



Title	全身性動作における体重心移動のダイナミクス [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	佐藤, 洋一郎
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(教育学)
Dissertation Number	甲第12446号
Issue Date	2016-09-26
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/63775
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Yoichiro_Sato_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（教育学）

氏名 佐藤 洋一郎

学位論文名

全身性動作における体重心移動のダイナミクス

動作に関する研究の教育学的な意味は、小中学校の児童や生徒に対する運動指導の一助となることや高齢者などに対する介護予防の体操教室での体操指導の一助となることなどが挙げられる。動作は運動行動の1つであり、目的を持った身体運動である。全身性の動作における目的は、全身の代表点である体重心の移動であると定義する。ここで、全身性の動作とは、立ち上がりや歩行などの全身の関節を使って移動を行う動作をさすこととする。これらの定義のもと、本研究は、全身性動作における体重心の移動がどのようなダイナミクスで成立しているかを明らかにすることを目的とした。

全身性の動作を中枢神経系が制御するとき、関節運動や筋活動がもつ自由度もしくは制御の対象が膨大になるという自由度の問題（Bernstein, 1967）が浮かび上がる。この問題に対して、上肢運動においては、課題に応じた手先の軌道を中枢神経系が制御しており、その手先軌道を生成するために、関節運動は協調して組織化していると結論付けられている（Todorov and Jordan, 2002）。一方、全身性動作においては、Uncontrolled manifold アプローチ（Scholz and Schöner, 1999; Scholz et al., 2001）が、中枢神経系が制御しているのは体重心の移動であると提言した。さらに、その体重心の移動は課題に依存した形として制御されているとも提言した。ただし、この課題依存性の体重心移動に関する提言は、同じ動作を繰り返すことでの試行間のばらつきの程度から検討されており、条件の違いによる体重心の移動を検討していないため、課題に依存しているかどうかを明言できていない。また、課題に依存した体重心の軌道は、最適化理論によって何らかのコストを最小にするものであると意味づけされており（Sadeghi et al., 2013; Yamasaki et al., 2014）、このことは、全身性動作における体重心の軌道は、体重心の移動にかかわるエネルギーの消費が最小になるような形であることを示唆している。すなわち、体重心の移動にかかわる関節運動や力は、エネルギーを最小にするようなメカニズムで体重心の移動に作用していると考えられる。しかし、全身性動作における関節運動や床反力などの力がどのように体重心の移動に寄与しているかについての課題が残っている。そこで、これらのことを検討するために本研究では3つの実験を設定した。

実験1は、運動の条件を変化させたときに体重心の移動により生成される軌道が課題に依存するかどうかを検討して、さらに体重心の移動が関節運動とどのような相互関係を示すか明らかにすることを目的とした。健常男性8名を対象とし、課題は終了肢位における体幹の屈曲角度を5つ設定したしゃがみ込み動作とした。三次元動作解析装置で記録された全身の骨指標の座標から体重心位置座標と下腿、大腿および体幹の傾斜角度を算出した。体重心の軌道の形は、統計学的に体幹の角度条件間に有意な差はなく、課題に依存した形を示した。また、体節間の角度の関係については、終了肢位における体幹の屈曲角度の増加に伴って、下腿の傾斜角度は減少した。一方、大腿の角度は体幹の屈曲角度によらず一

定の値（おおよそ 40° ）を示した。これらの知見は、体幹の運動条件によらず同様の体重心軌道を示したこと、全身性の動作における体重心の移動は課題依存性の形を示すことを示唆した。さらに、課題に依存した体重心の移動を形成するために、関節運動は柔軟に変化することを示唆した。

実験 2 は、全身性の動作において定型的に観察される関節運動（立脚相の膝関節屈曲運動）が、体重心の移動に対して力学的な法則を利用して寄与しているという仮説を検証することを目的とした。健常者 11 名を対象とし、2 枚の床反力計の上を歩かせたときの全身の骨指標の運動を高速カメラ 1 台で記録した。床反力値の 2 回積分から体重心の位置変化を算出し、骨指標の位置座標から膝関節の角度が算出された。また、膝関節の屈曲運動がパラメータ励振を利用しているかどうかを検討するために、体重心と足関節間の距離を求めた。さらに、体重心と足関節の距離短縮と体重心前方移動との関係を検証するために、可変長の逆振り子モデルを利用した。実験の結果は、膝関節が屈曲するタイミングで体重心と足関節との距離が短縮し、さらに同じ局面において体重心の前方への移動速度の上昇を示した。モデルによるシミュレーションの結果は、棒部分の長さが短くなる局面において、棒の角速度と体重心を仮定した質点の前方への速度が増加した。これらの知見から、立脚相の膝関節屈曲運動は、前方への回転運動中に体重心と足関節との距離を短くしてパラメータ励振という力学的な現象を利用していると考えられた。さらに、そのパラメータ励振によって体重心にコリオリ力が発生することで、体重心を前方へ加速させて、体重心の移動にかかわるエネルギー消費の効率を高めていると考えられる。

実験 3 は、両脚がどのようなタイミングで力を入れることで体重心の前方移動へ寄与しているかどうかを明らかにすることを目的とした。対象は、健常者 11 名とし、床に埋め込まれた床反力計の上を自然な速度で歩かせた。記録された床反力の値から、ヒルベルト変換によって算出された実部と虚部を用いて前後脚における垂直成分と前後成分それぞれの瞬時位相を求めた。すなわち、実部と虚部からなる複素平面内において各成分における前後脚それぞれの瞬時位相を求めた。さらに、各成分において求められた瞬時位相から前後脚の相対位相を算出した。結果としては、床反力の垂直成分は両脚支持相全体を通しておおよそ 180° の相対位相であり、一方で前後成分はおおよそ 40° から 50° 程度の相対位相であった。垂直成分については、前後脚の相対位相は逆位相となり、後脚の力の減少にともなって、前脚の力が増加していることを示している。このことは、後脚から前脚へ滑らかに荷重量が移行したことを示唆している。一方、前後成分については、垂直成分よりは明らかに小さな値を示し、このことは絶妙なずれを生じさせながら体重心の前方移動へ寄与していることが示唆された。

これらの実験結果から、体重心の移動は課題に依存するような形として中枢神経系によって制御されており、それを構成する関節運動の組み合わせは、課題に依存した体重心の移動を実行させるために柔軟に変化できることが示唆された。また、体重心を移動させる関節運動は、力学的な現象を利用して体重心の移動に寄与しており、その移動にかかわるエネルギーの消費を減らすように寄与していると考えられた。さらに、両脚の地面に対する力は、絶妙なずれを生じさせながら体重心の前方移動へ寄与することでエネルギーの消費を減らしていることが示唆された。