

歩行リハビリの支援と実施履歴を管理する システムの提案と開発

松岡 基揮¹ 小笠原 千紘¹ 水野 慎士¹

概要: 日本では、超高齢化社会の進行によってリハビリを必要としている人が増加傾向にある。そして、効果的なりハビリを実現するために、リハビリ施設や医療従事者ととも、リハビリを支援するITの需要も高まっている。リハビリでは、辛く感じてしまうことや、効果を実感できないことが原因となり、患者のモチベーションが低下してしまうことが大きな問題となっている。そのため、リハビリのモチベーションの維持・向上を実現するためには、患者にリハビリを楽しく感じてもらうこと、リハビリの効果を実感してもらうことが重要になる。そこで、本研究では歩行リハビリの支援と実施履歴を管理するシステムの提案と開発を行う。歩行者の足の位置によってインタラクティブに変化する映像を床に投影することでリハビリの楽しさを実感させ、歩行に関する様々な情報を取得することでリハビリの効果を実感することができるシステムの実現を行う。

Proposal and Development of a System for Supporting and Managing Walking Rehabilitation

MOTOKI MATSUOKA¹ CHIHIRO OGASAWARA¹ SHINJI MIZUNO¹

1. はじめに

日本では、超高齢化社会の進行によってリハビリを必要としている人が増加傾向にある。厚生労働省の推計によると、医療・介護分野での需要は2018年と比較して2025年は1.24倍、2040年には1.38倍に増加する見込みとなっている[1]。そして、効果的なりハビリを実現するために、リハビリ施設や医療従事者ととも、リハビリを支援するITの需要も高まっている。実際にリハビリを支援する研究は報告されており、杖にセンサデバイスを取り付けることで歩行者の日常での歩行動作をセンシングすることで歩行能力を評価する研究[2]や、KINECTを用いることで膝関節とつま先の座標から求める足の動き、両肩関節と両腰関節の座標から求める上体の動きを可視化・数値化する研究[3]などがある。

リハビリを効果的に行うために充実なものとして、施設

や器具、医療従事者などが挙げられるが、モチベーションがなければリハビリを継続して行えないことから、患者自身のモチベーションも非常に重要であると考えられる。しかし、リハビリに対する辛さや効果の実感のなさから、多くの場合にモチベーションが低下してしまうことがリハビリの分野で問題となっている。そのため、患者の歩行能力を評価するだけでなく、リハビリにエンタテインメント要素を取り入れることで支援する研究もある[4]。リハビリのモチベーションの維持・向上を実現するためには、患者にリハビリ自体を楽しく感じてもらうこと、リハビリの効果を実感してもらうことが重要になる。

そこで、本研究では歩行動作に着目して、インタラクション技術を用いて歩行リハビリの支援を行い、歩行リハビリの実施履歴を管理するシステムの提案及び開発を行う。歩行動作に着目したのは、人の最も基本的な移動能力であり、他の基本動作の土台となるからである。

提案システムでは、リハビリで問題となっているモチベーションの低下を防ぐために、「楽しさ」と「効果の実感」を実現して、患者のモチベーションを維持・向上を行

¹ 愛知工業大学大学院 経営情報科学研究科
Graduate School of Business Administration and Computer
Science, Aichi Institute of Technology, Aichi Toyota 470-
0392, Japan

う。「楽しさ」は、患者の足の位置によってインタラクティブに変化する映像を床に投影することで実感してもらう。また、「効果の実感」は、リハビリ結果を数値化・可視化したり、実施履歴を管理して提示することで実感してもらう。複数のセンサを用いて、リハビリ中の患者の歩行動作に関する様々な情報をリアルタイムに取得して、投影映像に反映して変化させたり、取得情報の分析を行う。

2. システム概要

前述で述べたように、本研究ではリハビリでの問題に対して、「楽しさ」と「効果の実感」の2つの方向からリハビリ支援を行い、患者のモチベーションの維持・向上を行うシステムを開発する。

