

運動イメージの可視化による運動学習過程

Motor Learning using the Visualization of Motor Imagery

山本 裕 二*

水藤 弘 吏****

池上 康 男*

鶴原 清 志**

横山 慶 子****

船橋 孝 恵****

岡本 敦*****

Yuji YAMAMOTO*

Hiroshi SUITO****

Yasuo IKEGAMI*

Kiyoshi TSURUHARA**

Keiko YOKOYAMA****

Takae FUNABASHI****

Atsushi OKAMOTO*****

We developed a method of motor-imagery visualization and examined the temporal and spatial accuracy and movement pattern of motor imagery using a dart-throwing task. Twelve male undergraduates were randomly assigned to two practice conditions and performed 18 sets consisting of 60 throws over sessions on 6 days. Before and after each set, participants were required to visualize throwing; the participants manipulated a puppet-type motion-capture system, which created visualized motion images corresponding to the motion of the puppet. The actual movements were recorded by a VTR. The temporal accuracy of the forward swing in the motor imagery was longer than that of the actual movement. However, the duration of the backswing in the motor imagery was shorter than that in the actual movement, in both practice conditions. The magnitude of the motor-imagery movements was underestimated, as compared to actual movements. While no significant correlation was found between the temporal and spatial accuracy of motor imagery, a significant correlation was shown between temporal and spatial accuracy and performance variability.

1 目的

運動技能の獲得において問題になるのは、やろうとしていることが間違っている、やろうとしていることは正しいが、そのとおりにできないという2つであると思われる。前者は理解の問題で、運動企図、あるいは運動計画に関わる問題であり、いわゆる運動遂行前の運動イメージに問題があると考えられる。後者は理解と遂行の乖離の問題で、運動企図は正確であるがその運動企図から運動が生成される過程に問題があると考え

られる。そこでこのどちらの問題が運動技能獲得の障害となっているかを明らかにするためには運動企図を観察することが必要である。この運動企図は運動遂行前の運動イメージとして考えることができる。

運動イメージは、風景や顔、あるいは単語などの意味的 (semantic) イメージと異なり、実用的 (pragmatic) イメージであることが指摘されている (Jeannerod, 1994)。したがって運動イメージでは時間的な正確性が問題となり、運動イメージにおける遂行時間と実際の遂行動作時間を比較してその機能的等価性を検討す

* 名古屋大学総合保健体育科学センター

** 三重大学教育学部

*** 九州大学大学院人間環境学府

**** 名古屋大学大学院教育発達科学研究科

***** 東海学園大学

* Research Center of Health, Physical Fitness, and Sports, Nagoya University

** Faculty of Education, Mie University

*** Graduate School of Human-Environment Studies, Kyushu University

**** Graduate School of Education and Human Development, Nagoya University

***** Tokai Gakuen University

る研究が多く行われてきたが、そこでの結果は必ずしも一致したものではない。Guillot and Collet (2005) は運動イメージの時間的正確性に関する研究を概観し、動的な部分だけをイメージしたり、競技直前にイメージを描くとイメージ時間は実際の遂行時間よりも短くなるが (Calmels & Fournier, 2001; Munroe, Giacobbi, Jr., Hall, & Weinberg, 2000)、複雑な課題では逆に長くなり (Cerritelli, Maruff, Wilson, & Currie, 2000; Decety & Jeannerod, 1996)、歩行などの周期的な運動において運動の自動化が進むとイメージ時間と遂行時間は一致するとしている (Decety & Michel, 1989; Munzert, 2002; Papaxanthis, Schieppati, Gentili, & Pozzo, 2002)。

こうした時間的測定法だけでなく、運動イメージを想起することによって生じる脳内活動からも検討され、Roland, Larsen, Lassen, and Skinhoj (1980) は運動をイメージすることによって補足運動野の血流が増加することを示し、運動イメージと実際の運動との機能的等価性を指摘している。こうした運動イメージの特異性や機能などは、脳内活動のさまざまな非侵襲的測定法を用いて検証されてきている (Decety, Philippon, & Ingvar, 1988; Decety, 1996; Bonnet, Decety, Jeannerod, & Requin, 1997)。これらの研究では、運動イメージにおける遂行時間と実際の遂行動作時間が一致するのは、運動のプログラミングと運動のイメージが同じ脳部位を共有しているためであると考えられている (Decety, Perani, Jeannerod, Bettinardi, Tadary, Woods, Mazziotta, & Fazio, 1994; Decety, 1996)。

このように運動イメージが運動のプログラミングと等価であり、そのことによって実際の運動とも等価になるということは、心理的不応期を実験パラダイムとした研究でも明らかにされている。Ito (1999) は力量発揮課題を用いた心理的不応期の実験で、第1反応をイメージで行った場合にも実際に行った場合にも第2反応時間が変わらないことを示し、イメージによる反応プログラミングと実際の動作は機能的に等価であるとしている。

