

WuR 多段センサを用いた害鳥獣の検知システム

直江 将史[†] 三角 真[†] 上山 憲昭^{††}

[†] 福岡大学工学部 〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1

^{††} 立命館大学情報理工学部 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

E-mail: †t1171287@cis.fukuoka-u.ac.jp, ††mmisumi@fukuoka-u.ac.jp, †††kamiaki@fc.ritsumeikan.ac.jp

あらまし 電源の確保が困難な山間部における、農作物に被害を与える動物(害鳥獣)からの被害が問題となっている。害鳥獣からの被害軽減のために、省電力な監視システムの実現を目的として、消費電力の異なる複数のセンサを組み合わせたセンサノードを設置し、消費電力の低いセンサで害鳥獣接近を検知した後に、消費電力は高いがより詳細な情報を取得可能な深度カメラなどを段階的に起動するシステムが提案されているが、地域内に配置された複数のセンサノード間の連携は考慮されていない。一方で、autonomous recording unit (ARU)を用いた音声による野生動物のモニタリングが行われている。ARUによる音声の収集では、長期間の運用を目的として間欠的にARUを動作させ、消費電力削減を実現しているが、ARU待機時のイベントの取りこぼしが課題となっている。そこで、本稿では、消費電力を抑えながらもイベント取得度の向上を目指し、対象地域内に複数配置したセンサノードの一部のみを起動状態とし、それらのセンサノードがイベント検知時に送信するWuC(wake-up call)を受信することで、待機状態となっている他のセンサを起動する害鳥獣モニタリングシステムを提案し、イベント検知度と消費電力について評価を行う。

キーワード 害鳥獣対策, wake-up receiver

Detection System of Harmful Wildlife Using WuR Multi-stage Sensor

Masashi NAOE[†], Makoto MISUMI[†], and Noriaki KAMIYAMA^{††}

[†] Faculty of Engineering, Fukuoka University

8-19-1 Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka-city, Fukuoka, 814-0180 Japan

^{††} College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

E-mail: †t1171287@cis.fukuoka-u.ac.jp, ††mmisumi@fukuoka-u.ac.jp, †††kamiaki@fc.ritsumeikan.ac.jp

Abstract In mountainous areas where it is difficult to get a power supply, animals that cause damage to farm products (harmful wildlife) have become a problem. In order to reduce the damage from harmful wildlife, a system that combines sensors with different power consumptions has been proposed to realize a power-saving monitoring system. After detecting the approach of harmful wildlife with a sensor with low power consumption, a depth camera, which consumes more power but can obtain more detailed information, is activated in stages. However, those systems do not consider the coordination among multiple sensor nodes located in a region. The autonomous recording unit (ARU) has been used to monitor wildlife using voice. the ARU is operated intermittently to reduce power consumption for long-term operation. However, the problem is that events are not captured when the ARU is in standby. In this paper, we propose a monitoring system for harmful wildlife that activates only some of the sensor nodes in the target area, and activates other sensors by receiving a wake-up call (WuC) sent by those sensor nodes when an event is detected.

Key words control of harmful wildlife, wake-up receiver

1. はじめに

2021年2月時点において[1]で、農林水産省の野生鳥獣による2010年～2020年の農作物被害金額データが示されている。これまでも様々な害鳥獣への対策は行われており、被害額は年々減少傾向にあるものの、2020年では依然として約161億円と多大な被害が報告されている。農作物に被害を与える動物(害鳥獣)からの被害を軽減することを目的として、カメラを使用した映像による害鳥獣の検知や分類のシステムが提案されているが、動物をカメラで撮影するためにはセンサノードの常時稼働が必要となる。害鳥獣の監視は山間部で行うため、センサノードは蓄電池にて運用することが想定され、害鳥獣の監視にセンサノードの常時稼働が必要な手法では長期間の監視が困難となる。これに対して、省電力なシステムの実現を目的として、尾崎[2]らは消費電力の異なる複数のセンサを組み合わせたセンサノードを設置し、消費電力の低いセンサで害鳥獣接近を検知した後に、消費電力は高いものの、より詳細な情報を取得可能な深度カメラなどを段階的に起動するシステムを提案しているが、地域内に配置された複数のセンサノード間の連携は考慮されていない。

