

ヒト身体がもつ冗長自由度は  
目標指向性運動の学習を難しくしているのか？  
：効果的な運動学習方法論の確立を見据えて

筑波大学 佐渡夏紀

**Does The Redundancy in Human Body Make Learning Goal-Directed Motor  
Tasks More Difficult?  
: Insights into Establishing an Effective Motor Learning Program**

by

Natsuki Sado  
*Faculty of Health and Sport Sciences,  
University of Tsukuba*

ABSTRACT

The redundancy in human body is believed to make motor control more complex. However, given the inherent noise in the human control system, the redundancy may allow strategies to reduce the effects of noise during a several goal-directed motor task, making motor execution rather easy. Here I show a case in which experimental reduction of degrees of freedom delays motor learning compared to the normal condition in a non-dominant arm dart throwing task. A total of 21 adult male and female participants were randomly allocated to a shoulder-joint restrained group and a control group and asked to perform 20 throws x 10 sets of a non-dominant arm dart task. The dart landing point and upper-limb kinematics were measured using a 3D motion-capture system. The shortening of the distance between the landing point and target in the control group reached a plateau at approximately the third set, whereas this shortening was delayed in the restrained group: at the third set, the distance between the landing point and target was significantly longer in the restrained group ( $0.135 \pm 0.026$

m) than in the control group ( $0.099 \pm 0.018$  m). These results suggest that practice methods in which each motor segmented structure (i.e., part-method of learning) is mastered separately can rather delay the learning of goal-directed motor tasks.

#### キーワード

運動制御, ダーツ, 協調, UCM 仮説, 分習法

#### Keyword

Motor control, Darts, Coordination, UCM hypothesis, Part-method of learning

### 要 旨

ヒト身体の冗長自由度は運動制御を複雑にすると考えられている。しかし、ヒト制御系に内在するノイズを考慮すると、冗長自由度はノイズの影響を軽減させる方略を可能とし、運動遂行をむしろ簡単に行っているかもしれない。本研究では、ダーツ課題を用いて、実験的な自由度の削減が通常の状態と比べて運動学習が遅延するという事例を示す。成人男女計21名を、肩関節を拘束する拘束群と対照群に無作為に割り付け、非利き腕ダーツ課題を20投×10セット行わせた。三次元動作計測装置を用いてダーツの到達点と上肢の運動学を測定した。対照群ではおよそ3セット目で到達点-目標間距離の短縮がプラトーとなったが拘束群ではこの短縮が遅延した。3セット目では拘束群( $0.135 \pm 0.026$  m)で対照群よりも有意に到達点-目標間距離が長かった( $0.099 \pm 0.018$  m)。この結果は、運動構造を部分的に取り出すような分習法のような練習法は、むしろ目標指向型運動の学習を阻害してしまう可能性を示唆している。

### 緒 言

ヒトの身体は200以上の骨を600以上の筋で制御している多自由度系である。目の前のコップに向かって手を伸ばすような単純な動作であっても、達成するための手先の軌道・関節角度の組み

合わせ・筋活動の組み合わせが無数に存在する。組み合わせが無数に存在することは、その構成要素のいずれかに機能障害が生じても運動遂行を可能にするという点で、運動遂行可能性の頑健性という利点をもたらしている。しかし、一意に定まらず無数に存在する組み合わせの中からある一つを決定しなくてはならないという状況は、計算論上、制御を複雑に行っているといえる。先に例示したようなリーチング課題において、各関節運動は試行間でばらつくのに対し、手先の軌道はほぼ同じ軌道を描くことが観察されている<sup>1)</sup>。この観察を基にBerunstein<sup>1)</sup>は、ヒトは複数の要素を協調させることで自由度を削減し、冗長性による複雑さを解決していると推察した。つまり、制御を考える上では、身体が持つ冗長自由度は運動課題の遂行を難しくする要因と捉えられている。身体の冗長自由度による運動遂行の複雑さは感覚的にも広く認識されている。例えば、運動の要素(例えば走動作における接地や腿上げ)を取り出すことで運動を簡略化して学習を促進する「分習法」が運動学習の実践場面でしばしば用いられ、保健体育の教科書にも取り上げられている。

