

ロープウェイ式カメラモニタリングにおける 効率的なロープの設置場所決定手法

勝間 亮^{1,a)} 小倉 広大¹

受付日 2020年5月13日, 採録日 2020年11月5日

概要: 山林に面している農用地の害獣被害を抑える対策として, WSN (Wireless Sensor Networks) による害獣モニタリングシステムにより害獣を検知し, 音や光などで追い払うことで, 被害を軽減することが期待されている. しかし, 一般的なモニタリングシステムでは監視カメラを固定しており, 植物の生育などにより撮影領域が減少するなどの問題に対処することが難しい. そこで本論文では, ロープ上を監視カメラが移動できるロープウェイ式害獣検知システムを提案し, モニタリング品質を保ちながらロープの設置コストをできるだけ少なくするという問題を定義し, それを解決する手法を提案する. 提案手法では, できるだけ少ない監視カメラで効率的にモニタリングを行うために, 複数に分割されている監視対象領域をまとめて監視できる領域をクラスタリング方式で求め, ロープを設置する位置を決定する. シミュレーション実験により, 提案手法では, 一般的なクラスタリング手法である k-means 法を本問題に適合するよう拡張した手法と比べると, より少ない監視カメラで全監視領域をモニタリングできることが確認できた.

キーワード: モニタリングシステム, モバイルノード, センサネットワーク, クラスタリング

An Efficient Rope Deployment Method for Ropeway-type Monitoring by Camera Nodes

RYO KATSUMA^{1,a)} KODAI OGURA¹

Received: May 13, 2020, Accepted: November 5, 2020

Abstract: Damage to rural areas by vermin is expected to be reduced by wireless sensor networks constructed from multiple sensor nodes with wireless communication devices. However, owing to their fixed monitoring cameras, general monitoring systems cannot always cope with plant growth and other obscurations that decrease the monitored area. This paper proposes a ropeway-type vermin detection system that moves the monitoring cameras on ropes, defines a problem to minimize the number of required ropes in the expected monitoring scenario, and proposes a method to solve this problem. For efficient monitoring with as few cameras as possible, the proposed method groups several target areas into one by a clustering procedure. The grouped area can then be monitored from a single position. Our simulation results show that the proposed method monitored all target areas with fewer monitoring cameras than a general clustering method (k-means clustering).

Keywords: monitoring system, mobile node, sensor network, clustering

1. はじめに

中山間地域などにおいて, シカ, イノシシ, サルなどの野生獣, いわゆる害獣による農村部への被害は過去から現

在まで長く続いている. 特に畑を荒らされる被害が多く発生しており, 2008年度から2014年度までの日本における集計では, 毎年約200億円にもものぼるほどの被害額がでている [1], [2], [3], [4]. 害獣被害は農作物への被害だけでなく営農意欲の減退や, 耕作放棄地の増加をもたらすなど被害額として数字に現れる以上に農村に深刻な影響を与えており, 対策を講じる必要がある. 近年では, 人手がかから

¹ 大阪府立大学
Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka 599–8531, Japan
^{a)} katsuma@cs.osakafu-u.ac.jp

ない対策として WSN (Wireless Sensor Network) を利用する対策が注目を浴びている [5], [6], [7]. 罾に出入りする頭数をセンサと人工知能で解析し, 罾に入る個体数が最大となるタイミングでゲートを閉じるように自動操作できるシステムや, 捕獲網をワイヤでつり下げ, 網の下に害獣が大量に入ったことを監視カメラで確認したうえで, 網を落として捕獲するシステムなどが利用されている. アイニックス株式会社では, 加速度センサ付き RF 監視タグ, 赤外線センサ付き RF 監視タグにより罾にかかった害獣を検知し, その情報を M2M でメールサーバに転送し, 管理者に捕獲メールを送るシステムを紹介している [8]. また, 小川は, web 上で双方向通信・制御できるロボット監視カメラを作成し, 監視と追い払い機能を同時に実現できる機器を開発した [9]. このロボット監視カメラは, 日中はカメラの動体検知機能を使い, 夜間は赤外線感知の外部センサ機能を使い害獣を検知する. このように, 様々な害獣への対策のベース部分にはモニタリングが必要であり, 非常に重要な要素となる. しかし, カメラを固定する既存のモニタリングシステムでは, 1 度設置したらその設置場所から動かすことが困難なため, 一部の機器の故障が起きた場合や, 植物の生育などでモニタリング不能となった場合に対処が容易ではない.

そこで, 移動式監視カメラを使ったモニタリング手法が必要となってくる. 移動式監視カメラを利用することで, 一部の機器の故障をカバーするようにカメラが移動したり, 障害物を避けて写したりすることが可能であり, 撮影領域を適切に保つことができるようになる. このようなモニタリング手法として, 立てたポールや木々の枝にロープを複数張り, ロープ上を移動可能な複数のカメラが協調移動しながら対象領域を監視するロープウェイ式害獣検知システムがあげられる. ロープウェイ式害獣検知システムの概略図を図 1 に示す. ロープ 1 本につき 1 個の監視カメラを設置してモニタリングする. 監視カメラは設置されたロープの上のみを自由に移動でき, 別のロープには移ることはできない. 監視カメラには通信機が搭載されており, 他の監視カメラと撮影領域についての情報を通信しあうこ

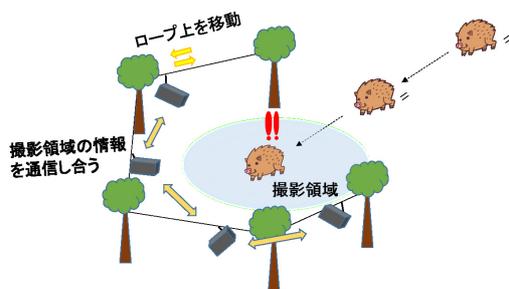


図 1 ロープウェイ式害獣検知システム概略図

Fig. 1 Schematic of our ropeway-type vermin detection system.

とができる. このモニタリングシステムでは, ノードどうしの情報交換による協調移動で, 自身が写していない領域を他の監視カメラが写すことで, システム全体の撮影領域を大きくできる. また, 他の監視ノードが故障しても別の監視ノードで撮影することができる. 以下, ロープ上に監視カメラに通信機が搭載されたものを監視ノードと呼ぶ.

