Representational momentum における 眼球運動関連要因の再検討¹

永井聖剛^{2,3} 齋木潤 京都大学

Examination of eye-movement related factors of representational momentum

Masayoshi Nagai and Jun Saiki (Kyoto University)

The judged final position of a moving target that disappears is displaced forward (representational momentum: RM), a phenomenon called representational momentum (RM). Recently, Kerzel (2000) suggested that RM was elicited by SPEMs after a target's offset that moved the persisting image of the target in the direction of the motion after the target disappeared. We examined RM for a target that was not pursued by eyes. In Experiment 1 the target and a small dot moved in the same or opposite direction. Participants were instructed to pursue the small dot and locate the final position of the target. In both conditions the target's motion on the retina was expected to be equal to each other. Although the Kerzel's hypothesis (2000) predicted negative RM for the target moving in the opposite direction of SPEMs, no consistent negative RM was observed. Results of Experiment 2 suggested that the individual strategy to use the small dot affected RM. Taken together, it was shown that Kerzel's lower-level model was not very successful in explaining RM, but instead data suggested that predictive mental extrapolation and a higher-order individual strategy were involved in the production of RM.

Key words: representational momentum, pursuit eye movements, visible persistence, mental extrapolation, landmark effect.

The Japanese Journal of Psychology
2006, Vol. 77, No. 2, pp. 105-114

動くターゲットが消失するとき、その消失位置は刺激の運動経路の延長上にずれて判断される。物理世界において運動する物体は慣性のため急に止まれないという Physical momentum とのアナロジーから、Freyd & Finke (1984) はこの現象を Representational Momentum (RM) と命名した。これまでの研究で様々な RM の性質が明らかにされてきた。例えば、

ターゲット速度・加速度の増加に伴って RM が大きくなること (Finke, Freyd, & Shyi, 1986; Freyd & Finke, 1985; Hubbard & Bharucha, 1988), 重力の向き (下方) へと RM が大きくなること (Hubbard, 1990, 1995b, 1997; Hubbard & Bharucha, 1988; Nagai, Kazai, & Yagi, 2002; Reed & Vinson, 1996), 他の物体との摩擦を生じながらターゲットが進むように提示されると RM は小さくなること (Hubbard, 1995b; ターゲット形態と摩擦効果との関連については、Nagai & Yagi (2001) を参照) など、物理法則と大まかに一致した RM の性質が指摘されている。また、物理法則との類似性では説明できないデータも報告されている。第 1 に、日常世界における物体の進行方向に関する知識も RM の大きさに影響を与える。例えば、ロケットは上昇するという知識と一致して、RM は上昇ロケット刺激に対して増大し、下降ロケット刺激に対して減少する (Reed & Vinson, 1996; Vinson & Reed, 2002)。第 2 に、実験参加者の予期が RM に影響を与えることが示されている (Hubbard & Bharucha, 1988; Verfaillie & d'Ydewalle, 1991)。例えば、Hubbard & Bharucha (1988) はフレーム内をバ

Correspondece concerning this article should be sent to: Masayoshi Nagai, Institute for Human Science and Biomedical Engineering, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Higashi Tsukuba 305-8566, Japan (e-mail: masayoshi-nagai@aist.go.jp)

¹ 本研究の一部は 43rd Annual meeting of the Psychonomic Society において発表された。本研究は文部科学省科学研究費補助金 (特別研究員奨励費 #200201154), 21 世紀 COE プログラム “心の働きの総合的研究教育拠点” (“the 21st Century COE Program from MEXT (D-2 to Kyoto University)”) の補助を受けた。

² 本論文の作成にあたり京都大学乾敏郎教授, 名古屋大学古賀一男教授より貴重なアドバイスをいただきましたこと, 深く感謝いたします。

³ 現在の所属: 産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門 認知行動システム研究グループ研究員。

