

ダーツ投擲時の上肢・下肢協調度合いの評価手法提案

中川純希（東京大学） Qi An（東京大学） 石川雄己（東京大学） 岡敬之（東京大学）
 山川博司（東京大学） 山下淳（東京大学） 浅間一（東京大学）

1. 序論

1.1 背景

昨今、我が国では高齢化が進み、介護を必要とする高齢者が増えている。平成 21 年度介護保険事業報告によると、要介護度が軽度の高齢者が特に増加している。この要介護度が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。

身体機能改善を目的とした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[?]。しかし人間が実際の生活を行う上では、上肢・下肢の協調的な動きを必要とする場合が多く、PT と OT を組み合わせたリハビリテーションが必要である。また、骨格筋を支配する上肢、下肢運動ニューロン間の結合には、正の相関があることがわかっており[?]、上肢と下肢を協調させた運動を行うことで、より高効率なリハビリテーションを行うことができると考えられる。

1.2 本研究の目的

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する。Timmann らは、投擲動作を巧く行える熟練者と投擲動作を巧く行うことができない未熟練者と小脳疾患患者の投擲動作を、肩関節内転速度、肘関節伸展速度、手首関節角度を計測することで比較している[?]。また、投擲位置、上肢の軌跡、筋電位、リリースタイミングを計測することで、熟練者と未熟練者の投擲動作を比較している研究もある[?]。これらの先行研究のように、ダーツ投擲動作は、熟練者と未熟練者、もしくは健康者と運動失調患者との比較においてよく利用される。しかし本来、ダーツ投擲の

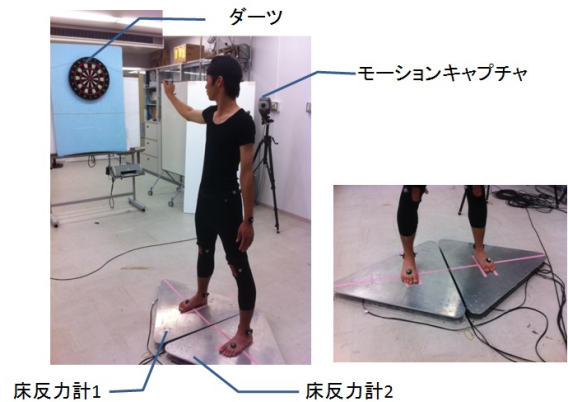


図 1 実験の様子

運動自体は激しくないで下肢の動きは少なく、ダーツ投擲動作時の上肢と下肢の協調運動について述べられた研究はない。

そこで本研究では、肘の伸展運動だけでなく、上肢・下肢を協調させながら行えるダーツ投擲リハビリテーションシステム開発のため、投擲距離を変化させることで上肢と下肢の協調運動を誘発し、投擲動作時の上肢の動きと体重移動を担う下肢の動きの協調度合いが、投擲距離に応じてどのように変化するかについて調べる。また、そのために必要な上肢・下肢協調度合いの評価手法を調査することを目的とする。

2. 解析手法

2.1 上肢と下肢の協調

ダーツ投擲動作では、まず、投擲方向から遠い方の足（後足）に体重を乗せる。その後、投擲方向に近い足（前足）へと体重を移動させながら投擲側肘を伸展し、矢をリリースする。今回の実験では、より上肢・下肢の協調運動を誘発し、上体を回転させることによる上肢に頼った投擲動作にならないよう、図 1 に示すように、利き腕側の足を的から近い位置、非利き腕側の足を的から遠い位置におき、的の中心、両足が同一直線上に乗るように配置した。本実験では、上肢と下肢の協調度合いを調べるため、人の上肢・下肢の関節位置、両足部からの床反力の同時計測を行うシステムを用いて、計測を行う。

2.2 評価手法

本研究では、上肢・下肢協調度合いを調べるために、相関係数を用いて評価する。上肢の計測データ $x(t)$ と下肢の計測データ $y(t)$ を用いて、相関係数 $R(x, y)$ を式 (1)~(3) で求める。

