

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03076

研究課題名(和文) 遮蔽物存在環境対応型マーカレスモーションキャプチャ法の開発

研究課題名(英文) Development of Markerless Motion Capture Method adaptive to the environment with obstacles

研究代表者

桐山 善守(Kiriyama, Yoshimori)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：30383722

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、次世代の動作計測手法であるマーカレスモーションキャプチャ法を遮蔽物存在環境下でも利用できる手法を検討した。視体積の向上にステレオ視を、遮蔽された身体節を推定するために関節表面形状モデルを構築した。遮蔽物存在環境下において歩行計測を行った。提案手法では、カメラ仕様の制限から利用が制限されたが、新たな評価関数を利用することで、半分以上が遮蔽された状況においても対象の位置・姿勢を推定できた。

研究成果の概要(英文)：Markerless Motion capture Method (MMC) is thought to be one of the motion capture method in the next generation. In this study, we developed the method to use MMC under the environment where there are some obstacles. Stereo vision was used to make a higher precision visual hull. Also, Joint surface model was developed to estimate the distal segments based on the deformation of the joint surface. We performed gait analysis under the condition to hide the body segments. Our method was restricted because the camera resolution was too low to use the proposed method, but we used a novel evaluation to match the visual hull and a subject model. As a result, we were able to use MMC to analyze human gait even when 60% of a body segment was hidden.

研究分野：生体力学，医用工学，スポーツ工学

キーワード：マーカレスモーションキャプチャ 動作計測 遮蔽物存在環境下

1. 研究開始当初の背景

(1) 遮蔽物が存在する環境下において、注目するヒトの身体部位が隠されてしまうと運動を計測することができない。遮蔽物は必ずしも取り除くことができない場合もあり、計測対象者自身が遮蔽物の一部となってしまう場合も考えられる。これは、光学式カメラを用いた計測では本質的な問題であり、これまでとは異なる発想での問題解決が必要であった。

(2) ヒトの運動を非接触・非拘束・非制限に計測できる光学式計測手法としてマーカレスモーションキャプチャ法がある。対象者の輪郭とカメラの視点を結ぶ輪郭錐を用い、複数の輪郭錐の共通部分から視体積を作成することで計測空間内における被検者の姿勢形状を取得する手法である。本手法であっても、遮蔽物が存在する環境下においては計測が困難になる問題があった。

2. 研究の目的

(1) ステレオ視による高精度視体積の構築

マーカレスモーションキャプチャ法では視体積を用いるため、身体部位の一部を計測できていれば遮蔽された部分の位置と姿勢を推定することが可能である。このためには、高精度化した視体積が必要となるが、その精度と解析時間のバランスが重要となる。そこで本研究では、ステレオ視による測距を行うことで視体積の向上を図り、実践的な手法として利用可能性について検討する。

(2) 関節表面形状モデルの構築

身体節の一部が遮蔽された視体積から、対象の運動を計測するには、運動に伴う身体形状の変化を推定できる対象モデルが必要となる。身体関節は、変形が大きい一方で運動角度に応じて表面形状が変化する。すなわち、表面形状の変化と関節角度に対応が取れば、関節から遠位の身体節については位置と姿勢を推定することが可能となる。そこで本研究では、被検者の身体サイズに適應できる表面形状モデルを構築する。構築したモデルが作成した視体積に利用できるかについて検討し、その有用性について明らかにする。

(3) 遮蔽物存在環境下におけるマーカレスモーションキャプチャ法での計測評価

実計測環境下において、身体が遮蔽された状態でのマーカレスモーションキャプチャ法を行い、遮蔽状態と計測可能な条件について明らかにする。また、実際環境での計測を通して、本研究全体の内容について総合的に評価を行う。

3. 研究の方法

(1) ステレオ視による高精度視体積の構築

カメラごとに作成した輪郭錐から作成した視体積を原視体積と呼ぶことにする。ステ

レオ視を行う際の複数カメラにおける対応点の探索範囲を原視体積に限定することで、ステレオ視における計算コストの低減を図った。またこれにより、誤対応が減少するため、測距における精度を向上させることができる。本研究では、対応点の決定にブロックマッチング法を用い、 11×11 [pixel]の窓とした。対応点の相関値を求める手法としてZero-means Normalized Cross-Correlationを採用した。一方のカメラでの注目点に対して、もう一方でのカメラにおいて可能性のある画素に対して相関を求め評価することで対応点を決定した。

