

# 多重変調パルス圧縮による空中超音波を用いた呼吸・心拍の非接触計測

Non-contact measurement of breathing and heart beat using airborne ultrasound  
by M-sequence and frequency-sweep modulated pulse compression



2161018

研究代表者

東京工業大学 工学院

助教

平田 慎之介

## [研究の目的]

少子高齢化，労働力人口の減少が懸念させる昨今において，独居高齢者や感染症患者に対する遠隔看護システムとして，バイタルサインを非接触でモニタリングできるロボット・システムには大きな期待が寄せられている。本研究では，空中超音波を用いて人間の呼吸や心拍を非接触で計測するシステムを提案し，その計測手法や信号処理について検討を行なっている。壁や天井などから超音波を送波し，人体から反射するエコーを受波する本システムでは，夜間や電磁波を用いることが困難な空間における呼吸・心拍のモニタリングが期待できる。これまでの研究では，仰臥位脱衣状態の被験者の上部に1対の送受波器を設置し，胸部変位を計測するシステムについて検討を行ってきた。そこで本申請研究では，次のステップとして立位脱衣状態の被験者を対象とした呼吸・心拍の計測を目的とする。

これまでの計測システムでは，1対の送受波器を用いて，被験者の胸部との距離を一定の時間間隔で計測する。仰臥位での計測では，この距離の変化量から胸部の変位を求めることができる。しかしながら，立位での計測では，被験者の体動の影響や体の向きの違いによって，距離の変化量から正確な胸部変位を求めることが

できない。そこで，複数の送受波器を用いて胸部の2次元変位を計測する手法について検討を行う。

## [研究の内容]

まず，体表から反射したエコーの信号対雑音比 (SNR) の向上と複数の計測システム間での混信を防ぐため，擬似ランダム符号の一種である M 系列を用いたパルス圧縮を適用する。M 系列とは，線形帰還シフトレジスタ (LFSR) という論理回路から生成される最長の 2 値ランダム符号列である。M 系列で符号化した超音波と使用した M 系列符号との相関処理を行うと，符号同士が重なる時間に相関ピークが現れる。さらに異なる LFSR から生成された M 系列符号同士で相関処理を行っても相関ピークは生じないため，相互干渉の少ない計測システム (送信信号) を構築することができる。しかしながら，次数の低い M 系列では LFSR の種類が少なく，同時計測可能なチャンネル数を十分に確保することができない。そこで，周波数が時間とともに変化する線形周波数変調 (LFM) 信号を M 系列で符号化する手法を検討する。この手法では，各符号に対応する周波数が異なるため，図 1 のように M 系列の初期位置をずらした符号を用いることで相互干渉の少ない送

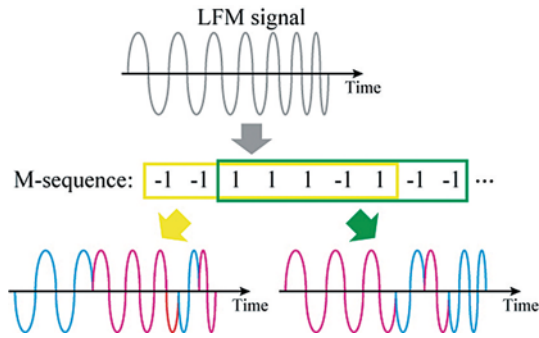


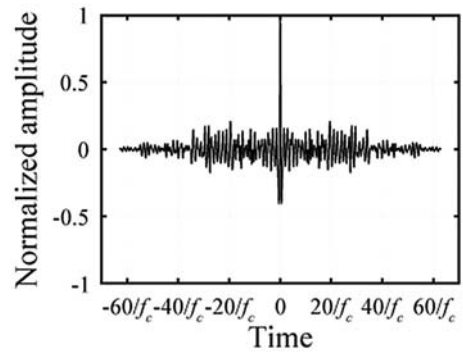
図1 多重変調パルス圧縮の送信信号

信信号となる。1種類のM系列から複数の送信信号を生成することができるため、LFSRの種類とM系列の長さ(符号数)の積だけチャンネル数を確保することができる。本申請研究では、M系列で符号化したLFM信号の相関特性について評価を行い、相関特性の優れた組み合わせの選出を行った。

