

# グリッド能動ステレオを用いた非接触心拍波形計測

青木 広宙<sup>1</sup> 古川 亮<sup>1</sup> 青山 正人<sup>1</sup> 日浦 慎作<sup>1</sup> 佐川 立昌<sup>2</sup> 川崎 洋<sup>3</sup>

1 広島市立大学大学院情報科学研究科 〒731-3166 広島県広島市安佐南区大塚東 3-4-1

2 産業技術総合研究所知能システム研究部門 〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第2

3 鹿児島大学大学院理工学研究科 〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40

E-mail: 1 {haoki, ryo-f, masa, hiura}@hiroshima-cu.ac.jp,

2 ryusuke.sagawa@aist.go.jp, 3 kawasaki@ibe.kagoshima-u.ac.jp

**あらまし** グリッド能動ステレオを応用した新しい非接触心拍波形計測手法を提案し、その妥当性について検討した。提案手法においては、グリッド能動ステレオを用いて胸壁部の三次元復元を行い、復元された点群データを等間隔に空間リサンプリングし、フレーム間での移動距離を算出する。これにより、各リサンプリング点の心拍波形を算出することが可能となる。心電図計を用いた同時計測による比較実験の結果、両者の波形においてピークが発生する間隔について高い同一性があることが明らかとなり、提案手法により算出される心拍波形が正しく心臓の動きを反映しているものであることを確認した。

**キーワード** 心拍波形, 非接触生体計測, グリッド能動ステレオ, 三次元計測

## 1. はじめに

従来、バイタルサインのひとつである心拍の計測においては、ECG (electrocardiogram, 心電図計) を用いて行われるのが一般的であるが、最近では、ECGのような接触型計測手段を用いずに、非接触計測手段を用いる手法が提案されている。例えば、Garbeyら[1]は熱画像を応用した手法を、Nagaeら[2]はマイクロ波を応用した手法を、それぞれ提案しており、これらの非接触計測手法は被験者の負担や拘束感を減ずる効果があるものと考えられる。しかし、これらの手法は高価な計測機器を必要とする。他にも、Pohら[3]はWebカメラを用いてカラー顔画像から心拍数を計測する手法について提案しており、安価なデバイスでの心拍計測を実現している。Pohらの手法においては安価なカラーカメラを用いることから照明変動に対するロバスト性が低いものと考えられ、また、心拍数の算出は可能であるものの定量性を備える心拍波形計測については実現が難しいものと考えられる。

我々は、グリッド能動ステレオによる三次元復元手法に関する研究に取り組んでおり[4]-[6]、本研究では、これを応用することで新たな非接触心拍波形計測を提案する。

提案手法のグリッド能動ステレオにおいては、プロジェクタ・カメラ系を利用し、投影された静的パターンによって単一画像からの復元を行う。これにより、高フレームレートでの動物体計測が可能である。提案手法において用いられる三次元復元手法は、単色パターンによるワンショット三次元計測、サブピクセル精度の対応点推定による高精度計測、並びに、環境光源の影響下での計測の実現を目標に新たに提案され[7]、これらの目標を以

下のアプローチにより実現するものである。

- (1) 波線パターンのグリッドによる暗黙的な対応情報の利用
- (2) プロジェクタの投影パターンとカメラ画像とのグリッドベースドステレオ法による一意的な対応推定
- (3) (準) 画素単位の補間および最適化による密な形状計測
- (4) 単色パターンの利用によるテクスチャに安定な処理と利用可能なプロジェクタの種類拡大

提案する非接触心拍波形計測手法においては、上記のグリッド能動ステレオを用いて胸壁部の三次元復元を行い、復元された点群データを等間隔に空間リサンプリングし、フレーム間での移動距離を算出する。これにより、各リサンプリング点の速度波形を算出することが可能となる。

本稿では、グリッド能動ステレオに基づく心拍波形計測手法を提案し、ECGを用いた同時計測による比較実験に提案手法の基礎的検討を行ったので報告する。

## 2. 提案手法

### 2.1. グリッド能動ステレオ

提案手法で用いられるシステムは、プロジェクタとカメラの一台ずつからなる(図1)。プロジェクタは図3(b)に示す静的パターン(図2)を投影する。このパターンは、単色で、正弦波形状の縦横の曲線をグリッド状に配置したものである。パターンは静的であるため同期の必要がなく、撮影に同期は必要ない。そのため、非常に高いフレームレートでの計測が可能である。

