

センサネットワーク技術を用いた放牧中の牛群における 群行動の観察手法への創出

代表研究者
共同研究者

李 根浩
杉野 文章

宮崎大学 工学部 准教授
宮崎県畜産試験場 家畜バイオテク部

1 はじめに

現在、肉用牛の飼育において担い手の高齢化や労働力不足という現状に対して、ICT・IoTなどが導入され作業の効率化や軽労化が取り組まれている。畜産分野のICT・IoT技術では大きく2つの観点から取り組まれている（図1参照）。一つは、モニタリングによる家畜の健康管理である。多くの畜産従事者は、家畜の餌やりや健康状態や体重の管理、へい死の確認などをすべて目視で行っている。しかしながら、大勢いる家畜を数人で確認し、一頭一頭管理するというのには限界がある。そこで、家畜の状態や行動のデータを可視化することによって、家畜の生育状況を推測することや、家畜の健康管理の指標とすることが可能とする[1][2]。もう一方は、畜産設備のオートメーション化である[3][4]。酪農においてそのほとんどの業務は家畜の飼育のための餌やりや施設の清掃やメンテナンスにある。そういった業務は肉体的な負担が大きい。そこで、畜舎の設備を自動で管理し、家畜の管理を補助することや、設備の状態をリアルタイムに把握し必要な業務を低減するというような取り組みがなされている。これにより牛舎内や通信可能な限られた範囲での分娩や発情といった牛の生態観察や子牛への哺乳作業の一部が代替され、畜産従事者の負担の軽減が図られている。その一方で、飼料の生産・給与や排せつ物処理等の省力化が期待できる放牧という広範囲での家畜管理方法がある。

放牧は現在、宮崎県や県内の生産者団体が畜産農家や地域住民の理解の醸成と啓発に努めるとともに、放牧技術の普及・高度化やそのための人材育成を推進されている。加えて、低コスト化や省力化、耕作放棄地等の再生利用が可能な放牧技術が見直され、農林水産省においても推進されている。しかしながら、放牧場においては、牛舎内のような通信環境が整った場所は少なく、通信や視覚化に必要なインフラの整備が十分でない場合が多い。また、牛は集団で生活する動物であり、牛同士の関係性の把握は放牧時においても必要不可欠である。

そこで、これらの問題を解決するために、敷地などにより行動が制限される牛舎とは異なり、自由に行動する放牧環境下での牛群の行動に着目し、牛同士の関係性や健康状態をモニタリングする手法の創出に挑戦する。具体的には、図2に示した概念のように、インフラが不要な通信手段であるモバイルセンサネットワークを用い、放牧牛における群行動の可視化を目指す[5]–[9]。

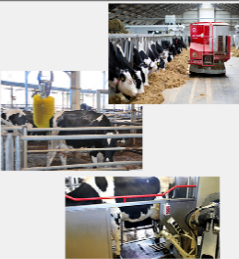
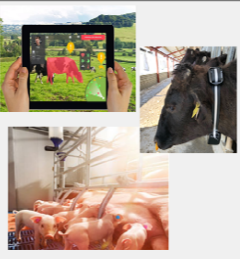
	IoTベースの 農場の自動化	IoTベースの 家畜のモニタリング
例		
特徴	1) 自動運転 リアルタイム管理 2) 畜産農家の負担の減少	収集されたデータは成長を推定するために視覚化され、家畜の健康管理を容易にするための指標として使用される → 管理の容易な家畜

図1 畜産分野へのICT・IoT技術の導入方法

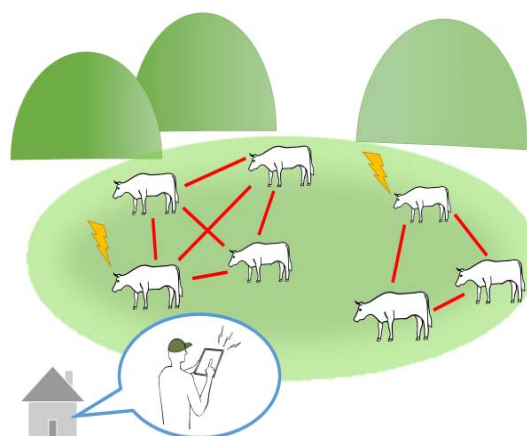


図2 放牧管理の概念図

2 無線センサタグ機器の開発

既製品であるファームノートのネックベルト式発情検知タグは既に普及しており，生存期間を短縮するような報告はない．そのため，私たちはこれを模倣し，牛にストレスを与えないようなネックベルト式の無線センサタグ機器の開発を行う（図 3 参照）．開発した無線センサタグ機器の大きさは縦 75mm，横 100mm，高さ 55mm である．これを動作させるのに必要な電力と消耗を考慮し，測定期間は 3 日間を想定している．

