

原著

腕運動に伴う眼球運動の発生源に関する研究

The Origin of Eye Movement Associated with Arm Movement

畑中 良太^{1) 2)} 今岡 真和^{1) 2) 3)} 岩田 恭幸⁴⁾

Abstract : We observe eye movements during arm movement, arm motor imagery, and vibration to the biceps brachii muscle, through which we verified the hypothesis that arm movement commands accompanying eye movement through efferent copying. The subject was a right-handed healthy adult man. Vibration at 100 Hz was applied by a vibration device installed in the biceps brachii of the subject. Arm movement included rapid rotation at 45° to the right or left. Eye movement was measured with a corneal reflection sensor. When the head was not fixed, eye movements were more frequent with arm movement than arm rest. However, when the head was fixed, the frequency of eye movements between arm movement and arm rest were not significantly different. Latency of biceps brachii muscle activity or triceps brachii muscle activity and latency of head movement were almost the same. However, the latency of eye movement was significantly extended compared to the latency of muscle activity and head movement. Eye movements did not occur during arm motor imagery and vibration to the biceps brachii muscle. From these results, we speculate that ocular movements accompanying arm movement originate from optokinetic reactions resulting from head movement of the anticipatory postural adjustment associated with contraction of the biceps brachii or triceps brachii muscles.

Key words : eye-hand coordination, origin of eye movement, optokinetic reflex

要約 : 腕運動中、腕運動イメージ中および腕運動主動筋への振動刺激中における眼球運動の出現を観察することを通して、腕運動命令が遠心性コピーを介して眼球運動命令を随伴生起するという仮説を検証した。対象は右利き健康成人男性とした。眼球運動は、角膜反射センサで計測した。腕運動は、右あるいは左に45°急速に回転した。振動刺激では、上腕二頭筋に設置された振動刺激装置で100Hzの振動刺激を加えた。頭部固定しない場合、腕運動により眼球運動は高頻度で出現したが、頭部固定するとその頻度は腕安静時と有意差のないものとなった。反応潜時は腕主動筋活動と頭部加速度潜時ではほぼ同時であった。しかし、眼球運動潜時はそれらより有意に遅延した。腕運動イメージ想起や腕運動主動筋に振動刺激をして筋感覚を生じさせても眼球運動は生じなかった。腕運動時に生じる眼球運動は腕運動による予測的姿勢調節である頭部運動に起因する視機動眼反射である可能性が高いと推測される。

キーワード : 目と手の協調、眼球運動の発生源、視機動眼反射

Ryota Hatanaka

E-mail : hatanakar@kawasakigakuen.ac.jp

- 1) 大阪河崎リハビリテーション大学
リハビリテーション学部 理学療法専攻
 - 2) 大阪府立大学大学院
 - 3) 国立長寿医療研究センター
 - 4) 国立精神・神経医療センター病院
- 2018年9月13日受付、2018年10月22日受理

1 序文

発達障害や視覚性運動失調などにおいて、目と手の協調が障害される場合がある。したがって、目と手の協調の神経機構の理解は様々な神経疾患や障害時の運動制御を理解し、その改善に寄与するうえで重要な事項である。目と手の協調に関しては、そのモデルも提示されているが¹⁻³⁾ いまだにそれらを立証する決定的な証拠は提出されていない。

目と手の協応のメカニズムに関して、これまで眼球運動が手運動プロセスに及ぼす影響に着目した先行知見がある。眼球運動は上肢運動時の皮質脊髄下降路興奮性に影響を与えることはないが、その運動の時系列制御には影響を与えることが示された⁴⁾。また、衝動性眼球運動の運動前位相において、上肢支配皮質脊髄下降路興奮性が同時に小指外転運動を実施しようとした時に小指外転筋から記録される運動誘発電位の抑制が生じることを観察し、これより、眼球運動前実行プロセスが上肢運動前実行プロセスと同時に実施される場合には上肢皮質脊髄下降路は一部眼球運動からの抑制入力を受けを確認した⁵⁾。また、円滑追従運動時に前腕回内位における安静手指筋の手指支配皮質脊髄下降路興奮性が低下するという Maioli らの報告がある⁶⁾。この皮質脊髄路興奮性低下が手指筋の機能に依存して異なっていたことから、著者らは眼球運動が手指運動命令を随伴して生じていると予想した。さらに Maioli の知見を精査し、円滑追従運動時、運動野に後方から前方へ脳内電流が生起されるように上肢支配運動野に磁気刺激を加えると上肢筋への I3 由来 descending volley により生起される運動誘発電位に対する促通効果が円滑追従眼球運動によって生じることが報告されている⁷⁾。また、Maioli らにより観察された手指支配皮質脊髄下降路興奮性の低下は視覚遮断下において追従ターゲットのない

状態での眼球運動も生じることが確認されている⁸⁾。

以上紹介したこれら先行知見は、眼球運動命令が上肢運動制御中枢へ及ぼす影響を示唆したものであるが、逆に上肢運動が眼球運動をガイドするというメカニズムも同時に存在することが知られている^{2,9)}。Snyder らは、サルにおいて対象物へ目だけ動かすことと手と目の両方を動かすことを比較した¹⁰⁾。その結果、目だけで動かすより手と目を同時に動かす方に最大眼球運動速度が約 4% 増加した。Steinback は、外部ターゲットを眼球追従するよりも自分の上肢で動かしたターゲットを追従する方がスムーズに実施できることを示し、上肢が眼球運動を誘導していることを示した¹⁰⁾。Gauthier らは、眼球運動単独でのターゲット追従時のターゲットに対する眼球運動の遅れが、手と同時にターゲットを追従することによって消失することを示した²⁾。随意運動時には運動命令と同時にそのコピー (efferent copy) を小脳などへ情報伝達するメカニズムが存在する¹¹⁾。これを基にヒトは運動を feedforward 制御していると考えられている。眼球運動に上肢運動が伴うと眼球運動の遅延が減少するという Gauthier らの報告は、この efferent copy による眼球運動の feedforward 制御によるものではないかという仮説を支持するものである。今回の研究ではこの仮説を検証した。