一方で、autonomous recording unit (ARU)を用いた音声による野生動物のモニタリングが行われており、複数のマイクに音声が届くまでの時間遅延利用した動物の空間的な位置の特定、収集した音声からの動物の推定に関して研究されている。ARUによる音声の収集では、長期間の運用を目的として間欠的にARUを動作させ、消費電力削減を実現しているが、ARU待機時のイベントの取りこぼしが課題となっている。

そこで、本稿では、消費電力を抑えながらもイベント取得度の向上を目指し、対象地域内に複数配置したセンサノードの一部のみを起動状態とし、それらのセンサノードがイベント検知時に送信するWuC (wake-up call)を受信することで、待機状態となっている他のセンサを起動する害鳥獣モニタリングシステムを提案する。

2. 関連研究

2.1 野生動物のセンシング

Rosalesら[3]は、画像解析を用いた野生鳥獣のモニタリングシステムを提案している。このシステムでは、モニタリングの対象地域に動物検知カメラを設置し、撮影された画像をクラウドに蓄積していくことで、深層学習などの機械学習によって解析し、その地域の野生動物の生態や種類を調査するものである。さらに画像データをクラウドに送る際に、リアルタイム性が高く、低遅延な通信を実現するために、エッジコンピューティングの技術を用いることでクラウドに送信するデータを削減している。しかし、電力消費の大きな動物検知カメラを常時起動しておかなければならないため、電力供給の乏しい森林や郊外での長期間の運用は困難である。また、画像を解析する際は、色彩や陰影によってより精度の高い解析が可能になるが、夜間や暗所、降雨時のような視認性が低下した環境では、野生動物の

解析精度は大幅に低下する。

これに対しWagnerら[4]は、赤外線カメラによって動物の姿勢を推測するシステムの提案をしている。このシステムは、赤外線カメラによって鹿を撮影し、その画像をニューラルネットワークを用いて解析し、姿勢を推測する手法である。夜間においても赤外線カメラによって得られる画像は取得可能なものの、赤外線カメラの画像のみで動物の種類分類は実現されていない。また、このシステムも常時稼働の必要があるため、商用電源の確保が困難な地点での長期間の監視には適していない。

内山ら[5]は、ドップラーセンサとサーモカメラを使用した害鳥獣の検知システムを提案している。このシステムは、低消費電力なドップラーセンサを常時稼働させ、移動物体が検知された場合にのみ、消費電力の大きいサーモカメラによる詳細な情報を取得するといった手法である。このような、種類の違うセンサを組み合わせ、段階的に動作させることで、森林などの電力供給の困難な環境においても長期間の監視が可能になっている。しかし、カメラなどの空間的指向性のあるセンサは、センサの指向範囲外のイベントの取りこぼしの課題があり、広範囲での監視やモニタリングには適していない。

動物の生態を調査する分野において、従来は観察者が現地に立ち入った調査が主であった。しかし、調査対象地域が必ずしも観察者にとって安全な環境ではなく、現地観察者の安全の問題が懸念されている。そのため、この観察を自律センサによって自動化する動きが高まってきている。ARUは、音響による探知が可能であり、時間同期された複数のマイクに特定の音が届くまでの時間遅延を定量化することで、動物が出す音を基にその動物の空間的な位置を特定することができる。ARUは、この自律センサのうち音響によって、鳥類、両生類、昆虫などの陸生生物や鯨類などの水生生物を含む音を出す生物の調査に特化している。音声信号は長期的な記録が可能なので、手法の更新によるデータの再分析など、柔軟性に富んでいるが、このシステムはまだ自動化されておらず、データの分析に多数のステップを踏まなければならない。ARUを自動化することで、より大規模に、より環境被害を抑えてデータ収集が可能になり、人的費用の削減と規模の大幅な拡大、質の向上が見込まれる。本実験のシミュレーションで使用を仮定したARUは、センサーとしては安価に入手でき、広範囲に大量に配置することが可能なOpen Acoustic DevicesのAudioMoth[6]のようなデバイスを想定する。