さらに運動プログラミングは意識的なイメージであるが、無意識に行う運動準備 (motor preparation) と運動イメージとが同じ神経基盤によるものであるという指摘もある (Jeannerod, 1994)。しかし、運動前野などの神経基盤の一部は共有していても、実際の運動では一次運動野も用いられるため、複雑な動きになるとイメージのほうが短くなるという報告もある (Reed, 2002)。

このように運動イメージに関してはさまざまな観点から研究が行われてきたが、運動イメージの空間的正確性、あるいは運動イメージと実際の遂行動作の空間

的等価性を検討したものはない。そこで本研究では、運動遂行者の運動イメージをパペット型モーションキャプチャ装置を用い、3次元コンピュータグラフィクス (CG) として可視化することによって、運動イメージの測定を試みる。さらに、この可視化した遂行者の運動イメージと実際の遂行動作に関してその時空間的正確性を学習過程の中で検討することが本研究の目的である。

2 方法

2.1 被験者

男子大学生12名を2群に分けた。

2.2 課題

課題はダーツ投げで、JSFD (Japan Sports Federation of Darts) の規則に従い、ダーツボードの中心から237cm離れたスローインラインから、23gのダーツを目標に向かって正確に投げることであった。

2.3 練習方法

練習方法として2条件を設定した。一つはダーツボードのダブルブルと呼ばれる中央の直径12.7mmの領域を狙って、1回3投ずつ20回の60投を1セットとして練習する方法で、これを一定練習群と呼んだ。もう一つはダーツボードの1から20までのエリアを順番に3投ずつ狙い練習するRound the clock方式と呼ばれる方法で、同様に1回3投ずつ20回の60投を1セットとし、これをブロック練習群と呼んだ。

2.4 練習期間

練習は両群とも1日に3セットの180投を1ブロックとし、できるだけ連続するように6日間で6ブロック行った。したがって両群とも練習として1,080投ずつ投げたことになる。また休日などのために練習に要した日数は最長で10日間であった。

2.5 運動イメージの可視化

運動イメージの可視化は、MarioGear (OAS社製) と呼ばれるパペット型モーションキャプチャ装置を用い、学習者が自らポテンシオメータが取り付けられているパペットの関節を操作することによって、Mocap (Alias社製) という3次元アニメーション作成ソフトウェア上でその姿勢変化が実時間で操作できるようにした。そして、構えの姿勢、最大にテイクバックした姿勢、リリース時の姿勢、フォロースルー時の姿勢の4姿勢を学習者自らが作成し、この4姿勢間の角度変化をBézier曲

線でアプリケーション側で補間することによって、一連の動作が3次元CGのアニメーションとして作成された。その後、各姿勢間の時間間隔を学習者が調整することによって、実際の運動イメージに最も近いと思われる動作になるように学習者が納得いくまで調整するようにした。

なお、今回学習者が操作したのは右腕の肩関節に相当する3つの自由度（内転・外転、内旋・外旋、回内・回外に相当）と肘関節に相当する1自由度（屈曲・伸展に相当）と手関節に相当する2自由度（掌屈・背屈と尺屈・橈屈に相当）の6自由度であり、それ以外の自由度に関しては固定とした。

2.6 手続

練習開始日の前に、実験の概要と進め方の説明を行った。そして第1ブロックの前に、ダブルブルへの10投と偶数エリアに1投ずつの10投を投げてもらい、事前テストとした。また第6ブロック後に同様のテストを行い、事後テストとした。

ダーツの到達位置はコンピュータ上で記録し、一定練習群では20分の1のエリアと同面積の中心からの同心円内への到達本数、ブロック練習群では定められた20分の1のエリアへの到達本数を集計した。

学習者は、60投の各セットの前にこれから行う一投目の運動イメージを描き、その運動イメージを可視化し、これを計画イメージとした。また各セットが終わった後に60投目の運動イメージを再生し、可視化させ、これを再生イメージとした。さらに、実際の投球動作は被験者の側方約5メートルの位置からデジタルビデオカメラで撮影し、実時間でコンピュータにその映像を取り込むようにした。また、被験者の投動作を解析するために、被験者は黒の長袖のウェアと黒の野球用の手掌部分だけの手袋を着用し、大転子、肩峰、右肘（上腕骨外側上顆）、右手関節（橈骨茎状突起）、右手（第5指中手骨頭）に直径18.75mmの反射マーカーを貼付した。

2.7 分析

ダーツの到達位置に基づいて、事前事後テストについてはダブルブルと偶数エリアにそれぞれ到達した本数とダブルブルを狙った10投のばらつきを Hancock, Butler, and Fischman (1995) の方法に基づき二変量変動誤差 (BVE: bivariate variable error) として算出し、パフォーマンスとした。練習期間については、1セット60投における到達本数と3投ずつのBVEの平均を求めた。