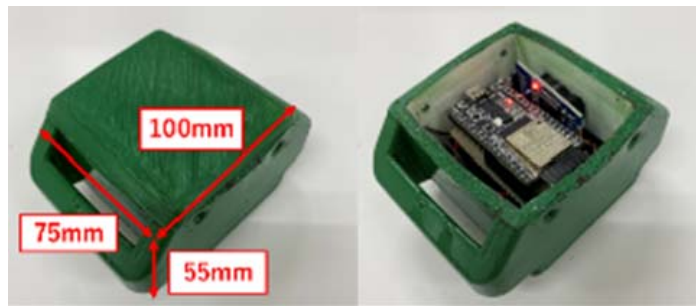


図 3 無線センサタグ機器

無線センサタグ機器には ESP32divskitC の通信モジュールを用いる．図 4 に示すように，送信するデータ全体の packets は以下のようにになっている．また，4MB のフラッシュメモリと 2.4GHz 帯のアンテナが搭載されている（図 5 参照）．実験に使用する無線規格は Wi-Fi : 802.11b/g/n であり，周波数帯域は 2.4GHz から 2.5GHz である．電波強度の計測したデータを保存するために，通信モジュールにマイクロ SD カードスロットシールドを取りつける．これを用いてネットワークを構築し，サーバーとの通信状態の確認を行う．

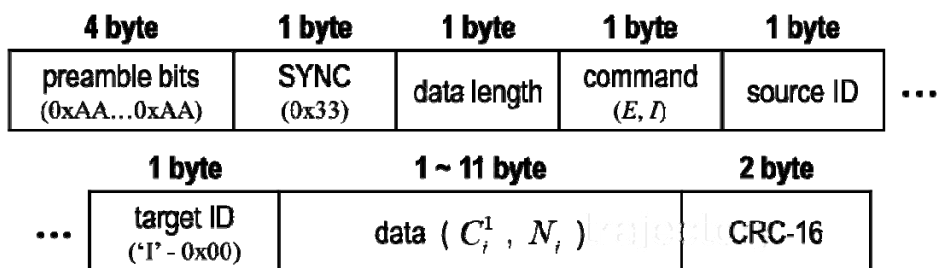


図 4 通信用の packets 構造

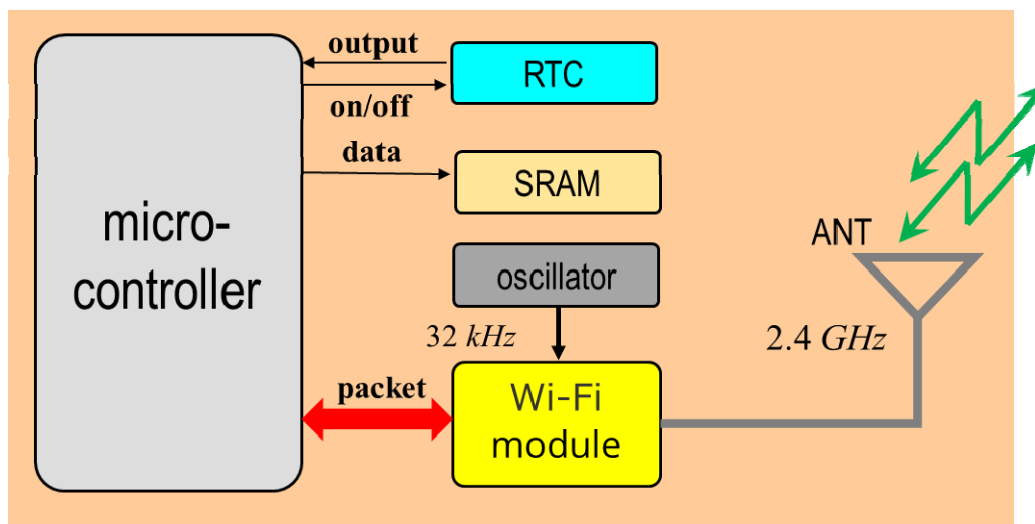


図 5 開発した無線センサタグ機器の制御構造

開発した無線センサタグ機器の送受信できる電波強度は距離に応じて減衰する．そこで，図 6 に示すように，電波強度における減衰を明らかにするために，大学にて基礎実験を行った．図 7 の左は 1m 間を 10cm 間隔で離れたときの短距離における計測データであり，図 7 の右は 50m 間を 1m 間隔で離れたときの長距離における計測データである．図 7 の左の計測データに示すように，短距離での電波強度はサーバーまでの距離に比例して低下した．また，図 7 の右の計測データではサーバーまでの距離が長くなるにつれ電波強度の大きさは指数的減衰をしている傾向があった．この基礎実験の結果により，無線センサタグ機器の個体差を考慮して，通信の有効範囲は 35m と定義した．

