

畜産業のIoT 応用を目指した牛の呼吸・心拍終夜非接触モニタリングシステムの構築

代表研究者 神谷 幸宏 愛知県立大学 情報科学部 准教授
共同研究者 松原 達也 岐阜大学 応用生物科学部 助教

1 はじめに

Internet of Things (IoT) の普及とともに、あらゆる産業分野においてデータを取得・蓄積して解析することで新しい知見を得たり、効率化しようとする試みが進められており、畜産の分野も例外ではない。しかし、畜産業におけるIoTでも、特にデータを取得する対象が動物の場合はIoTの実現が困難である。その理由として第1に、湿度が高くセンサが汚れやすいなど、環境がセンサや電子機器にとって厳しいものであることが挙げられる。本研究が対象とする牛舎の環境では牛の汚物が飛散するなど、電子機器にとってとても厳しい環境が問題となる。また第2に、対象が動物であるためその行動を制御することはできず、必ずしも測定しやすい状態を維持することができないことも挙げられる。たとえば、動物にセンサを取り付け、そのままじっとしていてももらうなどということのはぞめない。センサを直接取り付けることで動物へのストレスとなるばかりでなく、動物に壊されてしまうことになる。

そこで、主として上記の2つの理由から、非接触計測による動物の生体モニタリングへの期待が高まっている。非接触計測とは、その名の通り生体にセンサや電極を直接取り付けることなく物理的に離れたところから行うセンシングである。こうすれば、環境から受けるセンサの汚染はあるものの、動物の体にふれることによる直接的な形態での汚染は避けられる。また動物に直接、接触しないので動物にストレスを与えない。さらには、センサを動物の体に取り付ける手間も必要ない。なぜなら、センサは牛舎のような施設側に設置されているためであり、動物がその施設の中に入れば自動的に測定ができることになる。しかし、動物への実施例はまだ十分に研究されていない。このイメージを図1に示す。

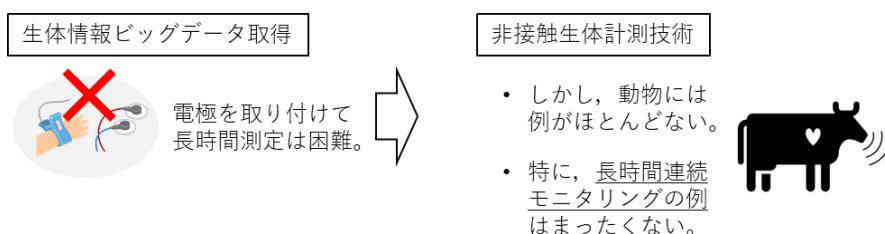


図1 研究の背景

非接触型のセンシングにはいくつかの方法がある。たとえば画像によるモニタリングはその一つである。しかし汚れに弱いことや、呼吸などの生体データの検出を行うのは簡単ではないという問題がある。こうした中で2016年ごろから、非接触で人間や動物の呼吸・心拍の測定ができるマイクロ波を用いたドップラーセンサが安価に市販されるようになった。これを用いて動物のモニタリングの実現可能性が高まったと言える。

以上の背景をもとに、本研究は非接触センサを用いた牛の終夜モニタリングシステムの構築を行う。そして、取得したデータを、従来から広く用いられている離散フーリエ変換 (DFT) に加え研究代表者が提案しているARSなど独自の手法でも分析を行う。また、対象とする動物の管理やデータの評価を獣医師である共同研究者が行い、工学と獣医学の視点から新しい知見の獲得を目指す。のような全体像を図2に示す。

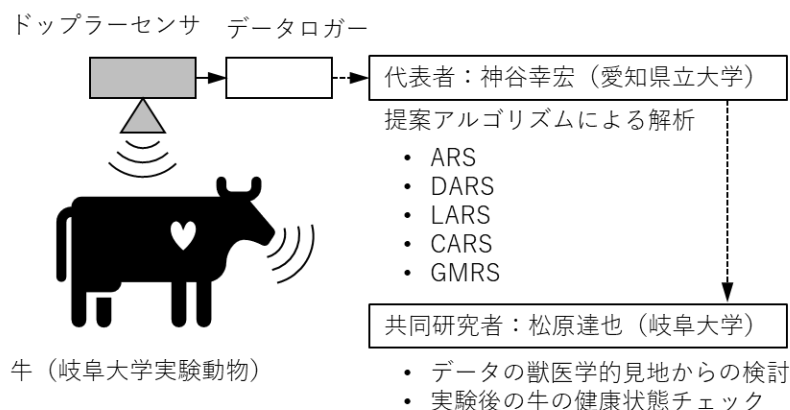


図 2 研究の全体像

2 センサおよびデータ解析

本章においてドップラーセンサによる非接触計測の原理を説明するとともに、本研究で用いるデータ解析手法について述べる。また、IoT の観点から、データ解析に要求される新しいニーズについても触れる。

