

長寿医療研究開発費 2020年度 総括研究報告

懸架ハーネス使用時における転倒動作の動作解析をするシステムの構築（20-52）

主任研究者	相本 啓太	国立長寿医療研究センター リハビリテーション科部（理学療法主任）
分担研究者	近藤 和泉	国立長寿医療研究センター（副院長）
	土元 翔平	国立長寿医療研究センター健康長寿支援ロボットセンター（外来研究員）
	松村 純	国立長寿医療研究センター リハビリテーション科部（理学療法主任）
	大脇 駿平	国立長寿医療研究センター リハビリテーション科部（理学療法士）
	浅井 裕介	国立長寿医療研究センター リハビリテーション科部（理学療法士）

研究要旨

本研究の目的は、歩行練習中にバランスを崩した状態（以下、転倒状態）を動作解析するためのシステムを構築することである。

本研究では、当センターの懸架ハーネスを使用したバランス練習中の動作を長時間ビデオカメラにて撮影し、転倒状態が生じた際の映像データを解析するシステムおよび解析用マニュアルを作成する。

映像撮影には、複数台の監視用ビデオカメラを一定間隔で点滅するLEDを用いて同期して撮影する。撮影した映像データの動作解析には、プログラミング言語のpythonおよび深層学習を用いたマーカレスモーションキャプチャのオープンソフトウェアなどを用いる。撮影したデータは二次元データであるため、2つのビデオカメラからの映像データにより、Direct Liner Transformation法を用いて三次元に再構成する。

研究協力者である理学療法士が転倒状態を再現し、その動作を撮影したデータを用いて動作解析を行う。さらに、ビデオカメラの同期撮影およびマーカレスモーションキャプチャでの動作解析までを行うためのマニュアル作成までを本研究で実施する。

主任研究者

相本 啓太 国立長寿医療研究センター リハビリテーション科部（理学療法主任）

分担研究者

近藤 和泉 国立長寿医療研究センター（副院長）

土元 翔平 国立長寿医療研究センター 健康長寿支援ロボットセンター（外来研究員）

松村 純 国立長寿医療研究センター リハビリテーション科部（理学療法主任）

大脇 駿平 国立長寿医療研究センター リハビリテーション科部（理学療法士）

浅井 裕介 国立長寿医療研究センター リハビリテーション科部（理学療法士）

A. 研究目的

本研究の目的は、バランス練習中の映像を記録し、転倒状態を動作解析する研究へ展開するために、ビデオカメラにて撮影した映像を同期させ、動作を解析する研究システムを構築することである。具体的には、懸架ハーネスの歩行路を取り囲むように配置した複数台のビデオカメラを同期撮影する実験系を構築し、理学療法士による模擬的な転倒状態を撮影する。次に、撮影した映像をマーカレスモーションキャプチャによって動作解析するシステムを構築する。これらが円滑に実施できるマニュアル作成までを行う。

B. 研究方法

1) マーカレスモーションキャプチャソフトウェアの検討

マーカレスモーションキャプチャに使用するソフトウェアを、解析時間や一定レベルの精度があるかの検討を行う。

本研究では、マーカレスモーションキャプチャソフトウェアとして、**DeepLabCut** と **OpenPose** を検討した。**DeepLabCut** は **Google** が開発したオープンソフトウェアである。**DeepLabCut** では動画に対して、研究者が動画上の任意の特徴点を指定し、少数の教師画像のラベルを作成することで、その特徴点を追尾することができる。**OpenPose** は、2017年に発表された人に特化したマーカレスモーションキャプチャソフトウェアであり、医療関係者は無料で使用することができる。同じ動画をそれぞれのソフトウェアで解析をして、解析時間や精度の検討をする。

2) ビデオカメラを同期するためのシステム作成

懸架ハーネスを設置している歩行路に配置する複数台のカメラを同期させるため、0.1Hzで点滅する **LED** ライトの作成を行う。実際の映像の同期は、以下の手順で行う。10秒ごとに点滅する1台の **LED** ライトを複数台のカメラから撮影する。1台の **HDD** に集められた複数のカメラ映像から、転倒状態が生じる直前の **LED** ライトが点灯したタイミングで、解析の開始時点を合わせる。

3)ビデオ映像解析プログラムの作成

ビデオカメラ設置後の三次元空間座標に変換するためのキャリブレーションを実施する。ビデオカメラを固定設置した後、長さが分かる直方体（0.5×1.2×1.2m）のキャリブレーションフレーム（12点を使用）を歩行路に設置する。ビデオ映像画面の座標と実空間の二次元空間座標の関係を把握し、**Direct Linear Transformation Method**にて三次元空間座標を推定する。くわえて、レンズの歪み補正をするキャリブレーションプログラムを作成する。上記三次元化の評価として、フレームの実空間上の座標と変換行列により得られた座標のズレの絶対値を算出する。

