



Title	他者運動認知能力に関する自己運動制御からの検討
Author(s)	大島, 浩幸; 山田, 憲政
Citation	スポーツ心理学研究, 39(2), 129-136
Issue Date	2012-11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/54863
Type	journal article
File Information	Oshima.pdf



「スポーツ心理学研究」投稿論文

1) 論文種類：原著論文

2) 題 目 （和）：他者運動認知能力に関する自己運動制御からの検討

（英）：A study on the ability to perceive motion of others from the viewpoint of
motor control

Abstract

The purpose of this study was to verify the ability to perceive the motion of others from the viewpoint of motor control. We selected a ball-throwing task because it is one of the most skilled multi-joint movements and requires excellent coordination among the joints, and even though it is commonly observed in various sports. The stimulus was a stick picture movie featuring two movements—the normal throwing motion of a skilled thrower (model motion) and an altered throwing motion (delayed motion) developed by systematically manipulating the timing of the elbow extension. Ten highly skilled players volunteered to take part in the study. First, they observed the stimulus twice. Next, they threw the ball once using their usual throwing motion (usual throwing condition) and performed a ball-throwing task that reflected the difference between the model motion and the delayed motion (changed throwing condition). They alternately performed these trials three times. As compared to the usual throwing condition, the changed throwing condition showed a significant decrease in the temporal phase difference between the extension angular velocity at the elbow and the wrist ($p < 0.05$). This change corresponded to the difference between the model motion and the delayed motion in the stimulus. The result of our experiment clearly shows that the participants detected the difference between the model motion and the delayed motion and controlled their movement.

Key words: motion discrimination, movement coordination, throwing movement, biological motion, stick picture

Abstract 和訳

本研究の目的は、他者運動認知能力を自己運動制御の観点から検証することであった。実験は様々なスポーツにおいて一般的な運動であるが、関節間の卓越した協調を要する最も熟練した多関節運動の一つである投球動作を用いた。観察映像は、2つの動作—熟練者の標準投球動作（モデル動作）とモデル動作を基に肘関節と手関節の伸展のタイミングを段階的に操作した投球動作（遅延動作）—によるスティックピクチャー映像であった。運動技術レベルの高い10人が実験に参加した。まず、彼らは映像を2度観察した。次に、通常の投球（通常投球条件）と、モデル動作と遅延動作の差異を反映した投球（変化投球条件）を行った。彼らは、交互に3球ずつこれらの試技を実施した。その結果、肘関節と手関節の伸展角速度の位相差が通常投球条件に比べ、変化投球条件において有意に減少した ($p < 0.05$)。この変化は、観察映像における基準動作と遅延動作の差異と共通の法則性を持つ。つまり、この結果は、基準動作と遅延動作の観察から肘関節と手関節の伸展における位相差を抽出し、自己の運動として実行したことを意味する。

Key words : 運動識別, 運動協調, 投球動作, バイオロジカルモーション, スティックピクチャー

1. 緒言

近年、観察運動学習と呼ばれる他者の運動を観察するだけの運動学習の実証研究が行われている (Breslin et al., 2005, 2006; Horn et al., 2005). これらの研究が共通の原理として取り上げる神経メカニズムがミラーニューロンシステムの活動である. このミラーニューロンシステムは、自己が運動を実行するときと他者が同様の運動を実行する様子を観察するときの両方で活動電位を発生させ (Rizzolatti et al., 1996; Rizzolatti et al., 1996; Grafton et al., 1996), さらに運動を観察する際に模倣を目的とした場合により強く活性化することが知られている (Iacoboni et al., 1999; Buccino et al., 2004). これは、運動観察には知覚系だけでなく運動系も関与していることを示唆している. そこで、運動系が運動観察に関与するのであれば、実際の運動経験の有無が運動観察時のニューロン活動に影響を及ぼすのではないかとということが検討された (Calvo-Merino et al., 2005, 2006; Cross et al., 2006). Calvo-Merino et al. (2005)は、クラシックバレエとカポエイラのダンサーが、それらのダンスを行う他者を観察したとき、自身と同じダンススタイルを観察する際にミラーニューロン領域の強い活性化が見られた事を報告した. さらに、男女のバレエダンサーに性別特有のバレエ動作のビデオを観察させ、よく見るが行うことがない異性に特有の動作と比較したところ、自身のレパートリー内の動作を観察した時にそれらの領域がより強い活性化を示したことから、ミラーニューロンシステムが視覚的慣れにより活性化した可能性を排除した (Calvo-Merino et al., 2006). また、Cross et al. (2006) は、あるステップに最初は未経験なダンサーが、練習後にこの領域における活性が増加したこと、さらに、身体運動を伴う運動学習と観察運動学習の両方法において同様の脳の活性を報告した (Cross et al., 2009).

