

運動方向変化に対する運動軌跡錯視とそれに及ぼす 誘導図形運動の効果

The effect of motion of an inducing object on the motion trajectory illusion observed when pursuing a moving object that changes its direction abruptly.

中 村 浩
Ko Nakamura

ABSTRACT

So far it has been clarified that eye movements accompanying the pursuit of a moving target which changes its direction abruptly cause the motion trajectory illusion. However the perceptual meaning of this particular eye movement pattern is still not clear. This study aimed to investigate how this eye movement pattern gives rise to the motion trajectory illusion by showing that the same perceptual phenomenon can be observed when the perceptual frame, which is represented by a small object placed at the center of a monitor, moved in same or opposite direction of the target movement just as this moving target changed its direction at a right angle. The results showed that this particular eye movement pattern in which the fixation point overshot the point at which the target changed its direction caused the involuntary movement of the perceptual frame, which brought about the induced movement of the target in the opposite direction of the perceptual frame.

Key Words: motion trajectory illusion, eye movements, induced movement, perceptual framework

1. 目的

直線運動している指標を追視している時、それが運動方向を90度変えると、その運動は、曲折点を通り過ぎ、そこから曲線的に弧を描いて実際の運動に追いつくように知覚されることが知られており (Sumi, 1966; 古賀, 1991; Koga, Ohta & Groner, 1996)、Koga et al. (1998) はこれを運動軌跡錯視 (motion trajectory illusion) と呼んでいる。しかし、運動の曲折点上に別の小さな図形を提示すると、指標の実際の運動がそのまま、すなわち直角に曲がる軌跡が知覚される (古賀, 1991)。これらの知覚現象には指標の運動に対する追跡眼球運動が深く関

与しており、前者の運動軌跡錯視については、指標が移動方向を変えてもすぐにはそれに対応することができず、注視点が曲折点を行き過ぎてしまうことや、後者の場合の注視点移動は、指標を追視するというよりは、指標の動きに先立って曲折点上の付加図形に注視点が到達し、そこで指標の到達を待つて曲折後の指標を追跡するような動きをすることも明らかにされている (古賀, 1991)。指標を追視しない時や固視点を曲折点から離れた位置に置いた時には錯視の出現率が著しく低下することからも、追跡眼球運動がこの知覚現象に関与していることについては疑う余地のないことのように思われる。

ではこのような特徴的な眼球運動（注視点移動）は、運動軌跡錯視の出現に関してどのような知覚的働きをしているのであろうか。この点について古賀（1991）は、指標の曲折運動に対応しきれずに曲折点を行き過ぎてしまう眼球運動のベクトルと指標の曲折後の運動ベクトルが合成され、その結果運動軌跡錯視が生じるという考えを述べている。しかし眼球運動のベクトルは指標と同じ方向であるのに対して、実際に知覚される指標の運動軌跡はそれとは反対方向のものであり、上記の解釈によって十分に説明できるものではないように思われる。

また Koga et al. (1998) は、指標の曲折の前にサッケード（飛越眼球運動）が生じて、指標より先に曲折点付近に注視点が停留している場合には運動軌跡錯視が生じにくいことから、このサッケードの生じる時点が重要な要素であると述べている。そして小図形が曲折点に布置された場合には運動軌跡錯視が生じない理由として、このサッケードが指標の曲折前に生じる場合が多いためであると結論づけている。中村（1979）も報告するように、移動対象の前方に別の対象が存在する場合には、移動対象がそこへ到達する前に、そちらへのサッケードが生じやすいことは確かであるが、これが運動軌跡錯視を生じさせない理由としては有効ではあるが、運動軌跡錯視が生じる理由については十分な説明を与えていないように思われる。

Mack, Fendrich & Sirigatti (1973) は一定の速度で動いている対象を追視していて、対象が急に停止すると、そこから反対方向にはね返るように見える錯視（rebound illusion）が生じることを示している。その理由として、彼らも、対象に対する追視の行き過ぎ（overshoot）を挙げているが、これは、対象の動きに方向の変化が加わっているか否かの違いがあるだけで、上記の運動軌跡錯視と同様の知覚現象であると思われる。そしてこのような追視による運

