

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 8 月 31 日現在

機関番号：21501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01421

研究課題名(和文) 歩行中の骨盤の動きが重心移動および機械的効率性に与える影響

研究課題名(英文) Effects of pelvic movement on center of gravity movement and mechanical efficiency during walking

研究代表者

神先 秀人 (Kanzaki, Hideto)

山形県立保健医療大学・保健医療学部・教授

研究者番号：10381352

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、骨盤の動きに制限を加えた時の歩行の機械的効率性や下肢・体幹の運動学的指標、下肢の筋活動に与える影響を明らかにすることを目的とした。健常若年者を対象に、装具などを用いて人工的に脚長差や股関節、膝関節および体幹の運動制限の状態を作り、歩行の運動学的指標や運動力学的指標に関して、制限のない場合と比較した。快適歩行速度においては、あらゆる条件において、下肢関節などに種々の代償運動が働き、歩行中の重心移動の機械的効率性が保たれることが示唆された。今回得られた結果は、加齢や種々の障害により形態異常や関節運動制限をきたした患者の歩行評価を行う上で、対照データとして有用な資料となり得ると考える。

研究成果の概要(英文)：We examined the effects of pelvic movement limitation on the mechanical efficiency of walking, the kinematic parameters of the lower limbs and trunk, and lower limb muscle activity. We asked healthy young adults to walk on a walking path under these conditions that artificially induced leg length discrepancy, restricted movement of the trunk, hip, or knee joint. The kinematic and kinetic parameters of walking were compared with those obtained without restriction. For comfortable speed walking, healthy young people showed that various compensatory movements worked on lower limb joints under any condition. The mechanical efficiency of movement of the center of gravity during walking was preserved. Results of this study are expected to be useful as control data for evaluating the walking of patients who have restricted or asymmetric movement of the pelvis caused by aging and various impediments.

研究分野：運動障がいの動作分析および理学療法

キーワード：歩行分析 骨盤運動 重心移動 機械的効率性 下肢装具 体幹装具 関節運動制限 脚長差

1. 研究開始当初の背景

我々は、これまで歩行中の重心移動に注目し、機械的効率性に関する研究を重ねてきた。その中で興味深い示唆として、運動学的所見と機械的効率性は必ずしも一致しないこと、重力(位置エネルギー)を身体の推進力(運動エネルギー)に変換するために重要な役割を果たす足部の回転運動に制限を加えた場合にも、他の部位による代償が働き、効率性が保たれることなどが挙げられた。これらの結果から、歩行中の機械的効率性^{1,2)}に直接的に関与する因子の抽出には至っていない。

本研究では、歩行中の重心移動に大きな影響を与えるとされている骨盤の動きに注目し、その動きに制限や種々の条件を加えた際に、重心の機械的効率性にどのような影響をもたらすかを、下肢・体幹の運動学的指標や下肢筋群の筋活動との関連の中で検討することを目的とした。

2. 研究の目的

(1) 研究 1: 脚長差及び膝関節伸展固定による歩行中の重心移動への影響

研究 1 の目的は、人工的な脚長差、および膝装具を用いて一側膝関節を伸展位に固定することで、左右非対称な骨盤運動を生じさせた時の、重心移動・エネルギー交換率に及ぼす影響、体幹、下肢の運動学、運動力学的パラメーターへの影響、下肢筋活動への影響を検討することである。

(2) 研究 2: 股関節運動制限による歩行中の重心移動への影響

研究 2 の目的は、股装具を使用して、股関節に伸展制限、外転制限、内転制限を加えることで、骨盤の動きに間接的に制限を加えた場合の重心移動・エネルギー交換率に及ぼす影響、下肢の運動学、運動力学的パラメーターへの影響を検討することである。

(3) 研究 3: 体幹の運動制限による歩行中の重心移動への影響

研究 3 の目的は、金属支柱を用いた固定性の強い体幹装具を使用して、体幹と骨盤の動きに、直接制限を加えた場合の重心移動・エネルギー交換率に及ぼす影響、下肢の運動学、運動力学的パラメーターへの影響を検討することである。

3. 研究の方法

(1) 研究 1 では、女性 7 例、男性 5 例の合計 12 例(年齢: 20-21 歳、体重 56.6 ± 4.0 kg、身長 164.8 ± 6.6 cm)を対象とした。片側の床面に 1~5cm の段差(右側高)を付け、人工的な脚長差を作った場合と膝装具を用いて右側膝関節を伸展位(0 度)に固定した場合の 2 つの歩行分析を行い、それぞれ裸足での対照条件と比較した。測定方法は、4 台の床反力計(Kistler 社)及び 3 次元動作解析装置(VICON MX T20)を備えた約 8m の歩行路上にて、各条件歩行を行わせ、制限の無い条件での歩行と比較した。3 次元動作分析は