これらの研究は、ミラーニューロンシステムの活動から運動観察能力に運動の技術レベルが

関与するかを検討しているが、いずれの場合も、観察者の運動技術レベルをその運動に対する経験の有無により分類している。しかし、当該の運動経験を有して、その運動が出来る人でも、技術レベルは異なると考えられるため、技術レベルに応じた運動観察能力の違いが存在する可能性がある。そこで大島・山田（2010）は、運動技術レベルと運動観察能力の関連を次のように実験的に検討した。運動課題としては、一般的な運動であり、なおかつ技術レベルにより明確な差が存在する投球動作を用いた。投球動作は、技術レベルの優劣により、肘関節と手関節の伸展角速度の増加開始時の位相差に特徴がある（熟練者は近位関節から遠位関節へ順次可動する）ことが明らかにされている（Hirashima et al., 2003）ため、この位相差を指標に技術レベルを2群に分類した。運動観察能力の判定は、熟練者モデルの投球動作によるスティックピクチャー（以下、基準動作）と肘関節の伸展のタイミングを遅らせて肘関節と手関節の位相差を段階的に減少させたスティックピクチャー（以下、遅延動作）を作成し、どの程度の変化の段階で遅延動作が基準動作と異なると識別できるかという指標を設けて検討した。その結果、技術レベルの高い実験参加者群の方が、技術レベルの低い群に比べ早い段階で基準動作と遅延動作間の差異を検出した。この結果から、運動の技術レベルの違いが、運動観察の識別感度に関与する可能性が示唆された。

ここで、技術レベルの異なる2つの実験参加者群が、基準動作と異なると判断した遅延動作のスティックピクチャーを静止画として描き出したものを図1に示す。基準動作におけるボールリリース時にあたる14コマ目の肘関節の相対角度を比較すると、基準動作は1.96rad、技術レベルの高い群では1.63rad、技術レベルの低い群では0.97radである。この差は基準動作の動作開始時から基準動作のボールリリース時までの肘関節の相対角度の変化を100%として正規化すると、技術レベルの高い群では29%減少、技術レベルの低い群では87%減少している。

つまり、技術レベルの高い群は、この静止画の形だけの比較では微細な差である基準動作と遅延動作の観察から2つの運動の識別が可能であったと言える。しかしながら、この運動観察能力は、実際に身体を動かすことなく運動観察を繰り返すだけで観察した運動の学習が起こることが観察運動学習の研究で実証されているため (Breslin et al., 2005, 2006; Horn et al., 2005), 何度も運動の観察と評価を繰り返し、その平均値をとるという方法ではなく、1度の観察・評価だけで結果を導いている点、また運動間の差異の検出が可能になった段階でマウスを押すという点の2つの点において、信頼性を担保するには弱点を孕んでいる。技術レベルの高い群が差異を識別できた段階は前述のように微細な変化の段階であることを考慮すると、何らかの別の方法で検証する必要があると考えられる。

そこで本研究では、大島・山田 (2010) の技術レベルの高い実験参加者群を対象に、運動間の差位を検出した段階でマウスを押すという知覚課題を繰り返すのではなく、基準動作とその基準動作に対して異なると判断した遅延動作をセットにした映像を観察させ、その運動間の差異を実際に動きとして出力するという運動課題を用い、運動観察において運動間の差異の識別が行われた事を検証することを試みる。加えてこの検証は、知覚した運動間の差異を自己運動制御に反映する事が可能かをみるものであり、これはつまり知覚と運動の密接な相互関連を検討することでもあり、他者の行う身体運動の認知と自己の身体運動制御との関係の検討に繋がるとも言える。