ロープウェイ式害獣検知システムでは, 監視ノードはロープ上を移動するため, 撮影領域はロープの設置場所に大きな影響を受ける. そのため, 監視したい地点 (以下, 監視点と呼ぶ) が与えられたときに, どこにロープを設置するかは重要な問題になる. モニタリングの情報量を増やすにはロープを数多く設置してカメラの数を増やす方法が考えられるが, 配置コストや情報整理の大変さを考えると, 少ないロープ数, カメラ数で高品質なモニタリングを行うことが求められる. また, たとえばモニタリング品質を保つためのロープの最大長や角度などの, 本システム特有の制約についても考えなければならない. そこで, 本論文ではまずロープウェイ式害獣検知システムにおいて, 導入する監視ノードの数をできるだけ少なくしつつ, 満足な監視領域を得るようなロープの設置場所を決定する問題を定義する. そのうえで, その対象問題の解となるロープの位置を決定する手法を提案する.

提案手法の特徴は以下の 2 点があげられる.

- 同時に複数の監視点をモニタリングできる位置を, ロープに関する制約を満たしつつ逐次的処理で発見する.
- 高品質モニタリングのためのカメラの可動域の保証する.

与えられた複数の監視点に対して, 同時に複数の地点を監視できる位置に監視ノードを設置すると効率的である. そのような監視ノードの位置を最少数ですべての監視点を被覆する問題は二次元平面であれば単位円被覆問題として扱うことができる. しかし, 本問題はモニタリングの質を保つためにロープの距離や角度の制限が設けられるため, 単位円被覆問題の最適解では適切なロープの設置位置を求めることができない可能性が高い. そこで提案手法では, 集約領域を決定する処理と, ロープの設置位置を決定する処理を交互に行い, 毎処理後にロープの長さや角度の制約を満たすように逐次的にロープの設置位置を求める. また, 移動式の監視ノードがモニタリングできる場所が, ロープ上のある 1 点のみになってしまうと移動性を活かさないモニタリングになってしまう. そのため, 監視点を集約する際は, 監視カメラの撮影可能距離よりも小さい範囲を想定して集約することで, カメラがある程度移動してもすべての監視点をモニタリングできるような工夫を施す.

2. 関連研究

これまでモバイルセンサとして空中飛行型 (UAV) を利用して, センシングやモニタリングを行うための様々な

研究が行われている．適切な領域被覆を行う研究 [10] や、LiDAR を搭載した UAV で実際に森林の上空からモニタリングを行う研究 [11] などがある．しかし、これらは木よりも上空の障害物のない領域を想定しており、山林地域の地上を撮影するためには高度を下げる必要がある．しかし、そのような環境では植物の枝や葉に飛行が妨害されてしまうため、UAV は利用できない．一方で、地上走行型 (UGV) のセンサを利用したモニタリングの研究も行われている．農業用地の管理のために UGV を利用する研究 [12] や、人にとって危険な汚染領域のモニタリングの研究 [13] などがある．しかし、山林地域では木の根や斜面、凹凸などにより UGV が満足に走行できない可能性が高い．これらの移動性の阻害要因に対処する必要があるため、本論文ではロープウェイ式によりセンサに移動性能を付与することを提案する．

本論文で扱う問題は、単位円被覆問題に関連がある．単位円被覆問題は L_2 ノルムにおいて NP 困難であることが知られており [14]、ユークリッド距離を基本とした理想環境において、監視点をまとめてモニタリングできる地点の最小個数を発見する問題が非常に難しいといえる．さらに、本論文で扱う問題は、上記問題の解をロープで被覆しつつ様々な制約を満たすようロープの適切な位置を求める問題であり、単位円被覆問題の良解が本問題における最適なロープの配置に利用できないことも多い．本論文ではこの新たな問題を提示し、それを解決する手法を提案する．

また、単位円被覆問題の近似アルゴリズムは様々提案されているが [15], [16]、遮蔽物のない環境が前提となっている．本研究の発展にとまらぬ、植物などの遮蔽物を考慮した制約付き被覆問題への拡張が行われることが予測される．そのため、遮蔽物など様々な制約への拡張性が高いことが望ましい．単位円被覆問題の解を算出可能かつ拡張性の高い手法として、k-means 法があげられる．一方で、本論文での提案手法は監視点の被覆を逐次的にローカルな情報で計算していくため、遮蔽物に対処しやすい性質を持っている．

3. 問題設定

本論文のねらいは、ロープウェイ式害獣検知システム導入時の効率の良いロープの設置手法の提案である．本章では、モニタリングを品質を保つうえで想定する環境、条件について述べ、対象問題を定義する．

モニタリングの品質を保つための目標をまとめると以下があげられる．

- (1) ロープ 1 本あたりの最大長を制限して弛みを防ぐ．
- (2) ロープの数を減らしてコストを削減する．
- (3) 監視ノードの故障による影響を軽減する．
- (4) 監視ノードの移動可能範囲を保証する．
- (5) できるだけ多角的なモニタリングができる配置にする．

3.1 節で対象とする領域について述べる．3.2 節ではロープと監視ノードについて述べ、上記目標 (1) のロープの最大長の制約条件を述べる．本問題は、複数の監視点をモニタリング可能な位置を利用して上記目標 (2) を解決することをねらいとするため、3.3 節で監視点の集約について述べる．複数の監視点をモニタリング可能な位置がロープ上の 1 点のみになってしまうと、位置情報の計測誤差への耐性や障害物の回避行動などのノードの移動を利用した柔軟なモニタリングが大きく制限されてしまう．それを防ぎ上記目標 (3) と (4) を達成するため、監視点を集約する際に設ける条件を 4.1.2 項で述べる．3.4 節で対象とする問題の入出力と目的をまとめ、目標 (5) を達成するためのサブ目的の設定について述べる．

3.1 対象領域

害獣検知では、監視ノードの撮影領域内で、害獣の姿を撮影するため、監視ノードの設置場所が大事となる．山中を移動する動物はやみくもに行き来するのではなく、獣道と呼ばれる通行頻度の高いコースが存在する．獣道では、足元の下草は食われて短くなっていたり、低木の小枝は折られたりしているため、肉眼で発見しやすい．害獣検知ではそのような獣道などの害獣が現れやすい場所を監視対象とする．

