

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12644

研究課題名(和文)巧みな投げを実現する「指先感覚」の制御原理の理解

研究課題名(英文)Sensory motor control with sense of finger-tip which realizes skillful throw

研究代表者

門田 浩二(Kadota, Koji)

大阪大学・医学系研究科・助教

研究者番号：50557220

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、2種類のボール質量、2種類の摩擦条件(指にテープを巻く)、3種類の投球速度の計12条件下で、ボールを的に向かって投げる際のボールに作用する力を実測するとともに、投球動作パターンとの関連性を調査した。低摩擦により滑りやすい状況では、通常と同じ握り方の場合には、ボール中心方向への力加減を変えずに、指の内外転方向の力を僅かに変えるだけで対応していた。また、また、ボールの重さや投球速度を変える際には、体幹部の回転速度と肘の伸展速度を変化することで対応していた。このように課題遂行上の変化を、関連する少数の項目で吸収し、全体の動きをあまり変えないように投動作は制御されていた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to make sure how to adjust the change of task requirements in ball throwing. Each participant threw two types of ball (same size, but different mass) in which two force sensors were equipped. They were also required to put two type of taping on the throwing fingers during throwing the ball at three ball velocities. The participants' motion were recording by using a 10-camera high-speed motion capture system during the throwing. When throwing the ball with the slippery taping, they did not change grip force to the direction of the center of ball. Instead, they slightly decrease their grip force to the medial direction. As ball velocity and the mass of ball increased, angular velocities of the pelvis rotation and the thorax rotation increased. Elbow extension angular velocity increased as well. To cope with the required task, throwing was controlled with minimum adjustments.

研究分野：スポーツ心理学

キーワード：スポーツ心理学 感覚 - 運動制御 投球

### 1. 研究開始当初の背景

投動作は人間の基本動作のひとつであり、今もなおスポーツ科学や運動学における主要な研究対象である。その先行研究を概観すると、運動学的な視点に基づいて身体の動作パターンを検討した報告や投球傷害に関連する報告が多く、投球の距離や速度の最大化あるいは傷害予防が主たる興味の対象となっている。他方、投動作のもう一つの重要な目的である「思ったところに思った速さで投げる」という、投げの制御側面に迫った研究は限られている。この傾向は神経科学や運動制御学等の隣接領域でも共通しており (Yarrow et al., 2009), 人間特有の巧みな投げを実現している神経系の仕組みには未解明の点が多く残されている。

望み通りの投げを実現するには、投擲物の速度や回転の精緻な制御が要求される。これらの変数は最終的にリリース時に投擲物に作用する力のパターンによって決まるため (Hore et al., 2001), この力が投動作の直接的な制御目標になる。一般的な運動の制御と同様に、高次中枢からのトップダウン型の運動指令と感覚受容器と脊髄が形成する末梢の神経ネットワークによるボトムアップ型の運動指令の相互作用によって、この力が制御されていることはほぼ確実であるが (Gomi, 2008), 両者の相互作用の様相はほとんど知られていない。

投動作の実現には脚から体幹、腕へと連動する全身の動きと手指の動きを協調させつつ、投擲物への作用力を精緻に制御することが要求される。これはタッピングや把持動作といった手指のみの動作や道具使用とは大きく異なる制御であり、投動作特有の制御方略が存在していることが予想される。つまり、投動作の制御原理を知ることが、人間の感覚から運動に至る情報処理の新たな側面の理解に繋がるとともに、その特性に基づく技術水準の評価指標や、新たなトレーニング法の開発に繋がることが期待できる。

### 2. 研究の目的

人間は、ある程度の環境の変化に対応して安定してものを投げることができる。このことは、投動作の制御において、環境の変化に適応して動きを修正する仕組みが内在することを意味する。特に、指先感覚と呼ばれる指先が投擲物に与える力の制御は、投げ技術の鍵であるが、その仕組みは不明である。本研究では、課題要請の変化 (投球速度、ボール重量、指とボールの摩擦力) に伴う力発揮の様相を整理し、人間の「投げ」を実現している制御原理を解明するための基礎的知見を得ることを目的とした。具体的には、投動作中に指からボールに作用する力を計測するとともに、投球の動作分析を行うことによって、課題要請の違いが力発揮や動作パターンに与える影響を調査し、投動作を実現している感覚運動制御の特性を理解する。

### 3. 研究の方法

#### (1) センサーボール

サインボール (2Z0-120, ミズノ) とピッチングトレーニング用のボール (TR-25, ダイトベースボール) に、小型 3 軸力覚センサー (S06-H5-500N, テック技販社製) を 2 つずつ埋め込んで、投球時にボールに加わる力を計測できるセンサーボールを製作した (Fig.1A)。センサーの X 軸方向は、ボールを持った際の指の長軸内側方向が正、Y 軸方向は長軸と平行方向で正は指の近位方向、Z 軸はボールの中心に向かう方向である。