2.2 wake-up receiver

IoTの技術を実現する技術の一つとして、ワイヤレスセンサネットワーク(WSN)が挙げられる。WSNはセンサネットワークの延命に重要なエネルギー効率の向上に大きく貢献する技術である。WSNの中でもwake-up receiver (WuR)は、従来手法であるDynamic Cluster-Based Wireless Sensor Network (DCWSN)やMain radio Sub-carrier Modulation (MR.SCM)に比べ大幅なエネルギー消費の削減に成功しており、近年注目されている。WuRは待機消費電力が約10 μ W/hの受信機であり、汎用性に富んでいるため他のエネルギー

ギー消費の激しいセンサセンサと組み合わせることで、センサネットワークの寿命を延ばすことが可能である。図 1 は、本研究での WuR の動きを示したものである。本研究では WuR と ARU と組み合わせることでセンサノードを構築すると仮定している。図 1(a) の状態の様に、起動している ARU がイベントを検知した場合、そのセンサノードに搭載された wake-up transmitter (WuTx) から周りの WuR に wake-up call (WuC) を送信する。WuC を受信した周りの WuR は、図 1(b) の状態の様に待機状態の ARU を起動させセンシングを開始する。

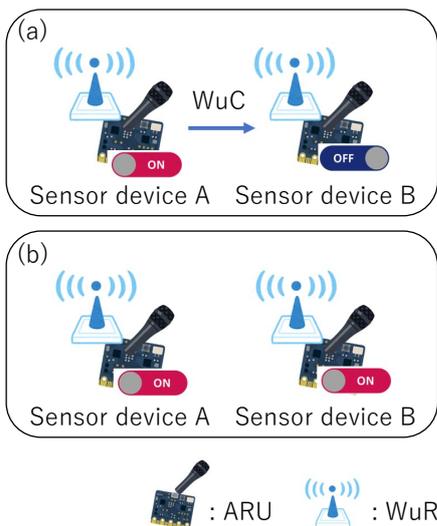


図 1: WuR による ARU 起動

3. 提案手法

本研究では、広域における長期的な害鳥獣のモニタリングを目的として、音声センサと WuR (wake-up receiver) を組み合わせたセンサノードを用いたモニタリングシステムを提案する。WuR は低消費電力で待機し続け、WuC (wake-up call) を受信すると接続された主センサを起動する機能を有した装置である。提案手法では、音声センサと WuR を組み合わせたセンサノードを複数個、対象地域内に配置する。対象地域内に配置した一定数のセンサノードは、害鳥獣の接近を検知するために常時起動しているが、その他のセンサノードについては待機状態とする。

図 2 は待機状態になるセンサノードの状態遷移を表している。害鳥獣の接近を検知した常時起動しているセンサノードから WuC を送信されたとき、WuC を受信した WuR を備えたセンサノードは、自身に接続された待機状態の主センサ (ARU) を起動する boot 状態を経て、センシングができる sensing の状態になる。一定時間イベントが観測されない状態が続いた時に待機状態である sleep に移行する。センサノードが sensing の状態のとき、イベントを検知すると active の状態になり、イベントが検知できなくなるまで active の状態でセンシングする。またイベントが検知されなくなると sensing の状態に戻り、ふたたび一定時間周囲をセンシングする。active と sensing はど

ちらも主センサの ARU において周囲で発生したイベントを検知可能なセンシング状態であるが、active はセンシング可能な範囲内で動物を検知している状態であり、sensing はセンシング範囲内に動物を検知するためにセンサが起動し続けている状態である。そのため動物がセンサの検知範囲内に存在する active の状態のとき、センサノードは時間は無制限でセンシングする。

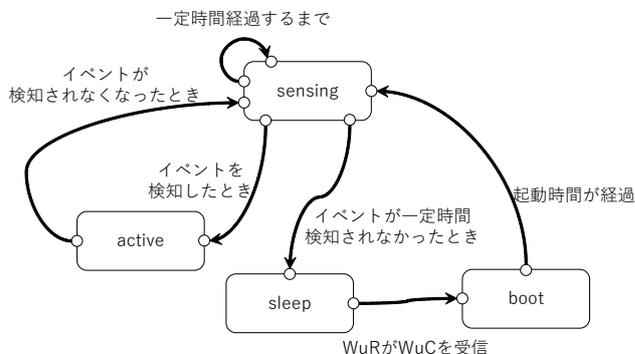


図 2: 待機状態になるセンサノードの状態遷移図

4. 評価

4.1 提案システムの評価方法

本稿では、提案手法を評価するために動物と、センサノードをエージェントとするマルチエージェントシミュレーションを作成し、提案システムで動作するセンサシステムにおける、イベントの検知度の分布と消費電力を比較する。図 3 にシミュレーション設定の概要を示す。1000m 四方の矩形領域を対象領域とし、1000m × 600m の連続する矩形領域を森林エリア、残りの 1000m × 400m の矩形領域を耕作エリアと定義した。