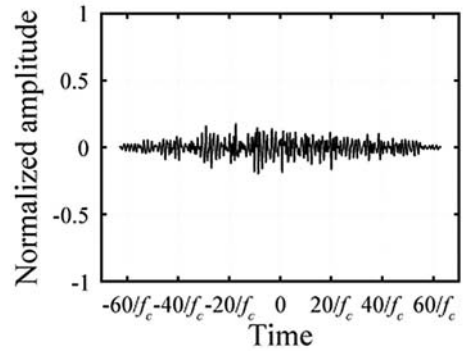
また、胸部の2次元変位を計測するため、複数の送受波器対を用いて2次元画像(空中音響画像)を作成する。空中音響画像は、各送受波器対から得られた相関波形および各送受波器の位置情報から合成開口法により作成することができる。そして、一定の時間間隔で作成された空中音響画像の高輝度部を体表の反射点として、各フレーム間での反射点の変位をトラッキングすることで胸部の変位を計測する。本申請研究では、被験者の前方および後方からの空中音響画像を作成し、体動の影響を除去した胸部変位の計測を行う。

### [研究の成果]

図2にM系列で符号化したLFM信号の自己相関関数と異なるM系列で符号化したLFM信号同士の相互相関関数の1例を示す。通常のパルス圧縮と同様に符号同士が重なる時間( $t=0$ )の自己相関関数にピークが確認できる。また、相関ピークの周辺や相互相関関数には打ち切り雑音や符号間干渉雑音が確認できる。これらの雑音の大きさ(ピーク値や分散)はM



(a) Autocorrelation function



(b) Cross-correlation function

図2 6次M系列で符号化した比帯域1.5のLFM信号の自己相関関数および相互相関関数

系列を生成するLFSRやM系列の初期値の組み合わせによって大きく異なることがわかった。そのため、図3のように全ての組み合わせの自己・相互相関関数を求めて雑音の大きさの評価を行った。M系列で符号化したLFM信号の自己相関関数における打ち切り雑音は、適切なLFSR・初期値を選ぶとピーク値0.12、分散 $2 \times 10^{-3}$ 程度まで小さくなることがわかった。通常のパルス圧縮で使用されるM系列で符号化した正弦波の場合と比較してピーク値が1.5倍、分散が2倍大きくなる。一方、相互相関関数における符号間干渉雑音は、適切な組み合わせではピーク値0.13、分散 $1.8 \times 10^{-3}$ 程度まで小さくなることがわかった。また、図3において、ピーク値が0.5~0.6付近に分布しているには初期値の差が1符号分の組み合わせで、0.4付近に分布しているには初期値の差が2符号分の組み合わせであった。よって、比帯域1.5のLFM信号を用いる場合は、初期値の差が3符

