

# 手先位置のオンライン視覚情報の有無は腕到達運動の学習戦略を変える

## Strategy changes in motor learning according to the online visual feedback of hand position

西條 直樹 (PY)<sup>†</sup>, 五味 裕章<sup>†‡</sup>

Naoki Saijo(PY) and Hiroaki Gomi

<sup>†</sup>NTT コミュニケーション科学基礎研究所<sup>‡</sup> 科学技術振興機構 ERATO 下條潜在脳機能プロジェクト

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

**Abstract**— Previous studies have suggested that a gradually increased visuomotor rotation during reaching adaptation results in more complete adaptation than a suddenly increased one does. However, it is still unclear which mechanism allows us such a complete adaptation. Here, we investigated whether the online visual feedback affects the motor learning strategy.

**Keywords**— motor learning, prism adaptation, visuomotor transformation, internal model

### 1 はじめに

プリズム眼鏡などを通して視覚的な手先位置にずれが生じると、到達運動に誤差が生じるが、この誤差は試行とともに減少する。このような運動学習の際、突然大きな手先位置のずれが与えられる場合と比較して、試行とともに徐々に大きくなるずれが与えられる場合に、より大きな学習効果が得られると言われている [1]。しかし、その学習効果の違いを生み出す運動学習の計算メカニズムはいまだ明らかではない。

我々は先行研究で、運動計画、フィードフォワードコントローラ (FFC)、フィードバックコントローラ (FBC) で構成される到達運動制御モデルを仮定し、ずれの与え方による学習効果の違いを生み出す計算メカニズムを考察した [2]。その結果、突然大きなずれが与えられた場合には、学習後、主に運動計画が適応し、一方で、ずれが徐々に大きくなる場合には、学習後に運動計画は変化せず、FFC と FBC が適応していることが示唆された。

では、ずれが徐々に大きくなる中で運動学習をする時に、オンラインの手先位置情報が利用できない場合、学習戦略はどのように変化するのか。本研究では、このオンライン視覚フィードバックが到達運動の学習戦略に与える影響を調べることを目的とする。

### 2 実験方法

被験者はマニピュラタ装置 (図 1A) のハンドルを握り、手先位置に始点中心の回転座標変換を加えてスクリーン上に提示したカーソル (図 1B) を始点から周囲 12 方向いずれかに移動したターゲットへ素早く動かす到

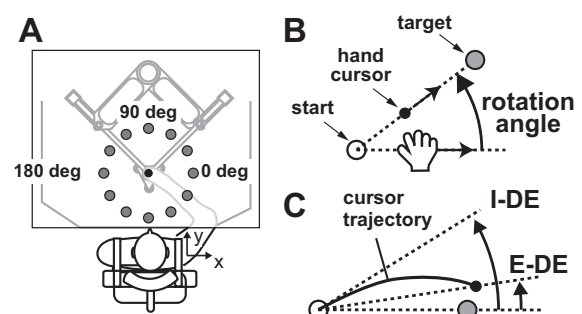


図 1: 実験セットアップ模式図と運動評価インデックス。

達運動を繰り返し訓練した。ここで、到達運動中にカーソルを提示する条件 (online feedback: OF 条件, 9 名) と、運動開始後、最初に手が停止した時点からカーソルを提示する条件 (no online feedback: NOF 条件, 14 名) を用意し、被験者はいずれかの条件で訓練した。

解析では、ターゲット移動から到達運動開始までの反応時間 (RT) と到達運動軌道の誤差 (図 1C, Initial Directional Error: I-DE, Endpoint Directional Error: E-DE) を算出した。そして、各ターゲット方向 1 試行ずつ全 12 試行を 1 ブロックとし、各パラメータの 12 試行の平均値をブロックの代表値とした。

また、学習前後 (pre, post) フェーズのランダムな試行で、運動開始後 150ms 時点から、カーソル位置に  $\pm 20\text{deg}$  の回転変換を加える視覚摂動試行を加えた。この摂動に対して手先に手先に現れた修正動作を解析した。

### 3 実験結果

図 2A に、試行ブロックに対する各パラメータの被験者間平均を示す。手先回転変換を与えない学習前 (pre) フェーズでは、両条件とも E-DE, I-DE とともにほぼ  $0\text{deg}$  であり、カーソルが直線的な軌道でターゲットへ到達していたことがわかる。学習 (training) フェーズでは、3 試行ブロック毎に  $0\text{deg}$  から  $10\text{deg}$  ずつ  $60\text{deg}$  まで増加する手先回転変換を与えた。まず、OF 条件の E-DE は、学習後までほぼ  $0\text{deg}$  付近の値を示した。一方、NOF 条件の E-DE は、手先回転変換が徐々に大きくなるにつれて、若干増加した後、減少していき、学習後にはほぼ  $0\text{deg}$  になった。I-DE は、両条件とも手先回転変換の角度とと