実験では眼球を正中位に保持させた状態で腕運動命令が生起される条件を付加し、それによって正中視した眼球に生じる運動を観察した。腕運動実験では腕運動により眼球運動が生じるかどうかを観察した。筋への振動刺激により錘内筋線維の group Ia 求心性線維が活動し、筋伸張錯覚が生じ、結果として運動錯覚が生じる¹²⁻¹⁴⁾。腕運動実験の結果観察された眼球運動に感覚入力に関与しないならば、筋感覚を生起する振動刺激を与えても眼球運動は生じないと

予想した。そこで振動刺激実験では、眼球を正中位保持させた状態で上腕二頭筋に振動刺激を加え、それによって生じられる運動錯覚によって眼球運動が生じるか否かを観察した。運動イメージをすると運動実行と同様の中枢神経活動を得られる¹⁵⁻¹⁹⁾。この手法を用いれば、フィードバックなしに上肢の運動命令を出力することが可能となるため、腕運動イメージ中の眼球運動の出現を観察することにより、腕運動命令が同時に眼球運動を生じるという仮説を検証できる。そこで腕運動イメージ実験では正中にある標的を凝視した状態で腕運動を想起させ、それによって眼球運動が生じるか否かを観察した。

2 研究方法

2.1 対象

実験1では、右腕および左腕で急速運動を実行させ、その時に眼球運動が生じるかについて検討した。実験2および3では頭部の運動アーチファクトの影響を検証するため、腕運動時に頭部の加速度を検証(実験2)、あるいは頭部を固定して腕運動を実行して眼球運動が生じるのかを観察した(実験3)。さらには上肢運動命令による眼球運動発生を観察するため、運動イメージにより眼球運動が生じるのかどうか、観察した(実験1, 2)。筋感覚の影響を検証するため、振動刺激を筋に導入して眼球運動を観察した(実験2)。

実験1の対象は年齢 30.0 ± 6.0 歳の健常男性9名とした。実験2の対象は年齢 28.6 ± 6.1 歳の健常男性7名とした。実験3の対象は年齢29歳の健常成人男性1名とした。利き手はEdinburgh Handedness Inventoryにて全員右利きであることを確認した。実験は大阪府立大学大学院総合リハビリテーション学研究科研究倫理委員会の承認を得て行った(承認番号2014-108)。

2.2 設定 (表1)

表1. 実験内容

		実験1	実験2	実験3
実験条件	視覚遮断	+	-	-
	頭部固定	間接固定	なし	直接固定
	運動側	左右	右	右
眼球運動	腕運動			
	運動イメージ			
	筋感覚			

対象者の姿勢は椅子座位とした。実験1では頭部に固定した視覚遮断装置を机からのバーに固定した(図1B)。実験2では頭部は固定しなかった(図1B)。実験3においては、顎台(T.K.K.930a; 竹井機器)に頭部を固定した(図1B)。腕回旋装置の位置は、無理のない姿勢を設定するため、肩関節軽度屈曲・軽度外転、肘関節軽度屈曲位となるようにし、腕回旋装置に前腕を置く。このとき腕回旋装置の長軸方向と前腕中央線が平行となるようにした。次に腕回旋運動のゼロポイントを設定するため、腕回旋装置が体幹の前額面に対して垂直になるように位置させた。この状態をゼロポイントとし、レーザーポインタでスクリーンに照射した。

2.3 視覚提示 (実験2,3)

実験1においては視覚刺激遮断装置を装着し、LEDライトを視野の中心となるように遮断装置内に設置した(図1B)。セッションごとに調整を行い、課題中にはLEDライトは消灯させ完全な暗闇とした。視覚刺激遮断装置は机からのバーの上に設置して固定した。実験2および3においては視覚提示装置(ITEM-13130, 竹井機器)を用いて画面中央に円形のシグナルを提示した(図1B)。

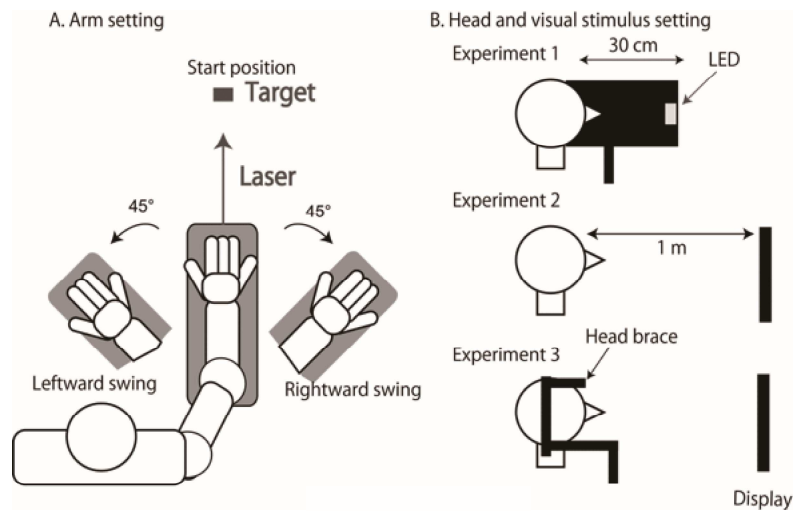


図1. 実験の設定

2.4 眼球運動および腕運動

全実験において眼球運動を計測した。眼球運動は、角膜反射センサ（TK2901；竹井機器）が附置されたゴーグルを装着した。腕回旋装置に歪みゲージを取り付け、腕回旋角度を測定した。A/D変換器（UAS-108S；ユニークメディカル）を用い、サンプリング周波数を5KHzにし、眼球運動と腕運動をPC上でモニタした。また、別のA/D変換器（Power lab 8SP；AD Instrument社、Colorado Springs、Co、USA）を用い、サンプリング周波数を400Hzとし、眼球運動と腕運動をPC上に記録した。

2.5 頭部運動（実験2,3）

実験2および3では頭部に小型3軸低容量加速度計（AMA-2A；共和電業）を設置して頭部の加速度を計測した。x軸は側方、y軸は上下方向、z軸は前後方向の加速度を計測した。