動対象の知覚位置のずれが生じる要因として、Mack & Herman (1978) は対象の移動速度の過小登録（under registration）と追視対象に対する背景の相対的位置の変化を挙げている。上記のはね返り錯視や運動軌跡錯視が生じる理由として追視（眼球運動）の行き過ぎが考えられるのであれば、これらの知覚現象を引き起こす上で、追視対象に対する背景の相対的位置変化を眼球運動が引き起こしているものと思われる。すなわち、注意を向けている指標の方向変化に対応できずに、注視点が指標とは異なる方向に移動するということは、視野という知覚の枠組み（背景）が注意点（指標）から分離して移動していることを示すものであり、知覚枠組みが注意点とは無関係に動いた場合に生じる誘導運動と同じ現象が上記錯視においても生じていることが推測できるのである。そして、曲折点に小さな図形が提示された時に指標の実際の軌跡を忠実に知覚できるのは、その小さな図形によって知覚枠組みとしての背景の変位が抑制されたためであるという解釈が可能となるのである。

本研究は、追視の行き過ぎが知覚的枠組み（背景）の変位を生じさせ、そのために運動軌跡錯視が生じるのであるならば、実際に背景を動かすことによって同様の知覚現象が生じるはずであるとの仮説を立て、この枠組み（背景）の移動と運動軌跡錯視との関係を明らかにすることによって、運動軌跡錯視における眼球運動の知覚的働きについて考察しようとするものである。特に、曲折点上に提示された小図形は、指標追視眼球運動に影響を与えることが報告されているが、この小図形の知覚的枠組みとしての働きを取り上げ、その移動方向ならびに移動開始と指標の曲折開始時点とのずれがその知覚内容に対する影響を検討することを通してこの運動軌跡錯視の知覚的意味について考察する。

2. 実験方法

被験者：札幌市内の専門学校生14名を被験者とした。視力矯正を必要とする者も含めて、全員視覚は正常で、本実験に対しては全くナイーブであった。

刺激条件：パソコンのモニター上に明るい水色の円形指標（直径2.5mm、視角14分）が黒を背景として現れ、左方からモニター中央に向かって60mm/sec（角速度5度42分/秒）の速度で60mm（視角5度42分）移動し、モニター中央で移動方向を90度下方へ転じ、同じ速度で60mm移動するという運動事象を基本刺激とした（St.1）。この条件において運動指標を追視すると、少し行き過ぎて曲線的に戻る「て」の字状の運動軌跡が知覚される（Fig.1a）。しかし、曲折点に正方形（誘導図形；一辺2.5mm）を提示すると、たとえ運動指標を追視したとしてもそのような軌跡は知覚されることなく、直角に方向を変える運動軌跡が知覚される（St.2）（Fig.1b）。実験ではこれらSt.1とSt.2を基本とし、曲折点から右あるいは左へ移動する誘導図形の出現時点ならびにその移動開始時点と指標の曲折時点との時間的関係を操作して、下記の4つの刺激シリーズを作成した。

刺激シリーズ1では、指標が曲折点に到達と同時に、到達の前、あるいは到達して曲折した後など、さまざまな時点に誘導図形が曲折点に出現して、そこから曲折前の指標と同じ右方向へ12mm（視角1度8分）、12mm/sec（角速度1度8分/秒）の速さで移動するという刺激条件を用いた。誘導図形が出現する時点は曲折の前330msecから曲折の後264msecまでで、33msecステップごとに19刺激を設定した。

刺激シリーズ2では誘導図形の移動方向が指標とは反対の左方へ動くというもので、誘導図形の移動距離、移動速度、移動開始時点はシリーズ1と同じ19刺激条件を設定した。この刺激シリーズでは誘導図形が指標とは反対方向に移動するため、眼球運動の行き過ぎと誘導図形の動きとが相殺し、直角に近い曲折運動が知覚されるか、あるいは誘導図形の効果が強ければ、「て」の字状の運動軌跡とは左右対称の放物線状の運動軌跡が知覚されることなどが期待される。

