

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：33916

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500621

研究課題名(和文) 歩行者に同調する歩行練習装置の開発と歩行能力評価への応用

研究課題名(英文) Development of gait training system synchronized with human walking and application to an evaluation of gait ability

研究代表者

田辺 茂雄 (Tanabe, Shigeo)

藤田保健衛生大学・医療科学部・准教授

研究者番号：50398632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、トレッドミル歩行時の測域センサを用いた両下肢位置座標計測法の構築と、その座標を用いたトレッドミルの自動同調化および歩行能力評価への応用を検討した。本研究の結果、提案法によって足部運動軌跡を計測可能であり、足部の接地および離地を推定可能であった。自動同調においては、推定歩行速度でのベルト駆動に加えて歩行者位置によるフィードバック制御を行うことで、任意の速度、定位置での歩行が可能であった。歩行能力評価においては、健康者および脳卒中片麻痺者で算出した時間距離因子は概ね真値と高い相関を認めた。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we developed a method to measure positional coordinates of both legs using a range scanner during treadmill-gait, and studied its application to automatic treadmill speed synchronization with human walking and an evaluation of gait ability. Our results suggest that the proposed method can measure a trajectory of foot motion and estimate foot contact and off. In the automatic synchronization, when position feedback control was added to belt driving at an estimated gait speed, participants could keep walking in a fixed position with any gait speed. In the gait evaluation, almost all spatiotemporal parameters correlated well with the reference values in healthy participants and stroke patients.

研究分野：リハビリテーション工学

キーワード：リハビリテーション トレッドミル 歩行練習 歩行分析

1. 研究開始当初の背景

歩行障害に対する練習手法としてトレッドミル(図1)が広く用いられ始めている。脳卒中患者や脊髄損傷患者においては、トレッドミル歩行練習が歩行能力を有意に改善させたとの報告がある。

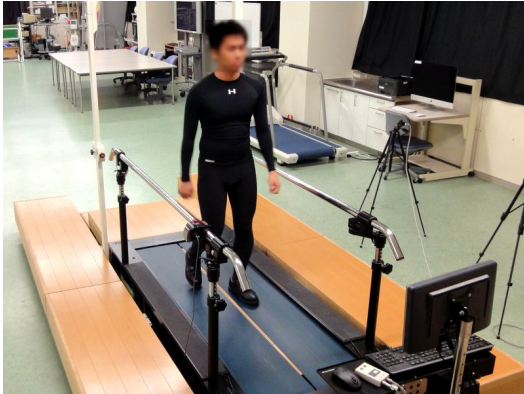


図1 歩行練習用トレッドミルの一例

また近年、トレッドミル歩行練習に歩行補助ロボットや機能的電気刺激を併用する手法についても検討が進められている。しかし、現在のトレッドミル歩行練習は2つの問題点を有していると考えられる。

1つ目の問題点は、トレッドミル歩行練習にある程度の歩行能力が必要な点である。トレッドミルは一定の速度で駆動するため、患者はそれに合わせた歩行を強いられる。しかし、患者の歩行は定常ではなく、時間距離因子のばらつきが大きい。また脳卒中患者においては、左右対称性も著しく低下している。そのような患者が定速で駆動するベルト上を歩行することは大変困難な課題であり、多くの患者がトレッドミル歩行練習の対象外となっているのが現状である。したがって、患者の歩行能力に合わせて自動的に速度が調節されるトレッドミルが求められている。

2つ目の問題点は簡便な歩行能力の評価が出来ない点である。個々の患者に最も適したトレッドミル歩行条件を提供するためには、定量的な歩行能力の評価が必要となる。その指標としては、時間距離因子(遊脚・立脚時間、ストライド、ステップ等)が用いられている。最も広く知られている計測手法は、床反力計内蔵型トレッドミルと三次元動作解析装置の併用である。しかしこれらの機器は非常に高価で、かつ特殊な計測環境を準備する必要があり、簡便な計測は出来ない。したがって、安価で簡便に計測できる手法が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記2点の問題を解決する手法として、レーザ測域センサを用いた両下肢運動計測システム(図2)を構築し、トレッドミルの自動同調化および歩行能力評価における有用性を検討することであった。

測域センサは、設置した高さの水平面上あるすべての対象物の位置座標を実時間で計測できる。したがって、トレッドミル前方、足部の高さに設置することで、両下肢の位置座標を実時間で計測でき、その値から患者の歩行に自動同調するトレッドミル速度制御が可能になり、歩行能力の評価に用いられる時間距離因子も算出できると考えた。