<図1挿入>

2. 方法

2.1. 実験参加者

大島・山田 (2010) において、技術レベルが高く、運動観察においても高い識別感度を示した 10 名 (平均年齢 21 ± 2.3 歳) が実験に参加した。すべての実験参加者は右投げであった。実験参加者には、事前に実験の目的や内容などを説明し、実験協力の同意を得た。また、本研究は所属大学倫理委員会の承認を得た。

2.2. 観察映像

まず、以下のような基準動作と遅延動作を作成した。基準動作は、投球動作に熟練した者の投球動作中の右腕の肩峰、上腕骨外顆、尺骨茎状突起、第 5 中手指節間関節の座標データを高速カメラ (HDR-FX, SONY) を用いてサンプリング周波数 120 Hz で収集し、その座標を繋ぐスティックピクチャーで表された投球動作である。遅延動作は、この基準動作を基に肘関節の角度データを、肩関節と手関節の角度データから $1/120 \text{ sec}$ ずつ段階的に遅らせた投球動作を 15 セット作成した (図 2a)。この位相を遅らせる操作は熟練者の動作を未熟練者の動作に近づけたものであり、肘の伸展のタイミングが遅くなることを意味する。また、作成したスティックピクチャーの投球動作は 120Hz の高速カメラで記録されているため、そのまま再生すると本来の投球動作よりも $1/4$ 倍速のスローモーション動作になる。そのため、通常の投球動作の速度に戻すため 4 倍速の 30Hz で保存した。基準動作、遅延動作ともに 44 コマ (約 1.47 秒) で構成されている。

図 2b は、観察映像の構成が示されている。全映像は約 7 秒であり、3 秒間のカウントダウン、基準動作、1 秒間の画面全体の暗転、遅延動作で構成されている。この遅延動作の決定は、大島・山田 (2010) において各実験参加者が、作成した 15 セットの遅延動作が小さな変化から大きな変化へと順次配列された一連の映像を観察し、基準動作と異なると回答した段階のもの

を採用した。表 1 は、各実験参加者が基準動作と異なると判断した遅延動作の遅延秒数が示されている。

<図 2 挿入>

2.3. 実験試技

図 3 は、実験の手順が示されている。実験参加者は、4m離れた壁に向かってボールを投げた。投球は矢状面上で腕の運動に限定した動作で行った。ボールはテニスボール (56.5g) を用いた。実験参加者は十分な準備体操の後、観察映像を 2 度観察した。その際に、実験参加者に映像を観察した後に、遅延動作を観察した際の基準動作に対する違和感を反映した投球を行うことを指示した。また、観察した遅延動作をそのまま実行するのではなく、遅延動作観察時の違和感を強調した投球を実行するよう求めた。実験に先立ち、3 球の練習試行を行った。そして続く実験では、まず通常の投球動作で 1 度投球した (以下、通常投球)。次に、違和感を反映した投球を 1 度実施した (以下、変化投球)。この 2 条件を 1 つのセットとし 3 セットの本試行を行った。つまり、両投球条件において 3 試技ずつの計 6 試技である。通常投球に関しては全力の 5 割の力と指示を与えて投球させた。この 5 割の力の試技は、5 割という努力感そのものを厳密に目標としたものではなく、実施者の意図通りの力感で運動を実行する試技として設定したものである。また、変化投球に関しては動作実施に重点を置く為に力については指示を与えていない。同様の理由により、両投球条件において正確性教示は行わずとも設定していない。

運動観察は、フェイスマウントディスプレイ (Glasstron, SONY) を用いた。フェイスマウントディスプレイを用いる事で観察映像以外は視界に入らない。そのため、基準動作以外のものと遅延動作を比較することができない。なお、運動観察の前に、肘の伸展のタイミングが遅

くなるという具体的な変化の内容は伝えていない。

<図 3 挿入>

2.4. データ収集

実験参加者の右腕に貼付した肩峰, 上腕骨外顆, 尺骨茎状突起, 第 5 中手指節間関節 (MP) の体節基準点 4 点とボール 1 点の計 5 点の反射マーカの動作を 1 台の高速カメラ (EX - F1, CASIO) を用いて投球者の右側方から 300Hz で撮影した。その後, DLT 法により 2 次元座標を取得した。

