

# UCM 解析を用いたダーツ投擲動作における関節間協調の解明\*

○中川純希（東大） Qi An（東大） 石川雄己（東大） 岡敬之（東大）  
高草木薫（旭川医大） 山川博司（東大） 山下淳（東大） 浅間一（東大）

**概要** 高齢者が要介護状態になることを抑制するには、日常生活における高齢者の身体機能改善を目的としたリハビリテーションが必要である。日常生活には上肢・下肢を協調させる必要のある動きが数多く存在する。しかしながら、現在多くのリハビリテーション病院では、上肢のリハビリと下肢のリハビリは別々に行われている。本研究では、上肢と下肢を協調させながら行える新しいリハビリ手法としてダーツ投擲動作に注目し、様々な投擲距離でのダーツ投擲動作の解析を UCM 解析という手法を基に行った。解析の結果、距離によらず、肘の位置を安定させることがダーツ投擲動作において最も重要であることが示唆された。

**キーワード:** 運動解析, 関節間協調, UCM 解析

## 1 序論

昨今、わが国では高齢化が進んでおり、介護を必要とする高齢者が増えてきている。平成 21 年度介護保険事業報告<sup>1)</sup>によると、要介護度が軽度の高齢者が特に増加しており、この軽度の高齢者が要介護状態になる原因として、「高齢による衰弱」「関節疾患」「骨折・転倒」などの「身体機能の低下」が約半数を占めている。身体機能の低下した高齢者は、体を動かす機会が減り、それがさらに身体機能の低下に拍車をかけてしまう。体を動かさない状態が続くことによって、心身の機能が低下して動けなくなること（廃用症候群）を防ぐためには、身体機能を改善するリハビリテーションが重要である。

身体機能改善を目的としたリハビリテーションの方法は、理学療法 (PT) と作業療法 (OT) に分けることができる。PT とは、病気、けが、高齢、障がいなどによって身体機能が低下した状態にある人々に対し、身体機能の維持・改善を目的に運動、温熱、電気、水、光線などの物理的手段を用いて行われる治療法のことである。OT とは、身体または精神に障がいのある者、またはそれが予測されるものに対してその主体的な活動の獲得をはかるため、諸機能の回復・維持を促す作業活動を用いて行う治療法のことである。

多くのリハビリテーション病院では、理学療法士は主に歩行訓練・姿勢制御訓練など下肢の訓練を担い、作業療法士は主に上肢機能訓練を担っている。このように、上肢のリハビリと下肢のリハビリは別々に行われることが多く、例えば上肢のリハビリは座った状態で行われ、下肢のリハビリは下肢の運動にのみ注目し、上肢の運動が組み合わせられることは少ない。

しかし、人間が日常生活を送る上では、上肢と下肢の協調的な動きを必要とする場合が多く、上肢の運動と下肢の運動を組み合わせたりリハビリが必要である。近年、上肢と下肢を協調させながら行うリハビリが注目されており、Waller らや Meusel は立った状態での投擲動作が上肢・下肢の協調動作のリハビリに有効であることを示唆している<sup>2)3)</sup>。しかし、これらの研究において、リハビリの効果を示すための評価手法は、上肢能力のみ、下肢能力のみの回復度合いを個別に評価しており、上肢・下肢を協調させる能力の回復度合いを定量的に評価できていない。

現在行われているリハビリ・回復度合い評価手法と

\*本研究の一部は Robomec2013 で発表したものである<sup>7)</sup>。

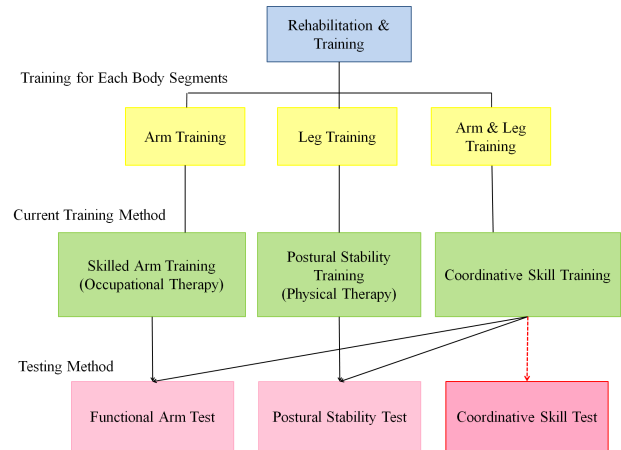


Fig. 1: Overview of current training and testing methods

新たに必要となり得る回復度合い評価指標の位置付けを図 1 に示す。上肢の運動機能回復のためのリハビリ、下肢の運動機能回復のためのリハビリ、並びにそれぞれのリハビリの効果を評価するための上肢のみ、下肢のみの回復度合い評価テストはリハビリテーション病院においてよく実施されている。一方、上肢・下肢の運動を組み合わせたりリハビリは近年注目されてはいるもののほとんど行われておらず、上肢・下肢の協調運動の回復度合いを評価する指標は存在しない。

