

## [研究助成 (A)]

## 遊具で遊ぶ子どもの動作から運動制御能力を評価するシステムの開発

2231017



研究代表者

広島大学  
大学院人間社会科学研究科

准教授

進矢 正 宏

## [研究の目的]

自分の意志に基づいて「やりたいことができる」という運動制御の能力は、人間の生活の質や幸福に直結する重要な能力である。運動制御や姿勢制御能力は、幼少期の多様な運動経験を通して獲得されるが、今日の我が国では、こどもの運動機会の確保は必ずしも容易でない。現状、乳幼児健診やスポーツテストは、定性的な評価や結果のみの数値化であり、筋力・神経制御のいずれが原因か、といった分析は行えず、定量的評価方法の確立が求められている (reviewed in 進矢 2024)。

運動制御や姿勢制御を定量的に研究するためのゴールドスタンダード技術はモーションキャプチャーである。従来のバイオメカニクス研究では、教示によって統制された動作を、光学式モーションキャプチャーによって計測していた。しかしながら、こどもを対象とした研究では、教示文によって動作がぎこちなくなってしまう、あるいは、こどもがマーカーを嫌がりマーカーを外してしまうといった計測上の問題があった。また、統制されていない自由行動中の動作から、定量的な姿勢制御指標を算出できていなかった。

以上を踏まえ、本研究では、マーカーレスモーションキャプチャーを用いることで、最小限の介入で、こどもの自然な動作をモーションキャプチャーするという計測における課題を解決し、重心の動的安定性解析を用いることで、

厳密な統制をしない動作から、ロバストな運動制御能力の指標を算出するという、解析における課題を解決し、幼児の運動制御能力を定量的に評価する手法を確立することを目的とした。

## [研究の内容、成果]

## 1. 予備実験

こどもの自然な動作データを計測する上で、直線歩行および非直線歩行の他、滑り台・ブランコ・飛び石歩きなど、さまざまな屋内遊具を用意して、動作データの撮影を試みた。それらの動作のうち、計測の安全性と、慣れない空間でも動作課題が行える、という点を踏まえて、非直線歩行における動的安定性指標の算出を、主たる計測課題として選び、1-6歳のこどもと、対象群として成人の被験者を対象に、歩行動作の撮影を行った。

## 2. 歩行課題

## 2.1. 成人を対象とした計測課題

室内に設けた7mの直線歩行路を歩く直線歩行課題と、5m地点に設置したミニコーンを旋回してスタート地点に戻る旋回歩行課題を設定した。旋回方向は、時計回りと反時計回りの両方を実施した。「普段通りの歩きやすい速度で歩いてください」という教示を与えた通常歩行条件に加え、通常歩行条件における歩行時間からおおよそ30%増減させた歩行時間を目安に

歩いてもらう、高速歩行条件および低速歩行条件を設定した。

### 2.2. 4-6歳の幼児を対象とした計測課題

言葉による教示がある程度可能な幼稚園年少から年長にかけての幼児を対象とした際は、成人と同様、直線歩行および、時計回り・反時計回りでの旋回歩行課題を行った。大人と異なる点として、歩行速度に関して、歩行時間の目安を提示しての一貫した教示は行わなかった。代わりに、「走らないでいちばん速く歩いて」「もう少し遅く歩いて」「もう少し速く歩いて」といった声掛けを行い、様々な歩行速度での旋回歩行の計測を行った。

### 2.3. 1-3歳の幼児を対象とした計測課題

1歳から3歳までの幼児を対象とした場合は、言葉による明確な教示は不可能であるため、保護者や実験スタッフによる声掛けや、計測空間に並べたおもちゃを取りにいってもらおうといった、間接的な誘導を行うことで、直線歩行および非直線歩行の計測を行った。

## 3. 動作計測

### 3.1. 成人を対象とした計測

アクションカメラ (DJI OSMO Action 3) 4台を用いて、歩行動作の撮影を行った (FHD, 240 fps)。また、アクションカメラでの撮影と並行して、全身に59個の反射マーカを貼付し、240 Hzでのモーションキャプチャー (Qualisys, Miquis M3 camera) を実施した。なお、支持基底面の定義のため、足部には、8か所のマーカを貼付した。