ヒト身体には中枢神経系の運動指令から筋活動に至るまでに取り除くことのできないノイズが内在する<sup>2)</sup>。この制御系のノイズによってヒトはいかに簡単な動作であっても完全に同じ動作を再現することができない。このことは特にリーチング

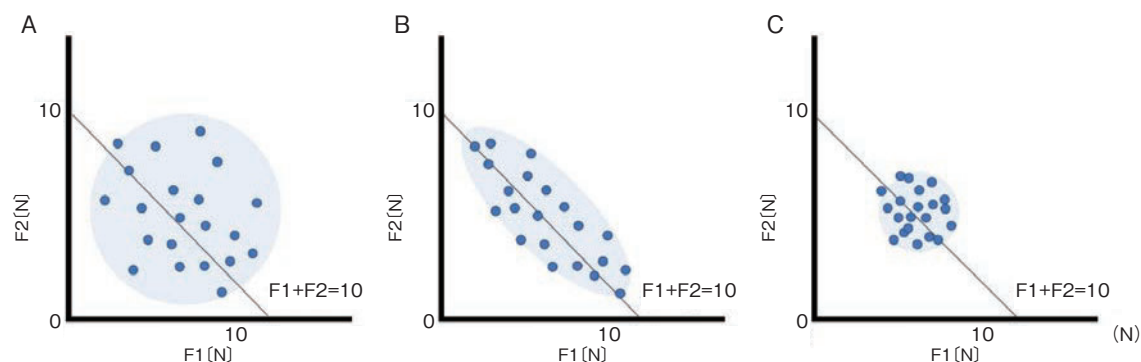


図1 UCM仮説の概念図

ここでは両手の(左手:F1 右手:F2)合計で10 Nバネを押すという試技を例にしている。Aは学習前、Bは協調によってパフォーマンスが改善した分散、Cはバラつきの縮小によってパフォーマンスが改善した分散をそれぞれ示している。「UCM仮説」では、Bのように「結果に関係するばらつき」(F1+F2=10の直線に直交する方向)のみを制御し「結果に関係のないばらつき」(直線に平行な方向)のばらつきを制御しないという協調方略によって合計値を10 Nに近づけると考えられている。

やダーツ投げのような目標指向型の運動課題を再現よく正確に行う上で問題となりうる。ヒト運動制御の協調方略として「Un-Controlled Manifold (UCM) 仮説」が提唱されている<sup>3)</sup>。この仮説では、ヒトの制御系があらゆる全ての運動要素を個別に制御しようとしているのではなく、運動課題の達成に関わる方向へばらつかないように要素間を共分散させ、逆に要素間の関係から課題の結果に影響を及ぼさないばらつきは制御しないというものである<sup>4,7)</sup>(図1にその概略を示した一例を載せる)。このようなUCM仮説を基に、自由度が高い状況下では要素間の協調というノイズの影響を軽減して運動の正確性を高める方略が可能にできると考えることもできる。換言すると、運動課題の達成を“難しく”していると捉えられる冗長自由度を、むしろヒトは利用して正確性の高い運動遂行を“簡単”にしているとも捉えることができる。これまで、様々な目標指向型課題において、運動要素間の協調や上達に伴う協調度合いの高まりが確かめられ<sup>12-14)</sup>、冗長性が運動課題を達成する組み合わせの多様性を生み出し、ヒトはその冗長性を「利用して」課題を達成していると推察はされてきた<sup>12-14)</sup>。しかし、自由度が低減すると運動の学習・制御に実態としてどのような影響を与えるかは直接検証されておらず、目標指向型

課題における冗長性の利用については推察の域を出ない。

本研究では、ダーツ未経験者を対象とした非利き腕ダーツ課題を用いて、実験的な自由度の削減が初期の運動学習に及ぼす影響を検討することを目的とした。実験に先立ち、冗長自由度が削減された条件では学習が遅延することを仮説とした。