歩行リハビリの「楽しさ」の実現は、歩行動作に対する床面に投影された映像とサウンドのインタラクシオンを実現することで行う。例えば、歩行中の足を接地させた位置でサウンドとともに映像を反応させたり、映像によって踏むべき場所を示すことで楽しさを実現する。また、リハビリで実際に行われている歩行方法を楽しみながら自然と行えるように促すことも行う。

歩行リハビリの「効果の実感」の実現は、歩幅、歩隔、姿勢、重心、足裏圧力などの歩行動作に関する情報を蓄積しながら分析して、それらをわかりやすく可視化することで行う。取り扱う歩行動作に関する情報は、共同研究を行っている理学療法士の意見に基づいて決定している。患者は可視化された歩行情報を確認することで、リハビリを行ったことにより効果が出ていることを実感することができ、今後のリハビリへのモチベーションにつながると考えられる。

提案システムで用いる足の接地位置情報は、二次元測域センサを用いてスキャンすることで求める。足の接地位置情報を求めることで、歩幅と歩隔を計測することができる。また、歩行中の姿勢と重心位置を計測するために、RGBDカメラを用いて外観情報を取得して、得られた骨格に関する情報に基づいて計算する。足裏圧力は圧力センサとマイコンを内蔵した特別な靴を用いることで取得する。

投影する映像は、二次元測域センサで取得した足の接地位置情報を用いて反映させることで生成する。そして、超短焦点プロジェクタを用いて生成された映像を床面に投影する。例えば、超短焦点プロジェクタを約90cmの高さの台に乗せて床面に映像を投影したとき、縦の長さが約260cm、横の長さが約460cmの映像が投影されて、歩行者は投影された映像の範囲を自由に歩くことができる。

また、取得した歩行情報、歩行中のビデオ映像、インタラクティブ映像を用いた歩行リハビリでの毎回および積算の歩行距離などの歩行リハビリに関する実施履歴を管理するためのシステムをWebベースで開発する。

図1に提案システムを実現するためのハードウェアの構

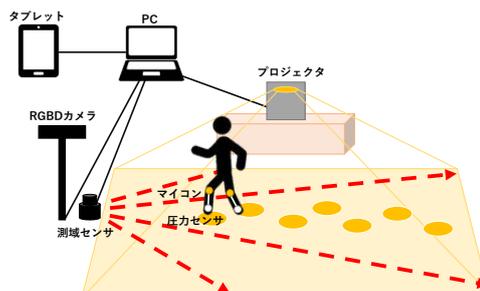


図1 ハードウェアの構成

成を示す。

3. 歩行情報の取得

前述で述べたように、様々な歩行情報を取得するために複数の機材を用いる。足の位置情報の取得のために二次元測域センサ、歩行者の重心位置の取得のためにRGBDカメラ、足裏圧力の重心の取得のために圧力センサとマイコンを使用している。

3.1 足の位置情報の取得

本研究で使用する二次元測域センサは、センサからレーザ光を回転させながら扇面状にレーザを照射して、照射したレーザが当たった物体からの反射光を捉えることで物体の距離と角度を測定する。二次元測域センサは設置した床面の上方10cm程度を平行にスキャンする。そのため、患者が歩く床に二次元測域センサを設置してスキャンすることで歩行中の足の位置情報を検出することが可能となる。取得した足の位置情報は床面に投影するための映像生成時に用いられている。足の位置情報を用いることで、歩行者の足元の映像を変化させたり、足が映像によって提示した場所にあるかどうか判定することが可能となる。

3.1.1 歩幅と歩隔の取得

「効果の実感」のために必要な歩行情報である歩幅と歩隔を求めるために、足の接地位置の取得が必要となる。二次元測域センサは、床面の上方10cm程度をスキャンしているため、足が床面に接地している時だけでなく、上方10cm以内にある床面から離れている足も検出してしまう。そのため、スキャンして得られたデータのままで、足の接地位置を取得することは困難である。そこで、歩行動作中に接地している足は同じ位置に一定時間留まっていることに着目して、スキャンデータを積算することで足の接地位置のみを検出する手法を用いる。初めに1回のスキャン結果を二値画像化する。この1回のスキャン結果では足が接地しているのかわからないので、一定時間分のスキャン結果を積算した画像を生成する。足が接地している場所であれば、その場所に足が検出され続けるため、積算結果の画像では足の接地位置は濃度値が高くなる。最後に閾値で