また、ボールには、バッテリーと Bluetooth も埋め込んであり、無線でデータが取得可能である。ボールの質量は前者が 154g で、後者が 228g であった。

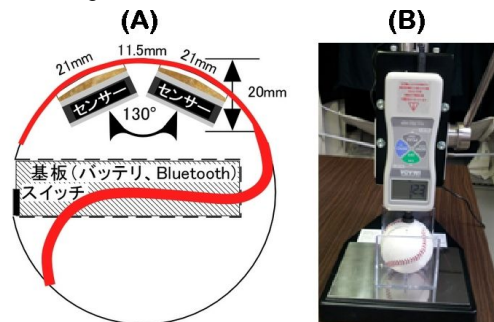


Fig.1 センサーボールの模式図(A)と校正法(B)

ボール製作上、ボールの法線方向に対して正確に垂直になるように力覚センサーを取り付けることは困難なため、ボール製作後、圧力センサーをボールの上から法線方向に当てることによって校正値を算出した (Fig. 1B)。

#### (2) 研究対象

研究参加者は、野球経験 4 年以上の男子大学生 11 名であった。うち、1 名は次の日の試合への疲労蓄積を避けるために、途中で実験を中止し、1 名は途中でセンサーボールの不具合により、データが得られなくなった。残り 9 名の身長、体重、年齢、野球歴の平均値 ± 標準値は以下の通りである：身長 1.76 ± 0.09m, 体重 65.4 ± 5.01kg, 年齢 19.2 ± 0.4 歳, 野球歴 8.1 ± 2.5 年。

#### (3) 実験手順

研究実施者は、研究参加者に対し、口頭および文書にて実験内容の説明を行い、署名を行った内諾書を得た後、Plug-in-Gait Marker Placement (VICON, 2002) に準じて、体表 46 箇所 (頭部 3 箇所、上下肢それぞれ 8 箇所、体幹 11 箇所) に直径 14mm の反射マーカーを貼付した。また、ボールリリース時刻を同定するために、投球腕の示指指先に 1 箇所とボールに 2 箇所、直径 6mm の反射マーカーを貼付した。

研究参加者は最初に投球するボールを使って、最少把持力テストを実施した。最小把持力テストは、投球時のようにセンサーボールを握り、基本的立位姿勢をとって、ゆっく

りと指の力を抜きながら、ボールを床に落とすテストで、ボールが落下する直前にボールに働く力を計測するものである。

その後、満足できるまで準備運動を行った後、154gのボールで最大努力の投球ができるまで投球練習を行い、さらに230gのボールでも最大努力で投球できるように投球練習を行った。

投球テストに関しては、2種類のボール質量条件(154g, 228g)と2種類の摩擦条件(第1~4指に、比較的摩擦力の大きいキネシオテープ(NKH-25, ニトムズ)を巻く条件と比較的摩擦力の小さいテフロンテープ(PTFE5490, スリーエム・ジャパン)を巻く条件)のそれぞれの条件について、最大努力での投球5球、で計測した投球速度の80%の速度を目指した投球を5球、同85%を目指した投球を5球、同90%を目指した投球を5球行った。

投球は、実験室内のフロアカーペット上で、投手板を模した投球線から4m前方の的を目指して行い、その時の投球速度をスピードガン(SRA3000, Sports Radar)で計測し、逐次、実験参加者にフィードバックした。

また、投球時の投球動作は10台の高速度カメラを備えたモーション・キャプチャー・システム(360Hz, OptiTrack)で反射マーカーの3次元座標値を計測した。

#### (4) 測定項目

力に関する変数として、第二指および第三指のX, Y, Z軸のそれぞれのピーク値を求めた。

投球動作に関する変数として、踏み出した足が着地する時点での上下肢及び体幹のkinematicsを11変数、着地時点からボールリリースまでに生じるkinematics7変数とボールリリースからボールリリース直後までに生じるkinematics9変数の計27変数と時間に関わる変数5変数を算出した。

#### (5) 統計

算出した測定項目に対して、3要因(ボール質量(2水準)×テープ(2水準)×速度(3水準))の分散分析を行った。すべての交互作用をモデルに加えた。速度要因に主効果が認められた場合には、Bonferroniの多重比較を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 速度の投げ分け

本研究では、実験時に計測した最大速度の80%, 85%, 90%の速度を提示し、それにできるだけ近づくように投球した。分析を進めるに当たり、まず、この投げ分けが上手くできたかどうかを確認した。

