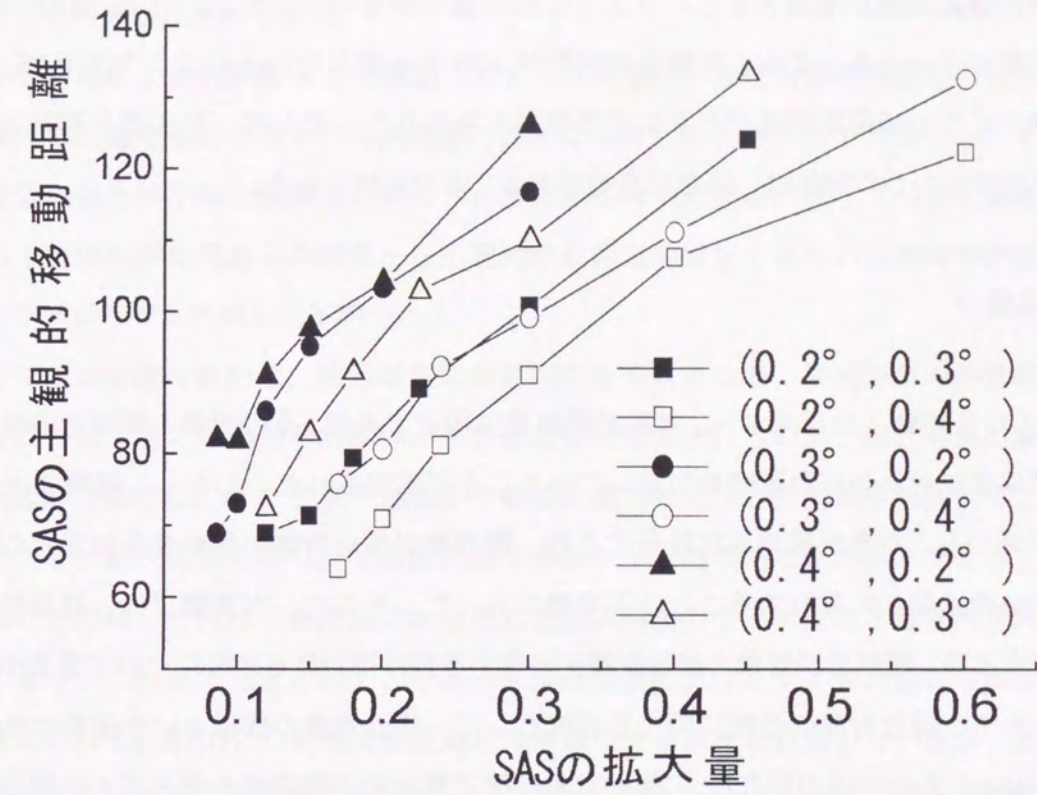


fig. 18 実験4で得られたSASの主観的移動距離

学的手がかりは、SAS の拡大量の変化に関わらず一定の効果が見られるため、接近対象による主観的移動距離知覚において、拡大量による手がかりと初期サイズによる幾何学的手がかりは独立加算的に働いていることが示唆された。

以上から、FAS と SAS の初期サイズが一定のとき、SAS の拡大量の増加に従って、SAS の主観的移動距離が増加するというように拡大量の効果がみられた。一方、FAS と SAS の拡大量が同一であっても、被験者の判断が 100 と一致しないというように FAS と SAS の初期サイズの幾何学的手がかりによる効果もみられた。そして、拡大量と初期サイズの幾何学的手がかりの関係は、独立加算的であることが示唆された。

3-2 実験 5

目的：

実験 1 から実験 4 の結果から、対象が観察者に接近する際、その対象の網膜像の拡大量から、観察者は対象の移動距離を知覚していることが示唆された。しかし、実験 1 から実験 4 の結果から、対象が観察者に接近する際、観察者が接近対象の移動量を知覚する時に行われる処理に関して言及することは不可能であった。そこで、本実験では、対象が観察者に接近する際、観察者が対象の接近距離を知覚する際に行われる処理について言及する。

これまで、接近対象の処理に関する研究として、接近対象の接近という運動に注目した研究(Regan らの一連の研究)と、接近対象の接近開始時の網膜像のサイズとの接近終了時のサイズの関係、さらにそのときの対象の物理的移動距離との幾何学的関係に注目した研究が存在する(Swanston & Gogel, 1986)。

接近対象から引き起こされる運動に注目した研究には、Regan and Hamstra (1993) の接近運動の検出モデルや相場 (1975, 1979, 1991) の接近速度の研究等がある。Regan and Hamstra (1993) は、対象のエッジの離反運動を検出し、その後、離反運動間関係から対象の奥行き運動を検出するというモデルを提案した。相場 (1975, 1977, 1991) は、網膜像自体の運動から直接に 2 次元網膜像の速度を知覚し、その網膜像の 2 次元速度から対象の 3 次元上の速度を知覚とした。

一方、接近対象の移動距離と拡大量の幾何学的関係に注目した研究として接近対象の距離に関するモデルである二段階モデルが提案されてきた(Swanston & Gogel, 1986; Gogel, 1998)。二段階説は、大きさ-距離不変仮説 (SDIH) を接近対象の移動距離知覚に当てはめるという知覚的過程と対象の認知的大きさと対象の主観的大きさの比率を知覚的過程から得られた距離に掛け合わせるという認知的過程から成り立つ。このうち、第一の段階で

ある SDIH は、接近対象の移動距離と網膜像のサイズ比との幾何学的関係を利用した処理である。

このように、接近対象を知覚する際に行われる処理は、接近対象の接近という運動に注目した研究と対象の接近開始前後の網膜像の拡大量と接近対象の移動距離の幾何学的関係に注目した研究がなされてきた。

本論文の実験 1 から実験 4 まで議論してきた拡大量は、接近対象の網膜像の拡大運動から直接に拡大量を抽出するという網膜像の運動に注目した手がかりであるのか、それとも接近対象の接近終了時の網膜像のサイズと接近開始時の網膜像のサイズの差を直接知覚し、その値と対象の移動距離との関係から主観的移動距離を知覚するという幾何学的関係に注目した手がかりであるのかは不明である。

そこで、本実験の目的は、接近対象の移動距離を知覚する際、接近対象の移動距離とその網膜像の拡大量との幾何学的関係から移動距離が知覚されるのか、接近対象の網膜像の 2 次元運動を抽出し、その 2 次元運動から移動距離を知覚されるのかを検証することである。ただし、拡大量から得られる移動距離手がかりが幾何学的な手がかりであるという結果が得られた時、それは二段階説における対象の網膜像のサイズ比による幾何学の手がかりではなく、これまで想定されてこなかった接近前後におけるサイズの差の手がかりであると考えられる。SDIH の処理は接近前後の対象のサイズ比を利用しているが、拡大量は接近前後のサイズの差を利用しているという点で、SDIH による処理と拡大量を手がかりとした処理は異なる。

刺激は、実験 1 と同じように接近する正方形を断続的に 2 回提示した。しかし、実験 1 と異なり、FAS と SAS は式(3)に従って反比例的に拡大するのではなく、一次関数もしくは sin 関数に従って拡大した(fig. 19)。拡大関数に一次関数と sin 関数を使用したのは、一次関数を使用した SAS は、対象が接近中、常時運動を検出することが可能であり、一方、sin 関数を使用した SAS は接近終了時、運動の検出が不可能になるというように運動の検出に差が見られるからであった。FAS の拡大関数が同じで、SAS の拡大関数が異なる刺激対を 1 つのグループとし、グループ内の SAS の主観的移動距離を比較した(table 10, 11)。

もし、接近対象の移動距離を知覚する際、被験者が接近対象の網膜像の運動を検知し、その運動情報から移動距離を知覚しているのであれば、同一グループの SAS を比較すると、拡大関数に一次関数を使用した SAS は拡大関数に sin 関数を使用した SAS よりも移動距離が長く知覚されることが予想される。

これは、以下の理由によるものである。拡大関数に sin 関数を使用した SAS は、接近開

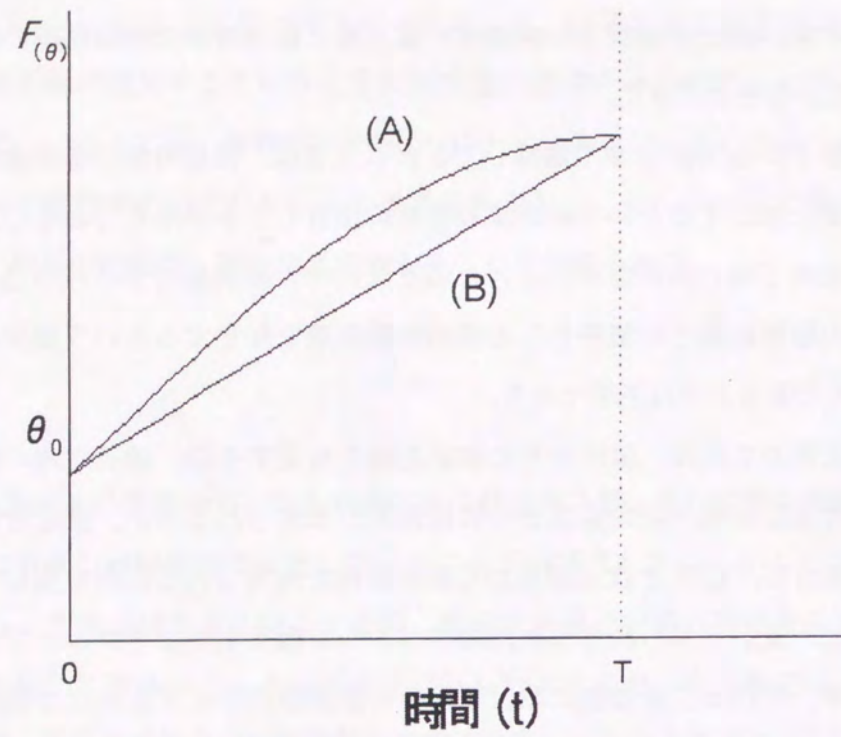


fig. 19 (A)は式(13)にしたがって、拡大する正方形のサイズを、(B)は式(14)にしたがって、拡大する正方形のサイズを示す

table 10 実験5で使用したFASとSASの属性

初期サイズ(°)	終了サイズ(°)	拡大関数	拡大量(°)
0.20	0.40	一次関数	0.20
0.20	0.40	sin関数	0.20
0.40	0.80	一次関数	0.40
0.40	0.80	sin関数	0.40

* 提示時間はいずれも3.0secであった。

table 11 実験5で使用したFASとSASの組み合わせ

グループ	FASの初期サイズ(°)	FASの拡大関数	SASの初期サイズ(°)	SASの拡大関数
1	0.20	sin関数	0.40	sin関数
	0.20	sin関数	0.40	一次関数
2	0.20	一次関数	0.40	sin関数
	0.20	一次関数	0.40	一次関数
3	0.40	sin関数	0.20	sin関数
	0.40	sin関数	0.20	一次関数
4	0.40	一次関数	0.20	sin関数
	0.40	一次関数	0.20	一次関数

始時に最大速度で接近するが、時間経過とともに接近速度が減少する(fig. 20)。このため、後半部では3次元上の接近速度、網膜像の拡大速度ともに遅滞し、接近終了時に接近速度がゼロになる。ゆえに、接近終了直前にかけて、観察者はSASの拡大および、接近を検出することが不可能になる。一方、拡大関数に一次関数を使用したSASは、接近開始時から接近終了時まで一貫して拡大率が一定のため、接近速度が接近終了時まで一定である。その結果、SASの網膜像が拡大し、SASが接近することを検出することが可能になる。

拡大関数にsin関数と一次関数を使用する双方のSASの主観的移動距離を比較することは、接近終了直前に接近運動が検出されないSASと一貫して接近運動が検出可能なSASを比較するということになる。このような理由で、被験者が接近対象の移動距離を知覚する際、もし対象の接近運動による網膜像の拡大運動自体を手がかりとして利用しているのであれば、拡大関数にsin関数を使用したSASの移動量が、拡大関数に一次関数を使用したSASよりも主観的移動距離が短くなることが予想される。

反対に、接近対象の移動距離を知覚する際、被験者が接近対象の接近前後の網膜像の拡大量と、移動距離の幾何学的関係を手がかりとして利用するのであれば、同一グループのSASを比較すると、拡大関数に一次関数を使用したSASと拡大関数にsin関数を使用したSASの移動距離は同じ長さであると知覚されることが予想される。これは、同一グループでは、拡大関数にsin関数を使用したSASと一次関数を使用したSASの幾何学的手がかりである接近開始時のサイズ、接近終了時のサイズ、提示時間が等しいからである。

被験者：正常視力を有する成人男性6人、女性4人（21才～29才：平均年齢24.9才）

装置：実験1と同じ

刺激：

実験1と同じく拡大する正方形が継続的に2回提示された。この時提示される正方形の初期サイズは 0.20° と 0.40° の2種類であった。しかし、これらの正方形が拡大する際に使用した関数は、実験1で使用した式(3)ではなく、一次関数とsin関数という2種類の関数を使用した(fig. 19)。

sin関数には、式(13)を使用した。

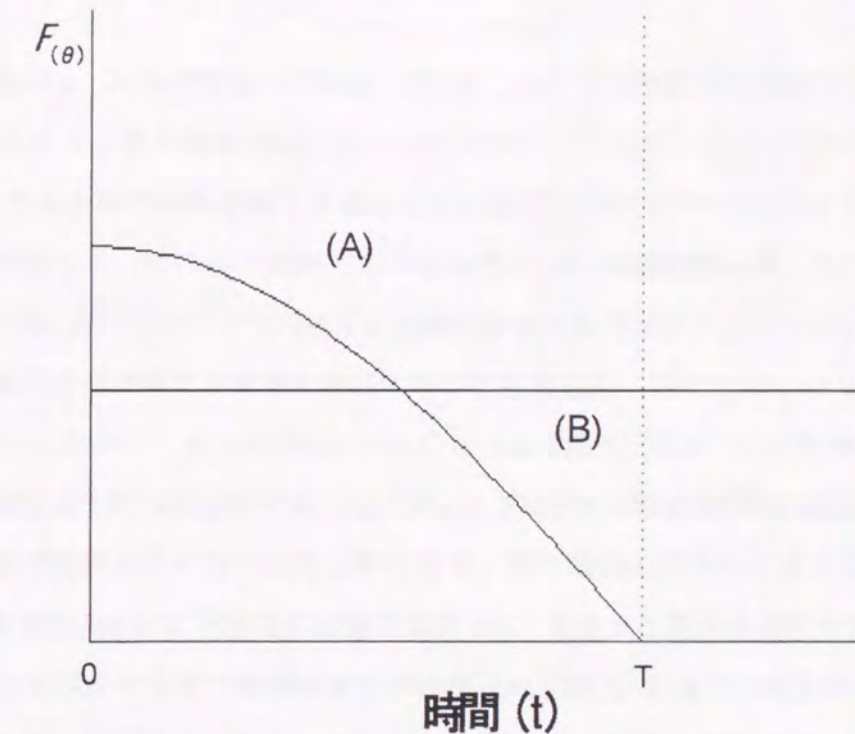


fig. 20 (A)は式(19)の時間に関する微分関数を、(B)は式(20)の時間に関する微分関数を示す

$$F(\theta) = \theta_0 + \alpha \times \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \dots\dots\dots (13)$$

(θ は時間 t における正方形のサイズ、 θ_0 は、正方形の初期サイズ、 α は拡大率、 T は提示時間を示す。)