2-1 ドップラーセンサによる非接触計測

ドップラーセンサは 24 GHz 帯の微弱な電波を放射する機能を持つセンサであり、同時に、生体に反射したマイクロ波を受信する受信機も備えている。この構成を図 3 に示す。受信機は送信した信号と受信した信号の周波数差を検出し、その周波数差に比例した電圧を出力する。この出力をデジタル・アナログ変換器 (Analog-to-digital converter, ADC) を介してサンプリングし、コンピュータでデータ解析を行う。

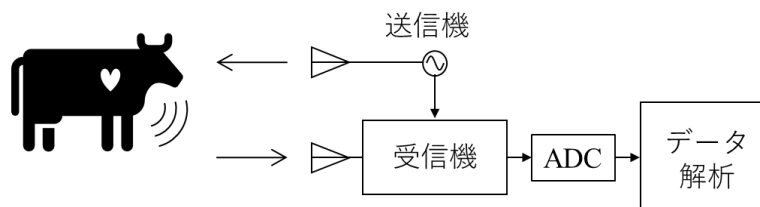


図 3 ドップラーセンサによる非接触センシングの構成

この出力電圧の変化が呼吸や心拍の情報を含んでいるのは次の原理による。すなわち、対象となる動物または人間の呼吸に着目すると、呼吸によって体の膨張と収縮が繰り返される。このとき、わずかながら体表面とセンサの間の距離が変化しており、その変化はマイクロ波にドップラー効果を生じさせる。これによってドップラーセンサ送信波と反射波に、体表面の変位に応じた周波数差が発生する。センサ出力電圧は周波数差に比例しているため、これを解析することで呼吸周期や心拍周期を検出できる。

2-2 データ解析手法

ここでは、本研究で検討するデータ解析の方法について説明する。また、IoT の観点からデータ解析に生じている新しいニーズについても説明し、従来の方法をそのまま適用することの問題を明らかにする。同時に、研究代表者が提案している ARS の利点を説明する。

(1) 離散フーリエ変換 (DFT)

センサ出力電圧を解析するにあたり、様々な手法が考えられるが、もっとも一般的に用いられてきたのが

離散フーリエ変換 (DFT) ^[1]である。DFT を用いることで、その信号を構成する周波数成分の電力を知ることができる。しかし、様々な分野で広く使われる一方で、低い周波数において解像度が低いという問題がある。生体計測において測定対象となる呼吸や心拍は、周波数では 1 Hz 以下の領域が重要となる。こうした低い周波数で DFT によって高い解像度を得ようとするには、非常に多くの信号サンプルが必要となり計算量が大きく、消費電力の増大につながる。また、多数の信号サンプルを取得するのに時間がかかるという問題もある。

(2) ARS

Accumulation for real-time serial-to-parallel converter (ARS) ^[2]は研究代表者によって提案された信号の周期解析法である。これには次のような特徴が挙げられる。

- 足し算のみで構成され、掛け算を含まないので計算量が下げられる。
- 同じ理由から、固定小数点演算による実現が可能であり、低価格・低消費電力のプロセッサで実現が可能である。
- DFT と比較して低い周波数で解像度が高い^[3]。

こうしたことから、特に生体計測を行う IoT システムに適した方法であると考えられる。以下に、ARS の基本原理を示す。

図 4 において、6 サンプルが 1 周期となる周期的な信号のサンプルが 6 つの出力ポートを有するシリアル・パラレル変換器(serial-to-parallel converter, SPC)に入力されている。SPC は内部に出力ポート数と同数のメモリを有しており、1 クロック信号ごとに入力サンプルがそのメモリの中に入れられていく。そして、すべてのメモリがいっぱいになったところで一度にすべてのメモリ内容を入力する。