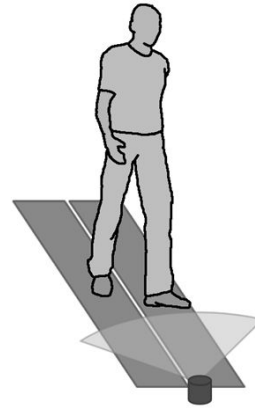


図2 測域センサを用いた両下肢運動計測

まず、センサから得られた両下腿の位置座標軌跡から、足部接地、離地の時期および位置を推定する手法を検討した。

次に、足部接地、離地情報を基に推定歩行速度を算出してベルト駆動し、加えて歩行者の位置変化に応じてフィードバック速度制御を行う手法について検討した。

最後に、歩行能力の評価指標である歩行の時間距離因子を算出し、従来法で計測した値との相関からその有用性を検討した。

3. 研究の方法

(1) 足部接地、離地の時期および位置を推定する手法の検討

対象は、中枢神経系疾患、整形外科系疾患の既往のない健常成人であった。

トレッドミルには、大武ルート工業社製のトレッドミル DLF-55 を使用した。測域センサには北陽電機社製二次元放射状スキャンレーザ測域センサ UTM-30LX を使用した。本装置の有効範囲は0.1m-30m、-135度+135度である。トレッドミル前方正中位置に高さ250mmで床面と平行に設置した。足部接地、離地の時期および位置の真値計測には、キッセイコムテック社製三次元動作解析装置 Motion recorder を使用した。

歩行条件としては、0.5km/h から 5.0km/h まで 0.5km/h 刻みで 10 段階の歩行速度を設定し、ランダムに実施した。被験者には快適な歩幅での2分間の連続歩行を指示し、定常状態となった後、連続 20 歩以上計測を行った。

提案法として用いた測域センサは、40Hz で行われるスキャンごとに、センサから対象物までの距離情報が 1080 点計測される。その

内、ベルト位置を基に、左右それぞれの下腿に反射した情報のみを抽出した。その後方向成分の最小値を時系列データ5点で移動平均し、下腿運動軌跡とした。時系列データの内、最小値が生じる時点(下腿部の運動軌跡が後方に移動し始めた時期)を足部接地とし、最大値が生じる時点(前方に移動し始めた時期)を離地とした。足部接地および離地の位置情報は、それぞれの時点での位置座標を用いた。

提案法は下腿の運動軌跡を用いて足部接地、離地の時期および位置を推定するため、真値と異なることが予想された。したがって真値を得るための従来法として、三次元動作解析装置を使用した。両下肢の外果に貼付した光学マーカを100Hzで計測し、キッセイコムテック社製 KineAnalyzer を用いて三次元化した。マーカ軌跡から足部接地、離地を大まかに自動判定した後、動作解析専門家がフレームごとの動きを基に正確な時期へと修正した。足部接地および離地の位置情報には、それぞれの時期でのマーカ位置座標を用いた。

提案法で推定された足部接地、離地の時期および位置の補正方法について、それぞれ従来法で得られた真値との差を算出し検討した。具体的には、得られた差を基に、測域センサが計測した下腿部の位置から真値を推定するための各項目の補正式を作成した。

(2)トレッドミル自動同調化への応用検討

対象は、中枢神経系疾患、整形外科系疾患の既往のない健常成人であった。また、実験で用いたトレッドミル、測域センサは実験1と同様であった。

ベルト速度制御手法の概要は以下の通りであった。トレッドミルの前方に測域センサを2台設置した。一方は歩行者の第2仙骨の高さに設置して推定重心位置座標を、他方は実験1と同様に床から250mmに設置して歩行中の足部位置座標を検出した。実験1で得られた補正後の推定足部接地時期と位置を用いて推定歩幅と推定歩行率を算出し、それらから求められる推定歩行速度でトレッドミルベルトを駆動した。加えて、推定重心位置座標の前後位置変化に応じたフィードバック速度制御によって歩行者位置を自動調節した。

フィードバック制御手法としては、比例-積分制御を用い、歩行者位置と目標位置との偏差および積分の要素によって制御した。

実験2ではまず、PI制御を行う上で必要な比例ゲインおよび積分時間の最適値を検討するため、Ziegler & Nicholsの限界感度法に基づいて値を求めた。対象者には、時速1.0km、2.0km、3.0kmでそれぞれトレッドミル上を歩行するよう指示した。検者が比例ゲインの値を徐々に増加させ、歩行者がそれ以上トレッドミルの中心位置で歩くことができない時点での最大ゲインと推定重心の持

続振動周波数を測定した。

得られた値から、各被験者の比例ゲインおよび積分時間の最適値を算出し、それらの平均値および標準偏差を求めた。また、この最適値を用いて推定重心位置の変動を制御しながらの歩行を行い、推定重心位置および歩行速度の変動を検討した。