一次関数には、式(14)を使用した。

$$F(\theta) = \theta_0 + \beta \times t \dots\dots\dots (14)$$

(θ は時間 t における正方形のサイズ、 θ_0 は、正方形の初期サイズ、 β は拡大率を示す。)

これらの拡大関数を使用した結果、sin 関数に従って拡大する正方形は、提示初期では、sin 関数に従って拡大する SAS は、接近開始時に最大速度で接近するように見えるが、時間経過とともに接近速度が減少して見える (fig. 20)。一方、一次関数に従って正方形が拡大する場合、接近時間が経過しても単位時間あたりの拡大率が一定のため、主観的には、若干減速して接近するように見える。また、接近時の後半部では、一次関数は sin 関数より、接近速度が大きくなる。

全ての正方形の接近時間は 3.00sec であった。また、初期サイズが 0.20° の正方形の終了サイズは 0.40° 、初期サイズが 0.40° の正方形の終了サイズは 0.80° であった。sin 関数に従い拡大する初期サイズ 0.20° 、 0.40° の正方形の拡大率 (α) はそれぞれ 0.2° 、 0.40° であった。また、一次関数に従い拡大する初期サイズ 0.20° 、 0.40° の正方形の拡大率 (β) はそれぞれ 0.67、1.33 であった。2 種の初期サイズ (0.20° 、 0.40°) と 2 種の拡大関数 (sin 関数、一次関数) を組み合わせた結果、4 種の拡大する正方形が作られた。実験 1 と異なり、初期サイズが同一の FAS と SAS の組み合わせは除外して、FAS と SAS を組み合わせた刺激を作成した結果、合計 8 種類の刺激が作られた。(table 10, 11)

FAS の初期サイズ、拡大関数に関して 4 つのグループ(table 11)に分割すると、同じグループ内における 2 つの SAS の初期サイズ、終了サイズは等しくなる。さらに提示時間も等しいため、同一グループの SAS の異なる点は、拡大関数に sin 関数を使用しているか、それとも一次関数を使用しているかという点であった。

手続き :

実験 1 と同じであった。被験者は一つの刺激につき 10 回、合計 80 試行に反応した。観察距離は 200cm であった。

結果 :

FAS の初期サイズ、拡大関数に関して 4 つのグループに分割し、同一グループ内の、2 つの SAS に対する主観的移動距離を比較した(table 11)。同一グループの 2 つの SAS は、拡大関数のみが異なり、その他の変数である初期サイズ、接近時間、終了サイズが同じであった。その結果、同一グループの SAS の主観的移動距離を比較することは、拡大関数が SAS の主観的奥行き量に与える効果を検証することになる。

グループ (1) において、2 つの SAS ($(0.4^\circ$ 、sin 関数)、 $(0.4^\circ$ 、一次関数)) の平均値は、それぞれ 121.71、128.29 であった。グループ(1)で、SAS の主観的移動距離の平均値に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、拡大関数の効果が有意となる傾向が見られた($F(1,99)=3.18$, $p<0.1$) (fig. 21 (a))。

グループ (2) において、2 つの SAS ($(0.4^\circ$ 、sin 関数)、 $(0.4^\circ$ 、一次関数)) の平均値は、それぞれ 120.90、127.92 であった。グループ (2) で、SAS の主観的移動距離の平均値に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、拡大関数の効果が有意な差が見られた($F(1,99)=6.87$, $p<.05$) (fig. 21 (b))。

グループ (3) において、2 つの SAS ($(0.2^\circ$ 、sin 関数)、 $(0.2^\circ$ 、一次関数)) の平均値は、それぞれ 90.45、96.29 であった。グループ (3) で、SAS の主観的移動距離の平均値に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、拡大関数の効果が有意な差が見られた($F(1,99)=7.15$, $p<.01$) (fig. 21 (c))。

グループ (4) において、2 つの SAS ($(0.2^\circ$ 、sin 関数)、 $(0.2^\circ$ 、一次関数)) の平均値は、それぞれ 86.78、95.91 であった。グループ (4) で、SAS の主観的移動距離の平均値に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、拡大関数の効果が有意な差が見られた ($F(1,99)=18.63$, $p<.01$) (fig. 21 (d))。

このように、すべてのグループで、sin 関数の拡大関数を持つ SAS の主観的移動距離は一次関数の拡大関数を持つ SAS の主観的移動距離に比べて短かった。この結果は、拡大関数が被験者の接近対象の移動距離知覚に効果を持つことを示していた。同時に、同じグループ内の SAS は、初期サイズ、終了サイズが同じであるため、拡大率により接近対象の主

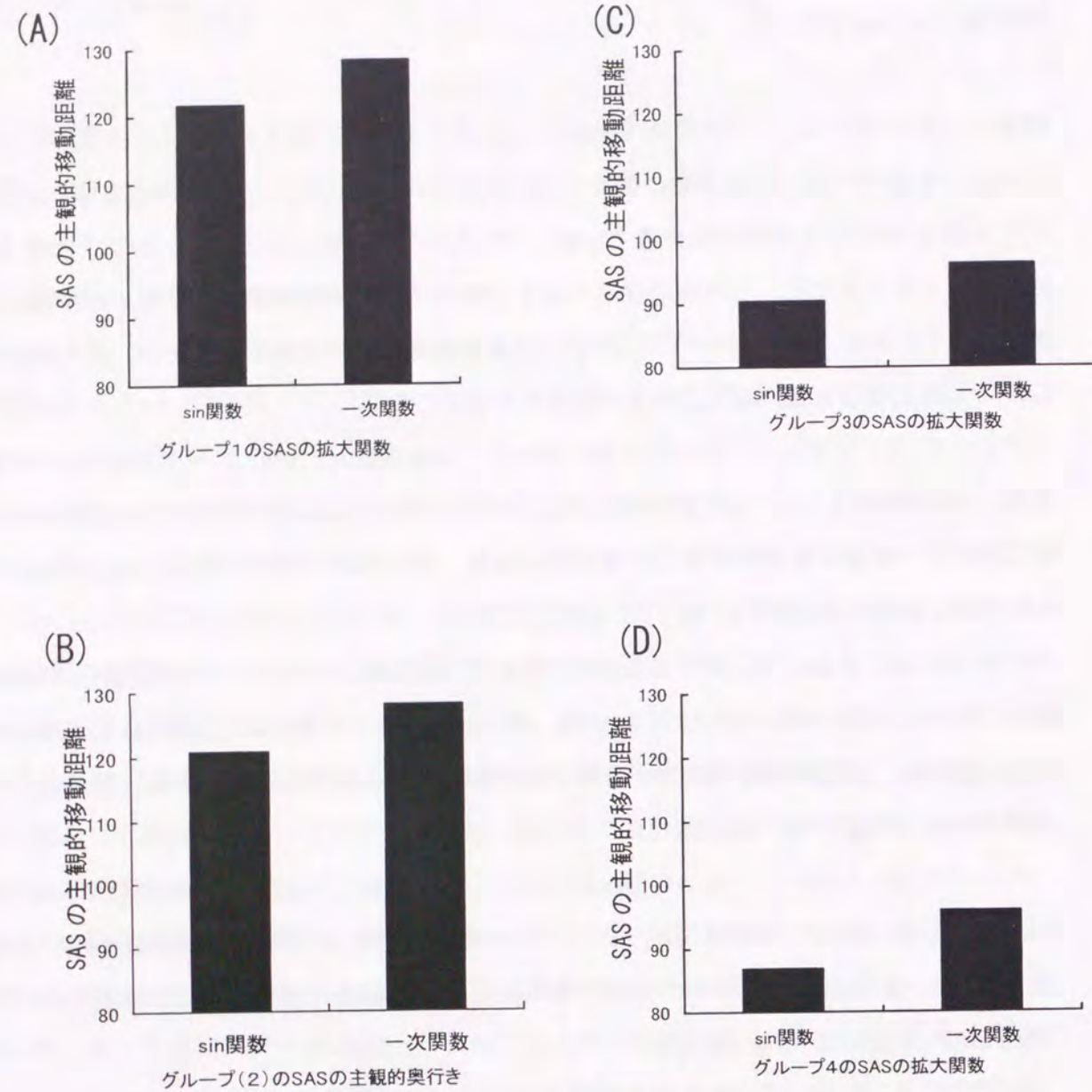


fig. 21 実験5で得られた各グループのSASの主観的移動距離。(A) (B) (C) (D) は、それぞれグループ1、2、3、4におけるSASの主観的移動距離を示す。

観的移動距離が決定されていなかったことが示された。また、対象の網膜像の拡大運動が主観的移動距離知覚に効果を持つことが示された。では、被験者は、いかにしてSASの移動量を知覚したのであろうか。

sin関数を使用したSASの主観的移動距離が一次関数を使用したSASの主観的移動距離よりも短いと判断されたのは、sin関数を使用したSASの接近後半部で拡大運動速度が検出閾値以下になった時間帯が存在したためであると考えられる。そして、全ての接近時間から、拡大運動が検出不可可能な時間帯を除外した時間帯の主観的移動距離が、sin関数を使用したSASの主観的移動距離になる。この時、主観的移動距離は拡大速度と接近時間のかけ算というよりは、接近速度の時間に関する積分に対応する処理が行われて、主観的移動距離が知覚される可能性が考えられる。以下にその詳細を記述する。

網膜像の拡大速度が対象の接近速度に対応しているとすると、理論的には、式(13)、式(14)を時間で微分した式が拡大速度関数になるので、式(13)、式(14)を時間で微分した式が接近速度に対応していることになる。さらに、この拡大速度を時間で積分すると、対象の接近距離と対応した値になる。しかし、式(13)、式(14)を時間で微分した後に時間で積分するため、結局、接近距離の関数は、元の式(13)、(14)から θ_0 を引いた、拡大量の関数になる。本実験で使用したグループ1のFASがsin関数に従って拡大する場合を考える。提示時間 = 3.00sec, $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.67$ をそれぞれ式(13)、式(14)に代入し、上記の計算を行うと、sin関数、一次関数それぞれのSASに対しても 0.4° で等しくなる。このことは、すべてのグループのSASに当てはまり、すべてのグループ内のsin関数と一次関数のSASの移動距離は等しくなる。

しかし、これは理論値であり、人の場合、網膜像の拡大を検出する閾値が存在する。sin関数による拡大運動を行うSASの場合、提示後1.5secを過ぎると、拡大速度が単調減少し、提示終了時には拡大速度が0になる。そのため、SASの拡大速度が検出閾下の速度になり、SASの拡大を検出できない状態が発生する (fig. 22)。しかし、一次関数の拡大関数を持つSASの場合、正方形の拡大開始時から拡大終了時まで一定速度で拡大し、かつ拡大検出閾を下まわらない速度で拡大するため、正方形が拡大している間、常に正方形の拡大が検出されている。このように、理論的には、sin関数に従って拡大したSASと一次関数に従って拡大したSASの拡大速度の積分された値は等しいが、主観的な拡大速度を時間で積分した値はsin関数に従って拡大したSASの方が小さい値になる。さらに、主観的拡大速度と主観的接近速度、主観的接近速度と主観的移動距離がそれぞれ対応しているため、主観的拡大速度を積分した値と主観的移動距離が対応することになる。このため、同じグ

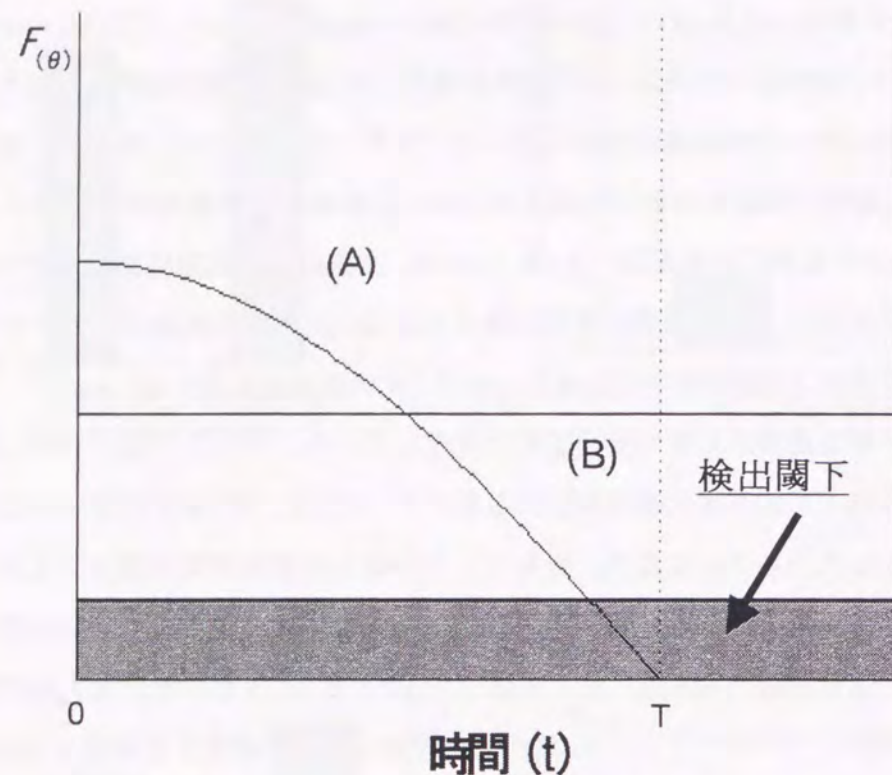


fig. 22 刺激の拡大運動と検出閾との関係。(A)は式(19)の時間に関する微分関数を、(B)は式(20)の時間に関する微分関数を示す

ループ内の sin 関数と一次関数の SAS の移動距離を比較すると、一次関数の奥行き移動距離が sin 関数の移動距離よりも長く知覚されることが考えられる。

本実験では、接近対象の移動距離を知覚する際、その接近前後の網膜像のサイズの差から移動距離を知覚するのではなく、拡大運動から移動距離を知覚することが示された。さらに、拡大運動を時間に関して積分することに対応した処理が行われて、移動距離が知覚されることが示唆された。

3-3 3章のまとめ

本章では、接近対象の主観的移動距離がいかなる処理機構により行われているかについて検討した。

実験 4 では、実験 1 で不明であった接近対象の主観的移動距離が初期サイズ、拡大量のいずれによって決定されているのかを検討した。刺激は実験 1 とほぼ同じく FAS と SAS が継時的に提示された。そして、FAS の初期サイズは 3 種存在し、同一の FAS に対し、初期サイズが一定で、拡大量が異なる 6 種の SAS を提示した。被験者の課題は実験 1 と同じく、FAS の移動距離を 100 とした時の SAS の相対移動距離を判断することであった。もし、被験者が拡大量を手がかりに接近対象の移動距離を判断しているのであれば、同一グループ内の SAS 間の主観的移動距離に差が見られることが予想された。一方、被験者が接近対象の初期サイズを手がかりにして接近対象の移動距離を判断しているのであれば、同一グループ内の SAS 間に差が見られないことが予想された。

実験の結果、同一グループ内では、SAS の拡大量が増加するにつれて主観的移動距離が増加した。この結果は、被験者が接近対象の移動距離を判断する際に、接近終了時のサイズから接近開始時のサイズの差である拡大量を手がかりとしていたことを示唆していた。また、FAS の初期サイズが SAS の初期サイズより大きい場合、SAS の主観的移動距離が拡大量から予想される値よりも大きくなることが示された。これは、初期サイズによる幾何学的手がかりの効果を示唆していた。そして、この効果は、SAS の拡大量が変化しても一貫して示されていたため、初期サイズによる幾何学的手がかりによる効果と拡大量による手がかりが独立加算的に働いていることが示唆された。