提案手法による復元アルゴリズムを図3に示す。まず撮影した画像から線検出を行う。Belief-propagation(BP)

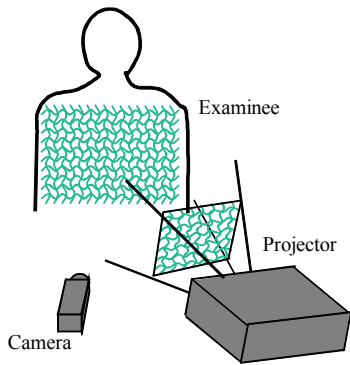


図1 システム構成

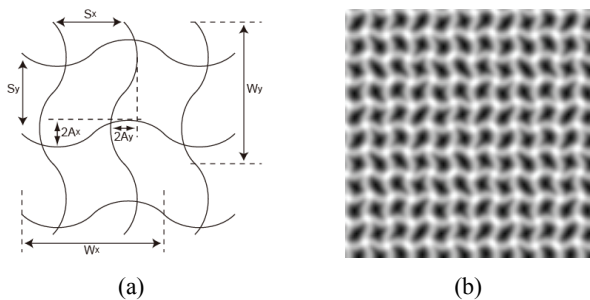


図2 波線パターン

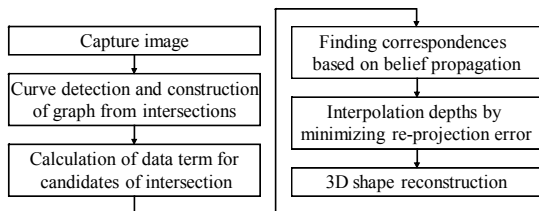


図3 アルゴリズムの概要

による最適化[5]により、単色のグリッド状の線を、縦と横に安定して分離して検出する。検出された縦横の線から交点を算出し、交点をノードとしたグラフを作る。次に各ノードに対応するエピポーラ線の位置をプロジェクタパターン上で計算し、そのライン上にグリッドの交点がある場合、これを対応候補とする。この時、通常は複数の対応候補が見つかるので、BPを利用して各点における対応候補の最適な組み合わせを求める。このままでは復元結果は疎であるので、最後に、各画素での深さを、補間およびパターンと観測画像の画素単位のマッチングを利用して求めることで、密な三次元形状を得る。

プロジェクタにより投影される静的パターンは、画像処理によって一意に対応が決まるパターンではなく、対応の優先順位に関する情報を与えるために、縦、横の波線からなるグリッドパターンを用いる。波線パターンは単純なパターンであるため、画像中での曲線として検出しやすく、輝度値のピークを計算することにより、その位置をサブピクセル精度で得ることができる。

波線として周期的な正弦波パターンを用いるが、波線グリッドは対応点検出に有効な情報を持つ。提案手法では、縦、横の波線の交点を特徴点として用いる。交点の配

置は、波線の間隔と波長で決定される。一定の間隔と波長を持つ波線を用いるが、下記に述べるように、縦波線の間隔が横波線の波長の整数倍でないため、交点まわりのパターンが局所的に固有なパターンを持ち、対応付けのための特徴量として用いることができる。

交点周囲の局所的パターンは、投影パターン全体の中で一意性を持つものではない。図2(a)において、 $S_x, S_y$ を隣接する波線の間隔、 $W_x, W_y$ を波長とすると、 $N_x = \text{lcm}(S_x; W_x) = S_x; N_y = \text{lcm}(S_y; W_y) = S_y$ を用いて、同一パターンが、横、縦軸に沿ってそれぞれ  $N_x, N_y$ 本の波線ごとに起こる。ここで  $\text{lcm}(a; b)$  は  $a$  と  $b$  の最小公倍数であり、添字  $x, y$  はそれぞれ横、縦軸に沿った値を表すものとする。しかしながら、局所パターンは、各サイクルにおいて識別可能なパターンである。図2(b) は、 $S_x = 10; S_y = 11; W_x = W_y = 14; A_x = A_y = 1$  (単位は画素) からなるパターンの例である。この例では、1周期は縦線7本、横線14本となる。よって、 $98 (= 7 \times 14)$ 種類 of 交点が1周期で構成される矩形の中に存在することとなる。