ステレオ視を併用して視体積を構築するために、カメラ配置について評価を行った。具体的には、(i)ステレオ視を行うカメラペア間の距離と(ii)カメラ台数による視体積の精度を行うこととした。実践的な利用を考え、カメラペア間の距離は500 [mm]ずつ4000 [mm]まで広げることとした。カメラ台数については、4台から2台ずつ12台まで増やしながら視体積の復元を行った。その際のカメラ配置は、対象の前後左右を均等に覆えるように配置した。また、隣り合うカメラが上下互い違いになるよう設置することとし、低位置では500 [mm]、高位置では2500 [mm]とした。

カメラやステレオ視以外の条件が外乱とならないよう、本研究は仮想空間内に計測対象被検者とカメラを設置した。仮想空間の構築には、Visualization Toolkit (VTK)を利用した。対象被検者として、日本人の標準的な体型データを利用した。また、計測に際しては、カメラの校正は行われているものとした。被検者画像の取得にあたっては、被検者の全身がカメラで写っているものとした。

対象被検者モデルの表面形状をなす三角形メッシュの頂点から修正視体積までの最近傍距離を求め、これを誤差とした。一つの視体積から得られる誤差は、被検者モデルに存在する三角形の頂点だけ存在するこのため、頂点数に対する誤差の算術平均と標準偏差を求め、これを評価した。

(2) 関節表面形状モデルの構築

本報告では、身体関節の中でも複雑な運動を示す股関節を例に方法を示す。

本研究では、関節表面形状の変形に薄板スプライン法を用いた。薄板スプラインは変形させたい対象を覆うように配置した制御点を移動することで、薄板の曲げエネルギーが最小かつ形状変形が連続となるように対象を変形させる手法である。すなわち、関節の変形を再現するためには制御点の適切な移動量を決定する必要がある。この制御点の移動は体格によっても異なるため、体格差による違いも反映できる必要がある。そこで本研究では、標準的なモデルに取り付けた制御点に標準的な移動量を持たせておき、体格による調整を行った後に、関節運動に伴った制御

点の移動を実現することとした。股関節は球関節であるため、骨頭を中心に回転していると考えてよく、制御点についても骨頭回りに回転すると仮定した。これにより、股関節の屈曲・伸展や内外転時の関節表面形状の再現が容易になる。すなわち、股関節の関節表面形状を再現するには、股関節運動角度と制御点の移動量の関係を決定すれば良い。薄板スプライン法では、制御点が多いほど詳細な変形の再現が可能となるが、それに応じて計算量が増大するだけでなく、モデルが持つべき情報が増えることになる。制御点は、関節表面形状の変形を再現するのに十分な数があれば良いため、制御点数変化させることで、関節表面形状の違いを評価し、適切な制御点数を決定した。またこれに伴い、制御点の初期位置によっては、より少ない位置で関節表面形状を再現できる可能性もある。このため、制御点の初期位置や関節角度に伴う移動方法について評価を行うこととした。具体的には、股関節運動に伴ってもっとも大きく変形する殿部上下に制御点を配置した場合と、さらにその間に制御点を設けた場合での形状変化を比較した。

実際の表面形状の変化を取得するために、10名の健常成人男性を対象に、屈曲角度 0, 30, 45, 90 度、外転角度 0, 20, 30, 40 度を組み合わせた姿勢を取らせ、この時の股関節表面形状を取得した。表面形状の取得には、Xbox One Kinect (Microsoft 社)を用いた。姿勢の指示には角度計を用いたが、詳細な角度の取得には、光学式モーションキャプチャシステム(Kestrel, Motion Analysis 社)を利用した。この際、股関節の角度はオイラー角により求めることとし、屈曲・伸展、内外転、内外旋の順とした。

