

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11157

研究課題名(和文) ウェアラブルセンサーを用いた歩行フィードバックシステムの臨床応用

研究課題名(英文) Clinical application of gait feedback system using wearable sensor

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ウェアラブルセンサーを用いた歩行フィードバックシステムを開発し、臨床応用について検証した。健康成人を対象に、本システムを用いた歩行練習による即時的な歩容変化を分析した。歩行練習中は、関節運動をリアルタイムで音声にてフィードバックした。その結果、おおむねフィードバックした目標値に応じて歩容が変化した。また、歩行速度も増加した。

脳卒中や変形性膝関節症、腰部脊柱管狭窄症を呈する症例を対象とした検証でも、おおむね健康者と類似した傾向を示した。一方で、歩行速度への影響は限定的であった。本システムの臨床応用にあたっては、身体機能に応じたフィードバックの選択等について検討を進める必要があると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ウェアラブルセンサーを用いた歩行フィードバックシステムの臨床応用について検証した。フィードバックを用いた歩行練習の有用性についてはコンセンサスが得られているものの、環境整備の困難さから臨床で利用されるには至っていない。本システムは、利便性や汎用性の面から臨床で利用しやすいため、これからの歩行リハビリテーションに貢献すると考えられる。

本システムは自主的な練習や、遠隔遠隔リハビリテーションにも応用可能である。また、歩行練習と効果判定を同時に行うシステムであり、歩容変化のビックデータの構築にも寄与すると考えられ、発展性が高いと考えている。

研究成果の概要(英文)：We developed a gait feedback system using wearable sensors, and investigated its clinical application. For healthy adults, immediate gait alteration after gait training using this system was analyzed. An auditory stimulation was given to the participants when their joint angle reached target during gait. As the results, gait changed according to the target after feedback gait training using our system. Gait velocity also increased.

For patients with stroke, knee osteoarthritis, or lumbar spinal canal stenosis, similarly gait alterations were shown after feedback gait training. These results indicate the usefulness of our gait feedback system in clinical practice.

However, no significant increase in gait velocity was observed in patients. Further analysis regarding the appropriate kind and target value for gait feedback, depending on physical function of patients, was needed.

研究分野：リハビリテーション

キーワード：フィードバック 歩行 ウェアラブルセンサー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

歩行能力の低下を有する脳卒中片麻痺者に対して、視覚的・聴覚的・触覚的・振動によるフィードバックを用いた歩行練習を行うことは、歩行の非対称性を改善し歩行速度を向上させると報告されており、その有効性についてはコンセンサスが得られている。Genthe Kら(2018)は、脳卒中片麻痺患者を対象に歩行中の麻痺側の床反力をフィードバックすることにより、歩行中の推進力が增加することを報告している。また、Booth ATCら(2019)は、脳性麻痺児を対象にトレッドミル歩行中に、歩幅や膝関節の角度をフィードバックすることにより、即時的に歩幅や、膝関節伸展角度、足関節パワーが増加することを報告している。したがって、フィードバックを用いた歩行練習は様々な症例に対して有効と考えられる。

これらの先行研究では、床反力計を内蔵したトレッドミルで歩行練習を行い、ディスプレイを介してフィードバックを行うものが多い。そのため、器機整備の困難さを理由に、研究施設における利用に限定され、歩行のフィードバックトレーニングは、臨床現場で一般的に利用されるには至っていない。

臨床場面での活用を想定し、ウェアラブルセンサーを用いた歩行のフィードバックについても検討が進められている。Bly N(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で荷重量のフィードバックを行うことにより歩行が改善することを報告している。しかし、圧センサーを用いた方法では荷重量しかフィードバックできず、汎用性に乏しいのが現状である。

近年では、簡便で客観的な歩行分析機器として、慣性センサーが用いられている。慣性センサーは小型であり、対象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。しかし、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を症例に適応させた研究は少なく、その有効性は明確になっていない(Lim SB, 2016)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、我々が開発したウェアラブルセンサーを用いた歩行のフィードバックシステムを臨床応用するための基礎的情報を蓄積することと、症例に対する効果を検証することである。