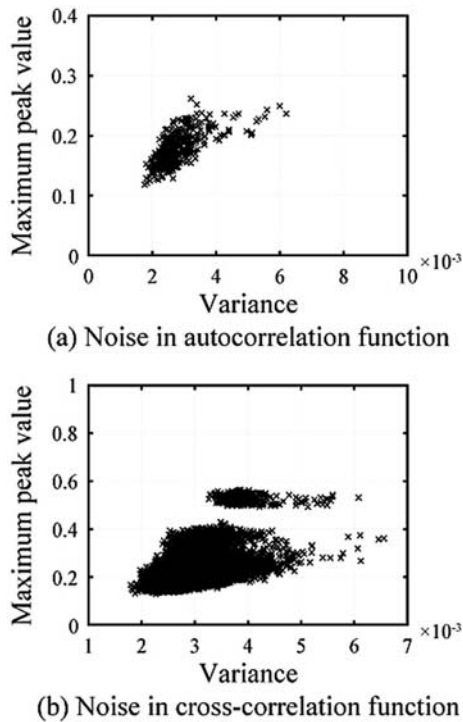


図3 6次M系列で符号化した比帯域1.5のLFM信号の自己相関関数および相互相関関数における雑音のピーク値と分散

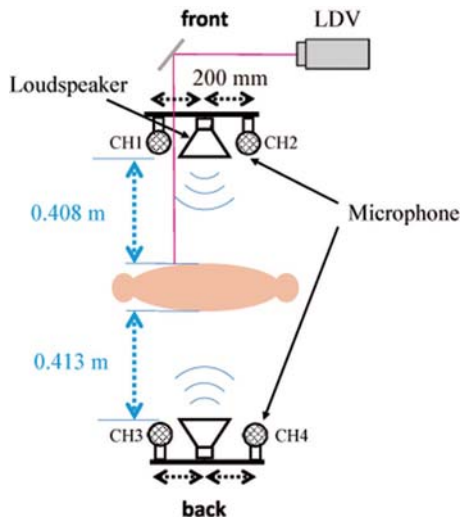


図4 立位脱衣状態の被験者の呼吸・心拍を計測する実験の状況および機器配置

号分以上であれば提案手法により相互干渉の少ない送信信号を生成することができる。

立位脱衣状態の被験者の呼吸・心拍を計測する実験を行った。実験の状況および機器配置を図4に示す。被験者には4周期に変化する動画を見せることで呼吸の周期を設定した。被験者

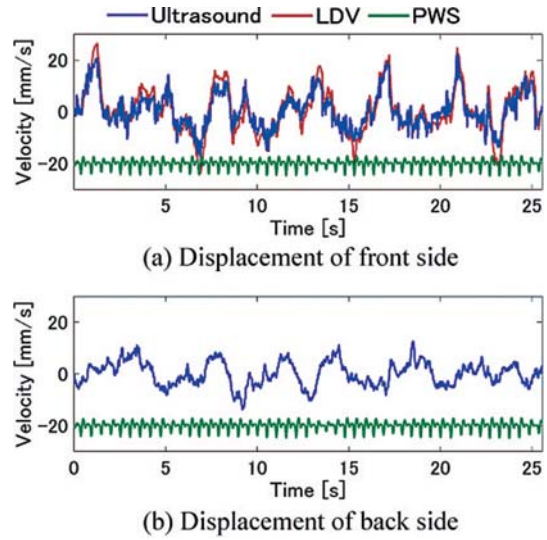


図5 前面および背面の胸部変位

の前方および後方に1台のスピーカと2台のマイクロホンをそれぞれ配置し、40 kHzの超音波を送信し、胸部付近から反射したエコーを受信する。それぞれの方向からの空中音響画像を作成し、高輝度部の変位ベクトルから胸部の変位を計測した。計測した前後方向の変位を図5に示す。同時に計測したレーザードップラー振動計(LDV)の変位と比較しても同様の結果が得られている。しかしながら、体動によると思われる不規則な信号が観測でき、呼吸・心拍による成分は確認することができない。そこで、図5の信号同士の差分をとることで、体動の影響を除去した胸部変位を図6に示す。4sの呼吸の周期を確認でき、その周波数スペクトルからも高調波を含む胸部変位を確認することができる。しかしながら、心拍による胸部変位は確認することができなかった。そこで、呼吸を止めた状態で再度実験を行い、体動の影響を除去した胸部変位を図7に示す。無呼吸時の結果からは心拍による胸部変位を確認することができる。以上のように、被験者の前方および後方から計測した胸部変位から体動の影響を除去することで、立位脱衣状態の被験者の呼吸・心拍を計測することができた。