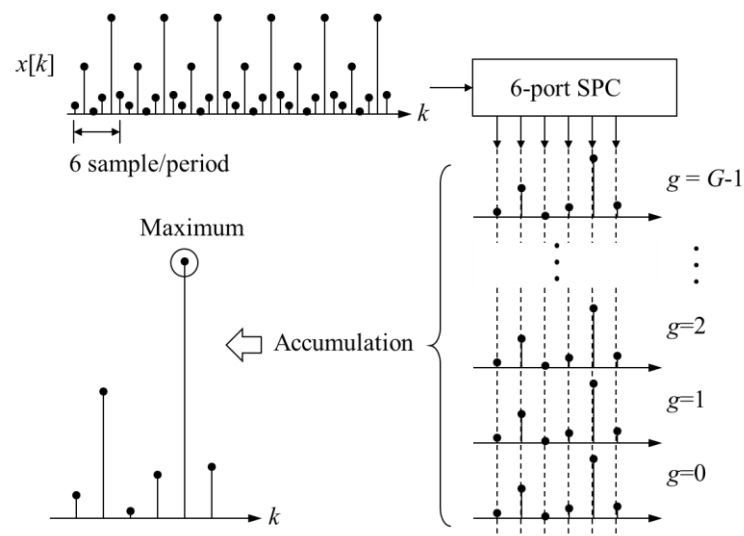


図 4 ARS の基本原理 (1)

このとき、同図では入力サンプルの周期と出力ポート数が等しく 6 となっているため、同じ波形が出力される。これを累積すると、大きな値が得られる。

一方、図 5 は図 4 と同様に見えるが SPC の出力ポート数が 7 となっていて入力サンプル系列の周期とは異なっている。このとき、図 5 に示すように SPC 出力に現れる波形は毎回一致しない。したがって累積しても大きくならない。

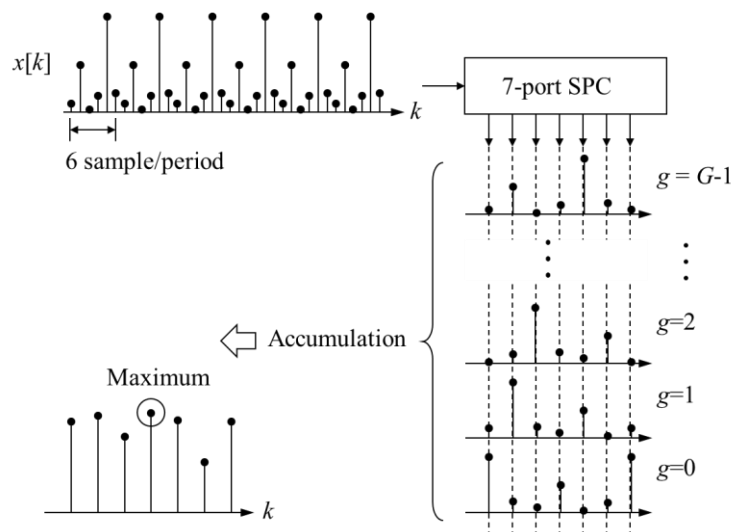


図 5 ARS の原理 (2)

以上に見た原理から、図 6 のような構成を考える。すなわち、出力ポート数が異なる様々な SPC をならべ、それらの出力を累積して最大値を比較する。すべての SPC にわたって比較し、累積結果が最大となる SPC の出力ポート数が入力サンプル系列の周期に等しいため周期推定ができる。

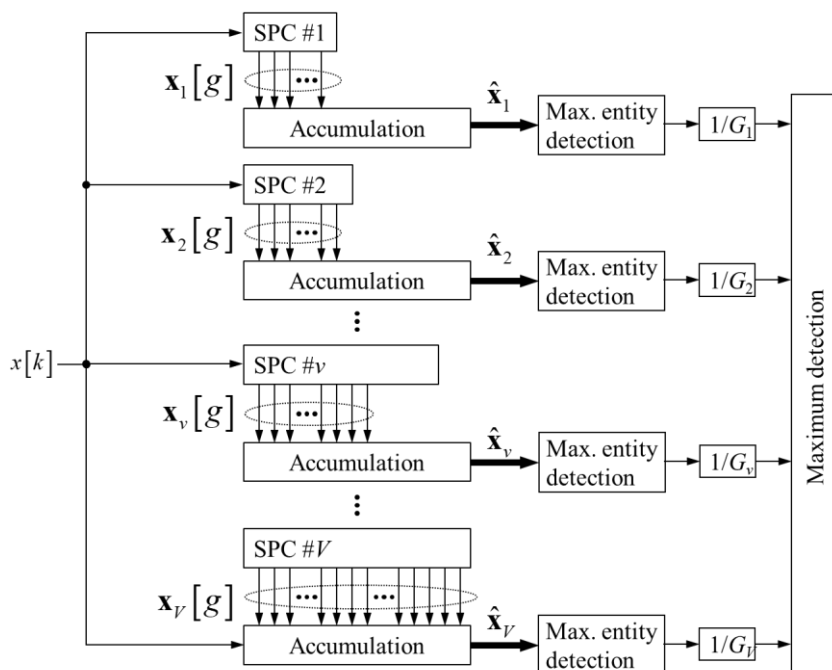


図 6 ARS の全体構成

以上に述べた構成は足し算だけで実現されているのでハードウェアへの負担が小さい。また、固定小数点演算プロセッサで実現が可能である。こうした特徴は安価で低消費電力な IoT システムを作る上で重要となる。