学習者の実際の投動作についてはビデオから Frame-

Dias (DKH 製) を用いて30Hzでデジタル化し、2次元平面上における肘関節と手関節の角度変位を算出した。また、運動イメージを可視化したアニメーション動作については、BVHファイル形式で30Hzで角度変位を書き出し、そこから算出した。

これらから、時間的正確性の指標として構えからテイクバックが完了するまでの時間（テイクバック時間）とテイクバックからリリースまでの時間（フォワードスイング時間）を遂行動作と運動イメージのそれぞれにおいて算出した。また空間的正確性の指標として、テイクバックでの肘関節と手関節の最大屈曲角度、リリース時の肘関節と手関節の屈曲角度を求めた。さらに運動パターンの類似性を検討するために、テイクバック開始からリリースまでの時間を基準化し、運動イメージと実際の遂行動作の2つの投パターンの平均平方誤差の平方根 (RMSE: root mean square error) を求めた。

ただし、ブロック練習群の1名については運動イメージの可視化に関するデータの一部が欠落していたため運動イメージの分析からは除外した。

3 結果および考察

3.1 パフォーマンス

事前事後テストの到達本数とBVEについて、2群間で乱順化検定 (Edgington, 1995; 橘, 1997) を行った結果、偶数エリアを狙った到達本数の事前テストにおいてのみ一定練習群の方がブロック練習群よりも有意に良い成績を示した ($p=0.021$)。一定練習群の方がBVEについても事前テストで小さい傾向があり ($p=0.058$)、必ずしも両群の事前テストでの成績が等質ではなかったと思われる。

また各群を事前事後テストで比較すると、ばらつきにおいてのみ有意な学習効果が両群にみられた（それぞれ、一定練習群： $p=0.043$ 、ブロック練習群： $p=0.015$ ）。したがって、到達本数には顕著な学習効果はみられないが、投動作に関しては両群とも学習によって安定性が増していると考えてよいと思われる。

学習期間での各群の各ブロックの到達本数と3投ずつのBVEの平均を示したのが図1である。練習条件(2)×ブロック(6)のブロックに関して繰り返しのある分散分析を行った結果、到達本数においてはブロックの主効果と交互作用が有意で（ブロック： $F(1, 5)=4.61, p<.05$ 、交互作用： $F(5, 50)=3.60, p<.05$ ）、またばらつきに関してはブロックの主効果のみが有意であった ($F(1, 5)=3.97, p<.05$)。すなわち、到達本数、ばらつきともに少しずつではあるが学習が進んでいるといえる。また、到達本数に関しては一定練習群の方がブロック

