

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11270

研究課題名(和文) 山林における移動式カメラノードの導入による協調モニタリング方式の開発

研究課題名(英文) Development of a cooperative monitoring system by introducing mobile camera nodes in forest areas

研究代表者

勝間 亮 (Katsuma, Ryo)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：80611409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では新たな移動式ノードを用いたモニタリングシステムとして、木々の枝と枝との間に短くロープを張り、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を開発した。実用化に向けて、ロープを張る位置を適切に決定する課題と、カメラが障害物の位置を知る課題に対して解決策を提案した。

前者の課題に対しては、複数の監視対象点を撮影できる場所をうまく利用することで、カメラの台数をできるだけ少なくする手法を開発した。後者の課題に対しては、カメラの移動性能とライトを利用して、障害物の位置を推定する既存の手法であるSLAMの誤差を軽減する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新たな移動式ノードを用いたモニタリングシステムにより、山林地帯での自動モニタリングの実現に近づくことができた。特に、導入コストを抑えるためには、必要な機材の数を少なくしなければいけないが、本研究の成果により少ないカメラやロープの数で広範囲をモニタリングできるような配置を求めることができるようになった。また、カメラが自動的に障害物を避けるように動くために必要な情報として、より正確な障害物の位置が不可欠である。本研究の成果により、障害物の位置を特定する際の精度が大幅に向上した。

研究成果の概要(英文)：In this research, as a new monitoring system using mobile nodes, we have developed a system in which a short ropes are stretched between the tree-branches and multiple mobile cameras that can move on the rope monitor the target area. For practical use, we proposed solutions to the problem of appropriately determining the position to stretch the rope and the problem of estimating the position of obstacles.

For the former problem, we have proposed a method to reduce the number of cameras as much as possible by focusing places where multiple monitoring target points can be shot. For the latter problem, we have proposed a method to reduce the error of SLAM by using the mobility of the cameras and their lights.

研究分野：モバイルコンピューティング

キーワード：モニタリングシステム 移動ノード 位置推定 カメラ 山林地帯

### 1. 研究開始当初の背景

中山間地域などにおいて、クマ、シカ、イノシシ、サルなどの野生獣、いわゆる害獣による被害は昔から問題視されている。特に人が襲撃されたり、畑を荒らされたりする被害が多く発生しており、日本の農作物に関しては 2008 年度から毎年約 200 億円にも上るほどの被害額がでており、近年、無線センサネットワーク (Wireless Sensor Network, WSN) を利用したモニタリングシステムにより害獣を検知し、追い払う等の対策が検討され、小規模なものが試験的に導入されてきている。害獣を検知するための WSN では、対象領域に設置された多数のカメラ付きセンサノードが撮影し、その画像や映像を無線マルチホップ通信により伝達する。しかし、従来のカメラを固定設置する方式のモニタリングシステムでは二つの問題がある。

- ・問題点 1: 撮影範囲の事前決定と実際の撮影範囲とのギャップ

あらかじめ効率良く対象領域を撮影するような固定式カメラの設置位置を決定する必要があり、そのための研究も存在する。しかし、自然環境には障害物となる植物が多数生育しているうえに、対象領域に存在するすべての植物の位置や生育状況を正確に入力として与えることは難しいため、実際の運用では期待通りに撮影できず、カメラ位置を変更しなければいけない場合がある。

- ・問題点 2: 植物の生育への対処の困難さ

固定式カメラでは一度設置した場所からの移動が困難なため、植物の生育などで撮影範囲が減少することへの対処が難しい。そのため、植物の生育にあわせてカメラを移動しなければいけない。

そこで、移動式カメラを使った新たな害獣検知手法が必要となってくる。移動式カメラを利用することで、障害物を避けて映すことが可能であり、植物の生育にも動的に対処することができると考えられる。しかし、移動ノードを用いた WSN の既存研究で提案されているような、地上走行型や空中飛行型のノードに監視カメラを搭載して運用すると、山中では木々が生い茂っているため、木の根、枝による転倒や故障の恐れがある。そのため、山林地域で導入可能な新しい移動式ノードによるモニタリングシステムが求められる。

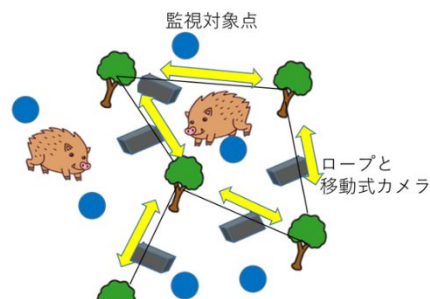


図 1 提案システム

### 2. 研究の目的

本研究では新たな移動式ノードを用いたモニタリングシステムとして、木々の枝と枝との間に短くロープを張り、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を開発する。ロープを設置したい位置に枝がない場合は、ポールを立てるなどをして、ロープを張る。一本のロープにつき一台のカメラを設置し、カメラはロープ上のみ移動でき、例えば障害物を回避できる位置に移動して対象領域をモニタリングできる。概略図を図 1 と図 2 に示す。このシステムでは、従来の固定カメラとは異なり、カメラが適切な位置に移動して障害物を避けながら、対象地点を撮影することが可能となる。このようなロープウェイ式モニタリングを実現するためには、次の課題を解決しなければいけない。