2.5. データ処理

解析区間は運動開始からボールリリースまでの投球区間とした。運動開始は肩関節の伸展角速度が最大値の 10% を越えた時点とし, ボールリリースは第 5 中手指節間関節とボールの距離が 10cm を超えた時点とした。また, 各データはその区間を 100% とし, スプライン補間を用いて正規化した。データは 4 次の Butterworth 型のローパスフィルターにより遮断周波数 10Hz で平滑化した。次に, 各関節角度を算出し, 角速度を得るために数値微分を行った。さらに, 各関節動作の相対角速度の時系列変化から, 肘関節と手関節の伸展角速度の位相差を算出した。関節間の伸展角速度の位相差は, 手関節の伸展角速度の増加開始時点から肘関節の伸展角速度の増加開始時点を減じたものである。つまり, 位相差が正の場合は肘関節が手関節より先行して伸展することを意味し, 負の場合は手関節が肘関節より先行して伸展することを意味する。各関節の伸展角速度の増加開始のタイミングは, 角速度の増加率 (角加速度) が最大値の 10% を越えた時点とした。なお, 図 4 左のように角速度が二峰性の波形を示した場合は, 最初の極

値の立ち上がりではなく、その後に生じる最大値へ立ち上がる波形で 10%を超えた時点とした。

結果は、実験参加者ごとに通常投球条件と変化投球条件のそれぞれ 3 回ずつの試行の平均値 ± 標準偏差で示す。有意差検定は、スチューデントの t 検定（両側検定）を用いて行った。統計的有意性は、危険率 5%未満 ($p < 0.05$) で有意差ありと判定した。

3. 結果

図 4 は、通常投球条件と変化投球条件の各条件における角速度データの典型例である。x 軸は投球区間を 100%とし、スプライン補間を用いて正規化した。表 1 は、実験参加者の通常投球条件と変化投球条件の肘関節と手関節の伸展角速度の増加開始時の位相差が示されている。実験参加者の通常投球条件における肘の伸展角速度の増加始点は、手首の伸展角速度の増加始点より 10%以上前に存在した（図 4 左）。それに対して、変化投球条件における肘の伸展角速度の増加始点は手首の伸展角速度の増加始点より後に存在するか、通常投球条件より位相差が減少していた（図 4 右）。全実験参加者において、通常投球条件における位相差は変化投球条件における位相差に比べ、有意に高い値であった。

<図 4, 表 1 挿入>

4. 考察

大島・山田（2010）は、運動観察において運動の技術レベルの違いが運動観察の識別の感度に関与する可能性を示した。しかし、その実験では、運動間の差異の検出が可能になった段階でマウスを押すという知覚課題を用いている。そこで本研究は、マウスを押すという知覚課題

を用いるのではなく、検出した運動間の差異を実際に自己の動きとして出力することから運動観察の識別が行われた事を検証することを試みた。

その結果、図 4 と表 1 に示したように、全実験参加者において、通常投球条件では肘関節と手関節の伸展角速度の増加開始時の位相差が 10%以上存在するが、変化投球条件ではその正の位相差が消失するか有意に減少した。この変化投球条件における肘関節と手関節の位相関係は、大島・山田 (2010) の未熟練者の特徴と一致している。本研究における観察映像の遅延動作は、熟練者の動作を肘関節と手関節の位相差が減少するように操作することにより、段階的に未熟練者の動作に近づけたものである。つまり、基準動作と遅延動作における変化と通常投球条件と変化投球条件の変化が、位相差の減少という共通の法則性をもつことを示している。この結果から、大島・山田 (2010) の技術レベルが高い実験参加者において、実際に動きを出力するという運動制御の観点から基準動作と遅延動作の 2 つの運動の識別が行われていた事が確認された。