本論文では、あらかじめ獣道などの監視対象において特に監視したい場所が点として定まっているものとする．つまり、監視領域は点として与えられる．以下、監視領域を監視点という名称で呼ぶ．監視点の集合を $S = \{s_0, s_1, \dots, s_n\}$ で定義する．監視点には固有の ID が割り振られている．また、領域をもれなく監視を目的としているため、監視点は極端に疎な配置にならないことを前提とする．

3.2 ロープと監視ノード

ロープ上には各ロープにつき 1 台の監視ノードを設置する．監視ノードは通信機、監視カメラ、小型 PC を搭載している．監視ノードは自身が設置されているロープ上でのみ自由に移動でき、他のロープに移ることはできない．各監視ノードは半径 R_c の通信範囲に存在する他のノードと通信して情報を交換することができる．通信可能距離については、機器の電波出力により数メートルから数キロメートルまで様々に変更可能な通信規格も存在するため、本問題では考慮しない．監視カメラは 360 度カメラを想定するため、カメラの方向については考慮しない．監視カメラの撮影可能距離を r_d とする．

ロープを設置する場合、長すぎるとロープが弛んでしまい、撮影に支障が生じる場合がある．そのため、ロープ 1 本あたりの長さには上限があるものとし、本問題に以下の制約条件を設ける．

制約条件 1 1 本のロープには長さの上限 l_{max} を設ける．

3.3 監視点の集約

監視点 s をモニタリング可能な位置は、 s を中心とした半径 r_d の円内の点である。少ないロープ数ですべての監視点をモニタリングできるようにするためには、複数の監視点を同時にモニタリングできる地点を適切に設定しなければならない。位置が近い複数の監視点 s_1, s_2, \dots, s_n を同時にモニタリングできる領域は、各監視点 s_1, s_2, \dots, s_n から距離 r_d 以内を満たす領域である。その領域の中の点を監視点 s_1, s_2, \dots, s_n の集約点と呼ぶ。効率的にロープを設置する際には適切な集約点を発見し、その上にロープを通さなければならない。

ロープ設置の際に必要なとなる集約点の集合を $V = \{v_0, v_1, \dots, v_m\}$ と記述する。ここで、ある監視点 s が集約点 v の位置からのモニタリング対象となる時、 s は v に属するという。これ以降は集約点をベースに議論を進めていくため、以下の制約条件を設ける。

制約条件 2 すべての監視点は、いずれかの集約点に属する。

ある集約点 $v \in V$ に属する監視点の集合を $A(v)$ とし、 $A = \bigcup_v A(v)$ とすると、各監視点はいずれかの集約点から監視可能な状態でなければならないので、 $S = A$ にならなければならない。

すべての監視点を同時にモニタリングするためには、1つの集約点につき1台のカメラが必要となる。すなわち、1つの集約点につき1本のロープを割り当てることが必要である。そこで、本問題に以下の制約条件を設ける。なお、これ以降は $A(v) = \emptyset$ となる $v \in V$ を空集約点、そうでない v を非空集約点と呼ぶ。

制約条件 3 すべての非空集約点に対して、ペアになるロープが重複なく存在する。

ここで、ある非空集約点 v とペアになれるロープ e の条件は、 e が v を通過していることである。

いずれかのノードが故障してしまうと、即座にモニタリングがまったくできない監視点が発生する可能性が高い。しかし、あらゆる監視点を2つ以上のノードから監視できるようにすると、故障の影響を軽減できる。そのため、以下の制約条件を設ける。

制約条件 4 非空集約点を通過するロープは2本以上存在する。

この条件を設けることにより、ロープ上を移動できる監視ノードの多くは2つの非空集約点に移動できる。そのため、故障した他のノードの代わりにモニタリングできるようになり、ノード故障によってまったくできない監視点が発生する可能性を大きく減らすことが可能となる。

3.4 問題の入出力、および目的

本問題の入力として監視点の集合 S を設定する。出力は設置すべきロープの集合 E と、各ロープ $e_i \in E$ の2つ

の端点 $\{f_i, g_i\}$ の位置座標 $\{(fx_i, fy_i), (gx_i, gy_i)\}$ である。目的はロープの本数、すなわち集合 E の要素数をできるだけ小さくすることである。

これまでに述べた制約条件を満たすような本問題の解は2本のロープが同一の端点を持つ場合が多くなると考えられる。このような解は、2台のカメラで1つの場所を撮影することも可能であるような解であるといえる。複数のカメラで同一の場所を撮影すると、より確実性の高いデータになることが知られているが、2つの映像が同方向からのものよりは、別角度からの撮影の方が情報量は格段に多くなる。たとえば片方からの撮影では植物に遮られる状況でも、反対側から目標地点を撮影できる場合などがある。そのため、モニタリングの品質を上げるためには別角度から撮影できることが望ましい。たとえば、ある監視点があるまま集約点となっており、その集約点が2本のロープの端点となっている場合、ロープのなす角度が大きくなることで、2つのカメラが別角度から撮影可能となる。このように監視点を別角度から撮影可能なケースを増やすため、以下のサブ目的を設ける。

サブ目的 複数本のロープが設置される非空集約点が n 個存在するとき、各ロープのなす角度が θ より大きい非空集約点の数をできるだけ n に近づける。

次に、各制約条件を満たすような本問題の解を求める手法について述べていく。

4. 提案手法

本章では、ロープウェイ式害獣検知システムを導入する際の効率的なロープの設置手法について述べる。提案手法ではクラスタリング方式で複数の監視点を集約点にまとめることにより、設置するロープの本数を減らし、必要な監視ノードの数を最小にする。非空集約点は、その非空集約点に属する監視点の代表点であり、非空集約点の位置は属する監視点の座標の平均座標とする。集約点を決定する際に注意しなければならないのは、全監視点を集約できるように集約点をすべて決定してから、その後に集約点を結ぶようにロープを設置すると、ロープの長さの上限 l_{max} を超えてしまう可能性がある。そこで提案手法では、初期に1つの集約点を作成し、作成済の集約点を始端とするロープの終端の集約点（次集約点と呼ぶ）を次々と作成していく方式をとる。最もシンプルな集約点を求めてから順次更新していくため、集約点の集合 V は、最初は $V = \emptyset$ であり、その後1つずつ追加されていく。追加する際に固有のIDを割り振る。最初に追加される集約点を初期集約点と呼ぶ。提案手法は3つのフェーズから構成され、監視点を集約点にまとめる処理を監視点集約フェーズ、次集約点を求めることを次集約点決定フェーズと呼び、これらのフェーズを交互に行う。次集約点決定フェーズで新たに集約点が追加されない場合に、最終フェーズである未集約監視点除