(3) その他

その他に、ARS を基本として、電力差が大きい複数の周期信号の検出に適した Geometric mean for real-time serial-to-parallel converter (GMRS)^[4]、生体計測において体動に強い Correlation of accumulation

for real-time serial-to-parallel converter (CARS)^[5]など多くの派生型アルゴリズムが提案されている。GMRS はARS において実現される SPC 出力の累積のかわりに幾何平均を行うアイデアである。また CARS は SPC 出力の相関を累積していく。

したがって、GMRS や CARS の特徴は ARS の低い計算量を犠牲にして実現されているため、計算量の面ではメリットが得られない。

2-3 本研究が目指す IoT の畜産応用

本研究が目指す畜産分野に応用する IoT システムのイメージを図 7 に示す。今回は、ドップラーセンサと各種データ解析による基本機能の検証として同図 (a) に示す 1 頭の牛の計測を行う。この知見を応用し、多数の牛の計測結果をワイヤレス通信を介して収集するシステムへと発展させる。

この際、ワイヤレス通信のデータ速度は限られているため、ドップラーセンサ出力のサンプルをすべて伝送することは困難である。このようなとき、ARS のような軽量で高性能な信号処理アルゴリズムがセンサノードに搭載されることとなる。すなわち、センサ出力をすべて伝送するのではなく、データ解析結果だけを伝送することでデータ圧縮を図る。

こうした仕組みが将来、牛だけでなく他の動物にも使われることが予想され、大きな波及効果が期待される。

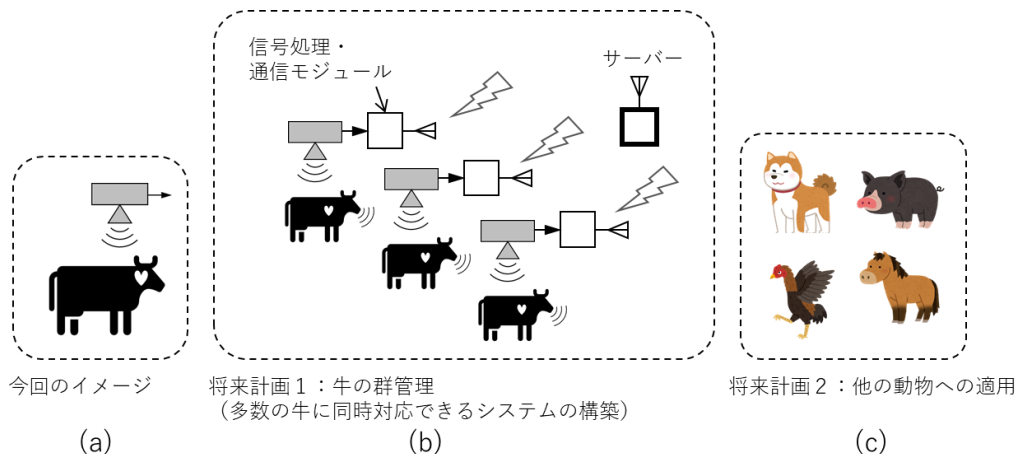


図 7 畜産に応用する IoT システムのイメージ

3 実験結果

本研究において実施した、牛を対象とした終夜非接触モニタリング実験の概要および結果を示す。実験は岐阜大学の実習牛を対象とした。そこで非接触センサとしてドップラーセンサを用い、いくつかの設置条件において 24 時間以上にわたって終夜実験を行った。また、データを長時間にわたって取得するため、ドップラーセンサモジュール周辺回路を独自に開発した。これによってデータロガーを用い、長時間、安定したデータ取得ができる仕組みを構築した。

以下にその構成および結果を示す。

3-1 ドップラーセンサによる終夜計測システムの構築

市販のドップラーセンサシステムには USB でパソコンに接続し、専用のソフトウェアで簡易にデータを取得できるものが多い。しかし、この仕組みでは長時間にわたって連続的にデータを取得することが困難である。これはパソコンの安定性に由来するものであって、パソコンによらない長時間の安定した計測を可能とするシステムが必要となる。

このため本研究ではまず、ドップラーセンサモジュールを購入し、その周辺回路を独自に設計してデータロガーに接続するシステムを構築した。データロガーはもともと、長時間の連続的なデータ取得を行うため