肘関節角度が最大となるフレームから，前 m フレーム，後 n フレームを 1 回の投擲動作として定義し，総タイムステップは T_{total} とする．

$$R(x, y) = \frac{\sum_{t=1}^{T_{total}} f(t)g(t)}{\sqrt{\sum_{t=1}^{T_{total}} f(t)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^{T_{total}} g(t)^2}} \quad (1)$$

$$f(t) = x(t) - \bar{x}(t) \quad (2)$$

$$g(t) = y(t) - \bar{y}(t) \quad (3)$$

ただし $\bar{x}(t)$ $\bar{y}(t)$ はそれぞれデータ $x(t)$, $y(t)$ の相加重平均である．

2.3 データ処理手法

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 ($\theta_j(t)$) は，関節 j から関節 i にかけてのベクトル ($\mathbf{v}_{j,i}(t)$) と関節 j から関節 k にかけてのベクトル ($\mathbf{v}_{j,k}(t)$) の内積を，それぞれの絶対値 $|\mathbf{v}_{j,i}(t)|$ と $|\mathbf{v}_{j,k}(t)|$ で割って算出する ((4) 式) ．

$$\theta_j = \arccos\left(\frac{\mathbf{v}_{j,i}(t) \cdot \mathbf{v}_{j,k}(t)}{|\mathbf{v}_{j,i}(t)| |\mathbf{v}_{j,k}(t)|}\right) \quad (4)$$

3. 実験

3.1 実験環境

人の位置計測にはモーションキャプチャ MAC3D HMK-200RT; Motion Analysis を用い，頭頂部，左右肩，右肘，右手首，右手第 3PIP 関節（近位指節間関節），左右大転子，左右膝，左右足首，左右足第 5MP 関節（中手指節間関節）の 14ヶ所の位置座標を測定する．モーションキャプチャのサンプリングレートは 60Hz である．得られた各位置座標を用いて，ダーツ投擲時の投擲側肘関節角度を算出する．6 軸反力センサ Nitta Corp. で得られた両足部からの床反力データを用いて，体重移動の度合いを測定する．この実験において，被験者はマークスーツを着用する．14 個のすべてのマークのマーク番号と位置の対応は，図 2 に示す．

3.2 実験手順

本研究の目的である，ダーツ投擲動作時の上肢・下肢協調動作度合を調べるために，距離に応じた投擲動作の変化を調べる．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 2.4m, 4.8m の 2 段階変化させて (図 3)，2.4m, 4.8m, 4.8m, 2.4m の順で計 4 回試行を行う．1 試行は 35 秒間で，6 回ダーツを投擲してもらう．ダーツ的の中心は，床から 1.73m の高さで，ダーツ的の直径は 0.5m である．被験者には，的の中心を狙って矢を投げてもらう．

3.3 対象

本実験には，合計 3 名の健常な右手が利き手の若者男性 (年齢 22, 身長 $1.72 \pm 0.02\text{m}$, 体重 $62 \pm 5\text{kg}$) が参加した．いずれの被験者も過去に手術・けが歴はなく，ダーツに熟練した者はいない．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．