ウンドしながら水平移動するターゲットを提示し、実験参加者にどの位置でターゲットがバウンドするかを学習させる。このとき、バウンドする直前にターゲットが消失すると、消失時のターゲット運動方向ではなく、逆方向、すなわちバウンド後にターゲットが達すると予期される位置へと RM が生じることを示した。これらの知見から、視覚表象システム内に運動物体の速度・移動方向、物体の進行に関する知識、さらにはターゲットの移動方向に関する予期に基づいて運動物体の未来の位置を心的外挿処理 (mental extrapolation) により自動的に予測する機構が存在し、RM が出現すると説明されてきた (Hubbard, 1998, 1999; Nagai, Kazai, & Yagi, 2002; Nagai & Yagi, 2001)。これに対し、Kerzel (2000) はこのような視覚表象システムにおける予測的心的外挿処理ではなく、眼球運動およびターゲットの視覚的持続により RM の生起が説明されると主張した。Kerzel (2000) の実験では、移動するターゲットを捉える追従眼球運動を行っている条件および眼球が静止している条件で RM の大きさを比較した。ターゲット消失後に提示されるプローブとターゲット消失位置との比較により、RM の大きさを測定した。実験の結果、眼球静止条件では RM が出現しないこと、眼球運動条件では RM がみられ、その大きさはプローブが提示されるまでの時間に伴って増加する傾向にあることを示した。この結果から、ターゲット消失後にターゲット移動方向に惰性に進む眼球が、ターゲットの視覚的持続をターゲット移動方向へと運ぶために RM が生じると主張した (Figure 1(a) および 1(b))。また Kerzel (2002) では、先に紹介した RM の速度効果および予期効果が、ターゲットを追従する眼球の速度、ターゲットがバウンドする時点に先立って移動方向を変える予測的な眼球運動により説明されることを示した。しかしながら、Kerzel 自身が指摘するように (Kerzel, 2003)、この仮説によって説明されない実験報告がある。例えば、ターゲットの断続的仮現運動を提示し (250 ms の提示時間および 250 ms の SOA)、ターゲットに対する追従眼球運動が生じない場合にも RM がみられること (Freyd & Finke, 1984)、聴覚刺激でも RM がみられること (Freyd, Kelly, & Dekay, 1990; Getzmann, Lewald, & Gusk, 2004; Hubbard, 1995a)、また RM の実験報告ではないが、運動ターゲットではなく静止ターゲットを提示した場合に下方への位置判断シフトが生じること (Freyd, Pantzer, & Cheng, 1988) は説明されない。これらの例では、ターゲットに対する眼球運動が生じないために、そもそも Kerzel 仮説を適用することが不可能であった。

本研究では眼球運動が生じターゲットの視覚的持続が利用可能な場合に、すなわち Kerzel 仮説が適用される条件が整った場合に、この仮説で RM の生起を

完全に説明できるか否かを検討した。実験では消失位置の判断を求められるターゲットだけでなく、眼球運動をコントロールするために“動く注視点”を提示した (実験 1)。実験参加者は注視点を常にとらえるように眼球運動を行うように求められた。ターゲットと注視点は同方向あるいは逆方向に移動した。眼球運動によって正確に注視点がとらえられる場合、Kerzel (2000) 仮説によれば、同方向条件では“正の RM” (ターゲット移動と同方向への RM) が生じること (Figure 1(c))、逆方向条件では同方向条件と同じ大きさであるが、ターゲット移動と逆向きの (すなわち

Figure 1. Kerzel's explanation (2000) of RM and prediction of results of the present study. Schematic explanation of RM in the smooth pursuit eye movement condition (a) and in the fixation condition (b) in Kerzel's experiments. Schematic presentation of Kerzel's prediction of RM in the same direction condition (c) and the opposite direction conditions (d) of the present study.

眼球運動と同方向)“負の RM”が観察されるものと予測される (Figure 1(d))。本研究では、逆方向条件における RM が Kerzel 仮説によって説明できるかどうかを調べ、その仮説の妥当性を検討することを主要な目的とした。また、本研究では Kerzel の実験では適切に操作されていなかった注視点の効果も検討する。彼の実験では注視点は眼球静止条件だけで提示され、眼球運動条件では提示されなかった。注視点が提示されるとき、これを利用しターゲット消失位置と比較できるため、消失位置判断のエラーが小さくなり RM が生じない、あるいは非常に小さくなる可能性がある。すなわち、Kerzel (2000) の眼球運動条件と眼球静止条件の差異は、眼球運動の有無で純粋に説明されず、注視点の有無という要因によるものかもしれない。本研究ではターゲット以外の刺激 (注視点) が RM にどのように影響するかについても検討を行った。

実験 1

方法

実験参加者 京都大学大学院情報学研究科大学院生 3 名、および著者 1 名。著者以外の実験参加者は本実験の目的は知られていなかった。すべての実験参加者は裸眼あるいは矯正により健全な視力を有していた。

実験装置 コンピュータ (Apple Macintosh, G4/466), 21 インチ CRT モニタ (Iiyama, s103m), および眼球運動測定装置 (Sensomotoric Instruments, EyeLink)。観察距離は 57 cm であり、モニタの刺激提示範囲は視角換算で横 37.8 deg, 縦 28.4 deg であった。

刺激および条件 白色背景画面にターゲットおよび注視点として異なる大きさの黒円が提示された (それぞれ、直径 0.5 deg, 直径 0.12 deg)。ターゲットと注視点は同時に出現し、同時に消失した。ターゲットおよび注視点は、右または左方向へと移動し、その速度はターゲットが 4 deg/s または 12 deg/s, 注視点は常に 4 deg/s であった。ターゲットの移動経路は注視点の移動経路より 2 deg 上方に位置した。実験参加者は刺激提示中、注視点をとらえる眼球運動を行うよう求められた。各ブロックでは、注視点の移動方向は固定されたが、ターゲットの移動方向はランダムに選択された。ターゲットが注視点と同方向へと移動する場合 (同方向条件), ターゲットの速度は 12 deg/s, 互いに異なる方向へと移動する場合には (逆方向条件) 4 deg/s であった。したがって、両条件での網膜座標上でのターゲットの速度は (眼球が注視点を正しくとらえていれば) 等質 (ともに 8 deg/s) になると期待された。注視点が右方向へと移動するとき、注視点は画