のものであり、安定した動作が期待できる。この構成を図 8 に示す。

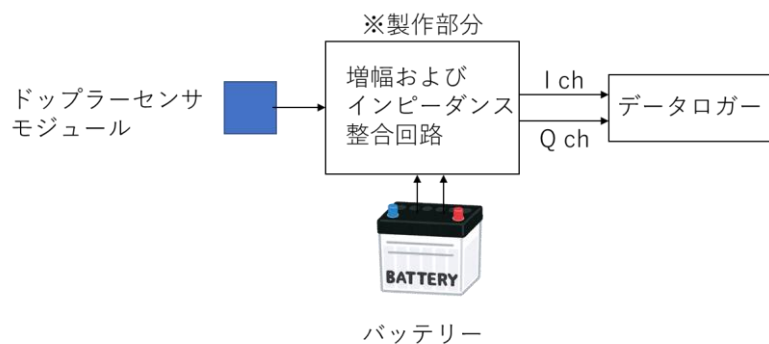


図 8 構築した非接触終夜計測システム

また、その回路図を図 9 に、および外観を図 10 に示す。

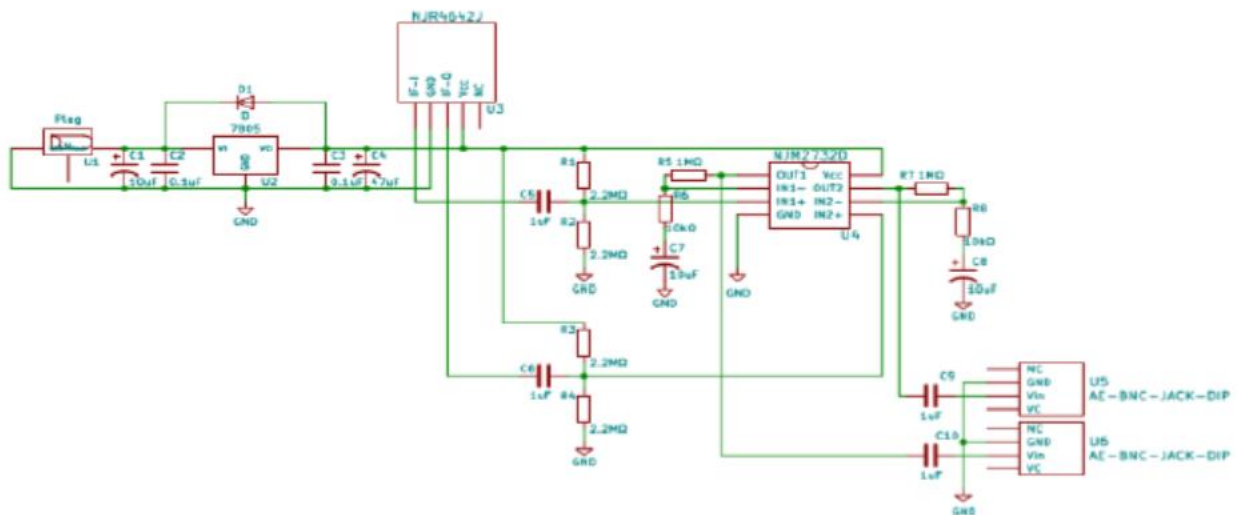


図 9 開発したドップラーセンサ増幅・インピーダンス整合回路

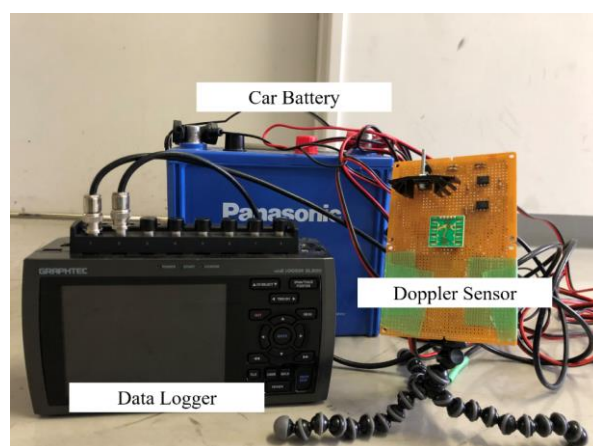


図 10 開発したシステムの外観

3-2 ドップラーセンサによる非接触計測

ドップラーセンサによる非接触計測を行うにあたり、牛の体のどの部分にマイクロ波を照射するかがによ

り取得できるデータが異なる。本研究では様々な方向からの計測を試みたが、そのうち、牛の側面から測定を行い、呼吸の検出を行うと同時に、活動量の計測を行った結果を以下に説明する。センサ設置状況を図 11 に示す。また、実際の設置状況を図 12 に示す。