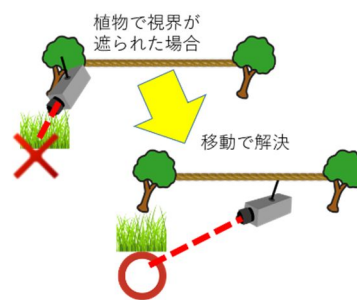


図 2 障害物回避

- (a) ロープを張る位置を適切に決定すること
- (b) カメラが障害物の位置を知ること

### 3. 研究の方法

#### 3.1 課題 (a) に関して

カメラが移動可能な場所はロープの設置に強く依存するため、獣道などの監視対象点を効率的に撮影できるように適切にロープを設置する必要がある。そこで設置コスト低減のために、複数の監視対象点を撮影できる場所 (集約点と呼ぶ) を利用することで、ロープの本数 (カメラの台数) をできるだけ少なくしつつ、すべての監視点を撮影できるようなロープの配置を決定するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムでは、高品質なモニタリングを保証するために、ロープの長さや、複数本のロープがなす角度の制約を設け、それらを満たすロープの配置を出力する。

この課題に対して、集約点をすべて効率よく求めてから、その地点をロープで結ぶ方式を取ると、高品質なモニタリングの保証のための制約を守れない可能性が高い。そのため、提案アルゴリズムでは、最初に集約点を 1 つ求めてロープの始点とし、その近くにもロープの終端となる集

約点を作成し、高品質なモニタリングの保証のための制約を守れるように逐次的にロープの位置を決定していく。

特に、カメラはロープ上を移動できるが、その際に、ある集約点から監視可能な地点をすべて同時にモニタリングできるようなロープ上の領域がただ一点になってしまうと、カメラはその一点にとどまることが強制され、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必要がある。そのため、集約点を求める際には、実際のカメラの撮影可能距離よりも小さい範囲と仮定する集約距離係数  $q$  を導入することで、モニタリング可能な地点が変わらないようなカメラの移動を保証する。

### 3.2 課題 (b) に関して

レーザーレンジスキャナ等の高価な機器を追加搭載することなく、障害物の位置を推定する既存の手法として SLAM がある。しかし、山林地域におけるロープウェイ式害獣検知システムで SLAM を実行すると、あるはずのない位置に特徴点が誤検出されることが多いことが問題となっている。そこで、カメラの移動性能とライトを利用して障害物の存在しない領域を広く求めるアルゴリズムを開発し、誤検出された SLAM の特徴点を特定し、排除することで SLAM の精度を上げる手法を提案した。この障害物の位置推定方式では、あるカメラが他のカメラが発する光を直接撮影できれば、そのカメラ同士の間には障害物がないことが保証されることを利用している。各カメラが移動しながら、様々な地点で、様々なカメラの発光を捉えることで、障害物の存在しない範囲を次々と特定していくことで、障害物の場所を限定していく。このアルゴリズムでは、3 段階のフェーズで障害物の存在領域を推定する。はじめに障害物のおおよその位置を把握するための初期推定フェーズ、次に一方のカメラがロープ上の端点から撮影を行い、障害物の存在範囲を大まかに分割するための端点探索フェーズ、最後に現段階で大まかに推定されている面積を狭めて精度を上げていくための精度向上フェーズを設定する。

## 4. 研究成果

### 4.1 課題 (a) に関して

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他に、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。この実験では、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。この方法は、 $k$ -means 法により最初に集約点を全て決定した後、各集約点をむす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、ロープの長さ制限を超えるロープも出てくるため、その場合には仮の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、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、角度制約を満たすように仮の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。 $40[m] \times 32[m] \times 10.5[m]$  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 それぞれに対し、集約距離係数  $q$  の値を  $q=1, 3/4, 1/2, 1/4$  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。

結果を表 1, 2 に示す。今回想定した監視点を規則正しく配置するマップ 1 と、密の領域を作るように配置するマップ 2 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、期待通り、すべてのノードについて  $q=3/4$  のとき  $2.5[m]$  が保証され、 $q=1/2$  のとき  $5.0[m]$  が保証され、 $q=1/4$  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。

