

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22827

研究課題名（和文）全天球カメラを用いた3次元動作解析システムの研究開発

研究課題名（英文）Research and development of three-dimensional motion analysis system using omnidirectional cameras

研究代表者

長野 明紀（Nagano, Akinori）

立命館大学・スポーツ健康科学部・教授

研究者番号：30392054

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では画角の広い全天球カメラを用いて3次元の動作解析システムを構築する事を目的とした。一般に3次元の動作解析には通常のカメラを用い、透視投影法に基づく分析を実施する。この手法は現在ゴールドスタンダードとなっているものの、カメラの画角に限られる、対象物の近くにカメラを配置することが困難である、という問題がある。本研究では全天球カメラを用いてこれらの問題を解決することに成功した。全天球カメラを用いるにあたり直交座標ではなく極座標を念頭におき、天球の緯度と経度を明示的に扱う事とした。これに対応した3次元座標の再構成を可能にする数式群を立案した。またその有効性と精度を実証実験を通して示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動作解析の技術はこれまでスポーツ科学・健康運動科学の分野で多く用いられてきた。近年では一般家庭、病院、オフィス、学校、保育所・託児所等で動作解析を実施する事が望まれている。これによりリハビリテーション、介護、職場・学校での健康管理、乳幼児の見守りなど現在の社会が有している様々な課題の解決に貢献できると考える。一方でこれまでの通常のカメラを用いた3次元動作解析の手法は適用できる物理的環境に限られており、スポーツの競技場の様な非常に広い領域でも、上記の様な障害物を有する狭小な領域でも使い難いという問題があった。本研究の成果はこれらの問題を解決するものであり、学術的にも社会的にも大きな意義を有する。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to develop a three-dimensional motion analysis system using omnidirectional cameras with a wide angle of view. Generally, a normal camera is used for three-dimensional motion analysis, and analysis based on the perspective projection method is performed. Although this method is currently the golden standard, it has the problems that the angle of view of the camera is limited and the camera cannot be placed near the object. In this study, we succeeded in solving these problems using omnidirectional cameras. When using omnidirectional cameras, we explicitly handled the latitude and longitude of the celestial sphere, based on polar coordinates in addition to Cartesian coordinates. We have devised a group of mathematical formulas that enable the reconstruction of 3D coordinates corresponding to this. In addition, its effectiveness and accuracy were shown through an experiment.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：DLT法 NLT法 モーションキャプチャー

1. 研究開始当初の背景

動作解析はスポーツ科学・健康運動科学・及び関連分野における重要な方法論の1つである。多くの場合動作解析では、身体の解剖学的ランドマーク点の3次元座標を取得し、解析を進める。3次元座標の値を微分する事で速度・加速度を計算し、更に運動時に身体に作用する力・トルクといった力学的変数を求めていく。

動作解析において3次元座標データを取得する方法として Direct Linear Transformation 法 (DLT 法) 並びに Non-Linear Transformation 法 (NLT 法) はこれまで最も広く使用されており、この分野におけるスタンダードであるといえる。DLT 法及び NLT 法は通常の光学式カメラの構造を基盤としており、透視投影モデルに立脚している。ここで通常のカメラを用いる場合、撮影できる画角が限られる、対象物の近くにカメラを配置する事が困難である、という問題がある。特に対象物が広い領域を移動する場合や、撮影領域が障害物を有する場合には多数のカメラを用いたり、カメラをパンニングしたりする必要がある。これには大きなコストが掛かり、セッティングに要する時間も長くなり、求められる技術も高くなる。

2. 研究の目的

本研究開発では、画角の非常に広い全天球カメラを用い、これらの問題を解決することとした。全天球カメラでは文字通り全天球(レンズが一つの場合は半天球)の映像を記録する事が可能である (Fig. 1.)。また対象物から 20 センチ程度離ればピントが合った状態になるため、対象物の近くにカメラを配置できるという特徴もある。