筆者らはこれまでに、ダーツ投擲動作において上肢・下肢の 2 関節間における協調性を調査し、ダーツ投擲動作における上肢・下肢協調度合いの定量的な評価手法を提案してきた。そして、肘関節と足首関節、肘関節と膝関節の間に協調関係があることを示唆する結果を得てきた<sup>4)</sup>。

しかし、生体は本来、冗長な自由度を有しており、多数の関節を制御して、様々な運動を行っている。そこで、2 関節間にも注目するだけでなく、運動実行の際のエンドエフェクタに寄与する関節すべてを考慮する必要がある。生体が冗長な自由度を駆使して、運動の安定化に寄与するような関節間協調の存在を調査するために、4 つの上肢関節の運動に注目し、UCM (uncontrolled manifold) 解析<sup>5)6)</sup>を行う。

そこで本研究では、上肢と下肢を協調させる運動としてダーツ投擲動作に注目し、上肢・下肢を協調させる能力の定量的な評価手法提案のため、UCM 解析を用いて、上肢・下肢関節間協調を調査することを目的

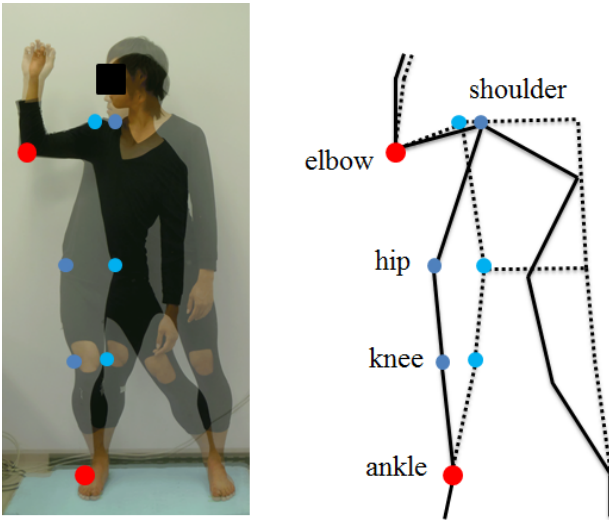


Fig. 2: Example of model for same elbow position

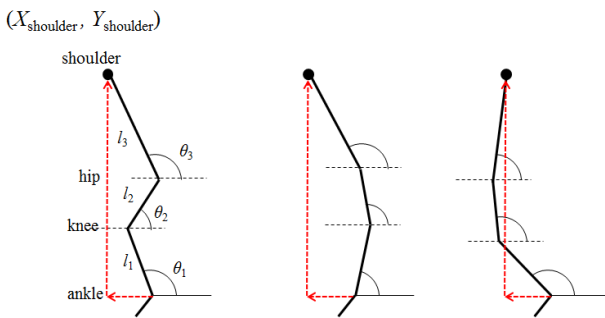


Fig. 3: Example of link model for same shoulder position

とする。

また、筆者らは投擲距離の違いによる、ダーツ投擲動作における上肢・下肢協調度合いの変化を調査してきた。そして、投擲距離が長くなるにつれて、協調度合いが向上することが示唆された。そこで、本研究においても同様に、投擲距離の違いによる上肢・下肢関節間協調の変化を調査する。

## 2 解析手法

### 2.1 UCM 解析

関節間協調の定量的な評価のため、UCM 解析を用いる。UCM とは、生体の冗長ないくつかの関節角度が、ある特定の関節目標位置を実現するという拘束の下でつくられる多様体のことである<sup>5)6)</sup>。図 2 は、足首、膝、腰、肩関節角度の組み合わせはそれぞれ違うにも関わらず、同じ肘関節位置を実現するような例を表している。このように例えば、肘関節のある特定の目標位置を実現するための肩、腰、膝、足首関節角度の組み合わせは無数にある。この組み合わせが作る多様体のことを UCM と呼ぶ。

本研究では、ダーツ投擲動作における上肢関節（指先、手首、肘、肩）目標位置を実現するための関節間協調を調査するために、UCM 解析を用いて、関節間協調度合いを定量的に求める。例えば、ダーツ投擲における肩関節位置に注目し、その 1 投擲毎の投擲動作を比べたとき、図 3 のように肩関節位置の変化に寄与す