実験 4 では、接近対象の主観的移動距離が拡大量を手がかりとして知覚されることが示唆されたが、拡大量がいかんして知覚されるのかについては不明であった。そこで、実験 5 では、接近対象の拡大量がいかなる処理機構により知覚されるのかについて検証した。接近対象についての処理機構に関する研究は、接近対象の 2 次元運動に注目した研究と接

近対象の移動距離と接近前後における網膜像のサイズの幾何学的関係に注目した研究がなされてきた。そこで、運動と幾何学的関係のいずれに基づいて拡大量から移動距離が知覚されるのかを検証した。

刺激は実験1と同じくFASとSASが継時的に提示された。FASとSASは実験1と異なり等速で接近するのではなく、sin関数もしくは一次関数に従って拡大した。被験者の課題は実験1と同じく、FASの移動距離を100とした時のSASの移動距離を判断することであった。もし、被験者が接近対象の網膜像の運動を手がかりに接近対象の移動距離を判断しているのであれば、初期サイズ、接近終了サイズ、提示時間が等しいsin関数と一次関数のSASの主観的移動距離の間に差が見られることが予想された。また、被験者が接近対象の幾何学的手がかりを用いて接近対象の移動距離を判断しているのであれば、sin関数と一次関数という拡大関数以外の要因がすべて等しいSASの主観的移動距離の間に差が見られないことが予想された。

実験の結果、sin関数と一次関数の拡大関数をもつSASの主観的移動距離を比較したところ、一次関数のSASの主観的移動距離の方が長く知覚されたことが示された。この結果は、被験者が接近対象の運動を手がかりに接近対象の移動距離を判断していることを示唆していた。そして、接近対象の移動距離が、その網膜像の拡大速度を時間に関する積分に対応した処理が行われたことを示していた。

本章で行われた実験から、接近対象の主観的移動距離は接近対象の網膜像の拡大量により決定されていることが示された。さらに、接近対象の主観的移動距離が、網膜像の時間に関する積分に対応した処理が行われることにより知覚されることが示された。

4章

接近対象の移動距離知覚における拡大運動情報と幾何学的情報の関係

4-1 実験 6

目的：

実験 1 で使用した刺激は、FAS と SAS が断続的に提示されたため、被験者が FAS と SAS を同一の対象である判断したのか、異なる対象であると判断したのかについて不明であった。そこで、本実験では、FAS の終了サイズと SAS の初期サイズを同一にし、FAS の提示に続いて SAS が提示された。この操作により、認知的に一つの対象が接近する状況をシミュレートした。認知的大きさが等しくなるので、知覚的処理から得られる移動距離が純粹に抽出される。実験 6 では、FAS と SAS に対して、同一の認知的処理がなされる状況においても、拡大量によって FAS と SAS の主観的移動距離が決定されているのかを調べた。

被験者：正常視力を有する成人男性 4 人、女性 1 人（22 才～29 才：平均年齢 24.6 才）

装置：実験 1 と同じであった。

刺激：

被験者がキーを押すと、実験 1 と同様に、ウィンドウの左から 9.9cm、上から 7.4cm の位置に中心がくるように正方形が出現した(fig. 23)。正方形は、その場で 1.00sec 静止した後、1.00sec 間拡大した。その後、1.00sec 間、正方形はその場で停止した。そして、再度正方形は 1.00sec 拡大し、1.00sec 停止した後に消失した。そして、1.00sec のブランク画面の後に被験者は課題を行った。全ての正方形は、等速で接近するように式(3)に従って拡大した。最初の 1.00sec 間、拡大する正方形を FAS、2 番目の 1.00sec 間に拡大する正方形を SAS とした。FAS と SAS の網膜上のサイズは異なるが、認知的には両者が同一の正方形となるようにシミュレートされた。また、SAS のほうが FAS より後の期間の正方形をさしているため、常に SAS のほうが FAS より被験者に近い位置に存在するように知覚された。また、FAS と SAS は同じ対象であるようにシミュレートされているため、FAS の終了サイズと SAS の初期サイズはどの刺激においても同じであった。FAS には 2 種類（ 0.20° 、 0.30° ）の初期サイズが存在した。さらに、FAS と SAS の衝突時間は 3 種類（3.00sec、2.00sec、1.67sec）存在し、同一刺激中の SAS と FAS の衝突時間は同じであった。FAS には 2 種類の初期サイズと、3 種類の衝突時間が存在した。初期サイズ、衝突時間を組み合わせた結果、合計 6 種類の異なる FAS が存在した。そして、6 種のそれぞれ

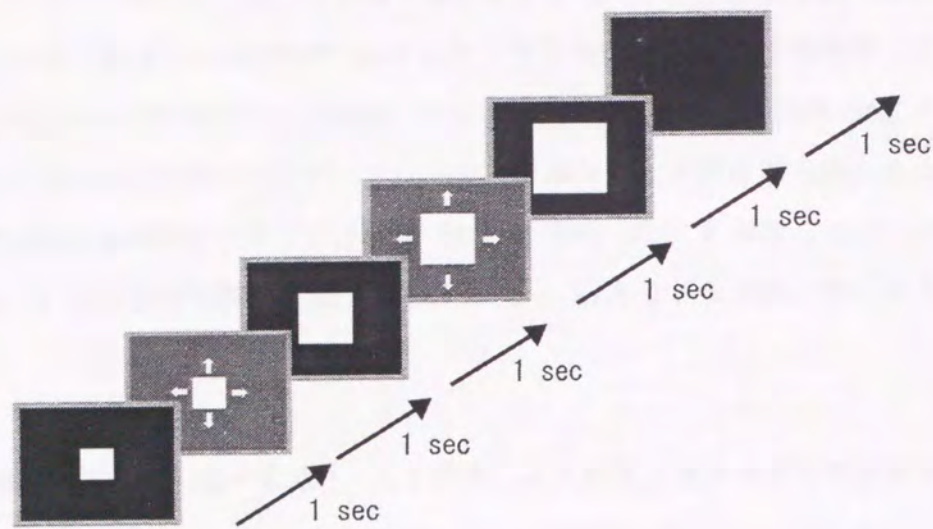


fig. 23 実験6の刺激シーケンス

のFASに対応したSASが存在した。SASの初期サイズは、 0.30° 、 0.40° 、 0.50° 、 0.45° 、 0.60° 、 0.75° の6種類であった。(table 12, 13, 14)。

手続き：

実験1と同じであった。被験者は一つの刺激につき10回、合計60試行に反応した。観察距離は200cmであった。

結果：

FASの初期サイズに関して2つのグループに分割し、それぞれのグループ内で分析を行った。FASの初期サイズが 0.2° (FAS(0.2))のグループにおいて、SASの拡大量が 0.15° 、 0.40° 、 0.75° である時のそれぞれの被験者の反応の平均値を求めたところ、102.90、95.00、94.10であった (fig. 24)。FAS(0.2)グループで、SASのFASに対する主観的移動距離の平均値に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、SASの拡大量の間に有意な差が見られた($F(2,98)=4.72$, $p<.05$)。チューキー法による下位検定の結果、SASの拡大量が 0.15° と 0.40° の間、 0.15° と 0.75° の間に有意な差が見られた。また、FASの初期サイズが 0.30° (FAS(0.3))のグループにおいて、SASの拡大量が 0.23° 、 0.60° 、 1.13° である時のそれぞれの被験者の反応の平均値を求めたところ、90.20、89.00、96.80であった (fig. 24)。FAS(0.3)グループで、SASの主観的移動距離の平均値に関する一要因被験者内計画の分散分析の結果、SASの拡大量の間には有意な差はみられなかった($F(2,98)=2.75$, $p>.05$)。

本実験で使用したすべての刺激において、FASはSASに比べ拡大量が多く設定されていた。もし、被験者が拡大量を手がかりにして正方形の移動量を判断していたのであれば、被験者の反応した値は、すべての刺激において100を超える値が得られることが予想された。しかし、被験者の反応の平均値は、FAS(0.2)グループ内のSASの拡大量が 0.15° の主観的移動距離以外すべて100を下まわっていた。さらに、FAS(0.3)グループでは、拡大量の効果がみられなかった。これらは、本実験で提示した刺激に対し、被験者は拡大量を手がかりにして奥行き移動量を判断していないことを示していた。

FAS(0.3)グループでは、拡大量の間に有意な差がみられなかったが、FAS(0.2)のグループでは、拡大量の間に有意な差がみられた。しかし、この統計的に有意な差を拡大量の効果であるとは考えにくい。その理由は以下の通りである。初期サイズが 0.2° のFAS、初期サイズが 0.30° のSAS、それぞれの拡大量は、 0.10° 、 0.15° と非常に小さく、その

table 12 実験6で使したFASの属性

初期サイズ(°)	終了サイズ(°)	拡大量(°)	衝突時間(sec)
0.20	0.30	0.10	3.00
0.20	0.40	0.20	2.00
0.20	0.50	0.30	1.67
0.30	0.45	0.15	3.00
0.30	0.60	0.30	2.00
0.30	0.75	0.45	1.67

* 提示時間は、いずれも1.0secであった。

table 13 実験6で使したSASの属性

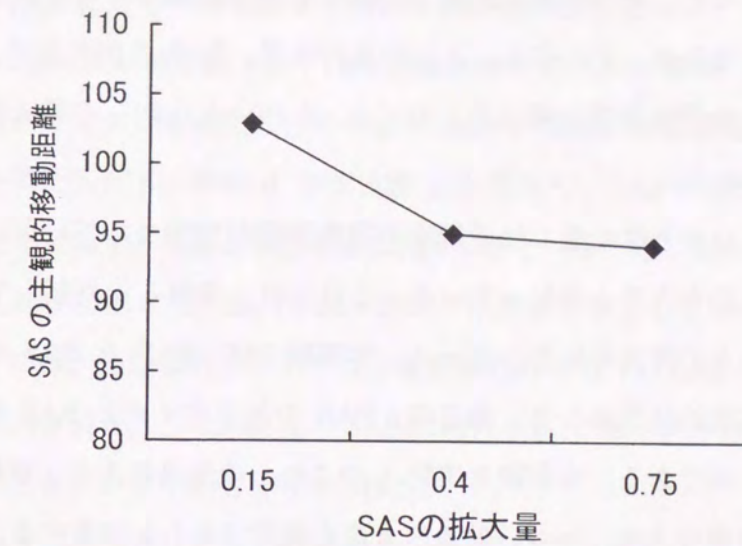
初期サイズ(°)	終了サイズ(°)	拡大量(°)	衝突時間(sec)
0.30	0.45	0.15	3.00
0.40	0.80	0.40	2.00
0.50	1.25	0.75	1.67
0.45	0.68	0.23	3.00
0.60	1.20	0.60	2.00
0.75	1.88	1.13	1.67

* 提示時間は、いずれも1.0secであった。

table 14 実験6で使したFASとSASの組み合わせ

FASの初期サイズ(°)	SASの初期サイズ(°)
0.20	0.30
0.20	0.40
0.20	0.50
0.30	0.45
0.30	0.60
0.30	0.75

(A)



(B)

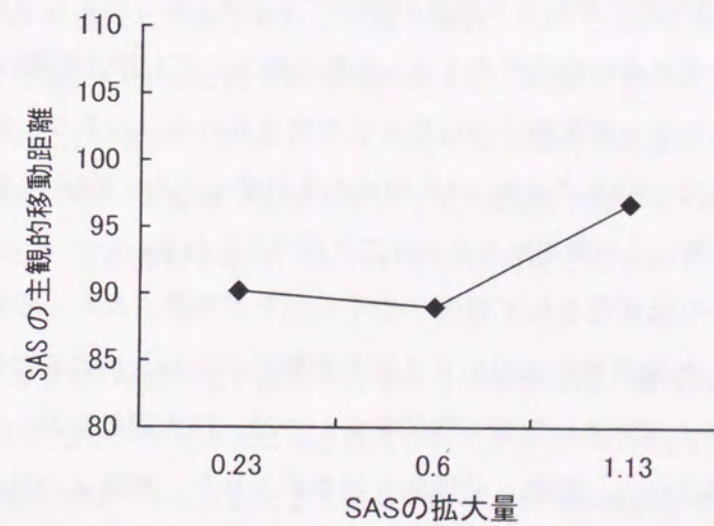


fig. 24 SASの主観的移動距離。(A)(B)は、それぞれFASの初期サイズが0.2°, 0.3°の時のSASの主観的移動距離を示す。

差も 0.05° と小さかった。また、両者の初期サイズの差 (0.10°) も小さかった。この拡大量、初期サイズの差が微量であるため、被験者は、FAS と SAS の移動量の差を判断することが困難となり、その結果、FAS と SAS の移動距離が同じであると判断したことが考えられるからである。それゆえ、下位検定の結果、SAS の拡大量が 0.15° と 0.40° 、 0.15° と 0.75° の間に有意な差はみられても、 0.15° と 0.40° の間に有意な差はみられなかったと解釈される。

この結果、すなわち拡大量で接近対象の移動距離が判断されていないという結果は、これまでの実験結果と大きく異なっている。これには、実験 1 と比較して、刺激上の差異が影響していることが考えられる。第一に、本実験では、FAS と SAS の間にブランク画面を挿入せずに連続的に提示した、第二に、FAS の終了サイズと SAS の初期サイズが同じであったという点である。本実験と実験 1 のこれらの差異により、被験者が FAS と SAS が明確に同じ対象であり、一つの対象の一連の運動であると知覚することができるようになったことが、実験 1 の被験者の反応と本実験の被験者の反応が異なった原因と考えられる。

では、どうしてこれらの刺激の性質の違いにより被験者の反応が実験 1 と異なったのであろうか。それは、FAS と SAS の初期の位置関係が実験 1 の刺激に比べより明確になったことにより、「遠距離に存在する対象が接近するとき、少し拡大しても接近距離は長い。」「近距離に存在する対象が接近するとき、大量に拡大しても接近距離は短い。」という幾何学的知識を利用することが可能になったことが考えられる。つまり、FAS は SAS よりも遠方に存在するので、FAS よりも SAS の拡大量が多くても、FAS の移動距離の方が SAS の移動距離よりも長いと判断されたということが考えられる。

拡大運動手がかりは利用されず幾何学的手法がかりが利用されたと示唆されることから、実験 6 で示唆された幾何学的手法がかりは拡大運動手がかりと排他的な関係にあると考えられる。一方、実験 4 で示された幾何学的手法がかりは、拡大運動手がかりと独立加算的な関係であることが示された。実験 6 の幾何学的手法がかりと、実験 4 の幾何学的手法がかりは異なる手がかりなのであろうか。

実験 4 と実験 6 の刺激の差異は、FAS が提示された後、SAS が提示されるまでの間にブランク画面が挿入されるか、FAS が静止したまま続いて SAS が提示されるかという点である。実験 4 では、FAS と SAS の間にブランク画面が挿入されたので、FAS と SAS、それぞれ個々別々に拡大運動手がかりが利用された。この時、幾何学的手法がかりである初期サイズの差は、FAS と SAS の奥行き位置の違いとして利用された。一方、実験 6 では、FAS に対しては拡大運動手がかりが利用されたが、SAS に対しては FAS の主観的移動距

離に幾何学的手法がかりから得られる FAS に対する SAS の移動量の比率が計算されて SAS の移動距離が知覚された。

つまり、実験 6 の SAS に対しては実験 4 で利用された奥行き位置という幾何学的情報だけではなく、FAS の接近開始時と接近終了時の網膜像のサイズ比と SAS の接近開始時と接近終了時の網膜像のサイズ比を比較し、その値と FAS の主観的移動距離から SAS の移動距離を判断したと考えられる。実験 6 では実験 4 と異なり、FAS の移動距離に対する SAS の移動距離の比率に関する情報まで被験者は利用したということになる。