なお、本実験は観察した遅延動作をそのまま実行するのではなく、遅延動作観察時の違和感を強調した投球を実行するよう求めた。これは、以下の理由による。熟練者は投球動作においてほぼ同じ軌道でボールを投げることが出来ることが知られている (e.g, 村瀬・宮下 1973; Vorro 1973)。しかし、どんな熟練動作であっても完全に同一ではなくばらつきが存在する (Newell and Corcos, 1993)。本研究で用いた基準動作と遅延動作の差異は 1/120 から 4/120 sec という微細なものであった。これを本実験の指標である位相差で考えた場合、基準動作は 22.6%, 1/120 秒遅延動作は 19.2%, 本実験において最も位相差の少ない 4/120 秒遅延動作でさえ 15.3%である。そこで、もし観察した遅延動作をそのまま実行する場合、出力された運動の位相差が観察した運動間のこの微細な差異を反映した結果なのか運動のばらつきが原因で生じた

結果なのかの判断が困難ではないかと考えた。実際、本研究の実験参加者の通常投球における 3 試技のばらつきは平均 $2.9 \pm 1.4\%$ であった。以上の理由により、遅延動作観察時の違和感を強調した投球を実行するよう求めた。どの程度強調するかは明確な指示を与えなかったため、完全に正の位相差が消失するか位相差が減少するかという差は存在したものの、全実験参加者の位相差が有意に減少するという同様の傾向を確認した。

また、本研究においては各関節の伸展角速度の増加開始のタイミングを、角速度の増加率が最大値の 10% を越えた時点とした。このような基準にすることにより、図 4 で示したように伸展角速度の増加開始時において、通常投球は正の速度を示すが、変化投球では負の速度を示す場合が生じる。これは、通常投球ではフォワードスイング中であるが、変化投球ではバックスイング中であることを意味する。したがって、動きとしてはフォワードスイングとバックスイングを比較することになる。しかし、本研究では角度という形の位相差を比較するのではなく、角速度の立ち上がり、つまり動きの変化点の位相差を抽出することを行った。なお、各関節の伸展角速度の増加開始のタイミングを、「角速度の増加率が最大値の 10% を越えた時点、かつ角速度が正の値を示した時点」とした場合には、変化投球における負の位相差はさらに大きくなり、本研究の結果と矛盾しない。

ところで、運動観察において、運動間の微細な差異を検出する際に実験参加者が利用可能な視覚的手がかりは、外に現れた軌道や関節角度のような運動学パラメータのみである。しかしながら、視覚的にとらえられる運動学パラメータに差異を感じたとしても、その差異を自己の運動として表現出来るわけではない。つまり、本実験結果として示された位相差の操作には力やトルクの制御が必要となる。今回の実験参加者の本来の自己の投球動作は、通常投球条件で示されたように近位関節から遠位関節への順次可動という協調構造、すなわち、肘関節の伸展

角速度の増加開始の後に手関節の伸展角速度の増加が開始するという位相関係が存在する。それに対して、変化投球条件において、全実験参加者がその本来の自己の運動の協調構造を崩し、手関節の伸展角速度の増加開始の後に肘関節の伸展角速度の増加が開始するという位相関係を構築した。この結果から、実験参加者は本研究で用いた投球動作の本質である肘関節と手関節の関節角速度の位相差の違いを見出し、自己の運動制御においてその異なる位相関係を構築するトルク発揮パターンを生成したことが示唆された。

5. 結論

本実験は、大島・山田（2010）で報告された技術レベルの高い群が示した運動識別の感度の妥当性を再評価した。その結果、技術レベルの高い実験参加者は、形状的に微細な差である基準動作と遅延動作の観察から、両動作間における肘関節と手関節の伸展開始時の位相差の違いを見出し、自己運動においてその位相差を操作し、投球動作として表現することが出来た。この結果から、実際に動きを出力するという運動制御の観点から運動の識別が行われていた事が確認された。