る足首、膝、腰関節角度にはばらつきがあっても、肩関節位置が変化していないならば、足首、膝、腰関節の間には肩関節のばらつきを抑える関節間協調があると判断する。

以下では、肩関節位置に注目した UCM 解析を例にとって説明する。肩関節位置はリンクモデル（図 4）を利用して、式 (1) のように表される。式 (1) において、 $X_{\text{shoulder}}$  は肩関節位置の水平方向成分、 $Y_{\text{shoulder}}$  は肩関節位置の鉛直方向成分を表す。ここで添え字  $i = 1, 2, 3$  はそれぞれ足首、膝、腰関節を表す。式 (1) において  $l_1$  は足首—膝間の長さ、 $l_2$  は膝—腰間の長さ、 $l_3$  は腰—肩間の長さを表し、 $\theta_1$  は足首関節角度、 $\theta_2$  は膝関節角度、 $\theta_3$  は腰関節角度を表す。

$$\begin{bmatrix} X_{\text{shoulder}} \\ Y_{\text{shoulder}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、以下のように算出された関節ベクトルを使って、関節角度を算出する。ある時間  $t$  における関節角度  $(\theta_i(t))$  は、関節  $i$  から関節  $j$  にかけてのベクトル  $(\mathbf{v}_{i,j}(t))$  と関節  $i$  から関節  $k$  にかけてのベクトル  $(\mathbf{v}_{i,k}(t))$  の内積を、それぞれの絶対値  $|\mathbf{v}_{i,j}(t)|$  と  $|\mathbf{v}_{i,k}(t)|$  で割って算出する（式 (2)）。例えば膝関節角度  $\theta_2(t)$  を求める際には、膝関節（関節番号:2）から足首関節（関節番号:1）にかけてのベクトル  $\mathbf{v}_{2,1}(t)$  と、膝関節（関節番号:2）から腰関節（関節番号:3）にかけてのベクトル  $\mathbf{v}_{2,3}(t)$  を用いて式 (2) より算出される。

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{\mathbf{v}_{i,j}(t) \cdot \mathbf{v}_{i,k}(t)}{|\mathbf{v}_{i,j}(t)| |\mathbf{v}_{i,k}(t)|}\right) \quad (2)$$

肩関節位置の変化に寄与する関節角度は式 (2) で求められた  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  であり、このとき UCM は図 5 のように 3 次元空間として表すことができる。図 5 中の曲線は同じ肩関節位置を実現するような UCM を示している。UCM は各被験者のある時刻  $t$  における関節平均軌道  $\bar{\theta}(t)$  を基に計算され、ある 1 投擲のある時刻  $t$  における関節軌道  $\theta_i(t) = (\theta_1(t), \theta_2(t), \theta_3(t))$  が UCM 上にあるなら、同じ肩関節位置を実現するような腰、膝、足首関節間の関節間協調があることを示唆している。一方、 $\theta_i(t)$  が UCM 上にないなら、それは UCM に直交する方向の成分である図 5 中で黒い矢印で示される  $\epsilon_{\perp}$  を含み、この  $\epsilon_{\perp}$  は、肩関節位置を変化させる方向のベクトルを意味している。

$\theta_i(t)$  と UCM との距離を計算するために、UCM のヤコビ行列を用いた線形近似を計算する。図 4 中の白い丸で示された参照点  $(\bar{\theta}_i(t))$  におけるヤコビ行列は式 (3)-(5) のように計算される。

$$\mathbf{J}_{\text{shoulder}}^{\text{X}}(t) = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \bar{\theta}_1(t) & -l_2 \sin \bar{\theta}_2(t) & -l_3 \sin \bar{\theta}_3(t) \\ l_1 \cos \bar{\theta}_1(t) & l_2 \cos \bar{\theta}_2(t) & l_3 \cos \bar{\theta}_3(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_{\text{X}}^{\text{shoulder}}(t) = [-l_1 \sin \bar{\theta}_1(t) \quad -l_2 \sin \bar{\theta}_2(t) \quad -l_3 \sin \bar{\theta}_3(t)] \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_{\text{Y}}^{\text{shoulder}}(t) = [l_1 \cos \bar{\theta}_1(t) \quad l_2 \cos \bar{\theta}_2(t) \quad l_3 \cos \bar{\theta}_3(t)] \quad (5)$$