## 1. 方法

### 1.1 実験デザイン

関節の拘束による運動自由度の削減が運動学習に及ぼす影響を検討することを目的に、関節の拘束により運動自由度が削減された状態で実験試技を行う「関節拘束群」と肩関節が拘束されていない状態で実験試技を行う「対照群」に研究対象者を無作為に割り付け、非利き腕ダーツ課題を行わせるランダム化比較試験を行った。

実験に先立ち、片側の対応のないt検定を対象に検定力分析 ( $\alpha = 0.05, 1 - \beta = 0.80$ ) を行い、各群10名の計20名が必要であることを確認した。この検定力分析の結果を基に、研究対象者はダーツ投げ経験のない健康な筑波大学に所属する学生男女21名とした。研究対象者を、肩関節を拘束される関節拘束群11名(男性5名、女性6名、 $22.4 \pm 4.4$ 歳)と、肩関節を拘束しない条件

で同課題を行う対照群10名(男性5名, 女性5名, 22.5 ± 4.0歳)に無作為に割り付けた。各研究対象者には事前に実験の目的及び試技内容の説明を行い, 書面にて協力の同意を得たうえで実験を行った。本研究は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得て行われた(体021-86)。

## 1. 2 実験手順

本研究のダーツ課題にはハードダーツ(Chandeny製, 中国)が使用された。ダーツのシャトル側の末端には直径10 mmの反射マーカを, 針先から0.03 mの位置には反射マーカで用いられる再帰反射シールをそれぞれ貼付した。ダーツ競技で使用される標的は情報を多く含むため, 研究対象者が得られる視覚的なフィードバックが的とダーツ着弾位置のみとなるよう, ダーツ投げの標的には0.75 m × 0.50 mのコルクボードを用いた。コルクボードには4隅及び左辺上に計5点の半球型の反射マーカを貼付し, 目標点となるよう対角線の交点にバツ印をつけた。

実験に先立ち, 研究対象者には実験用ウェアの着用させた。直径14 mmの反射マーカを肩甲骨と上肢の解剖学的特徴点に貼付した(図2A)。また, 上腕と前腕には4つの反射マーカが固定されたプラスチックのクラスターマーカを貼付

した(図2A)。

解剖学的肢位のデータを取得し, その後手関節の内側と肘関節の内側側に貼付したマーカを除去した。マーカの除去後, 肘関節及び肩関節中心を算出するための機能的動作を行わせた。肘関節の機能的動作は肘関節90度程度の屈曲・伸展を5回繰り返してであった。肩関節の機能的動作は1. 水平外転0度から90度の方に30度程度の肩関節屈曲・外転動作, 2. 肩関節屈曲30度から外転30度までの水平外転および逆回転, であった。この動作は, 股関節中心推定のガイドラインで提案されているStar-Arc動作<sup>8)</sup>を肩関節用に改変したものであった。以上の事前測定後, 関節拘束群には肩関節内外転の拘束が行える添え木を, 対照群には拘束群が装着した装具と同程度の質量である木片をそれぞれ上腕と体幹に装着した(図2B)。関節拘束群では, 拘束具により肩関節の運動ができないことを, 対照群では木片を装着した後も肩関節の運動が可能であることを確認した。添え木及び木片はいずれもベルトで巻いて固定した後にずれないようにテープで補強した。

実験試技は, 非利き腕によるダーツ投げ課題20投 × 10セットの計200投とした。全ての研究対象者は右利きだったため, 左腕で実験試技を行った。各セット間には1分間の休憩を設け, 装具の固定

