

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01512

研究課題名(和文) ウェアラブルセンサーを用いた臨床応用可能な歩行トレーニングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of a biofeedback system using wearable sensors for gait training

研究代表者

木山 良二 (Ryoji, Kiyama)

鹿児島大学・医歯学域医学系・准教授

研究者番号：60315413

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：臨床で使いやすい歩行のフィードバックシステムの開発を目的に、ウェアラブルセンサーによる歩行中の下肢伸展角度測定の妥当性に関する研究や、変形性膝関節症患者を対象に歩行中の体幹揺動について検討を行った。

また、下肢伸展角度が歩行に与える影響を、健常高齢者と脳卒中片麻痺患者を対象に分析した。先行研究では下肢伸展角度は歩行中の立脚相における推進力と関係することが指摘されていたが、それに加え下肢伸展角度は遊脚相における膝関節屈曲角度にも関係することが示された。

したがって、歩行中の下肢伸展角度のフィードバックは、歩行周期を通じて歩容を改善させる可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脳卒中治療ガイドライン2015では、関節角度などを用いたバイオフィードバック療法の推奨度はグレードBとされている。しかし、実際の臨床現場でバイオフィードバック療法が用いられることは極めて少ない。この背景には、バイオフィードバック療法に用いられる機器の利便性の低さ等が挙げられる。ウェアラブルセンサーは簡便に歩行を測定可能であり、バイオフィードバックにも利用可能と考えられる。本研究の結果は、ウェアラブルセンサーによるフィードバックを利用した汎用性の高い歩行トレーニングの基礎的情報として意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to develop a biofeedback system using wearable sensors for gait training. The changes of trunk fluctuation in patients with knee osteoarthritis, and the validity of measurement of leg extension angle in health subjects were analyzed. The effect of the leg extension angle on gait in healthy older people was also investigated. Previous study have stated the leg extension angle is related to the propulsion force during late stance. In addition, present results showed that the leg extension angle is related to the knee flexion angle during swing phase. Therefore, biofeedback of the leg extension angle during gait might alter the gait kinematics throughout waling cycle.

研究分野：リハビリテーション

キーワード：歩行能力 ウェアラブルセンサー リハビリテーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

歩行の異常に対して、視覚的刺激や音刺激によるフィードバックを用いた歩行練習は、歩行の非対称性を改善し、歩行速度を向上させることが諸家により報告されている。Moreland JD (Arch Phys Rehabil, 1998)らのレビューでは、脳卒中片麻痺患者に対する筋電図フィードバックは、通常の運動療法のみへの介入に比べ、下肢機能の改善が大きいことを示した。Bly N (Neuropsychologia, 2015)はパーキンソン病患者を対象に、足底に挿入した圧センサーを用いた荷重量のフィードバックが歩行を改善することを報告している。Bsaglia N (Scand J Rehabil Med, 1989)は膝関節の屈曲角度が不足している片麻痺患者を対象に、電気角度計を用いたフィードバック療法の有効性を報告している。

しかし、これらのフィードバックトレーニングは、臨床現場では一般的に利用されていない。この背景には、フィードバック療法に用いられてきた機器の使用が煩雑なこと、汎用性が乏しいことが挙げられる。例えば、モーションキャプチャシステムを用いたフィードバックは機器が大型、高価であるため、研究施設における利用に限られている(Darter BJ, Phys Ther, 2011)。ポータブルな機器としては、足底に挿入するタイプの足センサーなどがあるが、ケーブルなどが歩行を阻害する(Afzal MR et al, Biomed Res Int, 2015)。また、これらのポータブルの機器は、フィードバックできる歩行異常が限定されるため、汎用性が乏しい。そのため、臨床現場で広く利用されるに至っていない。

近年では、簡便で客観的な歩行分析機器として、ウェアラブルセンサーが用いられている。ウェアラブルセンサーとしては、主に加速度計が用いられ、腰部に貼付することで、歩行時の体幹動揺を分析している報告が多い。Mizuike C (Gait Posture, 2009)らは、脳血管障害片麻痺患者を対象に、麻痺の改善とともに歩行の規則性が改善することを報告している。また Sekine M (J Neuroeng Rehabil, 2013)らは、片麻痺患者の歩行能力の改善とともに、体幹の側方動揺が減少することを報告している。これまでの我々の研究でも、片麻痺患者の歩行の自立度には、非麻痺側下肢の加速度の root mean square や、歩行の規則性が関与することが分かっている (Kijima Y. J Aging Phys Act, 2018)。