このように、実験 4 の SAS には、幾何学的手法がかりは位置情報として利用されたのに対し、実験 6 の SAS には、幾何学的手法がかりは位置情報だけでなく、FAS の移動距離に対する比率としても利用された。この実験 6 の SAS に利用された幾何学的手法がかりは、二段階説の SDIH に従った手がかりであると考えられる。

ではどうして、FAS が提示された後、SAS が提示されるまでの間にブランク画面が挿入されるか否かによって、利用される幾何学的手法がかりが異なったのだろうか。実験 4 のように FAS と SAS が断続的に提示される場合、FAS と SAS を「種類は同じであるが異なる対象である」と認識されたために、FAS と SAS に拡大運動手がかりが利用された。一方、実験 6 の FAS と SAS が連続的に提示される刺激の場合、FAS と SAS が「全く同じ対象である」と認識されたため、FAS には拡大運動手がかりが、SAS にはサイズ比による幾何学的手法がかりが利用された。実験 6 の SAS にサイズ比による幾何学的手法がかりが利用された理由は、FAS と SAS が同一の対象であるということが認識されやすいので、拡大運動手がかりよりもサイズ比による幾何学的手法がかりが容易に利用できるからであると考えられる。

本実験から、FAS と SAS の同一性が確保されるような刺激では、拡大運動により主観的移動量が利用されるのではなく、サイズ比による幾何学的手法がかりが利用されることが示唆された。また、本実験で使用されたサイズ比による幾何学的手法がかりが実験 4 で利用された初期サイズによる幾何学的手法がかりとは異なることが示された。

4-2 実験 7

目的：

実験 1 から実験 5 では FAS と SAS が分離された刺激を用い、網膜像のサイズの拡大速度が統合されて移動距離が知覚されることが示された。一方、FAS と SAS が分離されずに提示された実験 6 では、網膜像のサイズの増加速度の統合以外に、接近対象の奥行き位

置と網膜像の接近前後におけるサイズ比の幾何学的手がかりも移動距離知覚に影響していることが示唆された。この効果は、実験4におけるSASの初期サイズによる幾何学的手がかりによる効果とは異なることが考えられた。

このように、これまでの実験から接近対象の移動距離知覚には網膜像の拡大運動手がかりによる知覚過程が働く場合と、2種類の幾何学的手がかりによる知覚過程が働く場合があることが示唆された。しかし、実験1では、拡大量の効果だけが見られたが、実験6では、サイズ比による幾何学的手がかりの効果がみられたように、両者の関係について一貫した結果が得られなかった。そこで、実験7では拡大量を一定にし、サイズ比による幾何学的手がかりの利用の容易さを変化させることにより、拡大量と幾何学的手がかりのダイナミクスについて検討する。

被験者：正常視力を有する男性3人、女性2人（19才～22才：平均年齢21.0才）

装置：実験1と同じ

刺激：

実験1から実験5までの刺激と実験6の刺激の異なる点は2点存在した。実験1から実験5までは、FASが提示されて消失した後、SASが提示されるまでの間、画面は何も映されていないブランク画面であった。一方、実験6では、FASが提示された後、FASの拡大終了時のサイズのまま静止し消失しなかった。そして、静止したFASに続いてSASが提示された。これが実験1から実験5までの刺激と実験6の刺激における第一の異なる点である。第2の異なる点は、実験1から実験5までの刺激では、FASの接近終了サイズはSASの接近開始サイズよりも大きかったのに対し、実験6の刺激ではFASの接近終了時のサイズとSASの接近開始時のサイズが等しいという点である。

これら2つの相違点が意味することは、実験6の刺激は実験1から実験5の刺激に比べ明らかにFASとSASの同一性が保証されており、サイズ比による幾何学的手がかりを利用する事が容易になるということである。そこで、本実験の刺激ではFASとSASの提示間隔とサイズの一貫性を変化させることによりサイズ比による幾何学的手がかりの利用の容易さを操作した。

もし、接近対象の移動距離を知覚する際、サイズ比による幾何学的手がかりが利用され、その利用の容易性に従って、サイズ比による幾何学的手がかりの移動距離知覚に対する

影響が強くなるのであれば、FASとSASの提示間隔を増加させるに従ってサイズ比による幾何学的手がかりから予想される移動距離から主観的移動距離が離反していくことが予想される。

実験1と同じく等速で接近するようにシミュレートされた正方形が連続して2回提示された（FAS、SAS）。被験者がキーを押した後、FASが出現した。そして、FASは接近開始時のサイズで1.0sec静止した後、2.0sec接近した。FASとSASの提示間隔は、0.3secと1.0secの2種類存在した。そしてSASは接近開始時のサイズで1.0sec静止した後、2.0sec接近した。SASが提示された後1.0sec間何もディスプレイ上に映されない状態が続いた。FASとSASの提示間隔、SASの初期サイズを操作することにより、C条件、I(0.3)条件、I(1.0)条件、ID(1.0)条件を設けた。

C条件では、FASが提示された後、FASの提示終了サイズの正方形が1.0sec間、画面上に静止して提示された後にSASが提示された。I(0.3)条件では、FASが提示された後、0.3sec間ディスプレイ上に何も提示されない状態が続いた後にSASが提示された。I(1.0)条件では、FASが提示された後、1.0sec間ディスプレイ上に何も提示されない状態が続いた後にSASが提示された。C、I(0.3)、I(1.0)、のすべての条件では、FASの終了サイズとSASの初期サイズが同じサイズであった。これら3つの条件では、FASとSASの提示間隔を操作することによってFASとSASの同一性を操作した。

最後にID(1.0)条件では、FASが提示された後、1.0sec間ディスプレイ上に何も提示されない状態が続いた後にSASが提示された。さらに、FASの終了サイズはSASの初期サイズよりも大きかった（FASの終了サイズが 0.6° の時、SASの初期サイズは、 0.8° 、FASの終了サイズが 0.75° の時、SASの初期サイズは、 0.9° であった。）。I(1.0)条件とID(1.0)条件の違いは、FASの終了サイズとSASの初期サイズの異同の差であった。このようにFASとSASのサイズの同一性を操作することにより、幾何学的手がかりの利用の容易さを操作した。

このように、FASとSASの提示間隔や、FASの終了サイズとSASの初期サイズの操作により、サイズ比による幾何学的手がかりの利用の容易さを操作した。この時、提示されるFASの初期サイズは、C条件、I(0.3)条件、I(1.0)条件、ID(1.0)条件のすべての条件で、 0.2° と 0.3° の2種類存在した。SASの奥行き位置情報の違いによる4つの条件、2種類の初期サイズを設けた結果、合計8種類の異なる刺激が存在した。(table 15, 16)

table 15 実験7で使用したFASの属性

初期サイズ(°)	終了サイズ(°)	拡大量(°)	衝突時間(sec)
0.20	0.60	0.40	3.00
0.30	0.75	0.45	3.30

* 提示時間はいずれも2.0secであった。

table 16 各条件ごとのFASとSAS。同一行内のFASとSASの組み合わせは、実際の刺激に使用された組み合わせであった。

FAS(初期サイズ, 終了サイズ)	SASの提示条件	SASの初期サイズ	SASの終了サイズ	SASの拡大量	SASの衝突時間(sec)
(0.20, 0.60)	C条件	0.60	1.80	1.20	3.00
	I(0.3)条件	0.60	1.80	1.20	3.00
	I(1.0)条件	0.60	1.80	1.20	3.00
	ID(1.0)条件	0.80	1.80	1.00	3.60
(0.30, 0.75)	C条件	0.75	1.88	1.13	3.30
	I(0.3)条件	0.75	1.88	1.13	3.30
	I(1.0)条件	0.75	1.88	1.13	3.30
	ID(1.0)条件	0.90	1.88	0.98	3.85

* サイズ、拡大量はいずれも視角(°)。

* SASの提示時間はいずれも2.0secであった。

手続き:

実験1と同様であった。被験者は一つの刺激につき10回、合計80試行に反応した。観察距離は200cmであった。

結果と考察:

fig. 25を見ると、被験者の反応傾向が大きく異なるために2つのグループに分けて考察する。グループ1は、被験者2、被験者3、被験者4の3人のグループで、グループ2は、被験者1、被験者5の2人のグループである。

グループ1の結果の考察

グループ1において、FASの初期サイズが0.2°の時、サイズ比による幾何学的手がかりの利用性を要因とする一要因被験者内計画の分散分析を行った。その結果、サイズ比による幾何学的手がかりの利用性の主効果に有意な差が見られた。(F(3,87)=4.35, p<.01)。サイズ比による幾何学的手がかりの利用性要因において、チューキー法による下位検定を行ったところ、C条件とI(1.0)条件の間、I(1.0)条件、ID(1.0)条件の間に有意な差が見られた(いずれも、p<.05)。

FASの初期サイズが0.2°である時、C条件、I(1.0)条件、I(0.3)条件、ID(1.0)条件における、被験者のSASの移動量のそれぞれの平均値は、98.6、101.9、103.3、98.9であった。ID(1.0)条件のSAS拡大量は、FASの拡大量よりも大きかった。しかし、ID(1.0)条件におけるSASの主観的移動距離の平均値が100以下であった。これらの結果から、拡大運動のみが手がかりとして利用されていることは限らないことが示唆された。

FASの接近開始時のサイズと接近終了時のサイズの比率はSASのその値と等しいため、サイズ比による幾何学的手がかりにより、SASのFASに対する移動量の比率を被験者が判断していたのであれば、被験者の反応は100に近い値を示すことが予想される。一方、SASの拡大量はFASの拡大量よりも大きいため、被験者が拡大運動手がかりにより判断していたのであれば、被験者の反応は100を超える値を示すことが予想される。

実験の結果、サイズ比による幾何学的手がかりが容易に利用可能なC条件では、100に近い値が示された。これは、幾何学的手がかりが用意に利用可能なC条件では、被験者が幾何学的手がかりを利用して示唆していた。また、C条件、I(0.3)条件、I(1.0)条件と、FASとSASの提示間隔が増加するにつれて、SASの主観的移動距離が増加した。この結果とC条件とI(1.0)条件の間に有意な差が見られたことから、SASとFASの提示間隔が増加するにつれて、使用する手がかりを拡大運動手がかりにシフトさせていったこ

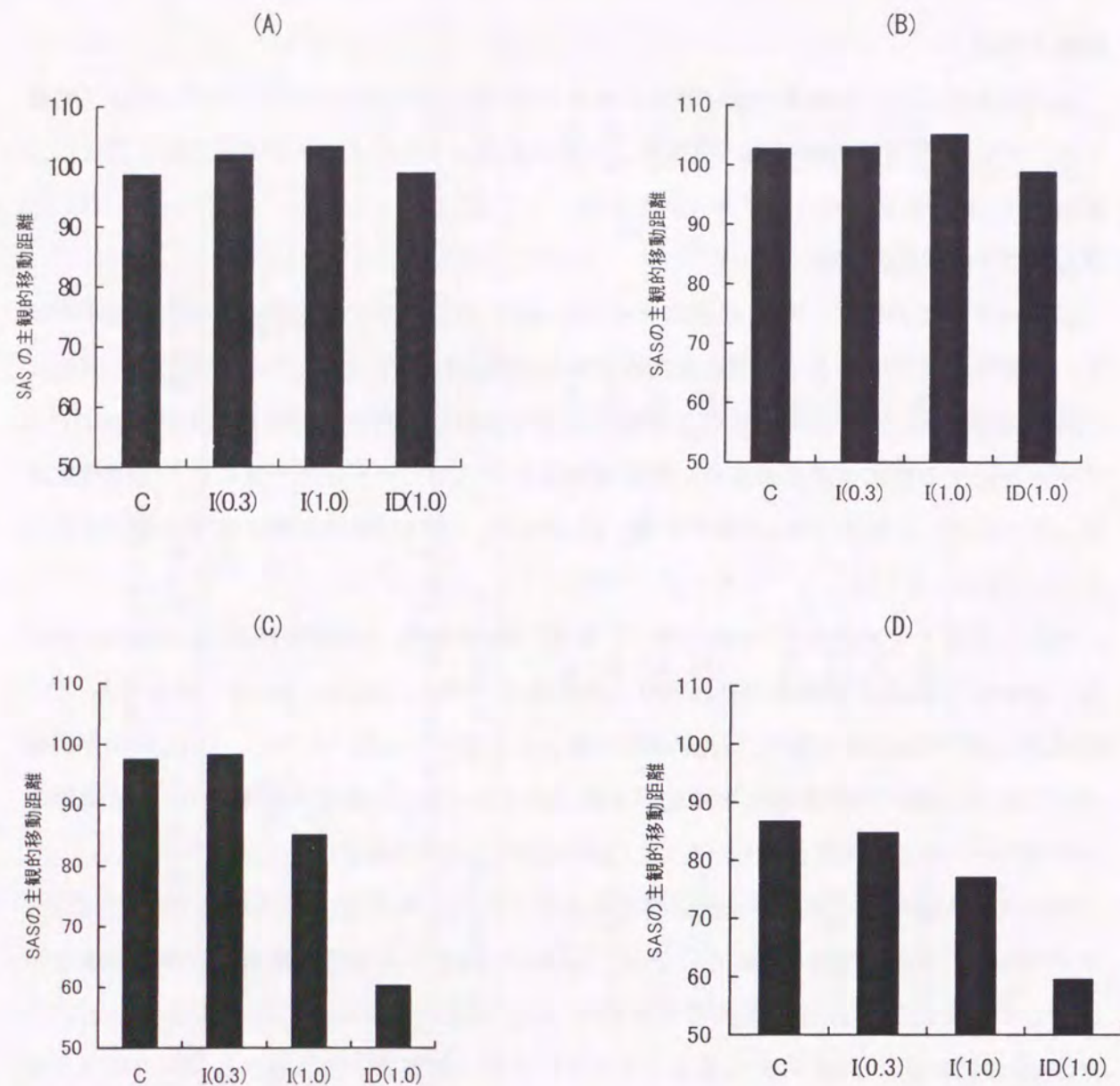


fig. 25 実験7で得られたSASの主観的移動距離。(A)はグループ1でFASの初期サイズ0.2°、(B)はグループ1でFASの初期サイズ0.3°。(C)はグループ2でFASの初期サイズ0.2°、(D)はグループ2でFASの初期サイズ0.3°の時の、SASの主観的移動距離を示す。

とが示唆された。これらの結果をまとめると、C条件のように幾何学の手がかりが容易に利用可能な刺激では、移動距離知覚にサイズ比による幾何学の手がかりを利用するが、幾何学の手がかりの利用が困難になるにつれて拡大運動手がかりへと使用する手がかりをシフトさせていくことが示唆された。

FASの初期サイズが0.3°の時、サイズ比による幾何学の手がかりの利用性を要因とする一要因被験者内計画の分散分析を行った。その結果、サイズ比による幾何学の手がかりの利用性に有意な差が見られた($F(3,87)=4.86, p<.01$)。チューキー法による下位検定の結果、I(1.0)条件、ID(1.0)条件の間に有意な差が見られた($p<.01$)。また、FASの初期サイズが0.3°である時、C条件、I(0.3)条件、I(1.0)条件、ID(1.0)条件における、SASの主観的移動距離の平均値は、102.7、103.0、105.0、98.8であった。C条件、I(0.3)条件、I(1.0)条件という提示間隔の異なる3つの条件間に有意な差は見られないが、FASの初期サイズが0.2°のグループと同様に、FASとSASの提示間隔が長くなるにつれてSASの主観的移動距離が増加する傾向が見られた。