刺激シリーズ3は、誘導図形が初めから曲折点に出現していることを除いて、移動開始時点等の条件はシリーズ1と全く同じ19刺激である。

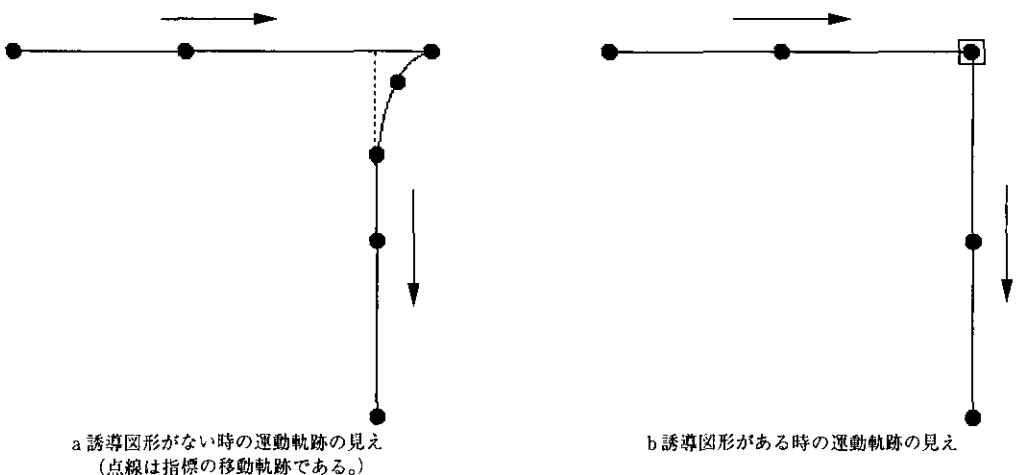


Fig.1 直角の曲折運動と運動軌跡錯視

a 図の直線上を指標が移動した場合、その軌跡は「て」の字状の曲線的軌跡を描いて知覚される。しかし b 図のように曲折点に小図形が提示されると運動軌跡錯視が見られなくなる。

刺激シリーズ4は、誘導図形が初めから曲折点に出現していることを除いて、移動開始時点等の条件は全くシリーズ2と同じ19刺激である。この刺激シリーズにおいては誘導図形が最初から曲折点に提示されているために眼球運動の行き過ぎは生じにくく、また誘導図形の移動方向と曲折前の指標の移動方向が反対であるため、放物線状の運動軌跡が知覚されることが期待される。

また、指標の垂直移動に対する誘導図形の効果だけを確認するために、指標の水平移動がなく、出現と同時に垂直下方へ移動し、それと同時に誘導図形も現れて12mm/secの速度で右あるいは左へ移動する2刺激条件（前者をSt.V1、後者をSt.V2とする）を加え、被験者ごとに、どれか一つの刺激シリーズの後に付け加え、指標の軌跡の見えについて尋ねた。

刺激事象は、Macintosh版アニメーション作成ソフトMacromedia Director ver.4.0Jのグラフィック機能およびアニメーション作成機能を用いて作成し、Power Macintosh G3によって17インチモニタ上に提示した。

実験手続：実験は被験者ごとに個別に実施した。最初にSt.1とSt.2を提示してFig.1aおよびFig.1bの反応が生じるか否かについてチェックした。各刺激は、被験者の反応が確定するまで繰り返し提示され、それを1試行とした。4つの刺激シリーズの実施順序は被験者間でカウンターバランスされた。被験者の課題は、直角を含めて、曲がる程度を6段階に分けて描かれた反応選択用紙の中から、知覚された運動軌跡に最も近いものを選ぶことであった。刺激の観察に際して被験者はあごを「chin rest」に乗せ、指標の動きを追視するよう教示された。なお観察距離は60cmであった。

3. 結果

14名の被験者のうち2名は、St.1に対して運

動軌跡錯視が全く生じなかった。実験の目的が運動軌跡錯視の有無ではなく、それに対する誘導図形の効果であることから、St.1に対して運動軌跡錯視が認められた12名の反応についてのみデータ処理した。ただしこの14名中12名の被験者において運動軌跡錯視が生じたということは、錯視反応有無の二項分布として、その生起確率を計算すると $p=0.006$ であった。

錯視量（曲がって知覚される程度）については個人差が大きかったので特に問題とはせず、知覚された運動軌跡が実際の運動に一致した直角か、あるいは「て」の字状の軌跡を描くかという観点から被験者の反応を分類した。その結果、St.1に対して「て」の字状の運動を知覚した12名の被験者はそのすべてが、St.2に対して直角に曲折する運動軌跡を報告した。