センサは、森林エリアと耕作エリアにまたがるエリアに、センサノード間を 35m, 105m で格子状に配置した。センサノード間の配置間隔 (d) が 35m のときには 29 × 9 の格子状に 261 個、センサノード間の配置間隔が 105m のときには 10 × 3 の格子状に 30 個センサを配置する。また、主センサであるマイクのセンシング半径は 40m と設定した。

提案手法であるウェイクアップセンサノードの WuC の到達距離 (r) は 50m, 100m, 150m, 200m で変化させシミュレーションを行った。提案手法において、常時起動するセンサノードは、格子状に配置したセンサ群において森林側の辺を構成するセンサのうち、全センサ、1つ置き、2つ置き、3つおきに選択した。また、Zhang らのセンサ消費電力モデルの研究 [7] から、WuR の待機電力や WuC の送信消費電力、ARU のセンシング時の消費電力と待機電力を設定した。

従来手法である間欠動作をするセンサノードについては、900 秒間待機と一定時間のセンシングを繰り返すよう設定した。今回のシミュレーションにおいては、センシング時間を 60 秒から 900 秒まで 60 秒毎に設定した。

動物の移動モデルとして、Homesick Lévy Walk [8] を Home と餌場をそれぞれ確率的に選択するよう拡張したモデルである拡張 Homesick Lévy Walk を用いた。Home は森林エリアか

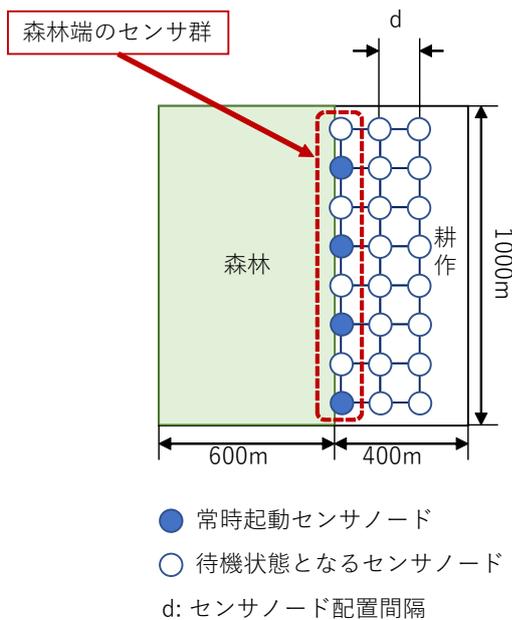


図 3: シミュレーション設定の概要 (常時起動センサノード 1 つおきの場合)

ら、餌場は耕作エリアからそれぞれランダムに選択した。動物が目的地を決定するとき、10%の割合で Home を、1%の割合で餌場を、残りの割合でランダムな目的地を選択するよう設定した。

これらの条件で、7日間10匹の動物が対象エリア内で行動すると仮定したシミュレーションを実施し、全センサノードの総消費電力とイベント検知度の分布を評価した。

なお、本稿におけるイベント検知度の分布は次のように定義する。1匹の動物が耕作エリアに侵入してから森林エリアに移動するまでの一連の行動を1回の侵入と定義した。侵入 i のイベント検知度 p_{di} は、動物がセンサノードのセンシング範囲に存在した回数を c_{ai} 、動物がセンサノードセンシング範囲に存在したときにそのセンサノードが動物を検知可能な状態であった回数を c_{di} としたとき、 $p_{di} = c_{di}/c_{ai}$ とする。なお、 c_{ai} と c_{di} をカウントするとき、連続した時間で同じセンサノードを複数回計上せず、1度だけ計上する。一定期間の各侵入についてのイベント検知度 p_{di} の分布を、本稿におけるイベント検知度の分布とする。

4.2 動物の移動モデル

野生動物の移動経路の推定・過程を行うのはこれまで困難であったが、バイオリギング・バイオテレメトリー技術の進歩によって可能になってきている。対象の移動距離の確率分布がべき乗則に従うことに着目した移動モデルである Lévy Walk [9] に対し、ねぐらを持つような動物の帰宅行動を考慮にいたれたモデルである Homesick Lévy Walk [8] が提案されている。これにより数日～数年の単位でモデル化を行うことが可能であり、ねぐらに帰ってくる動物の移動モデルとしても近似ができると考えられる。しかし、この移動モデルにも当てはまらない移動パターンを持つ動物もあり、今後の課題として研究が期

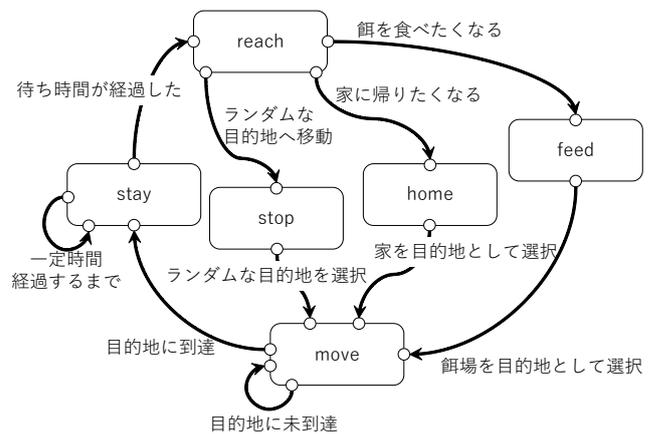


図 4: 動物の移動モデルの状態遷移図

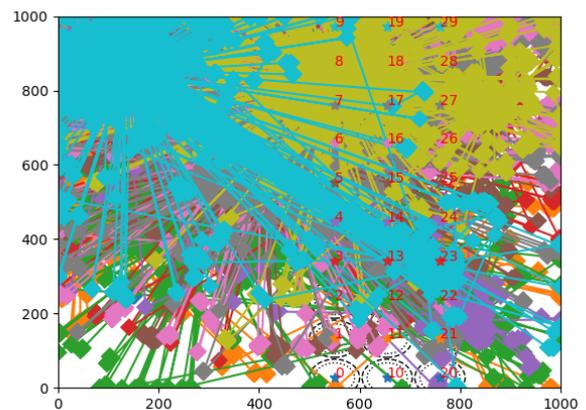


図 5: シミュレーション時の動物の移動軌跡

待されている。本研究で使用する動物の移動モデルである拡張 Homesick Lévy Walk は、この Homesick Lévy Walk にさらに改良を加え、確率的に Home だけでなく餌場を目的地とした行動を組み込んでいる。したがって、より実際の動物の行動に近いシミュレーションが可能になった。図 4 は、その拡張 Homesick Lévy Walk の状態遷移図である。動物は、一定の確率でねぐらや餌場を目的地とする、あるいは、ランダムに目的地を決めて進む。ねぐら、もしくは餌場に到着した場合、一定時間をその場で過ごし、その後、一定の確率に従って再度新しい目的地決めるといったサイクルで動く。図 5 は、本実験で実際に拡張 Homesick Lévy Walk を使用して、シミュレーションを実施したときの7日間の動物の移動の軌跡である。動物が、目的地に到着する都度に目的地を変え、一定の確率でねぐら又は餌場を目指して移動していることが確認できる。なお、図 5 の左側が森林エリア、右側が耕作エリアであり、赤い数字はセンサの配置箇所を表している。

4.3 シミュレーション結果

従来手法と、提案手法の結果について着目する。従来手法である間欠センサにおけるセンシング時間に対する消費電力の変化を図 11 に示している。対象地域内配置するセンサ数が多いほど、また、センシング時間が長いほど総消費電力が高くなって