### 3.2. 4-6歳児を対象とした計測

成人と同様、アクションカメラでの撮影を行った。また、反射マーカを貼付しても嫌がらない幼児に対しては、マーカ数を26個に削減した上で、モーションキャプチャーを実施した。

### 3.3. 1-3歳児を対象とした計測

1-3歳児は、マーカを貼付しても自ら外してしまうことが多いため、アクションカメラで

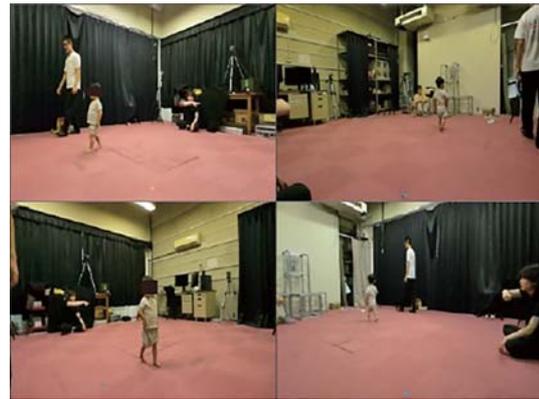


図1 アクションカメラで撮影したRGB動画の例。被験者は月齢21月。

のマーカレスモーションキャプチャーのみを実施した (図1)。

## 4. データ分析

### 4.1. 三次元動作データ

アクションカメラで撮影した動画を対象に、OpenPose (ver 1.7.0) を用いてマーカレスでの姿勢推定を行った (図2)。続いて、Direct Linear Transformation (DLT法) により、三次元動作データを得た (図3) (Yoshimoto et al. 2023)。成人被験者および、反射マーカを用いたモーションキャプチャーを行った4-6歳児被験者のデータを用いて、マーカレスモーションキャプチャーを用いた動作計測の妥当性を確認した。

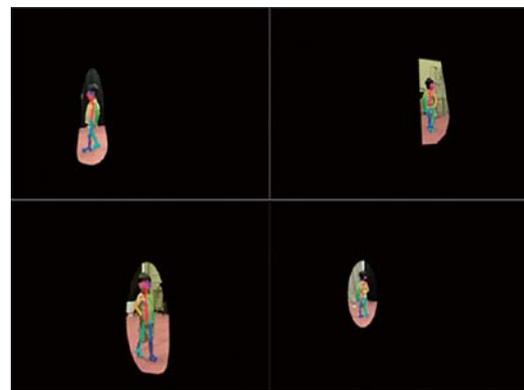


図2 各カメラで撮影した映像において、同時に映り込んでいる大人などの背景をマスクした上で、OpenPoseを適用して、歩行中のこどもの姿勢推定を行った。

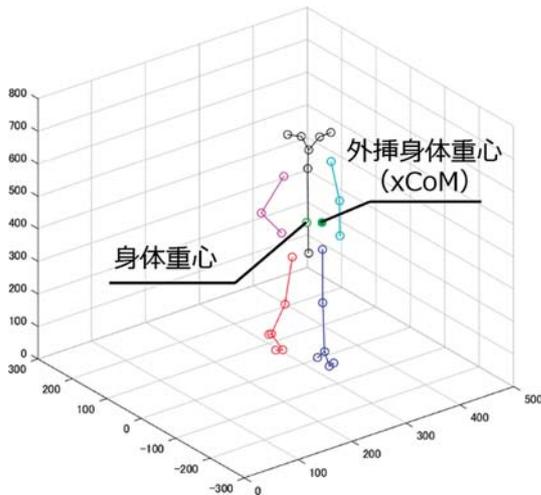


図3 DLT法によって得られた三次元動作データ

#### 4.2. 重心位置および外挿重心位置

三次元動作データから、成人は Winter (2009), 幼児は Jensen (1986) の身体パラメータを用いて、重心位置を推定した。重心位置を数値微分し、重心速度を算出した後、Hof (2005) に従い、外挿重心位置 (extrapolated Center of Mass: xCoM) を算出した。

#### 4.3. 安定マージン

Hof (2005) に従い、xCoM と支持限界 (支持基底面の端) との差を計算し、安定マージン (Margin of Stability: MoS) とした。反射マーカーを用いたモーションキャプチャーデータが得られている試行に対しては、踵骨の内外側、第一・第五中足骨頭および親指のうち、接地している部分からなる凸包として、支持限界を定義した。マーカーレスモーションキャプチャーを用いた試行に対しては、推定された親指・小指・踵をもとに、事前に計測した足幅を考慮に入れた台形状の足部モデルを用いて、支持限界を定義した。