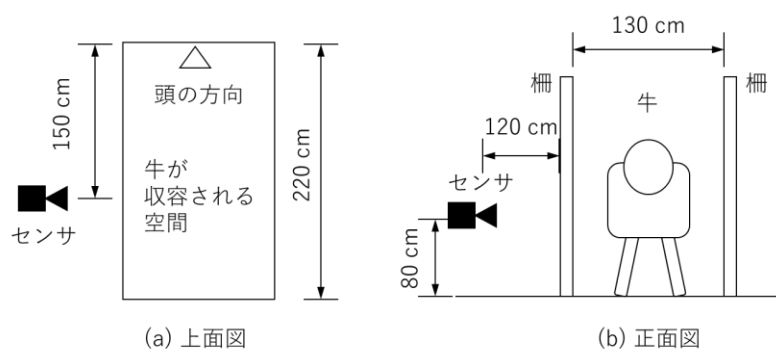


図 11 ドップラーセンサの設置



図 12 センサ設置状況

このような状況で2日間にわたって計測を行った。得られたドップラーセンサ出力を図 13 に示す。ドップラーセンサにより呼吸や心拍が計測できるが、体動もドップラー効果を生じさせるので、全体としては体動や活動量も計測することができる。深夜には活動が低下していることがわかる。

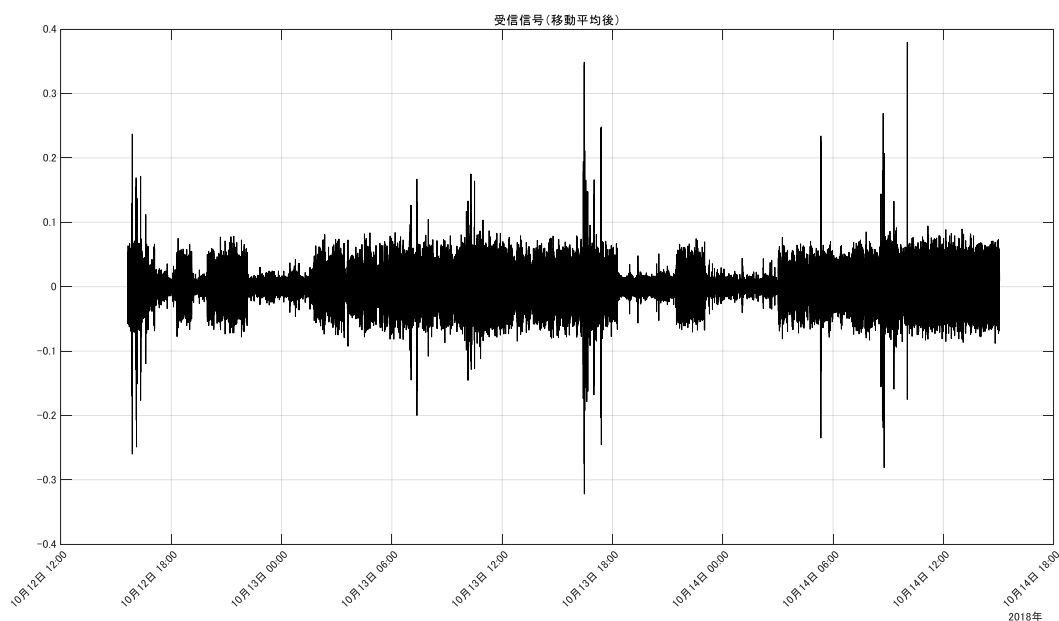


図 13 2 日間の計測で得られたセンサ出力の電力の変化

このうち、活動量が低く寝ていると考えられる 2018/10/13 の 18 時 22 分 24 秒 ～ 21 時 20 分 44 秒のうち、18 時 22 分 24 秒 ～ 18 時 23 分 24 秒について切り出すと、図 14 の波形が得られる。これを ARS および DFT で解析した結果を、それぞれ図 15 および図 16 に示す。

