

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：32404

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26670843

研究課題名(和文) 超高齢社会に適応するデジタルデンティストリーシステムの構築

研究課題名(英文) Construction of digital dentistry system suitable for super aging society

研究代表者

藤澤 政紀 (Fujisawa, Masanori)

明海大学・歯学部・教授

研究者番号：00209040

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：エピテーゼを製作する際の顔面の形状取得法として、汎用デジタルカメラを用いた空間計測システムが実用化されている。汎用デジタルカメラを用いて撮影した一対のステレオ画像をもとに色調の明暗を用いたノイズ補正を加えた場合、通常のダウンサンプリングによる平滑化に比べ、被写体の微細な凹凸を残した測定ノイズの除去が可能であったことから、画像内の色調の明暗は視覚的だけではなく実際の立体構造に影響し、色調による点群の測定ノイズの除去に有効であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Three-dimensional (3D) measuring system has been recently developed to measure distances in remote locations. To apply this system to facial measurement, the following were investigated. A pair of stereo images of a stone facial model and a wax facial prosthesis was photographed using a general-purpose digital camera. Then, a 3D point cloud dataset of the object was constructed using space measurement software. A noise removing procedure using the down sampling of digital color information allowed for data smoothing. Results were as follows: 1) The highest precision of the measurement was achieved with a 60cm measurement distance. The relative error was 1.30%. 2) The correction with light intensity detection allowed to detect more microstructures. It is considered that light intensity is related to the actual irregularity of objects. The correction using color information to lessen noise on a point group may be valid for facial measurements.

研究分野：歯科補綴学

キーワード：汎用デジタルカメラ 顔面形状計測 エピテーゼ ノイズ除去 Stereolithography エピポーラ平面
三角測量法 輝度値

1. 研究開始当初の背景

エピテーゼを製作する際の顔面の形状取得法として、従来の顔面印象法に代わり、様々な空間計測機器を応用した方法が提唱されている。近年、汎用デジタルカメラを用いた空間計測システムが実用化された。このシステムは受動型ステレオ法を原理としており、通常の写真と同様に撮影された画像をもとに三次元データの構築を行うことができるため、撮影が容易であり、携帯性にも優れていることから、主に工業界で幾何的構造物の測量に利用されている。一方で、空間計測能は被写体の色調および表面性状の影響を受けやすいことから、顔面の形状計測においては構築した点群に測定ノイズが生じやすい。また、構築した点群の各節点は三次元の座標値およびRGB値の色データからなるため、Stereolithography、いわゆるSTL形式に代表されるポリゴンデータへの変換には法線ベクトルの設定が必要である。Poisson surface reconstructionに代表されるポリゴン変換法では、対象節点および周囲節点の座標値から法線ベクトルの演算を行うため、あらかじめノイズの少ない点群を構築しておく必要がある。

2. 研究の目的

本システムをデジタル顔面形状計測の一方法として応用するに当たり、まず、構築した点群のノイズ除去方法を検討し、顔面欠損に対する顔貌回復のためのエピテーゼ製作における顔面形状取得法を検討する。そのうえで、空間計測機器に汎用デジタルステレオカメラを用いた顔面形状計測システムを構築し、その実用性を評価することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

顔面石膏模型およびエピテーゼのワックスパターンを被写体(概寸法、13W×7D×10H(cm))とした。視野角、レンズ間距離などの幾何的位置関係が既知の、空間計測ソフトウェア(撮測3D, Armonicos社製)を用いて三次元点群データを構築した。

構築した点群データから、エピポーラ平面上に平行に配列した点群を抽出し、奥行の測定値および以下に示す、画素のRGB値より算出した色データを用いたノイズ補正法について検証した。

- ・明度: $B = (RGB_{max} + RGB_{min}) / 2$
- ・輝度: $Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$
- ・彩度: $Cr = 0.500R - 0.419G - 0.081B$, $Cb = -0.169R - 0.419G - 0.081B$