Plug-In-Gait 全身モデルを使用し、身体に貼付した 35 個の反射マーカを 8 台の赤外線カメラで測定した。歩行速度は自分で楽と感じる歩き方(快適歩行)で歩くよう指示した。歩行中の各対象者の運動学、運動力学的パラメーターを収集するとともに、左右の脊柱起立筋(第 3 腰椎レベル)、中殿筋、外側広筋、ヒラメ筋の計 8 筋の筋活動を筋電計にて測定した(図 1)。

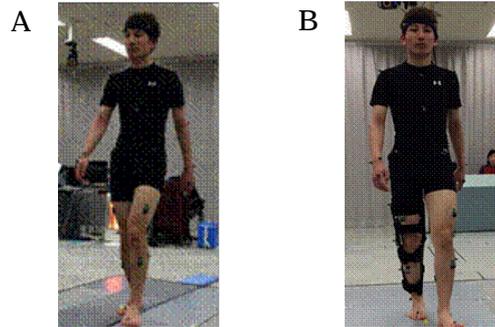


図 1. 研究 1 実験場面

A: 脚長差歩行, B: 膝伸展固定歩行

(2) 研究 2 の対象は、20-21 歳の女性 16 名(体重 54.3 ± 5.0 kg、身長 162 ± 6.6 cm)と男性 14 名(体重 62.4 ± 7.6 kg、身長 173 ± 6.5 cm)である。測定方法は、研究 1 と同様に、三次元動作解析装置および 4 枚の床反力計を使用した。股装具は既製の屈曲伸展運動範囲が調節可能な股装具(右側)に一定の外転、内転位固定できるよう改良を加えた。実験条件として、制限なし、右側股関節の伸展制限、右股関節内転 10 度固定、右股関節外転 10° 固定位での歩行を設定した。各条件における、重心移動と各エネルギー変化、骨盤・体幹、下肢の運動学、力学的パラメーターを算出し、条件間で比較した。今回の分析に当たっては、全てのパラメーターに欠損のない女性 8 例、男性 3 例の合計 11 例(体重 57.4 ± 6.7 kg、身長 164.8 ± 6.6 cm)を対象とした。

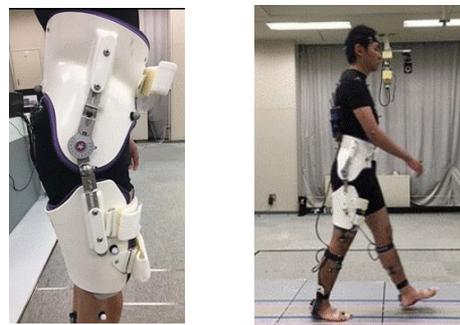


図 2. 研究 2 実験場面

使用した股装具と歩行測定場面。既製の屈曲伸展調節可能な股装具に、内転外転が一定範囲で固定、または制限なしの状態にできるように加工を加えた。

(3) 実験3では、女性14例(年齢:20-21歳、体重 53.6 ± 3.2 kg、身長 162.1 ± 6.3 cm)を対象とした。測定方法は、研究1と同様に、三次元動作解析装置および4枚の床反力計を使用した。実験に当たって、体幹と骨盤の動きを制限するための体幹装具として、既製の体幹の前屈を抑制する体幹装具(エムサポート社製、AFジュエツトブレース)に、固定強度を増すため、2本の金属製の後方支柱を使用して改良を加えた。腰椎前弯など異なる脊柱形態を有する個々の対象者に、装具が痛み無く適合できるように、後方支柱は骨盤部に対する伸展角度が5度、10度に調整された2種類を用意し、さらに角度調節用パッドと2本の固定ベルトを用いて調節した(図3)。