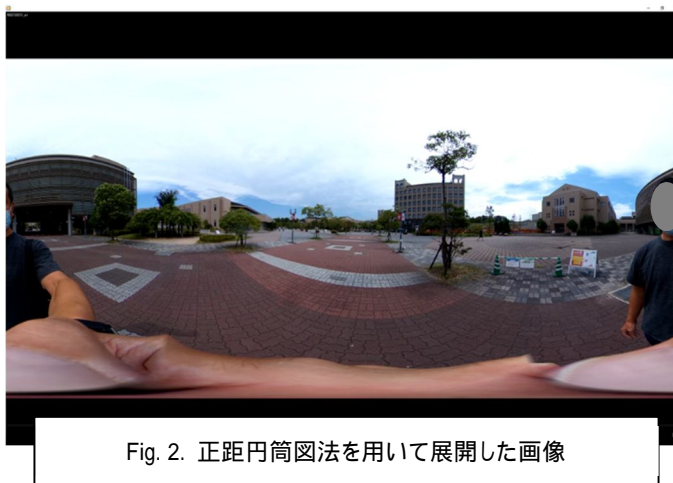
一方で全天球カメラではその構造が通常のカメラと異なっている。DLT 法・NLT 法は透視投影モデルに基づく通常のカメラの構造に立脚しているため、本研究に DLT 法・NLT 法のアルゴリズムをそのまま用いる事は不可能である。そのため本研究では全天球カメラの構造に合致した新たな3次元座標の取得法を考案した。DLT 法に着想を得た手法と NLT 法に着想を得た手法の二つを考案した。

3. 研究の方法

(1) 本研究で用いた座標系

本研究では通常の直交座標系に加えて極座標系を考えることとした。

全天球カメラを用いて取得した画像は正距円筒図法を用いて長方形に展開することができる (Fig. 2.)。この際、長方形の画像内の横位置が天球の経度に、縦位置が天球の緯度に相当する。



本研究ではこの経度と緯度を使用してカメラレイの方向ベクトルを定めた。この緯度・経度に基づいたカメラレイの定め方に本研究のオリジナリティの一つがある。(透視投影法ではカメラの光学中心と仮想的な投影面、対象物の間を直線で結び、三角形の相似関係に基づいてカメラレイの方向を定める。)カメラの直交座標系と極座標系との関係は Fig. 3. に示す通りである。

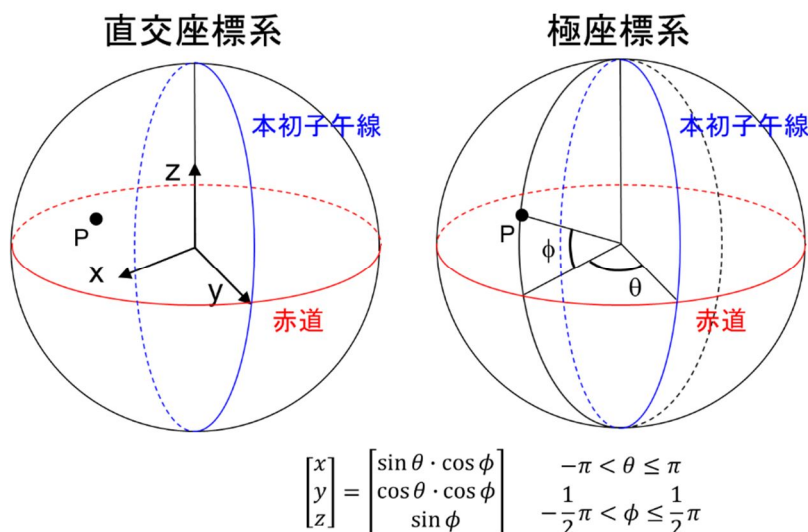


Fig. 3. 本研究で用いた直交座標系と極座標系の関係

(2) DLT法に着想を得た手法

3次元座標の再構成のためには幾つかのパラメータ値を定める必要があり、このパラメータ値を求めるプロセスをキャリブレーションと呼ぶ。一般にそれぞれのカメラによって決まるパラメータを内部パラメータと呼び、グローバル座標系に対するカメラの位置と姿勢角によって決まるパラメータを外部パラメータと呼ぶ。DLT法ではこれらの内部・外部パラメータの関数として定まる11の「DLTパラメータ」の値を定める事でキャリブレーションを行う。DLT法に着想を得た手法では、キャリブレーションの段階で6つのパラメータ値を定める事とした。すなわち、グローバル座標系におけるカメラの中心の位置のXYZ座標値と、カメラの向きを決定する3つの姿勢角の値である。これらの値を用いてカメラ座標系とグローバル座標系を対応付ける事とした。

