

ミリ波レーダを用いた非接触心拍センシング技術

Wireless Heart-beat Sensing Technology using Millimeter-wave Radar

酒井 啓之
Hiroyuki Sakai

福田 健志
Takeshi Fukuda

井上 謙一
Ken-ichi Inoue

奥村 成皓
Shigeaki Okumura

阪本 卓也
Takuya Sakamoto

佐藤 亨
Toru Sato

要 旨

離れたところから非接触で、測定していることを感じさせない心拍センシング技術を開発した。高感度スペクトラム拡散レーダ技術により、呼吸や心臓の鼓動による皮膚表面のわずかな動きを検知することで、呼吸や心拍を測定する。さらに、特徴点ベースの新しいアルゴリズムの開発により、一拍一拍の心拍間隔（IBI：Inter-Beat-Interval）の推定をも可能にした。これにより、心拍間隔変動から自律神経の状態を推定することも可能となる。本技術で推定した心拍間隔と心電計から得られた心拍間隔の相関係数は0.993に達し、非接触で心電計と同等の心拍間隔測定が可能となった。

Abstract

We have successfully achieved accurate wireless sensing of heartbeats and inter-beat intervals using our original millimeter-wave spread-spectrum radar technology and a signal processing algorithm. The radar remotely detects minute movements of the surface of human skin caused by respiration and heartbeats. The algorithm extracts heartbeat components separately from respiration and other movements, and estimates inter-beat intervals as well as an average heart rate with almost the same accuracy as that of electrocardiography, by exploiting feature points of a radar waveform. This new technology enables casual sensing of heartbeats on a steady basis. It can detect inter-beat intervals accurately so that we can estimate autonomic nerve conditions in an unobtrusive manner in people's daily life.

1. はじめに

近年、生活習慣病の予防や日々の健康増進のために、さまざまな生体情報を常時モニタし、管理したいという要望が高まっている。また、本格的な高齢化社会を迎え、一人暮らしの老人や介護施設の入居者に対し、肉体的・精神的な健康状態を見守りたいという要求も多い。これらの要望に応えるべく、小型で高感度なさまざまな生体情報センサが開発され、ネットワークを介したクラウド情報管理を組み合わせ多種多様なセンサシステムが提案されてきた。しかしながら、現状では小型化されているとはいえ、多くの生体センサは身体に接触・装着する必要がある。接触による不快感、装着の煩わしさ・拘束感、充電等のメンテナンスの必要性などの課題が指摘されている。そのため、測定時にストレスを感じさせないカジュアルな生体情報センシングが強く求められてきた。一部ではカメラや電波センサを利用した非接触型の生体センシングも提案されているが、接触型に比べ、測定精度においてはまだ課題が残る。特に、最近では呼吸数や心拍数といった医学的な生体情報だけでなく、これらの情報を用いて人の緊張状態、ストレス状態、眠気など、より高度な神経・精神状況まで推定したいという要望がある。例えば、心拍間隔の時間的ゆらぎの周波数成分と人の交感神経・副交感神経の活動には関係があると言わ

れており[1]、これらの関係から人の緊張状態、ストレス状態などを推定する試みもなされている。しかしながら、平均値としての心拍数に比べ、一拍一拍の拍間隔をリアルタイムに測定するには、センサ自体に高い測定精度が要求されると同時に、心拍を正確かつ高速に推定する優れたアルゴリズムが必要になる。

筆者らは、高感度なスペクトラム拡散レーダをセンサとして使い、独自の信号処理技術を組み合わせることによって心電計と同程度の高感度な心拍数/心拍間隔測定を実現し、高精度かつストレスフリーなカジュアルセンシングを実現した。