(1) 刺激シリーズ1

この刺激シリーズの各刺激に対する12名の被験者の反応頻数をFig.2に示す。Fig.2から明らかなように、全ての刺激でほとんどの被験者が「て」の字上の運動軌跡を知覚していることが理解される。指標の曲折時点と誘導図形の出現とが一致した刺激条件についてみると、12名中11名の被験者に「て」の字状の軌跡が知覚された確率は $p=0.001$ であった。

(2) 刺激シリーズ2

刺激シリーズ2の各刺激に対する各反応の頻数をFig.3に示す。本刺激シリーズにおいては、誘導図形の移動方向と指標の移動方向が逆になるため、運動軌跡錯視とは左右対称の放物線状の運動軌跡が知覚されている。ただし、刺激シリーズ1の場合とは異なっており、誘導図形の出現時点が指標の曲折時点に近いほど放物線状の軌跡が知覚されやすく、その効果が強いことが伺える。特に指標が曲折した後で誘導図形が出現する場合、その遅れが165msecを越えるとその効果がかなり

低下し、むしろ誘導図形がないときに生じる運動軌跡錯視が多くなると同時に、直角の運動軌跡を報告する被験者も多くなっていることが理解される。

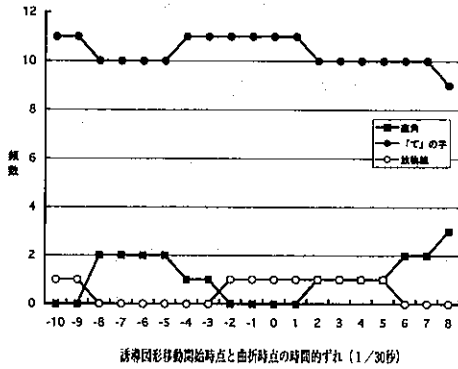


Fig. 2 刺激シリーズ1（誘導図形が指標の曲折前後のさまざまな時点で出現して右方向に移動する刺激群）の各刺激に対する各反応の出現頻数

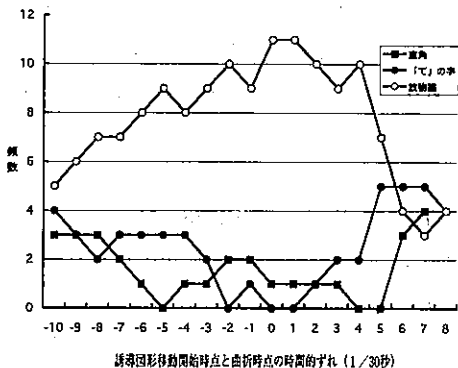


Fig. 3 刺激シリーズ2（誘導図形が指標の曲折前後のさまざまな時点で出現して左方向に移動する刺激群）の各刺激に対する各反応の出現頻数

(3) 刺激シリーズ3

刺激シリーズ3の各刺激に対する各反応の頻数を Fig. 4 に示す。このシリーズでは誘導図形が最初から提示されているため、刺激シリーズ1に比べて、誘導図形の移動開始が曲折時点から後ろへずれるに従って「て」の

字状の運動軌跡を報告する被験者が少なくなり、反対に直角の運動軌跡を報告する被験者が増加する傾向を認めることができる。また、誘導図形の移動開始が指標の曲折時点から132msec 以降の遅れがある条件では、指標は直角に曲折するが、その後の誘導図形の効果によって途中から曲線を描いて落下するという複合的な軌跡を報告する被験者が増加していることも本シリーズの特徴的な傾向である。この条件においては曲折後の一定時間、曲折点に誘導図形が停止しているため、このような傾向が出現するものと思われる。

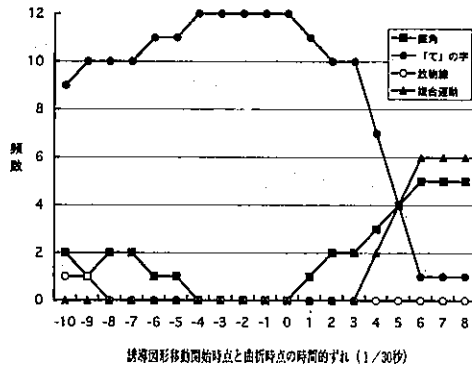


Fig. 4 刺激シリーズ3（曲折点に提示されていた誘導図形が指標の曲折前後のさまざまな時点で右方向に移動する刺激群）の各刺激に対する各反応の出現頻数

(4) 刺激シリーズ4

このシリーズの各刺激に対する反応の頻数を Fig. 5 に図示する。Fig. 5 から、全体の傾向としては誘導図形の効果によって放物線状の運動軌跡を報告する被験者が多いが、シリーズ2同様指標の曲折時点近くに誘導図形が移動を開始した場合にその効果が大きくなっていることがわかる。さらに刺激シリーズ3同様、指標が曲折した後で誘導図形が移動を開始する場合、その遅れが66msec 以降の刺激条件では、直角に曲折するが、途中から放物線を描いて落下するという複合的な軌