表 1 各部位の重心係数

部位	取得する関節点	重心比 (%)
頭部	頭	8.0
胴体	胴体	46.0
上腕 (左)	左肩, 左肘	4.0
上腕 (右)	右肩, 右肘	4.0
前腕 (左)	左肘, 左手	4.0
前腕 (右)	右肘, 右手	4.0
大腿 (左)	左尻, 左膝	7.0
大腿 (右)	右尻, 右膝	7.0
下腿 (左)	左膝, 左足	8.0
下腿 (右)	右膝, 右足	8.0

処理することで足の接地位置を求めることができる。

取得した足の接地位置情報を用いて歩幅と歩隔を計算する。これらを計算するために、患者に直線的に歩行をしてもらうとともに、足接地位置の情報から歩行位置を示す直線を計算する必要がある。歩行位置を示す直線は、歩行で得られた足接地位置の集合に対して最小二乗法を適用して線形近似を行う。そして、得られた近似直線を用いて歩幅と歩隔を求める。初めに、近似直線に対して各足接点から垂線を下ろして交点を求める。そして、得られた各交点間の距離が歩幅となる。また、右足と左足の接地点から下ろした垂線の長さを用いることで歩隔が求められる。

3.2 重心位置の取得

身体の重心は、身体の各部位の位置関係や、身体の各部位にかかる負担、動作における効率面からの評価などに利用するため、リハビリにおいて非常に重要な要素である。提案システムでは、RGBD カメラを用いて取得した骨格情報に基づいて患者の歩行中の重心位置を求める。

歩行中の身体の重心を求めるために、身体の構造を 10 個の部位に分割して考える。各部位及び体重に対する重量比率と、各部位の三次元座標が得ることができれば、身体全体の重心を簡易的に求めることができる [5]。

身体の 10 個の部位の座標を取得するために、RGBD カメラを用いて歩行中の 15 箇所の関節点の三次元座標を取得する。そして、得られた関節点座標に基づいて 10 個の部位の三次元座標を算出して各部位の重心の三次元座標が得られる。身体の 10 個の部位とその重量比を表 1 に示す [5]。

各部位の重心の三次元座標が得ることができれば、各部位の重心を合成することで身体全体の重心座標が得られる。

3.3 足裏圧力の取得

足裏圧力を取得するために、圧力センサとマイコンを内蔵した専用のシューズを開発した。圧力センサは母趾球、小趾球、踵の内側、外側の合計 4 箇所に設置した。得られた圧力はマイコンを通じて Bluetooth によって逐次 PC に送られる。そして、取得した各設置場所の圧力データを用



(a) 専用シューズの外観



(b) 専用シューズの構成

図 2 専用シューズについて

いて足裏圧力の重心を求める。試作した専用シューズを図 2 に示す。

4. インタラクティブ映像の生成

床面に投影する映像は、患者の足の位置によってインタラクティブに変化する映像になるように制作する。二次元測域センサで取得した足の位置情報を映像の変化のために用いる。足の位置情報を用いた一例として、歩行者が多数のモデルが配置されている 3DCG 空間の映像を投影した床に足を踏み出すと、二次元測域センサによってスキャンすることで足の位置を取得して、足の位置に対応した 3DCG 空間の位置に存在するモデルに移動や変形を行う。この処理をリアルタイムに行うことでインタラクティブに変化する映像を実現することができる。

歩行リハビリを支援する投影映像には、自由な歩行を促す映像と特定の歩行方法を促す映像の 2 系統用意する。自由な歩行を促す映像には、患者の体力の維持・向上という目的がある。そのため、投影映像を自然と足を踏み入れたくなるようなものにする事で歩行リハビリに楽しさを持たせる。特定の歩行方法を促す映像には、歩行リハビリで実際に行われているような歩行をして、バランス感覚の向上や足の柔軟性の向上という目的がある。これを楽しさとともに実現するために、歩行をゲームのように楽しむことができる映像にする。