面左端から 14.29 deg の位置より出現した。このとき、同方向条件ではターゲットは画面左端から 4.76 deg の位置より出現し右方向へと移動し、逆方向条件ではターゲットは画面右端から 14.29 deg の位置より出現し左方向へと移動した。注視点が左方向へと移動するとき、注視点は画面右端から 14.29 deg の位置より出現した。このとき、同方向条件ではターゲットは画面右端から 4.76 deg の位置より出現し左方向へと移動し、逆方向条件ではターゲットは画面左端から 14.29 deg の位置より出現し右方向へと移動した。刺激が出現してから消失するまでの時間は 1000, 1059, 1118, 1177, 1235, 1294, あるいは 1353 ms であった。これらの提示時間は各試行でランダムに選ばれた。いずれの条件においても、提示時間が 1177 ms の場合、ターゲットと注視点が垂直軸に関して一直線に並んだときに、すなわち、ターゲットが注視点の上方 2 deg に位置するときに、両者が消失した。また、1177 ms より短い三つの提示時間ではターゲットは注視点 (視線方向) へ近づくと、より長い三つの提示時間ではターゲットは注視点から遠ざかるときに、刺激が消失した。また、刺激消失時のターゲットおよび注視点の水平軸における両者の間隔は、提示時間が短いものから、-1.43, -0.96, -0.48, 0, +0.48, +0.96, および +1.43 deg であった (符号“-”は刺激消失時にターゲットが注視点に近づいていること, “+”は遠ざかっていることを示す)。刺激の消失から 47.1 ms 後、画面の中央付近にカーソル “+” が提示された。刺激消失後は眼球を自由に動かすことを許された。

課題および手続き 実験参加者の課題は、刺激消失後に提示されるカーソルをマウスデバイスによりターゲットが消失した位置に移動させ、クリックすることであった。その際、できるだけ正確に素早く反応することが求められた。実験参加者は移動する注視点を眼球によって追跡をする練習試行の後、実験に進んだ。各実験参加者は 280 試行からなる実験に参加した (注視点の移動方向 [2] × ターゲットの移動方向 [2] × ターゲット消失位置 [7] × 繰り返し [10])。各ブロックは 28 試行から成り、各ブロック終了時に小休止が取られ、その際必要に応じて眼球運動測定装置のキャリブレーションが行われた。

結果および考察

眼球運動データ 右眼の注視位置を測定対象とし、サンプリング周波数は 250 Hz, 注視位置は刺激提示モニタ上のピクセル座標、眼球速度は単位時間あたりの眼球移動距離によって表された。これらのデータ処理はオフラインで行われた。刺激消失前 400 ms から消失後 48 ms の間に 0.25 deg 以上のサッカディック眼球運動を行っていた、あるいは注視点と一致しない方向への眼球運動が行われていた試行のデータは以後の

分析には用いられなかった。実験参加者 4 名のうち 3 名の実験参加者 (YI, MM, および MN) では、除外された試行数は全体の 7.5% 以下であった (それぞれ, 7.5, 5.7, 4.6%)。しかしながら、実験参加者 KO のデータに高周波ノイズがみられたために眼球運動の判別が困難な試行が多くあり、31.7% の試行が除外された。

眼球運動の速度は刺激消失前 400 ms から刺激消失までおよび刺激消失から刺激消失後 48 ms の二つの期間に分けて分析された。刺激消失後 48 ms というのはターゲットの視覚的持続がおよそ消失する時間であった (Kerzel, 2000)。Figure 2 に各条件、各期間における眼球運動の平均速度を示す。もし眼球が完全に注視点を追跡しているならば、眼球の速度は注視点の移動

速度 (4 deg/s) に一致するはずであった。実験参加者 KO はすべての測定条件でおよそ注視点の移動速度と一致している。実験参加者 YI では、やや注視点の移動速度よりも小さいものの全測定条件でほぼ等しい眼球移動速度を示している。これに対し、実験参加者 MM および MN では、刺激消失後の逆方向条件 (Aft/Opp) で眼球速度が注視点速度の半分程度あるいはそれ以下になっている。