加えて、脳卒中片麻痺模擬患者においても比例ゲインおよび積分時間の最適値算出を行った。過去の報告によると、脳卒中患者の歩行速度は1-3km/hであり、立脚時間、遊脚時間等の時間因子は歩行速度によって変化する。この報告を基に、各歩行速度の時間因子を算出し、トレッドミルの前方に設置したスクリーンに両下肢が取るべき歩行周期を提示した状態で、被験者はそれに併せて歩行を行った。

(3)歩行能力評価への応用検討

対象は、中枢神経系疾患、整形外科系疾患の既往のない健常成人と脳卒中片麻痺患者(年齢35歳-74歳、身長148cm-185cm、体重42kg-78kg、SIAS股関節2-5・膝関節2-4・足関節1-3)であった。また、実験で用いたトレッドミル、測域センサ、足部接地および離地の時期および位置の真値計測用としての三次元動作解析装置は実験1と同様であった。

歩行条件としては、健常者は実験1と同様に、0.5km/hから5.0km/hまで0.5km/h刻みで10段階の歩行速度を設定し、ランダムに実施した。脳卒中片麻痺患者は、快適歩行速度(0.9km/h-2.7km/h)と0.5km/hから3.5km/hまで0.5km/h刻みで安全に歩行可能な範囲で実施した。被験者には快適な歩幅での2分間の連続歩行を指示し、定常状態となった後、連続20歩以上計測を行った。

提案法においては、実験1と同様の手順で足部接地、離地の時期および位置を算出した後、実験1の結果から得られた補正式を用いて補正を行った。その後、それらの値および歩行速度を基に、遊脚時間、立脚時間、両脚支持時間、ストライド時間、ストライド長、ステップ時間、ステップ長を算出した。従来法においても同様に、真値として上記項目を算出した。

統計解析としては、従来法で得られた真値と提案法で得られた推定値の相関および絶対誤差を算出した。

4.研究成果

(1)足部接地、離地の時期および位置を推定する手法の検討

提案法で推定された足部接地時期は、真値と比較してベルト速度に関わらず若干遅い値を示し、平均遅延時間は0.056秒であった。一方で足部離地時間は、歩行速度によって真値との差が対数関数的に早い値を示す傾向を認めた(式1)。

$$D = 0.11 \ln Bs - 0.17 \quad (1)$$

ここで、 D は足部離地時期のずれ、 B_s はベルト速度を表す。

提案法で推定された足部接地の位置は、真値と比較してベルト速度に関係なく若干遠位を示し、平均位置差は4.98cmであった。足部離地位置は著明な差を認めなかった。

(2)トレッドミル自動同調化への応用検討

被験者平均値から比例ゲインおよび積分時間の最適値を求めると、それぞれ $4.20 \times 10^{-3} \pm 5.30 \times 10^{-4}$ 、 $2.25 \pm 7.26 \times 10^{-1}$ となった。図3および4は、フィードバック制御なしで低速度から歩行者が快適と感じる速度まで歩行した際の推定重心前後位置および推定歩行速度を示す。トレッドミル上での歩行者の位置は前方へ移動し、歩行速度は2km/h程度に留まった。一方でフィードバック制御を加えて推定重心位置の変動を制御すると、一定位置での歩行が可能であり、歩行速度も十分に高値を示した(図5、図6)。