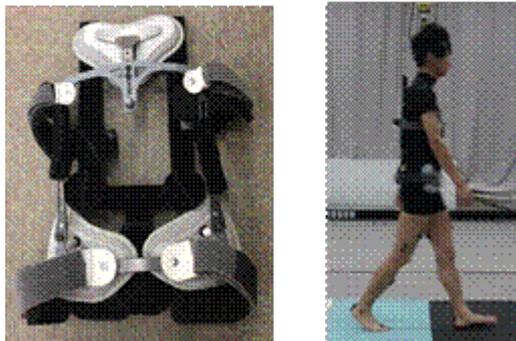


図3. 研究3実験場面
使用した体幹装具と歩行測定場面。

研究1~3の実験に当たっては、各対象者3試行の平均値を用いて、条件間で比較した。解析には、R2.8.1を使用し、Shapiro-Wilk検定にて、全ての変数が正規分布したとみなされた場合は、反復測定による分散分析を行い、有意差が認められた場合は、各水準間の差を、Shafferの補正による対応のあるt検定(多重比較法)で検定を行った。いずれかの変数が正規分布していない場合は、Friedman検定、およびWilcoxon検定(Holmの修正)による多重比較を行った。

研究開始に当たっては、公立大学法人山形県立保健医療大学倫理委員会の審査を受け、承認を得た(承認番号1512-18、承認年月日:平成27年12月1日)。

4. 研究成果

(1) 研究1(表1、2、図5):骨盤の前額面上の動きは、脚長差が大きくなるに従い、長脚(右)側への側方傾斜が減少し、変化量は脚長差5cmで1度(短脚側)~2度(長脚側)であった。骨盤と上部体幹のなす側屈角度は、骨盤の動きを反映し、脚長差が増すに従い長脚(右)側への側方傾斜が減少、短脚側への側方傾斜も5cmで有意に増大した。筋活動は脚長差が3cmになると、短脚側の中殿筋の活動が有意に増大し、5cmになると短脚側外側

広筋も増加を示した。また、脚長差増加に伴い、長脚側の足底屈筋群(ヒラメ筋)は減少するのに対し、短脚側では増加がみられた。重心移動に関しては、脚長差が大きくなるに従い、側方、上下方向の重心移動幅が増大するが、脚長差5cmに対して2cm程度の増加に抑えられていた。全例全試行の平均値を用いて、脚長差が0の時と5cmの場合の前額面上の重心軌跡(上段)、位置エネルギー(PE)、運動エネルギー(KE)、両者の和である総エネルギー(TE)の変化(中段)、仕事率の変化(下段)を図4に示した。右の立脚期に重心位置が高くなり、それに伴いPEとTEが高くなること、パワー曲線では、歩行周期の40~60%に生じる右足の蹴り出しによる仕事率の上昇が脚長差5cmでは認められなくなることが特徴として挙げられた。機械的効率性を示す、体重1kgを1m進行させるために必要な仕事量(Wt/kg/m)¹⁾は5cmで有意な増加を示したが、PEとKEのエネルギー交換率(Recovery)²⁾に関しては条件間に差はみられなかった。

膝固定時では、裸足または非固定時と比較して、骨盤の前後傾運動が増加し、長脚側への側方傾斜が減少した。胸椎部の短脚側への側方傾斜は増大、骨盤に対する胸椎部の最大伸展、および前後屈運動範囲、回旋運動範囲が増加を示した。筋活動は、長脚側の脊柱起立筋、前脛骨筋、短脚側の前脛骨筋の筋活動の増大がみられた。歩行中の重心移動は、裸足時に対して側方が約2cm、上下および前後方向で1cm程度の増大がみられた(表2)。

表1 研究(1)結果:脚長差による重心移動への影響

脚長差	0cm	1cm	3cm	5cm
歩行速度(m/min)	68.6±5.8	67.0±5.2	64.7±4.9	65.3±4.8
重心移動幅				
側方移動幅(cm)	2.3±0.9	3.8±0.7*	4.0±0.9*	4.4±0.9*
上下移動幅(cm)	3.2±0.7	3.4±0.6*	4.0±0.6*	5.0±0.7*
前後移動幅(cm)	2.2±0.4	2.3±0.4	2.5±0.4*	2.6±0.4*
骨盤側方傾斜				
右側方傾斜(度)	4.2±2.1	3.5±2.0*	2.5±1.9*	2.2±1.8*
左側方傾斜(度)	4.6±2.8	4.8±2.4	5.0±2.3	5.5±2.5
体幹側屈(骨盤に対する胸椎部側屈)				
右側屈(度)	6.0±3.2	4.8±3.3*	3.9±3.1*	3.7±2.8*
左側屈(度)	5.7±2.9	5.8±2.9	6.1±3.2	6.8±3.0*
筋活動(%MVC)				
右中殿筋(%)	17.3±7.8	18.2±7.8	17.9±7.8	18.1±7.9
左中殿筋(%)	20.6±10.2	21.2±9.5	22.5±9.9*	23.4±10.3*
右外側広筋(%)	38.2±19.0	40.2±20.0	39.9±1.1	41.3±17.9
左外側広筋(%)	24.9±10.2	27.9±11.1	27.9±10.8	31.7±12.8*
右ヒラメ筋(%)	23.8±6.9	20.9±5.3*	18.3±5.1*	16.7±4.7*
左ヒラメ筋(%)	37.3±18.9	39.3±21.2	43.5±24.1	51.5±31.2*
重心の仕事量				
Wt/kg/m(J/kg/m)	0.62±0.11	0.64±0.13	0.65±0.14	0.72±0.14*
エネルギー交換率				
Recovery(%)	67.1±3.3	67.6±4.2	67.6±4.6	66.6±3.5