消失位置判断データ RM の大きさは、水平軸における実際の消失位置と判断された消失位置との差によって定義された。注視点の移動方向にかかわらず、消失位置がターゲットの移動方向へとずれて判断された場合 RM の大きさに“正”の符号が与えられ、ターゲットの移動方向と逆にずれた場合“負”の記号が与えられた。Figure 2(b) に各条件における RM の大きさを示す。RM の大きさが 0 と異なるかどうかを調べるために、ウィルコクソン符号化順位検定を行った。その結果、実験参加者 MN の逆方向条件で有意な差が認められなかったが ($z=1.37, p=.17$)、その他では有意な差が認められた。つまり、実験参加者 YI の逆方向条件では有意な負の RM が認められ、それ以外では正の RM が認められた ($z_s > 2.51, p < .05$)。Kerzel (2000) の仮説で RM が完全に説明されるなら、すなわち、刺激消失後、眼球運動が運ぶターゲットの視覚的持続によってデータが完全に説明されるなら、同方向条件および逆方向条件で等質な眼球運動速度を示した実験参加者 (KO および YI) では二つの条件で絶対値が同じかつ符号の異なる RM が観察されるはずであった (Figure 1(d) 参照)。しかしながら、そのような結果は得られなかった。実験参加者 KO は条件にかかわらず、正の RM が観察された。また、YI では逆方向条件で負の RM がみられたが、その大きさは同方向条件での RM に比べ非常に小さい。残り 2 名の実験参加者 (MM および MN) は眼球運動のデータから逆方向条件において眼球が刺激消失時以後に減速していたことが示唆されるが、刺激消失後に眼球の速度がゼロになったわけではなく、Kerzel の仮説からは負の RM が予測される。しかしながら、そのようなデータは得られなかった。

以上から、本実験の結果は Kerzel (2000) で提案された仮説によって説明できないことが確認された。しかしながら、予測的な心的外挿処理によってもデータは完全に説明されなかった。仮に網膜座標上のターゲット速度にもとづいた予測的な心的外挿処理によって RM が完全に説明されるなら⁴、逆方向条件でも同方向条件と同じ大きさの正の RM が出現するべきであったからである。したがって、Kerzel 仮説および心的外挿処理のいずれかで実験データを完全に説明できないことが明らかになった。ただ、同方向、逆方向条件間で RM データに大きな差異があったことから

Figure 2. Eye velocity and magnitude of RM in Experiment 1, averaged across seven relative positions between fixation spot and target position at the stimulus offset. (a) Mean eye velocity during the target presentation (from 400 ms before the target offset to the offset) in the same (Pre/Same) and in the opposite (Pre/Opp) conditions, and mean eye velocity after the target's offset (from the offset to 48 ms after the offset) in the same (Aft/Same) and in the opposite (Aft/Opp) conditions. (b) Mean magnitude of RM in Experiment 1.

眼球運動が RM の生起に何らかの影響を持っていることは確かである。次項では眼球運動と RM の関連性をより詳細に調べた。

眼球運動と RM との詳細な比較 本実験では、七つの刺激提示時間が用いられた。これらの刺激提示時間は各試行でランダムに選択されたが、刺激出現から 1 295 ms (最長の刺激提示時間) 後に刺激は必ず消失

⁴ 実験 1 では網膜座標上でのターゲット速度を同方向・逆方向条件で等質にした実験を行い、“網膜座標上のターゲット速度にもとづいた”予測的な心的外挿処理により RM が完全に説明されるとすれば仮定し、心的外挿処理に関して論じている。しかしながら、“環境座標上のターゲット速度にもとづき”予測的な心的外挿処理が行われている可能性もある。我々は環境座標上でのターゲット速度を等質にした実験を補足実験として行った。同方向・逆方向条件共に環境座標上のターゲット速度は 12 deg/s、注視点の速度は 4 deg/s であった。すなわち、網膜座標上でのターゲット速度は、同方向条件で 8 deg/s、逆方向条件で 16 deg/s であった。他の手続きに関しては実験 1 にしたがった。実験の結果、個人差も含め、実験 1 と同じ傾向のデータが得られた (Appendix)。統計検定もほぼ同様で、実験参加者 MN で有意な正の RM が認められた ($z=3.68, p<.001$) 以外、同じ傾向であった ($z>4.00, ps<.0001$)。すなわち、補足実験の結果も、Kerzel (2000) では RM が説明されないこと、“環境座標上のターゲット速度”によっても RM の出現が完全に説明されることが確認された。

した。このように追従すべき対象 (本実験では、移動する注視点) の刺激属性の変化が予測できる場合には、その変化時点で先立って、追従眼球運動が予測的な変調をみせることが知られている (Boman & Hotson, 1992)。本実験の場合、刺激消失時点をもつて予測し、実際の消失に先立ち眼球を減速する可能性があった。Figure 3 の横軸は各刺激消失時点における、注視点に対するターゲットの相対的な消失位置、縦軸は眼球速度を示す。方法にて記したように、相対消失位置 +1.4 は最大の刺激提示時間 (1 353 ms)、-1.4 は最小の提示時間と対応している (1 000 ms)。Figure 3 より、多少データのばらつきはあるが、条件および刺激消失前・消失後に関わらず、プロットは右下がりの傾向にあり、刺激消失に先立ち予測的に眼球を減速したことを示している。特に、この傾向は実験参加者 MM、MN の逆方向条件、刺激消失後 48 ms 間のデータ (Aft/Opp) に顕著に示される。また、条件間で眼球運動の速度にほとんど差がみられない実験参加者 (YI; KO のデータにノイズがみられるが、大局的にみると大きな条件差はない) と顕著にみられる実験参加者 (MN、刺激消失前および後において; MM、刺激消失後において) に分類される。Figure 4 に注視点に対するターゲットの相対的な消失