グループ2の結果の考察

グループ2において、FASの初期サイズが0.2°、0.3°の時、サイズ比による幾何学の手がかりの利用性を要因とする一要因被験者内計画の分散分析を行った。その結果、サイズ比による幾何学の手がかりの利用性に有意な差が見られた($F(3,57)=10.08, p<.01$)。

($F(3,57)=16.10, p<.01$)。チューキー法による下位検定を行ったところ、SASの初期サイズが0.2°の時、C条件とID(1.0)条件の間($p<.01$)、I(0.3)条件とID(1.0)条件の間($p<.05$)、I(1.0)条件とID(1.0)条件の間($p<.01$)に有意な差が見られた。SASの初期サイズが0.3°の時、C条件とID(1.0)条件の間($p<.01$)、I(0.3)条件とID(1.0)条件の間($p<.01$)、I(1.0)条件とID(1.0)条件の間($p<.01$)に有意な差が見られた。

FASの初期サイズが0.2°である時、C条件、I(1.0)条件、I(0.3)条件、ID(1.0)条件における、SASの主観的移動距離のそれぞれの平均値は、86.8、84.8、77.0、59.5であった。また、FASの初期サイズが0.3°である時、C条件、I(1.0)条件、I(0.3)条件、ID(1.0)条件における、SASの主観的移動距離のそれぞれの平均値は、97.5、85.0、98.3、60.3であった。

ID(1.0)条件のSAS拡大量は、FASの拡大量よりも大きかった。しかし、ID(1.0)条件におけるSASの主観的移動距離の平均値が100以下であった。さらに、ID(1.0)は、他の条件におけるSASの主観的移動距離よりも有意に小さいことから、FASの初期サイズが

0.2° のグループでは、拡大運動による効果が見られないことを示していた。被験者の判断がすべての条件で 100 以下であることから、拡大量の効果と云い難い。この場面では、幾何学的手がかりが優先的に利用されていた可能性が示唆された。

グループ 1 と異なり、グループ 2 では、FAS と SAS の提示間隔が長くなるにつれて、被験者の反応が小さくなっていった。この違いは、グループ 1 の被験者が、FAS の接近終了時の奥行き位置と SAS の接近開始時の奥行き位置を同じ位置と判断したのに対して、グループ 2 の被験者は、SAS の接近開始時の奥行き位置を FAS の終了開始時の奥行き位置よりも手前と判断したことによると考えられた。

この原因として、初期サイズによる奥行き位置とその網膜像のサイズとの関係というサイズ比による幾何学的手がかり以外のより認知的な要因を想定しなければならない可能性がある。例えば、FAS が消失したブランク画面中、被験者は FAS が接近し続けていると判断し、SAS が初期サイズによる幾何学的手がかりから予想される位置よりも手前に存在すると判断する。その結果、SAS の主観的な大きさが物理的な大きさよりも過大視されることにより、サイズ比による幾何学的手がかりから得られる値が FAS よりも SAS の値が小さくなる。ゆえに、FAS と SAS の間にブランク画面があると、SAS のサイズ比による幾何学的手がかりから得られる値が FAS よりも小さい値になるので、被験者の判断が、100 よりも小さくなる。

この仮定に立つと、FAS のブランク画面中の接近距離がブランク画面の長さに対応して長くなることが予想される。実際、FAS と SAS のブランク画面が長くなるにつれて、グループ 2 の被験者の主観的移動距離が短くなったことから、この仮定は支持される。

グループ 1 グループ 2 の結果の考察

グループ 1 の被験者では、FAS の初期サイズ 0.20° のグループで、FAS と SAS の提示間隔を広げるにつれて、SAS の主観的移動距離は増加した。また、FAS の初期サイズが 0.30° のグループにおいても、同じ傾向がみられた。これは、被験者がサイズ比による幾何学的移動距離から拡大運動手がかりにシフトしていったことを示唆していた。

一方、グループ 2 の被験者では、FAS の初期サイズ 0.20°、0.30° の両グループで、FAS と SAS の提示間隔を広げるにつれて、SAS の主観的移動距離は増加するという傾向はみられなかった。実験 1 の拡大運動手がかりや実験 4 における初期サイズの効果と異なり、グループ 2 の被験者の結果は、サイズ比による幾何学的手がかりや初期サイズによる幾何学的手がかり以外の幾何学的手がかりを想定しなければならない可能性を示唆していた。

このように、グループ間に主観的移動量の差が見られたことは、幾何学的手がかりから得られる情報には個人差を想定しなければならない可能性がある。

4-3 4 章のまとめ

本章では、接近対象の移動距離を知覚する際、網膜像の拡大運動手がかり以外に接近対象の奥行き位置と網膜像のサイズの比率という、サイズ比による幾何学的手がかりが積極的に利用されるかどうかについて検討した。さらに、網膜像の拡大運動手がかりとサイズ比による幾何学的手がかりの関係についても検討した。

実験 6 では、FAS と SAS が同じ対象であるという、認知的処理がなされる状況においても、拡大量によって FAS と SAS の主観的移動距離が決定されているのかを検証した。実験 1 から実験 5 では、FAS が提示された後、SAS が提示されるまでの間にブランク画面が挿入されていたが、実験 6 では FAS が提示された後、FAS の接近終了時のサイズで FAS は静止した。その後 SAS がブランク画面なしで提示された。このため、FAS の終了サイズと SAS の初期サイズは同じサイズとなった。その結果、FAS と SAS が分離されて知覚されず、一連の運動として知覚された。このように、FAS と SAS が同じ対象であるという認識が観察者に生じることにより、SAS の FAS に対する相対的な奥行き位置をその網膜像の大きさから容易に知覚する事が可能になった。被験者の課題は、静止するまでの FAS の移動距離を 100 とした時の SAS の相対移動距離を判断することであった。

実験の結果、これまでの実験結果と異なり、拡大量の増加と共に SAS の主観的移動距離は増加しなかった。この結果は、これまでの実験とは利用される手がかりが異なるからであると解釈された。すなわち、被験者は FAS と SAS を明確に同一の対象であると認識し、一つの対象の一連の運動であると知覚したことにより可能になったことによることが示唆された。このため、被験者は接近対象のサイズ比による幾何学的手がかりを容易に利用することが可能になり、拡大運動手がかりよりも重視した。

実験 6 では、接近対象の移動距離の知覚に際して、サイズ比による幾何学的手がかりが利用されることが示唆されたため、実験 7 では拡大運動手がかりとサイズ比による幾何学的手がかりの関係について検討した。刺激は、実験 1 から実験 6 までと同様に、FAS と SAS が継続的に提示された。そして、FAS と SAS の提示間隔を操作して、C 条件、I(0.3) 条件、I(1.0) 条件という 3 つの条件を設けた。さらに、SAS の初期サイズが FAS の初期サイズよりも大きい、ID(1.0) 条件を設けた。このように、FAS と SAS の提示間隔、SAS の初期サイズを変化させることで、FAS と SAS の同一性の認識を変化させ、サイズ比によ

る幾何学の手がかりを利用する容易さを操作した。

実験の結果、5人中3人の被験者で幾何学の手がかりの容易さが減少するにつれて、SASの主観的移動距離が増加した。この結果は、幾何学の手がかりの利用の容易さが減少したことにより、幾何学の手がかりから拡大運動手がかりへと使用される手がかりがシフトしていったことを示唆していた。

5章 総合論議

5-1 結果のまとめ

本来、投影像から接近対象の接近距離を計算することは不可能であるにもかかわらず、我々は、接近する対象に対して逃避・捕獲等の適切な行動を難なくとることが可能である。本研究の目的は、観察者が接近対象の移動距離を知覚するとき、物理学的に算出される移動距離を知覚することが可能か否かを検討し、さらに、接近対象の移動距離を知覚するとき、いかなる視覚経路を経て知覚されているのかについて明確にし、接近対象の移動距離知覚のモデルを提案することである。

実験 1、2、3 では、接近対象の主観的移動距離と物理学的に算出される値との比較を行った。実験 4、5 では、接近対象の移動距離を知覚するメカニズムに言及した。さらに、実験 6、7 では、実験 4、5 で示された網膜像の拡大運動による手がかりと従来から研究されてきた接近前後の網膜像のサイズ比による幾何学の手がかりとの関係について検討した。

実験 1 では、対象が接近する際に生じる網膜像の拡大から、人は理論的に算出される移動距離と同じ距離を知覚することが可能かどうかについて検討した。その結果、主観的移動距離と物理学的に算出される値が一致しなかった(fig. 13)。さらに、対象の消失時と拡大開始時のサイズの差である拡大量が主観的移動距離を決定していることが示唆された。

実験 2 では、急激に検出閾値が上昇するとされる 1.5° を超える接近対象の主観的移動距離について検討した。FAS と SAS の初期サイズを実験 1 の 2 倍にした結果、一部の条件で、SAS の終了サイズが 1.5° を超えていた。これは、 1.5° を超える接近対象と超えない接近対象の主観的移動距離を比較するためであった。その結果、実験 1 と同様、SAS の拡大量と共に主観的移動距離が増加した(fig. 14)。これは、実験 1 と同じ傾向であった。これらから、接近対象のサイズが 1.5° を超えても、接近運動が知覚されることが示唆された。

実験 3 では、すべての条件で 1.5° を超える接近対象の主観的移動距離について検討した。FAS と SAS の初期サイズを実験 2 の 2 倍にした結果、全ての条件で、SAS の終了サイズが 1.5° を超えていた。結果、実験 2 と同様、SAS の拡大量と共に主観的移動距離が増加する傾向がみられた(fig. 15)。これは、実験 1、2 と同じ傾向であった。これらから、 4.8° を超えても奥行き運動が知覚できなくなるとはいえないことが示唆された。

実験 1 ではすべてのグループにおいて、SAS の主観的移動量の間には有意な差が見られたが、実験 2 では、二つの条件間の主観的移動距離に有意な差が見られなかった。さらに実験 3 では、四つの条件間の主観的移動距離に有意な差が見られなかった。このように、接近対象のサイズが増加するにつれて、有意差が見られない条件が増加していた。これらは、Beverley and Regan (1979b)らの結果と同様の傾向であった。しかし、接近対象の奥行き

運動の検出閾が急激に上昇されるとする 1.5° を超える対象でも、全く移動距離が知覚されなくなると言うのではなく、徐々に安定した移動距離が知覚されづらくなることが示唆された。

実験 4 では、実験 1 で不明確であった SAS の拡大量、初期サイズのいずれに主観的移動量が決定されているのかを調べた。その結果、SAS の初期サイズが一定であるにもかかわらず SAS の拡大量の増加と共に主観的移動距離が増加したことから (fig. 16)、接近対象の拡大量が接近対象の移動距離を決定していることが示唆された。FAS と SAS の拡大量が同一であっても、100 以上になる場合があった。また、この結果は、拡大量以外に初期サイズも幾何学的な奥行き位置情報として利用されていることが示唆された。

実験 5 では、接近対象の移動距離を知覚する際に行われる処理について検討した。そこで、接近対象の移動距離を知覚する際、接近対象の移動距離とその網膜像の拡大量との幾何学的関係から移動距離が知覚されるのか、接近対象の網膜像の拡大運動を抽出し、その拡大運動から移動距離を知覚するのかを検証した。実験で使用した SAS には、sin 関数に従って拡大する条件と一次関数に従って拡大する条件が設けられた。すべての SAS は、幾何学的関係に関する要因である接近時間、初期サイズ、終了サイズはすべて等しかった。結果、sin 関数に従って拡大する SAS は一次関数に従って拡大する SAS に比べて主観的移動距離が短いことが示された。これは、被験者が sin 関数に従って拡大する SAS において、検出閾値を下まわった期間の拡大運動を移動距離情報として利用できなかったからである。つまり、被験者は、SAS の拡大運動を利用して移動距離を知覚していたことが示唆された。

実験 6 では、FAS と SAS の奥行き位置関係を明確にするため FAS の終了サイズと SAS の初期サイズを同一にし、FAS と SAS を連続的に提示した。FAS と SAS が途切れることなく提示されるため、FAS と SAS が明確に同一の対象であると認識された状況で、拡大運動手がかりが SAS の移動距離を決定しているのかどうかを調べた。その結果、被験者は、実験 6 の SAS の移動距離を拡大運動によって知覚していないことが示された。この結果は、これまでの実験結果と大きく異なっていた。実験 1 と異なり、FAS と SAS を連続的に提示したという刺激上の問題が考えられる。これらの刺激上の原因により FAS と SAS が明確に同じ対象であり、一つの対象の一連の運動であると知覚することができるようになった。その結果、実験 1 の被験者の反応と本実験の被験者の反応が異なる値になったと考えられる。

これは、FAS と SAS の接近開始時の奥行き位置が実験 1 の刺激に比べより明確になったことにより、FAS と SAS の移動距離とそれぞれの接近前後の網膜像のサイズ比の整合性

をとったためであると考えられる。つまり FAS の接近開始時と接近終了時の網膜像のサイズ比と SAS の接近開始時と接近終了時の網膜像のサイズ比を比較し、その値と FAS の主観的移動距離から SAS の移動距離を判断したと考えられた。

実験 7 では、接近対象の移動距離知覚におけるサイズ比による幾何学的手法がかりと拡大運動手がかりの関係について検討した。FAS と SAS の提示間隔を操作し、サイズ比による幾何学的手法がかりの利用のしやすさを操作したところ、5 人中 3 人の被験者で、サイズ比による幾何学的手法がかりが利用されにくくなるにつれて、サイズ比による幾何学的手法がかりから拡大運動手がかりへと使用される手がかりがシフトしていった。このことから、両者の手がかりの利用しやすさに従って、どちらの手がかりが利用されるのかが決定されることが示唆された。

これらの実験から 3 つの点が明らかになった。第一に、接近対象の主観的移動距離が物理学的に算出された値と一致しないこと。第二に、接近対象の主観的移動距離を提供する情報として、対象の網膜像の拡大運動から得られる情報と接近前後の接近対象のサイズ比から得られる幾何学的情報の 2 種類存在すること。第三に、拡大運動情報と幾何学的情報のどちらの情報も、移動距離情報として出力されるかどうかは利用可能性に依存すること。

5-2 本研究から導かれる接近対象の移動距離知覚のモデル

一連の実験の結果から導かれる接近対象の移動距離の知覚に関する処理モデルについて述べる。接近対象の移動距離を知覚する際に行われる処理は、大きく分けて二つの経路から成り立つ。第一の経路は、対象の接近に伴い変化する対象の網膜像からの運動情報により移動距離を抽出する経路である (fig. 26)。第二の経路は、対象の接近に伴い変化する対象の網膜像から、網膜像のサイズの変化と移動距離距離の幾何学的関係により移動距離を抽出する経路である。

まず、対象の各辺の運動信号が抽出される。これは、fig. 7 の LM²に当たる。そして、各辺の運動信号から上下、左右のそれぞれの相対運動が抽出される。これは、RM³で処理される。そして、上下方向の相対運動信号と左右方向の相対運動信号から大きさ変化信号

2.3.4 LM(local motion filter)、RM(relative motion filter)、MID(motion in depth stage)の用語は Regan and Hamstra (1993)のモデルから援用されている。