4.1 自由な歩行を促す映像

自由な歩行を促す映像として 2 つの映像を制作した。1 つは落ち葉がたくさん落ちているシーンを再現した映像、もう 1 つは雪が積もっているシーンを再現した映像である。これは、多くの人が落ち葉や雪が積もっている場所には自然と足を踏み入れて歩行を楽しく感じるだろうという想定に基づいている。また、2 つの投影映像では歩行者の前方に歩行距離を m 単位で随時表示している。これは、患者に歩きながら現在の歩行距離を知ってもらうことで、長い距離を歩いたという達成感を感じてもらったり、目標の



図 3 落ち葉映像



図 4 雪面映像

距離まで頑張ろうという気持ちを沸かせることができると想定して提示している。以下にそれぞれの映像の概要を述べる。

4.1.1 落ち葉映像

落ち葉映像では、3DCG 空間中にある床面に多数の落ち葉モデルを生成して配置する。歩行者の足の位置と落ち葉の位置が近い場合、落ち葉に力とモーメントを与えることによって落ち葉が回転しながら舞い上がる。そして、舞い上がった落ち葉は重力の影響によって落下する。これを連続的に行うことで、歩行者が足を投影映像上に踏み出すたびに足元の落ち葉が舞い上がって落ちる映像が生成される。また、歩行者に踏み込んだ感覚をより深く感じってもらうために、落ち葉が床面から舞い上がる時に落ち葉同士がこすれるようなサウンドを再生する。図 3 に落ち葉映像を投影して歩行した様子を示す。

4.1.2 雪面映像

雪面映像では、3DCG 空間中に格子構造で作られた床面を生成して配置する。歩行者が投影映像上に足を踏み出すと、足の位置に近い格子点の位置を下方に移動させる。この際、足の位置と格子点の位置が近いほど大きく移動させる。そして、足の位置が格子点の位置から離れた場合、格子点が徐々に元の高さに戻る。これを連続的に行うことで、歩行者が雪面の上を踏んだ時に雪面が凹む映像が生成される。また、雪面が凹む際に踏んだ感覚を歩行者に感じってもらうために、雪を固めるようなサウンドを再生する。図 4 に雪面映像を投影して歩行した様子を示す。

4.2 特定の歩行を促す映像

特定の歩行を促す映像として 4 つの映像を制作した。これらの映像は全てゲーム感覚で歩行ができ、主に大股歩行や横向き歩行を促す映像である。歩行リハビリにゲーム性を持たせることで、患者に歩行リハビリで実際に行われている効果のある歩行を促すとともに楽しく歩行をしてもらい、モチベーションの維持・向上を図る。以下にそれぞれの映像の概要を述べる。

4.2.1 提示された場所を踏むことでゴールを目指す映像

提示された場所を踏むことでゴールを目指す映像では、踏むべき場所を示した 2 つの星を 3DCG 空間上に生成する。はじめに、歩行者がスタート位置に立つと映像上に 2 つの星が表示される。そして、それぞれの星を両足で踏むことにより、歩行者前方に踏む場所を示した星が移動して表示される。これを連続的に行っていくことで、歩行者がゴール位置に到達するとゲームクリアとなる。歩行者が星を踏んでいることをより実感してもらうために、踏んでいる間は星が一定の大きさまで大きくなり音を鳴らして回転する。歩行者の歩行リハビリにおける歩行方法に応じて適切に星を移動させることで大股歩行や横向き歩行などの歩行を促すことが可能となる。図 5 に提示された場所を踏むことでゴールを目指す映像を投影して歩行した様子を示す。