ステレオマッチングでは、対応点候補はエピポーラ線上の点に限られている。あるプロジェクタ画像の交点とエピポーラ線が適切な距離以内に位置している場合、そのプロジェクタ画像の交点是对应点候補の1つとして選択される。候補の数は、カメラ画像の交点位置に依存する。対応点候補は、プロジェクタ画像において疎に分布するため、画素単位で候補点を探索する通常のステレオ視と比べて、対応候補の数を大幅に少なくすることができる。

## 2.2. 非接触心拍波形計測手法

前記のグリッド能動ステレオにより、前出の図1に示したように、被験者の胸壁に投影された波線パターン画像から三次元復元を行い、胸壁の三次元形状の時間変化から心拍波形を算出する。画像取得に用いられるカメラはハイスピード撮影に対応しているものが用いられる。画像取得中、被験者は背もたれ付きの椅子に着座しているものとする。

復元された三次元点群データは、分布密度が場所により異なり、またフレーム間での点同士の対応を厳密に取ることは不可能である。そこで、カメラレンズを原点とし深度方向をZ軸としたXYZ三次元座標系において、XY平面に2次元格子点を設定し、三次元点群データを格子状に空間リサンプリングして新たに三次元座標を求める。そして、同じ格子点でフレーム間の対応付けを行い、連続するフレーム間での深度変化を算出することで心拍波形を算出する。つまり、心拍波形は腹壁とカメラレンズ間の距離変化(速度)に対応する。なお、三次元点群データの空間リサンプリングには、計算コストが低い線形補間三角網法[8]を用いる。

算出される心拍波形には、雑音や呼吸成分の体動が含

まれるため、透過帯域 0.4-5 Hz のバンドパスフィルター処理を行うことで、心拍成分のみを抽出する。

### 3. 実験および実験結果

提案手法の妥当性を検討するために、試作システムによる実測を行った。

試作システムにおいては、ハイスピードカメラとして、EPIX 社製 SILICON VIDEO® monochrome 643M を用いた。643M においては、VGA 画像を最大フレームレート 211FPS で撮影することが可能である。ここでは、100FPS での画像取得を行うこととした。カメラレンズの焦点距離は 8mm であった。また、波線パターンを投影するためのプロジェクタとして、エプソン社製液晶プロジェクタ EB-1750 を用いた。プロジェクタレンズとカメラレンズとの間隔は 600mm に設定した。

ここで、被験者は健常者男性 2 名(被験者 A 年齢 41 歳, 身長 1.71m, 体重 62kg / 被験者 B 年齢 39 歳, 身長 1.73m, 体重 69kg) である。なお、実験に先立ち、被験者とは実験同意書を取り交わしている。被験者の上半身の着衣は白色のTシャツである。実験時間は 30 秒間であり、実験開始後、約 10 秒間は呼吸を停止し、残りの時間は通常の呼吸を行うこととした。

以下に、被験者 A の実験結果について示す。図 4 は、ハイスピードカメラで取得された胸壁の波線パターン画像である。図 5 は、波線パターン画像から復元された三次元点群データ、ならびに、三次元点群データを XY 平面において格子状にリサンプリングした点群データの分布を示したものである。図 6 は、リサンプル点群データから生成された等高線図である。

図 6 中に×印で示した点における心拍波形の原波形とフィルタ処理後の波形を図 7 に示す。図 7 において、原波形には大きな高周波ノイズが含まれているが、心拍信号成分が含まれるとされる 0.4-5 Hz の周波数成分のみを高速フーリエ変換 (FFT) を用いて抽出した結果、周期的な波形が得られることとなった。

さらなる検討として、ECG との同時計測により、算出される心拍波形の妥当性について検討した。用いた ECG は LOGICAL PRODUCT 社製コンパクトワイヤレス ECG ロガーである。ECG 電極は左胸部下に設置した。実験結果を図 8 に示す。

### 4. 考察

前出の図 7 より、フィルタ処理後の波形の振幅より、腹壁の表面に現れる距離変化はサブミリオーダーと考えられた。また、呼吸停止時と通常呼吸時とでは、通常呼吸時の方が心拍波形の振幅が大きくなった。これは呼吸の周波数成分が除去しきれていないためと考えられ、FFT よりも高度な信号処理手法を用いた呼吸成分の除去について検討することが、今後の課題と考えられた。

図 9 は、復元された胸壁部の三次元形状の上に、空間

リサンプリングの格子点におけるフレーム間深度変化の空間分布を重ねて表現したものである。図 9(a)~(j)は 0.1 秒間隔でおおよそ拍動 1 回分のデータに相当する。フレーム間深度変化は変化量に基づきカラーマップとして表現している。連続するフレームにおいて三次元復元が行われなかったりフレーム間変化量があまりに大きな格子点においては、カラーマップ表現を行なっておらず、形状のみを表現している (灰色の部分)。