ウェアラブルセンサーは小型であり、ワイヤレスで情報を送信可能であるため、患者の歩行を阻害せずにリアルタイムでフィードバックが可能と考えられる。ウェアラブルセンサーを用いたフィードバックトレーニングは、健常者を対象に検討が進められているが、症例に適應させた研究はなく、その有効性は明確になっていない(Lim SB. Gait Posture, 2016; Shull PB. J Biomech Eng, 2011; Davis JR. Gait Posture, 2010; Huffman JL. Gait Posture, 2009)。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、ウェアラブルセンサーによるフィードバックを利用した簡便で実践的な歩行トレーニングシステムを開発することである。

## 3. 研究の方法

### (1)変形性膝関節症患者における人工膝関節全置換術による体幹動揺変化の分析

歩容を示す指標の一つである、体幹動揺をウェアラブルセンサーで検出可能かを検討した。対象は、変形性膝関節症を呈し人工膝関節全置換術(total knee arthroplasty, TKA)を施行した 18 名(年齢  $72 \pm 9$  歳, 男性/女性 6/12 名, BMI  $25.9 \pm 2.0$  kg/m<sup>2</sup>)とした。術前と TKA 4 週後に 3 軸の加速度計・角速度計を第 7 頸椎と第 3 腰椎に貼付し、歩行中の体幹動揺を計測した。歩行条件は、快適速度における 16m 歩行とし、中央の 5 歩行周期を分析対象とした。得られたデータから、各方向の二乗平均平方根 (Root Mean Square, RMS) が RMS の総和に占める割合 (RMS ratio, RMSR)を算出し、TKA 前後で比較した。

## (2) ウェアラブルセンサーを用いた下肢伸展角計測の妥当性の分析

立脚後期における大腿骨大転子と腓骨外果を結ぶ線と、垂直線のなす角は下肢伸展角と呼ばれる。下肢伸展角は、床反力前方成分と関係することが知られており、歩行能力を示す指標である。下肢伸展角のフィードバックは、歩行トレーニングにおいて有効と考えられる。そのため、ウェアラブルセンサーで下肢伸展角が計測可能か検討を行った。

健常若年者男性 18 名 (年齢  $25.2 \pm 3.2$  歳) を対象とした。モーションキャプチャシステムによる測定値を外的基準として、ウェアラブルセンサーを用いた各種歩行中の下肢伸展角計測の妥当性を分析した。

## (3) 健常高齢者と脳卒中片麻痺患者の下肢伸展角が歩行に与える影響の分析

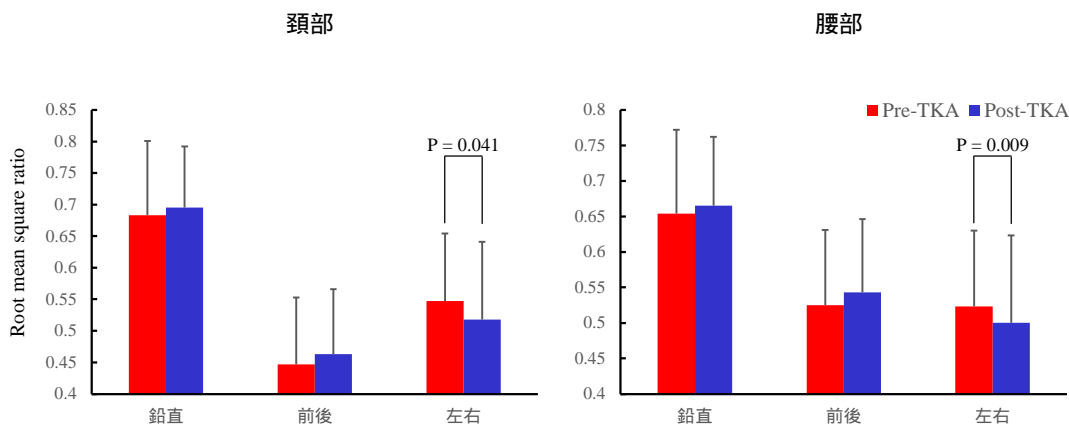
先行研究では、下肢伸展角は歩行中の床反力前方成分と関係することが報告されている。しかし、立脚後期の下肢伸展角度は遊脚相における膝関節屈曲にも関係し、歩行の安全性にも寄与すると考え、検討を行った。