4.2.2 障害物を回避してゴールを目指す映像

障害物を回避してゴールを目指す映像では、いくつかのひび割れた面が含まれている格子構造の床面を 3DCG 空間上に生成する。歩行者は、スタート位置からひび割れた面を踏まないように進み、ゴール位置に到達することでゲームクリアとなる。ひび割れた面には耐久度を設けてあり、歩行者のひび割れた面上の滞在時間により徐々に減少していき、耐久度が 0 になると床に穴があきゲーム終了となる。耐久度が残り半分になった際、よりひびの入った面が変わり音になることで歩行者に残り耐久度を知らせる。また、穴が空いた面になった際にも音を鳴らす。ゲームを無事クリアするためにはひび割れた面を避ける必要があるため、大股歩行や横向き歩行などの歩行を促すことが可能となる。図 6 に障害物を回避してゴールを目指す映像を投影して歩行した様子を示す。

4.2.3 物体が歩行者に合わせて移動する映像

物体が歩行者に合わせて移動する映像では、塀の上に猫がいる様子を再現するように 3DCG 空間上にモデルを生成する。歩行者は映像上の塀の下の地面部分のみ歩行することができる。歩行者の進行方向から横に向いた位置に猫が見えるようになっており、猫が歩行者の動きに合わせて塀の上を歩いてついてくるので、歩行者が猫を見ることで自然に横向きの歩行になるように促している。図 7 に物体が歩行者に合わせて移動する映像を投影して歩行した様子を示す。



図 5 提示された場所を踏むことでゴールを目指す映像



図 7 物体が歩行者に合わせて移動する映像



図 6 障害物を回避してゴールを目指す映像



図 8 物体を獲得して点数を稼ぐ映像

4.2.4 物体を獲得して点数を稼ぐ映像

物体を獲得して点数を稼ぐ映像では、木に複数生成されたリンゴモデルが落ちてきて、歩行者はそのリンゴの場所に向かい触れることで点数を獲得するゲームとなっている。スタート位置に立つとゲームが始まり、制限時間内により多くのリンゴを獲得して高得点を目指してもらう。制限時間を過ぎるとゲーム終了となり、点数の結果を映像によって示す。物体が歩行者に合わせて移動する映像と同じく、歩行者は映像の端のみを歩行することができ、リンゴが落ちてくる様子を見ながら移動をしなければならないので、自然に横向きの歩行に促されるような映像となっている。図 8 に物体を獲得して点数を稼ぐ映像を投影して歩行した様子を示す。

5. 実施履歴の管理

センサでスキャンして得られた歩行に関する情報や、歩行中のビデオ映像、インタラクティブ映像を用いて行った歩行の距離などは実施履歴として管理する。実施履歴を管理してタブレットを用いて提示することができれば、過去のデータと現在を比べて歩行にどのような変化があったのか知ることができ、医療従事者の方々の記録のサポートになり、患者にリハビリの効果を視覚的に実感させることができる。気軽に実施履歴を閲覧できるように、Web ベースで開発してタブレットでいつでも閲覧できるようにする。

実施履歴は患者ごとに分けて管理する。さらに日時でリハビリ履歴を分けて、その日時を選択することで情報を閲覧できる。選択した日時に行われた歩行リハビリ時の歩行

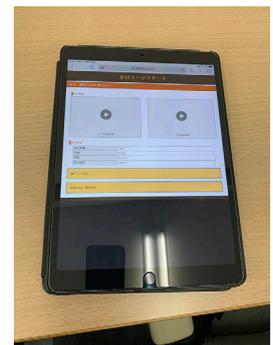


図 9 実施記録の閲覧

情報、その様子を撮ったビデオ映像および歩行の軌跡を描画した投影映像、インタラクティブ映像を用いて歩行した際の歩行距離などを閲覧することができる。

図 9 にタブレットで実施記録を閲覧した様子を示す。

6. 実験

歩行情報取得に関する実験では、初めに二次元測域センサと RGBD カメラを組み合わせ、歩幅、歩隔、重心を同時に取得する実験を行った。被験者に歩幅 61cm、歩隔 30cm、距離約 10m の直線的な歩行動作を行ってもらった。足接地位置の取得に基づく歩幅と歩隔の計測、歩行中の重心位置の取得を行い、精度の検証を行った。このとき、スキャン結果は 1 画素 1 cm で画像化、積算画像から接地位置を抽出するための二値化閾値は 40 (接地時間 1.3 秒以上) とした。図 10 に取得した足接地位置を示す。結果、提案手法で歩行動作時の足接地位置が検出できていることを確

