

## アクティブステレオ画像センサを用いた拍動波形検出の提案

青木 広宙\* 古川 亮 青山 正人 日浦 慎作 (広島市立大学)  
佐川 立昌 (産業技術研究所)  
川崎 洋 (鹿児島大学)

## Proposal on Cardiac Pulsation Detection Using Active Stereo Image Sensor

Hirooki Aoki\*, Ryo Furukawa, Masahito Aoyama, Shinsaku Hiura, (Hiroshima City University)  
Ryusuke Sagawa, (AIST)  
Hiroshi Kawasaki, (Kagoshima University)

We propose a method to observe cardiac beat from 3D shape information of body surface by using grid-based active stereo, and report preliminary experiments to evaluate validities of the proposed method. By comparing results of our proposed method with those of electrocardiogram (ECG), we confirmed sufficient correspondences between peak intervals of inter-frame depth changes measured by our method and R-R intervals measured by ECG. We tried the visualization of the spatial distribution of inter-frame depth change plotted on the 3D shape of thoraco-abdominal region. And, the shape change by cardiac beat is mainly found on the left side of the chest region.

キーワード：心拍動，生体計測，非接触計測，画像計測，アクティブステレオ

(Cardiac pulsation, physiological measurement, non-contact measurement, image measurement, active stereo)

## 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<sup>(1)</sup>は熱画像を応用した手法を、Nagae ら<sup>(2)</sup>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。Poh ら<sup>(3)</sup>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、グリッドアクティブ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<sup>(4)-(6)</sup>、本研究では、これを応用することで新たな非接触拍動波形検出を提案する。

提案手法のグリッドアクティブステレオにおいては、プロジェクト・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たものである<sup>(7)</sup>。

提案する非接触拍動波形検出手法においては、上記のグリッドアクティブ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、グリッドアクティブステレオに基づく拍動波形検出手法を提案する。また、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) グリッドアクティブステレオ

提案手法で用いられるシステムは、プロジェクトとカメ

ラの一か所からなる(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、撮影において投影系と撮像系の同期が必要ない。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。

本稿で用いられるグリッドアクティブステレオにおいては、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としており、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) 波線パターンを有するグリッドパターン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の拡大

本稿のグリッドアクティブステレオ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) による最適化<sup>(5)</sup>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

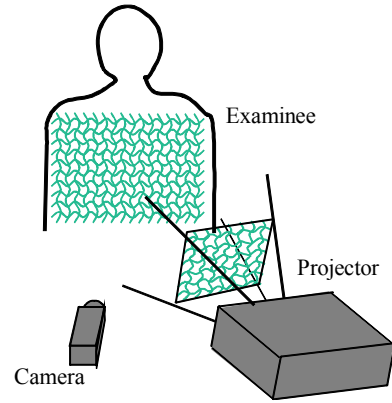


図 1 システムの構成

Fig. 1. System configuration.

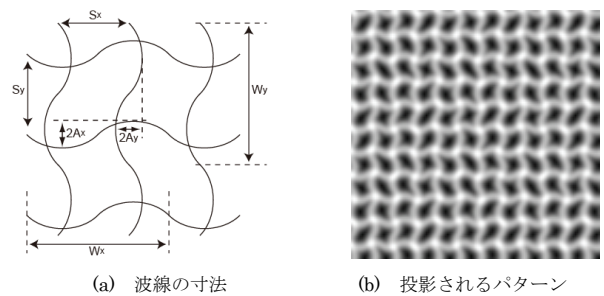


図 2 波線パターン

Fig. 2. Wave pattern.

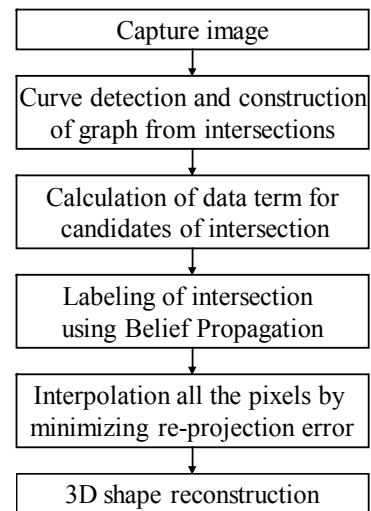


図 3 三次元復元アルゴリズム

Fig. 3. Algorithm for 3D reconstruction.

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(= 714)種類の交点が 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当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応点候補の 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・1) 非接触拍動波形検出手法

前記のグリッドアクティブステレオにより、前出の図 1 に示したように、被験者の胸壁に波線パターンを投影し、投影された波線パターン画像から三次元復元を行う。そして、胸壁の三次元形状の時間変化から心拍波形を算出する。画像取得には、ハイスピード撮影に対応するカメラが用いられる。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<sup>(8)</sup>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 0.4~5.0 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、被験者は健康者男性 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ティーシャツである。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



図 4 取得画像

Fig. 4. Obtained image.

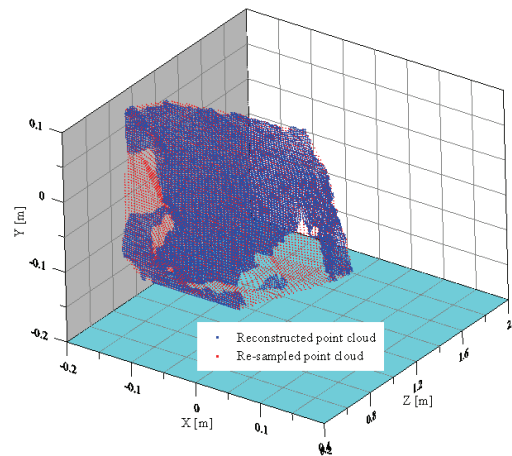


図 5 三次元点群データ

Fig. 5. 3D point cloud data.