	提案手法			
	1	3/4	1/2	1/4
集約距離係数 q	1	3/4	1/2	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	1.1m	2.9m	5.6m	10.0m
	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	1.3m	3.0m	6.4m	10.0m

表 1 マップ 1 での結果

	提案手法			
	1	3/4	1/2	1/4
集約距離係数 q	1	3/4	1/2	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	1.2m	2.8m	5.9m	9.4m
	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	1.6m	3.2m	6.9m	9.8m

表 2 マップ 2 での結果

#### 4.2 課題 (b) に関して

提案手法による障害物の位置推定の性能を評価するため、実地実験とシミュレーション実験を行った。実地実験では、フリー領域の推定精度および SLAM 誤差軽減度合を評価した。さらに、実地実験と同等の評価をシミュレーションで実行可能かどうかを調べるために、実地実験と同環境のシミュレーションを設定し、このシミュレーションによって求められた障害物の存在しない領域（フリー領域）の広さと、SLAM の誤り特徴点の検出数との間の相関を調査した。シミュレーション実験では、実地実験で調査しきれなかった膨大な量の障害物配置パターンで提案手法のフリー領域の推定精度を評価した。

##### 4.2.1 実地実験

実地での撮影においてロープが平行に張られている場合を想定して、ロープの長さを 5m として 5m×5m の平面フィールドを撮影した。ロープは 5m×5m のフィールドの上辺と下辺に設置され、各ロープに 1 台設置されたカメラは左右にのみ移動しながら動画を撮影した。フィールド内の木を障害物とし、木の幹を主な撮影対象とするためシミュレーションでは障害物を円に近似した。この円は各フィールド内の木の幹周を計測し、算出した半径を用いた。各撮影パターンの算出した半径の最大は 0.40m、最小は 0.12m、平均 0.21m となった。シミュレーションでのカメラ同士の識別を行う撮影間隔は 0.25m に設定した。フィールド内の木の本数は 1 本、2 本、3 本の場合の撮影を行った。誤り特徴点の検出数と、フリー領域の面積について、9 パターンのフィールドにおいて相関係数を算出した。その結果、障害物となる木が 1 本のフィールド 3 種で相関係数はそれぞれ 0.952, 0.969, 0.998 となり、木が 2 本のフィールド 3 種で 0.978, 0.946, 0.997, 木が 3 本のフィールド 3 種で 0.952, 0.912, 0.943 といずれの場合も非常に強い相関を示すことが出来た。この実験結果により、その環境を忠実に再現したシミュレーションが算出したフリー領域の面積と、撮影動画による SLAM の誤り特徴点の検出数との間に、強い相関があることを示すことができた。したがって SLAM の誤り特徴点の検出数を、フリー領域の面積に置き換えたシミュレーション評価に一定の有効性があることが示された。

##### 4.2.2 シミュレーション実験

提案手法によるフリー領域の推定精度を評価するために、シミュレーション実験を行った。2 本のロープが張られており、障害物は木の幹を対象にして二次元空間で円に近似した。ランダムに木の個数と位置、半径を決定し、二次元座標空間に配置した。提案手法を用いることで障害物の位置とフリー領域の面積を推定した。提案手法の 3 つのフェーズそれぞれの段階での探索時間、撮影回数、フリー領域の推定精度を表にまとめて比較することで、提案手法の有効性とどのフェーズが有効であるか評価する。また、ロープのなす角による探索時間と推定精度の違いも比較する。

ロープの長さを 5m とし、ロープとロープの成す角度を 0 度から 90 度の間で 15 度ずつ設定した。障害物の木については、小さく細いものから大きく太いものまで十分にあり得るが、実際の杉林などを参考に半径が 0.25m から 0.50m の間でランダムとした。木はロープに被ら

ないような配置で、1 から 4 本に設定してそれぞれの結果を出した。また、隣り合う撮影点の間隔が障害物の直径より極端に大きい場合、初期推定フェーズで障害物の位置が全く判別できない可能性がある。それを防ぐため、隣り合う撮影点の間隔が 0.25m となるように、撮影点をそれぞれ 21 点に設定した。さらに探索時間を決定するためにカメラの移動速度を 1.0m/s、撮影と認識にかかる時間を合計で 1.0s とした。フリー領域の推定精度は次の式に従って算出した。この値が 100(%) に近づくほど推定精度が良いと言える。

$$\text{Accuracy} = \frac{A - \sum_{i=1}^n E_i}{A - \sum_{i=1}^n S_i} * 100$$

$E_i$  : 障害物  $O_i$  の推定面積  
 $S_i$  : 障害物  $O_i$  の実際の面積  
 $A$  : 撮影領域全体の面積

	初期推定	端点探索	精度向上
平均 探索時間	26(秒)	94.05(秒)	117.51(秒)
平均 撮影回数	21(回)	71.72(回)	85.24(回)
平均 推定精度	78.23(%)	96.11(%)	96.32(%)