4)ビデオ映像解析の検討

検討すべき転倒状態を把握するために、事前にセラピストにハーネス使用時のバランス練習と転倒リスクの高い動作に関する以下のアンケートを実施する。アンケート結果に基づき、物品使用なども含めて再現する。

理学療法士および作業療法士に懸架ハーネスを使用したときの転倒状態が生じたときのリハビリテーションについてアンケートを実施した。アンケート項目は、以下の通りである。

質問1：懸架ハーネスを使用したリハビリテーションを実施したことがありますか？

質問2：（質問1が”ある”の場合）懸架ハーネス使用時に患者さんが、つまずいたり、懸架ハーネスが無ければ転倒したりするなどバランスを崩しそうなときはありましたか？

質問3：（質問2が”ある”の場合）バランスを崩しそうな動作はどのような練習のときに起こりましたか？

5)マニュアル作成

転倒状態の映像抽出・同期やマーカレスモーションキャプチャの使用法およびキャリブレーションによる座標変換を含めた動作解析までを、リハビリスタッフが効率的に行えるマニュアルを作成する。

（倫理面への配慮）

システム構築を目的としているため、倫理面への配慮はない。

C. 研究結果

1) マーカレスモーションキャプチャソフトウェアの検討

今回、DeepLabCutにおいて約24時間（約80万回）の学習を実施したが、特徴点が隠れた場合の精度が視診において低く、時折関節中心が隠れていないときにも特徴点が表示されていないときがあった（図2 A, C）。一方OpenPoseでは、撮影した動画をプログラ

ムにより取り込んだ後、撮影時間とほぼ同じ時間で、座標データの出力が可能であり、視診では十分な精度を確認できた(図2B,D)。以上の解析時間および視診での精度確認により、OpenPoseをメインとしたシステム構築に取り組むことにした。

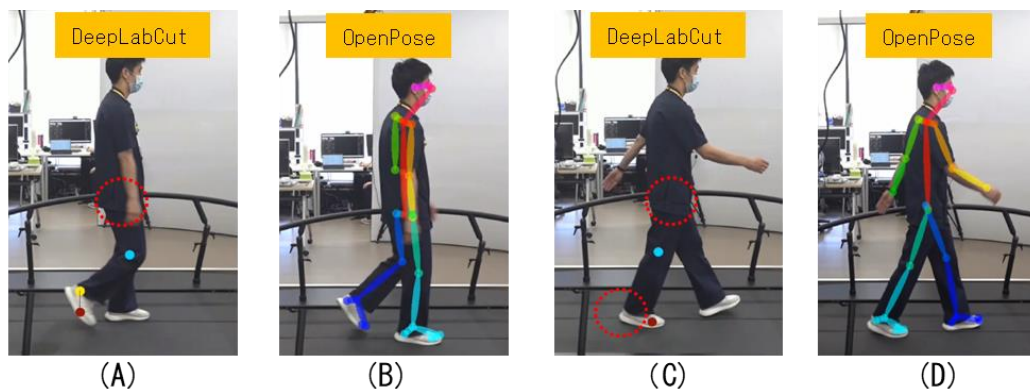


図2 DeepLabCut と OpenPose の比較

- (A) 股関節の特徴点が、上肢と重なり消えている
- (B) 股関節が上肢と重なっているが、特徴点が表示されている
- (C) 重なりはないが、股・足関節の特徴点が消えている
- (D) すべての特徴点が表示されている

2) ビデオカメラを同期するためのシステム作成

Raspberry Pi とブレッドボードでプログラミングし、LED の点滅システムを作成した。初めの作成では、LED の輝度が不十分で LED から離れたカメラからでは LED の光りを認識しにくかった。LED の十分な輝度を確保するため、高輝度 LED や抵抗を選択し直し、LED システムを作成した。

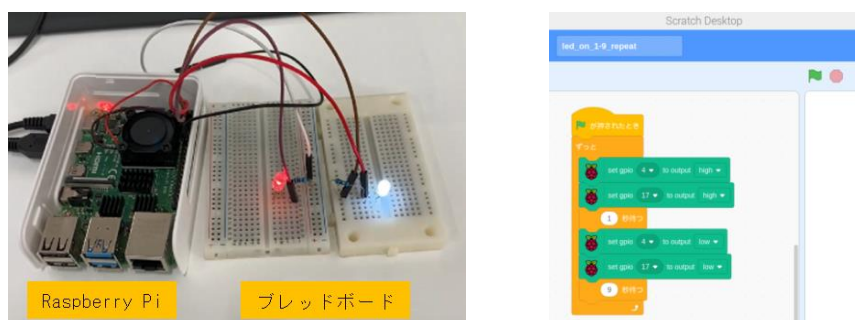


図3 Raspberry Pi で作成した LED 点滅システム (上) と LED 点滅の制御に利用したScrach3 (下)