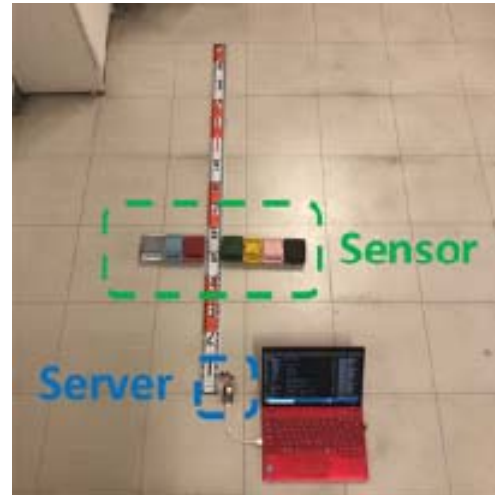


図 6 基礎実験

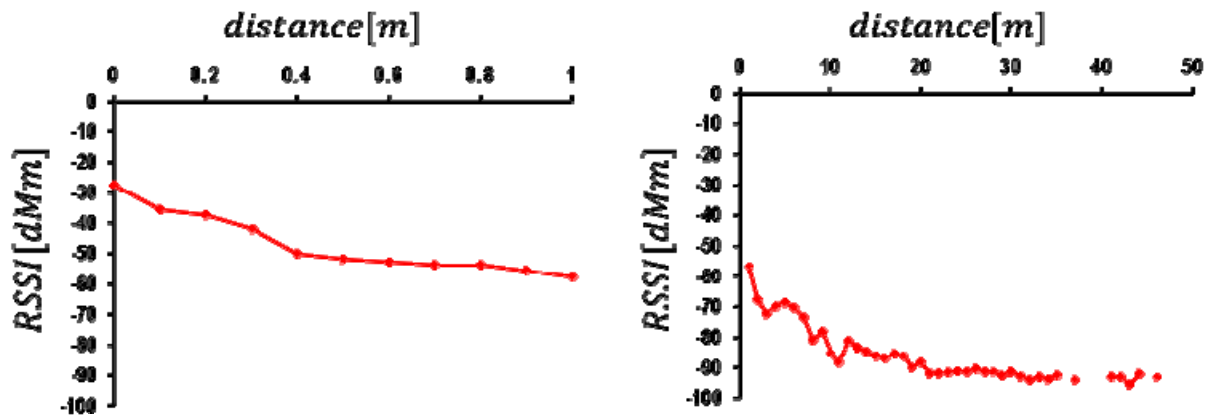


図 7 距離に応じた電波強度の変化

3 センサネットワークのアルゴリズム構築

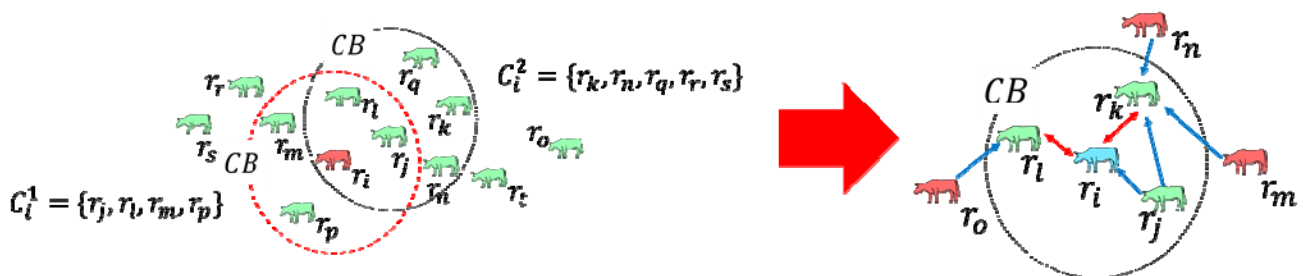


図 8 提案するセンサネットワークのアルゴリズムの概念図

提案するアルゴリズムは、牛のような自由に動くセンサノード（簡単に、ノード）に対し、各ノードが接続の変化に適応した動的ネットワークを構築することを可能にする．具体的には、各ノードが生成する送受信可能なローカルネットワークを結びつけることで、グローバルネットワークへの拡大が可能であるということである．