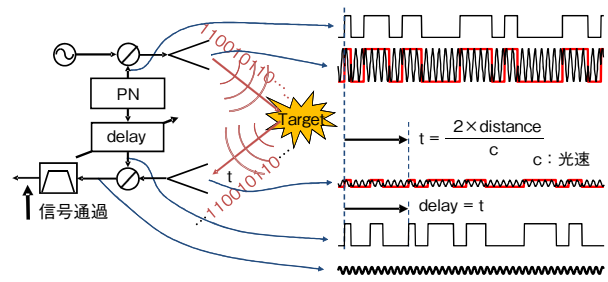
2. スペクトラム拡散レーダ技術

生体情報の非接触センシング手法として、赤外線センサやカメラ、加速度センサ、マイクロ波センサを用いたものなどが提案され、すでに商品として実用化されているものもある。しかし、多くのものは、人のおおまかな行動・体動から活動状態・睡眠状態などを推定するものであり、呼吸や心拍といった細かなバイタル情報を正確に測定できるものは限られる。カメラ映像データの画像解析から心拍を検出する技術も提案されているが、プライバシーの観点から、使用できる状況が制限される懸念がある。

筆者らはミリ波レーダを用いて、人の皮膚表面の微細な動きを計測し、呼吸や心拍を直接検出することを提案する。波長の極めて短いミリ波レーダは、1 mm以下のわずかな動きも検知できるため、人の呼吸による体の動きのみならず、心臓の拍動が皮膚表面に伝わるわずかな動き（心弾動）も検出することができる。人の呼吸による体表面の変位は1 mm～50 mm、心拍による変位は0.1 mm～0.5 mm程度と言われているが、例えば60 GHzミリ波レーダの波長は5 mmであり、0.5 mmの変位は位相にして36度にもなるので、いわゆるドップラ・レーダの原理で1 mm以下の動きが検知できる。またミリ波は衣服や布団など透過するため、着衣のまま、布団をかぶっての就寝中でも、検出が可能である。

1 mm以下の皮膚の動きを検知するだけであれば、24 GHzのISM (Industry Science Medical) 帯を用いた狭帯域ドップラセンサを用いれば可能であるが、実際の心拍計測の利用シーンを考慮すると課題が多く現実的でない。例えば、室内に被測定者以外に動くものが何もない状態であれば、被測定者の信号のみを検知できるので呼吸や心拍の推定が可能になるが、近くに別の人が居る場合、あるいは人でなくても扇風機など動くものがあつた場合、それらの信号と被測定者の信号が混信して分離できないためセンシングが不可能になる。そこで筆者らは、生体センシングに広帯域のUWB (Ultra Wide Band) レーダを新たに開発した。UWBレーダでは、帯域に対応したレンジビンと呼ばれる距離方向の測定区域を限定することができるため、被測定者が居るレンジビンのみの信号を抽出することで、外部擾乱（じょうらん）の影響を排除できると同時に、異なるレンジビンに居る複数の人の生体信号を同時に測定することができる。

今回、筆者らはPN (pseudo random noise) 符号位相変調を用いたスペクトラム拡散方式のレーダを開発した。第1図にスペクトラム拡散レーダの原理を示す。送信波は特定の拡散符号（疑似ランダム信号）で位相変



第1図 スペクトラム拡散レーダの原理
Fig. 1 Concept of the spread spectrum radar

調される。送信された電波はターゲットで反射され、レーダからターゲットまでの距離の2倍を光速で割った時間（ τ ）だけ遅れてレーダに戻ってくる。受信器では、戻ってきたレーダ信号をdelayだけ遅延させた拡散符号で復調する。delayと τ が一致したとき、受信信号は元の狭帯域の送信波に復調されるため、ターゲットまでの往復時間、すなわちターゲットまでの距離がわかる仕組みである。ターゲットである人の皮膚表面のわずかな動きは、レーダ信号波の位相シフトとして検出できる。またレーダが複数存在する場合には、それぞれのレーダに固有の拡散符号を割り当てることで、自己のレーダの反射波と他のレーダ波を区別することができる。

第1表にレーダ方式の比較をまとめた。本方式はパルスレーダなど他のUWBレーダ方式に比べても、連続送信による回路効率の向上など、微弱な生体信号を検出する生体センシング用途に適していることがわかる。

第2図に開発したスペクトラム拡散レーダのブロック図、第3図に試作機の写真を示す。周波数は60 GHz～61 GHz、送信4チャンネル、受信4チャンネルを有し、4×4のMIMO (Multi Input Multi Output) 動作が可能となっている。これにより、レンジ方向だけでなく、角度方向の分離も可能になる。すなわち、レーダから同一の距離に複数の被測定者が居る場合においても、レーダからの角