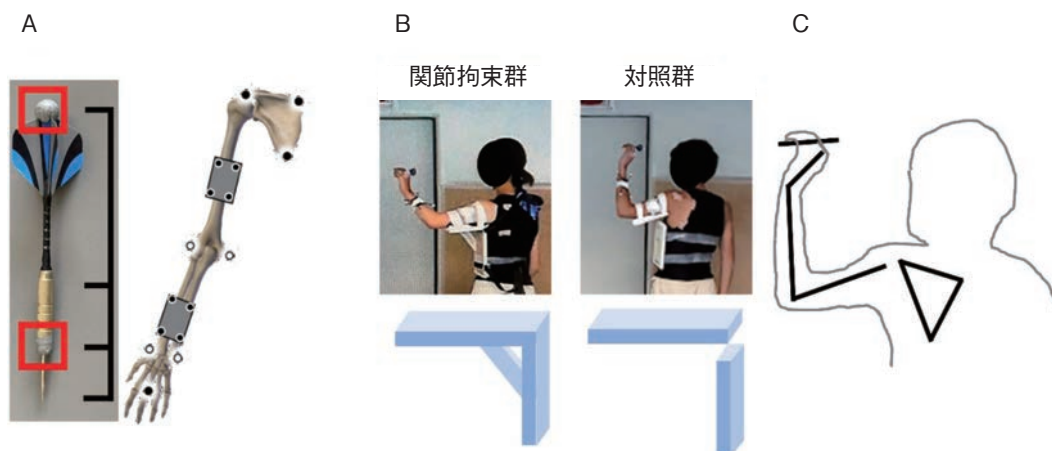


図2 実験設定

A: マーカセット, B: 肩関節の拘束方法, C: 使用した4セグメント(肩甲骨, 上腕, 前腕, 手) + ダーツのモデル

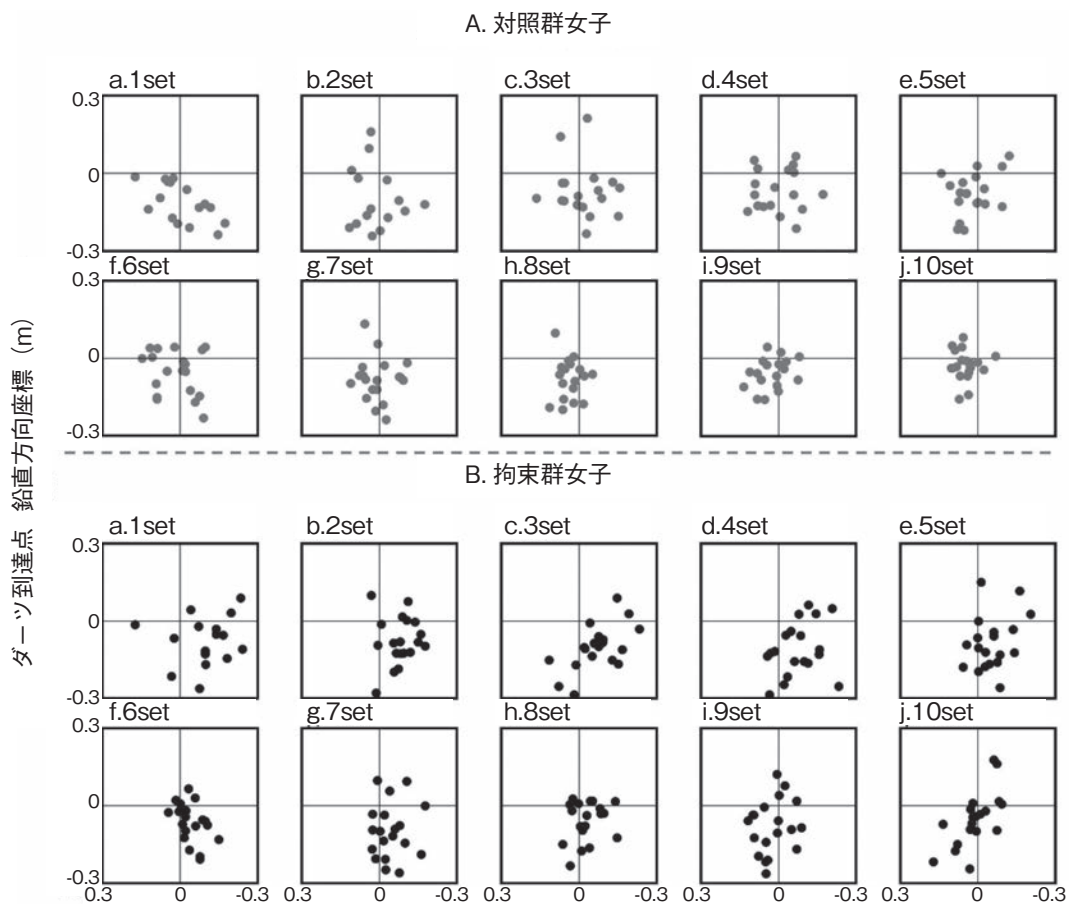


図3 ボード上のダーツ到達点の典型例  
Aは対照群女子の、Bは拘束群女子の一例を示している。原点はダーツの標的点として示している。

によって傷害や不快感が発生していないかを確認しながら実験を進行した。

世界ダーツ連盟 (World Darts Federation) の公式ルールに則り、高さ 1.73 m・距離 2.43 m を目標点と設定し、コルクボードの対角線の交点はその位置になるよう丁寧に設置した。標的の高さに対する研究対象者の身長の違いによる影響を考慮し、0.10 m の踏み台を用いて 0.10 m 単位で調整を行った。

赤外線カメラ 6 台を有する光学式 3 次元自動動作計測装置 (Motion Analysis Corp. Santa Rosa, CA, USA) により研究対象者・ダーツ・コルクボードに貼付した反射マーカ 3 次元座標値をサンパ

リング周波数 200 Hz で収集した。標的の鉛直下方向の地面上の点を原点とし、投射方向を向いた際の右方向を x 軸正方向、投射方向を y 軸正方向、鉛直上方向を z 軸正方向とする右手系の座標系を絶対座標系と定義した。