これから図 8 を用いて、提案するアルゴリズムの詳細を説明する．任意のセンサノード r_i は自身の通信範囲内(CB)の他のセンサノード r_j に対してメッセージを送信する．そして r_j は r_i に ID を返し、 r_i はその情報を元に、ローカルネットワークを構築するための特定のセンサノードを選択する．このとき返信したセンサノードの ID を 1-Hop のセンサノードの集合 C_i^1 に追加する． C_i^1 に含まれる r_j に対して、 r_j の C_i^1 である C_j^1 を要求し、 C_i^1 を更新する（図 9-(a) 参照）．更新した C_i^1 と C_j^1 を用いて、2-Hop となるセンサの集合 $C_i^2(= \cup C_j^1 - C_i^1 - r_i)$ を求める． C_i^2 を求めることにより、1-Hop と 2-Hop のネットワーク状況を求める．特定のセンサノードの選択方法は C_i^1 の中で最も多いセンサノードをネイバーとして定義し、 N_i へ追加する（図 9-(b) 参照）．その後、 C_i^2 により選択されたセンサの候補が含まれる C_i^2 を削除する．これを $C_i^2 = \emptyset$ となるまで削除と更新を繰り返し行う．これらの演算を行うことで $N_i = \{r_k, r_l\}$ となり、 N_i 間で情報交換（図 9-(c) 参照）を行うことで、 r_i 特有のローカルネットワークが構築される．

Algorithm 1: Local Distribution Acquisition	Algorithm 2: Neighbor Determination	Algorithm 3: Local Network Construction & Maintenance
Input : (msg_q from r_q, t_{iq}, w_i) <pre> 1 if (new msg_q or msg_q with $t_{iq} \leq w_i$) then 2 $C_{i,k}^1 \leftarrow C_{i,k-1}^1 \cup \{r_q\}$ 3 if ($msg_q = C_{q,k}^1$) then 4 $(\bigcup_{j \in C_{i,k}^1} C_{j,k}^1) \leftarrow (\bigcup_{j \in C_{i,k-1}^1} C_{j,k-1}^1) \cup C_{q,k}^1$ 5 $C_{i,k}^2 \leftarrow (\bigcup_{j \in C_{i,k}^1} C_{j,k}^1) - C_{i,k}^1 - \{r_i\}$ 6 else if ($msg_q \neq C_{q,k}^1$) then 7 $(\bigcup_{j \in C_{i,k}^1} C_{j,k}^1) \leftarrow (\bigcup_{j \in C_{i,k-1}^1} C_{j,k-1}^1)$ 8 $C_{i,k}^2 \leftarrow C_{i,k-1}^2$ 9 else if (no msg_q within w_i) then 10 $C_{i,k}^1 \leftarrow C_{i,k-1}^1 - \{r_q\}$ 11 $(\bigcup_{j \in C_{i,k}^1} C_{j,k}^1) \leftarrow (\bigcup_{j \in C_{i,k-1}^1} C_{j,k-1}^1)$ 12 $C_{i,k}^2 \leftarrow (\bigcup_{j \in C_{i,k}^1} C_{j,k}^1) - C_{i,k}^1 - \{r_i\}$ Output: ($C_{i,k}^1$, $C_{i,k}^2$) </pre>	Input : $C_{i,k}^1$ & $C_{i,k}^2$ <pre> 1 $C_i^1 \leftarrow C_{i,k}^1$; $C_i^2 \leftarrow C_{i,k}^2$ 2 $N_{i,k} \leftarrow N_{i,k-1}$; $j \leftarrow 1$ 3 while ($C_i^2 \neq \emptyset$) do 4 $f_{i,12} = C_i^1 \rightarrow C_i^2$; $f_{i,21} = C_i^2 \rightarrow C_i^1$; 5 $r_{n,j} \leftarrow \max_{r \in C_i^2} [dim(f_{i,21}(r))]$ 6 $C_i^1 \leftarrow C_i^1 - \{r_{n,j}\}$ 7 $C_i^2 \leftarrow C_i^2 - \{f_{i,12}(r_{n,j})\}$ 8 $N_{i,k} \leftarrow N_{i,k} \cup \{r_{n,j}\}$ 9 $j \leftarrow j + 1$ Output: $N_{i,k}$ </pre>	Input : $N_{i,k} = \{r_s \mid 1 \leq j \leq n\}$ <pre> 1 $r_s \leftarrow random(N_{i,k}, 1)$ 2 if ($dim(N_{i,k}) - dim(N_{i,k-1}) = 1$) then 3 $r_s \leftarrow dist(N_{i,k}, r_s)$ 4 for ($q \leftarrow 1$ to n) do 5 $r_{s,q} \leftarrow N_{i,k} - \{r_s\}$; $j \leftarrow 1$ 6 $v \leftarrow r_s \cup \{r_{s,q}\}$; $dim_v \leftarrow dim(r_s)$ 7 $j \leftarrow j + 1$ Output: $z_{i,j} = \{z_{i,j}^1, z_{i,j}^2\}$ </pre>
(a)	(b)	(c)