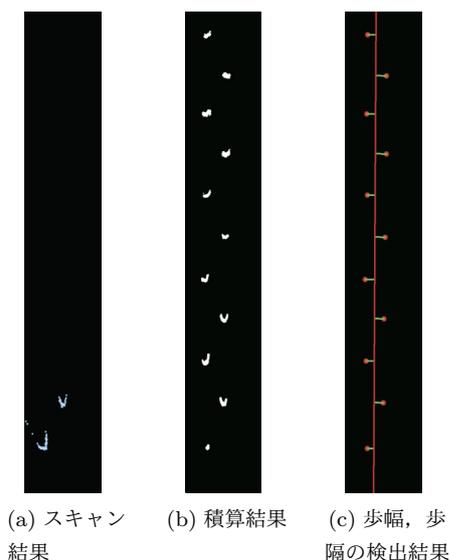


図 10 取得した足接地位置

認することができた。歩幅の計測値の平均は 30.0cm で標準偏差は 1.8cm であった。このことから、提案手法によって歩幅と歩隔が歩行リハビリの効果の確認に十分な精度で計測できることがわかった。

次に、提案手法を組み合わせ、複合的な歩行情報を取得して映像によって可視化した。図 11 に歩行中の足接地位置と状態姿勢を同時に取得している様子を示す。この映像から、リハビリの結果をわかりやすく確認することができる可能性を示すことができた。また、図 12 に身体の重心位置の移動の様子を示す。図 12(a) は普通に歩行した場合で、図 12(b) は高齢者の歩行を再現して大腿で歩行した場合である。歩行情報を可視化することで、歩き方の違いが明確に現れることを確認した。

次に、開発した専用シューズを用いて歩行中の足裏圧力を計測する実験を行った。シューズに内蔵されている圧力センサ FSR402、マイコンは M5Stack である。通常の歩行と片足を引きずった歩行を約 5 m 行い、圧力センサによって圧力を検出した。図 13 に 2通りの歩き方での歩行中の足裏の 4箇所（母趾球、小趾球、踵内側、踵外側）の圧力の変化を試作シューズで取得した結果を示す。歩行中の足裏圧力を取得できたことを確認した。また、通常の歩行と引きずった歩行で左右の足裏圧力の変化に違いが見られることを確認した。引きずり歩行では足の内側を引きずっているが、それが歩行中の圧力変化でも確認できた。このことから、取得した足裏圧力から歩行状態の識別、歩行中のバランスを確認できる可能性が示された。しかし、足裏圧力の分析と解析は今後の課題としている。

インタラクティブ映像に関する実験では、全ての映像を実際に投影して歩行を行った。自由な歩行を促す映像では、落ち葉映像であれば落ち葉の上、雪面映像であれば雪面の上を実際に歩いているような雰囲気を感じて、何もの

