

論文要旨

Effect of manipulating visual feedback information
on execution and learning of bimanual coordination
(視覚操作が両手協応動作の遂行および学習に及ぼす影響)

戸松彩花

第1章： 緒言

我々人間の動作はそのほとんどが多肢協調動作である。中でも両手を協調させて目的を達成する事に関して、人間の右に出る動物はいない。しかし、このように自由自在に動かす事ができるように思える両手の運動も、実は大きな制限を受けている。それは、両手をリズムカルに、反復して動かすとき、特に動作周波数が高い場合は、左右対称の動作しか行えないという制限である。最初は左右を非対称に動かしていても、徐々に動作周波数を高めていくと、突如として意図せずに左右対称の動作に切り替わってしまう。この最も良い例は初心者によるピアノの演奏であろう。

この制限には複数の制約が係っていると考えられる。例えば「左右対称の動作」は「左右の同名筋の同時活動」と言い換えられるが、これまでの多くの研究により、左右の同名筋に対する運動指令の間に干渉を起こす可能性のある生理学的制約が多数示されている。また、我々には外界の刺激と自らの動作との時間的および空間的同期を好む性質があり、この性質は左右の手が互いに、相手が発生する時間的および空間的情報に合わせあう可能性を示唆する。

現行動作に関する視覚情報、固有受容感覚情報および聴覚情報は、現行の両手動作の維持において重要な役割を果たす。しかし、視覚情報はさらに一步踏み込んだ効果をもたらすことが近年示された。我々が持つ視知覚の性質のひとつとして、視野内の複数のものが近接していたり、類似していたり、同時に同方向に動いたりすると、より知覚し易くなるというものがある。この性質を利用した「特定の視覚パターン」が左右非対称動作の正確性を向上させるというのである。はたしてこの性質はいかにして左右非対称動作を向上させるのであろうか。

両手協応動作の制限を作り出すメカニズムおよびそれを打開するメカニズムを解明する事は、運動学習に対する提言にも繋がるだろう。よって本論文の目的は、両手非対称動作を視覚情報の操作が改善するメカニズムを解明し、運動学習への提言をすることである。

第2章： 実験1 視覚操作が難易度の異なる両手協応動作の遂行に及ぼす影響

第2章では、視覚情報の操作が様々な難易度の左右非対称動作に及ぼす影響を検討した。

被験者は両手による円盤水平回転動作を要求された。3種類の動作(左右の位相ずれが90度、180度、270度)が、被験者の手の動きを隠して行われた。両手動作においては、左右対称動作(位相ずれ0度)に次いで高い安定性をもつ動作は180度であるため、3種類の動作のうち、180度は難易度が低い。被験者が行う動作はコンピュータ画面にオンラインで映し出された。画面表示は2種類あり、行った動作の位相ずれがそのまま表示される Normal vision 条件(N条件)と、右手の空間的位置を実際と異なる画面上の位置に表示する事で、要求された動作を正しく行くと、画面上に左右対称パターンが形成される Transformation 条件(T条件)であった。

この実験より導かれた結果および考察は以下の通りである。(1)難易度に係らず、T条件ではN条件に比べて動作の正確性が向上した。つまり、左右対称パターンへの視覚情報の変換は、難易度に依らず動作を向上させる効果を持っていた。(2)90度と270度の動作は、N条件において180度方向に偏り、T条件ではむしろ0度方向に偏っていた。従って、視覚情報の操作は、両手動作の制約と、何とか左右非対称動作を遂行しようとする行為者の意図との間に働くダイナミクスを変化させることができる。(3)2つの視覚条件における動作の差は、180度に対して90度および270度で大きく、視覚情報の操作が運動に与える影響は、動作の難易度が高いほど大きいことが結論づけられた。

(Experimental Brain Research, in press)

第3章： 実験2 視覚操作が両手協応動作の学習に及ぼす影響

第3章では、第2章で得られた「左右対称パターンへの視覚情報の変換は左右非対称動作を向上させる効果を持つ」という結果をもとに、その学習効果を検討した。

2群のいずれかに振り分けられた被験者は、位相ずれ90度の両手動作を特定の基準に達するまで練習した。練習の際の視覚条件は、N条件もしくはT条件のいずれかであった。それぞれをN群およびT群と表記する。練習前、基準達成直後、基準達成から1週間後に、視覚情報なし(画面表示なし)練習した動作が再現されるかテストした。

この実験より導かれた結果および考察は以下の通りである。(1)N群に比べてT群の練習期間は短かった。つまり、視覚情報の操作は、左右非対称動作の向上を早めた。(2)基準達成後に行われた2度の動作テストにおいて、90度が再現できない被験者がみられた。従って、これらの被験者においては視覚情報の存在という条件付きで課題動作が向上していたと言える。(3)基準達成後の2度の動作テストで90度を再現できなかった被験者のうちT群に属していた者に限り、90度の不正確さが大きいほど、左右対称動作(位相ずれ0度)も不正確になっていた。これらの被験者はいずれも練習開始前には正確に0度を行っていたので、練習後にみられた左右対称動作の