キャリブレーションにおいてはDLT法と同様のアプローチを取った。3次元座標が既知のコントロールポイントを対象領域に配置し、これを撮影した。コントロールポイントの位置を正距円筒図法で展開した長方形の画像中でデジタル化した。既知の座標値とデジタル化の結果得られた経度・緯度の情報に基づき、前述の6つのパラメータの値を決定した。これには非線形の数値的最適化を用いた。キャリブレーションを通して、個々のカメラについてそれぞれ6つのパラメータ値を求めた。3次元座標の再構成では、同一の点に対する各カメラからのレイが交差する(複数のレイが最も近接する)点として座標を求めた。

(3) NLT法に着想を得た手法

NLT法ではDLT法とは異なり、基本的に座標値が未知のコントロールポイントを用いてキャリブレーションを行う。また、複数のカメラについて同時にキャリブレーションを実施する。一台のカメラを基準とし、他のカメラについてはその基準とするカメラに対する位置と姿勢角を求める。

本研究で開発した手法でもNLT法と同様に、デジタル化した点の情報に基づいてパラメータの値を求めた。複数のカメラを同時にキャリブレーションする点、キャリブレーションに用いる点の座標値は未知で良い点、等がNLT法と共通している。カメラ座標系におけるカメラレイの表現方法が直交座標系に基づいているか(NLT法)極座標系に基づいているか(本手法)という点に相違がある。3次元座標再構成の際の考え方は「(2) DLT法に着想を得た手法」に記載した事項と同様である。

(4) 検証実験

今回対象とする撮像領域に、合計60点のコントロールポイントを配置した。全天球カメラを用いてこの映像を撮影し、それを正距円筒図法を用いて展開した。展開画像をデジタル化してそれぞれのコントロールポイントの天球における緯度・経度を求めた。

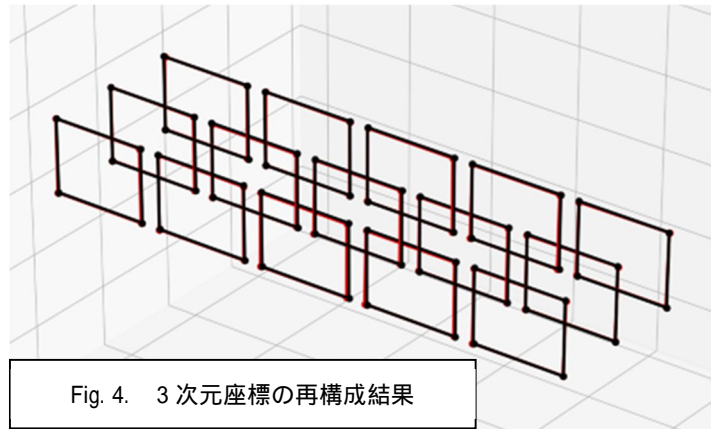
DLT法に着想を得た手法では、これらのコントロールポイントのグローバル座標系内での3次元座標と、デジタル化して得られた緯度・経度の情報からキャリブレーションを行った。キャリブレーションして得られたカメラパラメータと、デジタル化して得られた緯度・経度の情報からコントロールポイントの位置座標を再構成した。再構成した値と真の値の差からその精度を検証した。

NLT法に着想を得た手法では、コントロールポイントをデジタル化して得られた緯度・経度の情報からカメラのキャリブレーションを行った。この際コントロールポイントのグローバル座標系内での3次元座標値は用いなかった。DLT法に着想を得た手法と同様に、キャリブレーションして得られたカメラパラメータと、デジタル化して得られた緯度・経度の情報からコントロールポイントの位置座標を再構成した。再構成した値と真の値の差からその精度を検証した。