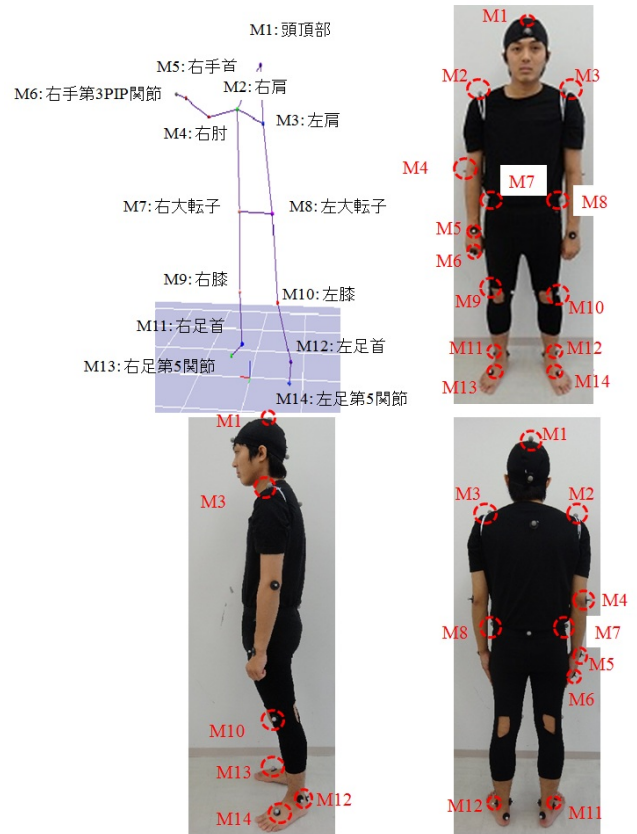


図 2 マーカ位置とマーカ名

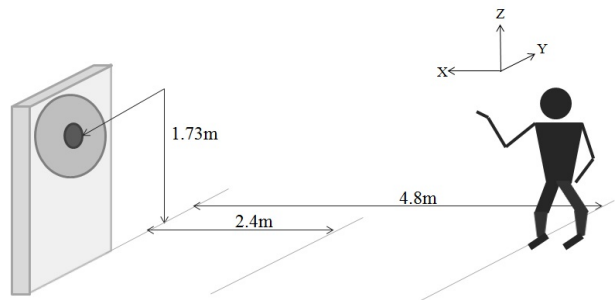


図 3 実験系

3.4 実験結果

投擲側肘関節角度 ($\theta_{elbow}(t)$) は， $\mathbf{v}_{M4,M2}(t)$ と $\mathbf{v}_{M4,M5}(t)$ より算出した．投擲手首関節角度 ($\theta_{wrist}(t)$) は， $\mathbf{v}_{M5,M4}(t)$ と $\mathbf{v}_{M5,M6}(t)$ より算出した．

前足膝関節角度 ($\theta_{r.knee}(t)$) は， $\mathbf{v}_{M9,M7}(t)$ と $\mathbf{v}_{M9,M11}(t)$ より算出した．前足首関節角度 ($\theta_{r.ankle}(t)$) は， $\mathbf{v}_{M11,M9}(t)$ と $\mathbf{v}_{M11,M13}(t)$ より算出した．

後足膝関節角度 ($\theta_{l.knee}(t)$) は， $\mathbf{v}_{M10,M8}(t)$ と $\mathbf{v}_{M10,M112}(t)$ より算出した．後足首関節角度 ($\theta_{l.ankle}(t)$) は， $\mathbf{v}_{M12,M10}(t)$ と $\mathbf{v}_{M12,M14}(t)$ より算出した．

肘関節角度が最大となるフレームから，前 12 フレーム ($m=12$)，後 5 フレーム ($n=5$) を 1 回の投擲動作として定義し，総タイムステップ (T_{total}) は 18 とした．

表 1 上肢と下肢の相互相関係数

	投擲距離	F_r	F_l	$\theta_{r.knee}$	$\theta_{l.knee}$	$\theta_{r.ankle}$	$\theta_{l.ankle}$
θ_{elbow}	2.4m	0.51±0.34(*)	-0.64±0.30(*)	0.25±0.68(*)	-0.13±0.64	0.32±0.68(*)	0.22±0.64(*)
	4.8m	0.63±0.35(*)	-0.65±0.28(*)	0.23±0.69	0.16±0.65	0.31±0.63(*)	0.09±0.72
θ_{wrist}	2.4m	0.05±0.49	0.05±0.50	-0.10±0.51	-0.07±0.44	-0.09±0.52	0.16±0.45(*)
	4.8m	-0.06±0.43	0.15±0.41(*)	-0.08±0.42	0.09±0.36	-0.14±0.46	0.15±0.44

上肢・下肢協調度合いの定量的な評価手法を提案するため、表 1 に示したように、投擲動作を担う上肢の運動として、投擲側肘関節と投擲側手首関節の角度変位、下肢の運動として、体重移動による床反力の変位、または下肢の膝関節と足首関節の角度変位を基に、上肢・下肢から得られたそれぞれのデータ間の相互相関係数を求めた。以下に、上肢・下肢協調度合いを比較する際に対象となるデータの名称を示す。