不正確性を生む原因は、練習期間内に形成されたといえる。動作テストでは視覚情報が与えられないために固有受容感覚を正確に判断する必要がある。90度と0度の双方に各被験者に依存した不正確さが見られたことから、視覚情報を操作した条件下で両手動作の遂行を繰り返す事が、固有受容感覚を正確に判断するためのフィードバックループの一部を変化させた可能性が示唆された。

第4章： 実験3 長期離脱後の学習効果の保持

第4章では、第3章の運動学習の実験において観察された現象が2ヶ月後にも残存するか否かを検討した。また、視覚情報を与えて動作を観察した。さらに個人の認知面（画面上に現れる2つの光点の動作の位相ずれを判断する能力および、認知スタイル）の測定を行い、練習動作の保持に関する個人差の説明を試みた。

第3章の実験に参加した被験者のうち、14名の参加を得て、視覚情報なしでの動作テストおよび視覚情報を与えた場合の動作を測定した。また、位相ずれの判断力および認知スタイルの測定も行った。

この実験より導かれた結果および考察は以下の通りである。(1)基準達成後1週間で行われた90度と2ヶ月後に行われた90度の成績は等しかった。つまり、基準達成後1週間の時点でうまく90度動作を行う事ができた被験者は2ヶ月後にもうまく行う事ができた。(2)基準達成後1週間で行われた0度と2ヶ月後に行われた0度の成績も等しかった。つまり、練習終了後に0度を正確に行えなかった被験者は、2ヶ月後も同様に正確に行えなかったのである。従って、練習期間中に形成された「左右対称動作の不正確性を生む原因」は、2ヶ月の時を経た後も存続していたといえる。(3)画面上に左右対称パターンをつくる視覚条件(T条件)で90度の動作を行わせた時、全ての被験者の動作は非常に正確であった。視覚操作なしでは90度を再現できなかったT群の被験者は、練習後2ヶ月経っていてもT条件下においては練習した動作を再現できた。(4)今回測定した認知能力は、動作の保持の個人差を説明しなかった。

第5章： 実験4 視覚操作条件下での両手協応動作遂行に係る脳活動

第5章では、第2章から第4章にかけて明らかになった、「左右対称パターンに見える視覚条件下での左右非対称動作の遂行」が、いかなる脳活動によって実現されるのかを、fMRI（機能的磁気共鳴画像法）を用いて検証した。

被験者はfMRI装置内で両手の位相ずれが90度になるようにタッピングを行った。このとき左右それぞれのタッピングに応じてコンピュータ画面の中で左右2つの光点が動いた。要求された動作が正確に行われると2つの光点の位相ずれが90度になる条件と、0度（左右対称）になる条件を設けた。さらに、被験者はまったく動作を行わず、90度もしくは0度の位相ずれで自

動的に動く光点を観察するだけの課題も行なった。

この実験より導かれた結果および考察は以下の通りである。(1) 90度の位相ずれ観察時の脳活動は、0度の観察時に比べて広範囲であった。条件の差が見られた部位は高次視覚野、背側運動前野、頭頂連合野を含んでいた。これより、被験者は90度の位相ずれの観察を課題動作（位相ずれ90度のタッピング）と関連づけていた可能性が示唆された。(2) 被験者の動作によって0度の位相ずれを画面内に形成する条件では、90度を形成する条件よりも島皮質の活動が減少した。島皮質は多数のモダリティを統合する座と言われていることから、左右対称パターンに見える視覚条件下で左右非対称動作を遂行する際には、感覚情報をもとに現行の運動を修正する一連の過程における、感覚情報統合のための情報処理負荷が軽減することが示唆された。

第6章： 総括論議

本論文における主張は以下の通りである。

- (1) 視覚操作の利点：左右対称パターンを目標として動作を行う場合、人間の持つ視知覚の性質により左右対称であるか否かを容易に検出できるため、運動修正のためのフィードバック情報としての視覚の重要度が高まると考えられる。すなわち、通常は視覚情報と固有受容感覚情報の統合によって現行の運動が修正されると考えられるが、視覚の重要度が高まることにより、固有受容感覚情報が積極的に用いられにくくなり、感覚情報統合のための情報処理負荷の軽減が起こったのではないかと考えられる。
- (2) 操作された視覚情報を受け続けることの影響：各感覚情報の感受性の変化が繰り返し経験されることにより、変化した感受性が固定化し、その後に与えられる感覚情報の重要性の変化（例えば視覚情報が失われる）に対応できなくなる人もいると考えられる。
- (3) 視覚操作の運動学習場面への応用：左右非対称動作の学習に対する視覚情報操作の効果には個人差がある。従って今回のように仮定の視覚的目標を置く練習方法は、習得する課題の特性を見極めて導入を判断する必要がある。つまり、最終的には操作された視覚情報なしで動作を行うことが目的であれば、今回の方法を用いる事は不適切であるかもしれない。しかし、良い効果を得た被験者もいるため、その有用性を無視する事はできない。練習時に与える視覚情報を、後にも与えることができるような課題の習得や、特定の感覚情報の感受性を変化させる事自体が目的であれば、今回のように、感覚情報の処理特性を利用した運動の拘束は非常に役立つだろう。