2.6 腕運動課題（実験1）

課題中、眼球は安静とし、瞬きをしないよう指示した（図2）。まず被験者は暗闇の中で点灯したLEDライトを見ておく。次にLEDライト点灯2秒後にLEDライトが消灯し、課題音が鳴る。500Hzの高い課題音が鳴れば、被験者

は腕を外側方向に、50Hzの低い課題音が鳴れば、腕を内側方向に腕を回旋させた。100Hzの中間の課題音が鳴れば、被験者に腕を静止するよう指示した。腕運動の開始は、課題音が鳴れば、できるだけすぐに始めた。腕運動の速度は、できるだけ速く動かすように指示し、回旋範囲は左右45°程度とした（図1A）。これを右腕と左腕の両方で行った。練習試行を、右方向5試行、腕静止を5試行、左方向5試行の合計15試行を行った。試行は右方向10試行、静止を10試行、左方向10試行の合計30試行を無作為な順序で行った。

2.7 腕運動課題（実験2,3）

課題中、眼球は安静とし、瞬きをしないよう指示した（図3）。まず視覚提示装置に1s赤色の点が提示された。次に点の色が緑色に変化すれば、腕を外側方向に、白色に変化すれば、前腕を内側方向に回旋させた。点の色が変化しなければ、腕の安静を維持するよう指示した。前腕はできるだけ速く動かすように指示し、回旋範囲は左右45°程度とした（図1A）。課題は右上肢のみで行った。練習試行を、右方向5試行、腕静止を5試行、左方向5試行の合計15試行を行った。試行は右方向10試行、静止を10試行、

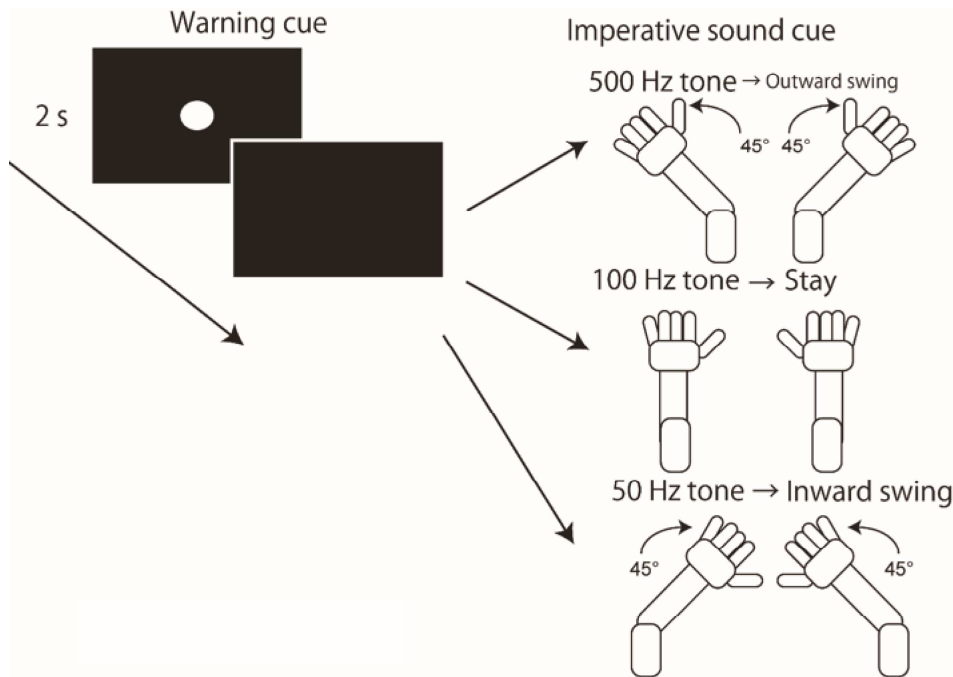


図2. 実験1の手続き

左方向10試行の合計30試行を無作為な順序で行った。

2.8 腕運動イメージ課題

腕運動の遠心性コピーが眼球運動に関与している可能性があり、腕運動イメージをさせて眼球運動が起きることを確認した。腕運動イメージで眼球運動が起これば、遠心性コピーによ

て眼球運動が起こることが証明できると考えた。

実験1では閉眼にて、500Hzの高い開始音では腕を外側に動かすイメージを行うよう、50Hzの低い開始音では、腕を内側に動かすイメージを行うよう、100Hzの中間の開始音では、腕を静止するイメージを行うように指示した。このときのイメージは視覚イメージではなく、運動

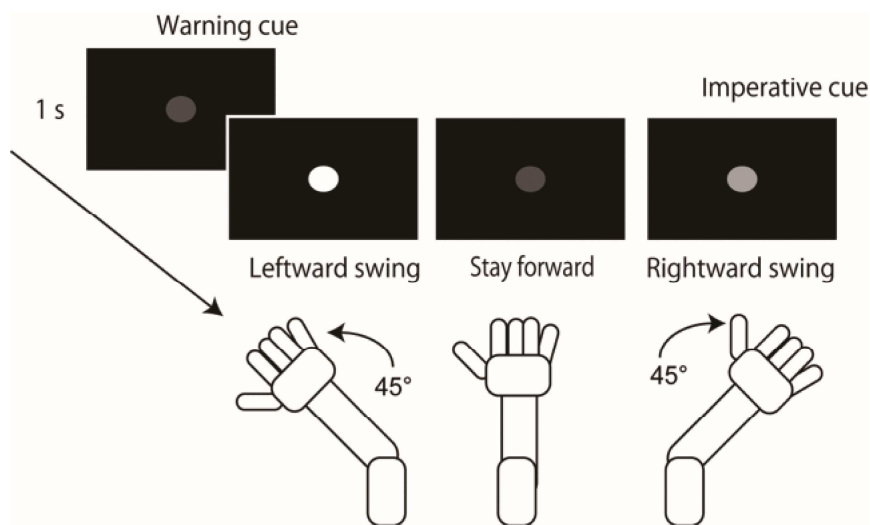


図3. 実験2,3手続き (腕運動実験・腕運動イメージ実験)