### 1. 3 データ分析

得られた座標値データは残差分析<sup>9,10)</sup>により遮断周波数を決定し、2次の Butterworth low-pass digital filter を双方向からかけることで位相ずれの無いように平滑化した。実際に使用された遮断周波数は、研究対象者の上肢のマーカが 13-19 Hz、ダーツのマーカが 13-16 Hz であった。本

研究では左肩甲帯, 左上腕, 左前腕, 左手部から構成された4セグメントモデルを使用した(図2C)。手関節中心は関節の内外に貼付した2個のマーカの midpoint 定義とした。肘関節中心は, 肘関節屈伸課題中の, 上腕に対する前腕のクラスターマーカ4点に共通する幾何学的回転軸を求め, 上腕骨内・外側上顆の位置を回転軸に投影しその midpoint と定義した<sup>11)</sup>。肩関節中心は, 肩関節の機能的運動課題中の, 肩甲帯における上腕のクラスターマーカ4点に共通する幾何学的な回転中心を求めることで定義した<sup>11)</sup>。

ダーツの持ち手の座標はダーツ針先側の反射マーカから0.035 m シャトル側後部の反射マーカ方向へ向かった点としてそれぞれ定義した。ダーツの針先の座標は, シャトル側後部の反射マーカから針側の反射シールまでの線分を0.03 m 延長した所にある点と定義した。ダーツ離手瞬間は, ダーツの持ち手と第三中手骨の距離が3 SD 以上離れた瞬間として定義した。針先の座標がコルクボード平面を通過した瞬間の3フレーム前から3フレーム後までの計7フレームの針先の座標で3次スプライン内挿を行い, コルクボード