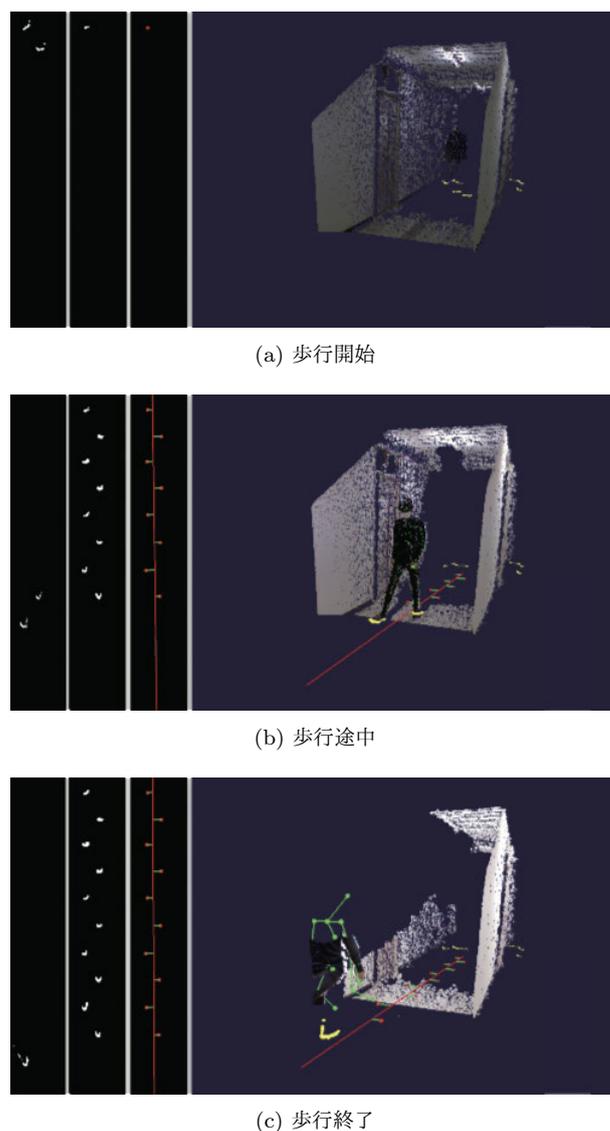
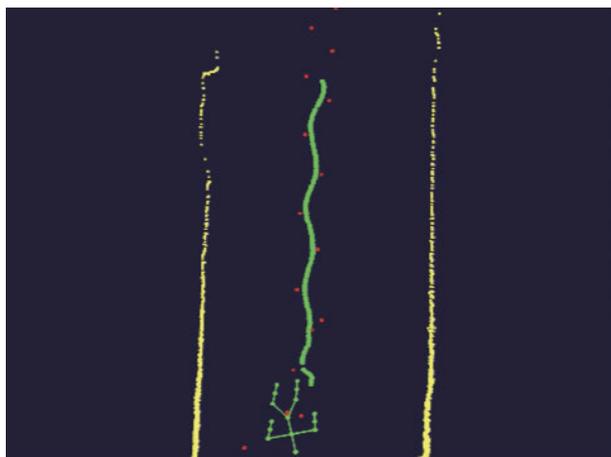


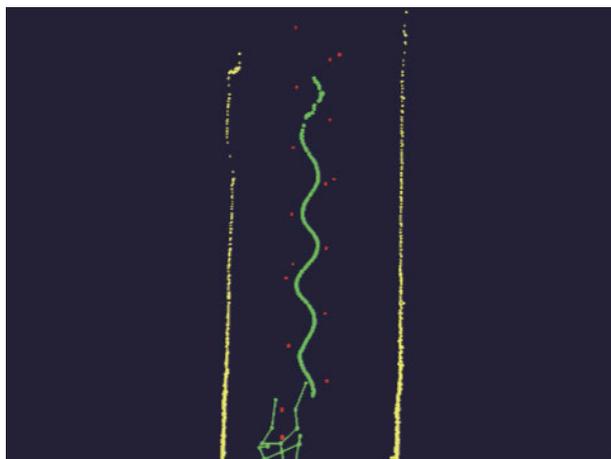
図 11 歩行中の足接地位置と状態姿勢を同時に取得している様子

い床を歩いている時より楽しい気持ちになることを確認できた。また、映像上に歩行距離が表示されることにより、自身の達成感やモチベーションになっているように感じた。特定の歩行を促す映像では、ゲーム形式である映像のギミックにより自然と大腿歩行や横向き歩行になることを確認することができた。また、ゲームクリアという目的があるため、ただ歩行するより、夢中になって楽しく行うことができるということがわかった。

実施履歴の管理に関する実験では、実際にインタラクティブ映像を用いて歩行を行い取得した情報を記録し、タブレットを用いて記録情報を閲覧した。行った歩行情報が正しく記録されていること、タブレットを用いて手軽に見ることができて患者ごとや日付ごとに見やすくなっていることを確認した。表示内容を患者向け、医療従事者向けにした提示は今後の課題であると感じた。