図 9 提案するアルゴリズムの詳細

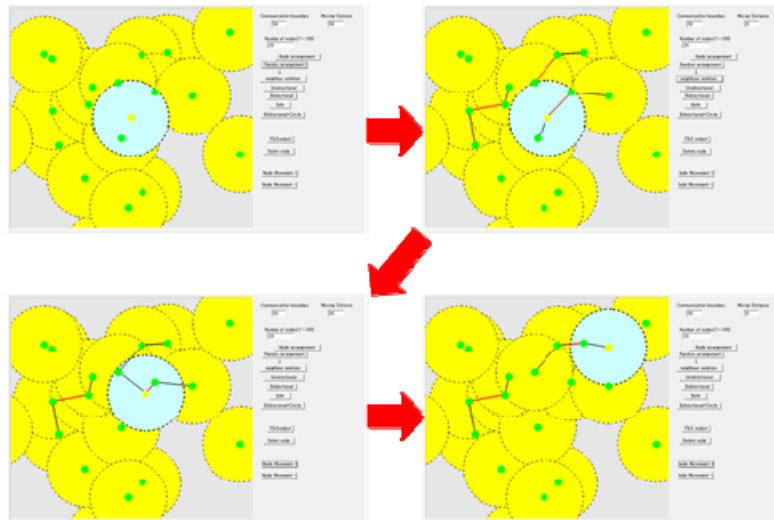


図 10 移動しながらのローカルネットワーク構築シミュレーション結果

図 10 は多数のセンサノードが配置された環境下で、その中の r_i が移動しながらローカルネットワークを構築するシミュレーション結果である。黄色の点と青い円はそれぞれ r_j とその CB を表している。赤い線はネットワーク構築後に特定のセンサノードと接続された状態を示している。青い円内の特定のセンサノードも同様に r_j と接続させることで、全体的なメッシュネットワークを構築できることを確認した。図 11 は CB を拡大した際の検知可能なセンサノードの個数(= $n(C_i^l)$)と特定のセンサノードの個数(= $n(N_i)$)を示している。この結果から、 CB を拡大させた際も選択される N_i の数は変わらず、接続性のあるネットワークが構築できるという有効性を検証した。

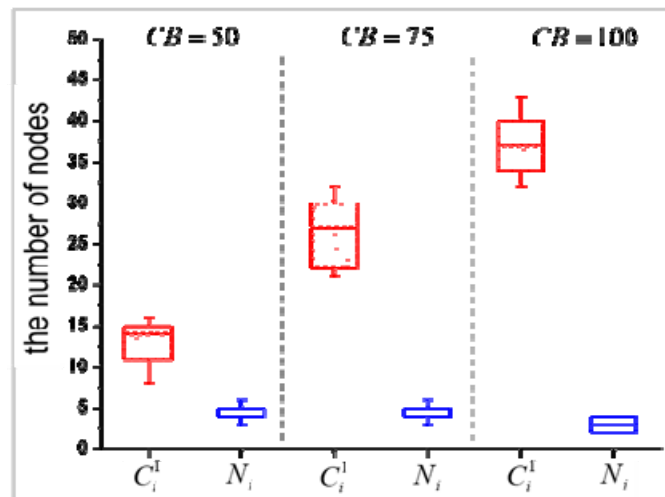


図 11 CB を拡大した際のノード数の変化を示した実験結果

4 無線センサタグ機器を用いたネットワークの基礎実験

無線センサタグ機器を用いて実際にセンサネットワークが構築されているかの確認するために基礎実験を行った。防疫関係規則や畜産試験場担当者の指示に従い、無線センサタグ機器を牛5頭の首に取り付ける(図 12 参照)。図 13 は、牛群と固定したサーバーによるネットワーク構成を示している。図 13 の上下それぞれの左側は実験様子を示し、右側はローカルネットワーク構成の状態である。実験から、提案するアルゴリズムにより、サーバーを基準とするローカルネットワークの構築とそれぞれの牛に取り付けられた無線センサタグ機器同士との接続を確認した。