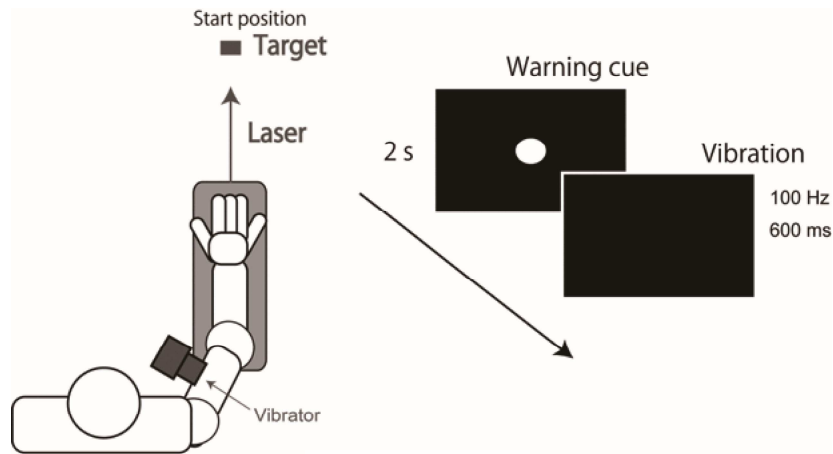


図4. 筋感覚実験

感覚をイメージさせた。実験2においては、眼球は安静開眼とし、瞬きをしないよう指示した。視覚提示装置に1s赤色の点が提示された。次に点の色が緑色に変化すれば、腕を外側方向に、白色に変化すれば、前腕を内側方向に回旋するイメージをさせた。点の色が変化しなければ、イメージをしなかった。

2.9 筋感覚課題 (図4)

課題中、眼球は安静とし、瞬きをしないよう指示した。まず被験者は視覚提示装置に映された赤色の点を見ておく。その後、点が消えると同時に上腕二頭筋に設置された筋肉・腱振動刺激装置 (VP - 1000、内田電子) で100Hzの振動刺激を600 msecの時間加えた。

2.10 解析

腕運動課題では、腕運動潜時・振幅を算出した。眼球運動は、眼球運動の出現頻度、振幅と潜時および潜時から50 msにおける眼球運動方向を眼球運動軌跡座標の回帰直線の傾きを用いて算出した。3時の方向(右水平方向)を 0° とし、時計回りを+とした。眼球運動出現は、腕運動潜時 ± 200 msのtime window内で視覚的に判定した。眼球運動出現の試行回数を全試行で除算して眼球運動出現確率を算出した。頭部加速度は潜時を算出した。振動刺激課題では、眼球運動出現頻度と眼球運動潜時を算出した。統計処理は繰り返しのある分散分析を実施し、有意差のある場合は多重比較検定を行った。有意水準は5%とした。

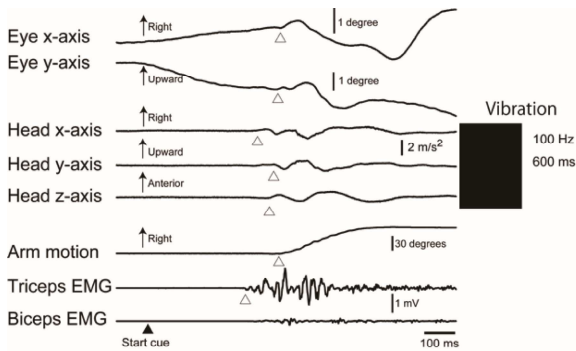


図5. 腕運動課題における生波形 (実験2)

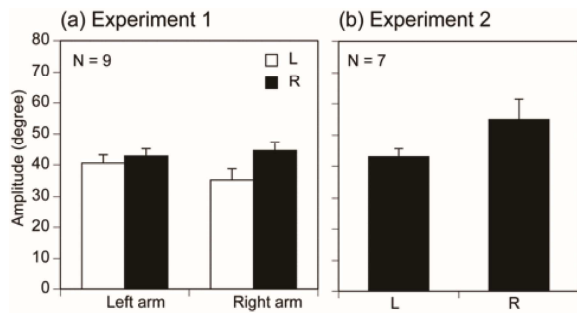


図6. 腕運動振幅 (実験1,2)

3 結果

3.1 腕運動課題

腕運動振幅 (図 5,6)

図 5 に実験 2 の腕運動課題実験の生波形を示す。実験 1 の腕運動振幅は左上肢の左方向で 40.6 ± 2.7 度、右方向で 42.8 ± 2.3 度、右上肢の左方向で 35.2 ± 3.6 度、右方向で 44.6 ± 2.7 度であった。分散分析の結果、腕間 [F(1, 32) = 0.40, p=0.53] および腕方向間 [F(1, 32) = 4.12, p = 0.05] で有意差は確認されなかった。相互作用も有意ではなかった [F(1, 32) = 1.53, p=0.22]。実験 2 の腕運動の腕運動振幅は左方向で 43.4 ± 2.5 度、右方向で 55.4 ± 6.5 度であった。腕方向間で有意差は確認されなかった (p=0.51)。

3.2 眼球運動出現確率 (図 7)

実験 1 および 2 において、腕運動に伴う眼球運動の出現を観測した。それに対し、腕安静時にはほとんどの試行で眼球運動は観察されなかった。分散分析の結果、眼球運動出現確率

は腕運動条件間で有意差を確認した。実験 1 では、腕間で有意差は確認されず [F(1, 48) = 1.20, p=0.28]、腕運動条件間で有意差が確認された [F(2, 48) = 18.55, p < 0.01]。有意な相互作用は確認されなかった [F(2, 48) = 1.30, p=0.28]。実験 2 では腕運動条件間で有意差が確認された [F(2, 12) = 521.06, p < 0.01]。多重比較検定の結果、実験 1 および実験 2 とも、有意に腕運動条件で腕安静条件と比較して眼球運動出現確率が有意に高い結果となった (p < 0.05)。実験 3 においてはほとんど眼球運動が観測されなかった。右方向のみ 0.3 の眼球運動出現確率であったが、他の条件は眼球運動出現確率は 0.0 であった。