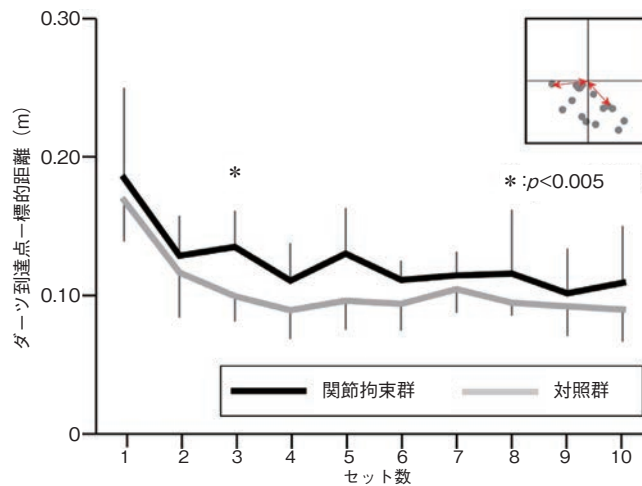


図4 ダーツ到達点—目標座標のセット内平均  
アスタリスクは有意差を表している (Bonferroniの不等式を用いて, 有意水準の補正を行っている)

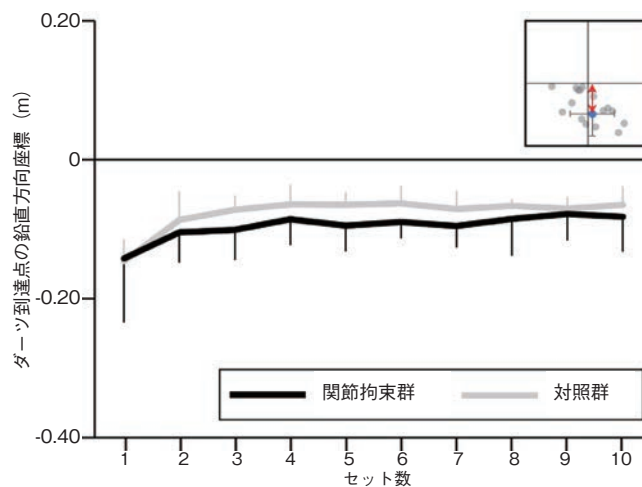


図5 ダーツ標的点を原点としたダーツ到達点の鉛直座標の各セットの平均値



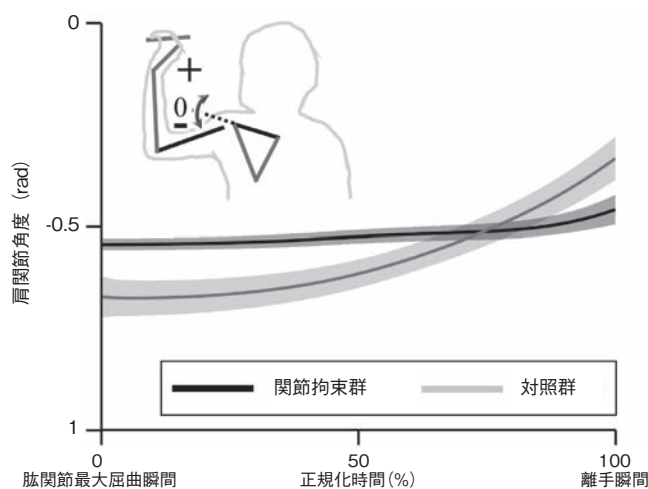


図6 肩(肩甲上腕)関節角度の時系列変化の例

関節拘束群と対照群それぞれ1名ずつの10セット目20投のアンサンブル平均を示している。時間は肘関節最大屈曲瞬間から離手瞬間までを100%として正規化している。肩甲骨上角から肩峰に向かうベクトルと肩関節中心から肘関節中心に向かうベクトルが同じ方向を向いている肢位(上腕が水平に近い肢位)を0度とし、正が外転、負が内転として示している。

平面上の点を着弾位置と定義した。コルクボード4点の位置座標からコルクボードの対角線の交点(つまり目標点)を原点とする右手系の座標系を定義し、着弾位置はこの座標系で示した。肩関節角度を、肩峰角(AI)から肩甲骨上部角(TS)に向かうベクトルと肘関節中心から肩関節中心に向かうベクトルの角度として算出した。