3. 研究の方法

(1)脳卒中片麻痺者の歩容の基礎的情報の蓄積

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。下肢伸展角度が歩行フィードバックの対象として適切かを見当するために、下肢伸展角が歩容に及ぼす影響や関連する身体機能を分析した。

対象は脳卒中片麻痺者 29 名とし、骨盤と下肢に取り付けた慣性センサーを用いて歩行を測定した。立脚後期の麻痺側の下肢伸展角が遊脚相の麻痺側膝関節の屈曲角や、立脚後期の速度の増加量(推進力)に与える影響を分析した。また、麻痺側下肢の運動機能を Fugl Meyer Assessment や Motricity Index、バランス能力を Functional Balance Scale を用い評価し、下肢伸展角との関係を分析した。

(2)健常者への歩行フィードバックシステムの適応

健常成人 12 名を対象に、フィードバックによる歩行練習の前後の歩容を比較し、即時的変化を分析した。練習前の歩行テストでは通常歩行を、練習後のテストではフィードバックで練習した歩容を順守させた。歩行のフィードバックおよび計測には慣性センサーを用い、センサーは骨盤、両側の大腿と下腿、足部に固定した。慣性センサーから得られた情報をもとに下肢関節角度をリアルタイムで算出し、フィードバックした。フィードバックは音声で行い、あらかじめ規定した目標値に達した場合にのみ与えた。

フィードバック下での歩行練習は 30m の歩行路で 1 分間実施した。歩行条件は、通常歩行(コントロール条件)、立脚後期の足関節底屈、下肢伸展角、遊脚相の膝関節屈曲を強調した 4 条件とした。快適歩行の関節角度を 20% 増加させた角度を目標値とした。各歩行練習による関節運動や歩行速度、歩幅等の即時的な変化量を比較した。

(3)症例への歩行フィードバックシステムの適応

脳卒中や変形性膝関節症，腰部脊柱管狭窄症を呈する症例7名を対象に，健常者と同じプロトコルを用い，歩容の即時変化を分析した。なお，健常者を対象とした分析で，遊脚相の膝関節屈曲のフィードバックは非効率的な歩容変化を生じさせる可能性が示唆されたため，症例を対象とした検討では除外した。

4. 研究成果

(1)脳卒中片麻痺者の歩容の基礎的情報の蓄積

脳卒中片麻痺者では立脚後期の下肢伸展角と速度の増加量（推進力， $r = 0.846$ ， $p < 0.001$ ），遊脚相の膝関節屈曲角（ $r = 0.721$ ， $p < 0.001$ ）に有意な正の相関関係を認め，下肢伸展角が効率的で安全な歩行に貢献することが示された（図1）¹⁾。このことから，歩行速度の向上や遊脚相のトウクリアランスの増加を目的として，立脚後期の下肢伸展角のフィードバックは有効であることが示唆された。

また，脳卒中片麻痺者の下肢伸展角と身体機能の関連をパス解析で分析した結果，下肢伸展角はバランス能力（Functional Balance Scale）の直接的な影響を受けること，麻痺側下肢筋力（Motricity Index）の間接的な影響を受けることが示された（図2）²⁾。このことから，脳卒中片麻痺者に対して歩行中の下肢伸展角をフィードバックする際には，対象者のバランス能力と下肢筋力を考慮して，目標値を設定する必要があると考えられた。