- ・投擲側肘関節角度変位 θ_{elbow} (上肢)
- ・投擲側手首関節角度変位 θ_{wrist} (上肢)
- ・前足膝関節角度変位 $\theta_{r.knee}$ (下肢)
- ・前足足首関節角度変位 $\theta_{r.ankle}$ (下肢)
- ・前足床反力変位 F_r (下肢)
- ・後足膝関節角度変位 $\theta_{l.knee}$ (下肢)
- ・後足足首関節角度変位 $\theta_{l.ankle}$ (下肢)
- ・後足床反力変位 F_l (下肢)

上肢の投擲側肘関節角度と下肢の計測データから、 $R(\theta_{elbow}, F_r)$ 、 $R(\theta_{elbow}, F_l)$ 、 $R(\theta_{elbow}, \theta_{r.knee})$ 、 $R(\theta_{elbow}, \theta_{l.knee})$ 、 $R(\theta_{elbow}, \theta_{r.ankle})$ 、 $R(\theta_{elbow}, \theta_{l.ankle})$ として相関係数を求めた。上肢の投擲側手首関節角度と下肢の計測データから、 $R(\theta_{wrist}, F_r)$ 、 $R(\theta_{wrist}, F_l)$ 、 $R(\theta_{wrist}, \theta_{r.knee})$ 、 $R(\theta_{wrist}, \theta_{l.knee})$ 、 $R(\theta_{wrist}, \theta_{r.ankle})$ 、 $R(\theta_{wrist}, \theta_{l.ankle})$ として相関係数を求めた。その後、算出された相関係数のデータを用いて相関があるという仮説のもと t 検定を行った。なお、本研究では有意水準を $p=0.05$ とする。

t 検定により有意差ありと判断されたデータのうち、肘伸展角度と前足反力に最も大きい正の相関係数が見られ、肘伸展速度と後足反力に最も大きい負の相関係数が見られた。すなわち、本研究で計測された肘伸展速度と前足反力・後足反力の相関係数に着目して、上肢・下肢協調度合いの評価を行うこととした。

各被験者の投擲側肘伸展開始時から投擲側肘伸展終了時までの、投擲側肘関節角度と前足床反力との相関係数を図 4(a) に示し、投擲側肘関節角度と後足床反力との相関係数を、図 4(b) に示す。各被験者の隣接した 2 本の棒グラフについて、左側の色付き棒グラフが投擲距離 2.4m、右側の無色棒グラフが投擲距離 4.8m を表しており、上下のエラーバーが標準偏差を表している。

被験者 1 において、投擲距離 2.4m のとき、計 12 投擲の相関係数の平均は 0.66 ± 0.21 となり、投擲距離 4.8m のとき、計 12 投擲の相関係数の平均は 0.85 ± 0.10 となった。また、被験者 2 においては、投擲距離 2.4m のとき、計 12 投擲の相関係数の平均は 0.23 ± 0.38 となり、投擲距離 4.8m のとき、計 12 投擲の相関係数の平均は 0.62 ± 0.43 となった。