Figure 3. Mean eye velocity at each relative position between fixation spot and target position at the stimulus offset in Experiment 1.

位置ごとの RM を示す。Kerzel 仮説から、条件間で眼球運動の速度にほとんど差がなければ（例えば、実験参加者 YI）、RM データは横軸に関して上下対称になるはずである。しかし、Figure 4 をみると逆方向条件の RM データは同方向条件のデータを基本的に下方にシフトしたものとなっている。したがって、眼球運動によって運ばれるターゲットの視覚的持続が RM 生起の決定的要因ではないことが示唆される。さらに、Figure 4 から実験参加者の RM データには、二つのタイプが存在することが示唆される。実験参加者 KO、MN のように刺激提示時間の増加に伴い単調に RM が減少するタイプ、または実験参加者 MM、YI のようにターゲットと注視点との相対的位置が小さいときに（MM では -0.4 、YI では 0 のときに）RM が小さくなるタイプがみられた。単調に減少するデータ傾向は Kerzel (2000) においてもみられ、予測的な眼球運動の影響であると示唆された。しかしながら、単調な減少は予測的に眼球運動を減速した実験参加者 MN もそうでない実験参加者 KO でもみられ、単純に予測的な眼球運動では説明されない。また、単調な減少を示さない実験参加者 MM、YI のデータは、注視点とターゲット消失位置が近いとき、注視点を効果的に利用しターゲット消失位置をコードしたために

消失判断位置の判断が正確になり RM が小さくなったという可能性を示唆する（ランドマーク効果、Hubbard & Ruppel, 1999; Nagai, Saiki, Nakai, & Yagi, 2002）。例えば、注視点の輝度を高くすると注視点に注意が引きつけられ、ターゲット消失位置が注視点に近いとき RM が小さくなるというランドマーク効果が強まり、実験参加者 YI および MN のようなデータ傾向を示し、注視点の輝度を低くすると注視点に引きつけられる注意効果が小さくなり、ランドマーク効果が減じられ、実験参加者 KO および MN のような RM データ傾向を示すことが、先行研究により予測される（Nagai et al. 2002; Hayes & Freyd, 2002）。このように注視点の顕著性を操作し、個人差を減じることは可能だが、個人差を減じることは本研究の趣旨ではなく、実験 2 で論議するように、むしろ個人差が RM の生起を理解するのに有益な手がかりになると考えるため、顕著性を操作する実験は行わなかった。

最後に運動ターゲットの速度知覚錯視と RM との関連について述べる。Koga らの行った一連の研究によって、追従眼球運動が生じるとき、ターゲットの知覚速度は網膜上でのターゲット移動ベクトルと眼球運動ベクトル（あるいは自己受容感覚器によってモニタリングされる眼球運動ベクトル）との統合が不完全で

Figure 4. Mean magnitude of RM at each relative position between fixation spot and target position at the stimulus offsets in Experiment 1.

あるために、ターゲットの速度錯視が観察されると示唆されている (e.g., 古賀, 1991; Koga, 2000; Koga & Groner, 1990; Koga, Groner, Bischof, & Groner, 1998; Koga, Makino, Sakata, & Takahashi, 1988)。

しかしながら、本研究ではターゲットの速度錯視がRMに影響する可能性は極めて低いと考えられる。理由は以下の2点である。第1に、仮にKogaらの研究で示唆される二つの運動ベクトルの情報統合による運動錯視が影響しているとすれば、実験1において注視点を正確に眼球によって捉え、網膜上のターゲット運動ベクトルがほぼ“ゼロ”である実験参加者KOおよびYIはRMの互いのデータが類似し、そうでない実験参加者MMおよびMNでデータに類似の傾向がみられると期待される。ところが実際には、追従眼球運動の精度の高・低（すなわち、網膜上でのターゲット移動ベクトルの小・大）とRMのデータ傾向は無関係であることが、示されている。第2に、背景誘導運動によりターゲット知覚速度が実際の速度と異なる場合であっても、知覚される錯視運動はRMに影響を与えないことが確認されている (Nagai & Saiki, 2005)。