#### 4.4. 歩行経路の推定とローカル座標系の定義

歩行研究では、歩幅や歩隔といった従来型の歩行変数や、xCoM や MoS といった動的安定性指標は、前後軸 (anterior-posterior: AP) と内外側軸 (medio-lateral: ML) に分けて分析され、論じられてきた。課題が直線歩行の場合は、歩行路の進行方向を AP、それに直交する方向

を ML として、自明に定義できる。非直線歩行課題においても、研究者側が歩行経路を定義している場合は、その歩行路の接線・法線方向を用いて AP・ML 軸を定義することが可能である一方、被験者が自由に歩行経路を決定する場合は、AP・ML 軸を定義するために、まずは歩行路を推定する必要がある。本研究では、最新の研究事例 (Dingwell et al. 2023) に従い、重心の移動経路を六次多項式で近似することで歩行経路を推定した。次いで、歩行経路上における、重心位置との最近傍点を算出し、その点における歩行経路の接線および法線方向として、AP・ML 軸もつローカル座標系を定義した。

#### 4.5. 歩行変数の分析

踵および中足骨マーカー座標を数値微分して移動速度を計算した後、その鉛直成分が 50 mm/s を下回る、または上回る時刻を、着地および離地と定義した。以下、右足ステップにおける歩行変数の分析手順を説明する (左右を反転させることで左足ステップの分析手順となる)。左足着地から右足着地までの期間を、右足ステップ期間と定義した。左足着地時から右足着地時までの歩行経路長を所要時間で除したものを、ステップ速度と定義した。左足着地時における歩行経路の接線方向と、右足着地時に

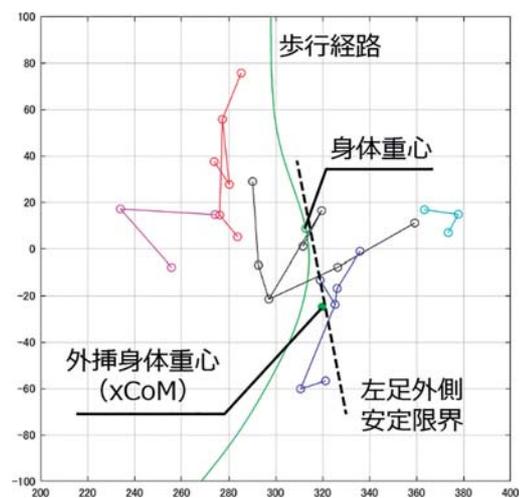


図4 重心の動的安定性解析。外挿身体重心位置 (xCoM) と安定限界の相対的な位置関係を、歩行経路に沿った座標系で評価する。図には、月齢21月の幼児の歩行例を示した。xCoM が安定限界付近に位置しており、動的に不安定な局面であることが分かる。

における歩行経路の接線方向との差分を、そのステップにおける旋回角度と定義した。左足着地位置から右足着地位置までの変位を、左足着地時のローカル座標系で表現することで、ステップ距離とステップ幅を得た。

重心の動的安定性の指標として、着地時および離地時の MoS を、ローカル座標系において定義された AP・ML 軸に沿って算出した (図 4)。

## 5. 結果・考察

成人・幼児に共通して、非直線歩行では直線歩行と比較してステップ距離は短かった。また、旋回角度とステップ速度の間には、旋回角度が急なほど歩行速度が遅くなるという、負の相関関係が観察された。これらの結果は、月齢 20 ヶ月といった 2 歳に満たない幼児の段階で、直線でない歩行経路を選択する際に、歩行速度を減らすという制御が行われているということを示唆しており、転倒のリスクを減らすための機能的な戦略が、歩き始めてから 1 年未満の段階において実施されているということを示唆している。一方で、幼児における旋回角度と歩行速度との間の相関の程度は、成人におけるそれよりも低く、幼児における非直線歩行は、成人と比較して計画性や精確性に乏しいという可能性が示唆される。