制御点の初期配置の決定には、数値最適化法の一つであるレーベンバーク・マルカート法を用いた。評価関数には、体格を一致させた標準モデルと被検者の表面形状が一致するように表面距離差の自乗和が最小となることを条件とした。

(3) 遮蔽物存在環境下におけるマーカレスモーションキャプチャ法での計測評価

本研究では、歩行解析を念頭に骨盤から遠位部である左右大腿および左右下腿からなる全 5 部位とした。計測にあたっては、10台のカメラ(640×480pixel, 90Hz, Allied Vision Technologies 社)を利用した。計測空間を取り囲み、隣り合うカメラが上下に互い違いになるように設置した。明示的な遮蔽物存在環境を構築するために、カーテンを利用して下腿を遮蔽することとした。遮蔽する割

りを調整するために、遮蔽高さを調整できるようにした。遮蔽率は、下腿長さの 30~70%となるように 10%ずつ変化させた。なお、被検者形状の取得には、(2)と同様に Xbox One Kinect を利用した。

動作時姿勢の変化を取得するために、被験者形状とのマッチングを行う必要がある。通常のマッチングでは、視体積と被験者形状との表面距離差が最小になることを条件にすれば良いが、遮蔽物が存在する環境下においては、必ずしも十分とはならない。遮蔽物存在環境下における視体積は、形状の一部が欠損しているが、被験者形状は欠損の有無や程度については把握できているわけではない。このため、表面距離差のみを評価してしまうと、この条件を満足するように本来は評価されるべきでない部分まで考慮されてしまう。そこで、以下の評価関数 f を提案した。

$$f = \sum D_{surf}^2 + \theta_{lim} + D_{inside} + D_{var}$$

$$D_{inside} = w_{conv} \times \sum D_{ext}^2$$

$$\theta_{lim} = \begin{cases} 0 & (if|\theta| \leq A_{threshold}) \\ \theta^2 & (if|\theta| > A_{threshold}) \end{cases}$$

$$D_{var} = p_{in} \times D_{sd}$$

ここで、 D_{surf} は視体積外の頂点から視体積の表面までの距離を表しており、これにより視体積内部へのマッチングを促した。 D_{inside} は復元された視体積内に含まれるモデルの範囲を表している。 θ_{lim} は回転角度 θ が人の生理的可動範囲を超えないようにするための抑制項として利用した。 p_{in} は被験者モデルの各身体部位において視体積内部に存在する頂点の個数の割合を示している。また、 D_{var} は被験者モデルから視体積表面までの距離の標準偏差を表している。これにより、表面距離差のばらつきを少なくし視体積の表面から一定距離でマッチングさせる項として利用した。

本研究では、健常成人 3 名を対象とした。また、既存の手法との比較を行うために、解剖学的特徴点に反射マーカを貼付し下肢関節の 3 次元動態を計測した。遮蔽物存在環境下においては、反射マーカも遮蔽されてしまい計測ができない。また、反射マーカが被験者形状モデルの特徴点となってしまう適切な評価ができない。このため、反射マーカを貼付した状態で同一被験者の歩行計測を行っておき、この動態とマーカレスモーションキャプチャ法との比較を行った。