これらのヤコビ行列において、肩関節位置の水平方向成分である  $X_{\text{shoulder}}$  に影響を与えない成分で、ヤコ

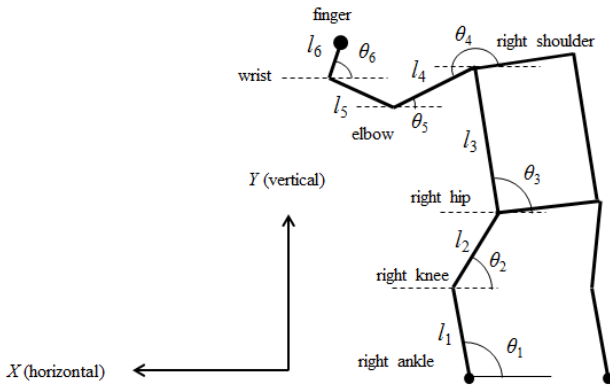


Fig. 4: Geometric link model

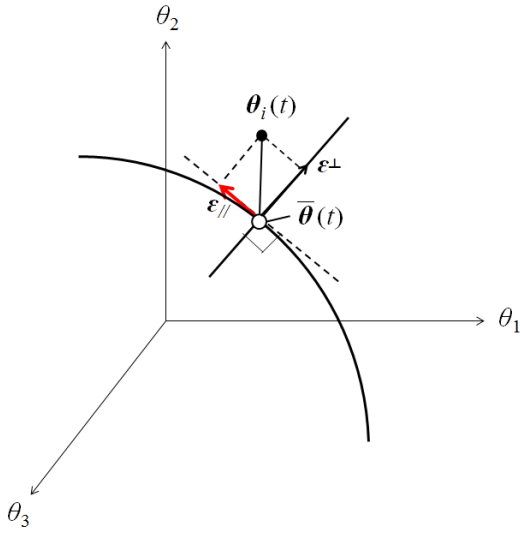


Fig. 5: Example of UCM analysis

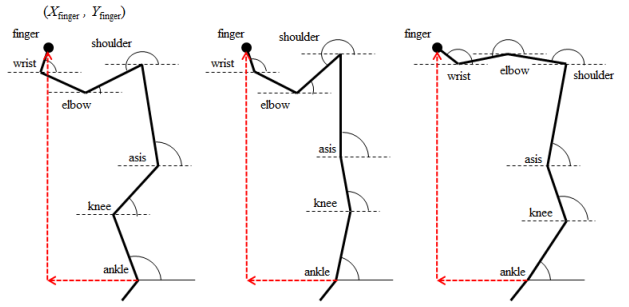
ビ行列の零空間である単位平行ベクトル  $\epsilon_{//}(t)$  は式 (6) で計算される.

$$\mathbf{J}_X^{\text{shoulder}}(t) \cdot \epsilon_{//}(t) = 0 \quad (6)$$

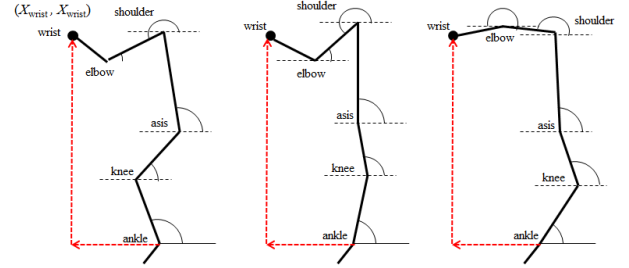
そして、同じ関節位置を実現するような関節間協調の度合いを定量的に計算するために、参照点から  $\theta_i(t)$  へのベクトルと  $\epsilon_{//}(t)$  で挟まれた角度の余弦  $S(t)$  を式 (7) のように計算する.

$$S(t) = \frac{(\theta_i(t) - \bar{\theta}(t)) \cdot \epsilon_{//}(t)}{|(\theta_i(t) - \bar{\theta}(t))| |\epsilon_{//}(t)|} \quad (7)$$

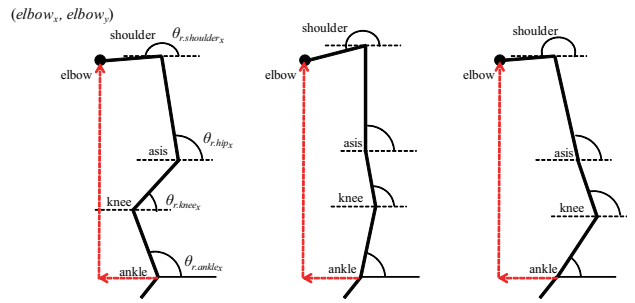
$S(t)$  は、1 に近いほど協調度合いが高く、0 に近いほど協調度合いが低いことを示している. 以上では、肩関節の水平方向位置のばらつきを抑える関節間協調度合いの評価について解析する方法を説明したが、本研究では関節の水平方向位置、鉛直方向位置のそれぞれに関してばらつきを抑える関節間協調があるかを調査する. 例えば、肩関節の鉛直方向位置のばらつきを抑える関節間協調度合いの評価には、式 (4) を用いて、以下の式 (8) のようにヤコビ行列の零空間から  $\epsilon_{//}(t)$  を求め、参照点から  $\theta_i(t)$  へのベクトルと  $\epsilon_{//}(t)$  で挟まれた角度の余弦  $S(t)$  を式 (7) のように計算する.



(a) The same lateral and vertical position of finger.



(b) The same lateral and vertical position of wrist.



(c) The same lateral and vertical position of elbow.