去フェーズに移行する。このフェーズにより、集約されなかった監視点を集約点と見なしてロープを設置する。

提案手法では、最初の集約点、つまり初期集約点はあらかじめ設定された監視点の中から1つ選択して開始しなくてはならない。初期集約点からロープを伸ばしていくので、システム全体の集約点の数、ロープの設置位置は最初に選択監視点に影響を受ける。そのため、最適なロープの設置位置を求めるには、最初に選択する監視点を1つずつ変更し、全探索する必要が出てくる。その中で、設置されるロープの数、つまり必要な監視ノードの数が少ないときのロープの設置位置を提案手法の解とする。

提案手法は、ある監視点から最も近い監視点までの距離が $r_d + l_{max}$ 以下となる範囲の監視点を対象とする。

4.1 提案手法のアプローチ

4.1.1 ロープの端点

制約条件4を達成するため、提案手法ではロープの両端はいずれかの集約点にする。具体例を図2に示す。ロープが非空集約点 v_t と v_{t+1} を結ぶように張られているとすると、監視ノードはそのロープ上を移動することができるため、非空集約点 v_t , v_{t+1} に属する監視点を監視することが可能である。

4.1.2 集約距離係数

監視ノードはロープ上を移動できるが、その際に、ある非空集約点に属する監視点をすべて同時にモニタリングできるようにロープ上の領域（ロープ上の集約領域と呼ぶ）がただ1点になってしまうと、その1点にとどまることが強制され、ノードの移動性を大きく損ねてしまう。そのため、監視ノードがロープ上をある程度移動しても、対象の監視点をすべてモニタリング可能な状態にすることが望ましい。

ある非空集約点に対するロープ上の集約領域の大きさは、その非空集約点から一番遠い監視点に依存する。たとえば、図3のように、非空集約点 v_0 に属する最も遠い監視点 s があり、その距離が撮影可能最大距離 r_d であり、 v_0 と別の集約点 v_1 を結ぶロープが張られているとする。そのロープ上を移動する監視ノードが v_0 に属する監視点をモニタリングするとき、 v_0 上でしかすべての監視点を監視できず、移動することが許されない状態に陥ってしまう。

この問題を解決するために、監視点を集約する際には、監視ノードの撮影可能距離 r_d の範囲にある監視点を集約するのではなく、 r_d より小さい範囲内で集約する。そこで、集約距離係数 q ($0 \leq q \leq 1$) を導入する。集約距離係数 q を導入した際の一歩遠い監視点と非空集約点との位置関係を図4に示す。集約する際に、 qr_d の範囲内の監視点を集約することにより、ロープ上を $(1-q)r_d$ の距離まで移動できることが保証される。この集約距離係数はシステム導入時にユーザが決めるものとする。

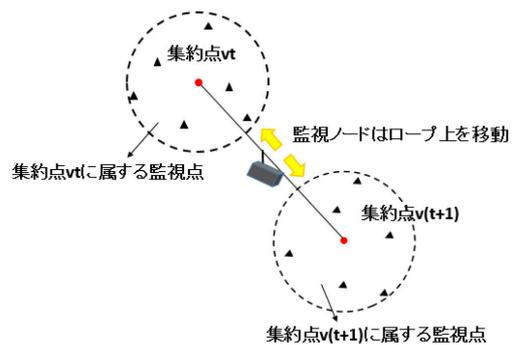


図2 ロープ上を移動する監視ノードの撮影領域
Fig. 2 Connection of two merged points by stretching the rope. The monitoring node can survey the areas covered by both merged points.



図3 集約距離係数を設定しない場合の一番遠い監視点と集約点
Fig. 3 Furthest monitoring point and the merged point when the merging range coefficient is not set.

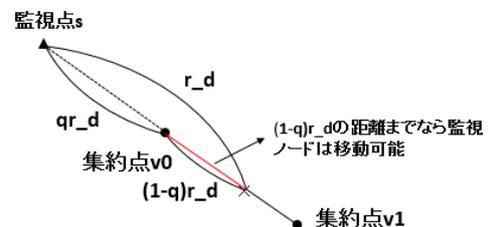


図4 集約距離係数を設定する場合の一番遠い監視点と集約点の関係
Fig. 4 Farthest monitoring point and the merged point when the merging range coefficient is set.

以上より、監視点を集約するにあたって、以下の制約条件を満たさなければならない。

集約における制約 ある非空集約点に属するすべての監視点は、その非空集約点から距離 qr_d 以内に存在する。

4.2 監視点集約フェーズ

ここでは、監視点を集約する際のアルゴリズムについて述べる。監視点集約フェーズでは、既存のクラスタリング手法である k-means 法のアイデアを用いて、監視点の平均位置を利用する方式をとる。集約点と未集約監視点集団に属する監視点との距離が qr_d 以下の監視点をその集約点に属する監視点とし、集約点の位置を属する監視点の平均座標に設定する。集約点に属する監視点が収束するまで集約

点の位置を更新し、収束した後、次集約点決定フェーズに移行する。集約点 v_i が周辺の監視点を集約するアルゴリズムは以下のとおりになる。

- (1) 未集約監視点のうち、集約点 v_i から距離 qr_d 以内になる監視点をその集約点に属する監視点とし、集約点 v_i からモニタリング可能な監視点の集合 $A(v_i)$ を更新する。
- (2) $A(v_i)$ に属する監視点の平均位置を計算する。
- (3) 集約点 v_i の位置 ($v_i.pos$) をステップ (2) で求めた平均位置に更新する。
- (4) $A(v_i)$ に属する監視点に変更が生じなくなる (過去の集合と同一の集合になる) までステップ (2), (3) を繰り返す。
- (5) 次集約点決定フェーズに移る。