#### 1. 4 統計処理

本研究では、各種の変数について1セット20投の平均値を各研究対象者の各セットの代表値として統計処理に用いた。ダーツの飛行中の姿勢により針先側の反射シールの位置が計測できなかった試技は除外した。Shapiro-Wilk testを用いて正規性を確認した後、正規性の有無に応じて対応のないt-testとWilcoxon signed-rank testのいずれかを用いてダーツ到達点から標的間の距離の群間差を検定した。危険率はBonferroniの不等式を用いて補正し、検定全体の有意水準は5%とした。

#### 2. 結果

関節拘束群も対照群もセットが進むにつれて

ダーツ到達点一標的間距離が短縮された(図3, 4)。距離の短縮は、関節拘束群ではおおよそ6セット目、対照群ではおおよそ3セット目でそれぞれプラトーとなることが観察された(図4)。3セット目において関節拘束群( $0.135 \pm 0.026$  m)のダーツ到達点一標的間距離は対照群( $0.099 \pm 0.018$  m)より有意に長かった( $p=0.04$ , 図4)。全てのセットで、標的を原点としたダーツ到達点の鉛直座標は関節拘束群と対照群の間に有意差は認められなかった( $p>0.14$ , 図5)。

対照群では離手に向かって肩関節が約0.2 rad(約11°)外転したのに対し、関節拘束群の肩関節はほとんど動いていないことが確認された(図6)。

#### 3. 考察

非利き腕ダーツ投げ課題において、対照群ではおおよそ3セット目で到達点-目標間距離の短縮がプラトーとなったが、拘束群ではこの短縮が遅延することが観察された。3セット目では拘束群で対照群よりも有意に到達点-目標間距離が長かった。これらの結果は、非利き腕ダーツ投げ課題で

は冗長自由度の実験的な削減が運動学習を遅らせたことを示している。

ダーツ試技中の肩関節角度の変化は関節拘束群で小さく、関節拘束が適切に行われたことを確認した。また、ダーツ到達点の鉛直座標に差はみられなかった。従って、本研究で得られた拘束群と対照群の差は、肩関節の自由度削減によってダーツ速度が不足したことによるものではなく、運動学的自由度の削減が影響した結果を表しているものと考えられる。

これまで、様々な目標指向型課題において、関節運動や筋活動、投射運動における投射角度・投射速度の変数（リリース変数）が運動学習によって協調していくことが確かめられてきた<sup>12-14</sup>。これらの協調研究では、冗長性により運動課題を達成する運動の組み合わせの多様性を生み出し、ヒトは「冗長性を利用して」課題を達成していると推察されてきた<sup>12-14</sup>。しかし、筆者の知る限り、自由度を実験的に削減して通常の運動学習と比較した研究は行われておらず、冗長自由度が目標指向型運動の利点となることを直接示した研究は見られない。そのため、「単に制御変数の次元を削減して冗長自由度による計算コストを小さくするためだけに強調させているのか」、「運動課題の正確性を高めるために冗長自由度を利用しているのか」、について直接言及することができなかった。一方、本研究は非利き腕ダーツ投げ課題において冗長自由度の削減が運動学習を遅らせたことを示した。この結果は、これまで推察の域を出なかった、運動を複雑にしていると考えられている冗長自由度がむしろヒトの正確性・再現性の高いパフォーマンスに有利であることを直接的な事例を示すものである。

本研究では非利き腕ダーツ投げ課題という上肢のみの運動を対象とした。そのため、冗長自由度の削減が運動学習に及ぼす影響について今回得られた知見を他の身体部位、より多くの身体の自由

度に関わる運動課題に直接適用できない。また、本研究は初期の運動学習を対象としており、運動課題の経験者がさらに正確性及び再現性を高めるという運動学習に本研究で得られた知見を適用することはできない。つまり長期的な運動学習に対する言及にも限界がある。以上のような部位特異性・自由度特異性・短長期の特異性といった問題が解決されることで、冗長自由度と運動学習の関係が今後さらに明らかにされていくと考えられる。本研究の知見はこれらの検証をするための仮説を立てる上で重要な根拠を提示するものである。