4. 研究成果

(1) DLT法に着想を得た手法

3次元座標の再構成結果を Fig. 4. に示す。再構成結果(赤)と真の値(黒)のプロットがほぼ重なっており、再構成が成功している事が解る。その誤差は、先行研究の中で DLT 法について示されてきた誤差の値と同程度であった。DLT 法においては外挿計算を行う(キャリブレーションした範囲よりも広い領域から 3次元再構成を行う)と誤差が増大する事が知られているが、この点に関しても同様の傾向が見られた。



(2) NLT法に着想を得た手法

DLT法に着想を得た手法と同様に、再構成が成功している事が示された。またその誤差も、先行研究の中で NLT 法について示されてきた誤差の値と同程度であった。NLT 法においてはサンプリングする点の数が過小な際に誤差が増大する事が知られているが、この点に関しても同様の傾向が見られた。

(3) 今後の展望

本研究を遂行する中で、全天球カメラを用いた3次元動作解析の手法は、スポーツ科学で取り扱う様な非常に広い環境のみならず、障害物を有する狭小な環境においても有効に活用できる事が明らかとなった。これはたとえ障害物の近くに配置したとしても天球の広い領域を撮影できるという全天球カメラの特性による。本研究は今後スポーツの場面のみならず、病院、学校、オフィス、自宅、乗物の中等の多様な環境における動作解析に活用していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 長野明紀	4. 巻 59
2. 論文標題 スポーツバイオメカニクスにおける三次元計測の基礎原理	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 697-792
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11499/sicejl.59.697	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 大塚光雄, 伊坂忠夫, 長野明紀, 栗原俊之, 大友智	4. 巻 32
2. 論文標題 定性的・定量的評価が可能な新しいタブレット端末用アプリケーションを活用した学習効果：ハードル走に着目して	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 トレーニング科学	6. 最初と最後の頁 19-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Nagano, A.	4. 巻 128
2. 論文標題 Three-dimensional videography using omnidirectional cameras: an approach inspired by the direct linear transformation method.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 110722
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jbiomech.2021.110722	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 長野明紀
2. 発表標題 全天球カメラを用いた3次元座標の再構成 - DLT法に着想を得た手法 -
3. 学会等名 第26回日本バイオメカニクス学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 湯池敦史, 佐藤隆彦, 長野明紀
2. 発表標題 動画データからジョギング中の鉛直地面反力を予測する人工ニューラルネットワークモデルの提案.
3. 学会等名 第26回日本バイオメカニクス学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 湯池敦史, 佐藤隆彦, 長野明紀
2. 発表標題 動画データを用いた畳み込み再帰型ニューラルネットワークによるジョギング中の地面反力予測.
3. 学会等名 第64 回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 酒井大輝, 佐藤隆彦, 長野明紀
2. 発表標題 経験者・未経験者の投球における動作の協調性の解析.
3. 学会等名 第64 回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Matsuno, R., Kudo, S., Sato, S., Nagano, A.
2. 発表標題 Relationship between step frequency and step length and trunk kinematics in sprinting
3. 学会等名 The 10th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 湯池敦史, 佐藤隆彦, 長野明紀
2. 発表標題 動画データを用いた畳み込み再帰型ニューラルネットワークによるジョギング中の地面反力予測
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長野明紀
2. 発表標題 全天球カメラを用いた3次元動作解析の取り組み.
3. 学会等名 第42回バイオメカニズム学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

立命館大学 研究者学術情報データベース https://research-db.ritsumei.ac.jp/rithp/k03/resid/S001178 イノベーションジャパン 立命館大学特設サイト http://www.ritsumei.ac.jp/features/innovation/research/index_04.html/

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	伊坂 忠夫 (Isaka Tadao) (30247811)	立命館大学・スポーツ健康科学部・教授 (34315)	

6. 研究組織（つづき）

	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	藤本 雅大 (Fujimoto Masahiro) (10732919)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	佐藤 隆彦 (Sato Takahiko) (50780813)	びわこリハビリテーション専門職大学・リハビリテーション学部・助教 (34207)	

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