*:脚長差0cm条件に対してp<0.05

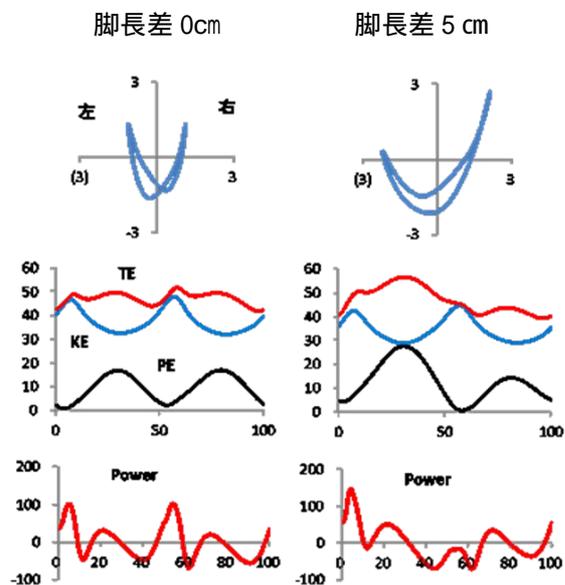


図4. 研究1結果(12例36試行の平均波形)
 上段: 前額面上の重心軌跡、中段: 歩行中の位置エネルギー(PE)、運動エネルギー(KE)、総エネルギー、下段: 仕事率の変化。

表2 研究(1) 結果: 膝関節固定による重心移動への影響

	裸足	膝装具フリー	膝伸展固定
歩行速度 (m/min.)	68.6±5.8	65.3±4.4*	60.6±4.8*†
歩行率 (step/mini.)	111.0±7.2	106.3±5.5*	97.6±5.8*†
重心移動幅			
側方移動幅 (cm)	2.3±0.9	3.4±0.8*	4.2±1.3*†
上下移動幅 (cm)	3.2±0.7	3.4±0.6	4.0±0.6*†
前後移動幅 (cm)	2.2±0.4	2.5±0.4*	3.2±0.7*†
骨盤			
前後傾運動範囲(度)	3.0±0.7	3.0±0.6	8.1±5.3*†
右側方傾斜(度)	4.1±2.0	3.8±2.0	2.8±5.0*†
胸椎部			
左側方傾斜(度)	2.6±2.5	1.7±1.3	3.7±2.2†
側方傾斜運動範囲(度)	4.3±3.7	3.0±1.7	5.4±2.4†
体幹(骨盤に対する胸椎部運動)			
最大伸展(度)	6.2±7.0	6.4±7.1	8.5±9.3*†
屈伸運動範囲(度)	4.5±1.4	5.0±1.4	11.6±6.1*†
回旋運動範囲(度)	15.6±5.7	14.0±4.0	18.0±5.6*†
筋活動(%MVC)			
右脊柱起立筋(%)	12.2±4.8	12.0±5.4	16.0±8.7†
左脊柱起立筋(%)	14.4±6.7	14.9±8.6	15.5±9.3
右中殿筋(%)	17.3±7.8	17.8±7.6	18.0±8.1
左中殿筋(%)	20.6±10.2	21.2±9.7	24.2±11.1
右前脛骨筋(%)	18.7±5.7	16.8±3.2	22.8±4.7†
左前脛骨筋(%)	19.1±6.5	19.5±7.2	21.4±6.8*†
重心の仕事量			
Wt/kg/m(J/kg/m)	0.62±0.11	0.65±0.13	0.53±0.12*†
エネルギー交換率			
Recovery (%)	67.1±3.3	67.2±3.2	71.2±3.7*†