跡を報告する被験者が多くなっていることがわかる。

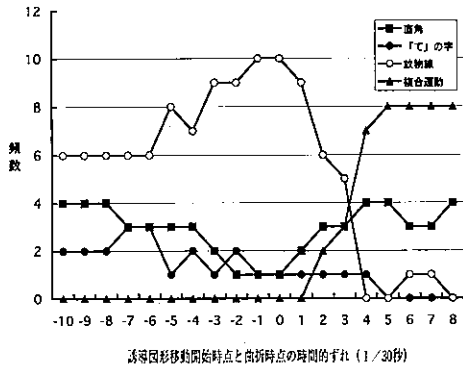


Fig. 5 刺激シリーズ4（曲折点に提示されていた誘導図形が指標の曲折前後のさまざまな時点で左方向に移動する刺激群）の各刺激に対する各反応の出現頻度

(5) St. V1（誘導図形が右に移動する刺激）に対しては12名中11名が右から左への放物線を描く運動軌跡を報告し、St. V2（誘導図形が左に移動する刺激）に対しては12名中11名が左から右への放物線を描く運動軌跡を報告した。

4. 考察

指標の曲折点に誘導図形が固定されている場合は運動軌跡錯視が生じないことは明らかであるが、これは注視点が運動指標の動きに先立ってこの誘導図形に到達しているため、誘導図形がないときに生じるような眼球運動の右方向への「行き過ぎ (overshoot)」が生じることがないからである。そのことは眼球運動と指標に対する注意とが分離することがないこと、従って知覚的枠組みの不随意的な変位が生じないことを示すものである。このように考えると誘導図形を固定するかわりに眼球運動が行き過ぎる方向に動かしたり、反対方向に動かすことによって知覚の枠組みも同様に動き、誘導運動が生じて、誘導図形の動きとは反対方向への指標の動

きが知覚され、それと指標の下向きの運動とが合成されて、運動軌跡錯視と同様の現象が生じることが予測される。このような仮説のもとに実施した実験の結果、Fig. 2から Fig. 5に示されるように、誘導図形が右へ動く場合は運動軌跡錯視と同じ「て」の字状の運動軌跡が知覚され、逆に誘導図形が指標とは反対方向の左へ動くときは「て」の字とは左右対称の放物線状の軌跡が知覚されることが明らかとなった。さらに指標の左から右への水平運動がない St. V1と St. V2においても同様の軌跡が知覚されたことから、眼球運動が曲折点を通り過ぎることによって知覚的枠組みとなっている視野が注意点から分離して右へ変位し、その分指標の反対方向への誘導運動が生じ、その動きと下方への動きが合成されて運動軌跡錯視が起きたものと考えられる。特に刺激シリーズ2において、誘導図形の出現が曲折時点以降の場合は誘導図形がない条件と同じで、眼球運動の行き過ぎが起きているはずであり、特定の対象に対する注意が解放されて他の対象に注意を向け直すまでに要する時間がおおよそ200msecであることを考えるならば (Braun & Breitmeyer, 1988; Mayfrank et al., 1986)、曲折時点に誘導図形が出現した条件であっても、即座に下方へ注意を転ずることはできず、その結果として「て」の字状の運動軌跡が知覚されてもおかしくはないはずである。それにもかかわらず明らかにこの条件において、さらには誘導図形の出現が曲折時点より132 msecも遅れた条件であっても放物線状の軌跡を報告する被験者が多く (12名中10名)、眼球運動の行き過ぎよりも知覚的枠組みの影響の方が強いことを示している。

Mack et al. (1973) が報告しているはね返り錯視の現象は、このような考えを支持するものと言えよう。古賀 (1991) は曲折点を通りすぎた右への眼球運動のベクトルと指標の下方へ