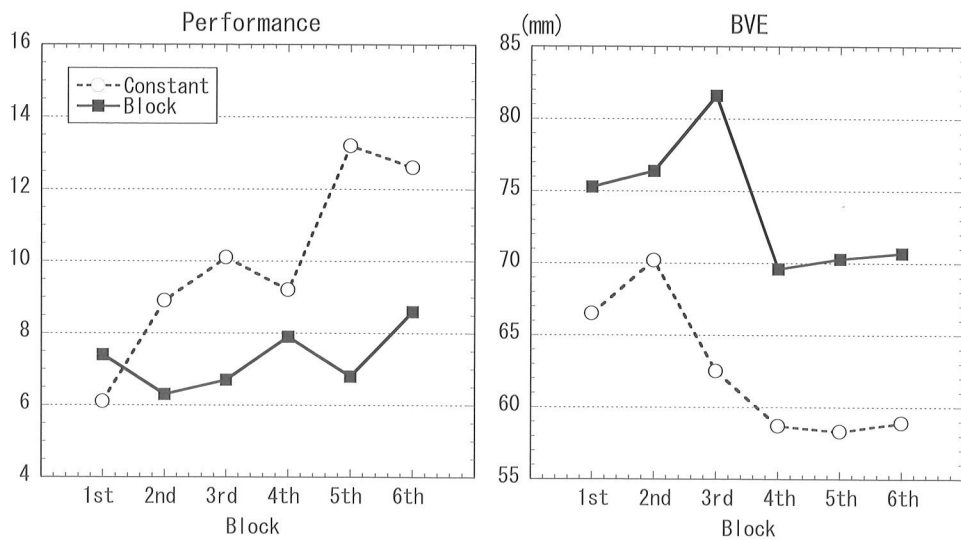


図1 各群の学習過程における到達本数とばらつきの変化

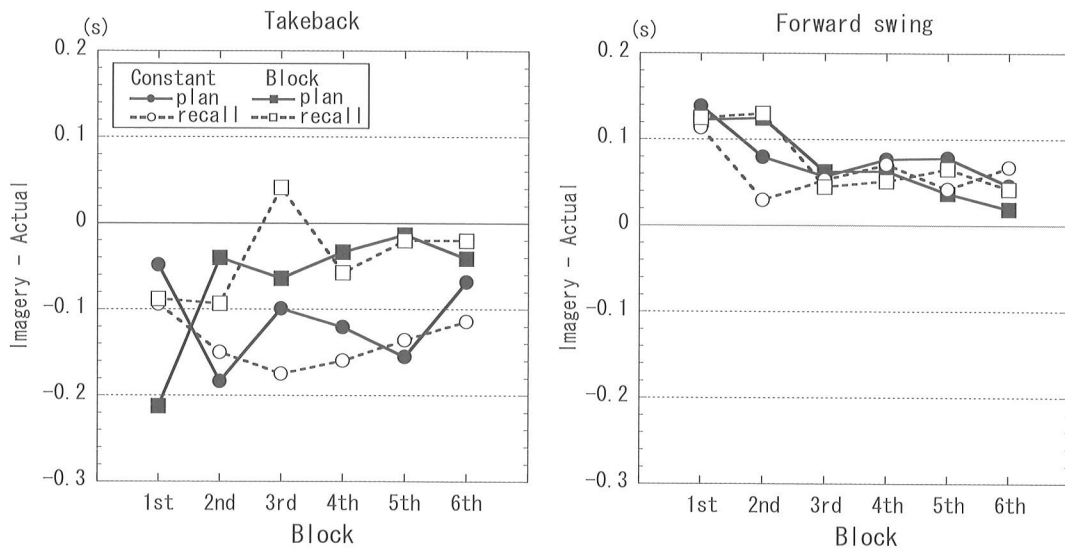


図2 各群の学習過程における運動イメージの時間的正確性の変化

練習群よりもより学習が進んでいたが、これはこれまでの運動学習における閉回路理論 (Adams, 1971) やスキーマ理論 (Schmidt, 1975) の検証における結果と一致するものである (Christina & Merriman, 1977; Shea & Kohl, 1991)。

3.2 運動イメージの時間的正確性

テイクバック時間とフォワードスイング時間について、運動イメージでの遂行時間から実際の遂行動作の時間を減じたものを運動イメージの時間的正確性とした。したがって正の値は、イメージ時間が実際の遂行時間よりも長いことを表し、負の値は逆に実際の遂行

時間の方が長いことを表す。試行前後の計画イメージと再生イメージごとに、練習条件 (2) × ブロック (6) のブロックに関して繰り返しのある分散分析を行った。その結果、計画イメージと再生イメージともにフォワードスイング時間においてブロックの主効果のみが認められた (計画イメージ: $F(5, 45) = 2.56, p < .05$, 再生イメージ: $F(5, 45) = 3.05, p < .05$)。各群のブロックごとの平均を図示したものが図2である。

ここで特徴的なことはテイクバック時間では計画イメージと再生イメージにかかわらず、運動イメージでの遂行時間の方が実際の動作遂行時間よりも短く、逆にフォワードスイング時間では運動イメージによる遂行