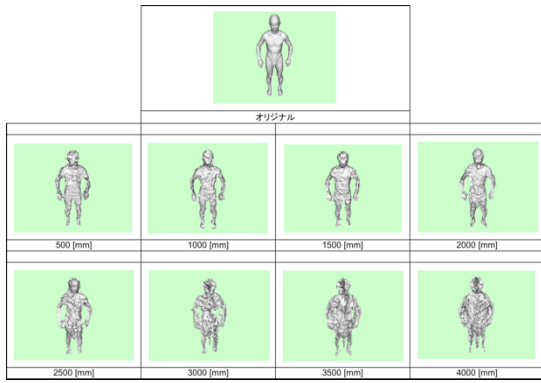


図1 カメラ間距離の違いによる復元の差

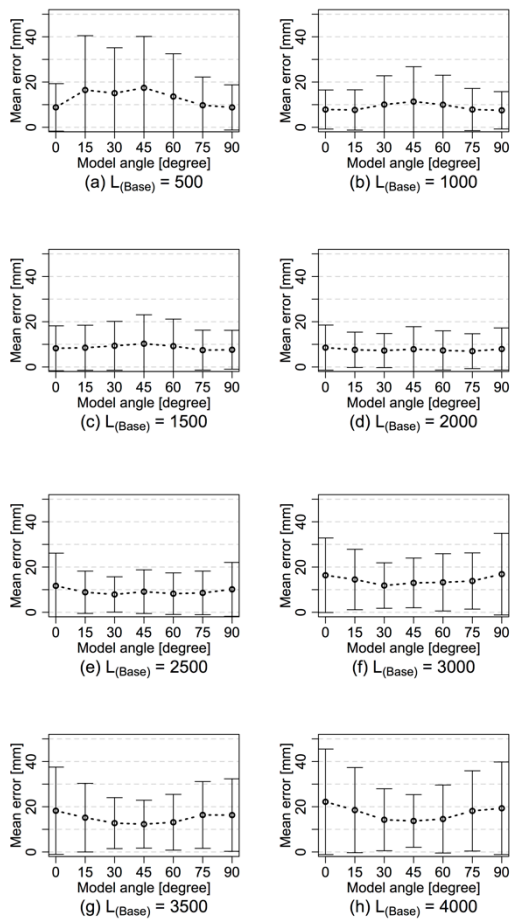


図2 カメラ間距離の違いによる誤差

4. 研究成果

(1) ステレオ視による高精度視体積の構築

図1に、カメラ間距離を変化させた結果を示す。カメラに対して正面を向いており、これを角度0度とした。図2に、カメラ間距離と平均誤差の関係を示す。角度は、カメラに対するモデルの向きを示している。カメラ間距離が2000 [mm]の時がもっとも平均誤差が小さく、3000 [mm]より広い場合には視体積の形状が崩れていた。カメラ台数については10台と12台では大きな差はなかったが、8台以下では、10台の時に比べて平均誤差が

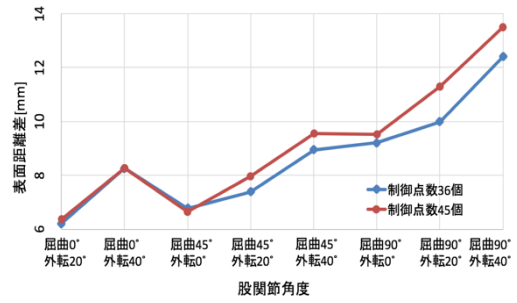


図3 制御点数の違いによる表面距離の差

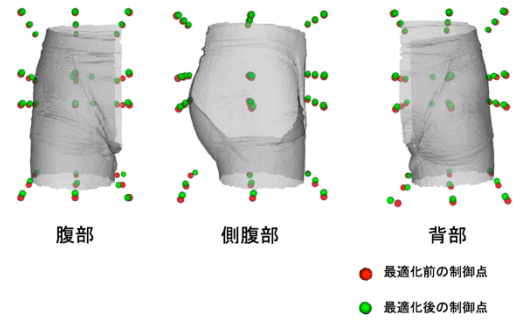


図4 制御点数36個時の初期位置

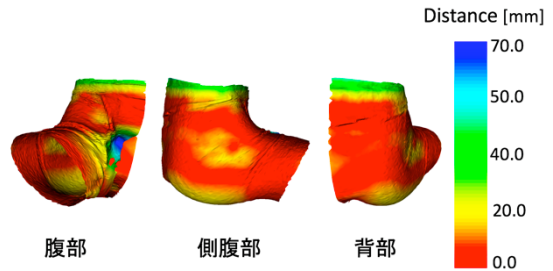


図5 表面形状距離差の分布 (屈曲90度, 外転30度)