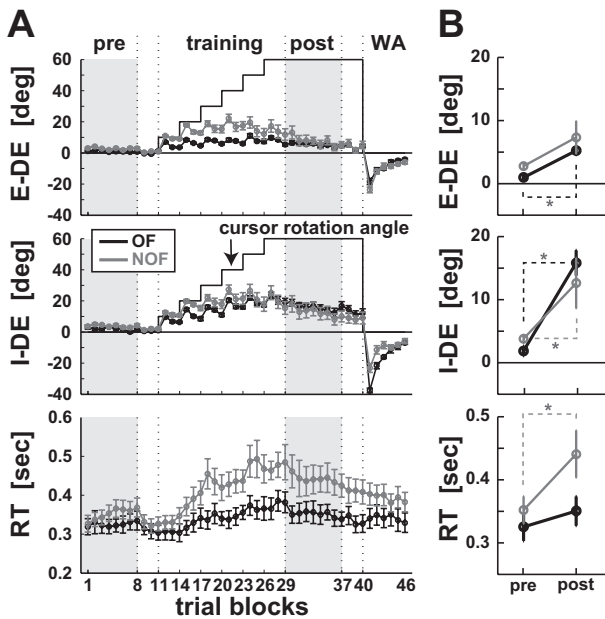


図 2: 試行数に対する I-DE, E-DE, RT の変化。

もに大きくなる傾向が見られた。また, washout(WA) フェーズで先回轉變換が 0deg に戻った後に I-DE に現れる学習の後効果 (aftereffect) は, OF 条件の場合が有意に大きかった ( $p < 0.05$ )。RT は, 学習前は条件間で差が見られなかったが, 30deg の手先回轉變換を与えたブロックから NOF 条件の RT が OF 条件よりも長くなる傾向が見られた。

学習前後でのパラメータ変化を定量的に解析するため, pre, post フェーズでの各パラメータの試行間の平均値を求めた。図 2B にそれらの値の被験者間平均を示す。NOF では E-DE に有意な変化は見られなかった ( $p = 0.09$ )。一方, OF 条件において学習後の E-DE が有意に増加した ( $p < 0.001$ ) が, 学習後の E-DE は  $5.2 \pm 0.6$  deg であり, ターゲットの大きさを考慮すれば被験者はほぼ正確にターゲットへ到達できていたものと考えられる。また, I-DE は両条件とも学習後に有意に増加していたことから, 両条件とも到達運動軌道が学習後に曲がる傾向であったことが示唆される。そして, RT は OF 条件では変化せず ( $p = 0.17$ ), NOF 条件で学習後に有意に増加した ( $p < 0.01$ )。

次に, 視覚摂動に対する修正動作を解析した。まず, 代表的な被験者の手先軌道と, y 方向の加速度を図 3A, B に示す。手先軌道を見ると, OF 条件と比べて NOF 条件の修正動作が小さいことがわかる。また, OF 条件では加速度応答が学習後に大きくなったのに対し, NOF 条件では小さくなっていった。この加速度応答の大きさを, 刺激方向間の加速度の差の時間平均 (摂動開始後 250-300ms) として定量化した。その被験者間平均を図 3C に示す。学習後の加速度応答の大きさは, OF 条件では有意に増加した ( $p < 0.01$ ) のに対し, NOF 条件では, 有意に減少した ( $p < 0.01$ )。これは, 学習後の視覚

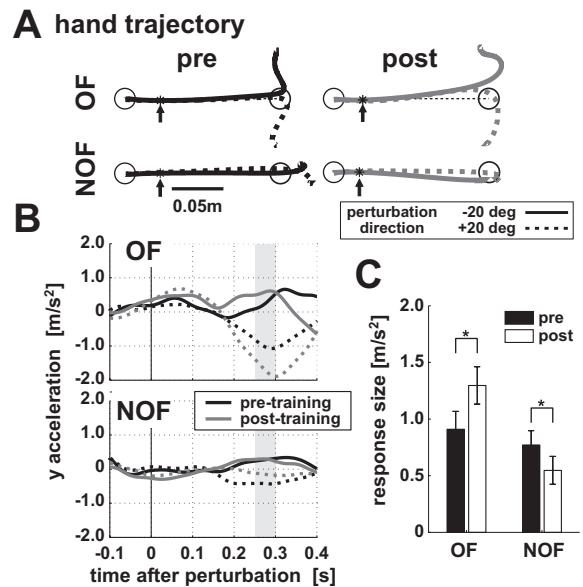


図 3: 視覚摂動に対する手先の修正動作。

FB ゲインが OF 条件では上昇し, 一方で NOF 条件では低下したことを示唆する。

#### 4 考察

以上の結果から, 条件間での学習戦略の違いを考察する。ここで, 運動計画は, 到達運動前になされる計算と仮定し, 運動計画における計算負荷の変化は, RT の変化として現れるものとする。

まず, OF 条件では, 学習前後で RT があまり変化せず, 視覚 FB ゲインが学習後に上昇した。これは, 運動計画はあまり変化せず, FBC が適応したことを示唆する。また, 視覚 FB ゲインの変化量は被験者毎に異なっており, 学習後に視覚 FB ゲインがあまり増加しなかった被験者は, 主に FFC が適応したものと考えられる [2]。

次に, NOF 条件では学習後に RT が上昇し, 視覚 FB ゲインが減少した。これは, 学習後に運動計画が適応し, FBC をあまり利用しない到達運動が獲得されたものと解釈できる。

そして, I-DE に現れた学習の後効果は, OF 条件の場合のほうが有意に大きかった。この後効果の差は, 上述のような条件間での学習戦略の違いが生み出したものと予想される。このように, 到達運動中の手先位置の視覚情報が利用可能であるか否かによって, 到達運動の学習戦略が変化することが示唆された。

#### 参考文献

- [1] F. A. Kagerer, J. L. Contreras-Vidal, and G. E. Stelmach (1997) "Adaptation to gradual as compared with sudden visuo-motor distortions." *Exp Brain Res*, vol.115, no.3, 557-561.
- [2] 西條直樹, 五味裕章 (2008) "手先回轉變換の変化速度は腕到達運動の学習戦略を変える." 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.542, 133-138