Table 1は要因ごとの投球速度を示しており、指定した投球速度の増加にともない、実際の投球速度も増加していることが確認できた。

また、ボールの質量が大きくなることによっても、投球速度は有意に小さくなった。

Table 1. 各要因・水準での投球速度 (m/s)

Tape	Mass**	Vel**	Mean	±	SD
Kinesio	154	80%	21.5	±	2.5
		85%	23.1	±	2.9
		90%	24.2	±	2.8
	228	80%	18.9	±	1.7
		85%	20.4	±	2.2
		90%	21.7	±	2.4
Teflon	154	80%	21.9	±	2.8
		85%	23.2	±	2.8
		90%	24.3	±	2.9
	228	80%	19.3	±	2.6
		85%	20.2	±	2.2
		90%	21.5	±	2.4

\*\*...p<0.01

#### (2) 投球時の力発揮パターン

典型的な力発揮の例をFig.1に示した。これは、ある研究参加者の154gボール・低摩擦テープ(テフロン)・最大速度の80%の速度条件時の第二指および第三指のX, Y, Z軸の値を時系列で示したものである。横軸の0はボールリリースを示す。

Z軸方向(法線方向)の力はボール保持のために比較的早い時間から3~10N程度の力を発揮していた。この研究参加者の場合には、第二指の方が第三指よりも早い段階で力発揮を増加させていたが、これに点に関しては、個人差が見られた。

ボールリリースの120ms前から急激な力の増加が観察された。この直後に、踏み出し足が着地し、続いて腰部や胸部の回転がピークを迎える。

Z軸方向の力のピークを迎える時刻は、投球動作では肩関節が最大外旋を迎える直前であり、大きな加速度が生じている場面であることから、ボールが抜け出さないよう、大きな力が要求されているものと考えられる。

Y軸方向の力は、Z軸方向の力よりも遅れてピークを迎え、力の大きさはZ軸方向の力の1/5~1/3程度であった。

X軸方向の力は、他の2軸と異なり、正負の符号に個人差があった。また同一個人内でも条件によって、異なる場合が見受けられた。

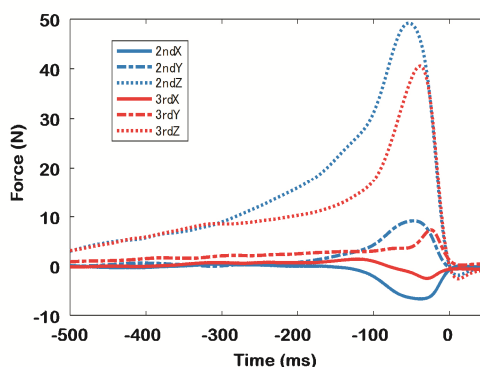


Fig.1 典型的な力発揮の例. 2ndは第二指を、3rdは第三指を表す。

(3) 三要因の力発揮への影響

上述したように、X軸のピークに関しては、個人内、個人間で正負の符号が異なる場合があり、統計解析には不相当であると判断し、除外した。Table 1~4 に Y 軸及び Z 軸のピーク値の平均値および標準偏差、ならびに主効果の有無を示した。

Table 2. 第二指の Y 軸方向の力 (N)

Tape**	Mass**	Vel	Mean	±	SD	
Kinesio	154	80%	5.6	±	2.8	
		85%	5.4	±	3.7	
		90%	6.9	±	3.2	
	228	80%	9.7	±	3.8	
		85%	10.6	±	3.6	
		90%	11.5	±	4.7	
	Teflon	154	80%	4.1	±	2.4
			85%	4.3	±	3.1
			90%	5.0	±	2.9
228		80%	6.7	±	2.8	
		85%	5.9	±	3.5	
		90%	7.8	±	4.0	

\*\*...p<0.01

Table 3. 第三指の Y 軸方向の力 (N)

Tape**	Mass	Vel	Mean	±	SD	
Kinesio	154	80%	6.8	±	2.9	
		85%	6.5	±	3.2	
		90%	7.8	±	1.8	
	228	80%	7.8	±	3.1	
		85%	8.4	±	3.4	
		90%	8.6	±	3.9	
	Teflon	154	80%	5.0	±	1.9
			85%	6.1	±	2.9
			90%	6.0	±	3.3
228		80%	4.9	±	2.9	
		85%	4.9	±	2.6	
		90%	6.0	±	2.3	

\*\*...p<0.01

両指の Y 軸・Z 軸方向のいずれの力に関しても、交互作用は認められなかった。

第二指の Y 軸方向に関しては、摩擦要因およびボール質量要因に 1%水準で有意な主効果が認められた (Table 2)