文献

- Breslin, G., Hodges, N. J., Williams, A. M., Curran, W., and Kremer, J. (2005). Modelling relative motion to facilitate intra-limb coordination. *Hum. Movement Sci.*, 24: 446-63.
- Breslin, G., Hodges, N. J., Williams, A. M., Kremer, J., and Curran, W. (2006). A comparison of intra- and inter-limb relative motion information in modelling a novel motor skill. *Hum. Movement Sci.*, 25: 753-66.
- Buccino, G., Vogt, S., Ritzl, A., Fink, G. R., Zilles, K., Freund, H. J., and Rizzolatti, G. (2004). Neural circuits underlying imitation learning of hand actions: An event-related fMRI study. *Neuron*, 42: 323-334.
- Calvo-Merino, B., Glaser, D. E., Grezes, J., Passingham, R. E., and Haggard, P. (2005). Action observation and acquired motor skills: An fMRI study with expert dancers. *Cereb. Cortex*, 15: 1243-1249.
- Calvo-Merino, B., Grezes, J., Glaser, D. E., Passingham, R. E., and Haggard, P. (2006). Seeing or doing? Influence of visual and motor familiarity in action observation. *Curr. Biol.*, 16: 1905-1910.
- Cross, E. S., Hamilton, A. F. D., and Grafton, S. T. (2006). Building a motor simulation de novo: Observation of dance by dancers. *Neuroimage*, 31: 1257-1267.
- Cross, E. S., Kraemer, D. J. M., Hamilton, A. F. D., Kelley, W. M., and Grafton, S. T. (2009). Sensitivity of the action observation network to physical and observational learning. *Cereb. Cortex.*, 19: 315-326.
- Grafton, S. T., Arbib, M. A., Fadiga, L., and Rizzolatti, G. (1996). Localization of grasp

- representations in humans by positron emission tomography: 2. Observation compared with imagination. *Exp. Brain Res.*, 112: 103-111.
- Hirashima, M., Kudo, K., and Ohtsuki, T. (2003). Utilization and compensation of interaction torques during ball-throwing movements. *J. Neurophysiol.*, 89: 1784-1796.
- Horn, R. R., Scott, M. A., Williams, A. M., and Hodges, N. J. (2005). Visual search and coordination changes in response to video and point-light demonstrations without KR. *J. Mot. Behav.*, 37: 265-274.
- Iacoboni, M., Woods, R. P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J. C., and Rizzolatti, G. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science*, 286: 2526-2528.
- 村瀬豊・宮下充正 (1973) ボウリングのキネシオロジー. *体育の科学*, 23: 654-659.
- Newell, K. M., and Corcos, D. M. (1993). Variability and Motor Control. *Human Kinetics: Champaign*.
- 大島浩幸・山田憲政 (2010). 運動技術レベルと運動観察能力の関連. *スポーツ心理学研究*, 37(2): 65-74.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese V., and Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cogn. Brain Res.*, 3: 131-141.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Matelli, M., Bettinardi, V., Paulesu, E., Perani, D., and Fazio, F. (1996). Localization of grasp representations in humans by PET: 1. Observation versus execution. *Exp. Brain Res.*, 111: 246-252.
- Vorro, J. R. (1973) Stroboscopic study of motion changes that accompany modifications and

improvements in a throwing performance. Res. Q., 44: 216-26.