4.3 次集約点決定フェーズ

ここでは、次集約点を決定する際のアルゴリズムについて述べる。監視点集約フェーズで集約点の座標を決定した後は、ロープを結ぶために結び先となる次の集約点を適切に決定しなければならない。次集約点決定フェーズでは、ロープの設置位置となる次集約点を決定する。次集約点は、未集約監視点から選ばれ、その未集約監視点の座標を次集約点の初期座標とする。ロープの設置角度のサブ目的のため、次集約点を決定する際は、集約点に結ばれるロープと、未集約監視点との角度が θ 以上となる未集約監視点のうち、集約点との距離が一番小さい監視点の座標を次集約点の初期座標とし、集約点集団 V に追加する。もし、角度の制約条件を満たす未集約監視点と、集約点との距離がロープの上限を超えてしまう場合は、ロープの上限以下のうち、一番近い未集約監視点の座標を次集約点の初期座標とし、集約点集団 V に追加する。また、ロープの上限以下の距離を持つ未集約監視点が存在しない場合は次集約点を決定しないまま次集約点決定フェーズを終了する。

ある集約点 v_t の次集約点 v_{t+1} を決定する例を図 5 に示す。この例では $\theta = \frac{\pi}{2}$ としている。集約点 v_t はロープの結び先として、集約点 v_{t-1} が存在しているとす。対象とする未集約監視点を s_{t+1} とすると、次集約点 v_{t+1} を決定する際は、 $\frac{\pi}{2} \leq \angle v_{t-1}v_t s_{t+1}$ を満たし、かつ集約点 v_t との距離 $v_t s_{t+1}$ がロープの上限以内で一番小さい監視点 s_{t+1} の位置を次集約点 v_{t+1} の初期位置として設定し、集約点集合 V に追加する。

集約点の数が 1 つしかない場合、まだロープが設置されていない状態なので、図 6 のように、次集約点は、未集約監視点の中から一番近い監視点の座標を初期位置とする集約点を設定し、集約点集団 V に追加する。もし、一番近い監視点までの距離がロープの長さの上限を超す場合は、中間地点に集約点を設定する。

集約点 v_t の次集約点 v_{t+1} を設定するアルゴリズムは以

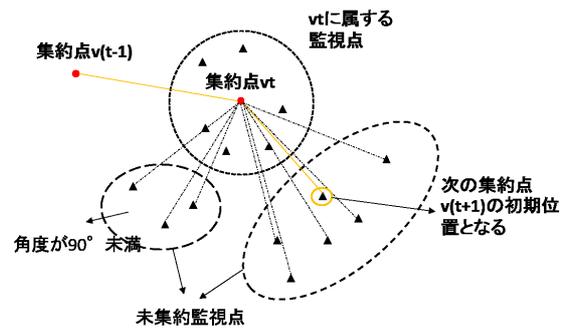


図 5 ロープの角度を考慮した次集約点決定フェーズ

Fig. 5 Selection of the next merged point considering the distance and angle constraints.

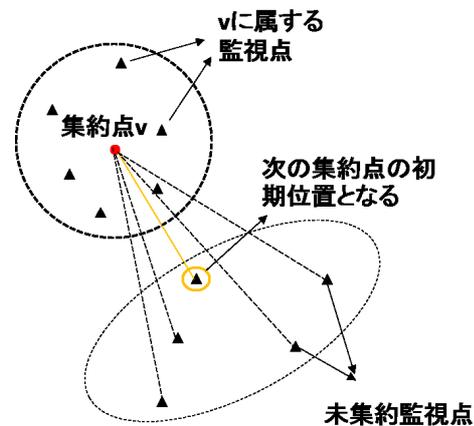


図 6 距離のみを考慮した次集約点決定フェーズ

Fig. 6 Selection of the next merged point considering the distance only.

下のとおりとなる。集約点 v_t には、集約点 v_{t-1} からロープが張られていることとし、ロープの上限は l_{max} である。また、未集約監視点 $\{S - \{A\}\}$ のうち対象とする監視点を s_{t+1} で表現する。ある集約点 $v \in V$ を端点とするロープのもう一方の端点となる集約点の集合を $E(v)$ とする。

- (1) 集約点 v_t が初期集約点ならステップ (2) へ、初期集約点以外ならステップ (3) へ。
- (2) 集約点 v_t の位置 ($v_t.pos$) と未集約監視点 $\{S - \{A\}\}$ に属するすべての監視点との距離 $v_t s_{t+1}$ を計算し、 $v_t s_{t+1} \leq l_{max}$ を満たす s_{t+1} のうち、 $v_t s_{t+1}$ の値が一番小さい監視点 s_{t+1} を決定する。監視点が決定したらステップ (4) へ移行する。
- (3) 集約点 v_t の位置 ($v_t.pos$) と未集約監視点 $\{S - \{A\}\}$ のすべての監視点との距離 $v_t s_{t+1}$ を計算し、 $\theta \leq \angle v_{t-1}v_t s_{t+1}$ を満たし、かつ $v_t s_{t+1} \leq l_{max}$ を満たす監視点 s_{t+1} のうち、 $v_t s_{t+1}$ の値が一番小さい監視点 s_{t+1} を決定する。ここで該当する監視点が存在しない場合はステップ (2) へ。
- (4) 集約点 v_{t+1} の位置 ($v_{t+1}.pos$) をステップ (2), (3) で求めた監視点の座標 ($s_{t+1}.pos$) で初期化し、集約点集

合 V に追加する. また, $E(v_t)$, $E(v_{t+1})$ にそれぞれ, v_{t+1} , v_t を追加する.

4.4 未集約監視点除去フェーズ

未集約監視点除去フェーズでは, 監視点集約フェーズにおいて, どの集約点にも属さなかった監視点に対してロープを渡していく. アルゴリズムは以下のとおりとなる.