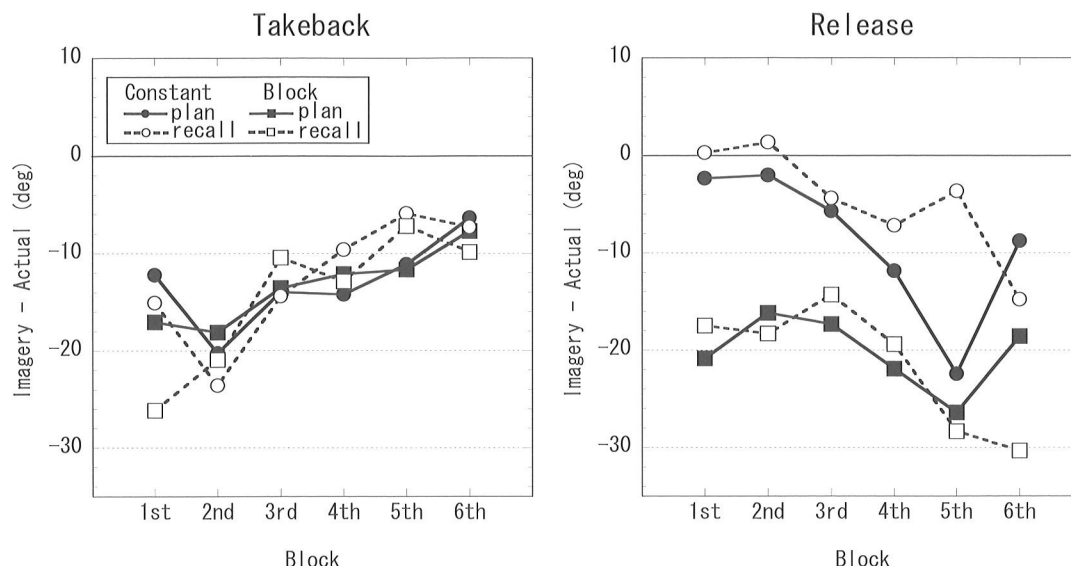


図3 各群の学習過程における肘関節の運動イメージの空間的正確性の変化

時間の方が実際の動作遂行時間よりも長いことである。テイクバックにかかった実際の動作遂行時間はすべてを平均すると0.51 sであり、フォワードスイングに要した時間は0.10 sであった。つまり、フォワードスイングの実際の遂行に要した時間は非常に短く、このことがフォワードスイング時間の運動イメージが過大評価された原因であると思われる。Calmels, Lopez, Holmes, and Naman (2006) は体操競技の選手を対象に跳馬の運動イメージを、助走から踏み切るまで、踏み切ってから着手まで、着手から離手まで、離手後の空中姿勢から着地までの4つに区分して検討している。その結果、助走から踏み切までの時間では実際の遂行時間の方がイメージ時間よりも長く、逆に踏み切ってから着手まで、あるいは着手から離手までではイメージ時間の方が実際の遂行時間よりも長くなることを報告している。そしてこれは、250ms以下の速い動きでは実際の動きをイメージするのにより長い時間を要するからであるとしている (Orliaguet & Coello, 1998)。

しかしながらフォワードスイング時間に両群とも学習効果が見られたことから、こうした短い時間の運動イメージでも学習によって改善する可能性が示唆される。つまり、未熟練者は実際の運動遂行時間よりもイメージ時間を過小評価し、熟練に伴いその差が減少し時間的正確性が高まることを支持するものであるといえる (Reed, 2002)。

3.3 運動イメージの空間的正確性

テイクバック時の運動イメージにおける肘関節と手関節の最大屈曲角度から実際の遂行動作の最大屈曲角

度を減じたもの、またリリース時の運動イメージの肘関節と手関節の屈曲角度から実際の遂行動作におけるそれぞれの屈曲角度を減じたものを空間的正確性の指標として、試行前後の計画イメージと再生イメージごとに、練習条件(2)×ブロック(6)のブロックに関して繰り返しのある分散分析を行った結果、いずれにも有意な主効果や交互作用は認められなかった。各群の肘関節については図3に、手関節に関しては図4にブロックごとの平均を図示した。

手関節のテイクバック時とリリース時の屈曲角度の一部を除いては、運動イメージでの屈曲角度の方が実際の遂行動作の屈曲角度よりも小さく、全般に動きの大きさを過小評価しているといえる。

3.4 運動イメージの運動パターン正確性

運動パターンの正確性を評価するために、テイクバック開始時からリリース時までの運動イメージでの動作と実際の動作を基準化した後、肘関節と手関節の運動パターンについてRMSEを求めた。試行前後の計画イメージと再生イメージごとに、練習条件(2)×ブロック(6)のブロックに関して繰り返しのある分散分析を行った結果、試行後の手関節の再生イメージにおいてのみ練習条件の主効果が認められた ($F(1, 9)=6.16, p<.05$)。各群のブロックごとの平均を図示したものが図5である。ブロック練習条件の学習者の方が一定練習条件の学習者よりも運動イメージと実際の遂行動作の運動パターンが一致していたことを示している。