図 12 無線センサタグ機器の取り付けの様子

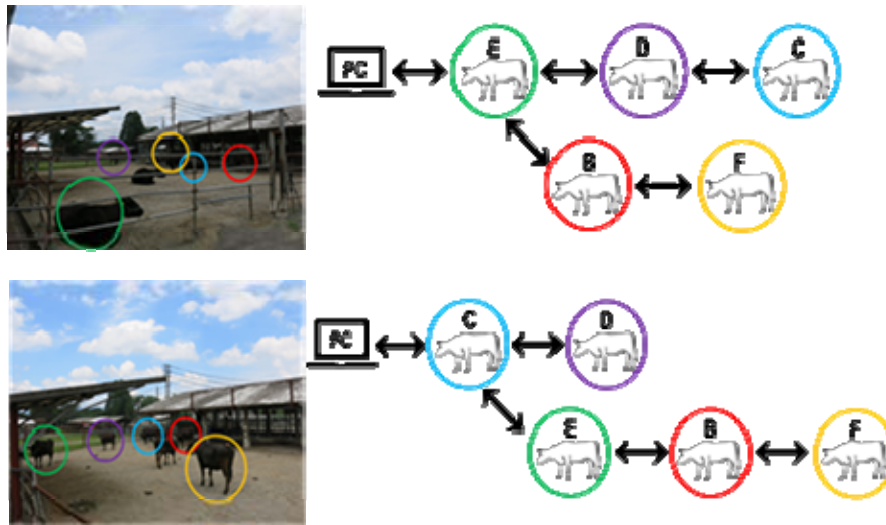


図 13 牛群とサーバーによるネットワーク構成の結果

5 牛同士の動作とネットワーク構築

群行動に対応するようにネットワーク構築が変化しているか確認するために検証実験を行い，群行動の一部とネットワーク構築の比較を行った．図 14 に示す群行動の様子としては緑の円で囲った牛が黄の牛のそばを通り，赤の牛に近づく様子を示している．図 15 は緑の円で囲った牛を基準とした群行動時のネットワーク構築と電波強度の変化を示している．赤色になっているところは，牛同士が近いことを表しており，指標として 2 章で述べた基礎実験から， $-30 \sim -60$ の電波強度と定義した．群行動の一部とネットワーク構築の比較により，特定の牛を基準のネットワーク構築と群行動に対応するようにネットワーク構築が変化していることを確認した．