実験 2

本実験では眼球静止時のRMを測定した。まず、Kerzel (2000) 仮説が正しければRMはみられず、RMの出現に予測的心的外挿処理が関与していればRMが出現すると予測された。さらに、RMが出現した場合、眼球静止時のRMデータが実験1と同様の傾向を示すならば、(a) Figure 4の単調減少傾向は予測的な眼球運動の減速では説明されないこと、(b) RMの個人差は眼球運動が生じるか否かに関わらず、各実験参加者の注視点の利用方略に起因するものと考えられる。

方法

実験参加者および実験装置 実験1と同様。

刺激および条件 注視点は画面中央より2 deg 下方に提示され、移動しなかった。ターゲットの移動経路は注視点より2 deg 上方に位置した。ターゲットの速度は4, 8, および16 deg/sの3種類であり、右または左に移動した。ターゲットの出現位置はターゲット速度に応じて異なり、4 deg/sのとき画面の左または右のエッジから画面中央へ14.29 deg ずれた位置、8 deg/sのときエッジから中央へ9.52 deg ずれた位置、および16 deg/sのときにはエッジの位置であった。注視点に対するターゲットの相対的な消失位置はすべてのターゲット速度で同じであり、実験1と同様、 $-1.43, -0.96, -0.48, 0, +0.48, +0.96$, および $+1.43$ degであった（符号“ $-$ ”は刺激消失時にターゲットが注視点に近づいていること、“ $+$ ”遠ざかっている

ことを示す）。さらに、実験1と同様、消失位置 -1.43 のときターゲット提示時間が最も短く（1000 ms）、 $+1.43$ degのとき最も長かった（1353 ms）。ターゲットと注視点は同時に出現し、同時に消失した。ターゲットの移動方向および速度は各試行においてランダムに選択された。実験参加者は注視点提示中、常に注視点を見つめるように教示された。刺激の消失から47.1 ms後、画面中央にカーソル“ $+$ ”が提示され、刺激消失後は眼球を自由に動かすことを許された。

課題および手続き 実験参加者の課題は実験1と同様であった。実験参加者は注視点の位置に眼球を保持する練習試行の後、実験に進んだ。各実験参加者は210試行からなる実験に参加した（ターゲットの移動方向 [2] × 速度 [3] × ターゲット消失位置 [7] × 繰り返し [5]）。各ブロックは28試行から成り、各ブロック終了時に小休止がとられ、その際必要に応じて眼球運動測定装置のキャリブレーションが行われた。

結果および考察

眼球運動データ 眼球運動のデータはオフラインで処理された。刺激消失前400 msから消失後48 msの間に0.25 deg以上のサッカディック眼球運動を行っていた試行のデータは以後の分析には用いられなかった。除外された試行数は全体の8.1%以下であった（実験参加者KO, 4.8%; MM, 2.8%; YI, 8.1%; MN, 2.4%）。注視時の眼球運動波形はフラットであり特に分析すべき特徴を持たないので、実験2では眼球運動データは分析されなかった。

消失位置判断データ Figure 5(a)に各条件、各ターゲット速度におけるRMの大きさを示す。RMの大きさが0より大きいのか否かを調べるために、ウィルコクソン符号化順位検定を行った。その結果、実験参加者YIに関してはターゲット速度が8 deg/sおよび16 deg/sのとき有意な正のRMが認められなかったが ($z_s < 1.22, p > .22$)、その他では有意な正のRMが認められた ($z_s > 2.46, p < .05$)。実験参加者YIにおいて二つの速度を除き、正のRMがみられたという本実験の結果は、Kerzel (2000) の仮説では説明不可能であり、RMの生起に心的外挿処理の関与することが示唆された。また、先行研究ではRMの大きさはターゲット速度に応じて大きくなるが見出されているが (Finke et al., 1986; Freyd & Finke, 1985; Hubbard & Bharucha, 1988)、本実験からはそのような傾向はみられなかった。Figure 5(b)に注視点に対するターゲットの各相対消失位置におけるRMの大きさを示す。これをみると、実験参加者KO/MNとMM/YIのデータには質的な差異が見受けられるようである。すなわち、実験参加者KOおよびMNではRMは相対消失位置の増加にしたがって単調に減少しているが、YIでは単調な減少に加えて相対消失位置

がゼロに近いときに RM はほぼゼロを示し、MM でも RM の単調減少はみられず、相対消失位置がゼロに近い -0.4 のときに RM が小さくなっている。この傾向は実験 1 での各実験参加者の傾向と対応している。予測的な眼球運動の減速が起こり得ない本実験の状況であっても RM の単調な減少がみられたことは、視線方向への位置判断のずれ (foveal bias; Osaka,

1977; Van der Heijden, Van der Geest, De Leeuw, Krikkle, & Müsseler, 1999) によって説明される。すなわち、ターゲットが注視点に向かっていているとき (相対消失位置が“ $-$ ”), foveal bias が生じる方向と RM の生じる方向が一致し RM が大きくなり、ターゲットが注視点から遠ざかるとき (相対消失位置が“ $+$ ”) 両者の方向が一致しないため RM が小さくなったと

Figure 5. (a) Mean magnitude of RM in Experiment 2, averaged across seven relative positions between fixation spot and target position at the stimulus offset. (b) Mean magnitude of RM in Experiment 2, at each relative position between fixation spot and target position at the stimulus offset.