(a) 通常の歩行

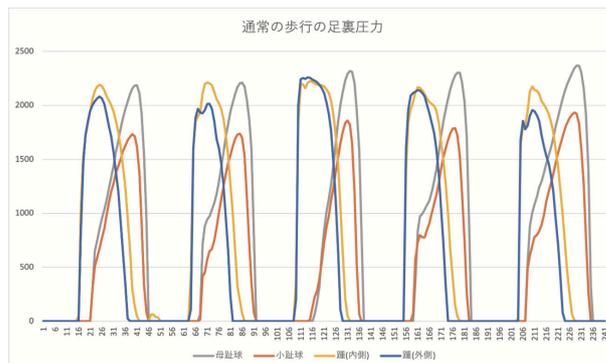


(b) 大股歩行

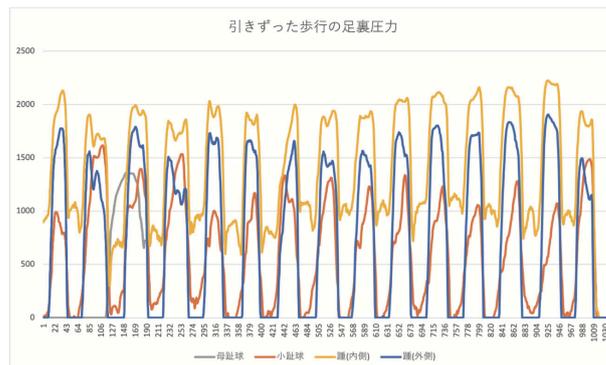
図 12 身体の重心位置の移動の様子

7. まとめ

本研究では、二次元測域センサ、RGBD カメラ、圧力センサを用いて歩行リハビリ患者の歩行情報を取得する手法の開発、インタラクティブ映像を床面に投影することで歩行リハビリを支援するシステムの開発、リハビリの実施記録を管理してタブレットで閲覧するシステムの開発を行った。歩行情報の取得、インタラクティブ映像を用いた歩行、実施記録の管理を行うことで、ただリハビリを行うよりも「楽しさ」と「効果の実感」という面でモチベーションを向上できることを確認できた。今後は、複合的な歩行情報の分析と可視化手法の開発を行い、より詳細な歩行情報取得システムの開発をする。また、インタラクティブ映像で新たな歩行動作の促しや、歩行情報取得システムと組み合わせた計測システムの実現を行う。そして、患者視点と医療従事者視点で、得られた歩行情報をよりわかりやすく便利に提供できる Web システムの検討を行うつもりである。



(a) 通常の歩行の足裏圧力



(b) 引きずり歩行の足裏圧力

図 13 歩行時の足裏圧力

参考文献

- [1] 厚生労働省 理学療法士・作業療法士需給分科会 (第 3 回), 資料 1 理学療法士・作業療法士の需要推計について, 入手先 <<https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi2/0000132674.00001.html>> (2019).
- [2] 高橋雄太, 音田恭宏, 藤本まなと, 荒川豊, “歩行リハビリ支援のためのセンサ装着杖を介した歩行動作認識手法の提案”, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2017 論文集, Vol. 2017, pp.44-51 (2017).
- [3] 新沼昂幸, 村田嘉利, 鈴木彰真, 佐藤永欣, “KINECT を用いた転倒防止システムの提案”, 第 79 回全国大会講演論文集, Vol. 2017, No. 1 pp. 399-400 (2017).
- [4] 松隈浩之, 藤岡定, 中村直人, 原田浩子, 百武永里子, 内之浦真士, 足立勇人, 梶原治朗, 服部文忠, “起立-着席訓練のためのリハビリテーション用シリアスゲームの介護老人保健施設への導入”, Vol. 2012-EC-24, No. 3, pp. 1-5 (2012).
- [5] 松井秀治, “各種姿勢の重心位置に関する研究 : (1) 身体各部の簡易質量計算とその質量比による重心位置の合成”, 体育学研究 2, pp. 65-76 (1956).