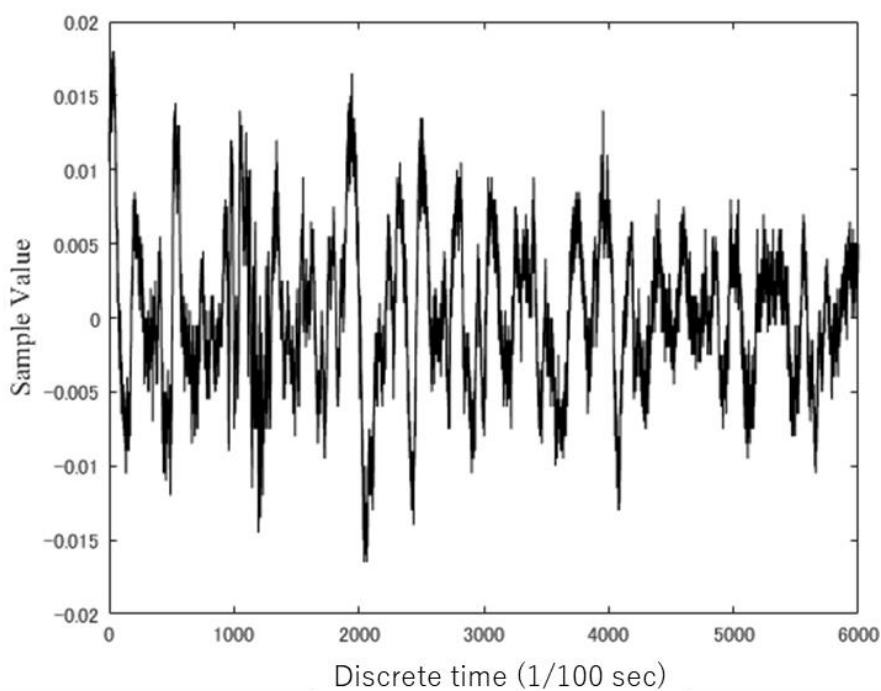


図 14 2018/10/13 18 時 22 分 24 秒 ～ 18 時 23 分 24 秒のドップラーセンサ出力波形

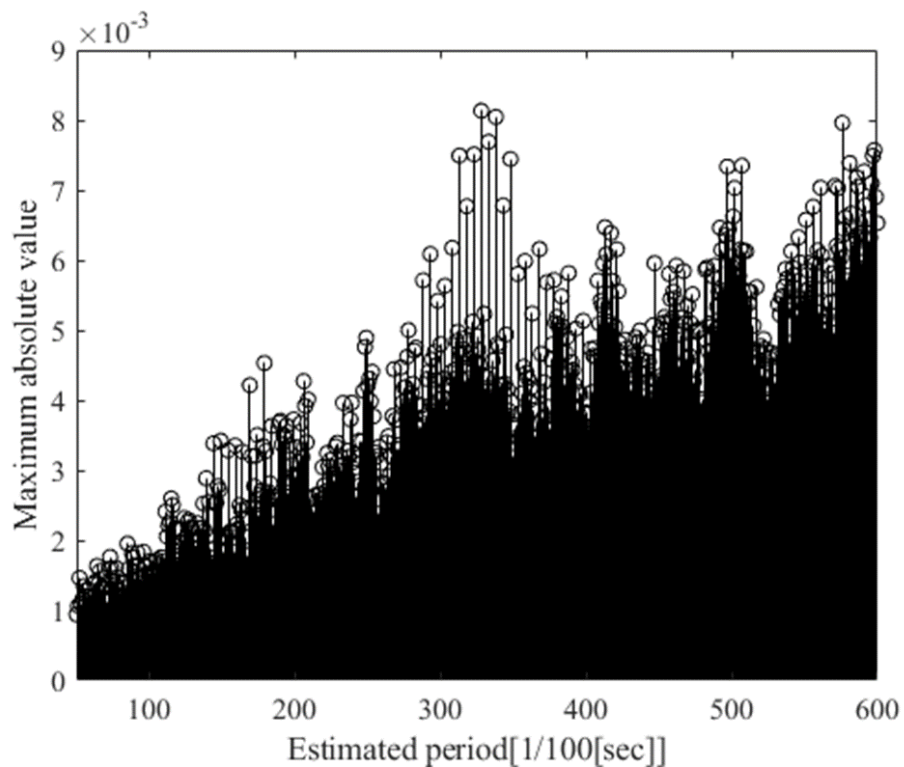


図 15 2018/10/13 18 時 22 分 24 秒 ～ 18 時 23 分 24 秒のドップラーセンサ出力波形の ARS 解析結果

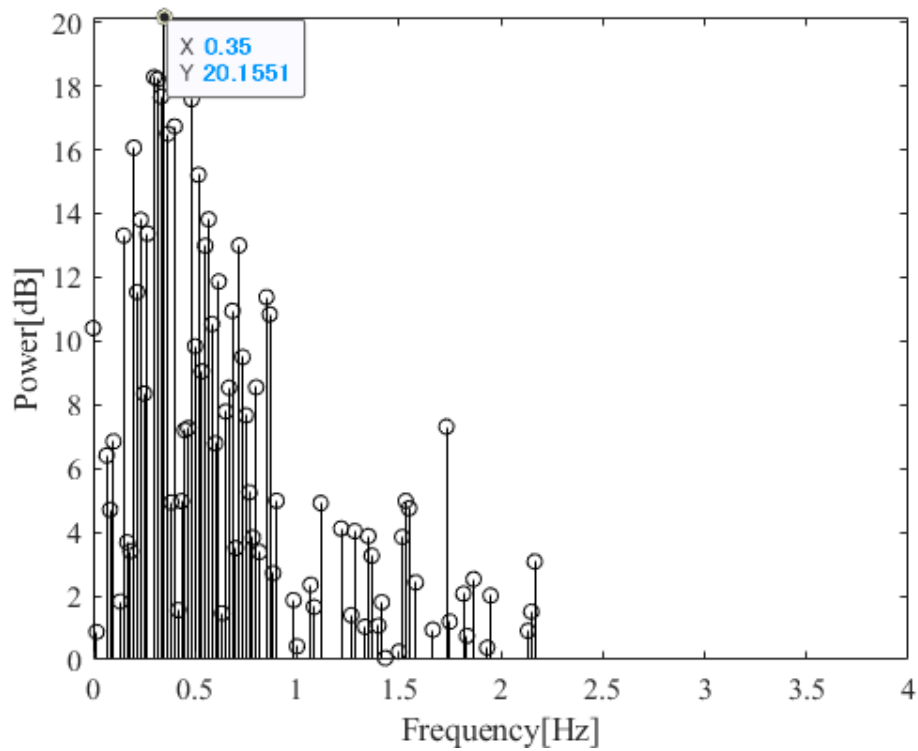


図 16 2018/10/13 18 時 22 分 24 秒 ～ 18 時 23 分 24 秒のドップラーセンサ出力波形の DFT 解析結果

ARS による解析の結果，図 15 から 3 秒付近にピークが現れており，これは成牛の呼吸数とされる「1 分間

に 20 回」^[6]と概ね一致している。また、同じ結果を DFT に入力した際に得られた周波数スペクトルは 0.25 Hz 周辺に高い電力が見られ、これは周期では 2.9 秒となって概ね 3 秒である。ARS で得られた結果とほぼ一致していることがわかる。しかし計算量の点で ARS は DFT に比べ大幅に少ない計算量で同じ結果が得られており、IoT の観点から ARS による計測が望ましいと言える。

4 おわりに

畜産業への IoT 応用を目指し、牛を対象とした非接触終夜モニタリングシステムを構築し、長時間にわたって連続的に計測を行って牛の活動量および呼吸の検出を行った。その結果、周期解析アルゴリズム ARS を用い、DFT の計算量を大幅に削減しながら同等の呼吸検出が可能となることを示した。また、長時間の連続計測に必要なドップラーセンサ周辺回路を製作した。

今回、ドップラーセンサによる計測と同時に、獣医師である共同研究者が血液の採取を行っており、その成分の変化とドップラーセンサで計測した呼吸や体動との関係を明らかにすることで、畜産業への応用の可能性を広げられる可能性があり、現在、発表準備中である。また同時に、今回取得したドップラーセンサ出力信号をデータベース化として公開するよう、現在、作業を進めている。

【参考文献】

- [1] J. G. Proakis and D. K. Manolakis, "Digital Signal Processing", Prentice Hall, 2006.
- [2] Y. Kamiya, "A simple parameter estimation method for periodic signals applicable to vital sensing using Doppler sensors", SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 10, No. 5, pp. 378-384, September 2017.