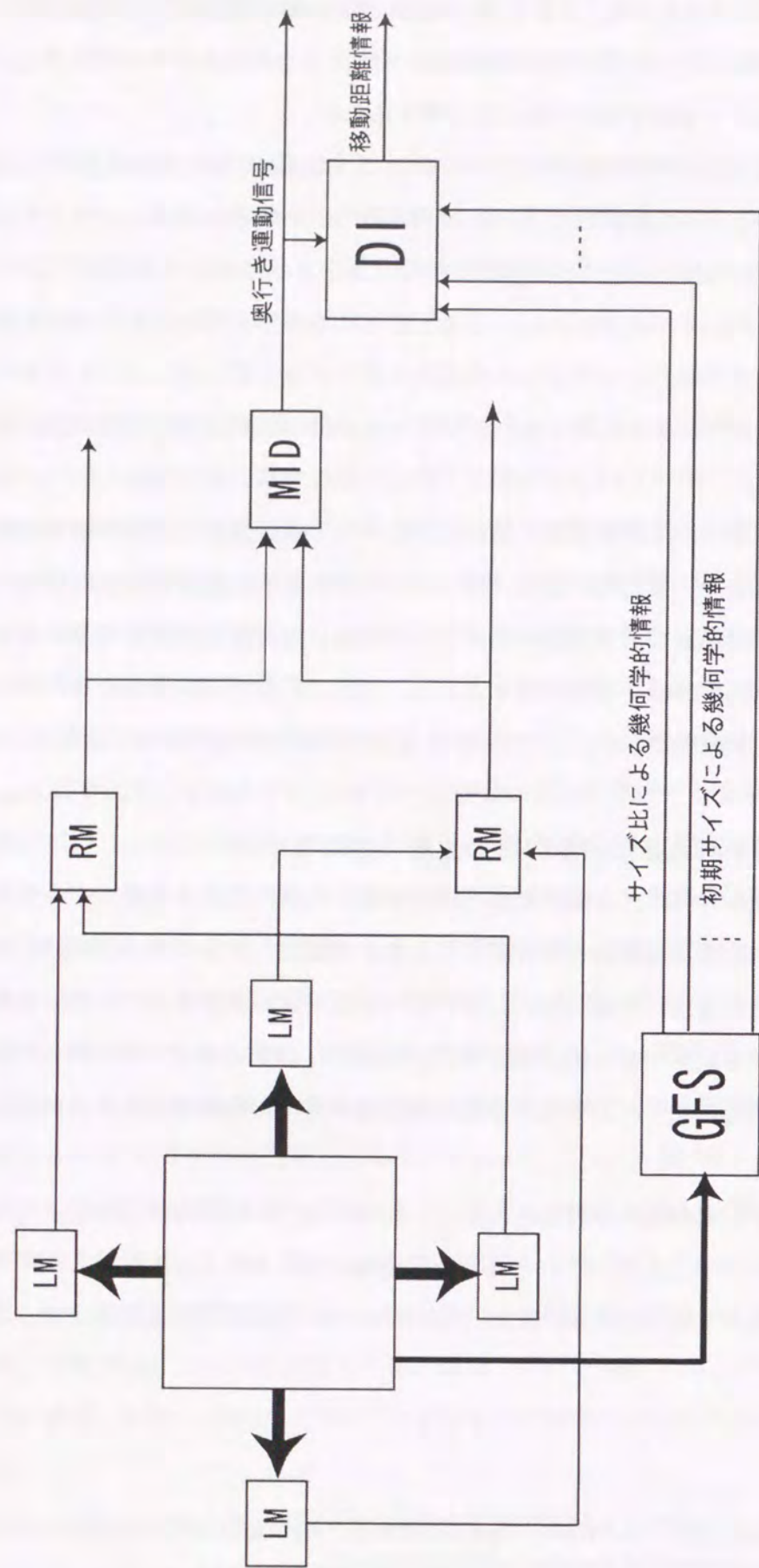


fig. 26 本研究から導かれる接近対象の移動距離知覚のモデル

が出力される。さらに大きさ変化信号のうち、上下方向の相対運動と左右方向の相対運動の比較から奥行き運動信号が出力される。この比較過程は、上下と左右の相対運動の大きさが等しいときに奥行き運動信号が最大値で出力されるようにチューニングされている。これらの処理は MID⁴で行われる。ここまでの処理については、Regan and Hamstra (1993) に準じた構成である。

MID から出力された奥行き運動信号は、DI に出力される。MID から出力される信号は、奥行き運動の速度信号であり、その速度は RM の大きさに比例した値となり、その信号は DI (distance integrator) に出力される。DI は MID の奥行き速度信号を時間で積分した値を移動距離信号として出力する。MID から受ける移動速度信号は、RM の上下・左右の相対速度に対応した値であるため、DI が受ける移動速度信号も RM の上下・左右の相対速度に対応した値になる。このように、RM から出力される相対速度信号を時間で積分した値と対応した網膜像の拡大率から移動距離信号が出力される経路を第一の経路とする。

第二の経路は、対象の網膜像とその奥行き距離との関係から移動距離の手がかりが出力される経路であり、対象の接近開始時の網膜像のサイズと接近終了時の網膜像のサイズの比率を比較することによる奥行き情報や、初期サイズによる奥行き位置情報などの情報が出力される経路である。これらの処理は GFS (geometric function stage)で行われ、GFS から出力された移動距離信号は、距離情報、位置情報はそれぞれ特定の経路を通過して DI に出力される。

第一の経路から出力された信号 (網膜像の拡大運動から出力される接近対象の移動距離信号) と第二の経路から出力された信号 (Swanston & Gogel (1986)の二段階説から出力される接近対象の移動距離信号) が、最終的に DI によって統合された結果、接近対象の移動距離が知覚される。このとき、GFS から DI に出力される経路の内、サイズ比による幾何学的手がかりは、それ自体が移動距離信号のため、第一の経路から出力される移動距離信号とは排他的な関係にある。

第一の経路から出力される拡大運動による移動距離信号と第二の経路から出力される幾何学的な関係から算出される移動距離信号のどちらが採択されるのかは、その刺激における手がかりの利用のしやすさによって確率的に振り分けられる。つまり、実験 1 のようなサイズ比による幾何学的手がかりが容易に利用できないような刺激では、拡大運動による手がかりが利用される確率が高くなるが、実験 6 のようなサイズ比による幾何学的手

がかりが容易な刺激に対しては、サイズ比による幾何学的手がかりが利用される確率が高くなる。このように考えると、実験1から実験3へとSASのサイズを大きくするにつれて、SASの初期サイズ間の有意な差の数が減少していった原因は、移動距離を判断する手がかりが拡大運動から、サイズ比による幾何学的手がかりにシフトしていったことにあると考えられる。

一方、実験4のように、拡大量の変化に関係なく一貫して被験者の判断が、拡大量から予想される値と一致しないグループが存在したことから、初期サイズによる奥行き位置信号のような位置情報は、第一の経路から出力される移動距離信号とは排他的な関係ではなく、独立加算的な関係にあると考えられる。

5-3 本研究のモデルによる実験結果の説明

実験1の結果を上記のモデルで説明すると、FASの四辺の運動がLMに検出される。そして、上下の二辺のLMからの運動信号は垂直方向の相対運動を受け持つ垂直方向RMに、左右の二辺のLMからの運動信号は水平方向の相対運動を受け持つ水平方向RMにそれぞれ送られる。MIDは、垂直・水平それぞれのRMの信号を比較し、奥行き速度信号をDIに送出する。第一の経路と同時に、幾何学的手がかりからも移動距離信号が出力される。そして、両方の移動距離信号がDIで統合されるが、実験1のFASの場合、FASの出現位置に関する情報が乏しいため、第二の経路よりも第一の経路の移動距離信号の方が優先的に出力される。同じようにSASについても、第一の経路の移動距離信号が優先的に出力される。第一の経路から出力される移動距離信号は、FASおよびSASの拡大量に対応して移動距離が大きくなる。そのため、実験1では、SASの拡大量が大きくなるにつれて、SASの主観的移動量が長くなったと解釈される。

たしかに、実験1では、拡大量の増加に伴い、主観的移動距離が増加した。しかし、実験2、実験3とSASの一辺のサイズを増加させる（実際には、SASの物理的なサイズは一定にし、SASの網膜像のサイズを増加させた）につれて、主観的移動量とSASの拡大量との対応関係が弱くなった。この結果を本研究のモデルで説明すると以下ようになる。実験1で使用されたSASのサイズは、 1.2° （初期サイズが 0.4° のSASの終了サイズ）よりも小さい値であった。これは、接近運動の検出閾値が急激に上昇するとされる 1.5° を下回っていた。しかし、実験2では、一部のSASが 1.5° を超える値になった。さらに、実験3では、すべてのSASが 1.5° を超える値になった。このように、実験1では、接近対象の網膜像の拡大運動が検出閾を超えなかったため、そこから出力される拡大速度、信

号が強力な情報となった。その結果、第一の経路から出力される移動距離信号が第二経路から出力される移動距離信号に比べ強力になり、接近対象の網膜像の拡大量と主観的移動距離の間に強固な対応関係が見られた。しかし、実験2、3では接近運動の検出閾値が急激に上昇するとされる 1.5° を超過したFASやSASが提示された結果、第一の経路から出力される移動距離信号が弱くなった。その結果、相対的に第二の経路から出力される移動距離信号が強くなったので、接近対象の網膜像の拡大量と主観的移動距離の間の対応関係が弱くなっていった。

実験4では、SASの初期サイズに関わりなく、SASの拡大量の増加と共にSASの主観的移動量が増加した。これは、実験1と同様に、主に第一の経路から出力される拡大運動による移動距離信号から移動距離が知覚されたことを示す。しかし、FASの初期サイズがSASの初期サイズよりも大きいグループでは、被験者の判断が100を超えていたことから、第二の経路であるGFSからの初期サイズによる奥行き位置情報がDIに、入力され、その情報も利用されていたことを示しており、この初期サイズによる位置情報と第一の経路から出力された移動距離情報は背反的な関係ではなく、加算的な関係になっていたと考えられる。

実験5では、SASの初期サイズ、終了サイズを変化させていないことから、いずれの条件においても、幾何学的情報は同じであった。そのため、第二の経路から出力される移動距離信号の差は生じなかった。一方、SASの拡大関数にsin関数と一次関数を使用したことから、sin関数条件と一次関数条件では第一の経路におけるRMの出力を変化させる。その結果、実験5の全てのグループでSASの拡大関数にsin関数を使用する条件と一次関数を使用する条件の間における主観的移動距離に有意差が見られた。さらに、sin関数を使用したSASの拡大速度信号の内、拡大終了付近の速度信号が微弱であったためにDIに入力されなかったのに対して、一次関数を使用したSASの拡大速度信号は、接近対象の網膜像が拡大中、全ての拡大速度信号がDIに入力されたためにsin関数を使用したSASの主観的移動距離の方が一次関数を使用したSASの主観的移動距離よりも短かった。

実験6では、FASの終了サイズでFASが静止した後、SASが提示されたので、被験者はFASとSASが同一の対象であると見なした。さらに被験者は、FASとSASが分離して運動するのではなく、同一の対象が連続的に運動していると知覚した。その結果、被験者はFASの接近終了時の奥行き位置とSASの接近開始時の奥行き位置が同じであるという幾何学的情報を得ることが可能になったため、第二の経路から入力されるサイズ比による幾何学的奥行き距離信号が第一の経路に比べ相対的に強くなった。その結果、実験6では、SAS

の拡大量が增加しても、被験者の SAS の主観的移動量は増加しなかった。

実験 7 では、FAS と SAS の提示間隔を操作し、幾何学的手がかりの利用の容易さを操作した。幾何学的手がかりの容易さを減少させていくと、第二の経路からのサイズ比の幾何学的手がかりから、第一の経路による拡大運動手がかりにシフトしていった。しかし、幾何学的手がかりの容易さを減少させても被験者が拡大運動手がかりにシフトしていかない被験者も存在したことから、初期サイズによる奥行き位置情報とサイズ比による移動距離情報以外の GFS から出力される幾何学的な情報が存在する可能性が示唆された。

衝突時間による説明との比較

対象の奥行き運動の速度を利用した変数として衝突時間 (time-to-collision: TTC) が考えられてきた (Lee, 1976)。衝突時間は対象が観察者に接近するとき、ある地点での観察者に衝突するまでにかかる時間を指す。

(Bruce, Green, & Georgeson, 1996)

fig. 27 から

$$\frac{1}{r(t)} = \frac{Z(t)}{r} \quad (15)$$

時間に関して微分すると

$$\frac{r(t)^2}{v(t)} = \frac{R}{V} \quad (16)$$

$R = Z(t)r(t)$ なので

$$\frac{r(t)}{v(t)} = \frac{Z(t)}{V} \quad (17)$$

よって、 $\frac{r(t)}{v(t)}$ が TTC である。

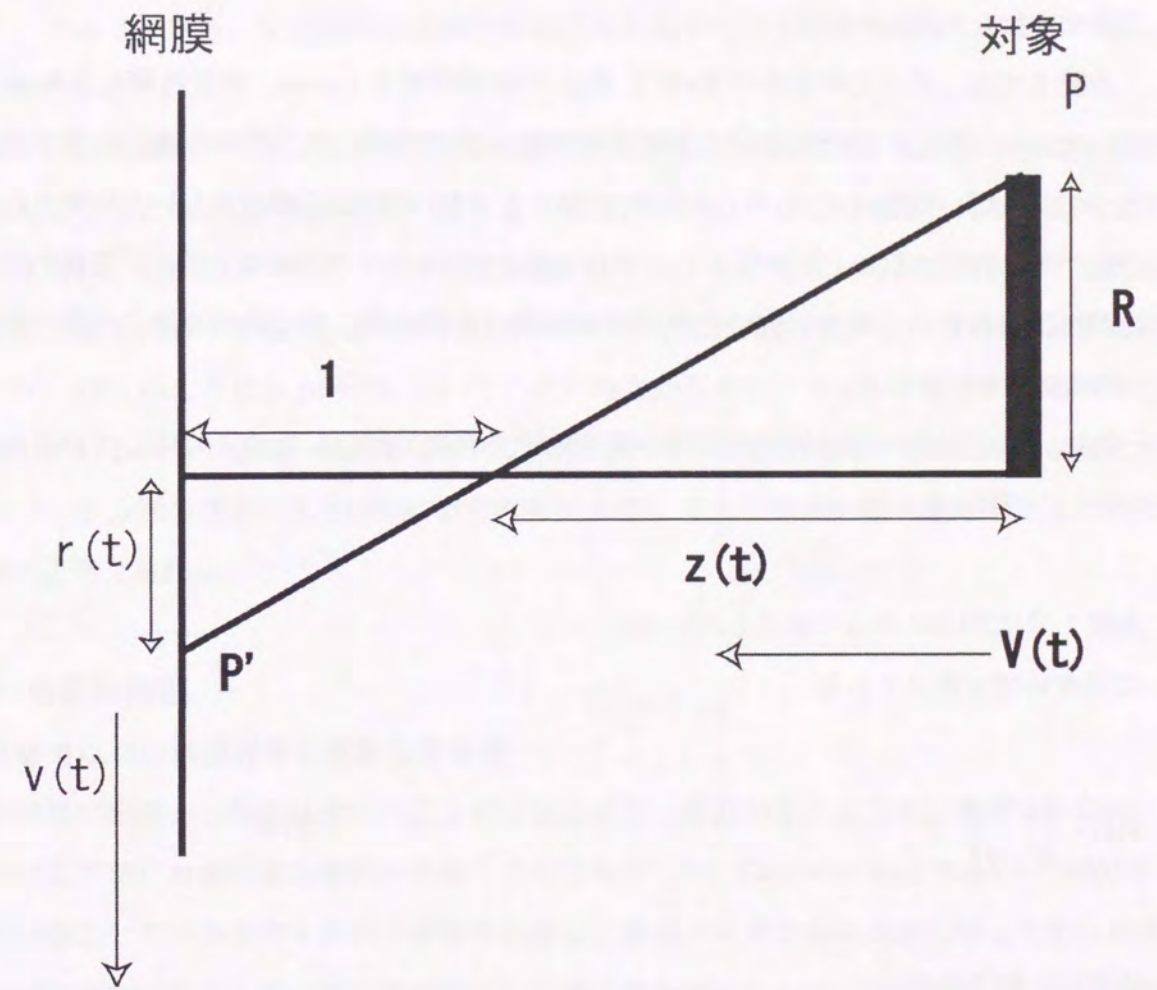


fig. 27 観察者から $Z(t)$ 離れた対象 (P) が観察者に接近する際の網膜像の変化。
 R は P の長さ、 $r(t)$ は p の網膜像への投影像、 $v(t)$ は $r(t)$ の拡大速度を示す。
 レンズの中心と網膜像の距離を 1 とする (Bruce, Green, & Georgeson, 1996)