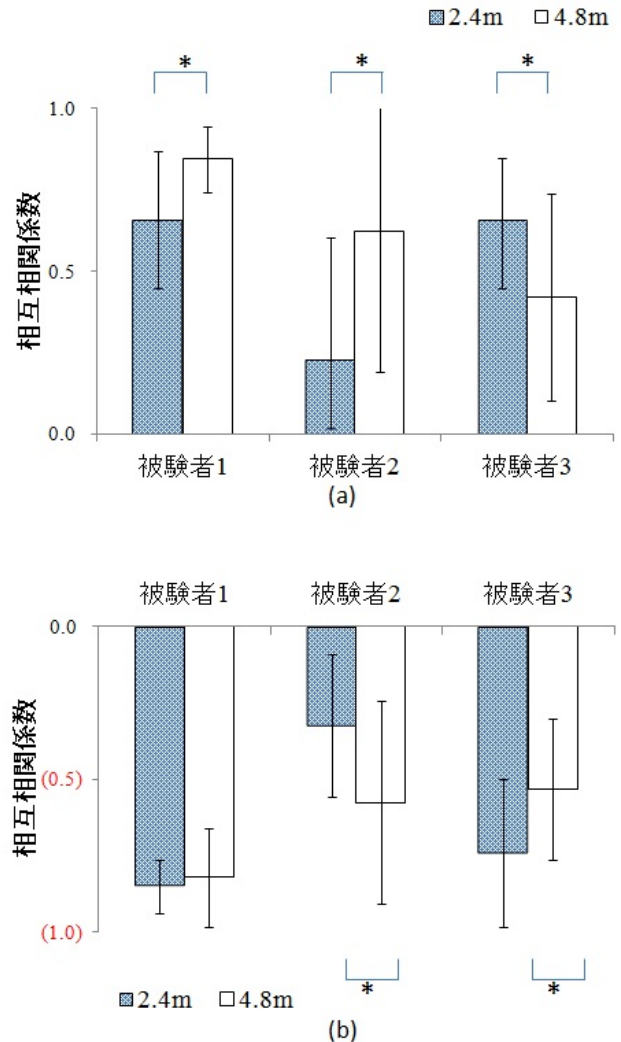


図 4 相関係数の結果 (a) 投擲側肘関節角度と前足床反力との相関係数 (b) 投擲側肘関節角度と後足床反力との相関係数

被験者 1, 被験者 2 において、図 4(a) に示したように、投擲距離が長い方とき、投擲距離が短いときと比べて相関係数の値は有意に大きい。被験者 3 においては、投擲距離 2.4m のとき、計 12 投擲の相関係数の平均は 0.66 ± 0.19 となり、投擲距離 4.8m のとき、計 12 投擲の相関係数の平均は 0.42 ± 0.32 となり、投擲距離の短い試行が、投擲距離の長い試行に比べて、相関係数が有意に大きくなった。