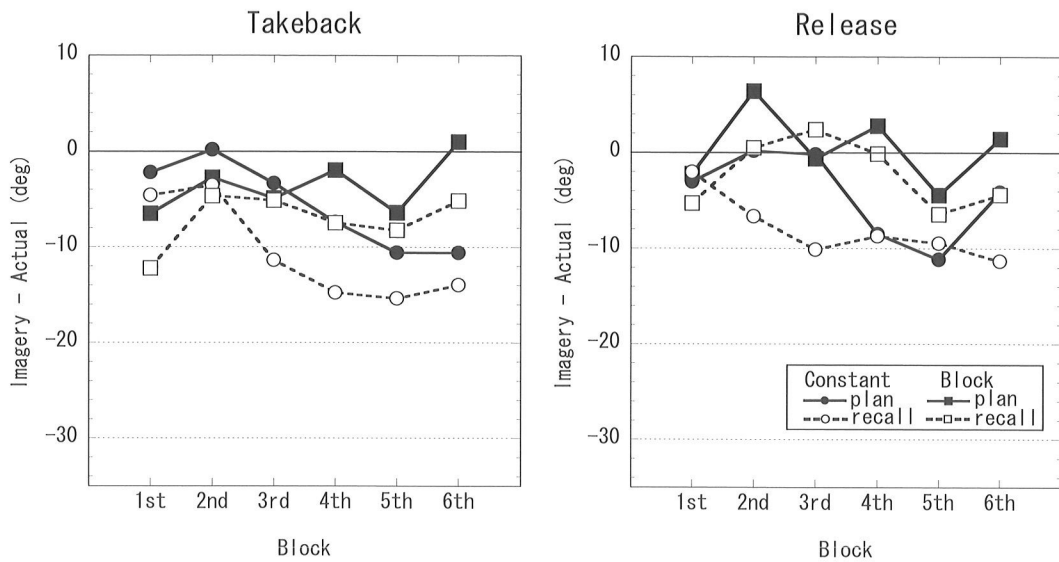


図4 各群の学習過程における手関節の運動イメージの空間的正確性の変化

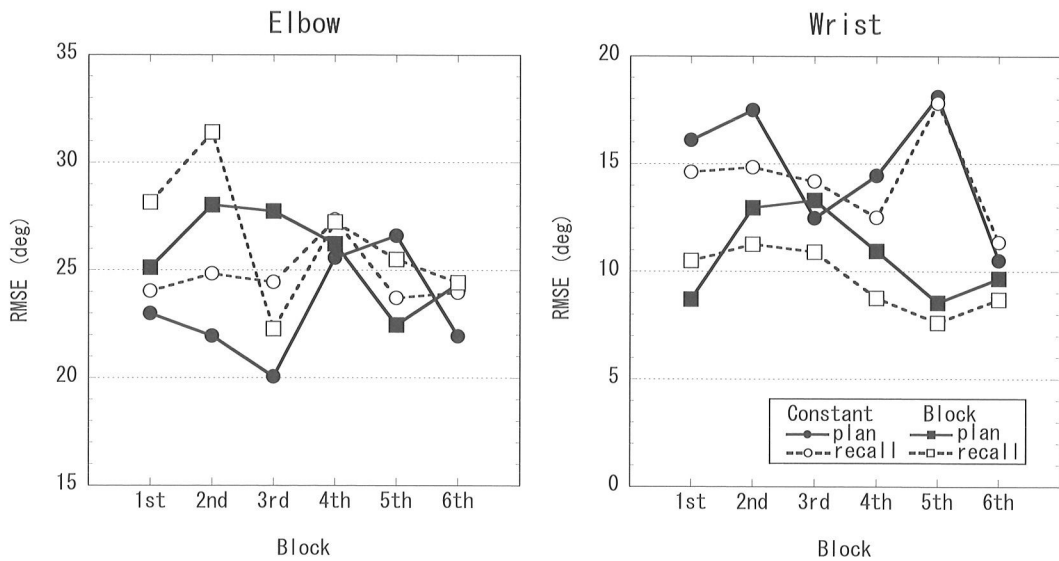


図5 各群の学習過程における運動イメージの運動パターンの正確性の変化

3.5 運動イメージの時空間正確性

運動イメージの時間的正確性と空間的正確性および運動パターンの正確性の関係を検討するためにそれぞれの指標間の相関係数を、両練習条件の被験者をまとめて試行前後の計画イメージと再生イメージごとに求めた。なおここでは、時間的正確性と空間的正確性に関しては絶対誤差として求めた。表1がその結果で、対角線より右上が計画イメージに関する結果で、左下が再生イメージに関する結果である。試行前後の計画イメージと再生イメージに共通して有意な相関が認められたのは、空間的正確性の肘関節と手関節のそれぞ

れのテイクバック時の最大屈曲角度とリリース時の屈曲角度、肘関節と手関節のテイクバック時の最大屈曲角度とリリース時の屈曲角度という、空間的な正確性とそれぞれの運動パターンの正確性であった。さらに、計画イメージではテイクバック時間と肘関節のテイクバック時の最大屈曲角度、再生イメージではテイクバック時間と肘関節のリリース時の屈曲角度および肘関節の運動パターンと有意な相関が認められた。

これらの結果から、関節の空間的正確性とそれぞれの関節の運動パターンの正確性には相関が見られるが、時間的正確性と空間的正確性、あるいは運動パターン

表1 運動イメージの時空間的正確性と運動パターンの正確性相互の相関

	Temporal accuracy		Spatial accuracy				Movement pattern	
	Takeback	FW swing	Wrist		Elbow		RMSE	
			Takeback	Release	Takeback	Release	Wrist	Elbow
TA								
Takeback		-0.139	0.078	0.020	0.146*	0.080	0.027	0.079
FW swing	0.007		-0.104	-0.017	-0.080	-0.054	-0.049	0.009
SA								
Wrist TB	-0.096	0.013		0.447**	-0.026	-0.032	0.762**	-0.137
Wrist RE	-0.044	-0.047	0.492**		0.091	-0.095	0.679**	-0.069
Elbow TB	0.139	0.014	0.012	0.030		0.182*	0.041	0.492**
Elbow RE	0.152*	0.103	-0.031	0.027	0.149*		-0.091	0.544**
RMSE								
Wrist	-0.109	0.000	0.850**	0.660**	-0.026	-0.024		0.001
Elbow	0.212**	0.069	-0.005	-0.033	0.556**	0.429**	-0.059	

右上が計画イメージ, 左下が再生イメージ. TB: Takeback, RE: Release, TA: Temporal accuracy, SA: Spatial accuracy, *p < .05, **p < .01