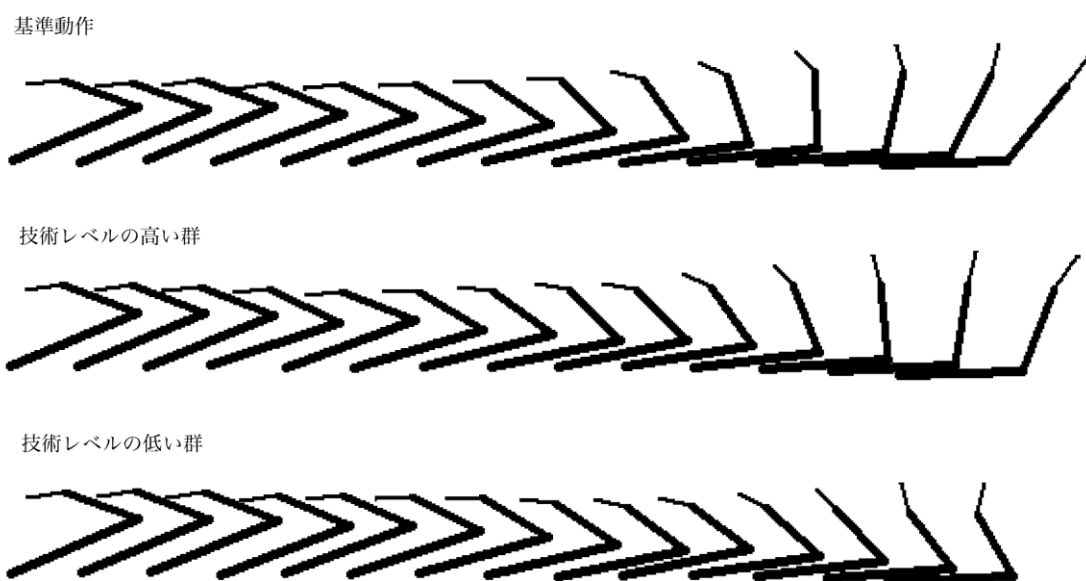


図 1 技術レベルの異なる 2 群の運動観察実験の結果に対応するスティックピクチャー。上段が基準動作，中段が技術レベルの高い群が基準動作と異なると判断した 3/120 秒遅延動作，下段が技術レベルの低い群が基準動作と異なると判断した 11/120 秒遅延動作を示す。基準動作と遅延動作の両動作はともに 44 コマ（約 1.44 秒）で構成されるが，これは基準動作のボールリリース時にあたる 14 コマ目までを描いたものである。

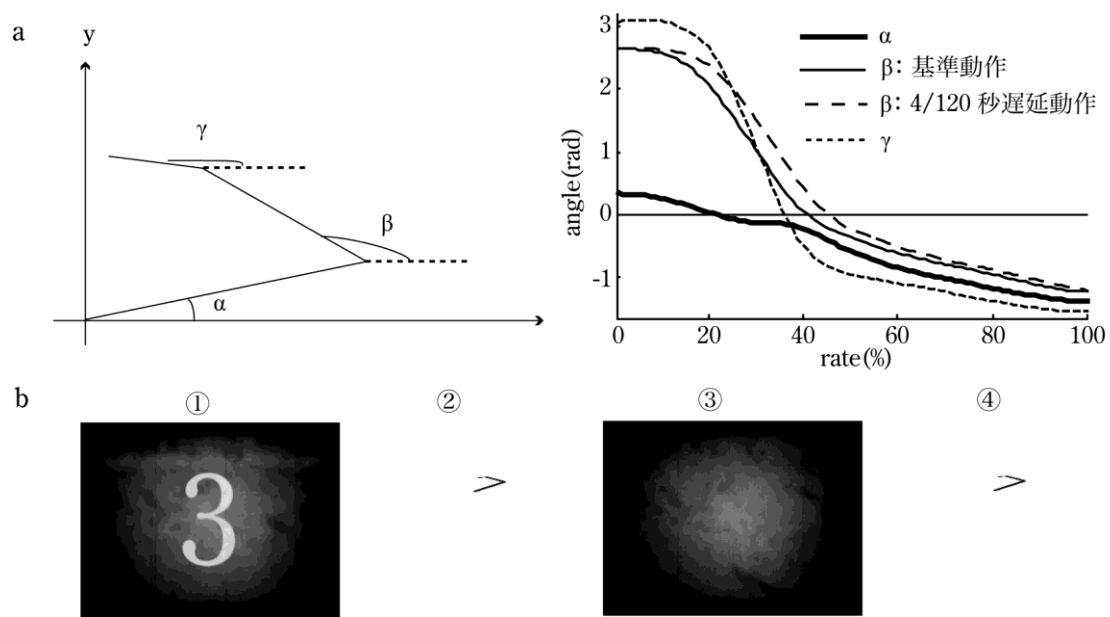


図 2 観察映像. **a** 投球動作の遅延操作方法. 左は各関節角度の定義を示し, α が肩の絶対角度, β が肘の絶対角度, γ が手首の絶対角度である. 右は作成したスティックピクチャーの各関節角度の時系列変化を表し, 太線が α , 実線が基準動作における β , 長破線が 4 コマの遅延操作を加えた β , 短破線が γ を示す. **b** 映像の構成は, ①3 秒間のカウントダウン, ②基準動作, ③1 秒間の画面の暗転, ④遅延動作である.