考えられる。また、実験 1 と一致した RM のデータ傾向から追従眼球運動時の RM の個人差は、ターゲット消失位置を判断するときの一般的な（すなわち、眼球運動の有無にかかわらず）ランドマーク（注視点）の利用方略に関連していることが示唆された。

総合考察

本研究では RM の生起が Kerzel (2000) によって提案された仮説により完全に説明されるか否かを検討した。実験 1 では注視点に対する追従眼球運動が生じ、またターゲットの視覚的持続を利用可能であったにもかかわらず、ターゲットと眼球とが逆方向に移動する場合には Kerzel 仮説によって RM の生起が説明されないことを明らかにした。また、実験 1 および 2 から RM の生起には、ランドマークの利用方略という高次の視覚情報処理もかかわっていることが示唆された。しかしながら、本研究の実験結果は予測的な心的外挿処理のみによっても説明されなかった。本研究の実験結果において一つ重要な点は、Figure 4 にみられるように注視点に対するターゲットの相対消失位置ごとに RM の大きさをプロットした場合、プロットの傾向は同方向条件と逆方向条件で同質であること、また同方向条件にて RM がより大きいということである。これらのうち、前者から、眼球運動がターゲット移動方向と同じか異なるかにかかわらず、すなわち、心的外挿処理に深く関与する RM 成分の存在が示唆される。後者から、眼球運動がターゲットの移動方向と一致するとき、眼球運動によって心的外挿処理が促進されるのかもしれない。この点は脚注 4 に述べた補足実験の結果からも支持されよう。すなわち、実験 1 と補足実験データの比較から、ターゲット移動速度が網膜座標上、環境座標上のいずれで規定されようとも得られる RM は個人傾向も含めて同質であり、眼球運動方向とターゲット移動方向が一致するか否かによって得られる RM の正負、そして大きさが決定される可能性が示唆される。

また、実験 2 から、眼球が静止している場合にその大きさは非常に小さいが RM が生じることが示された。Kerzel (2000) は眼球が静止している場合に RM は出現しないと結論したが、Kerzel (2003) および Ashida (2004) では眼球静止時にも RM が出現する可能性が示唆されている。また、Nagai, Sekuler, & Bennett (2004) においても眼球静止時の RM が観察されており、実験 2 の結果はこれらの報告と一致している。このことから、心的外挿処理が RM の生起に関与していることが示唆される。ただ、実験 2 から眼球運動静止時にはターゲット速度が RM の大きさに反映されないことが示された。これに対し、眼球運動を制限しない場合、本実験で用いられたようなターゲットが追従眼球運動を誘発するような実運動である

か、追従眼球運動を誘発しないような断続運動にかかわらず、RM の大きさはターゲット速度に応じて増大することが知られる (Finke et al., 1986; Freyd & Finke, 1985; Hubbard & Bharucha, 1988)。したがって、眼球運動が（おそらくは、ターゲットの移動方向へと）生じることがターゲット速度に応じた心的外挿処理を起こし、速度に応じた RM を生起させるために必要であると推測される。

引用文献

- Ashida, H. (2004). Action-specific extrapolation of target motion in human visual system. *Neuropsychologia*, **42**, 1515-1524.
- Boman, D. K., & Hotson, J. R. (1992). Predictive smooth pursuit eye movements near abrupt changes in motion direction. *Vision Research*, **32**, 675-689.
- Finke, R. A., Freyd, J. J., & Shyi, G. C. W. (1986). Implied velocity and acceleration induce transformations of visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, **115**, 175-188.
- Freyd, J. J., & Finke, R. A. (1984). Representational momentum. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, **10**, 126-132.
- Freyd, J. J., & Finke, R. A. (1985). A velocity effect for representational momentum. *Bulletin of the Psychonomic Society*, **23**, 443-446.
- Freyd, J. J., Kelly, M. H., & Dekay, M. L. (1990). Representational momentum in memory for pitch. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, **16**, 1107-1117.
- Freyd, J. J., Pantzer, T. M., & Cheng, J. L. (1988). Representing statics as forces in equilibrium. *Journal of Experimental Psychology: General*, **117**, 407.
- Getzmann, S., Lewald, J., & Guski, R. (2004). Representational momentum in spatial hearing. *Perception*, **33**, 591-599.
- Hubbard, T. L. (1990). Cognitive representation of linear motion: Possible direction and gravity effects in judged displacement. *Memory & Cognition*, **18**, 299-309.
- Hubbard, T. L. (1995a). Auditory representational momentum: Surface form, direction, and velocity effects. *American Journal of Psychology*, **108**, 255-274.
- Hubbard, T. L. (1995b). Cognitive representation of motion: Evidence for representational friction and gravity analogues. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, **21**, 241-254.
- Hubbard, T. L. (1997). Target size and displacement along the axis of implied gravitational attraction: Effects of implied weight and evidence of representational gravity. *Journal of Experimental*

- Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, **23**, 1484-1493.
- Hubbard, T. L. (1998). Representational momentum and other displacements in memory as evidence for nonconscious knowledge of physical principles. In S. R. Hameroff, A. W. Kaszniak & A. C. Scott (Eds.), *Towards a science of consciousness II: The second Tucson discussions and debates*. Cambridge, MA: MIT Press. pp. 505-512.
- Hubbard, T. L. (1999). How consequences of physical principles influence mental representation: The environmental invariants hypothesis. In P. R. Killeen & W. R. Uttal (Eds.), *Fechner Day 99: The end of 20th century psychophysics. Proceedings of the 15th Annual Meeting of the International Society for Psychophysics*. Tempe, AZ: The International Society for Psychophysics. pp. 274-279.
- Hubbard, T. L., & Bharucha, J. J. (1988). Judged displacement in apparent vertical and horizontal motion. *Perception & Psychophysics*, **44**, 211-221.
- Hubbard, T. L., & Ruppel, S. E. (1999). Representational momentum and the landmark attentional effect. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, **53**, 242-255.
- Hayes, A. E., & Freyd, J. J. (2002). Representational momentum when attention is divided. *Visual Cognition*, **9**, 8-27.
- Kerzel, D. (2000). Eye movements and visible persistence explain the mislocalization of the final position of a moving target. *Vision Research*, **40**, 3703-3715.
- Kerzel, D. (2002). The locus of "memory displacement" is at least partially perceptual: Effects of velocity, expectation, friction, memory averaging, and weight. *Perception & Psychophysics*, **64**, 680-692.
- Kerzel, D. (2003). Central force draws the eyes, not memory of the target, toward the center. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, **29**, 458-466.
- 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**, 93-120.
- (Koga, K. (1991). Eye movement plays important role in motion perception. *Japanese Psychological Review*, **34**, 93-120.)
- Koga, K. (2000). Motion perception modified by eye movements. *Swiss Journal of Psychology*, **59**, 108-114.
- Koga, K., & Groner R. (1990). Pursuit eye movement and object motion perception. In R. Groner, G. d'Ydewalle & R. Parham (Eds.), *From Eye to Mind: Information acquisition in perception, search and reading*. Amsterdam: Elsevier. pp. 59-98.
- Koga, K., Groner, T. M., Bischof, W. F., & Groner, R. (1998). Motion trajectory illusion and eye movements. *Swiss Journal of Psychology*, **57**, 5-17.
- Koga, K., Makino, T., Sakata K., & Takahashi, N. (1988). How can we know the veridical velocity of a moving objects? In G. Lüer, U. Lass & J. Shallo-Hoffman (Eds.), *Eye Movement Research: Physiological and Psychological Aspects*. Toronto: C. J. Hogrefe. pp. 320-336.
- Nagai, M., Kazai, K., & Yagi, A. (2002). Larger forward displacement in the direction of gravity. *Visual Cognition*, **9**, 28-40.
- Nagai, M., & Saiki, J. (2005). Illusory motion and representational momentum. *Perception & Psychophysics*, **67**, 855-866.
- Nagai, M., Saiki, J., Nakai, R., & Yagi, A. (2002). Representational momentum with and without a non-target context. *Perception*, **31**, 122c. (suppl.)
- Nagai, M., Sekuler, A. B., & Bennett, P. J. (2004). Representational momentum with different target's contrast. *Journal of Vision*, **4**, 572a.
- Nagai, M., & Yagi, A. (2001). Pointedness effect on representational momentum. *Memory & Cognition*, **29**, 91-99.
- Osaka, N. (1977). Effect of refraction on perceived locus of a target in the peripheral visual field. *Journal of Psychology*, **95**, 59-62.
- Reed, C. L., & Vinson, N. G. (1996). Conceptual effect on representational momentum. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, **22**, 839-850.
- Van der Heijden, A. H. C., Van der Greest, J. N., De Leeuw, F., Krikke, K., & Müsseler, J. (1999). Source of position-perception error for small isolated targets. *Psychological Research*, **62**, 20-35.
- Verfaillie, K., & d'Ydewalle, G. (1991). Representational momentum and event course anticipation in the perception of implied periodical motions. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, **17**, 302-313.
- Vinson, N. G., & Reed, C. L. (2002). Sources of object-specific effects in representational momentum. *Visual Cognition*, **9**, 41-65.

—2004. 8. 5 受稿, 2006. 1. 14 受理—

The magnitude of RM in the supplementary Experiment, averaged across seven relative positions.