Fig. 6: Examples of different postures which still achieves the same lateral and vertical position of each arm joint.

$$\mathbf{J}_Y^{\text{shoulder}}(t) \cdot \epsilon_{//}(t) = 0 \quad (8)$$

図 6 は図 2 と同様に、足首、膝、腰、肩、肘、手首関節角度の組み合わせはそれぞれ違うにも関わらず、同じ指先関節位置 (図 6(a)), 手首関節位置 (図 6(b)), 肘関節位置 (図 6(c)) を実現するような例を表している. 図 6 のように肩関節以外の指先関節位置、手首関節位置、肘関節位置に注目し、その 1 投擲毎の投擲動作を比べてとき、それぞれの関節位置の変化に寄与する足首、膝、腰、肩、肘、手首関節角度にはばらつきがあっても、それぞれの関節位置が変化していないならば、足首、膝、腰、肩、肘、手首関節の間にはそれぞれの関節のばらつきを抑える関節間協調があると判断する.

特に指先位置に注目した UCM 解析では、ヤコビ行列は指先関節位置の変化に寄与する式 (2) で求められ

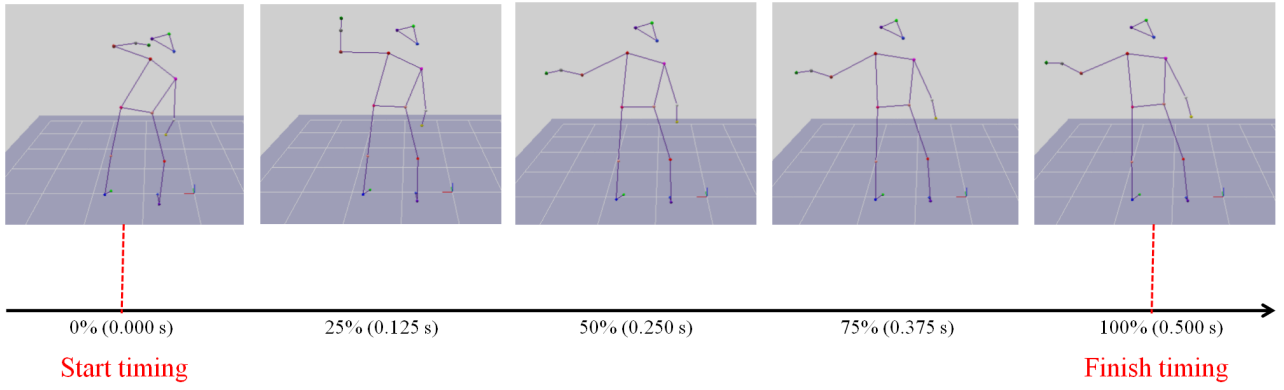


Fig. 7: Definition of dart throwing motion

た  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$  と  $l_1, l_2, l_3$  に加え、肩—肘間の長さ  $l_4$ 、肘—手首間の長さ  $l_5$ 、手首—指先間の長さ  $l_6$  を用いて、以下の式 (9)~(12) によって計算される。

$$\begin{bmatrix} X_{\text{finger}} \\ Y_{\text{finger}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + \cdots + l_6 \cos \theta_6 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + \cdots + l_6 \sin \theta_6 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{J}^{\text{finger}}(t) = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \bar{\theta}_1(t) & \cdots & -l_6 \sin \bar{\theta}_6(t) \\ l_1 \cos \bar{\theta}_1(t) & \cdots & l_6 \cos \bar{\theta}_6(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{J}_X^{\text{finger}}(t) = [-l_1 \sin \bar{\theta}_1(t) \quad \cdots \quad -l_6 \sin \bar{\theta}_6(t)] \quad (11)$$

$$\mathbf{J}_Y^{\text{finger}}(t) = [l_1 \cos \bar{\theta}_1(t) \quad \cdots \quad l_6 \cos \bar{\theta}_6(t)] \quad (12)$$

手首関節位置に注目した UCM 解析では、ヤコビ行列は手首関節位置の変化に寄与する式 (2) で求められた  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$  と  $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$  を用いて、以下の式 (13)~(16) によって計算される。

$$\begin{bmatrix} X_{\text{wrist}} \\ Y_{\text{wrist}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + \cdots + l_5 \cos \theta_5 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + \cdots + l_5 \sin \theta_5 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{J}^{\text{wrist}}(t) = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \bar{\theta}_1(t) & \cdots & -l_5 \sin \bar{\theta}_5(t) \\ l_1 \cos \bar{\theta}_1(t) & \cdots & l_5 \cos \bar{\theta}_5(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{J}_X^{\text{wrist}}(t) = [-l_1 \sin \bar{\theta}_1(t) \quad \cdots \quad -l_5 \sin \bar{\theta}_5(t)] \quad (15)$$

$$\mathbf{J}_Y^{\text{wrist}}(t) = [l_1 \cos \bar{\theta}_1(t) \quad \cdots \quad l_5 \cos \bar{\theta}_5(t)] \quad (16)$$