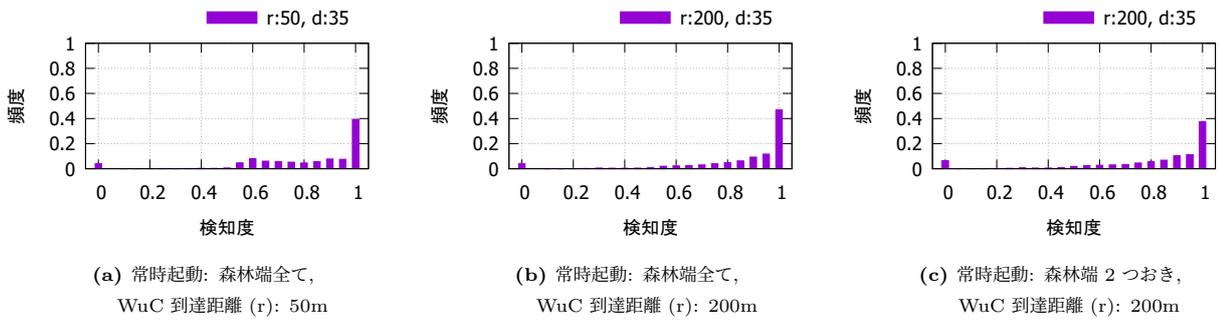


図 6: 提案手法における耕作地侵入におけるイベント検知度の分布 (センサノード配置間隔 (d): 35m)

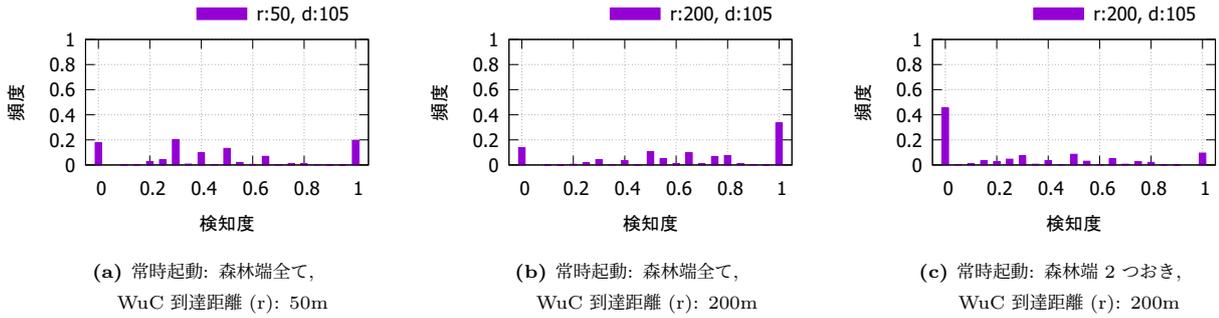


図 7: 提案手法における耕作地侵入におけるイベント検知度の分布 (センサノード配置間隔 (d): 105m)

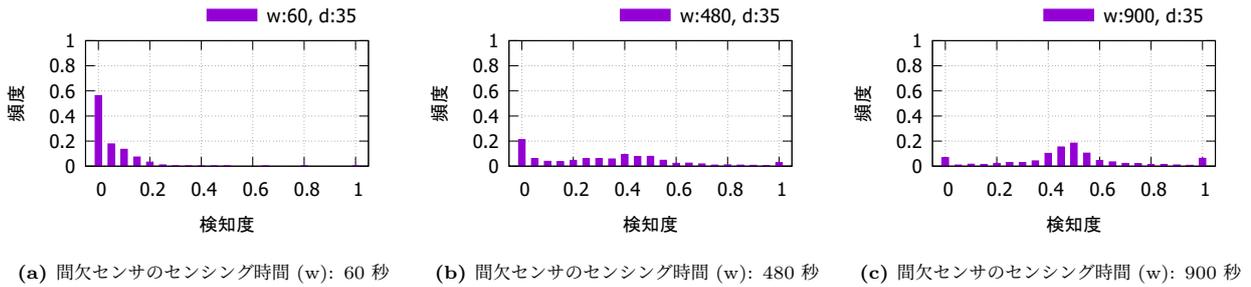


図 8: 間欠センサ (従来手法) の耕作地侵入におけるイベント検知度の分布 (センサーノード配置間隔 (d): 35m)

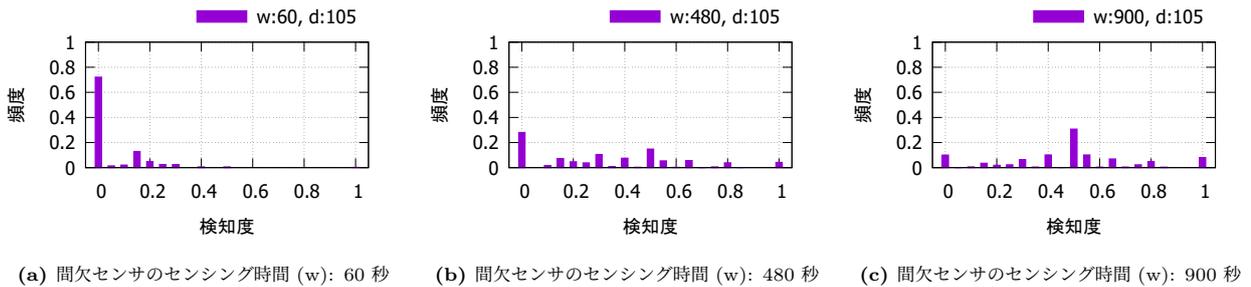
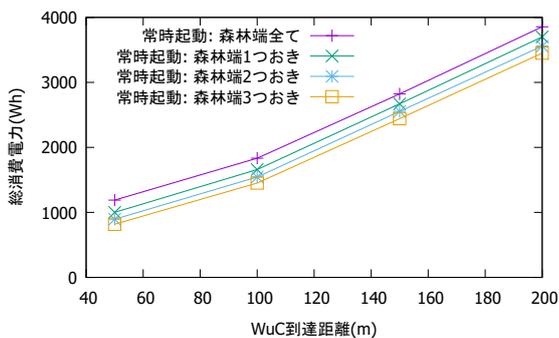


図 9: 間欠センサ (従来手法) の耕作地侵入におけるイベント検知度の分布 (センサーノード配置間隔 (d): 105m)

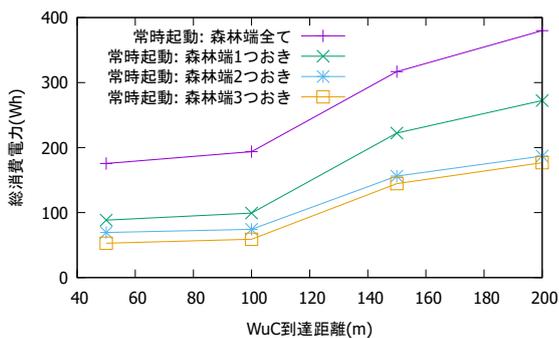
いる。間欠センサのセンシング時間が 60 秒のときの $d = 35m$ と $d = 105m$ における、イベント検知度合いの分布の結果がそれぞれ図 8(a) と図 9(a) であるが、いずれも低い検知度が多い分布となっている。また、図 11 において、 $d = 35m$ でセンシング時間が 900 秒のとき総消費電力は 2200Wh 程度であるが、図 8(c) に示す通り、イベント検知度合いが 0.5 付近の分布が高い。一方、図 10(a) において、提案手法のイベント検知度を示す図 6(a) 時の総消費電力は 1100Wh 程度と、既存手法の

図 8(c) のおよそ半分の総消費電力であるものの、提案手法の方が高いイベント検知度の頻度分布を達成している。これらの結果から、WuR を用いた提案手法は、従来手法と比較少ない消費電力で、高いイベント検知度を達成可能なことが確認された。

続いて、提案手法同士の結果に着目する。提案手法のイベント検知度の分布の結果を示す図 6 と図 9 においては、常時起動しているノード数が多ければ多いほど、また、WuC の到達



(a) センサノードの配置間隔 (d): 35m



(b) センサノードの配置間隔 (d): 105m

図 10: 提案手法における WuC 到達距離に対する総消費電力

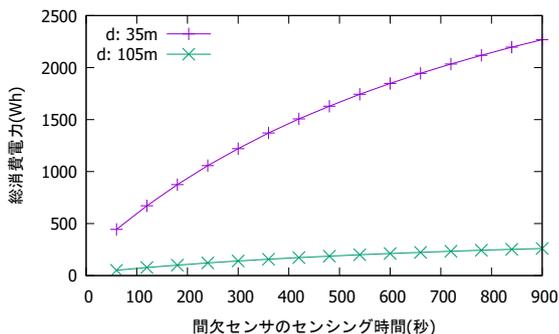


図 11: 間欠センサ (従来手法) のセンシング時間に対する総消費電力

距離が長いほど、高いイベント検知度の頻度が高く、対象地域内の動物の移動軌跡をより正確に追跡可能となっている。一方で、図 7(b) の結果に着目すると、センサノードの台数が少ない場合であっても WuC の到達距離が長ければ、図 6(c) に多少劣る程度のイベント検知度が達成可能であることが確認された。また、図 10 は、常時起動センサノード毎の、WuC の到達距離に対する総消費電力の変化を表しているが、全ての条件において対象地域内に配置するセンサノード数が多い $d = 35$ が、 $d = 105$ よりも総消費電力が高い。図 7(b) のときの総消費電力が 270Wh 程度であるのに対して、それと同程度のイベント検知度である図 6(c) の消費電力は 3000Wh 程度と、10 倍ほど総消費電力が高いことが確認できる。これらの結果より、特定の地域内に格子状にセンサノードを配置するとき、配置間隔が広くセンサノードの密度が低い場合であっても、WuC の到達距離を高めることで、より高いイベント検知度合いが達成可能

であることが示唆された。

5. まとめ

本稿では、広域において長期的に害鳥獣をモニタリングする際に高いイベント検知度合いを達成することを目的として、WuC と音声センサで構成されるセンサノードを、常時起動センサからの無線信号で起動する手法を提案し、シミュレーションによってイベント検知度の分布と消費電力について評価した。従来手法と提案手法の比較においては、総消費電力小さい場合であっても提案手法が高い検知度を達成できることが確認された。さらに、提案手法において、センサノードの配置間隔を広くし、対象地域内のセンサ密度が低い場合であっても、WuC の到達距離を高めることが、高いイベント検知度の頻度が増加する影響を与えることが明らかになった。これらの結果を用いることにより、より少ない数のセンサで、詳細な対象地域内の動物の行動追跡の実現が可能となる。

今後は、より効率的でイベント検知度の高いセンサノードの配置の決定手順や、実際の地形を考慮したシミュレーション評価、実機を用いた実験を行う予定である。

謝 辞

本研究成果は KDDI 財団研究助成寄付金 190051 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] 農林水産省: “農林水産省”, https://www.maff.go.jp/j/seisan/tyozyu/higai/hogai_zyoukyou/.
- [2] 尾崎大智, 山本寛, 宇都宮栄二, 吉原貴仁: “多種センシングデバイスが連動する省電力有害鳥獣検知システムの開発と評価”, 電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report: 信学技報, **120**, 297, pp. 66–71 (2020).
- [3] A. R. Elias, N. Golubovic, C. Krintz and R. Wolski: “Where’s the bear? - automating wildlife image processing using iot and edge cloud systems”, 2017 IEEE/ACM Second International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI), pp. 247–258 (2017).
- [4] R. Wagner, M. Thom, M. Gabb, M. Limmer, R. Schweiger and A. Rothermel: “Convolutional neural networks for night-time animal orientation estimation”, 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp. 316–321 (2013).
- [5] 内山敬吾, 山本寛, 宇都宮栄二, 吉原貴仁: “ドブラーセンサとサーモカメラの連動による有害鳥獣状態検知システムの開発と評価”, 電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report: 信学技報, **121**, 68, pp. 33–38 (2021).
- [6] Open Acoustic Devices: “AudioMoth Dev”, <https://www.openacousticdevices.info/audiomoth>.
- [7] M. Zhang, D. Ghose and F. Y. Li: “Does wake-up radio always consume lower energy than duty-cycled protocols?”, 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), pp. 1–5 (2017).
- [8] A. Fujihara and H. Miwa: “Homesick lévy walk: A mobility model having ichi-go ichi-e and scale-free properties of human encounters”, 2014 IEEE 38th Annual Computer Software and Applications Conference, pp. 576–583 (2014).
- [9] I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee and S. Chong: “On the levy-walk nature of human mobility”, IEEE INFOCOM 2008 - The 27th Conference on Computer Communications, pp. 924–932 (2008).