大きくなった。このため、十分な精度で計測を行うためには、最低でも10台のカメラが必要であることがわかった。またこの際、カメラ間距離を2000 [mm]とすることで適切ステレオ視によるモデル復元精度が向上できることがわかった。しかし本結果は、計測対象全体が含まれるほどズームした結果となっている。一般に、計測対象は画像の半分以下となっていることもありうる。このため、本結果は極めて理想環境に近い状況での精度検証といえる。後述の実環境におけるマーカーレスモーションキャプチャのカメラ仕様を考慮すると、ステレオ視の有無による差がほとんど無視される程度になることが考えられる。このため、(3)の実計測にはステレオ視による精度向上は行わないこととした。今後、ステレオ視による精度向上を行うには、ハードウェア的な精度向上やソフトウェア的な画像の高精度化が必要と考えられ、今後の課題といえる。

(2) 関節表面形状モデルの構築

図3に、股関節運動に伴う表面距離差の変化を示す。この図からは、制御点数が少ない

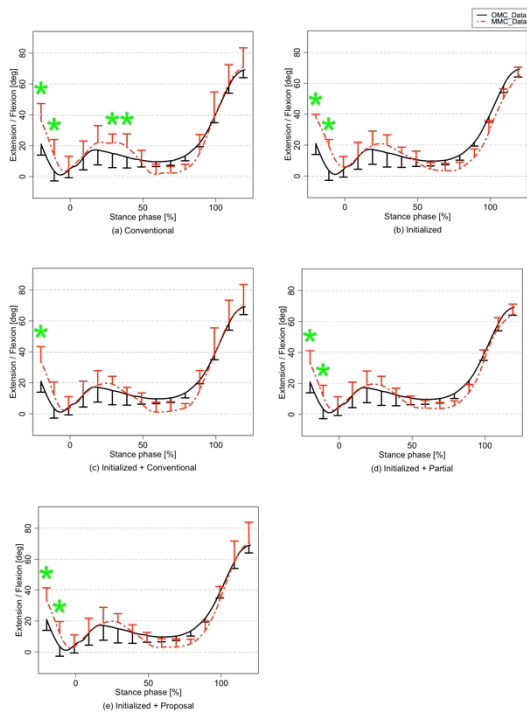


図6 マーカレスモーションキャプチャ法の計測精度

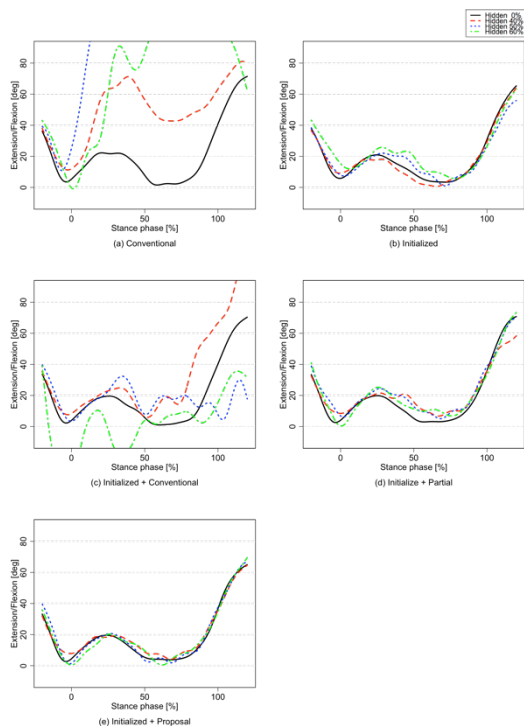


図7 遮蔽物存在感強化でのマーカレスモーションキャプチャ法の計測精度

36 個の場合の方が全体として表面距離差が小さいことがわかった。一般的に、薄板スプライン法では制御点が多いほど詳細な変形ができると考えられている。しかし本手法では、制御点の移動は股関節の回転角度に応じて変化するようにした。この結果、制御点が任意の移動量を実現できるわけではなく、制御点数の多い 45 の場合ではより大きな移動

量を示すべき制御点が小さな運動に留まってしまい、形状変形の再現度を下げたと考えられる。この結果より、本研究では、殿部の形状変化には制御点数 36 個とした。またこの時の制御点位置を図 4 に示す。遠位および背側の殿部付近で、制御点初期位置の変更が確認できる。図 5 には、もっとも表面距離が大きい状態での距離差の分布を示す。股関節表面全体を通して、距離が小さいことを確認できる。表面距離差が大きくなったのは近位部分のズレによるものであり、関節表面全体に大きな問題はなく、本手法は有効であったと考えられる。