肘関節位置に注目した UCM 解析では、ヤコビ行列は肘関節位置の変化に寄与する式 (2) で求められた  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  と  $l_1, l_2, l_3, l_4$  を用いて、以下の式 (17)~(20) によって計算される。

$$\begin{bmatrix} X_{\text{elbow}} \\ Y_{\text{elbow}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + \cdots + l_4 \cos \theta_4 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + \cdots + l_4 \sin \theta_4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{J}^{\text{elbow}}(t) = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \bar{\theta}_1(t) & \cdots & -l_4 \sin \bar{\theta}_4(t) \\ l_1 \cos \bar{\theta}_1(t) & \cdots & l_4 \cos \bar{\theta}_4(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{J}_X^{\text{elbow}}(t) = [-l_1 \sin \bar{\theta}_1(t) \quad \cdots \quad -l_4 \sin \bar{\theta}_4(t)] \quad (19)$$

$$\mathbf{J}_Y^{\text{elbow}}(t) = [l_1 \cos \bar{\theta}_1(t) \quad \cdots \quad l_4 \cos \bar{\theta}_4(t)] \quad (20)$$

以上のようにそれぞれ求められたヤコビ行列を用いて、式 (6)、式 (8) と同様に  $\epsilon_{//}(t)$  を求め、式 (7) により  $S(t)$  を算出する。以下では、水平方向位置に関する協調度合いを  $S_X(t)$ 、鉛直方向位置に関する協調度合いを  $S_Y(t)$  と定義する。

## 2.2 データ処理手法

試行間で異なる投擲動作を比較するために、投擲動作を 0% から 100% となるように正規化を行った。0% は動作の開始、100% は動作の終わりとして一致する。

本研究では、動作の開始を肘関節角速度が負の値から正の値に変わる時点とし、動作の終わりを肘関節角速度が正の値から負の値に変わる時点とした。図 7 はある被験者の投擲動作を示したものである。この図において、5 つあるうちの左端の図は投擲動作の開始地点、右端の図は投擲動作の終了地点を示している。これら 5 つの図は 0.125 秒間隔で投擲動作が移り変わる様子を示している。

## 2.3 統計処理手法

4 つの上肢関節における、関節位置のばらつきを抑える関節間協調度合いの、注目する関節位置による結果の違いを調査するために、関節位置の要因に関する一要因分散分析を行い、有意差ありと判断された場合のみ 2 群多重比較を行った。有意水準は  $p = 0.05$  とした。なお、関節間協調度合いは 1 つの距離について、3 名の被験者、10 回の投擲すべての平均をとっている。

## 3 実験

### 3.1 実験環境

本研究で行った、ダーツ投擲動作を計測するための実験環境の様子を図 8 に示す。ダーツ投擲動作を計測する

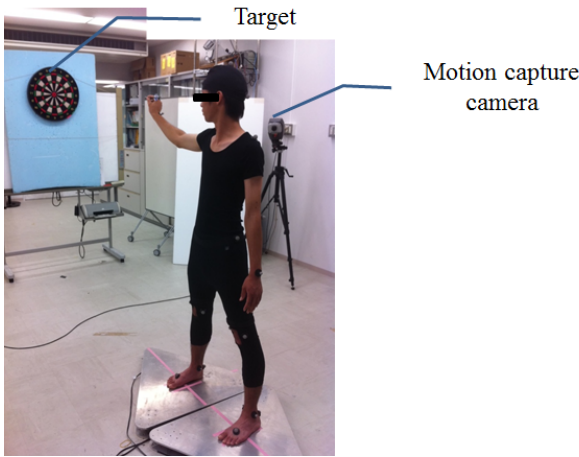


Fig. 8: Experiment of dart throwing motion measurement

ために、モーションキャプチャMAC3D HMK-200RT; Motion Analysis を用いた。被験者はマークスーツを着用し、頭頂部、左右肩、右肘、右手首、右手第3PIP関節、左右大転子、左右膝、左右足首、左右足第5MP関節の14ヶ所の位置座標を測定した。モーションキャプチャのサンプリングレートは200Hzとし、モーションキャプチャカメラは8台を使用した。得られた各位置座標を用いて、図4に示されたような関節角度を算出する。

### 3.2 実験手順

ダーツ投擲動作時の上肢・下肢の協調度合いを調べるために、距離に応じた投擲動作の変化を調べた。そのため1人につき、被験者の投擲位置からの的までの距離を図9のように1.2m, 2.4m, 3.6m, 4.8m, 6.0mの5段階変化させて、1投擲距離につき10回投擲してもらった。ダーツの的の中心は床から1.73mの高さで、被験者には的の中心を狙って矢を投げてもらった。

また被験者間で投擲動作に大きな違いが出ないように、足の置き方や体の向き、腕の振り方を実験前に指定した<sup>4)</sup>。

### 3.3 対象

本実験には、合計3名のダーツに熟練していない、健全な右手が利き手の若者男性(年齢23, 身長1.72 ± 0.02m, 体重62 ± 5kg)が参加した。いずれの被験者も過去に手術・けが歴はない。実験開始前に実験の概要について十分に説明をし、すべての被験者から同意を得た。また、本実験は東京大学大学院医学系研究科倫理委員会の承認を受け実施された。