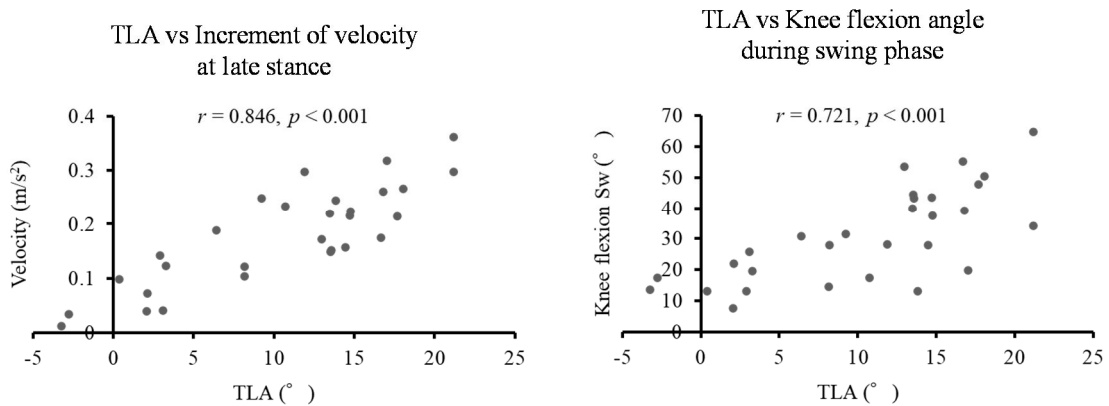


図1 下肢伸展角と速度の増加量，遊脚相の膝関節屈曲角の関係

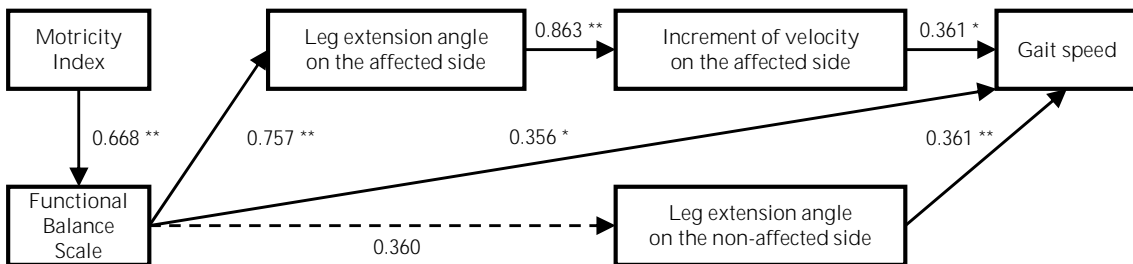


図2 下肢伸展角と身体機能のパス解析

- 1) Matsuzawa Y, Miyazaki T, Takeshita Y, Higashi N, Hayashi H, Araki S, Nakatsuji S, Fukunaga S, Kawada M, Kiyama R. Effect of leg extension angle on knee flexion angle during swing phase in post-stroke gait. *Medicina (Kaunas)*. 2021;57(11):1222.
- 2) Matsuzawa Y, Miyazaki T, Takeshita Y, Araki S, Nakatsuji S, Fukunaga S, Kawada M, Kiyama R. For patients with stroke, balance ability affects the leg extension angle on the affected side. *Applied Sciences* 2022;12(19): 9466.

(2) 健常者への歩行フィードバックシステムの適応

健常成人を対象とした検討では、フィードバックシステムを用いた歩行練習により、関節角度がおおむね目標値に近い値を示し、設定したとおりに歩容が変化した（図 3）。また、歩容の変化に伴い歩行速度も即時的に 0.15-0.19 m/s 増加した（ $p \leq 0.01$ ）。特に、立脚後期の足関節底屈を強調したフィードバックでは足関節底屈だけではなく下肢伸展角度の増加も認め、フィードバックするパラメーターとして有効と考えられた。

これらのことから、歩容の変容に対応する身体機能を有する者に対しては、フィードバックを用いた歩行練習が有効であることが示唆された。一方で、遊脚相の膝関節屈曲をフィードバックした歩行では、膝関節屈曲のみが増加すること、有意な差はないものの立脚後期の足関節底屈角が減少することから、歩行練習における有用性は低いと考えられた。これらの内容については現在、海外誌に投稿中である。