3.3 眼球運動振幅 (図 8)

実験 1 の眼球水平運動振幅は右上肢の右方向で 5.0 ± 1.6 度、左方向で 4.6 ± 1.6 度、左上肢の右方向で 5.8 ± 2.1 度、左方向で 4.2 ± 1.4 度であった。眼球水平運動振幅に左右間 [F(1, 30) = 0.01, p=0.91] および腕方向間 [F(1, 30) = 0.35, p=0.56] で有意差は確認されなかった。有意な

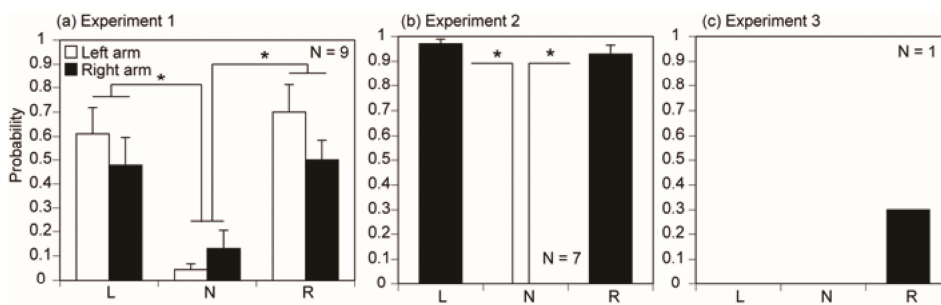


図 7. 眼球運動出現確率 (実験 1-3)

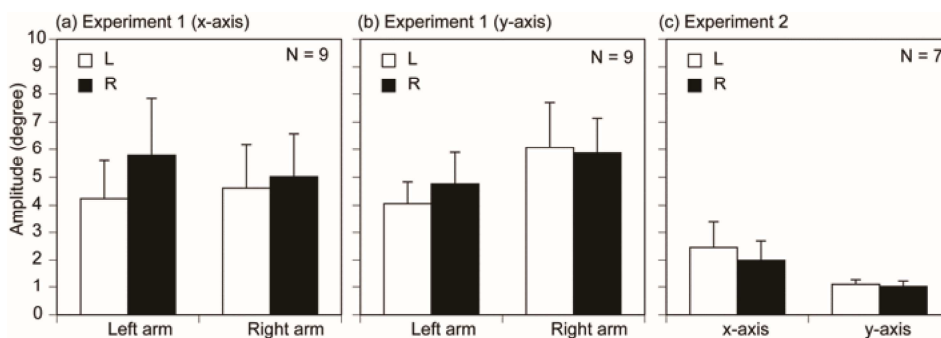


図 8. 眼球運動振幅 (実験 1,2)

交互作用も確認されなかった [F(1, 30)=0.12, p=0.73]。眼球垂直運動振幅は右上肢の右方向で 5.0 ± 1.6 度、左方向で 4.6 ± 1.6 度、左上肢の右方向で 4.8 ± 1.1 度、左方向で 4.1 ± 1.8 度であった。眼球垂直運動振幅に左右間 [F(1, 30)=1.61, p=0.21] および腕方向間 [F(1, 30)=0.04, p=0.84] で有意差は確認されなかった。有意な交互作用も確認されなかった [F(1, 30)=0.14, p=0.72]。

実験2の眼球水平運動振幅は右方向で 2.0 ± 0.7 度、左方向で 2.5 ± 0.9 度であった。左右方向間で有意差は確認されなかった (p=0.30)。眼球垂直運動振幅は腕右方向で 1.0 ± 0.2 度、腕左方向で 1.1 ± 0.2 度であった。左右方向間で有意差は確認されなかった (p=0.71)。

3.4 潜時 (図9)

実験1における腕運動開始潜時は左腕左方向で 545 ± 19 ms、右方向で 566 ± 32 msであった。眼球運動開始潜時は左腕左方向で 572 ± 38 ms、右方向で 580 ± 30 msであった。潜時に腕・眼球運動間 [F(1, 31)=0.43, p=0.52] および腕方向間 [F(1, 31)=0.24, p=0.63] で有意差は確認されなかった。有意な交互作用も確認されなかった [F(1, 31)=0.05, p=0.83]。腕運動開始潜時は右腕左方向で 557 ± 26 ms、右方向で 493 ± 25 msであった。眼球運動開始潜時は右腕左方向で 585 ± 61 ms、右方向で 548 ± 39 msであった。潜時に腕・眼球運動間 [F(1, 31)=1.05,

p=0.31] および腕方向間 [F(1, 31)=1.57, p=0.22] で有意差は確認されなかった。有意な交互作用も確認されなかった [F(1, 31)=0.11, p=0.74]。

実験2における腕運動開始潜時は左方向で 496 ± 15 ms、右方向で 498 ± 16 msであった。眼球運動開始潜時は左方向で 486 ± 19 ms、右方向で 485 ± 27 msであった。頭部運動開始潜時は左方向で 426 ± 16 ms、右方向で 419 ± 16 msであった。それに対して主動作筋活動開始潜時は左方向で 396 ± 14 ms、右方向で 365 ± 18 msであった。潜時に腕運動・頭部運動・筋活動・眼球運動間 [F(3, 48)=17.96, p<0.01] で有意差が確認された。腕方向間では有意差は確認されなかった [F(1, 48)=0.49, p=0.49]。有意な交互作用も確認されなかった [F(3, 48)=0.33, p=0.80]。多重比較検定の結果、頭部加速度は腕運動および眼球運動潜時より有意に短かった (p<0.05)。また、筋活動開始潜時も腕運動および眼球運動潜時より有意に短かった (p<0.05)。頭部運動開始潜時と眼球運動開始潜時の差は右方向腕運動時で 65.6 ± 20.4 ms、左方向腕運動時で 60.1 ± 10.4 msであった。

3.5 眼球運動方向 (図10)