式中に $v(t)$ という拡大速度を含んでいるため、衝突時間は接近対象の二次元網膜像の拡大速度に関連した変数である。衝突時間が接近対象の主観的速度を示す変数であるのなら、衝突時間に時間を乗じた値、もしくは衝突時間を時間で積分した値が接近対象の移動距離を表す変数と考えられる。

実験 1 では、すべての条件の FAS と SAS の衝突時間を 3.0sec、接近時間を 2.0sec に設定したため、もし、接近対象の主観的移動距離が衝突時間に接近時間を乗じた値で表されるのであれば、実験 1 のすべての条件で FAS と SAS の接近距離が等しいと知覚されることが予想された。しかし、実験 1 の結果は SAS の初期サイズの増加と共に、主観的移動距離が増加したため、接近対象の主観的移動距離が衝突時間に接近時間を乗じた値であるという仮説は否定される。

次に、接近対象の主観的移動距離が衝突時間を時間で積分した値と対応しているかどうかという点については、

実験 1 では式(3)に従って拡大したため、式(3)を時間で微分すると

$$v(t) = \frac{T_0 r(t_0)}{(T_0 - t)^2} \dots\dots\dots (18)$$

ゆえに、衝突時間は、

$$\frac{r(t)}{v(t)} = \frac{T_0 - t}{T_0} \dots\dots\dots (19)$$

衝突時間を時間で積分すると

$$\int \frac{r(t)}{v(t)} dt = -\frac{t^2}{2T_0} + \frac{1}{T_0} + C \dots\dots\dots (20)$$

右辺に $r(t)$ を含んでいないため、衝突時間を時間で積分した値は、初期サイズが変化しても不変である。

式(20)から初期サイズが変化しても、接近対象の主観的移動距離が衝突時間を時間で積分した値は変化しないが、実験 1 の結果は初期サイズとともに SAS の主観的移動量が増加した。このことから、接近対象の主観的移動距離と衝突時間を時間で積分した値は一致しないことが示される。

確かに、卓球のスマッシュや飛び込みのタイミングのような非常に短時間で判断を要求されるような状況では、衝突時間のような、変数が手がかりとして利用される可能性は否定できない。しかし、本研究で扱う移動距離のような、ある程度、時間経過を要する状況で移動距離を判断する場合、衝突時間は手がかりとして利用されない。これは、衝突時間は、式(17)のようにある時刻において、その時点から等速で接近した場合の接近時間を想定しているからである。実験 5 のサイン関数で拡大するように刻々と接近速度が変化するように正方形の場合のある時刻の衝突時間を知覚しても、移動距離と対応することはできないと考えられる。

5-4 発展的問題

正方形ではない接近対象の移動距離知覚

本研究で使用した刺激はすべて正方形であったが、接近対象が正方形以外のときには、いかにして接近対象の接近運動を処理するのであろうか。Beverley and Regan (1980)は、彼らが仮定している奥行き方向の運動検出器は、垂直・水平方向の速度に対してのみ感受性を持つのではなく、すべての方向において感受性を持つとして、以下のように楕円形の場合について詳細に説明した。

楕円上の対象が観察者に接近し、楕円の網膜像が拡大する様子を fig. 28 は示している。楕円上の 2 点 A、B をとり、それらの点の移動方向と反対方向に移動する点をそれぞれ C、D とする。そして、A と B、C と D を結んだ線分をそれぞれ a、b とする。線分 a、b が微小な時間 t にそれぞれ ax、bx だけ拡大するとする。すると、時間 t 後に線分 a、b の長さはそれぞれ(a+ax)、(b+bx)となる。

楕円の接近中、点 A、B の分離速度 (V_1+V_2) は、

$$V_1 + V_2 = \frac{ax}{\Delta_t} \dots\dots\dots (21)$$

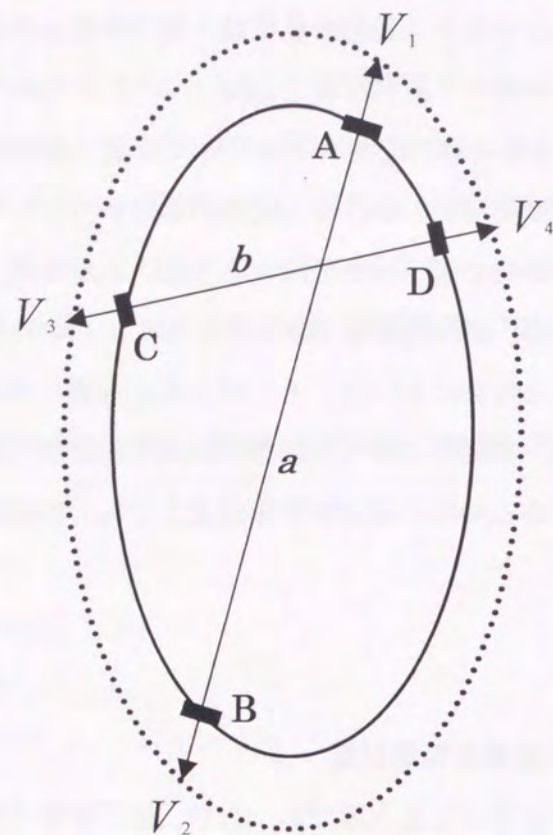


fig. 28 接近対象が楕円の場合における模式図 (Beverley & Regan, 1980)

同じように、点 C、D の分離速度 (V_3+V_4) は、

$$V_3 + V_4 = \frac{bx}{\Delta_r} \dots \dots \dots (22)$$

対象が剛体性を保ち回転しなければ

$$\frac{V_1 + V_2}{V_3 + V_4} = \frac{a}{b} \dots \dots \dots (23)$$

式 (23) は、正方形が接近する場合の垂直方向のエッジ間の分離速度と水平方向のエッジ間の分離速度の比が水平方向のエッジ間の距離と垂直方向のエッジ間の分離距離の比に等しいときに奥行き運動が知覚されやすいとする式 (1) と類似する。このことから、Beverley and Regan (1980)は、正方形以外の一般的な対象であっても接近対象の知覚のモデルをあてはめることが可能であるとした。この Beverley and Regan (1980)の指摘を、本研究で提案したモデルの第一の経路にあてはめると、正方形以外の接近対象についても本研究で提案したモデルに適応可能であると考えられる。

視差変化

本研究で行った実験では、被験者は単眼で刺激を観察した。日常生活で、我々は、両眼で対象を観察する。両眼視が可能な状態で接近対象の奥行き移動距離を知覚する際に行われる処理について考えてみると、これまで考えてきた接近対象の網膜像の変化に加え、対象の網膜像の視差の変化率、輻輳の変化率を考慮しなければならない。

Regan and Beverley(1979)は、接近対象の処理において視差の変化率と網膜像のサイズの変化率の処理が独立した処理機構であるとしている。そして、サイズ変化による奥行き運動知覚は、その方向とは逆の方向の奥行き運動知覚を発生させる視差変化により相殺されるとした。

さらに、Regan and Beverley (1983)、Hong and Regan (1989)は、視野の様々な位置の視差変化の閾値とサイズ変化の閾値を調べた。その結果、視差変化による運動視が不可能であっても、サイズ変化が検出可能な位置が視野内に存在することが示された。そこで、Regan and Beverley (1983)は、視差変化による運動視が不可能であってもサイズ変化によ

って奥行き運動を知覚することが可能であるため、日常生活では視覚情報と手などの身体動作との連係が崩壊することなく行われているとした。

このように、両眼視手がかりである視差変化と単眼手がかりであるサイズ変化の処理はお互い独立した処理機構を持つとされている。そして、日常、両者が利用可能な場面では、両者が加算的に働き、視差変化が検出不可可能な場面ではサイズ変化手がかりが利用されるというようにお互いが相補的に作用していることが考えられる。

展望

日常的な場面での接近対象の移動距離についての処理機構を想定する時、両眼視や輻輳などの他の奥行き視手がかりを考慮した処理機構を考える必要が生じる。実験5で示されたように、網膜像の拡大運動から移動距離が知覚されるが、両眼視の変化率から移動距離は知覚されるのであろうか。また、知覚されるのであれば、その距離は網膜像の拡大運動から得られる移動距離と一致するだろうか。今後、このような両眼視が可能な場面での移動距離知覚について検討する必要がある。

さらに、車やボールなど、日常的な接近対象における認知的な処理を考慮した処理機構も考える必要があります。実験6のように、幾何学的手法がかりの利用が容易な場面では、拡大運動手がかりよりも幾何学的手法がかりから得られる移動距離情報が優先されていることから、日常的な接近対象では幾何学的手法がかりが優先されて利用されている可能性がある。しかし、日常場面でも、海上を航行する船が接近する場合のように、周りのテクスチャーが一様な場面では幾何学的手法がかりが利用しがたい。このようなとき、幾何学的手法がかりではなく、拡大運動手がかりを利用している可能性がある。これらの外界のテクスチャーと接近対象の関係については今後、さらに検討していかなければならない。そのとき、本研究で得られた単眼視による移動距離知覚についての基礎的知見を基にして発展させていくことが可能であろう。

6章 要約

本来、投影像から接近対象の接近距離を計算することは不可能であるにもかかわらず、我々は、接近する対象に対して逃避・捕獲等の適切な行動を難なくとることが可能である。そこで、本研究の目的は、接近対象の距離知覚を中心に、対象の接近運動の処理メカニズムを明らかにしていくことである。

実験 1、2、3 では、接近対象の主観的移動距離と物理学的に算出される値との比較を行った。実験 4、5 では、接近対象の移動距離を知覚するメカニズムに言及した。さらに、実験 6、7 では、実験 4、5 で示された網膜像の拡大運動による手掛かりと従来から想定されてきた接近前後の網膜像のサイズ比による幾何学的手掛かりとの関係について検討した。

実験 1 では、対象が接近する際に生じる網膜像の拡大から、人は理論的に算出される移動距離と同じ距離を知覚することが可能かどうかを検討した。刺激としては、二つの等速で接近する正方形を用い、これらを断続的に提示した。被験者は、最初の正方形 (FAS) を 100 としたときの後の正方形 (SAS) の移動距離を判断した。その結果、理論的には等速で同じ時間接近すると、対象の初期サイズが増加するに従って、移動距離が同じもしくは減少するにも関わらず、主観的な移動距離は増加した。これは、主観的移動距離が、物理学的に算出される値と異なっていることを示していた。さらに、対象の消失時と拡大開始時のサイズの差である拡大量が主観的移動距離を決定していることが示唆された。

実験 2 では、急激に検出閾値が上昇されるとする 1.5° を超える接近対象の主観的移動距離について検討した。被験者とディスプレイの距離を実験 1 の半分の 100cm にしたことにより、一部の SAS の条件で、終了サイズが 1.5° を超える条件を設定した。これは、 1.5° を超える接近対象と超えない接近対象の主観的移動距離を比較するために行われた。その結果、実験 1 と同様、SAS の拡大量と共に主観的移動距離の平均値が増加した。これは、実験 1 と同じ傾向であり、これらから、 1.5° を超えるとすぐに接近運動が知覚できなくなるとはいえないことが示唆された。

実験 3 では、すべての条件で 1.5° を超える接近対象の主観的移動距離について検討した。被験者のディスプレイの観察距離を実験 2 よりさらに短く設定し、50cm にした。その結果、実験 2 と同様、SAS の拡大量と共に主観的移動距離の平均値が増加する傾向がみられた。これは、実験 1 と同じ傾向であった。これらから、 4.8° を超えても奥行き運動が知覚できなくなるとはいえないことが示唆された。

実験 1 では、すべてのグループにおいて、SAS の主観的移動量の間有意な差が見られたが、実験 2、では、二つの SAS 間の主観的移動距離に有意な差が見られなかった。さらに実験 3 では、四つの SAS 間の主観的移動距離に有意な差が見られなかった。このように、

接近対象のサイズが増加するにつれて、有意差が見られない条件が増加した。これらは、Beverley and Regan (1979b)らの結果と同様であった。しかし、接近対象の奥行き運動の検出閾が急激に上昇するとされる 1.5° を超える対象でも、まったく移動距離が知覚されなくなると言うわけではなく、徐々に安定した移動距離が知覚されづらくなることが示唆された。

実験4では、実験1で不明確であったSASの拡大量と初期サイズのいずれによって主観的移動量が決定されているのかについて検討された。その結果、SASの初期サイズが一定であるにもかかわらずSASの拡大量の増加と共に主観的移動距離が増加したことから、接近対象の拡大量が接近対象の主観的移動距離を決定していることが示唆された。また、FASとSASの拡大量が同一であっても、100以上になる場合があり、このケースに限って初期サイズの効果が示された。この結果から、初期サイズによる幾何学的な奥行き位置情報も主観的移動距離の決定に利用されていることが示された。

実験5では、接近対象の移動距離を知覚する際に行われる処理について検討した。接近対象の主観的移動距離を知覚する際に行われる処理機構に関わる先行研究には、接近対象の接近という運動に注目したReganらによる研究(Regan & Beverley, 1979b; Regan & Hamstra, 1993 など)と、接近対象の網膜像のサイズと対象の物理的移動距離との幾何学的関係に注目したSwanstonらによる研究(Swanston & Gogel, 1986 など)という、大きく分けて、二つの立場に立った研究がなされてきた。そこで、主観的移動距離が拡大運動と幾何学的手がかりのいずれの情報を基礎にしているのかを検証した。

実験で使用したSASには、sin関数に従って拡大する条件と一次関数に従って拡大する条件が設けられた。すべてのSASで、幾何学的関係に関する要因である接近時間、初期サイズ、終了サイズのそれぞれがすべて等しかった。その結果、sin関数より一次関数に従って拡大するSASの主観的移動距離のほうが短いことが示された。これは、被験者がsin関数に従って拡大するSASの移動距離を知覚する際に、拡大運動検出閾を下まわった期間の拡大運動を移動距離として知覚することができなかったからである。つまり、被験者は、SASの拡大運動を利用して移動距離を知覚していたことが示唆された。

実験6では、FASとSASの奥行き位置関係を明確にするため、FASの終了サイズとSASの初期サイズを同一にし、FASとSASを連続的に提示した。その結果、拡大運動による効果は消失し、接近前後のサイズ比の効果が得られた。これは、被験者が実験6のSASの移動距離を拡大速度によって知覚せずに、FASの接近前後のサイズ比とSASの接近前後のサイズ比を比較し、その値と拡大運動手掛かりによるFASの主観的移動距離からSAS

の移動距離を判断したことによると考えられた。

実験7では、接近対象の移動距離知覚におけるサイズ比による幾何学的手がかりと拡大運動手がかりの関係について検討した。FASとSASの提示間隔を操作し、サイズ比による幾何学的手がかりの利用の容易さを操作したところ、5人中3人の被験者で、サイズ比による幾何学的手がかりが利用されづらくなるにつれて、拡大運動手がかりが重視されていく傾向が見られた。これは、両者の手がかりの利用の容易さに従って、どちらの手がかりが利用されるのかが決定されることを示唆していた。