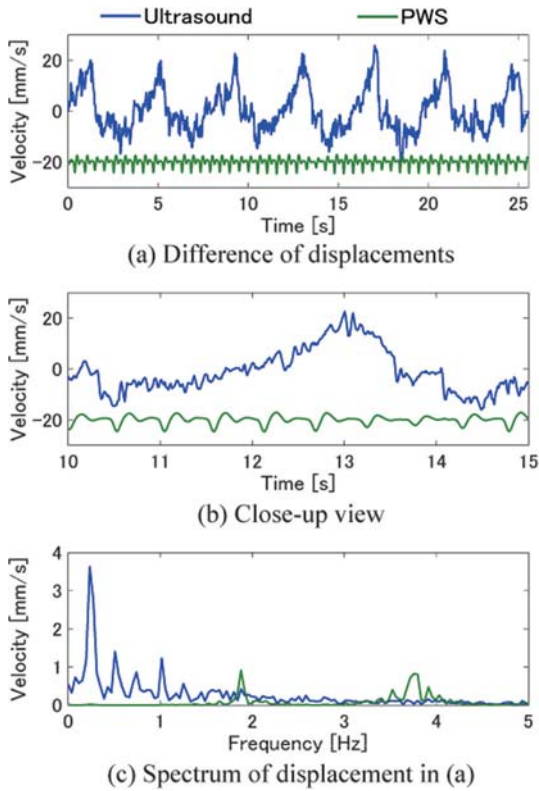


図6 呼吸時に体動の影響を除去した胸部変位とその周波数スペクトル

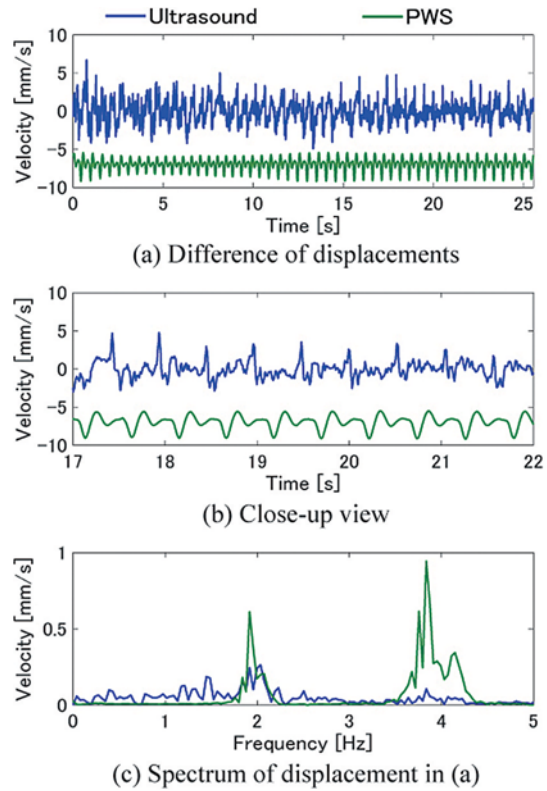


図7 無呼吸時に体動の影響を除去した胸部変位とその周波数スペクトル

[今後の研究の方向, 課題]

本申請研究では、被験者が計測システムの中央に静態している状況での検証を行ったため、変位を計測する反射点の同定が容易であった。今後は実環境での計測を目的として、被験者の体の向きと計測システムの向きが異なる場合の検証や歩行時の計測を可能とするシステムについて検討を行う。また、被験者が複数存在する場合に対しても検証を行う必要がある。

[成果の発表, 論文等]

- [1] 山中航太, 平田慎之介, 蜂屋弘之, M 系列でコード化した LFM 信号を用いた超音波パルス圧縮で作成した空中音響画像の評価, 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 1089-1090, 2016.
- [2] 林泰輝, 平田慎之介, 蜂屋弘之, 空中音響画像を利用した呼吸・心拍による胸部変位の非接触計測, 日本音響学会 2017 年春季研究発表会講演論文集, pp. 1093-1094, 2017.
- [3] 林泰輝, 平田慎之介, 蜂屋弘之, 空中音響画像を用いた呼吸・心拍による体表面の 2 次元変位の非接触計測, 信学技報, Vol. 117, No. 41, pp. 7-12, 2017.