実験1における眼球運動方向は左腕左方向で $-113 \pm 47^\circ$ 、右方向で $-132 \pm 38^\circ$ 、右腕左方向で $-130 \pm 28^\circ$ 、右方向で $-117 \pm 32^\circ$ 、であった。分散分析の結果、眼球運動方向に腕運動方

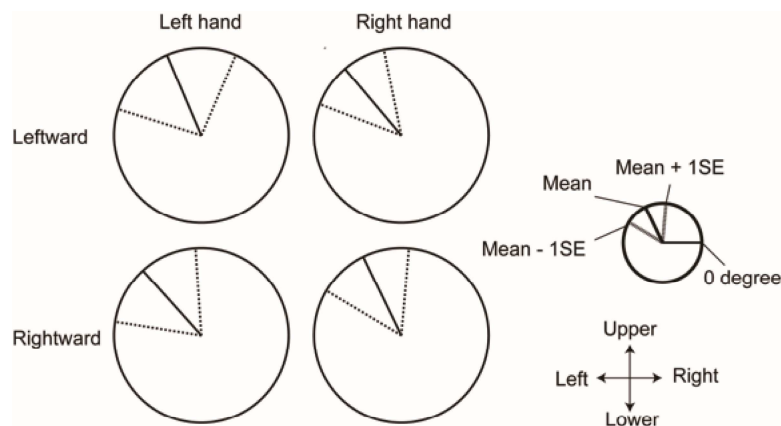


図9. 眼球運動方向

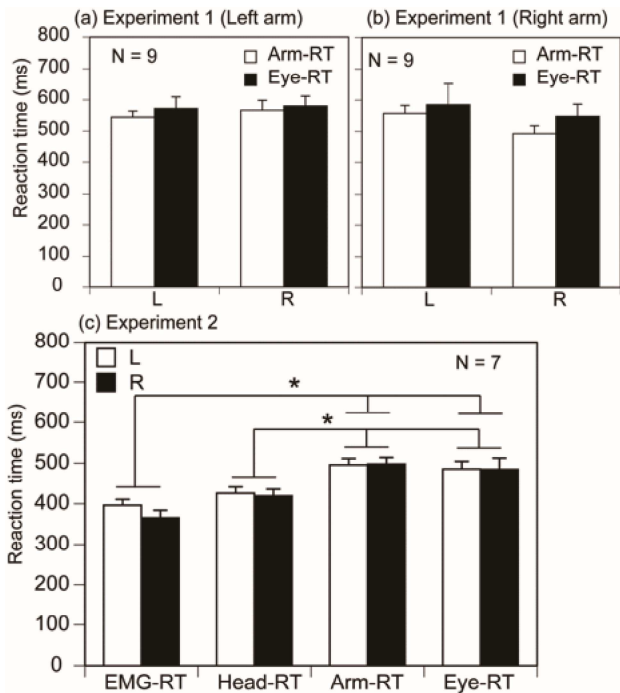


図 10. 潜時 (実験 1,2)

向間 [F(1, 30)=0.01, p=0.94] および腕間 [F(1, 30)=0.00, p=0.99] で有意差は確認されなかった。有意な交互作用も確認されなかった [F(1, 30)=0.18, p=0.67]。

3.6 運動イメージ課題 (図 11)

運動イメージ課題時、実験 1 および実験 2 において有意に安静時よりも高い眼球運動出現確率は得られなかった。実験 1 の分散分析の結果、出現確率に腕運動方向間 [F(2, 30)=0.86, p=0.43] および腕間 [F(1, 30)=0.49, p=0.49] で有意差は確認されなかった。有意な交互作用も確認されなかった [F(2, 30)=0.86, p=0.43]。実験 2 の分散分析の結果、出現確率に腕運動方向間で

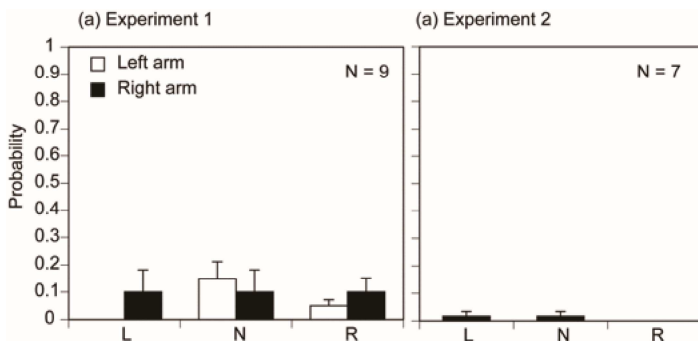


図 11. 腕運動イメージによる眼球運動出現確率

有意差は確認されなかった [F(2, 15)=0.50, p=0.62]。

3.7 筋感覚課題 (図 12)

振動刺激条件と非振動刺激条件とも、眼球運動出現確率は非常に低く、両条件間で有意差は確認されなかった (p=1.00)。

4 考察

本研究では腕運動命令が同時に眼球運動命令を生じるという仮説を検証した。実験においては腕運動、運動イメージ、頭部運動アーチファクト、筋感覚を実験条件に眼球運動出現を観察・検証した (表 2)。

表 2. 実験結果まとめ

		実験1	実験2	実験3	
実験条件	視覚遮断	+	-	-	
	頭部固定	間接固定	なし	直接固定	
	運動側	左右	右	右	
眼球運動	腕運動	+	+	-	頭部運動が眼球運動の原因
	運動イメージ	-	-	-	腕運動命令は眼球運動命令を生起しない
	筋感覚	-	-	-	腕運動による筋感覚は眼球運動命令を生起しない

