

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

Elucidation of Joint Coordination with UCM Analysis during Dart Throwing Motion in Healthy People

○中川純希 (東京大) Qi An (東京大) 石川雄己 (東京大) 岡敬之 (東京大)
山川博司 (東京大) 山下淳 (東京大) 浅間一 (東京大)
Junki NAKAGAWA, The University of Tokyo, nakagawa@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Qi AN, Yuki ISHIKAWA, Hiroyuki OKA, Hiroshi YAMAKAWA,
Atsushi YAMASHITA, Hajime ASAMA, The University of Tokyo

In order to improve physical function of elderly people, they need to get physical training. There are activities which require integrated lower body and arm. However there are no quantitative testing methods of the degree of recovery for the coordination between arm movements and lower body movements. In this study, we focus on dart throwing motion to suggest the quantitative evaluation of the coordination between arm movements and lower body movements in dart throwing motion. Joint coordination was analyzed with uncontrolled manifold (UCM) analysis at different throwing distances. It is suggested that the joint coordination in order to achieve the same elbow position is mostly required in dart throwing motion.

Key Words: Motion Analysis, Joint Coordination, UCM Analysis

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[1]によると、要介護度が軽度の高齢者が特に増加しており、この要介護度が重度になることを防ぐためには、身体機能を維持するリハビリテーションが必要である。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されることは少ない。

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[2][3]。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。

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[4]。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[4]。

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 関節間にのみ注目するだけでなく、運動実行の際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 [5][6] を行う。

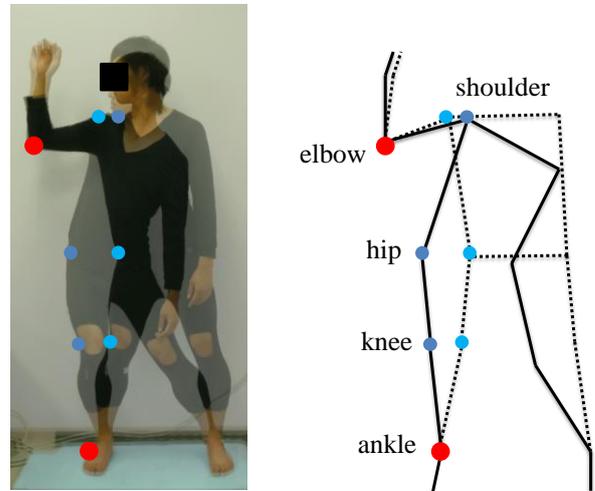


Fig. 1 Example of model for same elbow position

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[4]。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[4]。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[5][6]。図 1 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 2 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 3)を利用して、式(1)のように表される。式(1)において、 $X_{shoulder}$ は肩関節位置の水平方向成分、 $Y_{shoulder}$ 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、 θ_1 は足首関節角度、 θ_2 は膝関節角度、 θ_3 は腰関節角度を表す。

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

肩関節位置の変化に寄与する関節角度は $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ であり、このとき UCM は図 4 のように 3 次元空間として表すことができる。図 4 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 $\theta_i(t) = (\theta_1(t), \theta_2(t), \theta_3(t))^T$ 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 上にならなければ、それは UCM に直交する方向の成分である図 4 中で黒い矢印で示される ϵ_{\perp} を含み、この ϵ_{\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におけるヤコビ行列は式(2)-(4)のように計算される。

$$\mathbf{J}_{\theta}^{shoulder}(t) = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1(t) - l_2 \sin \theta_2(t) - l_3 \sin \theta_3(t) \\ l_1 \cos \theta_1(t) \quad l_2 \cos \theta_2(t) \quad l_3 \cos \theta_3(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_X^{shoulder}(t) = [-l_1 \sin \theta_1(t) - l_2 \sin \theta_2(t) - l_3 \sin \theta_3(t)] \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_Y^{shoulder}(t) = [l_1 \cos \theta_1(t) \quad l_2 \cos \theta_2(t) \quad l_3 \cos \theta_3(t)] \quad (4)$$

こ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 $X_{shoulder}$ に影響を与えない成分で、ヤコビ行列の零空間である単位平行ベクトル $\epsilon_{//}(t)$ は、式(5)で計算される。