- [3] R. Takao and Y. Kamiya, "A Performance Evaluation of Periodic Signal Analysis by ARS Compared with Frequency Analysis by FFT", SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration (Printing).
- [4] K. Tsuji and Y. Kamiya, "A Simple Algorithm for Fetal Heartrate Estimation", 2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2018), pp. 248-249, Nara, Japan, October 9-12, 2018.
- [5] S. Imai and Y. Kamiya, "A new signal processing method for vital sensing using a Doppler sensor aiming at reliable sensing under body movement", The 20th IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES'2018), DOI: 10.1109/ICVES.2018.8519507, Madrid, Spain, September 12-14, 2018.
- [6] 「成牛の病気」(社)中央畜産会
http://zookan.lin.gr.jp/kototen/nikuusi/n223_5.htm#:~:text=%E3%81%BE%E3%81%9F%E3%80%81%E6%AD%A3%E5%B8%B8%E3%81%AA%E5%A0%B4%E5%90%88%E3%81%AE,%E3%81%A7%2D10%E5%9B%9E%E3%81%A7%E3%81%99%E3%80%82

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
ドップラーセンサを用いた牛の活動量の終夜計測	計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2019 (SSI2019)	2019 年 11 月
A Simple Algorithm for Fetal Heartrate Estimation	2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2018)	October, 2018
Non-Contact Detection and Measurement Method of Conversation and Mastication using a Doppler sensor	2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2018)	October, 2018