- (1) 未集約監視点 $\{S - \{A\}\}$ から 1 つ取り出し, 監視点 s_t とする. もし, $\{S - \{A\}\} = \{\emptyset\}$ なら未集約監視点除去フェーズを終了する.
- (2) 集約点 v_t の位置 ($v_t.pos$) を ($s_t.pos$) で初期化し, 集約点集合 V に追加する.
- (3) 集約点 v_t に対して, 監視点集約フェーズを行う.
- (4) 集約点 v_t から一番近い集約点 v_{t+1} を計算する.
- (5) 距離 $v_t v_{t+1} \leq l_{max}$ を満たすなら $E(v_t)$, $E(v_{t+1})$ にそれぞれ v_{t+1} , v_t を追加する. 満たさないなら v_t と v_{t+1} の中間に集約点 v_{t+2} を追加し, ($v_{t+2}.pos$) を $\frac{(v_t.pos + v_{t+1}.pos)}{2}$ で初期化し, 集約点集合 V に追加する. $E(v_t)$, $E(v_{t+1})$, にそれぞれ, v_{t+2} , v_{t+2} を追加し, $E(v_{t+2})$ に v_t , v_{t+1} を追加する.
- (6) ステップ (1) に戻る.

集約点を頂点, ロープを辺としたときに, これまでの操作で最終的に連結なグラフが得られる. ここで, モニタリングを実現するためにはカメラと集約点のペアリングができていなければならない. 非空集約点の数よりもロープの数が少ない場合, 空集約点を新たに角度 θ のサブ目的の条件を満たす位置に追加し, 集約点の数とロープの数を一致させることで解決する. このような位置は容易に見つかるため, 説明は省略する.

5. シミュレーション実験による評価

提案手法によるロープの設置方法の有効性を評価するために, シミュレーション実験を行った. 畑と面している山地を想定しフィールドの大きさを決定し, 監視点を格子状の配置と獣道を想定した配置に設定したマップのほかに, ランダムに監視点を設定したマップを用意した. それらのマップに対して集約点を求めることにより, ロープの設置位置を決定する. 本実験では, 提案手法との比較のために, 逐次的処理でない方法によるシミュレーションも行った. この比較手法として, 計算量の面で優れており, 三次元の単位球被覆問題への拡張が容易な k-means 法をベースとしたアルゴリズムを採用した. k-means 法はシンプルかつカスタマイズ性に優れた手法であり, 将来的に遮蔽物を考慮した複雑な被覆問題などへの拡張可能性を見込んでベースライン手法とした. この方法は, k-means 法により最初に非空集約点をすべて決定した後, 各非空集約点を結ぶロープの最大長を最小化する連結ツリーを作成する. 連結ツリーを作成する際には, ロープの長さ制限 l_{max} を超えるロー

プも出てくるため, その場合には空集約点を中間点に設置して 2 本のロープで補うメカニズムも設定した. さらに, 非空集約点の数よりもロープの数が少ない場合, それらを同数にするように, 角度 θ 以上を満たすように空集約点とロープを追加する. この手法を, 以降で単に k-means 法と記述する. k-means 法を提案手法と同じ条件下で実行し, 必要な集約点数, ロープの本数, 角度制約の達成率, ノードの移動可能距離平均を比較することで提案手法の有効性を評価した. 角度制約の達成率とは, 3 章で説明したサブ目的に関する評価項目である. 複数本のロープが設置される非空集約点が n 個存在し, 各ロープのなす角度が θ より大きい非空集約点の数が m 個とすると, $\frac{m}{n}$ を角度制約の達成率と呼ぶ. ノードの移動可能距離平均とは, 監視点をすべてモニタリング可能な状態を保ちながらカメラがどれだけ移動可能かを表す評価項目であり, 提案手法の集約距離係数の効果を測ることができる. ある集約点 v において, 監視点をすべてモニタリング可能な状態を保てるカメラの最大移動可能距離 c_v としたとき, 各集約点 $\forall v \in V$ における c_v の平均値をノードの移動可能距離平均と呼ぶ.

5.1 シミュレーション設定

実験では, 京都市左京区の安養寺山周辺の杉林を想定し, $40 [m] \times 32 [m] \times 10.5 [m]$ の三次元フィールドに対して, 98 個の監視点を 2 通りの方法で配置したマップ 1, 2 を用意した. マップ 1 では監視点を規則正しく設置し, 隣の監視点との間隔は約 $4 [m]$ としている. マップ 2 では獣道などの害獣が現れやすい領域を想定し, ある範囲では監視点を密に設置し, その他の部分では疎に設置した. 密な範囲の監視点は約 $2 [m]$ 間隔で並んでおり, 疎の方では約 $5 [m]$ 間隔で並んでいる. マップ 1, 2 で配置した監視点をそれぞれ図 7, 図 8 に示す. マップ 1, 2 それぞれに対し, 集約距離係数 q の値を $q = 1, \frac{3}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$ と変更し, 提案手法, k-means 法を三次元空間に拡張して適用し, ロープの設置位置を求めた. k-means 法の初期クラスタ数 k は, 1 から順に増やしていき, すべての集約点が集約における制約 (4.1.2 項で記述) を満たした時点での値を用いた. それゆえ, k-means 法での解も集約距離係数 q による影響を受け, ノードの移動可能距離を保証できる. 本シミュレーション実験におい

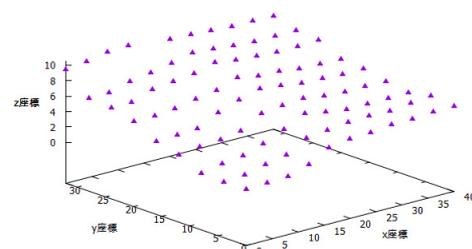


図 7 マップ 1: 規則正しく設置した監視点

Fig. 7 Map 1 created from the 98 monitoring points.

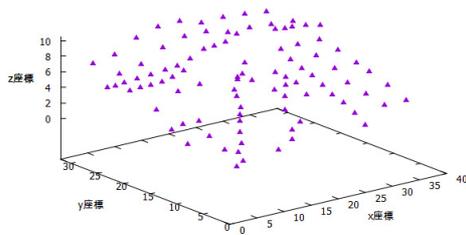


図 8 マップ 2：獣道を想定し設置した監視点

Fig. 8 Map 2 created from the 98 monitoring points.

表 1 シミュレーション実験のパラメータ
Table 1 Parameters of the simulation.

フィールドサイズ	40 [m] × 32 [m] × 10.5 [m]
監視点の数	98
監視カメラの撮影可能距離	10 [m]
ロープの限界距離	10 [m]
角度制約 θ	$\frac{\pi}{2}$
集約距離係数 q	1.0, 0.75, 0.5, 0.25

で設定したパラメータを表 1 にまとめる.