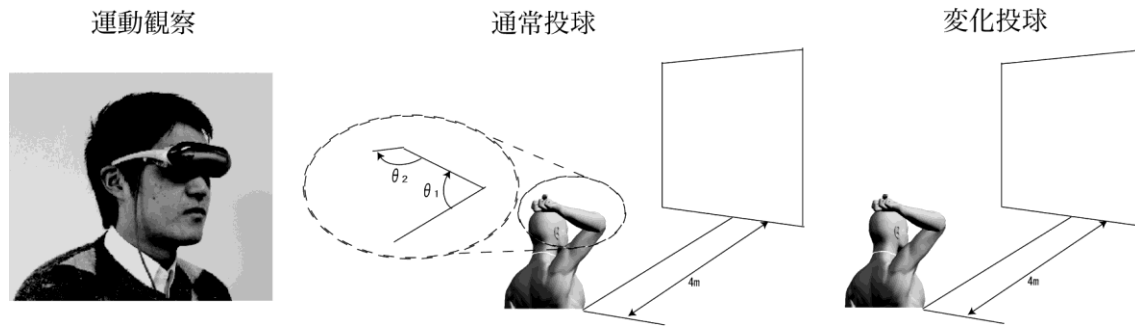


図3 実験手順. 実験参加者は、まず作成した観察映像を2度観察した. 次に、通常の投球動作で1度投球する（通常投球）. そして、違和感を反映した投球を1度実施する（以下、変化投球）. この2条件を1つのセットとし、3セットの本試行を行った. 投球動作における肘関節（ θ_1 ）と手関節（ θ_2 ）の相対角度は伸展方向を正とする.

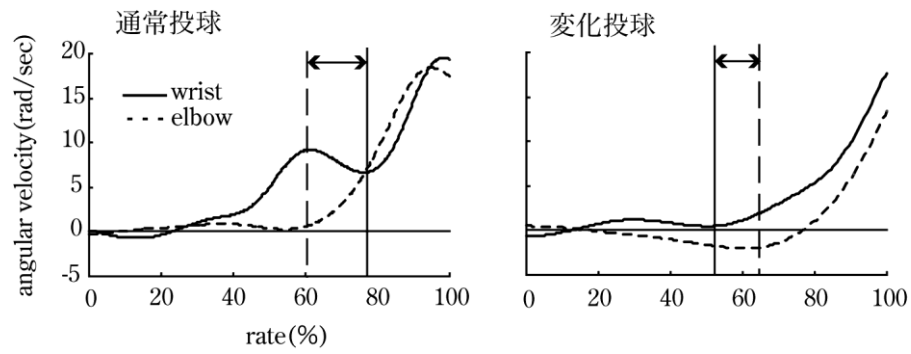


図 4 通常投球と変化投球における肘関節と手関節の伸展角速度の時系列データの典型例．実線は肘関節の角速度，破線は手関節の角速度であり，正方向が伸展を示す．実線の鉛直線が肘関節の角速度の増加開始時，破線の鉛直線が手関節の角速度の増加開始時を示し，関節間の伸展角速度の位相差は，手関節の伸展角速度の増加開始時点から肘関節の伸展角速度の増加開始時点を減じたものである．

表 1 各実験参加者の基準動作と異なると判断した遅延動作の遅延秒数と、全実験参加者の通常投球と変化投球における肘関節と手関節の伸展角速度の増加開始時の位相差 (%)

参加者番号	遅延秒数 (sec)	通常投球 (%)	変化投球 (%)	検定結果
1	4/120	12.1 ± 2.3	-25.1 ± 2.3	***
2	2/120	20.4 ± 2.1	-26.7 ± 7.9	***
3	1/120	14.6 ± 6.5	-20.5 ± 6.3	**
4	3/120	26.3 ± 2.6	4.7 ± 2.4	***
5	3/120	15.2 ± 1.7	1.2 ± 3.8	***
6	4/120	12.5 ± 1.9	-22.7 ± 2.9	***
7	3/120	16.9 ± 3.5	-12.0 ± 7.7	**
8	3/120	23.8 ± 2.7	5.9 ± 3.7	**
9	2/120	16.1 ± 3.7	3.5 ± 3.9	*
10	2/120	23.6 ± 2.3	7.9 ± 1.6	***

*: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001