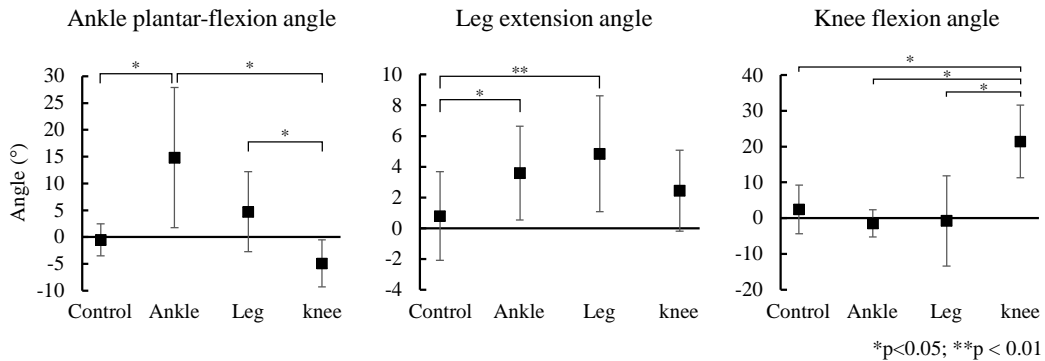


図 3 フィードバックを用いた歩行練習による関節運動の変化

(3) 症例への歩行フィードバックシステムの適応

症例を対象とした検討では、統計学的分析をするには至っていないものの、健常者を対象とした検討とほぼ同じ傾向を示した（図 4）。特定の下肢運動をフィードバックすることで他の関節運動にも影響が波及し、足関節底屈のフィードバックでは下肢伸展角が、下肢伸展角のフィードバックでは足関節底屈角の増加を認めた。歩容の変化に伴いストライド長も延長し、特に下肢伸展角のフィードバックでストライド長の延長が大きいことが示唆された。

これらのことから、我々が開発した歩行フィードバックシステムは、臨床場面でも効率的な歩行の獲得を促進するツールとして有用であることが示唆された。本システムは小型のタブレット PC とウェアラブルセンサーで構成されるものであり、簡便性に優れており、臨床への適応が可能と考えられる。また、症例の歩容に応じてフィードバックするパラメーターを選ぶことができることから、汎用性も高い。今後は、長期的な介入効果の検証や、身体機能や歩容に応じた適切なフィードバックの選択や目標値の設定について分析を進める予定である。