*: 裸足条件に対してp < 0.05

†: 装具フリーに対してp < 0.05

(2) 研究2 (表3): 歩行速度や他の速度因子に関して4群間に差は認められなかった。歩行中の重心移動は、側方移動幅が外転固定時に有意に大きくなるが上下や前後方向の移動幅には有意な差はみられなかった。機械的効率性を示す体重1kg、進行距離1mに対する仕事量、および重心の運動エネルギーと位置エネルギーの交換率は、両者とも条件間による差はみられなかった。

股関節伸展制限装具により歩行中の股関節最大伸展角度が約10度減少した。この時の骨盤、体幹の矢状面上での運動に注目すると、無制限時と比較して、歩行中の絶対空間における骨盤の最大前傾角度が有意に増大し、運動範囲も増大した。骨盤に対する胸椎部角度は、逆に、伸展角度の大きな増大を示した。絶対空間における胸椎部屈伸角度には差を示さなかった。これらのことから、股関節伸展制限においては、骨盤の前傾で代償し、さらに骨盤に対して上部体幹を伸展させることで、体幹を直立位に保つような運動した動きを示すことがわかった。

股関節伸展時の下肢関節に注目すると、対側股関節の最大屈曲角度や内転角度の増大、外転角度の減少、同側外転角度の増大と内転角度の減少がみられた。

表3 研究(2) 結果: 股関節運動制限による重心移動への影響

	股装具フリー	伸展制限	外転固定	内転固定
歩行速度 (m/分)	69.5±5.6	67.5±6.1	67.1±7.5	69.7±6.4
重心移動幅 (cm)				
側方移動幅	2.9±0.9	3.2±0.9	4.9±2.1*	1.9±0.6
上下移動幅	3.9±0.9	3.9±0.7	3.9±0.6	3.9±0.7
前後移動幅	2.5±0.6	2.6±0.6	2.8±0.7	2.6±0.7
骨盤最大傾斜(度)				
前傾	11.6±5.1	19.8±4.2*	14.5±5.7*	13.2±5.1*
後傾	-7.8±5.1	-9.8±4.5	-9.1±4.8	-8.7±4.6
右側	5.0±2.2	7.4±2.9*	5.1±1.9	6.1±2.5
左側	0.50±2.5	-1.1±2.4*	-0.10±2.0	0.8±2.1
胸椎部最大傾斜(度)				
前傾	5.3±4.1	6.7±4.7	7.1±4.7	6.4±4.4
後傾	-1.8±4.0	-2.8±4.1	-3.0±4.3	-2.3±4.6
体幹最大屈伸角度(骨盤に対する胸椎部運動ピーク値:度)				
屈曲	-3.7±8.1	-4.7±7.9	-3.6±8.1	-3.4±7.7
伸展	8.4±7.5	14.6±6.9*	8.9±8.1	9.2±7.5
股関節最大角度(度)				
右最大屈曲	28.0±6.4	28.8±6.3	27.2±5.4	27.2±5.9
右最大伸展	8.4±6.3	-1.9±6.3*	5.5±7.1	7.1±6.6
左最大屈曲	32.9±7.1	40.4±5.0*	34.2±6.4	34.4±6.9
左最大伸展	10.5±6.1	9.1±5.8	9.5±5.4	10.3±5.5
右最大内転	-1.6±2.3	-4.4±3.0*	-4.9±3.1*	-2.9±3.2
右最大外転	9.5±2.6	12.5±3.7*	12.0±2.9*	10.1±3.1
左最大内転	8.3±4.1	10.1±3.8*	7.2±3.6	10.7±3.9*
左最大外転	0.8±3.7	-1.9±4.0*	1.0±3.7	-1.9±3.7*
重心の仕事量 (J/kg/m)				
Wt/kg/m	0.69±0.08	0.63±0.1	0.62±0.08	0.64±0.10
エネルギー交換率				
Recovery (%)	65.1±3.4	65.9±4.8	68.0±4.7	66.2±4.9

*: 股装具フリー条件に対してp < 0.05

(3) 研究3 (表4) : 脊柱固定により、ストライド長が有意に減少するとともに、骨盤-胸椎部間 (体幹) の運動が顕著に制限されることで、絶対空間における骨盤および胸椎部の動きも多くの方角で有意な低下を示した。こうした体幹の運動制限による下肢への影響として、両側股関節内外転運動範囲が減少し、両側股関節によるエネルギー産出 (正の仕事量) の減少と足関節によるエネルギー産出の増大がみられた。歩行の機械的効率性を示す体重 1kg 進行距離 1m 当たりの重心移動に必要な仕事量 (Wt/kg/m) および、PE と KE のエネルギー交換率 (Recovery) に関しては、有意な変化はみられなかった。