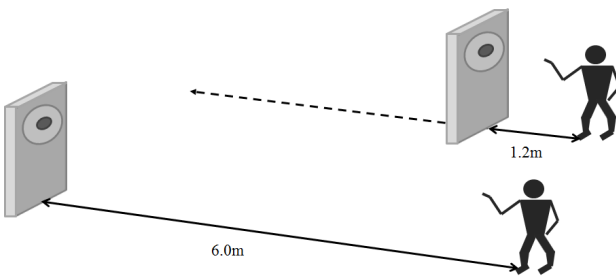
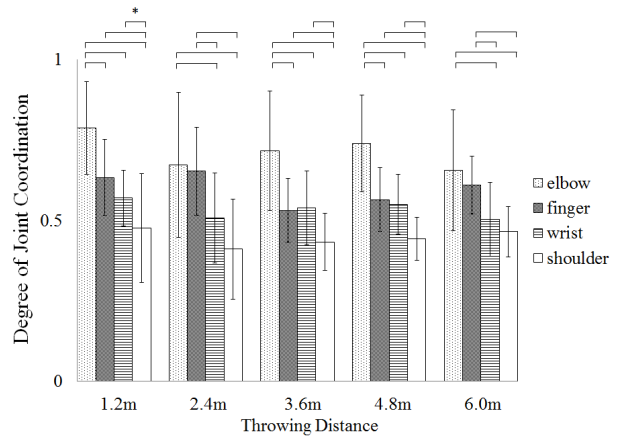
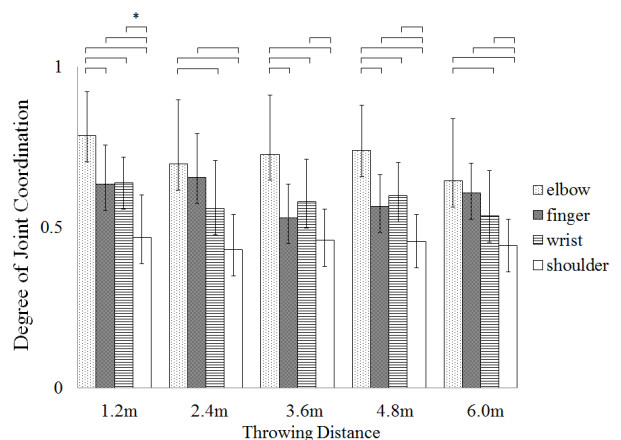


Fig. 9: Overview of experiment



(a)



(b)

Fig. 10: Histograms of degrees of joint coordination. (a) Histograms of degrees of joint coordination for lateral. (b) Histograms of degrees of joint coordination for vertical.

## 4 結果

各投擲距離において3人の被験者各々に10投擲してもらった計測データを用いて、ダーツ投擲動作において、どの上肢関節位置のばらつきを低く抑えるような上肢・下肢関節間協調が存在するかをUCM解析を計算することで調査した。肘、指先、手首、肩の4つの上肢関節角度の水平方向位置、及び鉛直方向位置におけるばらつきに注目した。図10(a)は、水平方向位置のばらつきを抑える関節間協調度合い $S_x(t)$ が示されており、図10(b)は、鉛直方向位置のばらつきを抑える関節間協調度合い $S_y(t)$ を示している。エラーバーは標準偏差を示している。

これら2つの図より、ダーツ投擲動作において、投擲距離に関わらず、肘関節位置のばらつきを抑えるような関節間協調度合いが水平方向、鉛直方向いずれも他の関節位置の協調度合いよりも有意に高いことがわかる( $p < 0.05$ )。すなわち、ダーツ投擲者は投擲時

Table 1: Average value during each distance

	Trial	Mean		Trial	Mean
$S_X^{\text{elbow}}$	1.2m	0.79	$S_Y^{\text{elbow}}$	1.2m	0.79
	2.4m	0.67		2.4m	0.70
	3.6m	0.72		3.6m	0.73
	4.8m	0.74		4.8m	0.74
	6.0m	0.66		6.0m	0.64
$S_X^{\text{finger}}$	1.2m	0.63	$S_Y^{\text{finger}}$	1.2m	0.63
	2.4m	0.65		2.4m	0.66
	3.6m	0.53		3.6m	0.53
	4.8m	0.56		4.8m	0.56
	6.0m	0.61		6.0m	0.61
$S_X^{\text{wrist}}$	1.2m	0.57	$S_Y^{\text{wrist}}$	1.2m	0.64
	2.4m	0.51		2.4m	0.56
	3.6m	0.54		3.6m	0.58
	4.8m	0.55		4.8m	0.60
	6.0m	0.50		6.0m	0.54
$S_X^{\text{shoulder}}$	1.2m	0.48	$S_Y^{\text{shoulder}}$	1.2m	0.47
	2.4m	0.41		2.4m	0.43
	3.6m	0.43		3.6m	0.46
	4.8m	0.44		4.8m	0.46
	6.0m	0.47		6.0m	0.44