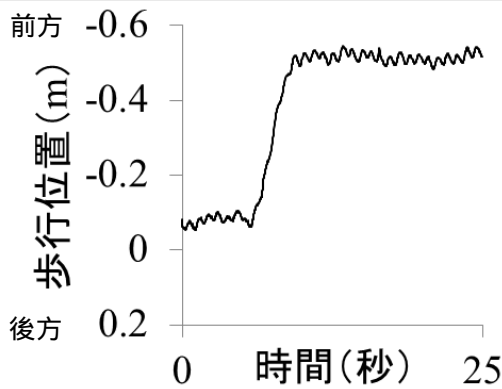


図3 フィードバック制御なしでの推定歩行者位置推移

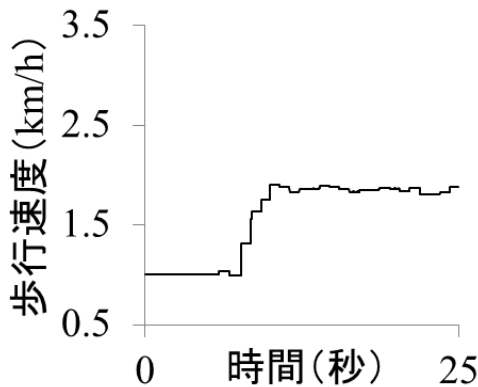


図4 フィードバック制御なしでの推定歩行速度推移

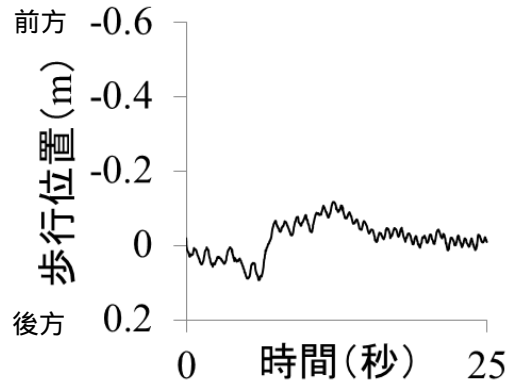


図5 フィードバック制御ありでの推定歩行者位置推移

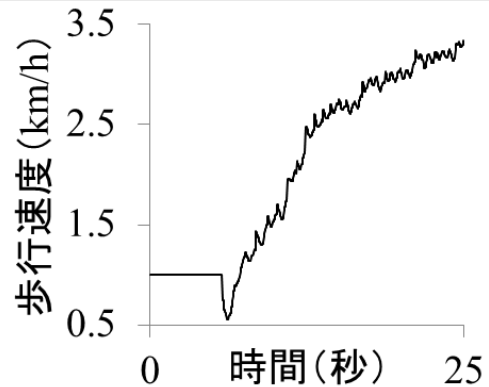


図6 フィードバック制御ありでの推定歩行速度推移

脳卒中片麻痺模擬患者においては、比例ゲインおよび積分時間の最適値はそれぞれ $3.93 \times 10^{-3} \pm 4.31 \times 10^{-4}$ 、 2.09 ± 1.02 となり、健常歩行とは若干異なった値であった。

(3)歩行能力評価への応用検討

各時間距離因子における、従来法から得られた真値と提案法による推定値の比較結果を以下に示す。

健常者の結果において、遊脚時間は高い相関と小さな平均誤差を認めた ($r=0.57$, 誤差 0.042 秒).立脚時間と両脚支持時間は極めて高い相関と小さい平均誤差を認めた ($r=0.98$, 誤差 0.043 秒, $r=0.94$, 誤差 0.040 秒). ステップ, ストライドに関する項目については、すべて極めて高い相関と小さな平均誤差であった(ストライド時間 $r=0.98$, 誤差 0.024 秒; ストライド長 $r=0.99$, 誤差 4.06cm; ステップ時間 $r=0.94$, 誤差 0.025 秒; ステップ長 $r=0.98$, 誤差 3.53cm).

脳卒中片麻痺患者において、計測可能であった最大歩行速度は1.0km/hが1名, 1.5km/hが1名, 3.0km/hが3名, 3.5km/hが3名であった。遊脚時間は高い相関と小さな平均誤差を認めた ($r=0.65$, 誤差 0.085 秒). 立脚時間と両脚支持時間は極めて高い相関と小さい平均誤差を認めた ($r=0.98$, 誤差 0.095

秒, $r=0.93$, 誤差 0.090 秒). ステップ, ストライドに関する項目については, ほぼすべての指標で極めて高い相関と小さな平均誤差であった(ストライド時間 $r=0.98$, 誤差 0.035 秒; ストライド長 $r=0.93$, 誤差 3.17cm; ステップ時間 $r=0.87$, 誤差 0.023 秒; ステップ長 $r=0.93$, 誤差 2.12cm).

(4) 成果のインパクトと今後の展望

提案法は, レーザ測域センサによって計測した下腿運動軌跡から足部接地, 足部離地を推定し, トレッドミル自動同調化および歩行能力評価を行うシステムである.

トレッドミルが歩行者に自動同調する機能によって, 非定常で時間距離因子のばらつきが大きい患者歩行においても, 長時間の持続歩行が可能となると考える. したがって, より早期から, より重度の患者がトレッドミル歩行練習の対象となり得ると考えられる.

また, 提案法による歩行能力評価は簡便に実施可能であり, 特別な計測法を習得する必要もないため, 臨床で広く用いることが可能である. 加えて, 実時間で歩行能力を評価できるため, 患者の歩行能力を随時評価し, 常に最適な歩行練習を提供できる.

これらの特徴によって, 治療効果の向上に伴う患者の入院期間短縮等にも寄与できると考えられ, 社会への貢献は大きいと考える.

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)
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田辺 茂雄 (Tanabe, Shigeo)

藤田保健衛生大学・医療科学部・准教授

研究者番号: 50398632