Scrach3 のプログラムにより、ブレッドボード上の LED を制御する。

3) ビデオ映像解析プログラムの作成

i) 座標出力の流れ

OpenPose で出力された特徴点の二次元座標は、1 フレームごとに、json 形式で保存される。そのままでは扱いにくいいため、出力されたすべての json ファイルを統合し、csv ファイルで保存するプログラムを python で作成した。

統合した csv ファイルは、各特徴点が二次元の座標として時系列に並ぶ。この二次元座標を 2 台のビデオカメラから準備した。

ii) DLT (Direct Liner Transformation) 法の実施

キャリブレーションフレームを撮影した動画から 1 枚の画像を切り出した。切り出した画像から Windows PC のペイントソフトを利用して、キャリブレーションフレームの映像内における座標を算出した。2 台のビデオカメラにおける映像内の二次元座標と、実際の空間における三次元座標 (1 点を原点 (0, 0) と規定し、原点からの距離を三次元で表示) の関係から、変換行列を Microsoft Excel で作成した。続いて、2 つのビデオカメラより出力した二次元座標から、作成した変換行列を含むプログラムを Microsoft Excel のマクロ機能を利用して自動化した。このマクロを使用することで、座標を確認しながら実際の歩行などの動作から得られた 2 つの二次元座標を数秒で三次元座標に変換することができる (図 4)。

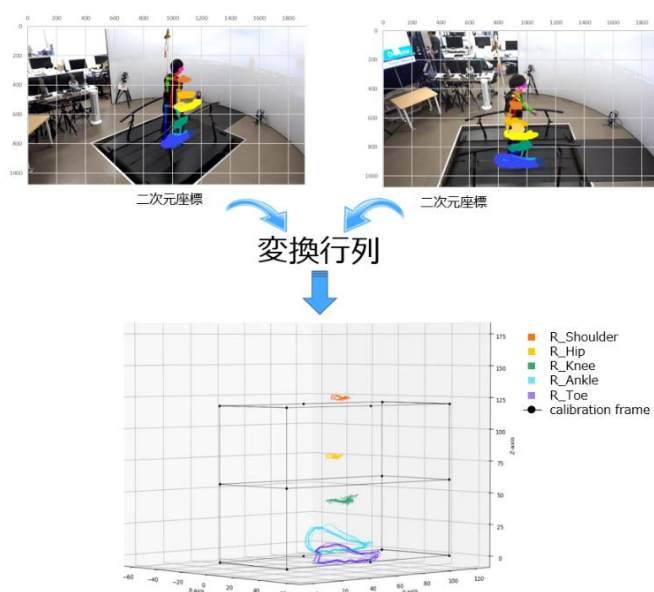


図 4 二次元座標から三次元座標への再構成

2 つの動画から得られた二次元座標 (画像上に動画撮影した歩行中の各特徴点の動きをプロットしている) を DLT 法により得られた変換行列を用いて、三次元に再構成している。三次元に再構成した図には、目安としてキャリブレーションフレームも表示している。

レンズの歪みに対するレンズキャリブレーションは、今回使用したカメラでは非常にわずかではあったものの、今後画角の広いビデオカメラや広角レンズを使用する可能性を踏まえて、python でレンズの歪み係数を算出するプログラムを作成した。このレンズキャリブレーションによる歪み係数はマクロ内で適応されている。

上記により出力した三次元データは、ノイズ（特徴点の非常に細かな動き）が多かった。通常のマーカ有りのモーションキャプチャでも使用される 6Hz の low pass filter のプログラムを作成し、解析プログラムに組み込んだ（図 5）。

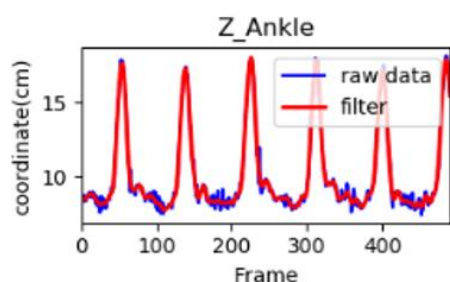


図 5 low pass filter 処理前後の特徴点例（足関節の上下座標）

青線：生データ、赤線：生データに 6Hz の low pass filter を適応したデータ

図は例として足関節の上下方向における特徴点の時系列の動きを表示している。

三次元化により得られたキャリブレーションフレーム座標と実空間上座標のズレの絶対値における平均値（12 点）は、3.9mm（最小 0.3mm～最大 9.1mm）であった。