$$\mathbf{J}_X^{shoulder}(t) \cdot \epsilon_{//}(t) = 0 \quad (5)$$

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(6)のように計算する。

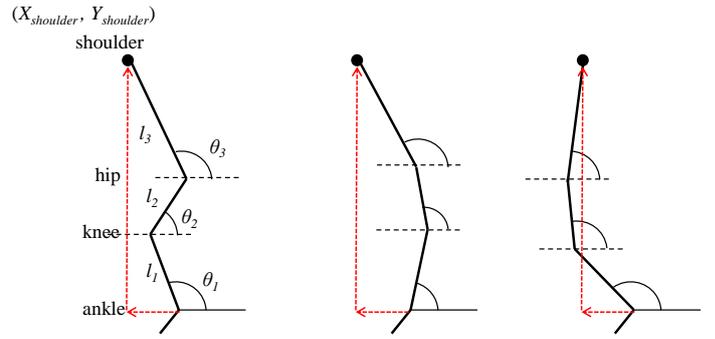


Fig. 2 Example of link model for same shoulder position

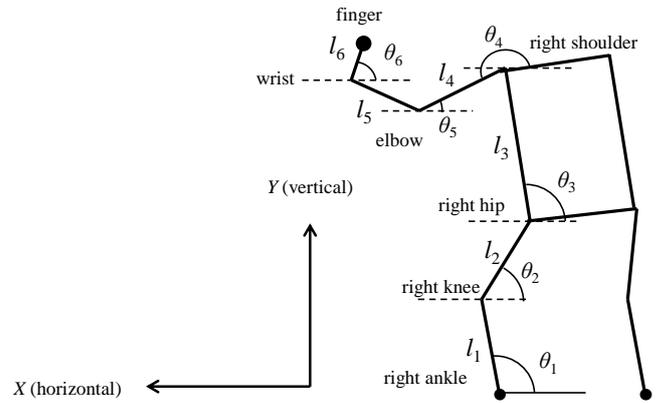


Fig. 3 The Geometric Link Model

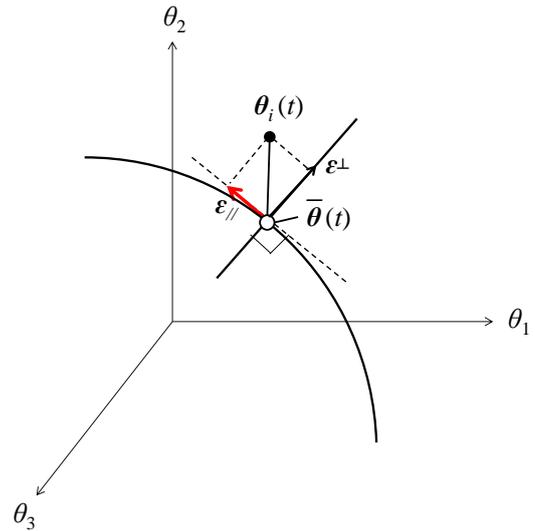


Fig. 4 Example of UCM Analysis

$$S(t) = \frac{(\theta_i(t) - \bar{\theta}(t)) \cdot \epsilon_{//}(t)}{\|(\theta_i(t) - \bar{\theta}(t))\| \|\epsilon_{//}(t)\|} \quad (6)$$

$S(t)$ 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

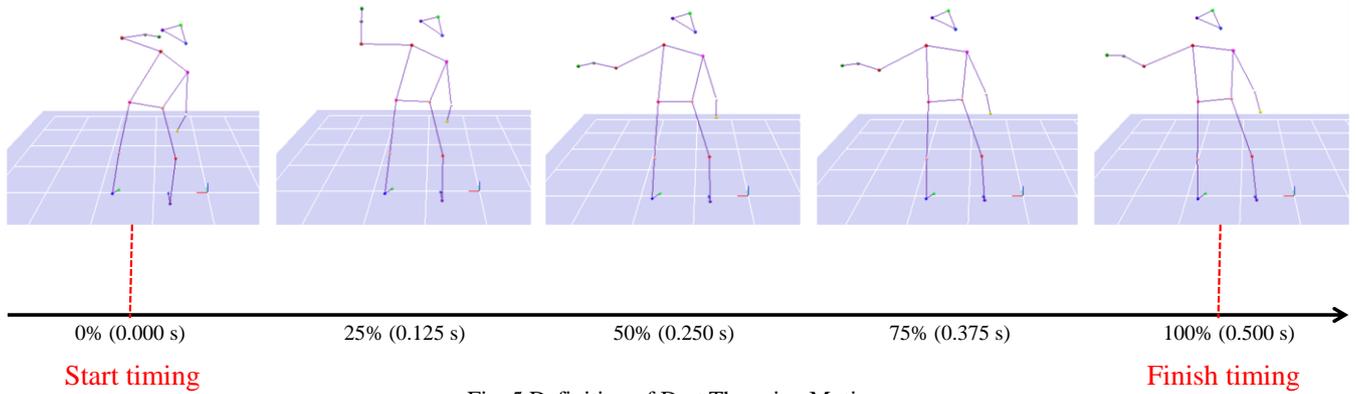


Fig. 5 Definition of Dart Throwing Motion

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(7)のように $\epsilon_{//}(t)$ 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(6)のように計算する．

$$J_Y^{shoulder}(t) \cdot \epsilon_{//}(t) = 0 \quad (7)$$

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 5 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，それぞれの関節位置のばらつきを抑える関節間協調度合いの違いを調査するために，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 6 に示す．ダーツ投擲動作を計測するために，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 台使用した．得られた各位置座標を用いて，図 3 に示されたような関節角度を算出する．