表 3 障害物数が 1 のときの結果

	初期推定	端点探索	精度向上
平均 探索時間	26(秒)	106.52(秒)	138.94(秒)
平均 撮影回数	21(回)	83.30(回)	99.72(回)
平均 推定精度	64.38(%)	91.89(%)	92.98(%)

表 4 障害物数が 2 のときの結果

	初期推定	端点探索	精度向上
平均 探索時間	26(秒)	113.43(秒)	155.12(秒)
平均 撮影回数	21(回)	89.71(回)	110.23(回)
平均 推定精度	51.99(%)	85.17(%)	88.03(%)

表 5 障害物数が 3 のときの結果

	初期推定	端点探索	精度向上
平均 探索時間	26(秒)	117.03(秒)	166.15(秒)
平均 撮影回数	21(回)	93.07(回)	117.08(回)
平均 推定精度	41.25(%)	76.90(%)	82.14(%)

表 6 障害物数が 4 のときの結果

まずはロープが平行に張られている場合限定し、フェーズごとの有効性について述べる。フィールドに存在する障害物の個数ごとに各フェーズの平均探索時間、平均撮影回数、平均推定精度を表 3 から 6 にかけて示した。各フェーズにおいて、障害物の個数に反して精度が低下することが確認できた。特に初期推定フェーズは障害物の個数の影響を大きく受けた。端点探索フェーズまで実行した結果、木が 1 本の時と 2 本の時は 90%以上の精度でフリー領域を推定できた。しかし、精度向上フェーズまで実行しても向上した精度は良くて 1%程度という結果になった。逆に木が 3 本と 4 本の時は端点探索フェーズまで実行した時 75%から 85%程度の精度となったが、精度向上フェーズまで実行すると 3%から 6%程度向上した。しかしいずれの場合も探索時間に対する精度向上率を考えると、端点探索フェーズまでで探索を終了した方がより少ない探索時間で高い精度を出す要求を満たしていると言える。精度向上フェーズでは撮影点の間隔をさらに細かくすることで今以上に精度向上することも可能だと考えられるが、大きく向上することはなく撮影回数と探索時間がひたすら増加していくことが予想される。

次に、ロープが平行に張られた時(これを 0 度と表現する)だけでなく、ロープのなす角が 15 度、30 度、45 度、60 度、75 度、90 度の時を調査した。いずれの結果においてもロープのなす角が 0 度、15 度、30 度の時に推定精度が良くなっており、それ以降は角度が大きくなるにつれて精度が低下している傾向が見られた。この結果から、ロープを張る際にはロープのなす角が平行から 30 度程度までが障害物位置推定に適していると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 勝間 亮, 小倉 広大	4. 巻 62
2. 論文標題 ローブウェイ式カメラモニタリングにおける効率的なローブの設置場所決定手法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 455-464
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 川濱 悠, 勝間 亮	4. 巻 60
2. 論文標題 カメラでの方角計測による位置推定の精度向上	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1096-1107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kei Nihonyanagi and Ryo Katsuma
2. 発表標題 Reducing Falsely-detected Feature Points of SLAM by Estimating Obstacle-free Area for RCMSs
3. 学会等名 the Third International Workshop on Mobile Ubiquitous Systems, Infrastructures, Communications and Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 二本柳 京, 勝間 亮
2. 発表標題 ローブウェイ式カメラモニタリングにおけるSLAM誤差軽減手法の評価方法に関する検討
3. 学会等名 第28回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 二本柳 京, 勝間 亮, 安本慶一
2. 発表標題 ロープウェイ式モニタリングにおける障害物の存在領域の推定と誤差の補正
3. 学会等名 情報処理学会研究報告, 2019年度情報処理学会関西支部支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中井 若菜, 勝間 亮
2. 発表標題 少数の障害物によるRSSI距離測定誤差に耐性のある室内位置推定手法
3. 学会等名 情報処理学会第27回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二本柳 京, 勝間 亮
2. 発表標題 ロープウェイ式モニタリングにおける障害物位置の簡易的推定
3. 学会等名 2018年度情報処理学会関西支部支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kodai Ogura, Ryo Katsuma
2. 発表標題 Rope Deployment Method for Ropeway-type Vermin Detection Systems
3. 学会等名 The 32nd IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	安本 慶一  (Yasumoto Keiichi)  (40273396)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授   (14603)	2020年度に研究協力者に変更

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	安本 慶一  (Yasumoto Keiichi)  (40273396)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授   (14603)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------