第三指の Y 軸方向の力においては、ボール質量にのみ、1%水準で有意な主効果が認められた (Table 3)。

Z 軸方向に関しては、第二指では、ボール質量に主効果が認められたが、第三指に関しては、どの要因にも主効果は認められなかった (Table 4, 5)。

摩擦要因は、第二指および第三指ともに Y 軸方向に効果が現われ、摩擦が低いほど Y 軸方向の力を加えていないという結果となっ

た。これは、球形の物体に対して、大きな剪断力を働かせると、ズレが生じ、ボールが滑り出して、正しく把持あるいは投球できなくなることへの対応と考えられた。

一方で、滑りやすいボールをしっかりと把持しておくために、Z 軸方向に大きな力を発揮することが予想されたが、本研究の結果はそれを支持しなかった。

Table 4. 第二指の Z 軸方向の力 (N)

Tape	Mass**	Vel	Mean	±	SD	
Kinesio	154	80%	28.7	±	13.0	
		85%	31.1	±	16.9	
		90%	33.7	±	14.3	
	228	80%	36.6	±	9.6	
		85%	37.2	±	9.0	
		90%	39.3	±	9.9	
	Teflon	154	80%	27.4	±	10.4
			85%	29.7	±	10.1
			90%	31.6	±	13.2
228		80%	35.2	±	10.1	
		85%	34.4	±	9.1	
		90%	36.8	±	9.8	

\*\*...p<0.01

Table 5. 第三指の Z 軸方向の力 (N)

Tape	Mass	Vel	Mean	±	SD	
Kinesio	154	80%	24.5	±	9.8	
		85%	26.4	±	11.6	
		90%	27.2	±	12.6	
	228	80%	29.6	±	12.3	
		85%	30.2	±	13.9	
		90%	34.1	±	15.5	
	Teflon	154	80%	25.7	±	13.5
			85%	30.8	±	15.1
			90%	31.1	±	14.2
228		80%	29.4	±	12.5	
		85%	32.5	±	15.4	
		90%	36.0	±	15.9	

\*\*...p<0.01

(4) 三要因の投球動作への影響

本研究で取り上げた kinematics 変数のうち、動作速度に関わる変数において、影響が観察された。

腰部回転最大角速度では、速度要因に主効果が見られ、胸部回転最大角速度では速度要因及びボール質量要因の 2 つ主効果が認められた。

また、肘関節伸展最大角速度においても、速度要因とボール質量要因の 2 つに主効果が認められた。

摩擦要因に関しては、どの項目に関しても主効果は認められなかった。

以上のように、本研究においては、投球速度を増加させるために、体幹の回転速度を上げるとともに、肘の伸展速度を上げる戦略を採用していた。ボール質量要因の主効果が腰部や胸部の回転速度に現われたのは、前述したように、ボールの質量が大きくなることによって、投球速度が小さくなったため、投球速度を介した間接的なものであると思われる。

ボールへの力発揮と動作パターンの両者を合わせて考えると、摩擦の異なるボールを投球する場合、法線方向に加える力をほとんど変えず、僅かに指の内外転方向の力を変えるだけで対応していることが明らかとなった。これによって、投球動作全体の動きを変えることなく課題遂行を可能としていた。

また、投球速度を最大速度の80%から90%に上げる際にも、動作の時間パターンを大きく変えることはなく、最終局面の体幹の動きや肘の伸展速度を上げることのみで対応しており、肩関節最大外旋位付近でピークを迎える、ボールへの力発揮に影響は及んでいなかった。

以上のように、課題遂行上の変化を何らかの方法で吸収しながら、つまり、滑り具合の調整には指先の力加減だけで、そしてボールの重さやボール速度の調整には、体幹部などの回転の加減だけで調整し、全体的には極めて類似した動作パターンになるように投球を制御していることが明らかとなった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 件)

〔学会発表〕(計 件)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：

番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

門田 浩二 (Kadota Koji)  
大阪大学・大学院医学系研究科・助教  
研究者番号：50557220

##### (2) 研究分担者

山際 伸一 (Yamagiwa Shinichi)  
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授  
研究者番号：10574725

松尾 知之 (Matsuo Tomoyuki)  
大阪大学・大学院医学系研究科・准教授  
研究者番号：00209503

木下 博 (Kinoshita Hiroshi)  
大阪大学・大学院医学系研究科・名誉教授  
研究者番号：60161535

那須 大毅 (Nasu Daiki)  
立命館大学・共通教育推進機構・嘱託講師  
研究者番号：20758411

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

##### (4) 研究協力者

( )