被験者 3 は、図 5(f) より投擲距離が遠くなると、投擲動作初期に両足に同じ力を床方向に加え、上下方向

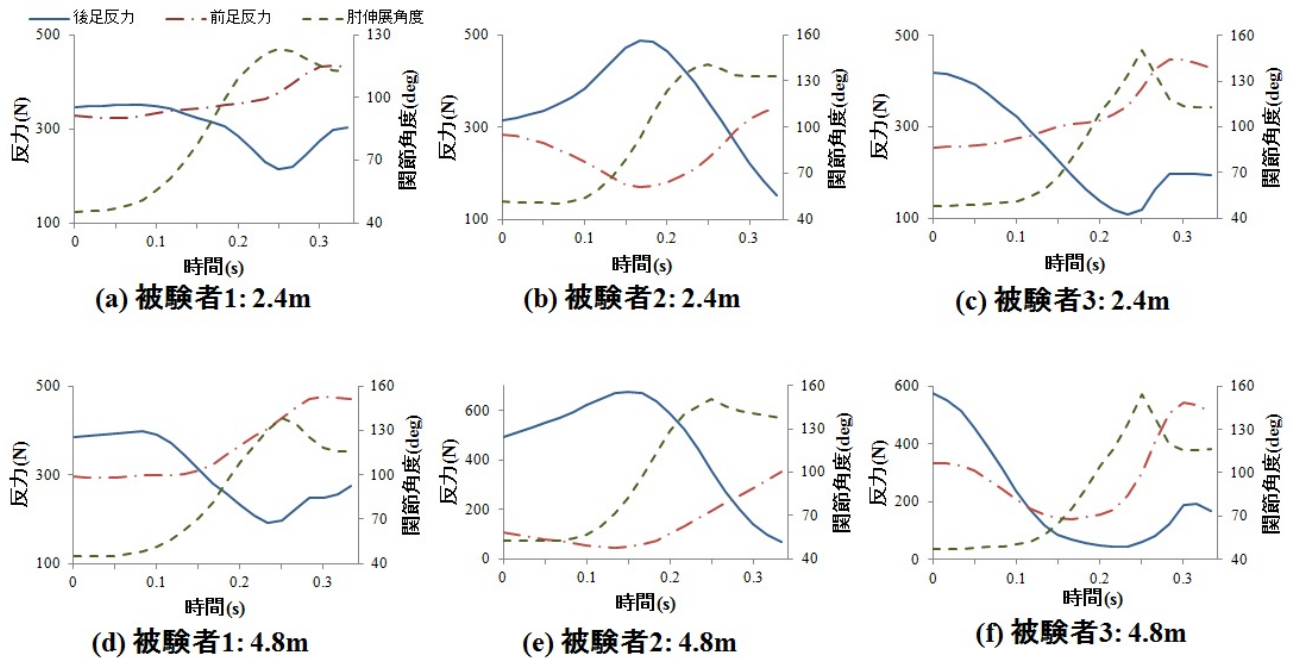


図5 投擲時の投擲側肘関節角度と体重移動の関係

の力で投擲を行っており、左右の体重移動を用いた投擲を行っていないことが考えられる。しかし、被験者3においても、投擲距離が短い試行、投擲距離が長い試行とともに、相関係数は有意に大きく、被験者3の投擲動作も上肢・下肢協調動作であることが示唆された。

図4(b)より、被験者1において、投擲距離2.4mのとき、計12投擲の相関係数の平均は -0.85 ± 0.09 となり、投擲距離4.8mのとき、計12投擲の相関係数の平均は -0.82 ± 0.16 となった。被験者1は、距離による投擲側肘関節角度と後足床反力との相関係数に有意差はないものの、距離の大小に関わらず、いずれも大きい負の相関を示している。

被験者2において、投擲距離2.4mのとき、計12投擲の相関係数の平均は -0.32 ± 0.23 となり、投擲距離4.8mのとき、計12投擲の相関係数の平均は -0.58 ± 0.33 となった。被験者2は、投擲距離の長い試行が、投擲距離の短い試行に比べて、相関係数の絶対値が有意に大きくなることがわかった。

被験者3において、投擲距離2.4mのとき、計12投擲の相関係数の平均は -0.74 ± 0.24 となり、投擲距離4.8mのとき、計12投擲の相関係数の平均は -0.54 ± 0.23 となった。被験者3は、投擲距離が短い試行が、投擲距離が長いときに比べて、相関係数の絶対値が有意に大きくなった。

しかし、被験者3の場合でも、投擲距離が短い場合、投擲距離が長い場合ともに、相関係数は有意に大きく、被験者3の投擲動作も上肢・下肢協調動作であることが示唆された。いずれの被験者においても、投擲側肘伸展角度と前足床反力との間には正の相関が得られ、後足床反力との間には負の相関が得られた。

4. 結論

ダーツ投擲動作時の上肢・下肢協調度合いの定量的な評価は、投擲側肘関節角度と前足床反力との間に正

の相関、投擲側肘関節角度と後足床反力との間に負の相関があるかどうかを調べることで行えることが示唆された。

今後は、より高精度な上肢・下肢協調度合いの定量的評価法を提案するために、運動学的な観点からだけでなく、筋電計を用いることで計測データを増やし、生理学的な観点からの協調度合い評価を行う。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究(B)24300198の助成を受けたものである。

参考文献

- [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 2012/7/19).
- [2] 中島愛, 池田誠: “訪問リハビリテーションにおけるPT・OTの協業に関する調査研究” 理学療法科学, vol.25, no.4, pp.645-648, 2010.
- [3] Dietz, V., Fouad, K. and Bastiaanse, C. M.: “Neuronal Coordination of Arm and Leg Movements during Human Locomotion” *The European Journal of Neuroscience*, vol.14, no.11, pp.1906-1914, 2001.
- [4] Timmann, D., Lee, P., Watts, S. and Hore, J.: “Kinematics of Arm Joint Rotations in Cerebellar and Unskilled Subjects Associated with the Inability to Throw Fast” *The Cerebellum*, vol.7, no.3, pp.366-378, 2008.
- [5] Yamaguchi, H. and Kondo, T.: “Analysis of Motor Skills for Throwing Darts: Measurement of Release Timing” *Proceedings of the SICE Annual Conference 2011*, pp.2105-2110, 2011.