本実験では、測定環境を一定とするため、測定の間隔や天候などの影響を受けない室内で行った。また、撮影は三脚を用いてカメラを固定し、カメラの内蔵フラッシュを使

用せず、蛍光灯による室内照明下にて行った。測定環境の評価として照度計(デジタル照度計 T-1, ミノルタ, 東京)を用いて測定条件を一定(100~150lx)とした。また、画素のノイズを最小限に抑えるために、感度をISO100に固定し、自動露出補正機能を使用し撮影を行った。

測定方法の評価に際しては、顔面石膏模型およびエピテーゼのワックスパターンを被写体とした。撮影距離30cm、水平方向のレンズ配置および画像投影無しを条件とした撮影を基準とした。以下に示す条件を変化させて撮影した画像より3次元点群モデルを再構成し、モデル上に生じた節点の欠落およびノイズを検出し形状を評価した。

解析方法

撮影した画像の撮影距離±10cmの範囲で3次元点群モデルを再構成した。3次元点群モデルの節点座標(XYZ直交座標系)および色(RGB値)の測定値をCSV形式で出力した。一方、本システムによって再構成した3次元点群モデルの各節点はエピポーラ拘束および撮影画像のピクセル幅を基準として一定の間隔(理論的節点間隔)で配列している。それぞれの同一エピポーラ線上の測定節点は本来、理論節点間隔を比例定数とした直線(理論的直線)上に配列している。そこで、CSVデータより、同一エピポーラ線上に存在する、すなわちX座標値が同一の測定値を有する節点を抽出し、理論的直線上に再配列することで欠落した節点をデータに反映し、測定形状の復元を行った。さらに抽出した節点をYZ平面上に投影し、Z軸(奥行)成分の変位からノイズを検出し、モデルの形状を評価した。また、YZ平面上で隣接する節点間のY軸成分の差が理論的節点間隔より大きい場合を形状の欠落とした。また、欠落の長さを理論的節点間隔で除することで欠落節点数を算出した。

隣接する節点間でのZ軸成分値の差に対して閾値(0.4mm)を設定した。閾値以上の変位量を認めた節点をノイズとして検出し、ノイズ節点数を算出した。さらに、色データを用いた測定ノイズの処理効果を評価した。測定方法の評価を行った際と同様の被写体および手順にて3次元点群モデルを再構成した。モデルの色データを応用したノイズ処理法(CCI)を用いてその効果を評価した。

4. 研究成果

測定精度の評価

3次元点群モデル上での実測値で8.00cmであった測定点間距離は撮影距離が撮影距離60cmで8.03cmであり実測値に最も近い

値を示した。測定点間距離の平均値は8.10cmであり、実測値に対する測定誤差は1.25%であった。

測定方法の評価

再構成した点群モデルの総節点数に対する、欠落節点数およびノイズ節点数の割合を調べた。欠落節点は撮影距離30cm、水平レンズ配置、画像投影無しの場合を基準とした場合、その他の条件全てで、その発生頻度が減少した。ノイズ節点の発生率については、画像投影を行った場合とレンズ配置を垂直とした場合で増加し、撮影距離を60cmとした場合で減少した。

色データを用いた測定ノイズの除去

CCI 節点と DS 節点による補正面と測定値からなる基準面との比較を行った結果、1,252 節点中 65 節点が CCI 節点として抽出された。DS 節点のみからなる補正面はサンプリングレートの増加に比例して補正誤差が増加するのに対して、CCI 節点の追加によってその増加を抑制する傾向を認め、DS 節点のサンプリングレートが増加するほどその抑制効果は顕著であった。また、データ容量の軽減効果は CCI 節点を追加した場合でも、DS 節点のみを抽出した場合と同様の傾向を示した。