運動学習の現場では、複数の運動要素からなる全身運動について、運動要素を取り出して個別に学習させ、後で組み合わせる「分習法」がしばしば用いられている。しかし、本研究は自由度を削減することでむしろ正確性を求められる目標指向型運動課題の学習が遅延することをダーツ課題で示した。本研究で得られた知見が先駆けとなり、今後一般化されることで、全身運動の運動要素を細分化して習得する分習法に代わり、まとめて習得するための運動学習理論が構築されることが期待される。

#### 4. 結 論

本研究では非利き腕ダーツ投げ課題における、肩関節拘束による実験的な自由度の削減が初期の運動学習に及ぼす影響を検討した。ダーツ到達点一目標点間の距離を肩関節の冗長自由度を持たない関節拘束群と対照群で比較した結果、関節拘束群の方が通常の試技を行う対処群よりも距離が短縮されるのが遅くなった。本研究の結果は、運動学的自由度が大きい状況がむしろ運動学習にとって有利になる事例の1つを示すものである。

#### 謝 辞

本研究は堆耕平氏・藤森俊秀氏・野中愛里氏（筑



波大学大学院)の多大な協力を得て行われた。また、公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団第44回(2022年度)研究助成金に支援された。ここで深く御礼申し上げる。

#### 文 献

- 1) Bernstein, N. The coordination and regulation of movements. *New York Pergamon Press*. (1967)
- 2) Faisal, A.A., Selen, L.P.J. & Wolpert, D.M. Noise in the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience* vol. 9 292–303 (2008)
- 3) Scholz, J.P., Kang, N., Patterson, D. & Latash, M.L. Uncontrolled manifold analysis of single trials during multi-finger force production by persons with and without Down syndrome. *Exp. Brain Res.* 153, 45–58 (2003)
- 4) Krishnamoorthy, V., Latash, M. L., Scholz, J. P. & Zatsiorsky, V.M. Muscle synergies during shifts of the center of pressure by standing persons. *Experimental Brain Research* vol. 152 281–292 (2003)
- 5) D' Avella, A., Saltiel, P. & Bizzi, E. Combinations of muscle synergies in the construction of a natural motor behavior. *Nat. Neurosci.* 6, 300–308 (2003)
- 6) Latash, M. L., Scholz, J. P. & Schönner, G. Motor control strategies revealed in the structure of motor variability. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 30, 26–31 (2002)
- 7) Turvey, M.T. & Fonseca, S.T. The medium of haptic perception: A tensegrity hypothesis. *J. Mot. Behav.* 46, 143–187 (2014)
- 8) Camomilla, V., Cereatti, A., Vannozzi, G. & Cappozzo, A. An optimized protocol for hip joint centre determination using the functional method. *J. Biomech.* 39, 1096–1106 (2006)
- 9) Wells, R.P. & Winter, D.A. Assessment of Signal and Noise in the Kinematics of normal, Pathological and Sporting Gaits. *Proc. 1st Conf. Cdn. Soc. Biomech., Locomot.* 92–94 (1980)
- 10) Winter, D.A. Kinematics. in *Biomechanics and Motor Control of Human Movement* vol. 4th 45–81 (John Wiley & Sons, 2009)
- 11) Gamage, S.S.H.U. & Lasenby, J. New least squares solutions for estimating the average centre of rotation and the axis of rotation. *J. Biomech.* 35, 87–93 (2002)
- 12) Nasu, D., Matsuo, T. & Kadota, K. Two types of motor strategy for accurate dart throwing. *PLoS One* 9, (2014)
- 13) Kudo, K., Tsutsui, S., Ishikura, T., Ito, T. & Yamamoto, Y. Compensatory coordination of release parameters in a throwing task. *J. Mot. Behav.* 32, 337–345 (2000)
- 14) Müller, H. & Sternad, D. Decomposition of Variability in the Execution of Goal-Oriented Tasks: Three Components of Skill Improvement. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 30, 212–233 (2004)