

サッカードに伴う視覚誘導性腕応答ゲインの動的変化

Dynamic updating of the involuntary manual response gain during goal directed movement

安部川 直稔 (PY)[†], 五味 裕章^{† ‡}

Naotoshi Abekawa(PY), Hiroaki Gomi

[†]NTT コミュニケーション科学基礎研究所

[‡] 科学技術振興機構 ERATO 下條潜在脳機能プロジェクト

{abekawa, gomi}@idea.brl.ntt.co.jp

Abstract— Reflexive manual response induced by visual motion (MFR) is modulated by the gaze and reaching-target configuration. To clarify when the modulation is completed, we examined the MFR gain after gaze shift during reaching movement. Our data showed that the new gaze-target configuration changed MFR amplitude, suggesting that the MFR gain was dynamically modulated in the motor execution process.

Keywords— On-line motor control, Conscious and subconscious motor controls, Spatial representation, Eye-centered reference frame

1 はじめに

ヒトの巧みな運動は、意識的動作と無意識的動作が機能的に関わることで実現されており、反射応答が運動課題や注意の影響に応じて修飾される現象が報告されている。近年、上肢到達運動中に視覚運動刺激が生じると、その運動方向に無意識かつ短潜時に腕が加速する現象 (Manual Following Response: MFR) が知られる [1]。我々はこの反射性腕応答が、視線方向と到達目標方向の角度が小さい程増加し、大きい程減少することを報告した [2]。このことは、意識的動作に関連する視線と到達目標の空間的關係性によって、MFR が機能的に調節されることを意味するが、いかなる情報がどのタイミングでゲイン修飾に関わるのか、詳細なメカニズムについては未解明な点が多い。本研究では、腕運動中にサッカード課題を行なわせ、視線移動に伴って動的に MFR のゲイン修飾が変化するか否かを調べた。

2 実験方法

2.1 実験装置

被験者 (8 名) は暗室内で頭部を顎台で固定して椅子に座り、前方 50cm に視覚刺激提示用の PC モニタ (横 53 度 × 縦 41 度) が設置された (図 1A)。被験者の課題は手元のボタンスイッチから、モニタまでの到達運動を行なうことである。被験者の腕を光学式三次元位置センサー (OPTOTRAK3020, 250Hz) で、眼球の位置を、眼球運動計測装置 (Eyelink2000, 2000Hz) で計測した。

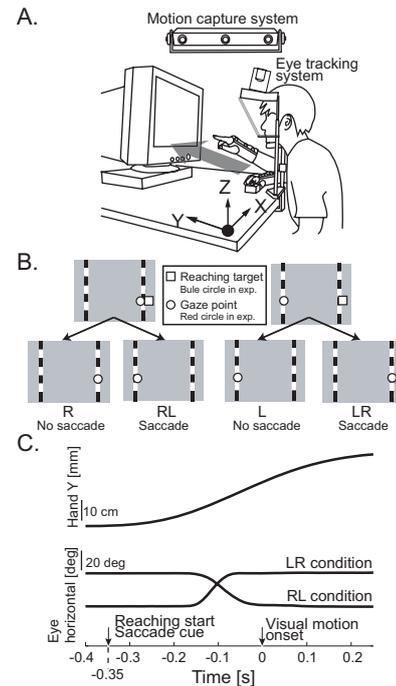


図 1: A:実験セットアップ B:視線に関する 4 条件 C:サッカードを含む試行の時間プロトコル

2.2 実験課題

各試行の開始で、被験者は初期位置 (座標:[0, -5]cm, モニタ中心:[0, 0]) を注視しながらボタンスイッチを押して待機した。一定時間経過後、到達目標指標 (青丸) が初期位置の右方 (座標:[14.5, -5]cm) に、注視指標 (赤丸) が右方 (座標:[14, -5]cm) または左方 (座標:[-14, -5]cm) に提示される。これら指標と同時に、静止水平正弦波縞 (横:0.5 度, 縦:41 度, 空間周波数:0.2c/d) が二本、初期位置から左右 14cm の位置に提示された (図 1B)。被験者が注視指標を 700ms 間見続けた後、腕運動の開始を指示するピープ音と共に、到達目標指標が消える。全体の 1/2 の試行で、腕運動の開始と共に、注視指標が横方向にステップ移動する。移動方向は、左から右 (LR 条件), 右から左 (RL 条件) の 2 通りで、移動量は 28cm である (図 1B)。被験者は腕運動中に、指標移動に対してできるだけ早くサッカードを行なうことが指示された。残りの試行については、注視指標は静止し

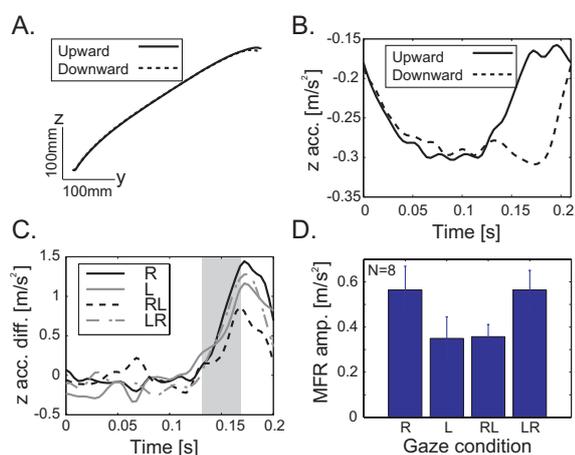


図 2: A:y-z 平面平均手先軌道 B:平均手先加速度 B:視線 4 条件の差分手先加速度. 影部は応答の大きさ評価区間. D:MFR 大きさの被験者間平均 (+ 標準誤差)