図 4 波線パターン画像

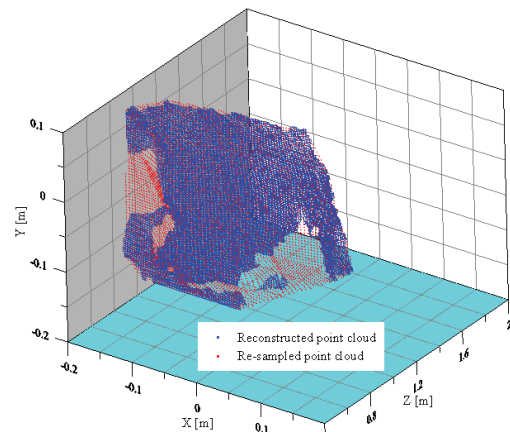


図 5 三次元点群データ

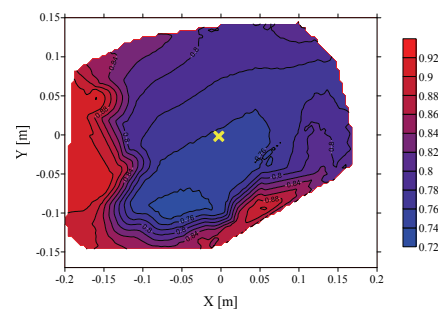


図 6 胸壁の等高線図

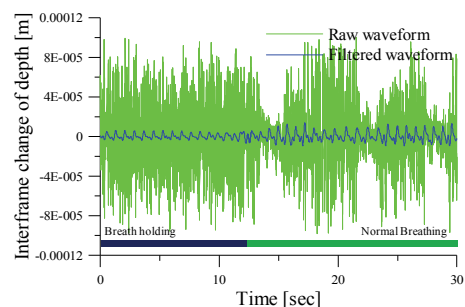


図 7 心拍波形



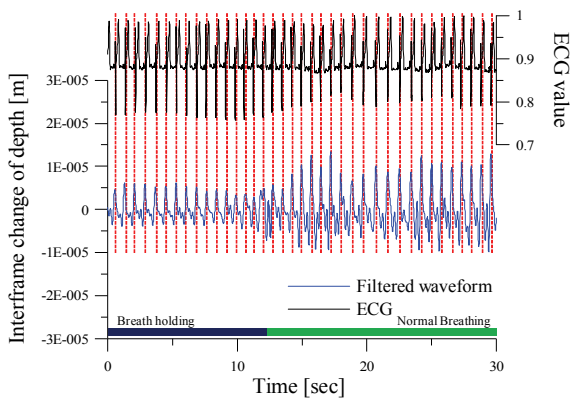


図8 ECG との比較 (波形)