考 察

本研究で用いた空間計測システムは、測定用ステレオカメラの両レンズ中心軸間距離、レンズの焦点距離および画素ピッチより算出される三次元空間内の理論距離分解能は、撮影距離が1mの場合で、X軸およびY軸成分で0.3mm Z軸成分で3.6mmとなり、撮影距離に対するZ軸成分の距離分解能は0.3%となっている。また、1/2.3型CCDセンサに対して記録画素は3,648×2,736ピクセルで一定であるため、撮影距離の増加に伴い、センサ内での被写体の解像度は相対的に低下する。従って、理論的空間分解能は撮影距離に反比例することとなる。測定精度の評価では撮影距離30cmでの撮影が理論的最小空間分解能を条件とした距離計測であったが、撮影距離と測定精度に関連を認めなかった。

受動型ステレオ視法では対応点検出精度は測定精度の向上に大きく影響することが知られている。一般に基線長の短いカメラの配置条件で被写体を撮影することにより、視差の少ない画像すなわち類似性の高い画像の取得が可能である。これらの画像を基にした空間計測では、対応点の検出精度が向上し、良好な測定結果を得ることができる。本研究で用いたステレオカメラは基線長に相当す

る両レンズ中心軸間距離が一定となっているため、撮影距離の増加によって取得した画像の類似性が増大する。従って、対応点の検出精度が向上することにより測定精度が向上すると考えられる。さらに撮影距離の増加は、画像に投影される被写体の拡大率が減少し、光学レンズの周辺ひずみの影響が少ない画像を取得できる。撮影距離の増加は画像の解像度を低下させる一方で、対応点の検出精度の向上やひずみの少ない画像の取得が可能であり、測定精度に対して二律相反を生じる。従って、本実験では撮影距離と測定精度の関係に一定の傾向が認められなかったものと考えられる。この点に対しては、被写体の色調や表面性状など他にも影響を及ぼす要因が関与することから今後さらなる検証が必要と考える。

一方、撮影距離60cmで最大の測定精度が得られたことから、対象の大きさや撮影距離など、顔面計測を想定した計測では、空間分解能よりも対応点の検出精度の方が測定精度に及ぼす影響が大きいものと考えられる。

撮影距離80cmの場合で、取得した画像の解像度の低下により基準点の検出が困難であった。撮影距離が30~70cmの場合について実測値に対しての平均測定誤差は1.25%であった。

小坂らは、2次元顔貌写真を用いて視覚による顔面の対称性の識別を検証した報告において、非対称性の判断の境界点は、顔貌正面観の左右的な非対称率が6.0~6.9%の範囲内にあると報告している。本実験で再構成した3次元モデルを用いてミラー投影による設計法を用いたエビテーゼを製作した場合、装置の寸法的な誤差は臨床的に許容できると考えられる。従って、本システムは顔面計測に応用可能な精度を満たしていると考えられる。

測定条件について

本システムでは、1回1方向からの写真撮影によって取得した画像から点群を構築している。そのため、アンダーカットなど死角を生じた領域の点群は構築されない。また、撮影距離に応じて点群構築範囲を限定したことから、範囲外のZ軸成分の座標値を有する節点はデータ上で形状の欠落として反映される。さらに、ステレオ視法では、対応点の識別精度が空間計測精度に大きく影響することが知られている。一般に視差の少ない画像を基にすること、被写体の色調や表面性状が不均一であるほど、対応点の識別精度が向上するとされている。測定対象の形状や大きさによってカメラ間の基線長および角度の調整が行われる。

一方、本実験ではこれらの幾何学的条件は

測定装置に固有の値を使用した．そこでそれぞれの測定条件が3次元点群モデルのノイズおよび欠落に及ぼす影響を明らかにし、顔面計測に適した撮影条件を評価した．

撮影距離について

測定方法の評価において、異なる撮影距離によって得た画像より再構成した3次元点群モデルの形状評価の結果、撮影距離 60cm は、30cm と比較して、点群の欠落率、およびノイズ発生率が低かった．撮影距離 60cm の理論的最小空間分解能はX軸およびY軸成分で 0.2mm となる．このとき撮影画像の解像度は、皺や毛穴などの顔面上の微細な構造を識別可能である．さらに、画像の投影面の大きさはおよそ横 73cm × 縦 55cm となることから、対象となる顔面全体を投影することができる十分な距離であると考えられる．測定精度の結果からも、本システムでの撮影距離は 60cm を基準とすることが適切と考えられる．