4.1 腕運動に伴う眼球運動

頭部固定しない実験 1 と実験 2 の結果、腕運動により眼球運動が高頻度で生じた。その振幅は水平方向および垂直方向とも 1-8 度程度の範

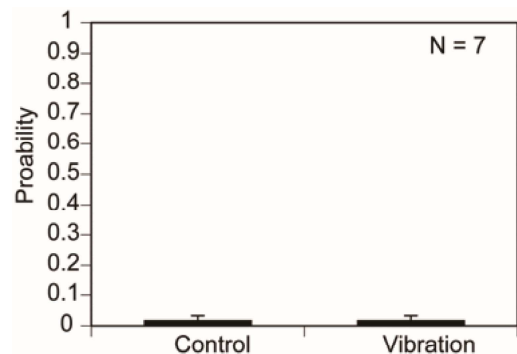


図 12. 上腕二頭筋振動刺激による眼球運動出現確率

囲内であった。これは腕運動により少なくとも何らかの原因により眼球運動が生じることを示唆する。加えて実験1においては眼球運動方向を解析した。その結果、どちらの腕運動においても方向性にかかわらず、眼球は左上方に運動する傾向が顕著であった。この傾向を説明する仮説としては、(1)腕運動命令に伴って眼球運動が生じている、(2)腕運動に伴う運動アーチファクト由来の感覚フィードバックが代償的な眼球運動を生じているの2点が考えられる。後者の場合、腕運動に伴う運動アーチファクトが外側方向への腕運動で特に大きかったことによって生じたと解釈することが可能である。

4.2 眼球運動の腕運動命令由来仮説

本研究では腕運動命令に伴って眼球運動命令が生じることを仮説とした。しかし腕運動に伴う眼球運動の出現を観察するだけでは腕運動に伴うフィードバックや運動アーチファクトの影響を否定できない。そこで実験1と2では、腕運動イメージに伴って眼球運動が生じるかどうかを検証した。運動イメージではその運動を実際実施した時と近似した脳活動を引き起こせるため、実際の運動な意思に運動実行時の脳活動を引き出すことが可能である¹⁵⁻¹⁹⁾。この実験の結果、腕運動イメージでは眼球運動はほとんど生じなかった。これより、腕運動命令が眼球運動を生じたという仮説は否定される。

4.3 頭部運動の起源

頭部運動潜時は腕運動潜時よりも有意に短縮したことから、頭部運動は腕運動のアーチファクトには由来しない。EMG記録と頭部に設置した加速度計から得られた記録より、腕主動作筋活動と頭部加速度潜時はほぼ同時であった。筋活動は運動命令が運動野に生じた結果生じる骨格筋の収縮を反映している。MEP潜時より、一次運動野の活動に始まり皮質脊髄路から運

動ニューロンを経由して運動指令が骨格筋に伝達される時間は手指筋で約20ms程度である²⁰⁾。したがって、今回の頭部加速度と腕運動命令は相当近いタイミングで生じていたと考えられる。つまり、頭部運動命令と腕運動命令は同時に同じトリガで指令を受けていたと考えられる。腕運動の感覚フィードバックを受けて頭部運動が生じた場合には腕運動開始潜時に対して頭部運動が遅延するはずであるが、今回は腕運動開始潜時より早い潜時で筋活動潜時と同程度のタイミングで開始したことから、頭部運動は運動アーチファクトの感覚フィードバックではなくて何らかのフィードフォワード制御により生じたものと考えられた。

ヒトにおいては予測的姿勢制御が運動に先立ってあるいは伴って作用することが知られている²¹⁾。つまり同時並行に随意運動命令と姿勢制御命令が生じうる。今回の実験では座位で腕を振ったため、予測的姿勢制御が関与する余地はある。つまりはこの頭部運動は腕運動命令と同時に生じた予測的姿勢制御の表れではないかと予想される。

4.4 頭部運動と眼球運動の関係

では、頭部運動と眼球運動の関係はどうか。実験3において顎台により頭部固定すると眼球運動出現確率は大幅に減少し、安静時の出現率とほとんど差がなくなった。これは、頭部が自由に動くことが腕運動に伴う眼球運動の出現の前提条件と解釈できる。眼球運動は頭部加速度潜時より大きく遅延した。その遅延は約60msと感覚フィードバックによる眼球の反射を十分許容する時間であった。これより、眼球運動は予測的姿勢制御として上肢運動命令に伴って生じた頭部運動がもたらす感覚フィードバックに対する反射活動として生じた可能性が高い。頭部運動に伴って生じる眼球運動反射を vestibulo ocular reflex と呼ぶ²²⁾。しかしこの反射はおよ

そ10ms 以内の潜時で生じるので今回の結果はそれには該当しないと考えられる²³⁾。これに対し、頭部運動の代償として生じる optokinetic reflex は頭部運動に対する潜時が約 70ms である²⁴⁾。したがって、今回の実験で生じた眼球運動はこの optokinetic reflex であった可能性が高い。

4.5 腕運動感覚フィードバック由来仮説

これに対して腕運動の潜時は眼球運動潜時と有意差はなかった。腕運動アーチファクトが眼球運動をもたらしたと解釈するならば一定の潜時が必要であるので、腕運動による感覚入力が見球運動をもたらしたとする仮説は否定される。同時に筋感覚フィードバックの効果も今回の実験で否定された。振動刺激は筋刺激となるので筋感覚を誘発する^{13,14)}。しかしそれに伴った眼球運動も生じなかった。先行研究においても振動刺激では眼球運動が生じないことが報告されており、今回の結果はそれを支持するものであった。これより、反証仮説である、筋感覚による眼球運動の誘発は支持されなかった。

4.6 機序のモデル (図 13)

これらより、腕運動による眼球運動が生じる機序をモデルとして提示する。腕運動と頭部運動は同一のトリガで開始されるが、腕運動は随意制御、頭部運動は腕運動を予測したことに

よる予測的姿勢制御である可能性が高い。これに対して眼球運動は頭部運動の感覚入力に反応して生じていた視機性動眼反射 (optokinetic reflex; OKR) と推測する。腕運動による感覚フィードバックは眼球運動には関与しないものと考えられる。

4.7 本研究の限界

本研究の限界について、対象者数が少数であること、対象者が成人であること、対象者が男性であることが挙げられる。また、本研究は腕運動と眼球運動による研究であり、手や指の運動と眼球運動の関係については研究していない。