以上の流れは、キャリブレーション作業は 1 度必要（10 分程度）なもの、同じカメラ位置からの撮影であれば、それ以降のみの作業（5 分以内）で実施することができる。

4) ビデオ映像解析内容の検討

懸架ハーネスを使用したときの転倒状態が生じたリハビリテーションについて、理学療法士および作業療法士に実施したアンケート結果を以下に示す。

計 68 名から回答を収集した。質問 1 では 76%（68 名中 52 名）が懸架ハーネスを使用したリハビリテーションを実施したとの回答であった。質問 2 では、懸架ハーネス使用時に患者がバランスを崩したことがあったのは、48%（52 名中 25 名）であった。

転倒しそうな動作としては、通常の歩行練習以外には、

- ・後ろ向き歩行
- ・方向転換練習

- ・柔らかいマット上での外乱刺激を加えたとき
 - ・ボールを投げる、蹴る練習
 - ・片脚立位
 - ・物の拾い上げ練習
 - ・段差昇降練習
- があげられた。

上記動作を、複数の監視カメラを同期させた映像を用いて、作成したプログラムでの解析を行った。上記動作の多くで三次元化できることを確認できた。一方で、対象者の近くに別の人がいると、解析対象が変わってしまうという問題がみられた（図 6）。

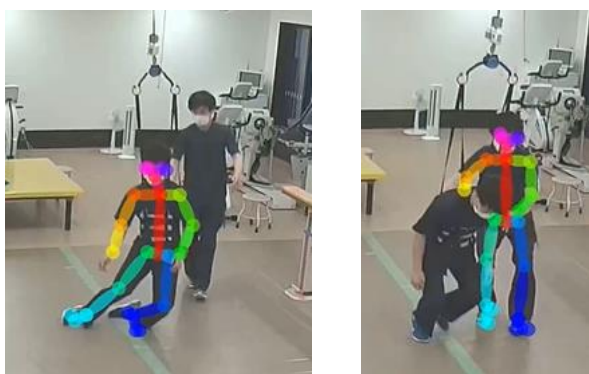


図 6 OpenPose で解析された動画

左：転倒状態の対象者を解析できている 右：解析対象者が介助者に移っている

5) マニュアル作成

動画の計測からマーカレスモーションキャプチャでの解析、三次元化までをマニュアルとして作成した。作成したマニュアルをもとに分担研究者が、作業ができることを確認した。

D. 考察と結論

懸架ハーネスを備えた場所において、複数の監視カメラと同期用 LED から、解析したい必要な動作部分を切り出し、マーカレスモーションキャプチャにて三次元化するシステムを作成できた。キャリブレーションフレームにおける実空間と三次元化により得られた座標のズレは最大 10mm 未満であり、一定の精度を確保することができた。

一方で、今回作成した OpenPose では、対象者の近くに別の人がいると、解析対象が変わってしまう可能性が生じるという問題がみられた。DeepLabCut でも同様の問題は生じる。これは、OpenPose が、リアルタイムでの解析も可能なボトムアップ型の深層学習を行っていることが 1 つの要因として考えられる。ボトムアップ型では、人の認識は行わず関節中心に相当する特徴点の抽出と特徴点同士を結ぶ処理が行われる。そのため、対象者を追跡す

ることが難しい場合があると考えられる。データを出力した後で、誤認した解析対象者の調整・変更は可能であるものの、時間を要する。追跡対象者の誤認をゼロにすることは、現在の技術では困難である。しかし、人を認識した後に特徴点を抽出するトップダウン型のマーカレスモーションキャプチャを使用することで、追跡対象者の誤認が減る可能性がある。今回作成した解析システムは、ソフトウェアが変わっても三次元化や同期方法は同じ方法を使用することができる。人工知能を用いたマーカレスモーションキャプチャは、アップデートされ続けている。効率のより良い解析システムを実現していくために、OpenPose のバージョンアップに限らず、新しいマーカレスモーションキャプチャソフトウェアの導入を検討する必要がある。

今回、複数カメラと同期用 LED から、マーカレスモーションキャプチャにて三次元化するシステムを作成できた。マーカレスモーションキャプチャは、対象者の時間や衣服に関する制限が少なく、非常に有意義な方法である。作成したシステムは、ビデオカメラ 2 台で三次元化が可能な非常に簡易なシステムである。今回の転倒状態の解析に限らず、多くの応用が考えられる。引き続き、今回のシステムを発展させていく。

E. 健康危険情報

なし

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

相本啓太，松村純，大脇駿平，浅井裕介，他. 簡易的なマーカレスモーションキャプチャを用いた三次元化の試み，第 42 回臨床歩行分析研究会定例会（予定）.

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし