

## ノード間の接続性を考慮した電波強度に基づく放牧牛の位置推定

## Localization of Grazing Cattle Based on RSSI Considering Connectivity between Nodes

若菜 理志<sup>†1</sup> 大川 剛直<sup>†1</sup> 太田 能<sup>†2</sup> 大山 憲二<sup>†3</sup>  
 Satoshi Wakana Takenao Ohkawa Chikara Ohta Kenji Oyama

## 1. はじめに

近年、畜産分野において、従事者の高齢化や、後継者不足を始めとした多くの問題が生じている。これらを解決するために、情報技術を用いて従事者の負担を軽減することが重要視されている。我々の研究グループでは、放牧飼育された繁殖牛を対象として、発情や疾病などを要因として牛の行動に変化が生じた際に、他の牛との関係性に何らかの変化が現れる[1][2]ことに着目、その行動の変化を捉えることによって異常状態を自動検知する方法について研究を進めている[3]。

牛同士の関係を調べるにあたって、まずは個々の牛をトラッキングすることが有用と考えられる。トラッキングとは、動物などの移動体に対し、その位置を連続的に捉え、時刻と牛の位置情報に対応させることにより、移動経路を把握することである。Global Pointing System (GPS) デバイスを取り付けることによればこのことは実現できるものの、一般に GPS は消費電力が大きく、頻繁にバッテリーを交換する必要が生じるために、農業従事者にとっては人的負担と費用的負担となる。そこで、長期間バッテリー交換が不要な省電力無線を用いた位置推定手法の開発が行われてきた。

文献 [3] では、放牧牛に無線発信機（具体的には、Bluetooth Low Energy (BLE) タグ）を取り付け、そのタグから定期的に発信されるビーコン信号を放牧場周辺に固定設置したレシーバで受信し、その受信電力強度 (Received Signal Strength Indicator: RSSI) でもって牛の位置を推定することが試みられている。しかしながら、位置推定には複数のレシーバでビーコン信号を受信する必要があり、レシーバを多数設置する必要があった。また、通信距離に制約のある省電力無線では、広大な放牧場に適用できないという問題があった。

そこで本研究では、牛に装着する無線発信機が送信するビーコン信号を互いに受信できるようにし、その際の RSSI も利用することでこれらの問題を解決することを試みる。なお、本研究では、固定設置されその位置が基地であるレシーバをアンカーノード、牛に装着する無線機をモバイルノードと呼ぶことにする。

一般的には、ノード間の無線信号の強度からその距離が推定できるため、3 つ以上のアンカーノードからの距離が取得できる場合、モバイルノードの位置推定が可能となる。

<sup>†1</sup> 神戸大学大学院システム情報学研究科 Graduate School of System Informatics, Kobe University

<sup>†2</sup> 神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科 Graduate School of Science, Technology and Innovation, Kobe University

<sup>†3</sup> 神戸大学大学院農学研究科附属食資源教育研究センター Food Resources Education and Research Center, Kobe University

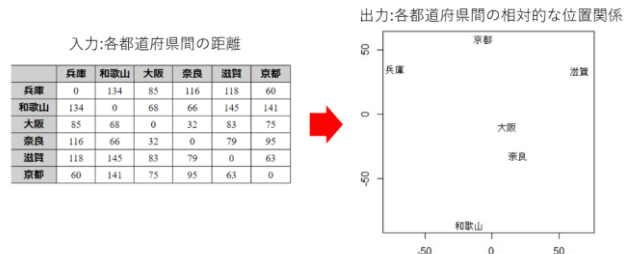


図 1 MDS による入出力の例

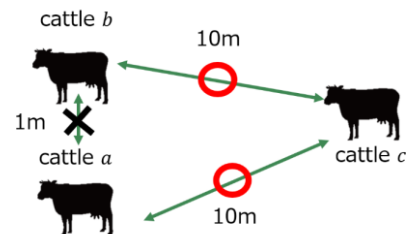


図 2 最短経路の近似によって誤差が生じる例

しかし、アンカーノードとの距離が通信可能距離を超えている場合やノード間に遮蔽物が存在している場合に直接電波が取得できない。本稿ではこの現象を欠損と定義する。

欠損が生じるような状況でも、モバイルノードの位置を順に推定していく操作を繰り返すことで、位置推定の精度を高める方法を考える。このような手法は数多提案されているが[4][5][6]、中でも、RI-MDS (RSSI-based Iterative-MDS) は実験環境による誤差の影響を削減できるといった利点がある[7]。しかし、RI-MDS においてノード間の電波強度に欠損が生じた際に、位置推定の精度が低下するといった問題点がある。そこで、既存手法である RI-MDS を基に、ノードを適切に分割するといったアイデアを取り入れることで、可能な限り欠損の影響を削減し、位置推定の誤差を小さくすることを試みる。本稿では、このアイデアを取り入れた提案手法を、接続性を考慮した区分的 RI-MDS と称する。また、本稿では提案手法を、モバイルノードである放牧牛の位置推定に適用するために、実験対象の放牧場に設置したレシーバをアンカーノードとして使用する。

## 2. RSSI を用いた多次元尺度構成法による定位

## 2.1 多次元尺度構成法

提案手法の元となる多次元尺度構成法 (Multi-Dimensional Scaling: MDS) [8]について説明する。N 個のノードがあり、各ノード間の関係が既知であるが、全体としての関係が未知の場合に MDS を用いることによって、ノード全体としての関係を把握することが可能になる。その例を図 1 に示す。各都道府県を位置推定対象のノードとし

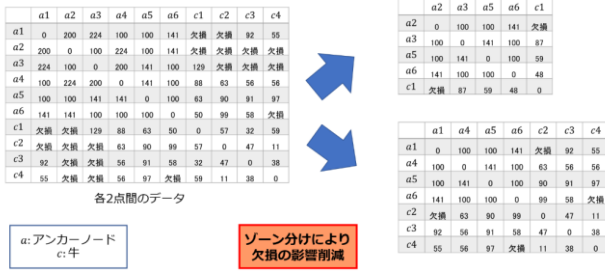


図 3 提案手法の着眼点

た時、それら全 2 点間の距離が分かっているならば、この関係性を反映した 2 次元の位置情報を得ることができる。MDS の目的は、N 個の対象の中から選んでできるすべての関係性から、可能な限り次元数の少ないユークリッド空間における点の布置を求めることである。各ノードの関係性として、例で示したような距離データを用いることによって、MDS を位置推定に適用することが可能となる。

### 2.2 RI-MDS

MDS を実行するためには、全ノード間の、距離や電波強度などの関係性が全て分かっている必要がある。しかし、本研究で使用する RSSI はノード間の障害物や遮蔽物の存在、及び使用デバイスの不具合によって欠損する場合がある[9]。また、通信可能距離を超えた場合は RSSI 値の取得が不可能となる[10]。

あるノード間の RSSI 値が取得できない場合、全ノードを対象とした MDS の実行が不可能となる。これを解決するために、RSSI の特性を考慮し、存在しないデータを推定することで、MDS の適用を可能とした位置推定手法が RI-MDS である。RI-MDS では RSSI 値を距離に変換した後、RSSI 値の欠損が生じているノード間の距離を、最短経路の距離で近似し、MDS を実行する。その後、最急降下法による反復改善ステップを繰り返して、誤差が小さい推定位置を得る。

### 3. 提案手法

RI-MDS では、ノード間の RSSI 値が欠損している場合においても、位置推定が可能である。しかし、欠損が原因で誤差が大きくなる場合がある。図 2 に例を示す。牛 a と牛 b の本来の距離は 1 m である。しかし、欠損が生じているため距離を直接取得することができない。求める距離を牛 a・牛 c 間と牛 c・牛 b 間の距離を用いて近似すると、10 m+10 m = 20 m となる。このように、実際の距離と推定した距離との乖離が大きくなる場合は位置推定の誤差増大に繋がる。

そこで、本研究では RSSI 値の欠損に着目し、可能な限りこれが生じないような分割を行い、分割された要素ごとに RI-MDS を実行することで欠損による誤差の影響を小さくすることを考える。ここでは、分割したものをそれぞれゾーンと呼び、ゾーンをアンカーノード 4 つから構成する。ゾーン分けによって欠損の影響を削減できる様子を図 3 に示す。ゾーン分け前は、10 つのノード間の距離情報が欠損していたが、ゾーン分け後は合計で 3 つの欠損に抑えることが可能となる。

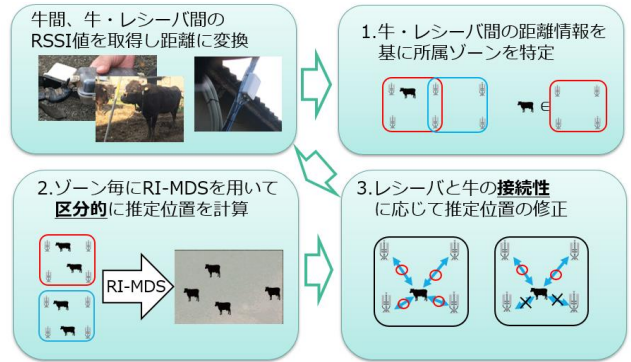


図 4 提案手法の流れ

### 3.1 各牛の所属ゾーン特定

各ゾーンは可能な限り小さな四角形であるのが望ましい。なぜなら、ゾーンを大きく設定すると、同ゾーン内でも欠損が生じゾーン分けの効力が失われるからである。また、各ゾーンは他ゾーンと重なる面積が可能な限り小さく決定されるのが望ましい。なぜなら、近い距離に位置する牛が別のゾーンに属すると判別され、位置推定の誤差が大きくなるからである。

ゾーンの作成後は、RSSI 値を距離に変換した推定距離を用いて、各牛の所属ゾーンを特定する。以下にゾーン特定の手続きを述べる。

ゾーン毎にアンカーノードの集合を作る。アンカーノード  $a_i$  がゾーン  $Z_k$  に属する時、これを  $a_i \in Z_k$  と表記する。

1. 牛  $c_j$  とアンカーノード  $a_i$  の RSSI 値を、以下の式を用いて距離  $d_{c_j, a_i}$  に変換する。

$$d_{c_j, a_i} = 10^{-(RSSI-E)/10n}$$

$E$  はあらかじめ測定された通信距離 1 m での RSSI 値 (単位 RSSI 値) を、 $n$  はレシーバのゲインや環境に関連した定数を表す。

2. 距離の総和  $D_{c_j, Z_k} = \sum_{a_i \in Z_k} d_{c_j, a_i}$  を計算する。
3. 牛  $c_j$  が所属するゾーンを、 $k_{c_j} = \text{argmin}_k D_{c_j, Z_k}$  を満たす  $k_{c_j}$  に決定する。もし  $n(\text{argmin}_k D_{c_j, Z_k}) \geq 2$  ならば  $k_{c_j} \in \text{argmin}_k D_{c_j, Z_k}$  をランダムに決定する。

牛と近くに位置するアンカーノードでも RSSI 値が欠損する可能性があることを考慮し、ゾーン内のすべてのアンカーノードとの距離の総和を比較して、特定を行う。

### 3.2 ゾーンと接続性を考慮した区分的 RI-MDS

ゾーン分けを行うことで、欠損による誤差の影響は削減できるが、それを完全に無視することは難しい。そこで、ゾーン分けした後の牛においても、アンカーノードとの RSSI 値の有無を確認し、誤差を可能な限り低減することを考える。以下に、手続きを述べる。

1. ゾーン  $Z_k$  に属するノード  $n_i, n_j \in Z_k$  間の RSSI 値を距離  $d_{ij}$  に変換する。RSSI 値が欠損している場合は最経路によって近似する。このようにして得た距離行列  $D$  を入力とした RI-MDS を行う。

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{pmatrix}$$



図 5 放牧場内のレシーバ配置とゾーン

実行結果として、以下に示すような各ノードの推定座標を得る.

$$\begin{pmatrix} X'_{c_1} & Y'_{c_1} \\ X'_{c_2} & Y'_{c_2} \\ \vdots & \vdots \\ X'_{c_n} & Y'_{c_n} \end{pmatrix}$$

2. 牛  $c_j \in Z_k$  において、アンカーノード  $a_i \in Z_k$  4 つ全てとの距離が存在するなら、牛  $c_j$  とアンカーノード  $a_i \in Z_k$  の 5 つの要素を基に RI-MDS を実行し、新たに牛  $c_j$  の座標  $(X'_{c_j}, Y'_{c_j})$  を求める.
3. 牛  $c_j$  の座標を 2. で求めた座標で更新する

$$\begin{aligned} X'_{c_j} &= X_{c_j}^{new} \\ Y'_{c_j} &= Y_{c_j}^{new} \end{aligned}$$

図 4 に提案手法である接続性を考慮した区分的 RI-MDS の流れを示す.

## 4. 実験

### 4.1 実験設定

実験は神戸大学大学院農学研究科附属食資源教育研究センターにあるおよそ  $80\text{ m} \times 140\text{ m}$  の放牧場で実施した. ここで 6 頭の牛に, GPS と RSSI 測定デバイスを装着して放牧した. また, アンカーノードとしては放牧場に設置されたレシーバ 6 つを用いる. 放牧場内のレシーバの配置と事前に決定したゾーンは図 5 に示した通りである. こうして GPS から正解データとなる牛の位置と, RSSI 値測定デバイスから位置推定に用いる牛間及び牛・レシーバ間の RSSI を計測した. 2020 年 11 月 18 日から 2020 年 12 月 3 日の RSSI データ及び GPS データのうち, これら全てが存在する計 1127 秒間を実験に用いた. 既存手法の RI-MDS と, 提案手法である接続性を考慮した区分的 RI-MDS の 2 つの手法での誤差比較を ALE (Average Localization Error) を用いて行う. 時刻  $t$  における牛  $c_i$  の推定座標を  $(X'_{c_i}, Y'_{c_i})$ , 実座標を  $(X_{c_i}^t, Y_{c_i}^t)$ , 牛の頭数を  $n$  とすると, 時刻  $t$  における ALE は以下の式で表される.

$$ALE = \frac{\sum_{i=0}^n \sqrt{(X'_{c_i} - X_{c_i}^t)^2 + (Y'_{c_i} - Y_{c_i}^t)^2}}{n}$$

正解データである GPS の緯度・経度は座標であるため距離にならない. したがって, 緯度・経度から 2 点間の距離をメートル単位で求め ALE を計算する.

### 4.2 実験結果

結果を表 1 に示す. 僅かではあるが提案手法での精度が従来手法のそれを上回った. しかし, 従来手法と提案手法での精度に大きな差はなく, 誤差の改善幅も十分ではない. 5 章で考察を詳しく述べる.

表 1 各手法を用いた際の ALE

手法	ALE
RI-MDS	86.33
接続性を考慮した RI-MDS	83.59

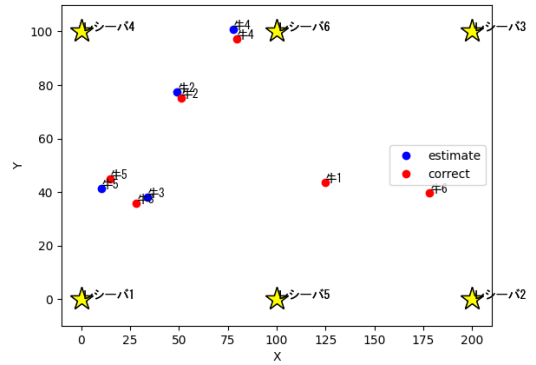


図 6 RSSI 値の欠損が少なくても推定精度が悪い例

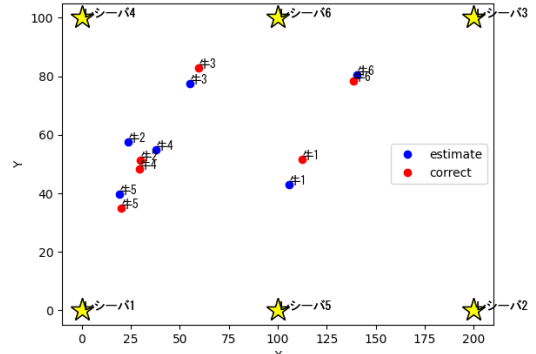


図 7 RSSI 値の欠損が多くても推定精度が良い例

## 5. 考察

牛間及び牛レシーバ間の RSSI 値の欠損数と ALE にはそれほど大きな関係がない. 例を図 6, 7 に示す. 図 6 はノード間の RSSI 値の欠損が少ないものの, 誤差が大きくなった例である. ノード間の RSSI 値の欠損数は 4 であり, ALE は平均を大きく上回る 375.85 を示した. RSSI 値が欠損しているのはゾーン A では牛 4-牛 2 間, ゾーン B では, 牛 1-レシーバ 6 間, 牛 6-レシーバ 5 間, 牛 6-レシーバ 6 間の計 4 点間である. ゾーン B では, 本来は牛 1-レシーバ 6 間の距離が 67.56 m, 牛 6-レシーバ 6 間の距離が 86.22 m である. しかし, 最短経路によって距離を近似した結果, 牛 1-レシーバ 6 間が 144.44 m, 牛 6-レシーバ 6 間が 166.71 m と本来の値の 2 倍近くなった. このように, ゾーン内の全ての牛が, あるレシーバとの RSSI 値を持たない場合は, 最短経路による近似で, レシーバ-レシーバ間の距離を加算することになり, 誤差の増大に繋がったと考えられる.

次に, 欠損数が多いものの, ALE が小さくなった例を図 7 に示す. ノード間の RSSI 値の欠損数は 8 であるが, ALE は平均を大きく下回る 6.10 となった. この時刻において RSSI 値の欠損が生じているのは, ゾーン A のみであり牛 1-レシーバ 4 間, 牛 2-レシーバ 5 間, 牛 3-レシーバ 1 間, 牛 3-牛 2 間, 牛 4-牛 1 間, 牛 5-レシーバ 4 間, 牛 5-レシーバ 5 間, 牛 5-レシーバ 6 間の 8 点間である. これらのうち, 最短経路によって近似した距離と実際の距離の誤差が 1 番

大きいのは、牛5-レシーバ5間である。このノード間の実際の距離は99.91 m、最短経路によって近似した距離は116.75 mであり、差は16.83 mである。他の7つのノード間では実際の距離と近似した距離の誤差はどれも6 m以下となっている。このように、RSSI値の欠損の数が多くても、最短経路によって近似した距離と実際の距離の誤差が小さい場合は、精度が保たれる。

次に、提案手法におけるALEの改善幅が十分でなかった理由について考察する。原因は複数考えられる。まず、レシーバの指向性である。牛同士が同じ距離に位置している場合でも、デバイスの向きによって取得されるRSSIの値に変化が生じるため、誤差が生じたと考えられる。

加えて、RSSIの取得デバイスによる丸め誤差も原因として考えられる。RSSIは通常、負の整数値で表される。桁を整数に丸めることによって誤差が生じると考えられる。これらの誤差を含んだまま、RI-MDSによって推定位置の修正を行ったため、ALEが外れ値的に大きくなったと考えられる。欠損しているノード間の距離は、RSSIデバイスを装着した牛の数を増やすことによって高い精度で近似できる。また、RI-MDSにおける推定位置の更新ステップにおいて、距離が過度に大きくなった際や、放牧場の範囲から大きく外れた際は、最急降下法の探索の方向を変更するなど、放牧場の範囲を考慮した改善を加えることによって、誤差の増大を防げるのではないかと考える。

しかし、本手法では、前述の牛の体積、高低差・レシーバの指向性やデバイスによる丸め誤差の改善はそのままの適用では実現が困難である。これらの問題を解決するためには、各レシーバとのRSSIの値を用いた機械学習など、誤差を含んだRSSI値を基に距離関係を考慮する必要がある。また、牛の行動特性を考慮することによって、位置推定の精度を上げることが可能になると考える。例としては、時刻、天気や季節に応じた位置の学習データを用いて、同様の条件下での牛の位置を推定・修正することである。加えて、牛同士のコミュニティを確実に検出することができれば、その情報を用いて行動の同期を考えた推定・修正が可能になる。

このように機械学習や牛の行動特性を考慮に入れることによって、牛の位置推定の精度は向上し、牛のコミュニティ発見や状態検知に役立てることができるのではないかと考える。

## 6. 結論

本稿では、電波強度を基にした牛の位置推定を行う際に、ノードをゾーン分けし、ゾーンごとにRI-MDSを実行することで、各牛とレシーバの接続性を考慮して位置の修正を行う、ノード間の接続性を考慮した区分的RI-MDSを提案した。これにより、欠損の生じやすいRSSI値を用いた位置推定の精度を向上することができた。

しかし、今後の課題は数多く残っている。提案手法では、牛の体積やレシーバの指向性による誤差及びデバイスによるRSSIの丸め誤差を修正することは困難を極める。その結果、位置推定の精度が著しく悪化する場合もある。また、欠損を可能な限り無視するために、RI-MDSにゾーンの概念を導入したが、完全に欠損を消すことは難しい。特に、ゾーン内の牛の数が少ない場合は、最短経路によって近似した距離と実際の距離の乖離が大きくなるといった問題も

見られた。これらを解決するためには、実験対象となる牛を増やすことや、より精度の高い距離近似アルゴリズムを考案することが考えられる。また、推定位置が放牧場の範囲から大きく外れる場合は修正を加えるなど、実験対象となる放牧場の条件を考慮した改善を加えることも考えられる。

しかし、トラブルによって牛が放牧場の外に出てしまった場合の検知が難しくなるため、牛の行動特性や放牧場の条件などを十分考慮してこの改善を実装する必要がある。加えて、牛の行動特性や牛同士の行動の同期を考慮することによる位置推定の精度の向上も期待できる。これらの課題を解決することによって、牛同士のコミュニティ検出や状態管理に役立てることができるのではないかと考える。

## 参考文献

- [1] M. L. Williams, N. M. Parthala, P. Brewer, W. P. James, and M. T. Rose, "A novel behavioral model of the pasture-based dairy cow from GPS data using data mining and machine learning techniques", *Journal of Dairy Science*, Vol.99, No.3, pp.2063-2075 (2016).
- [2] D. P. Dickson, G. R. Barr, and D. A. Wieckert, "Social relationship of dairy cows in a feed lot", *Behaviour*, Vol.29, No.2, pp.195-203 (1967).
- [3] 山内陽平, 山西雄大, 福元駿汰, 治京拓人, 太田能, 西出亮, 大山憲二, 谷口隆晴, 大川剛直, "IoC: Internet of Cows—インタラクティブ分析による放牧牛飼養管理システム—", *デジタルプラクティス*, Vol.11, No.3, pp.511-532 (2020).
- [4] Y. Shang, W. Rumml, Y. Zhang, and M. Fromherz, "Localization from connectivity in sensor networks", *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol.15, No.11, pp.961-974 (2004).
- [5] J. Cabero, D. Torre, A. Sanchez, and I. Arizaga, "Indoor people tracking based on dynamic weighted multidimensional scaling", *Proc. of MSWiM 2007*, pp.328-335 (2007).
- [6] O. Dieng, P. H. A. M. Congduc, and O. Thiare, "Outdoor Localization and Distance Estimation Based on Dynamic RSSI Measurements in LoRa Networks: Application to Cattle Rustling Prevention", *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pp.1-6 (2019).
- [7] C. Miao, G. Dai, K. Mao, Y. Li, and Q. Chen, "RI-MDS: Multidimensional Scaling Iterative Localization Algorithm using RSSI in Wireless Sensor Networks", *Computer and Information Science*, Vol.501, pp.164-175 (2015).
- [8] 齋藤堯幸, "多次元尺度構成法", 朝倉書店 (1980).
- [9] 中井若菜, 川濱悠, 勝間亮, "単位RSSI値の強弱の推定による位置推定精度の向上", *情報処理学会関西支部大会講演論文集* (2017).
- [10] 森部 智也, 岡田 啓, 小林 健太郎, 片山 正昭, "圃場における無線センサネットワークのための920 MHz帯電波伝搬特性評価", *農業情報研究*, Vol.26, No.1, pp.1-10 (2017).