表2 遂行成績と運動イメージの正確性との相関

	Temporal accuracy		Spatial accuracy				Movement pattern	
	Takeback	FW swing	Wrist		Elbow		RMSE	
			Takeback	Release	Takeback	Release	Wrist	Elbow
Performance								
Plan	-0.128	-0.063	0.037	0.071	-0.061	-0.025	0.076	0.003
Recall	-0.092	-0.068	0.087	0.066	-0.029	-0.070	0.006	0.025
BVE								
Plan	0.194**	0.086	-0.028	0.029	0.184**	0.044	0.030	0.116
Recall	0.143*	0.013	-0.030	-0.031	0.042	0.133	0.050	0.042

*p < .05, **p < .01

の正確性には一貫した相関は認められない。このことは、運動イメージの正確性において時間的成分と空間的成分が必ずしも依存関係にあるとはいえないことを示唆している。これまでの運動イメージに関する研究では空間的正確性の評価が行えなかったことから、運動イメージの機能的等価性に関しては脳図化などの手法を用いても検証されてきているが、時間的正確性についてのみ言及され、課題や時間的制約などによってその正確性に関しては必ずしも一貫した結果が得られているとはいいがたい (Decety, 1996; Guillot & Collet, 2005; Jeannerod, 1994; Li, Latash, & Zatsiorsky, 2004; Romero, Lacourse, Lawrence, Schandler, & Cohen, 2000)。したがって、運動イメージの機能的等価性に関しては、

時間的正確性と空間的正確性の双方を検討することが必要であると思われる。

3.6 運動イメージの正確性と遂行成績

運動イメージの正確性と遂行成績の関係を検討するために、運動イメージの正確性のそれぞれの指標と遂行成績である到達本数とばらつきとの相関係数を求めたものが表2である。その結果、遂行成績におけるばらつきと計画イメージと再生イメージの時間的正確性であるテイクバック時間と、また計画イメージの空間的正確性である肘関節のテイクバック時の最大屈曲角度のそれぞれにおいて有意な相関が認められたが、それ以外には有意な相関は認められなかった。

このことは、ダーツのような的当て課題では到達本数といったパフォーマンスには多くの要因がかかわることから、必ずしも観察できる遂行動作の正確性と関連が見られないと考えられる (Kudo, Tsutsui, Ishikura, Ito, & Yamamoto, 2000)。しかしながら遂行成績の安定性とと考えられるばらつきとの間に有意な相関が認められたことは、従来の運動イメージの機能的等価性を支持するものであると思われる。さらに、運動イメージの時間的正確性だけでなく計画イメージにおいて運動イメージの空間的正確性との間に有意な相関が認められたことは、いわゆる実際に遂行するフォームを遂行前にイメージすることが実際の運動遂行の安定性に寄与することを示唆していると思われる。

まとめ

離散的な投課題であるダーツ投げの学習において、パペット型モーションキャプチャ装置を用いて運動イメージを可視化し、一定練習とブロック練習という2種類の練習方法において学習を行い、運動イメージの時空間的正確性と運動パターンの正確性を検討するとともに、運動イメージの正確性相互の関係や遂行成績との関係について検討した。その結果、実際の運動遂行時間が短い場合には運動イメージは過大評価され、逆に実際の運動遂行時間が長い場合に過小評価されるが、学習によってその正確性は向上することが示唆された。また運動イメージの空間的正確性は、実際の運動遂行よりも過小評価される場合が多いことが明らかになった。さらに、運動イメージの正確性相互の関係を検討した結果、時間的正確性と空間的正確性には有意な相関が認められず、運動イメージにおける時間的成分と空間的成分の独立性が示唆された。最後に、運動イメージの時間的正確性と遂行成績の安定性の間には有意な相関が見られ、これは運動イメージの機能的等価性を支持するものであったが、さら遂行前の計画イメージの空間的正確性と遂行成績の安定性との間にも有意な相関が見られたことは、遂行前に描く運動イメージを空間的に正確にすることで遂行動作の安定性が得られることを示唆していると思われる。

運動学習において運動イメージを利用することが有効であることは古くから指摘されてきた。そしてそのために一人称のイメージを描くことによってより実際の遂行動作と一致し効果的であることも指摘されている (Decety & Chaminade, 2003; Mulder, Hochstenbach, van Heuvelen, & den Otter, 2007; Sirigu & Duhamel, 2001)。しかしながら、運動イメージの時間的な正確性に関してはこれまでも測定されてきたが、空間的な正確性

については測定不能であった。今回用いたパペット型モーションキャプチャ装置による運動イメージの可視化では、一人称イメージで運動イメージを描くとともに、その描いた運動イメージを可視化でき、運動イメージの修正も行うことができるものと思われる。今後、運動学習を支援するシステムとして実際の遂行動作との比較等も含めて更なる検討が必要である。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B) (No. 17300206) の補助に基づくものである。記して謝意を表する。