レンズの幾何学的配置について

被写体に対するレンズの幾何学的配置は、レンズを上下に配置して撮影した場合は、レンズを左右に配置した場合よりも点群の欠落の発生が少なかった．解剖学的特徴点に基づく顔面形状相同モデルでの前頭顔面の輪郭は、水平断で正中を頂点とした曲面で近似される．つまり、顔面計測においては、レンズを左右に配置して撮影を行った場合は、画像間での視差が大きくなり、対応点の探索精度の低下によって死角による測定エラーが生じやすくなる．レンズを上下に配置した場合は全体的に画像間で視差が少なくなり、測定エラーの少ない計測を行うことができると考えられる．

画像投影について

三角測量法を原理としたステレオ視法は、計測基準点に対する対応点の関連付けが計測精度に大きく影響する．さらに受動型原理では対応点探索の安定度が低くなる．そこで計測精度の向上を目的とした対応点探索について、2つの画像からブロックマッチングを行う際、ブロックサイズを適応的に選択する手法やマッチング関数を用いたサブピクセルレベルでの推定を行う手法などが提唱されている．一方、アクティブステレオ法は、測定時に被写体に対して光波などのエネルギー波動を投影することで容易かつ確実に対応点の関連付けを行うことができる．アクティブステレオ法は計測用のハードウェアの構成が複雑になるものの高精度な空間計測が可能であり、今日、歯科用口腔内スキャナなど多くの計測機器に応用されている．

本研究では、画像投影によるアクティブ化によって点群モデルの欠落に対して形状の改善を認めた．一方、ノイズについては、通常の撮影によって再構成したモデルよりも発生頻度が増加した．この理由としては、使用した液晶プロジェクターが単一焦点型であったことから、投影された画像が被写体上で歪みを生じ十分な輝度コントラストを得られなかったことが考えられる．さらに1方向からの画像投影であったことから、被写体上で十分に画像が投影されない部位が生じていたことが考えられる．全焦点型であるレーザープロジェクターを複数台使用することでこれらの原因の解決が可能であると考えられる．しかし、計測用ハードウェアの複雑化は測定が煩雑になるだけでなく、開眼状態での撮影を想定する生体計測では安全性にも問題がある．加えてパターン画像を投影して再構成した点群モデルでは本来の被写体の色調を再現できない．従って本システムを顔面計測に応用する場合、パターン画像投影の併用は避けるべきであると考えられる．

3次元モデルについて

本研究で作成した3次元点群モデルは、RAW データを使用していることから、空間計測の精度検証や、異なる計測システムの比較、被写体の形状評価を行う場合に適した形式である．

一方、データの記述形式が節点の座標値を最小構成としており、データ容量が節点数に比例して増加するため、膨大なメモリーが必要となる．また、空間座標系での表示を行った場合、計測した節点がそれぞれに独立していることから RAW データの取り扱いにはコンピュータに負荷がかかる．従って一般的に、修正距離関数を用いた曲面計算やドロネー三角形分割によるポリゴン化、陰関数を利用したメッシュ生成など点群モデルをその他のモデル形式に変換する手法が提唱されている．

物体の表面形状を微小な多角形の集合として表現したポリゴンモデル、特に、最小構成を三角パッチとした STL は、構成が比較的単純であり、自動要素分割のためのアルゴリズムが公開されていることから今日、各種ソフトウェアが準備されている．歯科領域での CAD/CAM システムに利用されるだけでなく、その他の RP システムや、CAM システムの標準ファイルフォーマットとして利用されている．