対象者は、健常高齢者 109 名 (年齢  $76.0 \pm 6.9$  歳, 男性/女性 34/75 名), 脳卒中片麻痺患者 (年齢  $61.3 \pm 14.4$  歳, 男性/女性 15/10 名) とした。ウェアラブルセンサーを用い、立脚後期における下肢伸展角と遊脚相における膝関節屈曲角度の関係を分析した。

## 4. 研究成果

### (1) 変形性膝関節症患者における人工膝関節全置換術による体幹動揺変化の分析

歩行速度は、TKA 前  $0.96 \pm 0.18$  m/s, TKA 後  $1.00 \pm 0.19$  m/s であり、有意な差を認めなかった ( $P=0.282$ )。一方で、歩行中の体幹動揺を示す側方の RMSR は、頸部と腰部で有意な減少を認めた (図 1)。ウェアラブルセンサーによる歩行計測は、TKA による疼痛、下肢アライメ



ントの改善に伴う歩行時の体幹の側方動揺の改善を検出可能であることが示された。

図 1 人工膝関節全置換術による歩行中の Root mean square ratio の変化

## (2) ウェアラブルセンサーを用いた下肢伸展角計測の妥当性の分析

モーションキャプチャシステムによる測定値を外的基準とし、ウェアラブルセンサーによる下肢伸展角の測定の妥当性を検討した。その結果、様々な歩行条件において、ウェアラブルセンサーにより計測した下肢伸展角は、モーションキャプチャシステムによる測定値と一致した (図 2, Intraclass correlation coefficient, 0.831-0.876,  $P < 0.001$ ; Coefficient of multiple correlation, 0.956-0.959)。ウェアラブルセンサーによる下肢伸展角測定の妥当性が示された。

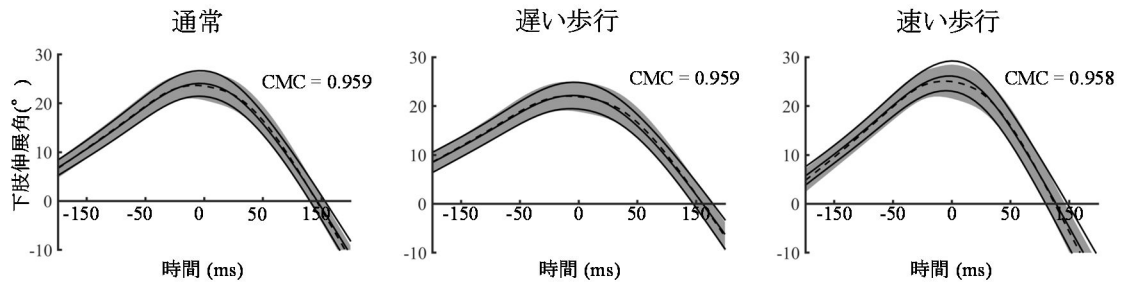


図2 ウェアラブルセンサーとモーションキャプチャシステムで計測した下肢伸展角  
 全対象者の下肢伸展角を加算平均したグラフ。実線はウェアラブルセンサーで計測した下肢伸展角の平均値±標準偏差を示す。破線とグレーの範囲はモーションキャプチャシステムで計測した下肢伸展角の平均値±標準偏差を示す。時間の0は足趾離地を示す。  
 Coefficient of multiple correlation, CMC

### (3) 健常高齢者と脳卒中片麻痺患者の下肢伸展角が歩行に与える影響の分析

健常高齢者と脳卒中片麻痺患者を対象に、立脚後期の下肢伸展角と遊脚相における膝関節屈曲角度の関係を検討した。その結果、両群において有意な相関関係を認め、健常高齢者では  $r = 0.49$  ( $P < 0.001$ )、脳卒中片麻痺患者では  $r = 0.74$  ( $P < 0.001$ )であった。

先行研究では、下肢伸展角は歩行中の推進力と関係することが示されている。今回の検討では、下肢伸展角は、遊脚相の膝関節屈曲角度にも影響することが示された。歩行中の下肢伸展角のフィードバックは、歩行周期を通じて歩容を変化させることが示唆された。