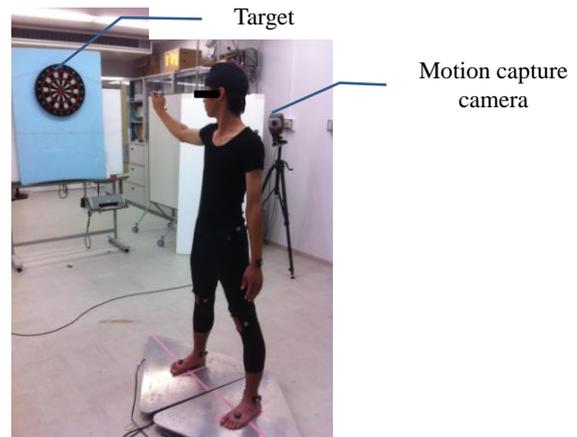


Fig. 6 Experiment of dart throwing motion measurement

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 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．

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，健康な右手が利き手の若者男性（年齢 23，身長 1.72 ± 0.02 m，体重 62 ± 5 kg）が参加した．いずれの被験者も過去に手術・けがが歴はない．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．

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 7 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 8 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

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。

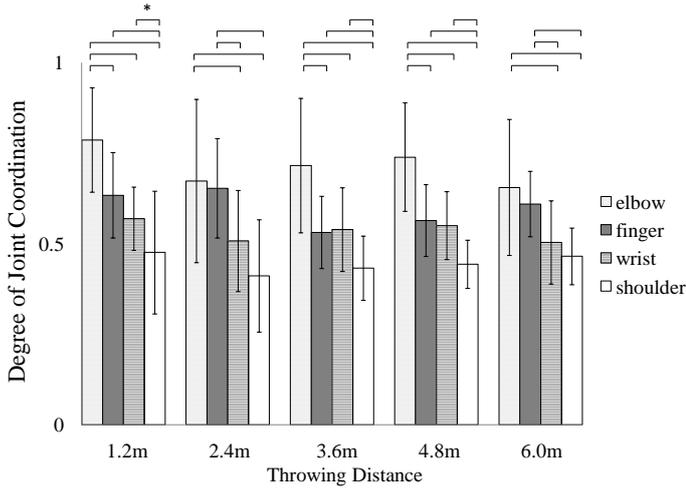


Fig. 7 Histograms of degrees of joint coordination for lateral

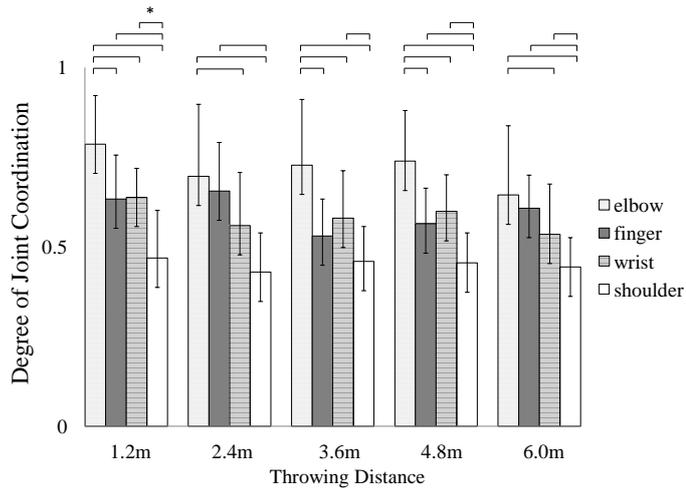


Fig. 8 Histograms of degrees of joint coordination for vertical

る。実際に算出された関節間協調度合い $S(t)$ の値は表 1 に示されている。

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。

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、正確に的へ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。

Table 1 Average Value during each Distance

| | | $S_x(t)$ | | | $S_y(t)$ |
|----------------|------|----------|----------------|------|----------|
| X_{elbow} | 1.2m | 0.79 | Y_{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 |
| X_{finger} | 1.2m | 0.63 | Y_{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 |
| X_{wrist} | 1.2m | 0.57 | Y_{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 |
| $X_{shoulder}$ | 1.2m | 0.48 | $Y_{shoulder}$ | 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 |

文献

- [1] 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).
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 中川純希, Qi An, 石川雄己, 岡敬之, 山川博司, 山下淳, 浅間一: "ダーツ投擲時の上肢・下肢協調度合いの評価手法提案" 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, AC2I1-1, 2012.
- [5] Schoner, G.: "Recent Developments and Problems in Human Movement Science and their Conceptual Implications" *Ecological Psychology*, vol.7, no.4, pp.291-314, 1995.
- [6] 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.