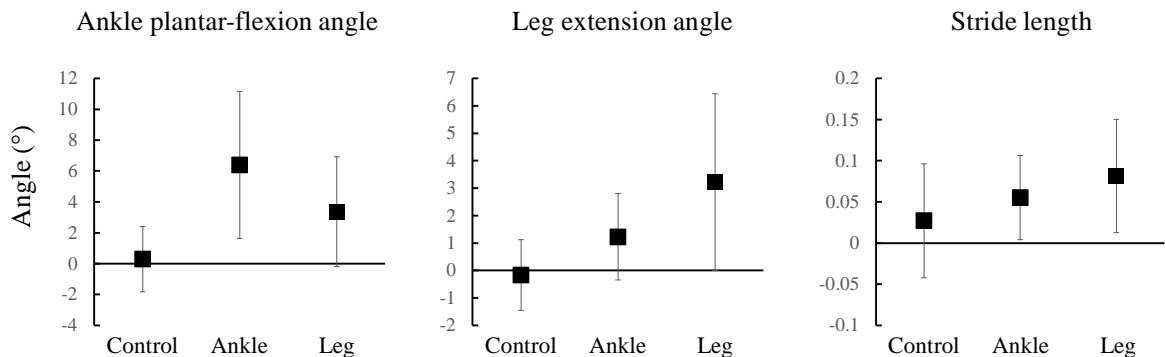


図 4 フィードバックを用いた歩行練習による関節運動とストライド長の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Matsuzawa Y, Miyazaki T, Takeshita Y, Higashi N, Hayashi H, Araki S, Nakatsuji S, Fukunaga S, Kawada M, Kiyama R	4. 巻 57
2. 論文標題 Effect of Leg Extension Angle on Knee Flexion Angle during Swing Phase in Post-Stroke Gait	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Medicina (Kaunas)	6. 最初と最後の頁 1222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/medicina57111222	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 Miyazaki T, Kiyama R, Nakai Y, Kawada M, Takeshita Y, Araki S, Makizako H	4. 巻 9
2. 論文標題 Relationships between gait regularity and cognitive function, including cognitive domains and mild cognitive impairment, in community-dwelling older people	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Healthcare	6. 最初と最後の頁 1571
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/healthcare9111571	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 Miyazaki T, Kiyama R, Nakai Y, Kawada M, Takeshita Y, Araki S, Hayashi H, Higashi N, Makizako H	4. 巻 18
2. 論文標題 The relationship between leg extension angle at late stance and knee flexion angle at swing phase during gait in community-dwelling older adults	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Int J Environ Res Public Health	6. 最初と最後の頁 11925
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ijerph182211925	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 Matsuzawa Y, Miyazaki T, Takeshita Y, Araki S, Nakatsuji S, Fukunaga S, Kawada M, Kiyama R	4. 巻 12
2. 論文標題 For patients with stroke, balance ability affects the leg extension angle on the affected side	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 9466
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app12199466	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 Araki S, Kiyama R, Nakai Y, Kawada M, Miyazaki T, Takeshita Y, Makizako H	4. 巻 103
2. 論文標題 Sex differences in age-related differences in joint motion during gait in community-dwelling middle-age and older individuals	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Gait Posture	6. 最初と最後の頁 153-158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gaitpost.2023.05.009	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8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 荒木草太, 松浦央憲, 東條竜二, 中村俊博, 竹下康文, 松澤雄太, 宮崎宣丞, 指宿勝巳, 足立貴志, 中井雄貴, 川田将之, 木山良二
2. 発表標題 回復期脳卒中片麻痺者の Physical Cost Index と身体機能・歩行パラメータの関連
3. 学会等名 第19回日本神経理学療法学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮崎宣丞, 福崎弘樹, 竹下康文, 荒木草太, 松澤雄太, 指宿勝巳, 足立貴志, 中井雄貴, 川田将之, 木山良二
2. 発表標題 口頭による教示が歩容に与える即時的变化 - 健常成人による予備研究
3. 学会等名 第26回日本基礎理学療法学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松澤雄太, 米良隼紀, 宮崎宣丞, 山口祐弥, 竹下康文, 荒木草太, 中辻晋太郎, 貴嶋芳文, 川田将之, 木山良二
2. 発表標題 脳卒中片麻痺歩行の下肢伸展角に影響を及ぼす因子の検討
3. 学会等名 第18回日本神経理学療法学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒木草太, 木山良二, 牧迫飛雄馬, 川田将之, 宮崎宣丞, 竹下康文, 中井雄貴, 林浩之, 東直人, 窪園琢郎, 中村俊博, 竹中俊宏, 大石充
2. 発表標題 地域在住高齢者における加齢による歩容の変化
3. 学会等名 第57回日本リハビリテーション医学会学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎宣丞, 木山良二, 竹下康文, 荒木草太, 川田将之, 中井雄貴, 富岡一俊, 谷口善昭, 竹中俊宏, 牧迫飛雄馬
2. 発表標題 地域在住高齢者における歩行の定常性, 対称性と認知機能の関連
3. 学会等名 第62回日本老年医学会学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹下康文, 木山良二, 宮崎宣丞, 荒木草太, 川田将之, 中井雄貴, 富岡一俊, 谷口善昭, 竹中俊宏, 牧迫飛雄馬
2. 発表標題 地域在住高齢者における歩行の対称性と下肢筋量の左右差の関連
3. 学会等名 第62回日本老年医学会学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎宣丞, 竹下康文, 下世大治, 柿元翔吾, 中島将武, 荒木草太, 松澤雄太, 中井雄貴, 川田将之, 木山良二
2. 発表標題 ウェアラブルセンサーによるリアルタイムフィードバックを用いた歩行練習の即時効果: 若年健常成人と入院患者における検討
3. 学会等名 第27回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松澤雄太, 宮崎宣丞, 竹下康文, 荒木草太, 中辻晋太郎, 福永誠司, 川田将之, 木山良二
2. 発表標題 脳卒中片麻痺者におけるバランス能力・麻痺側下肢機能・歩行能力の相互関係
3. 学会等名 第20回日本神経理学療法学会学術集会
4. 発表年 2022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 (Kawada Masayuki) (30783477)	鹿児島大学・医歯学域医学系・助教 (17701)	
研究分担者	牧迫 飛雄馬 (Makizako Hyuma) (70510303)	鹿児島大学・医歯学域医学系・教授 (17701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------