成人の非直線歩行時の MoS は、旋回角度が急になると、ML 方向において負の値を示した。これは、直線歩行時において AP 方向の MoS が負になると同様に、重心が移動方向に倒れるダイナミクスを利用していると考えられる。幼児においても同様の傾向が観察されたが、成人と比較して、xCoM は支持基底面に近い場所に位置することが多かった。この結果は、幼児は、移動方向に向かって意図的にバランスを崩しながら歩くというメカニクスを十分には活用できていないということを示している。成人の歩行では、xCoM や MoS の値は、旋回角度と歩行速度が決まれば、同一被験者内では同等の

値をとることが多かった一方で、幼児においては、動的安定性指標に大きなばらつきが観察された。すなわち、歩幅を広くとって MoS が大きな正の値をとるステップがある一方で、図 4 に示されているように、xCoM が移動方向とは関係ない方向の支持限界に近づくような不安定な重心状態も観察された。これらの結果は、典型発達児の初期の歩行において、内外側方向が不安定であり、動作が大きくばらついているということが示しており、直線歩行動作を対象に、歩行中の重心制御能力の発達過程を分析した先行研究 (Hallemans et al. 2018) と定性的に一致している。

## 6. 今後の課題

技術的に改善の余地がある点として、撮影からマーカーレスモーションキャプチャーをかけるまでの前工程の省力化が挙げられる。4 歳未満の幼児を対象として実験を行う際は、安全管理やモチベーションの維持のために、親や実験スタッフが近くに寄り添う必要がある。撮影した映像に複数人が映り込んだり、同じ画像内で幼児と大人が映っている位置が重なったりすると、必ずしもマーカーレスモーションキャプチャーの精度が低下するため、撮影した映像から分析可能な区間をクリップしたり、子供が映っている部分以外をマスク処理したりする必要がある。今後は、OpenPose 以外のソフトの使用や、子供が単独で映っているフレームの自動認識、あるいは、こどもが独りで歩きたくなるような実験環境の構築など、ソフト・ハードさまざまな観点からの効率化を進めていく予定である。

### [引用文献]

- 進矢正宏 (2024). 幼児期における二足立位歩行の発達. 体育の科学=J Heal Educ Recreat 74, 81-85.
- Yoshimoto K, Mani H, Hirose N, Kurogi T, Aiko T & Shinya M (2023). Dynamic stability during level walking and obstacle crossing in children aged 2-5

- years estimated by marker-less motion capture. Front Sport Act Living 5, 1-12.
- Winter DA (2009). Biomechanics and motor control of human movement. John Wiley Sons.
  - Jensen RK (1986). Body segment mass, radius and radius of gyration proportions of children. J Biomech 19, 359-368.
  - Hof AL, Gazendam MGJ & Sinke WE (2005). The condition for dynamic stability. J Biomech 38, 1-8.
  - Dingwell JB, Render AC, Desmet DM & Cusumano JP (2023). Generalizing stepping concepts to non-straight walking. J Biomech 161, 111840.
  - Hallemans A, Verbecque E, Dumas R, Cheze L, Van Hamme A & Robert T (2018). Developmental changes in spatial margin of stability in typically developing children relate to the mechanics of gait. Gait Posture 63, 33-38.

[研究成果]

国内学会発表

- 秦一真, 進矢正宏 「歩行速度が直線・旋回歩行のステップパラメータに与える影響」広島体育学会令和5年度研究発表例会
- 平野絢子, 進矢正宏 「歩行速度に応じた非直線歩行中の重心の動的安定性」広島体育学会令和5年度研究発表例会
- 小林貫太, 進矢正宏 「異なるステップ距離における重心の前後方向の動的安定性戦略」日本体育・スポーツ・健康学会第73回大会

学術誌総説等

- 進矢正宏 「幼児期における二足立位歩行の発達」体育の科学 74 巻 2 月号「乳幼児期の脳・身体運動の発達」, pp. 81-85 2024 年 2 月 10 日 杏林書院
- 吉本航平, 進矢正宏 (2023) 「障害物跨ぎ歩行計測におけるマーカレスモーションキャプチャ」バイオメカニズム学会誌 Vol. 47, No. 2 (2023), pp. 117-122
- 柳原大・真鍋清則 編著 (2023); 進矢正宏 「4 章 転倒に関わる運動制御：健常者における実験から」転倒と転倒予防のブレインサイエンス pp. 51-63