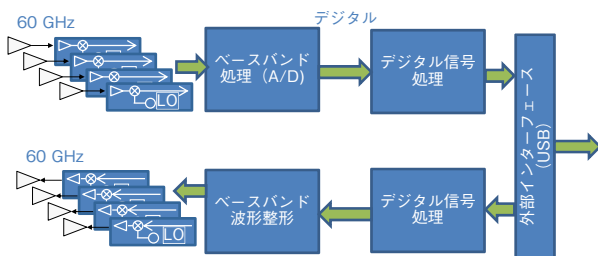
第1表 レーダ方式の比較

Table 1 Summary of radar systems

方式	PN符号位相変調方式 (スペクトラム拡散: SS)	パルス方式	FM-CW方式
測距原理	PN符号自己相関	パルス自己相関	送受信周波数差
用途	近距離～中距離 数10 cm～20 m	航空・気象・軍事・車載 など	主に遠距離車載レーダ 3 m～100 m
耐干渉波	PN符号で分離	干渉あり	干渉あり
回路効率	連続送信のため回路効率 高い	インパルス状間欠送信の ために大電力回路が必要	連続送信のため回路効率 高い
距離分解能	高分解能化可能 (τc)/2 τ : 1 bit時間 3 Gbit/s: 5 cm	高分解能化可能 (τc)/2 t: パルス幅 333 ps: 5 cm	高分解能化し難い 短距離検知も困難

度が異なれば、分離して同時に心拍を測定することが可能になる。

第2表に試作したレーダの主要諸元をまとめる。ここで、距離分解能は、拡散符号のチップレートで決まるレンジビンのことであり、チップレートを高くすることでより細かくできる。この距離分解能だけ離れた被測定者は分離可能で、それぞれの心拍を同時に測定することができる。本試作機は1.25 Gchip/sで12 cmの距離分解能が実現できるが、チップレートを250 Mchip/sに落とすことで電波法で規程された60 GHz帯レーダの帯域に低減し、特定無線設備の技術基準適合証明を取得した。これにより、パブリックスペースでの実験が可能となった。



第2図 開発したスペクトラム拡散レーダのブロック図
Fig. 2 Block diagram of the spread spectrum radar



第3図 スペクトラム拡散レーダ試作機の写真
Fig. 3 Photo of the spread spectrum radar prototype

第2表 レーダ試作機の主要諸元

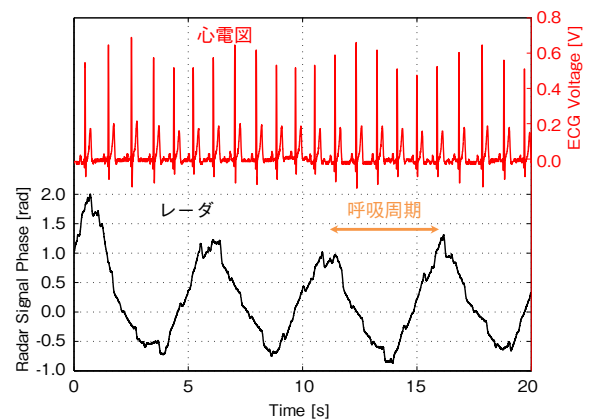
Table 2 Specifications of the radar prototype

周波数帯	60 GHz帯
送信電力	10 mW以下
変調方式	PN符号位相変調方式
チップレート	250 Mchip/s / 1.25 Gchip/s
距離分解能	60 cm/12 cm
アンテナ	送信4×受信4 アンテナ利得9 dBi
サイズ	180 mm×210 mm×470 mm

3. 特徴点を用いた心拍推定アルゴリズム

前章で述べた高感度レーダを用いても、離れたところから人の心拍間隔を測定することは容易ではない。そもそも心拍の検出は呼吸の検出に比べて難しい。心臓の拍動による胸の皮膚表面の動きは呼吸による動きに比べて1桁以上小さいうえに、実際にはさらに体動などの別の動きも重畳される。姿勢や個人差の影響もあるであろうし、波形や心拍数は時間的に変化し、再現性も乏しい。