本研究結果から、健常若年成人では、体幹の運動制限により下肢の運動や力学的因子、歩幅などの時間因子に影響が生じるものの、他の関節等による代償により、身体重心全体の動きにおける効率性が保たれることが示唆された。

表4 研究(3) 結果: 体幹装具による重心移動への影響

	装具なし	体幹装具
歩行速度 (m/min)	74.6 ± 4.4	72.7 ± 5.1
ストライド長 (m)	1.31 ± 0.05	1.21 ± 0.09*
重心移動幅 (cm)		
側方移動幅	3.5 ± 0.8	3.1 ± 0.7
上下移動幅	3.2 ± 0.5	3.1 ± 0.5*
前後移動幅	2.2 ± 0.4	2.2 ± 0.4
骨盤運動範囲 (度)		
前後傾	2.9 ± 1.0	2.7 ± 0.5
側方傾斜	10.7 ± 2.6	3.8 ± 1.2*
回旋	13.9 ± 3.2	7.9 ± 2.7*
胸椎部運動範囲 (度)		
前後傾	4.2 ± 0.8	3.5 ± 0.6*
側方傾斜	3.4 ± 0.7	2.3 ± 0.7*
回旋	8.3 ± 2.3	7.9 ± 2.9
体幹運動範囲 (骨盤に対する胸椎部運動角度)		
前後屈 (屈伸)	5.2 ± 1.9	2.0 ± 0.6*
側屈	14.0 ± 3.0	3.8 ± 1.4*
回旋	16.9 ± 4.3	2.1 ± 0.8*
股関節運動範囲 (度)		
右側内外転	13.0 ± 2.7	8.5 ± 3.1*
左側内外転	13.5 ± 3.1	8.5 ± 3.2*
関節仕事量 (J/kg)		
右股関節	0.249 ± 0.054	0.206 ± 0.040*
左股関節	0.237 ± 0.051	0.219 ± 0.047*
右足関節	0.338 ± 0.052	0.371 ± 0.059*
左足関節	0.366 ± 0.057	0.401 ± 0.060*
重心の仕事量 (n=10)		
Wt/kg/m (J/kg/m)	0.69 ± 0.08	0.71 ± 0.09
エネルギー交換率 (n=10)		
Recovery (%)	63.2 ± 2.2	63.7 ± 2.4

*: 裸足条件に対して $p < 0.05$

これら3つの研究を通して示唆されたことは、筋力や柔軟性、刺激に対する反応性などの身体機能が比較的高いと考えられる健常若年成人では、人工的に骨盤の運動制限や下肢に左右非対称の動きをもたらしても、股関節や胸腰椎の代償により、絶対空間における

体幹を直立位に保つとともに、両下肢の協調性のある運動により、前進に必要なエネルギーを必要最小限に抑えながら、補填し合い、全体として機械的効率性の高い歩行を維持し得るということである。

今回得られたデータは、高齢者や種々の障害により形態異常や関節運動制限をきたした患者の評価を行う上で、対照データとして有用な資料となり得ると考える。

<引用文献>

1) Iida H, Yamamuro Y, Kinetic analysis of the center of gravity of the human body in normal and pathological gait. J Biomechanics, 20, 1987: 987-995

2) Cavagna G.A and Kaneko M, Mechanical work and efficiency in level walking and running. J. Physiol, 268, 1977: 467-481

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0件)

[学会発表](計 0件)

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神先 秀人 (KANZAKI HIDETO)

山形県立保健医療大学・保健医療学部・教授

研究者番号: 10381352

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

真壁 寿 (MAKABE HITOSHI)

山形県立保健医療大学・保健医療学部・教授

研究者番号: 60363743

高橋 俊章 (TAKAHASHI TOSHIAKI)

山形県立保健医療大学・保健医療学部・准教授

研究者番号: 50464508

南澤 忠儀 (MINAMISAWA TADAYOSHI)

山形県立保健医療大学・保健医療学部・講師

研究者番号: 40347208

赤塚 清矢 (AKATUKA SEIYA)

山形県立保健医療大学・保健医療学部・講師

研究者番号: 70363744

永瀬 外希子 (NAGASE TOKIKO)

山形県立保健医療大学・保健医療学部・助教

研究者番号: 10404865

伊橋 光二 (IHASHI KOUJI)

福島県立医科大学・新医療系学部設置準備室・教授