に、肘関節位置を一定軌道で動かすことに注意しており、そのために、足首、膝、腰、肩関節を巧みに協調させていることがわかった。

そして、指先、手首関節位置のばらつきを抑えるような関節間協調度合いには水平方向、鉛直方向ともに大きな差はなく、肩関節位置のばらつきを抑えるような関節間協調が最も低くなった。

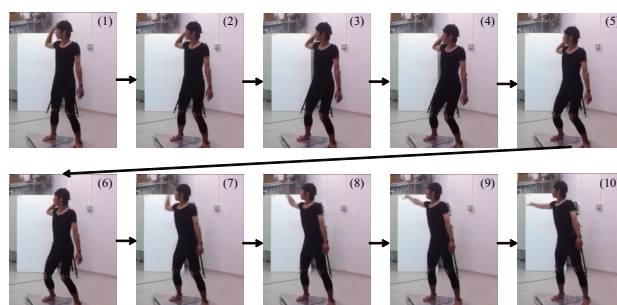
図 11 は本研究にて実際に計測された、ある被験者の距離の違いによる投擲動作の違いを比較した図である。図 11(a) は、投擲動作が長いときのダーツ投擲動作を、図 11(b) は投擲距離が短い際のダーツ投擲動作を表している。これらの図の中では、全ダーツ投擲動作は 10 フレームに分けられている。特に、遠距離での投擲を表した図 11(a) の (3) フレームから (6) フレームにおいて、短距離での投擲を表した図 11(b) の同フレームより明らかに投擲者は下肢を利用して投擲を行っていることがわかる。このように明らかに遠距離での投擲と短距離での投擲には投擲動作に差があるにも関わらず、UCM 解析により得られた結果には投擲距離による差はほとんどなく、遠距離、短距離ともに肘関節位置のばらつきを抑えるような関節間協調が必要であった。

## 5 結論

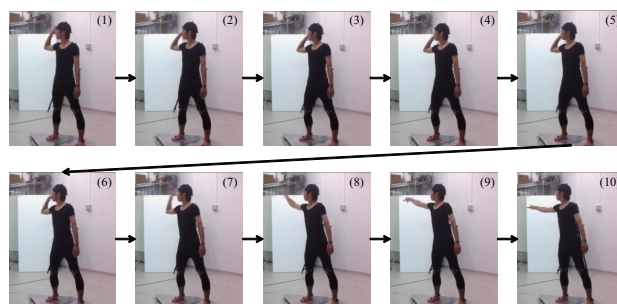
ダーツ投擲動作において、投擲者は投擲距離に関わらず、正確に投擲するために肘関節位置のばらつきを抑えるような足首、膝、腰、肩関節の協調を行っていることがわかった。この知見によって、高齢者におけるダーツ投擲動作に UCM 解析を適用することで、複数の関節間協調を定量的に評価できる可能性を示唆した。

## 謝辞

本研究は、科研費基盤研究 (B)24300198、特別研究員奨励費 24・8702 の一部として実施されたものである。



(a) Dart throwing motion at a long distance



(b) Dart throwing motion at a short distance

Fig. 11: Example of dart throwing motion in our experiment.

## 参考文献

- 厚生労働省, 介護予防とは, <http://www.mhlw.go.jp/topics/kaigo/-yobou/dl/yobou.pdf>(available on 2013/2/22).
- Meusel, H., "Developing Physical Fitness for the Elderly through Sport and Exercise," *British Journal of Sports Medicine*, vol.18, no.1, pp.4-12, 1984.
- Waller, S. M. and Prettyman, M. G., "Arm Training in Standing also improves Postural Control in Participants with Chronic Stroke," *Gait&Posture*, vol.36, no.3, pp.419-424, 2012.
- Nakagawa, J., An, Q., Ishikawa, Y., Oka, H., Takakusaki, K., Yamakawa, H., Yamashita, A., and Asama, H., "Analysis of Joint Correlation between Arm and Lower Body in Dart Throwing Motion," *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2013.
- Schoner, G., "Recent Developments and Problems in Human Movement Science and their Conceptual Implications," *Ecological Psychology*, vol.7, no.4, pp.291-314, 1995.
- Scholz, J.P. and Schoner, G., "The Uncontrolled Manifold Concept: Identifying Control Variables for a Functional Task," *Experimental Brain*, vol. 126, no. 3, pp. 289-306, 1999.
- 中川純希, An Qi, 石川雄己, 岡敬之, 山川博司, 山下淳, 浅間一. "健常者におけるダーツ投擲動作の UCM 解析による関節間協調の解明," *日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'13 講演論文集*, 2A1-I01, pp. 1-4, 2013.