の運動のベクトルが合成されたものとの見解を述べているが、もしそうであるならば、はね返り錯視は生じないことになる。Mack et al. (1973) も Koga et al. (1996) と同様にこの時の眼球運動に指標の停止地点よりもさらに先まで移動する「行き過ぎ」があることを報告しているが、この場合は錯視の運動方向が眼球運動とは逆の方向になっており、眼球運動と同じ方向のベクトルが指標の動きとして知覚されているわけではないからである。このはね返り錯視の場合も、指標の急な停止に追視が対応しきれずに停止地点を行き過ぎ、それが知覚的枠組みの変位を導き、その結果誘導運動としての反対方向への運動（はね返り運動）が知覚されたものと考えられるのである。

また、Sakata et al. (1983) は、追跡眼球運動において活動している視覚的追跡ニューロンが、大脳皮質 MST 野周辺に多く分布していると同時に、この追跡ニューロンの多くが、視覚的入力と眼球運動の信号の両方によって共通に活動することが報告している。またこれに関連して小松 (1991) は固視状況で指標が動く場合、すなわち網膜上の像が移動する場合と、指標を追視して網膜上の対象像の位置変化がない場合、そして指標の固視状況で背景が移動する場合では、この追跡ニューロンが同じように活動していることを報告している。従って運動軌跡錯視やはね返り錯視においては眼球運動が指標の曲折点や停止位置よりも行き過ぎるということは知覚的枠組みとしての視野が変位し、それによる追跡ニューロンの活動によって指標の反対方向への運動が知覚されはね返り錯視が生じ、運動軌跡錯視の場合はその動きと指標の下方への動きが合成されることによってそのような知覚が生じるものと思われる。

また St. V1 と St. V2 においても運動軌跡錯視と同様の軌跡が知覚されているが、この場合、誘導図形の停止点から放物線を描いて落下する

ように知覚される。これは知覚の枠組みが変位し始めたとき指標はその中心にあるので、その枠組みの中心を起点として動いているように見え、そのために全体の動きとしては誘導図形の到達点を起点として放物線を描いて落下しているように知覚されるものと考えられる。そして運動軌跡錯視も同じように曲折点よりさらに右の方を起点として「て」の字状の軌跡を描いて落下するように知覚されており、このことから同じような知覚的働きの結果であることが理解されるのである。このことは Fig. 3 と Fig. 5 に認められるように曲折点と誘導図形の移動開始時点が一致しているときに最も放物線状の運動軌跡が知覚されることから支持されよう。

引用文献

- 1) Braun, D., & Breitmeyer, B.G. 1988 Relationship between directed visual attention and saccadic reaction times. *Experimental Brain Research*, **73**, 546-552.
- 2) 古賀一男 1991 眼球運動が運動視に果たす重要な役割. *心理学評論*, **34**, 93-121.
- 3) Koga, K., Ohta, Y., & Groner, R. 1996 Eye movement modifies motion trajectory of a moving target. *Environmental Medicine*, **40**, 113-121.
- 4) Koga, K., Groner, M.T., Bischof, W.F., & Groner, R. 1998 Motion trajectory illusion and eye movements. *Swiss Journal of Psychology*, **57**, 5-17.
- 5) 小松英彦 1991 空間と運動の脳内表現. *科学*, **61**, 239-248.
- 6) Mack, A., Fendrich, R., & Sirigatti, S. 1973 A rebound illusion in visual tracking. *American Journal of Psychology*, **86**, 425-433.
- 7) Mack, A., & Herman, E. 1978 The loss of position constancy during pursuit eye move-

- ments. *Vision Research*, **18**, 55-62.
- 8) Mayfrank,L., Mobashery,M., Kimmig,H., & Fischer,B. 1986 The role of fixation and visual attention in the occurrence of express saccades in man. *European Archives of Psychiatry and Neurological Science*, **235**, 269-275.
- 9) 中村浩 1979 因果関係知覚に付随する眼球運動の研究. 札幌医科大学人文自然科学紀要, **20**, 1-6.
- 10) Sakata,H., Shibutani,H. & Kawano,K. 1983 Functional properties of visual tracking neurons in posterior parietal association cortex of the monkey. *Journal of Neurophysiology*, **49**, 1364-1380.
- 11) Sumi,S. 1966 Path of seen motion and motion after effect. *Perceptual and Motor Skills*, **23**, 1003-1008.