STL のデータ記述形式は面を構成する多角形の頂点座標および法線ベクトルを最小単位としていることから、点群モデルをポリゴンモデルへ変換する際は、節点に対する法線の設定が必要となる．点群モデルの節点に

対する法線の設定は、対象とする節点の周囲節点の座標値を参考にして法線ベクトルの推定を行う。点群モデルは RAW データとして測定値を直接形状に反映したものである。従って、形状に測定のエラーであるノイズや欠落を生じやすい。そこであらかじめ再構成した点群モデルのノイズ処理を行うことでポリゴンモデルへの変換の過程で生じる被写体の形状の変形を抑制できると考えた。

ノイズ処理について

点群のノイズ処理に関して、Taubin らは点群を信号レベルの異なる周波数として取り扱い、高周波信号のみをノイズとして取り除く手法を提唱している。また、Beeler らは顔面点群モデルに対して、立体モデルデータの陰影表現に用いられる環境遮蔽効果 (AOC) を考慮した形状の最適化について報告している。しかし、ソーベルフィルタなどの高周波除去フィルタでは、ノイズの振幅幅が節点の間隔に比べて大きい場合、ノイズを除去することができず、AOC による形状の最適化は、節点の法線データを対象とした処理法である。本実験で再構成した 3 次元点群モデルの節点は法線データを含まず、形状として皺や毛穴などの微小な凹凸を取り扱う必要があったことから、これらのノイズ処理法の適用が困難であった。そこで、測定によって得られた節点の座標データおよび色データを利用したノイズ処理法についての検討を行った。

本実験で用いた CCI は、その処理過程で隣接する節点間での奥行成分の変位量に閾値を設けた。奥行成分の変位の少ない形状からは対象とする節点が抽出されず、CCI 節点は色調の変化を伴う部位に限局していたことから、演算コストの低い DS による平滑化と併用することで形状全体のノイズ処理を行い測定形状との比較を行った。

測定環境が室内であり、天井に設置された照明光が測定時の主たる光源であった。また、被写体が一様な色調の石膏模型であり、光に対する挙動が一定であった。従って、撮影した画像は形状の凹凸を色調の陰影として反映が容易であったと考えられる。

CCI 節点数の総節点数に対する割合は 5.2% であり、CCI 節点の抽出によるデータ容量の増加は軽微であるといえる。

以上、本手法は点群モデルのノイズ処理法として有効であると考えられる。人体を対象とした場合は、各種条件が異なることからさらに検証が必要と思われる。顔面を対象とした計測においては、形状の凹凸が主に皮膚上に存在しており、その色調は比較的近似しているため、顔面計測によって再構成した点群モデルに対しても CCI が有効である可能性が高いと考えられる。

色調の明暗を用いたノイズ補正を加えた場合、通常のダウンサンプリングによる平滑化に比べ、被写体の微細な凹凸を残した測定ノイズの除去が可能であったことから、画像内の色調の明暗は視覚的だけではなく実際の立体構造に影響し、色調による点群の測定ノイズの除去に有効であることが示唆された。

今後は再構築した点群のポリゴンデータへの変換を行い、他の空間計測機器を用いて得られたデータとの比較による、空間計測能力の評価を経て、本システムの顔面計測法としての応用を目指す。

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)

勅使河原大輔, 猪野照夫, 藤澤政紀. 3D フェイシャルスキキャンの今, そしてこれから. QDT Arts&Practice 40, 46-58, 2015

[学会発表](計1件)

勅使河原大輔, 野露浩正, 藤澤政紀. 汎用デジタルカメラを用いた顔面形状計測 - 色調による測定ノイズの除去について. 日本デジタル歯科学会学術大会. 2015.4.25 (福岡).

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤澤政紀 (FUJISAWA Masanori)

明海大学・歯学部・教授

研究者番号: 00209040

(2) 研究分担者

猪野照夫 (INO Teruo)

明海大学・歯学部・准教授

研究者番号: 70146215

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

勅使河原大輔 (TESHIGAWARA Daisuke)