本研究で作成した関節表面形状モデルは、極めて精度が高く、概ね 10 [mm]以下で形状を一致させることができる。実際には、より小さな誤差で形状を一致させており、関節表面と離れた部分でのズレが誤差値として評価されている。一方で、これほどの高精度で表面形状を再現するには、視体積においても同等程度の精度が必要となる。しかしながら前述のように、実環境におけるマーカレスモーションキャプチャ法においてそれほど高精度の視体積を構築することはできていない。(1)のステレオ視を用いた手法であっても、現状の計測機器の仕様ではそれほどの精度向上が見いだせないことがわかった。

このため、遮蔽物環境下におけるマーカレスモーションキャプチャ法では、関節表面形状モデルは用いず、提案するモデルマッチング法と遮蔽率との関係を明らかにすることとする。

(3) 遮蔽物存在環境下におけるマーカレスモーションキャプチャ法での計測評価

図 6 に、反射マーカを用いた光学式システムとマーカレスモーションキャプチャ法における歩行立脚時の膝関節の屈曲角度を示す。表面距離差のみを評価する従来手法に加え、探索の初期値の変更や提案評価関数を部分的に利用した方法とを比較しても、全体として大きな違いはないことが確認できる。すなわち、遮蔽物が存在しない環境下においては、マーカレスモーションキャプチャ法は、既存の動作計測手法と同等の解析精度を有していることがわかる。

図 7 に、同様の手法を遮蔽物が存在している状況で結果を示す。初期位置を調整した場合には、遮蔽が無い場合での運動により近くが(図 7 右上)、さらに提案手法を加えることで遮蔽率が 60%であっても遮蔽が無い場合と同様の結果にまで一致する(図 7 左下)。このことから、本研究で提案する手法は遮蔽物存在環境下においても有効に機能することがわかった。

前述のように、遮蔽物存在環境下においては、ステレオ視と関節表面形状モデルを用いなかった。しかしながら、提案するモデルマッチング手法においても遮蔽率 60%まで極めて良い一致度で運動を推定することがで

きた。(1)によるステレオ視による視体積の高精度化と(2)関節表面形状モデルによる遮蔽時の推定は互いに密接に関係して、どちらもカメラ仕様の向上もしくはソフトウェア的な改善が必要となる。しかし、この点を改良することができれば、本研究成果はそのまま利用することができる。

以上より、本研究ではステレオ視による視体積の高精度復元方法を明らかにした。また、遮蔽物が存在する環境下において、身体節の位置と姿勢を推定できる標準的なモデルを開発できた。研究代表者らの計測環境では料手法とも利用できなかったが、その原理と有効性について示すことができた。また、実環境下において、マーカレスモーションキャプチャ法を利用して、遮蔽物が存在する環境下における計測限界と回避方法について明らかにした。この結果、遮蔽率が60%未満では、身体節の位置と姿勢を推定できることがわかった。遮蔽率が大きくなった場合には、本研究で示したステレオ視と関節表面形状モデルの利用がより有効になると考えられる。

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)

[雑誌論文] (計 1 件)

- 1) 畝迫寛太, 桐山善守, 臨床動作における慣性センサシステムの精度検証, 臨床バイオメカニクス, 査読有り, 37, 57-61, 2016.

[学会発表] (計 2 件)

- 1) 天廣崇文, 桐山善守, 膝関節運動時における表面形状の変形再現手法の開発, 日本人間工学会第58回大会, 2017.
- 2) Kanta SEZAKO, Yoshimori KIRIYAMA, ACCURACY EVALUATION OF AN INERTIAL SENSOR SYSTEM IN CLINICAL MOTION ANALYSIS, Congress of European Society of Biomechanics 2016, 2016.

[その他] (計 1 件)

- 1) 桐山善守, 生体力学に基づく整形外科的疾患の発症メカニズムの解明, りそな中小企業振興財団 技術懇親会, 2017.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1063/Bio3lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桐山 善守 (KIRIYAMA, Yoshimori)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：30383722

(2) 研究協力者

畝迫 寛太 (SEZAKO, Kanta)