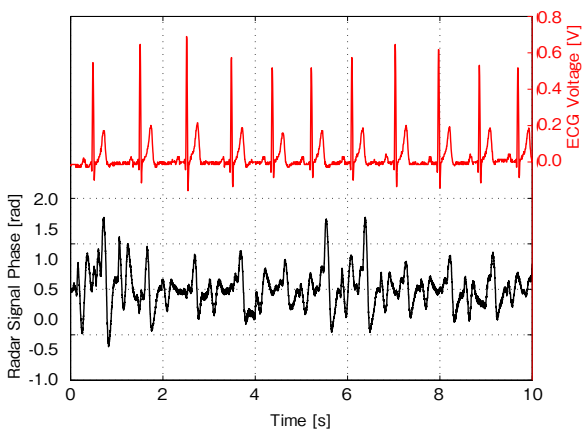
第4図はある被験者の胸部にレーダを照射したときのレーダ信号と装着した心電計による被験者の心電図（Electrocardiogram：ECG）を同時にプロットしたものである。被験者は椅子に着席した状態で、正面から胸部に向かって約1mの距離からレーダを照射した。レーダ信号は位相をプロットしており、被験者の胸部の動きを捉えている。心電図の波形とレーダ信号の波形は対応が見られず、特に周期が大きく異なっているが、これはレーダ信号では呼吸による胸部の動きが優勢なためである。レーダ波形をよく見ると、細かな周期の動きが重畳しており、これらの信号を抽出すれば、心拍がわかるように思われる。そこで、レーダ信号から帯域通過フィルタによって呼吸の周波数成分を取り除いた波形を第5図に示す。心電図波形とレーダ波形にある程度の対応が見られるようにはなったが、依然ここから心拍を検出するのは容易ではない。呼吸の周波数成分を取り除いても、体動などの別の信号が重畳する他、呼吸信号の高調波成分も乗ってくるからである。



第4図 レーダと心電位の同時測定波形
Fig. 4 Simultaneous measurement with radar and ECG

これらの混在した信号のなかから、心拍の成分を高速に抽出するために、特徴点を用いた新しいアルゴリズムを開発した[2], [3].

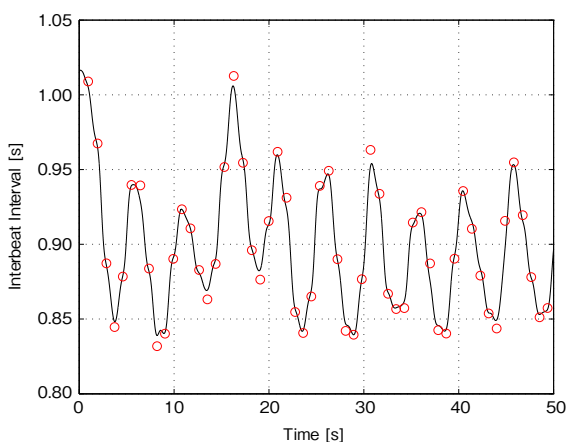
心拍間隔時間を推定するのに、レーダ信号波形につい



第5図 単純なフィルタによる呼吸成分除去
Fig. 5 Removal of respiration with simple HPF

て、基準時刻における周期を周期の推定範囲だけ進んだ波形との相関を計算するのが一般的だが、時間が進んだ波形の相関（波形がどの程度似てるか）だけの判断では、誤った周期を心拍間隔と推定してしまうことも多かった。そこで、今回新たに特徴点による判断を追加した。レーダ波形から、極大点、極小点などの特徴点を抽出する。さらに、その微分信号波形から、勾配極大点や勾配極小点などの特徴点を抽出する。これらの特徴点がどのような順番で現れるか、すなわち特徴量空間における特徴点の遷移状態を表す量として、各特徴点に離散複素特徴量を割り当てた特徴トポロジー信号を新たに定義し、この相関も判断に用いることで、信頼できるデータのみで心拍間隔を推定することにより、正確な推定を可能にした。