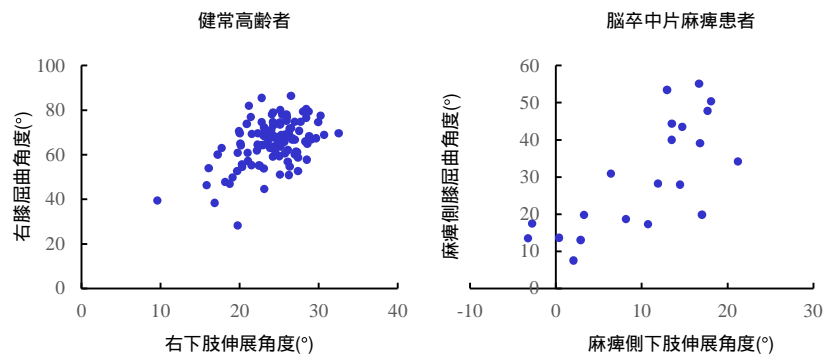


図3 下肢伸展角と遊脚相の膝関節屈曲角度の関係

以上の結果を踏まえ、下肢伸展角をウェアラブルセンサーにて測定し、リアルタイムでフィードバックするシステムを構築した。今後、本システムによる歩行の変化を分析する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Miyazaki T, Kawada M, Nakai Y, Kiyama R, Yone K	4. 巻 2019
2. 論文標題 Validity of Measurement for Trailing Limb Angle and Propulsion Force during Gait Using a Magnetic Inertial Measurement Unit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biomed Res Int	6. 最初と最後の頁 8123467
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1155/2019/8123467	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Saida T, Kawada M, Kuroki D, Nakai Y, Miyazaki T, Kiyama R, Tsuneyoshi Y	4. 巻 -
2. 論文標題 Accelerometer Measurement of Trunk Lateral Fluctuation During Walking Following Total Knee Arthroplasty in Patients With Osteoarthritis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J Aging Phys Act	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1123/japa.2019-0149	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 宮崎宣丞, 木山良二, 牧迫飛雄馬, 川田将之, 中井雄貴, 米和徳, 窪園琢郎, 竹中俊宏, 大石充
2. 発表標題 サルコペニアや運動器疾患を有する地域在住高齢者の歩行中の体幹・下肢の角度
3. 学会等名 第60回日本老年医学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮崎宣丞, 木山良二, 川田将之, 中井雄貴, 米和徳
2. 発表標題 ウェアラブルセンサーを用いた歩行時の Trailing Limb Angleと推進力の評価の妥当性の検討
3. 学会等名 第23回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 4. 竹下康文, 木山良二, 牧迫飛雄馬, 宮崎宣丞, 川田将之, 中井雄貴, 東直人, 窪園琢郎, 竹中俊宏, 大石充
2. 発表標題 地域在住高齢女性の歩行中の体幹加速度と外出機会の関連
3. 学会等名 第61回日本老年医学会学術集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 3. 宮崎宣丞, 木山良二, 牧迫飛雄馬, 川田将之, 竹下康文, 林浩之, 米和徳, 窪園琢郎, 竹中俊宏, 大石充
2. 発表標題 地域在住高齢者におけるサルコペニアと歩行パラメーターの関連
3. 学会等名 第61回日本老年医学会学術集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 2. Miyazaki T, Kiyama R, Makizako H, Kawada M, Takeshita Y, Nakai Y, Yone K, Kubozono T, Takenaka T, Ohishi M
2. 発表標題 Effect of Trailing Limb Angle on Propulsion Force and Knee Flexion Angle during Gait in Community-dwelling Older People
3. 学会等名 International Society of Physical and Rehabilitation Medicine World Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 1. 松澤雄太, 宮崎宣丞, 米良隼紀, 山本浩史, 石原伸之, 荒木草太, 中辻晋太郎, 貴嶋芳文, 福永誠司, 川田将之, 木山良二, 藤元勇一郎
2. 発表標題 脳卒中片麻痺歩行におけるTrailing Limb Angleと遊脚相における膝関節屈曲角度の関係
3. 学会等名 第17回日本神経理学療法学会学術大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	川田 将之  (Msayuki Kawada)  (30783477)	鹿児島大学・医歯学域医学系・助教   (17701)	
研究 分担者	米 和徳  (Kazunori Yone)  (40182844)	鹿児島大学・医歯学域医学系・教授   (17701)	