5.2 実験結果

5.2.1 マップ 1：規則正しく監視点を設置した環境での結果

マップ 1 に対する解の例として、集約距離係数 $q = \frac{3}{4}$ のときの提案手法、k-means 法の出力結果を図 9、図 10 にそれぞれ示す。これらの出力結果の図は集約点（空集約点も含む）と設置されるロープを表す。集約距離係数を変更したときのマップ 1 に対する結果として、提案手法、k-means 法それぞれで必要となる集約点の数、ロープの本数、角度制限達成率、ノードの平均移動可能距離を表 2 にまとめる。

集約点とロープの数について、集約距離係数を変化させても提案手法のほうが少なくできることが分かった。k-means 法では、すべての集約点が集約における制約を満足させるために、初期クラスタ数が増加してしまう結果となった。また、ロープの長さが l_{max} を超えてしまうケースも見られ、そのようなロープの間に空集約点をおいて 2 本のロープとしなければならないため、集約点とロープの数が増える要因となった。マップ 1 では、集約距離係数 q の値を $\frac{1}{4}$ に設定すると、集約距離に対して、隣接する監視点までの距離の方が大きくなるため、設定した監視点そのまま集約点となった。集約距離係数 q の値を 1 から $\frac{3}{4}$ にしても、必要となる集約点数、ロープの本数ともにあまり変化が見られなかった。しかし、集約距離係数 q の値を $\frac{1}{2}$ にした場合は、必要となる集約点数、ロープの本数ともに大幅に増加することが確認できた。

ノードの移動可能距離平均について、両手法ともに集約距離係数の導入によりノードの移動可能距離をある程度

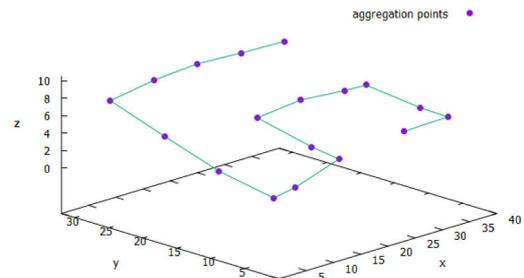


図 9 マップ 1，提案手法， $q = 0.75$ での出力結果

Fig. 9 Simulation results of Map 1 by the proposed method with $q = 0.75$.

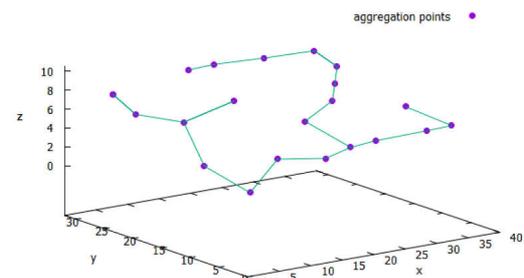


図 10 マップ 1，kmeans 法， $q = 0.75$ での出力結果

Fig. 10 Simulation results of Map 1 by the k-means method with $q = 0.75$.

表 2 マップ 1 での提案手法，k-means 法別集約点数，ロープの本数

Table 2 Results of Map 1.

提案手法	集約距離係数 q			
	1	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$
集約点数	16	18	44	98
ロープの本数	15	17	43	97
角度制限達成率	100%	100%	97.5%	100%
移動可能距離平均 [m]	1.1	2.9	5.6	10.0
k-means 法				
集約点数	18	21	52	98
ロープの本数	17	20	51	97
角度制限達成率	79.6%	82.4%	69.6%	100%
移動可能距離平均 [m]	1.3	3.0	6.4	10.0

調整可能であることが確認できた。また、結果としては k-means 法の方が提案手法よりも良くなった。その理由として、集約点の数が k-means 法で多く必要とするため、集約点 1 つあたりに所属する監視点数が少なくなったことがあげられる。集約点の数が多くなると、集約点に属する最も遠い監視点の距離も近くなると考えられ、そのぶんノードの移動可能距離が伸びる。このことについては、4.1.2 項で述べており、想定どおりの結果であったといえる。

5.2.2 マップ 2：獣道を想定した環境での実験結果

マップ 2 に対して、集約距離係数 q を変化させたときの提案手法、k-means 法による集約点の数、ロープの本数、角度制限達成率、ノードの平均移動可能距離を表 3 に示す。

マップ 1 のとき同様、必要となる集約点数、ロープの本

表 3 マップ 2 での提案手法, k-means 法別集約点数, ロープの本数

Table 3 Results of Map 2.

提案手法	集約距離係数 q			
	1	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$
集約点数	9	12	24	63
ロープの本数	8	11	23	62
角度制限達成率	100%	100%	100%	98.4%
移動可能距離平均 [m]	1.2	2.8	5.9	9.4
k-means 法				
集約点数	14	18	37	91
ロープの本数	13	17	36	90
角度制限達成率	83.7%	86.7%	88.3%	97.6%
移動可能距離平均 [m]	1.6	3.2	6.9	9.8

数, 角度制限達成率は提案手法の方が良い結果となった。マップ 2 では監視点が密な領域があるため, 必要となる集約点数, ロープの本数は, 同条件でのマップ 1 と比べ少なくなかった。また, 集約距離係数 q の値を $\frac{1}{4}$ に設定しても, 監視点が密に存在する領域は, 集約距離に対して, 隣接する監視点までの距離の方が小さくなり, 監視点を集約できる結果となった。特に集約距離係数 q の値が $\frac{1}{4}$ の場合, 監視点が密な領域で集約可能となり, マップ 1 よりも集約点の数が減っていることが確認できた。それにともない, 監視点を集約できたことで移動可能距離平均が下がることが確認できた。

5.3 実験結果の評価

今回想定した 2 つのマップ, 監視点を規則正しく配置する場合と, 密の領域を作るように配置する場合の両方ともに, 提案手法を適用することで, k-means 法と比べると, ロープの数を少なくすることが可能であった。