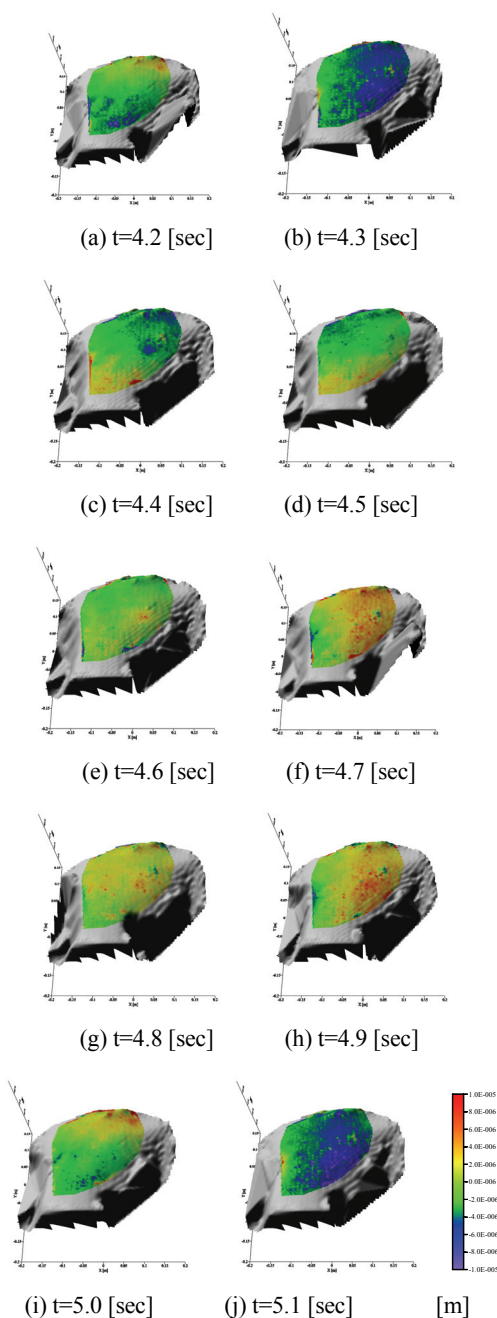


図9 心拍に伴う体表変動の可視化

図9より心拍動は、心臓が存在する胸壁の左側に出現していることがわかる。このように心拍動による僅かな体表の変化を画像化することで、心拍動の可視化を行うことができるものと期待している。

前出の図8より、提案手法による心拍波形のピークの出現間隔と ECG 波形のピーク (R 波) の出現間隔がほぼ一致していることがわかる。図10は、それぞれの手法におけるピークの出現間隔についてまとめた Bland-Altman 図である。図10より、両手法のピーク出現間隔には十分な一致性が存在することが明らかとなり、提案手法により算出されることが示唆された。通常呼吸時の方が呼吸停止時の差異より大きいことから、前述の通り、呼吸成分の影響を除去する必要があるものと考えられた。

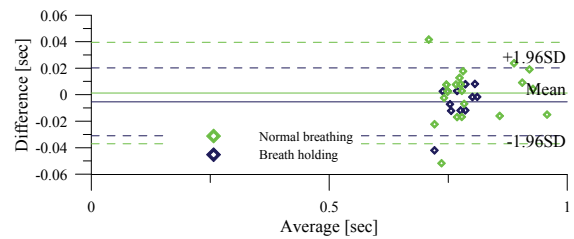


図10 ECG との比較 (ピーク出現間隔の Bland-Altman 図)

## 5. おわりに

グリッド能動ステレオを応用した新しい非接触心拍波形計測手法を提案し、その妥当性について検討した。提案手法においては、グリッド能動ステレオを用いて胸壁部の三次元復元を行い、復元された点群データを等間隔に空間リサンプリングし、フレーム間での移動距離を算出することで、心拍波形を算出した。ECG との同時計測による検討の結果、両者の波形にはピークが発生する間隔に高い同一性があることが確認され、提案手法により算出される心拍波形が正しく心臓の動きを反映していることを明らかにした。

なお、本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発制度(SCOPE)ICT イノベーション創出型研究開発(101710002)、文部科学省科学研究費補助金(21200002)および内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム(LR030)、日本学術振興会・科研費(23700576)の助成を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- [1] Garbey, M., Nanfei S.; Merla, A.; Pavlidis, I.: "Contact-Free Measurement of Cardiac Pulse Based on the Analysis of Thermal Imagery," IEEE Transactions on BME, Vol.54, No.8, pp.1418-1426, 2007
- [2] Nagae, D., Mase, A.: "Measurement of vital signal by microwave reflectometry and application to stress evaluation," APMC 2009. Asia Pacific, pp.477-480, 2009
- [3] Poh, M.; McDuff, D.J.; Picard, R.W.: "Advancements in Noncontact, Multiparameter Physiological

Measurements Using a Webcam," IEEE Transactions on BME, Vol.58, No.1, pp.7-11, 2011

- [4] Kawasaki, H., Furukawa, R., Sagawa, R. and Yagi, Y.: "Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern", CVPR, pp. 1-8, 2008
- [5] Sagawa, R., Ota, Y., Yagi, Y., Furukawa, R., Asada, N. and Kawasaki, H.: "Dense 3D reconstruction method using a single pattern for fast moving object", ICCV, 2009
- [6] Sagawa, R., Kawasaki, H., Furukawa, R. and Kiyota, S.: "Dense One-shot 3D Reconstruction by Detecting Continuous Regions with Parallel Line Projection," ICCV, 2011
- [7] 阪下和弘, 佐川立昌, 古川亮, 川崎洋, 八木康史: "高密度3次元形状復元のための単色波線パターンを用いたグリッド能動ステレオ", MIRU, 2012
- [8] Lee, D. T., and Schachter, B. J.: "Two Algorithms for Constructing a Delaunay Triangulation," International Journal of Computer and Information Sciences, Vol. 9, No. 3, pp. 219-242, 1980