5 結論

腕運動命令が同時に眼球運動命令を生じるという仮説を検証した。頭部固定しない場合、腕運動により眼球運動は高頻度で出現した。腕運動イメージおよび腕筋への振動刺激では眼球運動は発生しなかったことから、腕運動命令や腕筋感覚フィードバックのみでは眼球運動は生起されないことが確認された。頭部固定すると眼球運動発生頻度は大幅に低下したことより、眼球運動は頭部運動アーチファクトと関連するものと考えられた。腕主動作筋活動と頭部加速度潜時がほぼ同時であったことより、頭部運動は

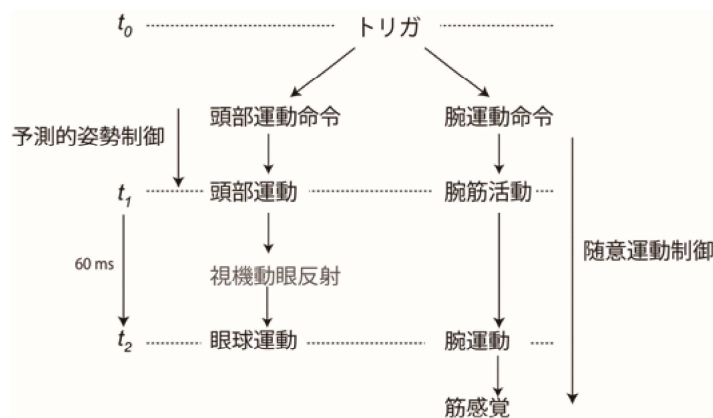


図 13. 腕運動による眼球運動の機序 (仮説)

腕運動の予測的姿勢制御の結果生じていると考えられた。眼球運動は頭部運動に遅延するので、頭部運動感覚フィードバックが関与すると考えられた。これらより、眼球運動は腕運動に先立って生じる腕筋群の収縮と同時に生じる予測的姿勢制御を機序とした頭部運動の感覚フィードバックに伴って生じる現象、おそらく視機性動眼反射であると結論された。

[引用文献]

- 1) Bock O: Coordination of arm and eye movements in tracking of sinusoidally moving targets. *Behavioural brain research*, 24:93-100, 1987
- 2) Gauthier GM, Vercher JL, Ivaldi FM, et al.: Oculo-manual tracking of visual target: control learning, coordination control and coordination model. *Experimental Brain Research*, 73:127-37, 1988
- 3) Lazzari S, Vercher JL, Buizza A: Manuo-ocular coordination in target tracking : I. A model simulating human performance. *Biological Cybernetics*, 77:257-266, 1997
- 4) Horino H, Mori N, Matsugi A, et al.: The effect of eye movement on the control of arm movement to a target. *Somatosensory and Motor Research*, 30:153-159, 2013
- 5) Hiraoka K, Kurata N, Sakaguchi M, et al.: Interaction between the premotor processes of eye and hand movements: Possible mechanism underlying eye-hand coordination. *Somatosensory & motor research*, 31:49-55, 2014a
- 6) Maioli C, Falciani L, Giancesini T: Pursuit eye movements involve a covert motor plan for manual tracking. *The journal of Neuroscience*, 27:7168-7173, 2007
- 7) Hiraoka K, Abe M, Ogura N, et al.: Smooth pursuit eye movement preferentially facilitates motor-evoked potential elicited by anterior-posterior current in the brain. *NeuroReport*, 25:279-283, 2014b
- 8) Chujo Y, Jono Y, Tani K, et al.: Corticospinal excitability in the hand muscles is decreased during eye movement with visual occlusion. *Perceptual & Motor Skills*, 122:238-55, 2016
- 9) Steinbach MJ, Held R: Eye Tracking of Observer-Generated Target Movements. *Science*, 161:187-188, 1968
- 10) Snyder LH, Calton JL, Dickinson AR, et al.: Eye-Hand Coordination: Saccades Are Faster When Accompanied by a Coordinated Arm Movement. *J Neurophysiol*, 87:2279-2286, 2002
- 11) Wolpert DM, Miall RC: Forward Models for Physiological Motor Control. *Neural Network*, 9:1265-1279, 1996
- 12) Kito T, Hashimoto T, Yoneda T, et al.: Sensory processing during kinesthetic aftereffect following illusory hand movement elicited by tendon vibration. *Brain Res*, 1114:75-84, 2006
- 13) Goodwin GM, McCloskey DI, Matthews PB: The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents. *Brain*, 95:705-748, 1972
- 14) Yoshimura A, Matsugi A, Esaki Y, et al.: Blind humans rely on muscle sense more than normally sighted humans for guiding goal-directed movement. *Neuroscience letters*, 471:171-174, 2010
- 15) Decety J, Sjoholm H, Ryding E, et al.: The cerebellum participates in mental activity : tomographic measurements of regional cerebral blood flow. *Brain Res*, 535:313-317, 1990
- 16) Stephan KM, Fink GR, Passingham RE, et al.: Functional anatomy of the mental representation

- of upper extremity movements in healthy subjects. *J Neurophysiol*, 73:373-386, 1995
- 17) Porro CA, Francescato MP, Cettolo V, et al.: Primary motor and sensory cortex activation during motor performance and motor imagery: a functional magnetic resonance imaging study. *J Neurosci*, 16:7688-7698, 1996
- 18) Lotze M, Montoya P, Erb M, et al.: Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements : an fMRI study. *J Cognit Neurosci*, 11:491-501, 1999
- 19) Jeannerod M: Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage*, 14:103-109, 2001
- 20) Lim, CL, Yiannikas C: Motor evoked potentials: a new method of controlled facilitation using quantitative surface EMG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 85:38-41, 1992
- 21) Massion J: Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination. *Progress in neurobiology*, 38:35-56, 1992
- 22) Dieterich M, Brandt T: Vestibulo-ocular reflex. *Current opinion in neurology*, 8, 83-88, 1995
- 23) Crane BT, Demer JL: Human horizontal vestibulo-ocular reflex initiation: effects of acceleration, target distance, and unilateral deafferentation. *Journal of neurophysiology*, 80:1151-1166, 1998
- 24) Gellman RS, Carl JR, Miles FA: Short latency ocular-following responses in man. *Visual neuroscience*, 5:107-122, 1990