文献

- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111-149.
- Bonnet, M., Decety, J., Jeannerod, M., & Requin, J. (1997). Mental simulation of an action modulates the excitability of spinal reflex pathways in man. *Cognitive Brain Research*, 5, 221-228.
- Calmels, C., & Fournier, J. F. (2001). Duration of physical and mental execution of gymnastic routines. *The Sport Psychologist*, 15, 142-150.
- Calmels, C., Lopez, E., Holmes, P., & Naman, V. (2006). Chronometric comparison of actual and imaged complex movement patterns. *Journal of Motor Behavior*, 38, 339-348.
- Cerritelli, B., Maruff, P., Wilson, P., & Currie, J. (2000). The effects of an external load on the force and timing components of mentally represented actions. *Behavioural Brain Research*, 108, 91-96.
- Christina, R. W., & Merriman, W. J. (1977). Learning the direction and extent of a movement: a test of Adam's closed-loop theory. *Journal of Motor Behavior*, 9, 1-9.
- Decety, J., Perani, D., Jeannerod, M., Bettinardi, V., Tadary, B., Woods, R., Mazziotta, J. C., & Fazio, F. (1994). Mapping motor representations with positron emission tomography. *Nature*, 371, 600-602.
- Decety, J. (1996). Do imagined and executed actions share the same neural substrate? *Cognitive Brain Research*, 3, 87-93.
- Decety, J., & Chaminade, T. (2003). When the self represents the other: a new cognitive neuroscience view on psychological identification. *Consciousness and Cognition*, 12, 577-596.
- Decety, J., & Jeannerod, M. (1996). Mentally simulated movements in virtual reality: Does Fitts's law hold in motor imagery. *Behavioural Brain Research*, 72, 127-134.
- Decety, J., & Michel, F. (1989). Comparative analysis of actual and mental movement times in two graphic tasks. *Brain and Cognition*, 11, 87-97.
- Decety, J., Philippon, B., & Ingvar, D. H. (1988). rCBF landscapes during motor performance and motor ideation of a graphic gesture. *European Archives of Psychiatry and Neurological*

- Sciences*, 238, 33–38.
- Edgington, E. S. (1995). *Randomization test: third edition, revised and expanded*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Guillot, A., & Collet, C. (2005). Duration of mentally simulated movement: a review. *Journal of Motor Behavior*, 37, 10–20.
- Hancock, G. R., Butler, M. S., & Fischman, M. S. (1995). On the problem of two-dimensional error scores: measures and analyses of accuracy, bias, and consistency. *Journal of Motor Behavior*, 27 (3), 241–250.
- Ito, M. (1999). Functional equivalence for response programming of actually performing versus imaging movements. *Perceptual and Motor Skills*, 88, 941–951.
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain: neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioural and Brain Sciences*, 17, 187–202.
- Kudo, K., Tsutsui, S., Ishikura, T., Ito, T., & Yamamoto, Y. (2000). Compensatory coordination of release parameters in a throwing task. *Journal of Motor Behavior*, 32, 337–345.
- Li, S., Latash, M. L., & Zatsiorsky, V. M. (2004). Effects of motor imagery on finger force responses to transcranial magnetic stimulation. *Cognitive Brain Research*, 20, 273–280.
- Mulder, T., Hochstenbach, J. B. H., van Heuvelen, M. J. G., & den Otter, A. R. (2007). Motor imagery: the relation between age and imagery capacity. *Human Movement Science*, 26, 203–211.
- Munroe, K. J., Giacobbi, Jr., P. R., Hall, C., & Weinberg, R. (2000). The four Ws of imagery use: where, when, why, and what. *The Sport Psychologist*, 14, 119–137.
- Munzert, J. (2002). Temporal accuracy of mentally simulated transport movement. *Perceptual and Motor Skills*, 94, 307–318.
- Orliaguet, J.-P., & Coello, Y. (1998). Differences between actual and imagined putting movements in golf: a chronometric analysis. *International Journal of Sport Psychology*, 29, 157–169.
- Papaxanthis, C., Schieppati, M., Gentili, R., & Pozzo, T. (2002). Imagined and actual arm movements have similar durations when performed under different conditions of direction and mass. *Experimental Brain Research*, 143, 447–452.
- Reed, C. L. (2002). Chronometric comparisons of imagery to action: visualizing versus physically performing springboard dives. *Memory & Cognition*, 30, 1169–1178.
- Roland, P. E., Larsen, B., Lassen, N. A., & Skinhoj, E. (1980). Supplementary motor area and other cortical areas in organization of voluntary movements in man. *Journal of Neurophysiology*, 43, 118–136.
- Romero, D. H., Lacourse, M. G., Lawrence, K. E., Schandler, S., & Cohen, M. J. (2000). Event-related potentials as a function of movement parameter variations during motor imagery and isometric action. *Behavioural Brain Research*, 117, 83–96.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225–260.
- Shea, C. H., & Kohl, R. M. (1991). Composition of practice: influence on the retention of motor skills. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 62, 187–195.
- Sirigu, A., & Duhamel, J. R. (2001). Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 910–919.
- 橘敏明 (1997). 確率化テストの方法—誤用しない統計的検定—. 東京: 日本文化科学社.

(2008年1月4日受付)