第6図にレーダ信号から本手法で推定した心拍間隔と、心電図のピーク間隔から計算した心拍間隔を同時にプロ

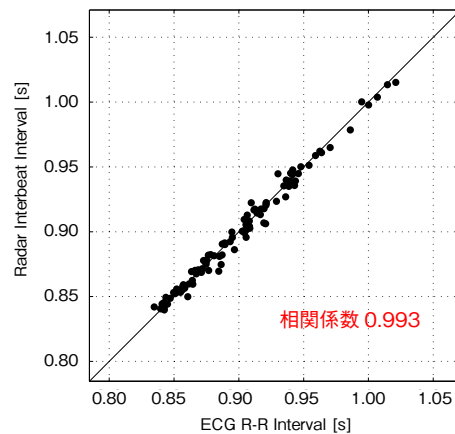


第6図 心電計とレーダによる瞬時心拍間隔*
Fig. 6 Inter-beat interval detected with ECG and radar

*: R-R Interval: 心電図におけるR波と呼ばれるピークの間隔。この値から心拍間隔を決める。

ットした結果を示す。両者が非常に良く一致しているのがわかる。RMS誤差（平均二乗誤差：Root Mean Square Error）はわずか5.1 msであった。第7図は両者の相関をプロットしたものである。相関係数は0.993に達した。

このことから、今回開発したレーダを用いた非接触の心拍センシングは、心電計とほぼ同等の精度で心拍間隔まで計測できていると言える。



第7図 心電計とレーダによる瞬時心拍間隔の相関
Fig. 7 Correlation between inter-beat interval detected with ECG and radar

4. まとめ

高感度スペクトラム拡散ミリ波レーダと、特徴点を用いた新しい心拍推定アルゴリズムを開発し、被験者に測定されていると感じさせない、心拍センシングを実現した。ミリ波レーダで測定された心拍間隔は心電計による測定値と相関係数0.993で一致し、非接触センサでも心電計と同程度の測定精度が得られた。

本技術により、人の健康状態からストレス・緊張などの神経の状態までを推定することが可能になり、家庭や職場、介護施設など、さまざまなところで、健康管理や見守りなどの新しいサービス・システムへの展開が期待される。

今後は、さまざまな被験者による、より実生活に近い状態での実証実験を通して心拍間隔推定アルゴリズムのロバスト化を進めると同時に、より広帯域化が可能な79GHz帯を用いたより小型軽量なレーダシステムを開発し、早期の実用化を目指す。

本研究の一部は国立研究開発法人 科学技術振興機構（JST）の研究成果展開事業「センター・オブ・イノベーション（COI）プログラム」の支援によって行われた。

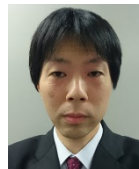
参考文献

- [1] Akselrod S. et al., "Power spectrum analysis of heart rate fluctuation : A quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control," Science, vol. 213, no. 4504, pp.220-222, 1981.
- [2] Takuya Sakamoto et al., "Feature-based Correlation and Topological Similarity for Estimating Accurate Heart Rate using Ultra-Wideband Radar," IEEE Trans. Biomed. Engineering, vol. 63, no. 4, 2016.
- [3] Takuya Sakamoto et al., "Remote heartbeat monitoring from human soles using 60-GHz ultra-wideband radar," IEICE Electronics Express, vol.11, no.25, 1-6.

執筆者紹介



酒井 啓之 Hiroyuki Sakai
先端研究本部 材料・デバイス研究室
Materials and Devices Research Lab.,
Advanced Research Div.



福田 健志 Takeshi Fukuda
先端研究本部 材料・デバイス研究室
Materials and Devices Research Lab.,
Advanced Research Div.



井上 謙一 Ken-ichi Inoue
先端研究本部 材料・デバイス研究室
Materials and Devices Research Lab.,
Advanced Research Div.



奥村 成皓 Shigeaki Okumura
京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University



阪本 卓也 Takuya Sakamoto
京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University
兵庫県立大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, University of Hyogo
博士 (情報学)



佐藤 亨 Toru Sato
京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University
工学博士