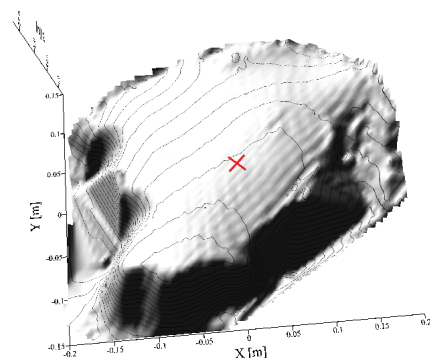


図 6 復元された胸壁三次元形状

Fig. 6. Reconstructed 3D shape of chest wall.



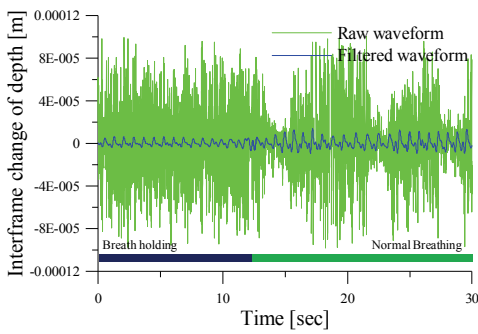


図 7 心拍波形の抽出

Fig. 7. Extracted cardiac beat.

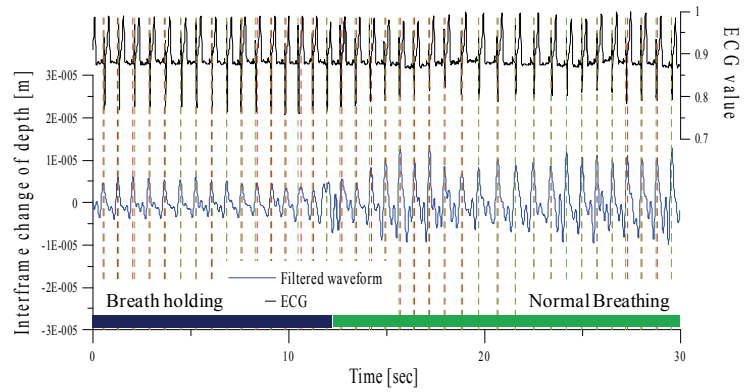


図 8 ECG との比較

Fig. 8. Comparison of ECG.

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復元された胸壁の三次元形状である。

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

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 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 9 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 9 において、若干の加算誤差が見られるものの比例誤差は表れていないことから、大きな系統誤差は見られなかった。両手法のピーク出現間隔の差異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。誤差の許容範囲 (LOA: limits of agreement) を比較すると、通常呼吸時の LOA が呼吸停止時の LOA より僅かに大きいことから、呼吸運動が心拍波形の抽出に影響を及ぼしているものと考えられた。したがって、呼吸運動成分の除去について、今後検討していく必要があるものと考えられた。

図 10 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。フレーム間深度変化を変化量に基づきカラーマップとして表現している。一連のフレームにおいて、正しく三次元復元が行われなかったり、フレーム間変化量が明らか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 10 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。

#### 5. おわりに

グリッドアクティブステレオを応用した新しい非接触拍動波形検出手法を提案し、その妥当性について検討した。提案手法においては、グリッドアクティブ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。また、復元された胸壁部の三次元形状の上

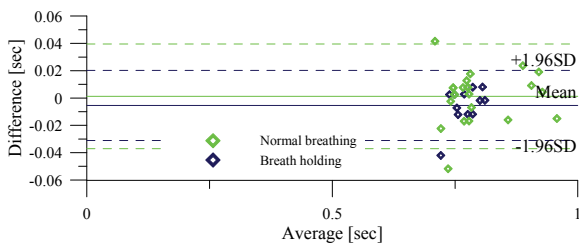


図 9 Bland-Altman 図

Fig. 9. Bland-Altman plot.

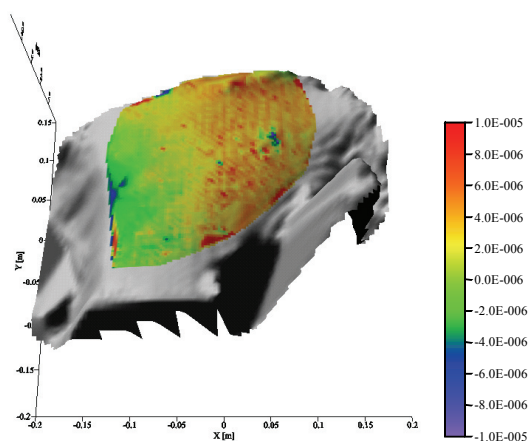


図 10 心拍動の可視化

Fig. 10. Visualization of cardiac beat.

に、フレーム間深度変化の空間分布を重ねて表現した結果、心拍運動が胸壁の左側に出現していることを確認した。

実験においては、呼吸を停止した状態と通常呼吸を行なっている状態との比較を行ったが、通常呼吸を行なっている状態の方が、ECG の計測結果との差異が大きかった。このことから、提案手法においては、呼吸運動が心拍波形抽出に影響しているものと考えられ、波形に含まれる呼吸運動成分の除去が今後の課題と考えられた。また、本稿においては、十分な被験者数による検討ができなかったことから、今後、被験者数を増やした上で検討を加えていく予定である。

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