図 14 群行動の様子（1 頭が群れの中を移動している様子）

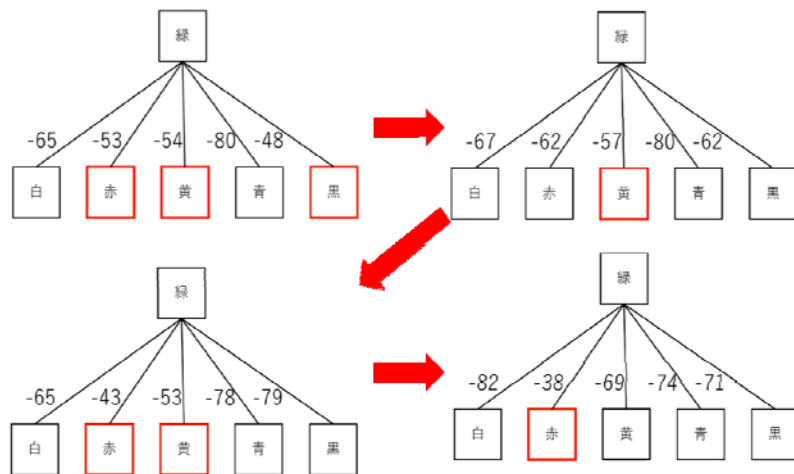


図 15 群行動時のネットワーク構築の変化

5 宮崎畜産試験場での放牧を想定した検証実験

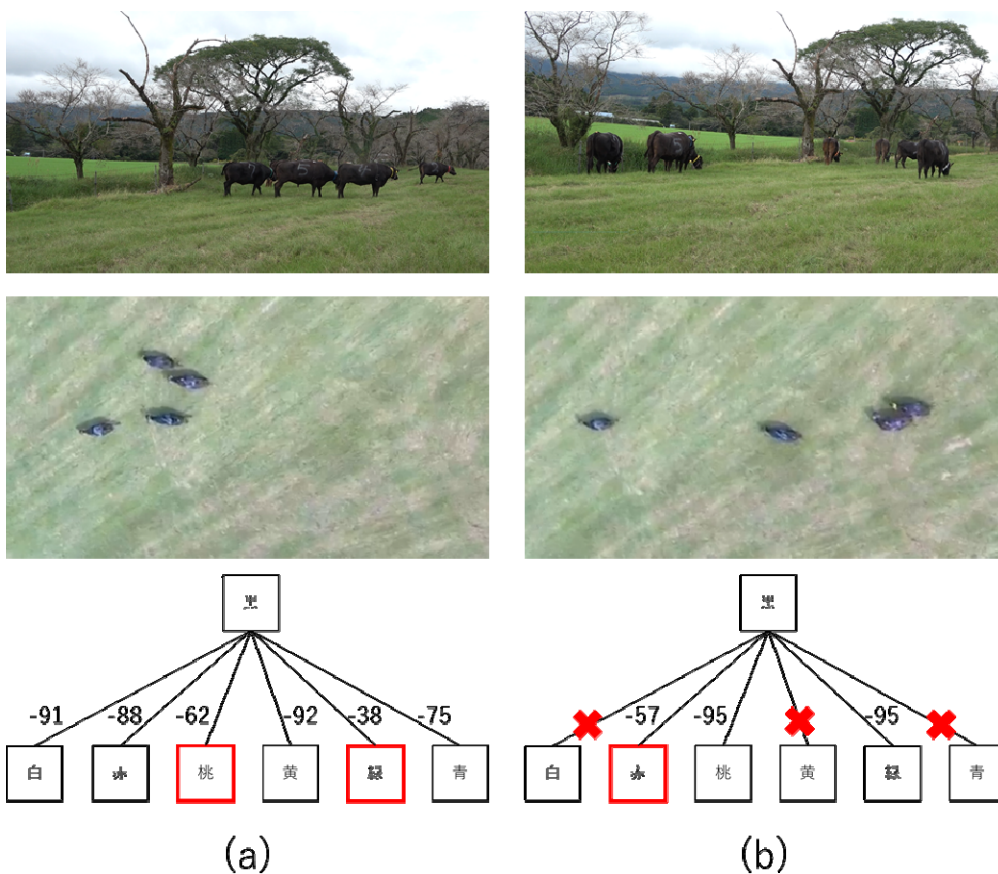


図 17 放牧牛の群行動の様子

10頭の放牧牛に無線センサタグ機器を取り付け放牧環境での実地実験を行った。放牧場の広さは約1haある。放牧牛は上下関係や発情兆候により、2頭の牛が近寄って行動し、または複数のグループに分裂する。図17は複数の群れが統合した状態から分裂した時の様子とネットワークの構成である。図17-(a)では複数の群れが統合した時、基礎実験により定義した通信の有効範囲の牛の中から2頭のネイバーが選択されていることを確認した。図17-(b)はその後複数の群れに分裂した時、元のネットワークは切断され、また別の牛がネイバーとして選択された。このことから接続性のあるネットワークの構築と再構築を表現できた。