たまでであった (R 条件, L 条件, 図 1B). また注視指標の移動に関わらず, 全試行の 2/3 で, 腕運動の開始後 350ms に正弦波縞が上または下に動き (速度 50 deg/s), 1/3 の試行では動かない条件となる. サッカードの潜時が 130 ~ 270ms の範囲から外れた試行は除外し, 正弦波縞運動の開始時刻にはサッカードが終了するように設定した. 図 1C にサッカード条件における手と眼球の運動の時間プロファイルを示す. 以上より, 全部で 12 条件: [視線マーカの位置 (左または右) × サッカード (有りまたは無し) × 視覚運動刺激 (上, 下, または静止)], 1 条件 36 試行の計 432 試行で実験を行った.

2.3 データ処理

図 2A は y-z 平面の平均腕軌道であるが, 正弦波縞運動に誘発される腕応答は z 軸が顕著であり, z 軸腕運動軌道を解析した. 計測位置データに平滑化処理を施し (ローパス 30Hz), 時間差分から速度, 加速度を求めた. これらデータは全て, 正弦波縞の運動開始を時刻 0 とした. 速度波形を元に運動が大きく外れた試行を除外した後に, 各条件毎に平均手先加速度を求めた. 二つの平均手先加速度の差分 (上方向 - 下方向) を求め (差分手先加速度), 正弦波縞の運動開始から 130ms-170ms の平均値を MFR の大きさとして定義した.

3 実験結果

図 2B に, 正弦波縞の運動方向に対する平均加速度を示す (被験者 NA, R 条件). 正弦波縞の運動開始後約 120ms という短い潜時で, 刺激方向に腕が加速している. 同一被験者で, 視線条件毎の差分手先加速度波形を図 2C に示す. 視線移動を含まない R, L 条件を比較すると, 到達目標位置と視線位置に近い R 条件の方が, 離れた L 条件に比べて, 大きな腕応答が誘発されており, 視線と到達目標の位置関係による MFR 修飾が観察された. 次に, この視線依存の応答修飾が視線移動で変化するか否かを調べるために, 腕運動中にサッカードを伴

う RL, LR 条件において MFR を比較する. MFR は RL 条件に比べて LR 条件において大きく誘発されており, サッカード後の視線と到達目標の位置関係で, MFR の大きさが修飾されていることが分かる. 図 2D に, 定量化した MFR の大きさを (全被験者間平均) 各条件毎に示すが, 上記典型被験者の結果とほぼ同様の傾向であった. 一要因 (視線 4 条件) の分散分析を行なった結果, 主要因は有意 ($p < 0.0005$) で, 多重比較 (シェフの検定) によると, R と L, R と RL, L と LR, RL と LR, 各々の条件間に有意差 ($p < 0.01$) が認められた.

4 考察とまとめ

本研究では腕運動中の視線移動に伴って, MFR ゲインが動的に変化するかについて調べた. 結果を考察する上で, サッカード抑制による視覚運動処理への影響を考慮する必要があるが, 本結果ではゲインが増加する場合 (L LR) と減少する場合 (R RL) の両条件において, サッカード後の視線と到達目標の位置関係に応じた応答調節が観察された (図 2D). このことは, MFR ゲイン設定は腕運動計画時に終了するものではなく, 腕運動遂行時にも実時間で更新されることを示唆する.

また, R と LR 条件間に, L と LR 条件間に有意な差が認められないことから, サッカードに伴う MFR ゲインの更新が, 本実験条件では完全に遂行されたと考えられる. それではゲイン更新はどの時間フェイズで行なわれているのだろうか? 大別すると次の 3 つを考えることができる. 1) 注視指標のステップ移動から正弦波縞運動開始までの約 350ms 間, 2) サッカード開始から正弦波縞運動開始までの約 150ms 間, 3) サッカード終了から正弦波縞運動開始までの約 70ms 間. 詳細な時間発展を探るためにはサッカードの生起時刻を細かく調節する必要があるが, MFR を誘発するための拘束条件や, 腕運動中にサッカードを調節する困難性を考慮すると, 実験課題として困難である. そこで今後はサッカード開始前のゲイン調節の有無を調べると同時に, 注意や知識, 注視指標の視覚情報といった, 眼球運動や眼球位置とは直接関係のない情報によってもゲイン調節が生じうるかについて探っていきたい.

参考文献

- [1] Saijo N, Murakami I, Nishida S, Gomi H (2005) "Large-field visual motion directly induces an involuntary rapid manual following response." *J Neurosci*, **25**, 4941-4951.
- [2] Abekawa N., Gomi H. (2006) "Contribution of the spatial relationship between gaze and reaching target to the gain modulation of visually induced manual response." 36th Society for Neuroscience Meeting Abstract, 440.2.