これら代表的な 2 種のマップに対するシミュレーション実験を通して, 次のことが確認できた。まず集約点を利用して連結なグラフを作成することにより, 少ないロープの数でモニタリングが可能であることと, 故障したノード影響を軽減できる環境を作れることが確認できた。ロープの最大長の制約を設けることで, ロープの弛みの問題を防ぐことができた。また, 集約距離係数の導入により, ノードがモニタリングを維持しつつ移動できるようにできた。各ノードの移動可能距離について調査した結果, 期待どおり, すべてのノードについて $q = \frac{3}{4}$ のとき 2.5 [m] が保証され, $q = \frac{1}{2}$ のとき 5.0 [m] が保証され, $q = \frac{1}{4}$ のとき 7.5 [m] が保証されていることが確認できた。集約点の数を減らすことと移動可能距離平均を増やすことがトレードオフの関係にあることも確認できた。さらに, 角度 θ に関するサブ目標の導入により, 多角的なモニタリングを可能にできた。これらより, 3 章で述べた高品質モニタリングの目標を達成できたことが確認できた。

6. まとめ

本論文では, ロープウェイ式害獣検知システムにおいて, 少ないロープの数で高品質モニタリングを行うためのロープの配置問題を定義した。その問題に対して, 複数の監視点をまとめて監視することができる集約点を求めることにより, 必要となる監視ノード減らす手法を提案した。さらに提案手法では, 高品質モニタリングをねらいとして, ロープの最大長などの制約を守るメカニズムや集約距離係数を導入した。

シミュレーション実験を行い, k-means 法と比較することで, 提案手法の有効性を検証した。その結果, k-means 法を用いて全集約点を決定してからロープの設置位置を決定するよりも, 提案手法のように, 集約点を決める処理と, ロープの設置位置を決める処理を交互に行う方が, 制約条件を満たしつつ必要となるロープの数を少なくすることができることを確認した。また, 集約距離係数の導入により, ノードがすべての監視点をモニタリングできる状態を維持しつつ, ある程度の距離を移動可能であることが保証できた。

今後に残る課題としては, ロープウェイ式害獣検知システムにおいて, 他の監視ノードと協調移動することで, 具体的な故障ノード発生時のカバー方法や, システム全体の撮影領域を最大化する手法を開発したい。

参考文献

- [1] 農林水産省: 鳥獣被害の現状と対策, 入手先 <<http://www.maff.go.jp/j/seisan/tyozyu/higai/attach/pdf/index-15.pdf>>.
- [2] 堀内史郎, 今井乃里子, 高柳和宜, 今井康仁: 野生ニホンザルが農山村住民に及ぼす生活被害の指標化: サルの出現率, 畑の被害レベル, 作物の総収穫件数の分析, *J. Naturalistae*, No.3, pp.9-18 (2009).
- [3] 武山絵美, 九鬼康彰, 東口阿希子, 奥村啓史: 中山間水田農業地域における農地周辺バッファゾーンの空間特性と害獣対策, *J. Rural Planning Association*, Vol.30, pp.405-410 (2011).
- [4] Cassidy, A.: Vermin, Victims and Disease: UK Framings of Badgers In and Beyond the Bovine TB Controversy, *Journal of the European Society for Rural Sociology*, Vol.52, No.2, pp.192-214 (2012).
- [5] Jagtap, P.S. and Hatkar, A.P.: Smart monitoring and controlling of wind farms based on WSN, *Proc. IEEE 1st India International Conference on Information Processing (IICIP)* (2016).
- [6] Molina-Pico, A., Cuesta-Frau, D., Araujo, A., Alejandro, J. and Rozas, A.: Forest Monitoring and Wildland Early Fire Detection by a Hierarchical Wireless Sensor Network, *Journal of Sensors*, Vol.2016, Article ID 8325845 (2016).
- [7] Yamaguchi, N., Sakai, Y., Shiraishi, T., Onishi, S. and Kowata, T.: E-kakashi project, an agri sensor network using ad hoc network technology, *Proc. SICE Annual Conference (SICE)* (2011).
- [8] アイニック株式会社: 害獣捕獲監視システム わなタグ,

- 入手先 (http://www.ainix.co.jp/products/biometrics_service/monitoring/).
- [9] 小川勇治：ロボット監視カメラによる獣害被害防止の対策技術開発，第19回生物学技術研究会・第30回生理学技術研究会予稿集，pp.41–42 (2009).
- [10] Caillouet, C., Giroire, F. and Razafindralambo, T.: Optimization of mobile sensor coverage with UAVs, *Proc. INFOCOM2018* (2018).
- [11] Sankey, T., Donager, J., McVay, J. and Sankey, J.B.: UAV lidar and hyperspectral fusion for forest monitoring in the southwestern USA, *Journal of ELSEVIER Remote Sensing of Environment*, Vol.195, No.15, pp.30–43 (2017).
- [12] Tokekar, P., Hook, J.V., Mulla, D. and Isler, V.: Sensor Planning for a Symbiotic UAV and UGV System for Precision Agriculture, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2013).
- [13] Zampetti, E., Papa, P., Di Flaviano, F., Paciucci, L., Petracchini, F., Pirrone, N., Bearzotti, A. and Macagnano, A.: Remotely Controlled Terrestrial Vehicle Integrated Sensory System for Environmental Monitoring, *Sensors. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol.431, pp.338–343 (2017).
- [14] Fowler, R.J., Paterson, M. and Tanimoto, S.L.: Optimal packing and covering in the plane NP-complete, *Inf. Process. Lett.*, Vol.12, No.3 (1981).
- [15] Fu, B., Chen, Z. and Abdelguerfi, M.: An almost linear time 2.8334-approximation algorithm for the disc covering problem, *Proc. 3rd International Conference of Algorithmic Aspects in Information and Management*, pp.317–326 (2007).
- [16] Liu, P. and Lu, D.: A fast 25/6-approximation for the minimum unit disk cover problem, *Computational Geometry*, arXiv: 1406.3838 (2014).
- [17] MacQueen, J.: Some methods for classification and analysis of multivariate observations, *Proc. 5th Berkeley Symp. Math. Statist. and Prob.*, Vol.1, pp.281–297 (1967).



勝間 亮 (正会員)

2006年京都教育大学教育学部情報数学科卒業。2011年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年大阪府立大学大学院工学研究科助教。2019年より同大学講師。モバイルコンピューティング，センシ

ング等の研究に従事。



小倉 広大

2016年大阪府立大学工学域電気電子系学類卒業。2018年大阪府立大学大学院工学研究科電気・情報系専攻博士前期課程修了。