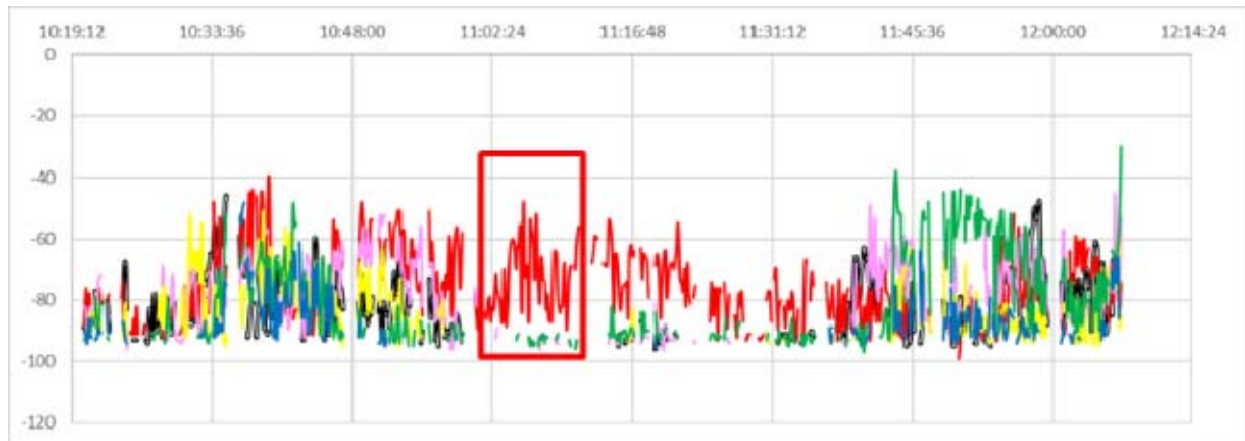


図 18 2頭が牛群から離れた際の電波強度の変化

図18に示すグラフは、群れから2頭の牛が離れて行動した際の片方の牛に取り付けたセンサに受信された電波強度の計測データである。一緒に群れから離れていった牛の電波強度は赤を示しており、グラフの一定区間赤が大きい電波強度が計測された。また、赤の四角で囲まれた部分は親和行動の1つである相舐め行動をした時の電波強度を示している。このことから、放牧環境での親和行動や群れから分裂した際も、各牛の距離におけるネットワークが電波強度を用いて再現できていることを確認した。

6 まとめ

これまでの研究結果から、各牛に取付けた無線センサタグ機器による電波強度によるネットワークを構築してきた。距離に応じた電波強度を明確にすることで、ネットワークの再構築を表現できる。これにより放牧牛群の分裂や統合の様子を結び着けた。以上により本研究では放牧牛群から優劣関係や健康状態をモニタリングする牛群の動作モデルを創出した。従って、提案する手法により、大規模な放牧環境での逐次的に牛の上下関係やけがなどの孤立した状態などをモニタリングすることを可能にし、農家の労力負担の軽減や生産性の向上へ繋がることを期待する。

【参考文献】

- [1] 木村誠, “家畜飼養管理における自動化技術” 農林水産技術研究ジャーナル, 12 巻, 12 号, pp. 27-32, 1989.
- [2] 新出陽三, “群管理と搾乳の自動化” 日本家畜管理研究会誌, 29 巻, supplement 号, pp. 39-46, 1993.
- [3] 鈴木亨, 吉永有一, 宮田正文, 木村彰一, 勝田賢, “赤外線サーモグラフィを用いた子牛の健康管理システムの開発” 農研機構研究報告 動物衛生研究部門, 第 124 号, pp. 33-37, 2018.
- [4] 谷原礼論, “畜産現場への ICT 導入—和牛繁殖管理システムの開発—” 新近畿中国四国農業研究, 第 1 号, pp. 68-70, 2018.
- [5] J. K. Park and E. Y. Park, “Monitoring method of movement of grazing cows using cloud-based system”, ECTI Transactions on Computer and Information Technology, Vol.15, No.1, pp.24-33, 2021.
- [6] F. Zhou, R. Q. Hu, Z. Li, and Y. Wang, “Mobile edge computing in unmanned aerial vehicle networks”, IEEE Wireless Communications, Vol.27, No.1, pp.140-146, 2020.
- [7] S. Muhammad, N. Mohammad, A. Bashar, and M.A. Khan: “Designing human assisted wireless sensor and robot networks using probabilistic model checking”, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.94, pp. 687-709, 2019.
- [8] R. Kazala, A. Taneva, M. Petrov, S. Penkov: “Wireless network for mobile robot applications”, IFAC PapersOnLine, Vol.48, pp.231-236, 2015.
- [9] H. C. H. Chiu and W.-M. Shen, “ANCHOR - selfconfiguring robotic network”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.5375-5380, 2011.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
High-degree connectivity-based swarm communication framework: application to a herd of pastured cattle	Proc. International Symposium on Advanced Technologies and Applications in the Internet of Things	2021 年 8 月 24 日
Communication-path generation for adaptable self-organized sensor networks	Proc. JSME International Conference on Design and Concurrent Engineering 2021 & Manufacturing Systems Conference 2021	2021 年 9 月 3 日
Monitoring a herd of pastured cattle using mobile sensor networks	Proc. the 8th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2021	2021 年 9 月 8 日
近接通信を用いたモバイル・ネットワークの構築手法	日本機械学会 2021 年度年次大会	2021 年 9 月 7 日
放牧牛群の行動観察を目的としたモバイルネットワーク構築手法の提案	火の国情報シンポジウム 2022	2022 年 3 月 1 日