本研究の実験を通して、接近対象の運動知覚についての新たなモデルが提案された。接近対象の移動距離知覚には、接近対象の網膜像の拡大運動自体から移動距離を知覚する経路と、接近前後の網膜像のサイズ比による移動距離、初期サイズによる奥行き位置等の幾何学的な情報から移動距離を知覚する経路が存在し、両者の利用可能性が、動的に変化することが示唆された。さらに、接近対象の移動距離知覚に、接近対象の位置情報が恒常的に働いていることも示された。

References

- 相場 覚 (1975). 接近運動における視速度の規定要因. 日本心理学会第35回発表論文集, 248-249.
- 相場 覚 (1977). 運動知覚の諸様相. 北海道大学文学部紀要, **26**, 3-28.
- 相場 覚 (1979). 予測法および対比較法による接近運動知覚の実験的研究. *Hokkaido Behavioral Science Report, Series P, Supplement 10*.
- 相場 覚 (1991). 連続光と断続光下の接近運動知覚. 心理学評論, **34**, 296-315.
- Bex, P. J., & Makous, W. (1997). Radial motion looks faster. *Vision Research*, **37**, 3399-3405.
- パークリー, D. 下条信輔・植村恒一郎・一ノ瀬正樹(訳) (1990). 視覚新論. 勁草書房.
(Berkeley, D. (1709). *An essay towards a new theory of vision*.)
- Beverley, K. I., & Regan, D. (1979a). Separable aftereffects of changing-size and motion-in-depth: Different neural mechanisms? *Vision Research*, **19**, 727-732.
- Beverley, K. I., & Regan, D. (1979b). Visual perception for changing size: The effect of object size. *Vision Research*, **19**, 1093-1104.
- Beverley, K. I., & Regan, D. (1980). Visual sensitivity to the shape and size of a moving object: implications for models of object perception. *Perception*, **9**, 151-160.
- パウアー, T. G. R. 古崎愛子 (訳) (1979). 乳幼児の知覚世界. サイエンス社.
(Bower, T. G. R. (1977). *The perceptual world of the child*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.)
- Bruce, V., Green, P. R., & Georgeson, M. A. (1996). Visual perception: physiology, psychology, and ecology (3rd ed.). East Sussex: Psychology Press.
- De Bruyn, B., & Orban, G. A. (1990). The importance of velocity gradients in the perception of three-dimensional rigidity. *Perception*, **19**, 21-27.
- Duffy, C. J., & Wurtz, R. H. (1993). An illusory transformation of optical flow fields. *Vision Research*, **33**, 1481-1490.
- Gibson, J. J. (1950). The perception of visual world. Boston: Houghton-Mifflin.
- Gogel, W. C. (1998). An analysis of perceptions from changes in optical size. *Perception and Psychophysics*, **60**, 805-820.
- Gogel, W. C., & Eby, D. W. (1997). Measures of perceived linear size, sagittal motion, and visual angle from optical expansions and contractions. *Perception and Psychophysics*, **59**, 783-806.
- Gray, R., & Regan, D. (1999). Motion in depth: Adequate and inadequate simulation. *Perception and Psychophysics*, **61**, 236-245.
- Gray, R., & Regan, D. (2000). Estimating the time to collision with a rotating nonspherical object. *Vision Research*, **40**, 49-63.
- 平井有三 (1995). 視覚と記憶の情報処理. 培風館
- Hong, X., & Regan, D. (1989). Visual field defects for unidirectional and oscillatory motion in depth. *Vision Research*, **29**, 809-819.
- Kappers, A. M. L., Van Doorn, A. J., & Koenderink, J. J. (1994). Detection of vorticity in optical flow fields. *Journal of the Optical Society of America A*, **11**, 49-54.
- Koenderink, J. J. (1986). Optical flow. *Vision Research*, **26**, 161-180.
- Koenderink, J. J., & van Doorn, A. J. (1975). Invariant properties of the motion parallax field due to the movement of rigid bodies relative to an observer. *Optica Acta*, **22**, 773-791.
- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, **5**, 437-459.
- Levingston, E., & Sekular, R. (1975). Inhibition and disinhibition of direction-specific mechanisms in human vision. *Nature*, **254**, 692-694.
- Longuet-Higgins, H. C. (1984). The visual ambiguity of a moving plane. *Proceedings of Royal Society of London B*, **223**, 165-175.
- Longuet-Higgins, H. C., & Prazdny, K. (1980). The interpretation of a moving retinal image. *Proceedings of Royal Society of London B*, **208**, 385-397.
- 松田隆夫 (1995). 視知覚. 培風館.
- McKee, S. P. (1981). A local mechanism for differential velocity discrimination. *Vision Research*, **16**, 59-59.
- Nakayama, K., & Tyler, C. W. (1981). Psychophysical isolation of movement sensitivity by removal of familiar position cues. *Vision Research*, **21**, 427-433.
- Ono, M. E., Rivest, J., & Ono, H. (1986). Depth perception as a function of motion parallax and absolute-distance information. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, **12**, 331-337.
- Orban, G. A., Lagae, L., Raiguel, S., Xiao, D., & Maes, H. (1995). The speed tuning of medial superior temporal (MST) cell responses to optic-flow components. *Perception*, **24**, 269-285.
- Regan, D. (1986). Visual processing of four kinds of relative motion. *Vision Research*, **26**, 127-145.
- Regan, D., & Beverley, K. I. (1978a). Illusory motion in depth: Aftereffect of adaptation to changing size. *Vision Research*, **18**, 209-212.
- Regan, D., & Beverley, K. I. (1978b). Looming detecting in the human visual pathway. *Vision Research*, **18**, 415-421.
- Regan, D., & Beverley, K. I. (1979). Binocular and monocular stimuli for motion in depth: Changing-disparity and changing-size feed the same motion in-depth stage. *Vision Research*, **19**, 1331-1342.
- Regan, D., & Beverley, K. I. (1983). Visual fields for frontal plane motion and for changing size. *Vision Research*, **23**, 7, 673-676.
- Regan, D., & Beverley, K. I. (1985). Visual responses to vorticity and the neural analysis of optic flow. *Journal of optical society of America A*, **2**, 280-283.
- リーガン, D., ベバリー, K. I., シナイダー, M. 河内十郎 (訳) (1982). 奥行き運動の視知覚. 大山正(編) 別冊サイエンス 特集 視覚の心理 イメージの科学 (pp. 84-97) 日経サイエンス.
(Regan, D., Beverley, K. I., & Cynader, M. (1979). The visual perception of motion in depth. *Scientific American*, **241**, 136-151.)
- Regan, D., & Cynader, M. (1979). Neurons in area 18 for cat visual cortex selectivity sensitive to changing size: Responses to two edges. *Vision Research*, **19**, 699-711.

- Regan, D., & Hamstra, S. J. (1993). Dissociation of discrimination thresholds for time to contact and for rate of angular expansion. *Vision Research*, 33, 447-462.
- Saito, H., Yukie, M., Tanaka, K., Hikosaka, K., Fukuda, Y., & Iwai, E. (1986). Integration of direction signals of image motion in the Superior Temporal Sulcus of the Macaque monkey. *Journal of Neuroscience*, 6, 145-157.
- 佐藤隆夫 (1999). 視覚心理. 斎藤秀明・森見徳 (編). 視覚認知と聴覚認知 (pp. 3-27) オーム社.
- 下条信輔 (1992). まなざしの誕生: 赤ちゃん革命. 新曜社.
- Simpson, W. A. (1988). Depth discrimination from optic flow. *Perception*, 17, 497-512.
- Simpson, W. A. (1993). Optic flow and depth perception. *Spatial Vision*, 7, 35-75.
- Spileers, W., Orban, G. A., Gulyas, B., & Maes, H. (1990). Selectivity of cat area 18 neurons for direction and speed in depth. *Journal of Neurophysiology*, 63, 936-954.
- Stronmeyer, C. F. III, Kronauer, R. E., & Madsen, J. C. (1984). Opponent-movement mechanism in human vision. *Journal of Optical Society of America A*, 1, 876-884.
- 杉江 昇 (1994). 視覚情報処理とそのモデル. 松本 元・大津展之 (編), 脳・神経系が行う情報処理とそのモデル. (pp. 51-83) 培風館.
- Swanston, M. T., & Gogel, W.C. (1986). Perceived size and motion in depth from optical expansion. *Perception and Psychophysics*, 39, 309-326.
- Tanaka, K., Fukuda, Y., & Saito, H. (1989). Underlying mechanism of the response specificity of expansion / contraction and rotation cells in the dorsal part of the medial superior temporal area of the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology*, 62, 642-656.
- Tanaka, K., & Saito, H. (1989). Analysis of motion of the visual field by direction, expansion/contraction, and rotation cells clustered in the dorsal part of medial superior temporal area of the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology*, 62, 626-641.
- Te Pas, S. F., Kappers, A. M. L., & Koenderink, J. J. (1996a). Detection of the sign of expansion as a function field size and eccentricity. *Perception and Psychophysics*, 158, 401-408.
- Te Pas, S. F., Kappers, A. M. L., & Koenderink, J. J. (1996b). Detection of first-order structure in optical flow fields. *Vision Research*, 36, 259-270.
- 山崎 校・松田隆夫 (2000). 空間周波数勾配を含む放射運動による速度の過大視. 日本心理学会 第64回発表論文集, 393.
- ゼキ, S. 河内十郎 (訳) (1995). 脳のヴィジョン. 医学書院.
(Zeki, S. (1993). *A vision of the brain*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.)

Appendix

Regan and Hamstara (1993)は、幅 2S の対象が観察者に等速 (v_z) で接近する場合、対象と観察者の距離 (D_t) と時間 (t) の関係を以下のように示した(fig.29)。

$$\tan \theta_t = \frac{S}{D_t} \dots\dots\dots (24)$$

(t における対象の視角を θ_t とする)

$$D_t = D_0 - v_z t \dots\dots\dots (25)$$

(接近開始時の対象と観察者の距離を D_0 とする)

(22)、(23) から

$$\tan \theta_t = \frac{\frac{S}{D_t}}{1 - \frac{v_z t}{D_0}} \dots\dots\dots (26)$$

$$v_z T_0 = D_0 \dots\dots\dots (27)$$

(T_0 は $t=0$ における対象の観察者までの衝突時間)

(24) , (25) から

$$\tan \theta_t = \frac{\tan \theta_0}{1 - \frac{t}{T_0}} \dots\dots\dots (28)$$

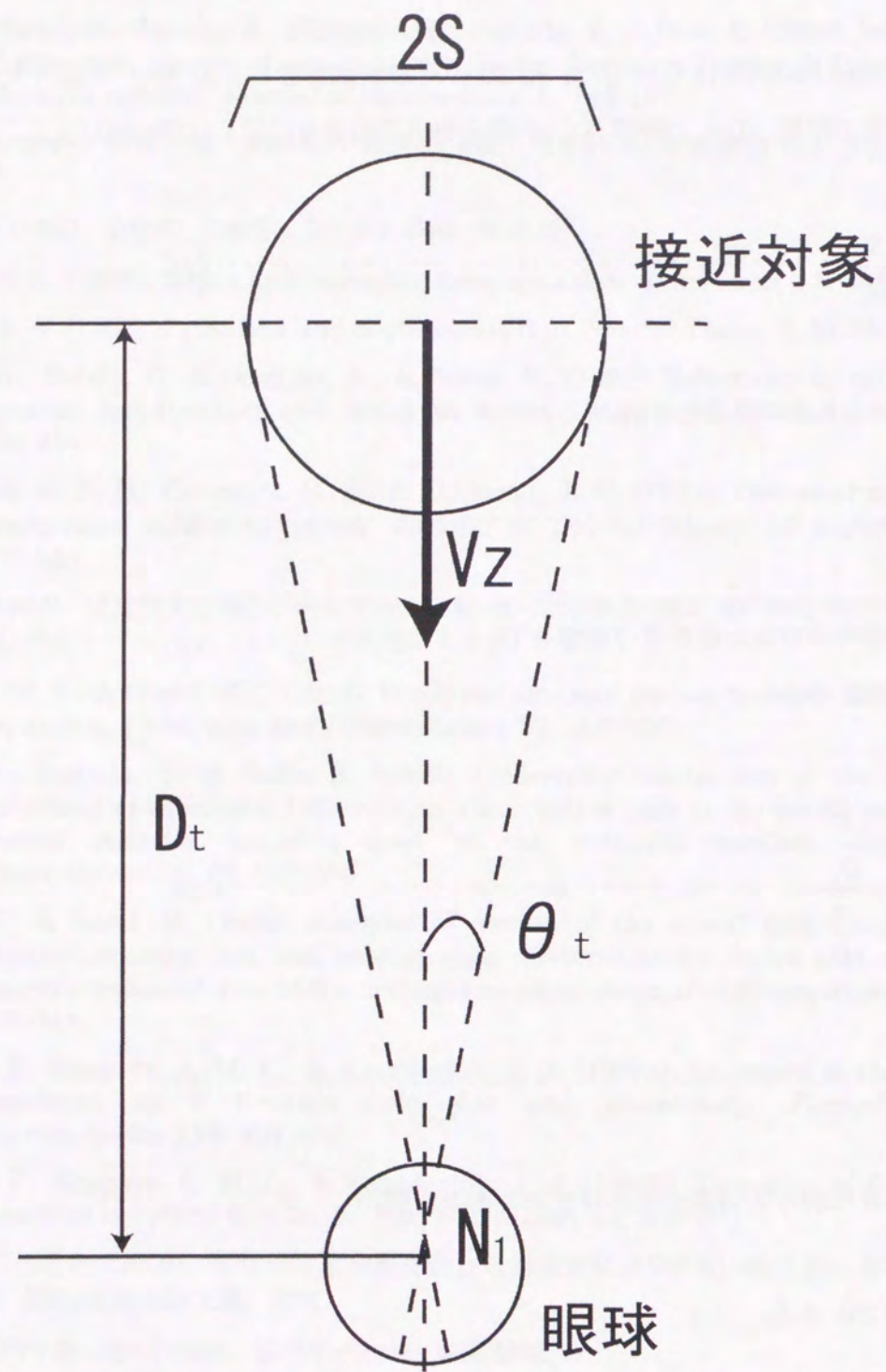


fig. 29 接近対象による網膜像の変化関数の説明 (Regan & Hamstra, 1993)

式(3)には、時間と網膜像のサイズしか含まれておらず、距離に関する変数は含まれていない。つまり、式(3)では、対象の観察者からの距離の変化ではなく、時間の経過と共に変化する網膜像のサイズを記述している。二次元平面であるディスプレイ上で、対象の接近という三次元運動をシュミレーションする場合、接近開始時の対象と観察者の距離が一意に決定することができないため、式(3)のように 距離情報を含まない関数は有効である。

謝辞

本論文の作成に当たり、終始ご指導いただきました、実験心理学講座の中島義明教授に心から感謝いたします。赤井誠生助教授には、多大なるご指導と暖かい励ましをいただき、心から感謝しております。また、ご多忙中、実験計画等でご助言いただきました井上雅勝助手、ならびに川村智助手に心からお礼を申し上げます。

そして、実験や本論文の作成におきまして、お忙しい中、多くのご助言と様々なご協力をしていただきました大学院生、大学院研究生の皆様に深く感謝いたします。また、苦痛な実験に参加していただいた被験者の皆さんの協力なしには、本論文の完成はありえませんでした。大変感謝しております。

2000年12月25日

名手 久貴

