

複数領域を巡回する移動型センサノードのための経路探索手法

中 宮 正 樹^{†1} 寺 田 努^{†2} 西 尾 章 治 郎^{†1}

筆者らはこれまで、従来の移動型センサネットワークの研究では扱われていなかった実運用上の問題を解決するため、コストマップを用いた移動型センサノードのための経路探索手法を提案した。提案手法により、センサのセンシング範囲やノード移動時の障害物、ノードの移動特性および衝突を考慮したノードの経路探索を実現した。本稿では新たに、各ノードが担当するセンシング領域および巡回順序を決定するアルゴリズムを提案する。本稿では、消費電力量の削減およびノード間での消費電力量の平均化を実現するための手法をそれぞれ検討し、さらに提案手法の有効性を確認するためシミュレーションによる最適解との比較評価を行った。

A Route Planning Method for Mobile Nodes Moving Multiple Sensing Areas

MASAKI NAKAMIYA,^{†1} TSUTOMU TERADA^{†2} and SHOJIRO NISHIO ^{†1}

We have proposed a route planning method for mobile sensor nodes using *cost map*. The proposed method achieves a novel path planning that can solve several practical problems in previous works: the limitations of sensing areas, barricades on nodes' path, restrictions on nodes' movements, and nodes' collisions. In this research, we propose a route planning method that can decide which sensing areas the node senses and the sensing order simultaneously. We considered two policies: reduction and averaging of nodes' power consumption for moving. Furthermore, we compare the proposed method with optimal methods, and show the effectiveness of the proposed method through software simulations.

1. はじめに

近年のネットワーク技術や無線通信技術の発展、センサデバイスの小型化および高性能化により、センサデバイス自体に無線通信機能をもたせたセンサノードによってネットワークが形成される、センサネットワークの研究が盛んに行われている。最近では、センサノードにアクチュエータを搭載し、自由に移動できるようにした移動型センサノードに関する研究が注目されている⁶⁾。ノードに移動性をもたせることで、センシングデータ要求の動的な変化に対応でき、人が近づけない危険地帯や人の手が届きにくい場所などへのノード配置も可能となる。

筆者らはこれまでに、移動型センサノードを用いた従来研究では考慮されていなかった実用上起こりうる問題を解決するために、コストマップを用いた移動型センサノードの経路探索手法²⁾を提案した。提案手法により、センサの種類によるセンシング可能な範囲の

違い、ノード移動時の障害物、およびノードの移動特性を考慮し、ノードが移動に要する消費電力が最小となる経路を探索することが可能となった。さらに、複数ノードのための経路探索手法³⁾を提案し、ノード同士の衝突を回避する経路の探索を実現した。

しかし、これまでの手法ではノードが1箇所のセンシング領域を継続的にセンシングすることを想定しており、複数領域のセンシングには対応していなかった。複数箇所のセンシング領域に対して複数の移動型ノードを利用してセンシングを行う場合、ノードが搭載するセンサの種類を考慮した上でどのノードがどのセンシング領域を担当するか、さらにどのような順序でセンシングを行うかを決定する必要がある。このような問題は、複数のセールスマンが複数箇所の地点をただ一回ずつ全て巡るときの移動経路を求める複数巡回セールスマン問題 (MTSP) に類似している。複数巡回セールスマン問題は、セールスマンが一人の場合の巡回セールスマン問題と同様に NP 困難な問題であるが、実際の環境に応用できるアプリケーションが多岐に渡ることから、少ない計算量で近似的に最適解を求めるための手法がこれまでに数多く提案されてきた。従来手法では、セールスマンの総移動距離の削減またはセールスマン同士の移動距離の均等化のいずれかを目的とするものが多い。しかし、一般的な複数巡

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻
Department of Multimedia Engineering, Graduate
School of Information Science and Technology, Osaka
University, Japan

^{†2} 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University

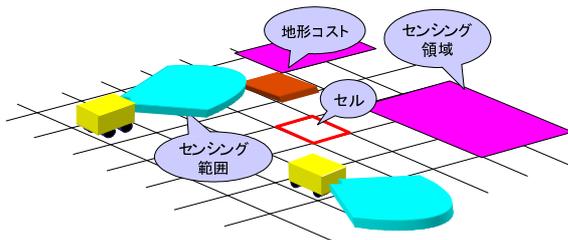


図1 フィールドマップ

回セールスマン問題ではいずれかのセールスマンがただ一度指定された地点を巡ればよいが、本研究で想定する環境ではノードが搭載するセンサの種類によりセンシングできる領域が異なる。さらに、移動に影響を及ぼす凹凸のある地面や壁といった経路上の障害物を考慮しなければならない。以上の理由から従来手法をそのまま適用することはできない。

そこで本研究では、ノードが担当するセンシング領域および巡回順序を決定し、消費電力量の削減および平均化という2つの要件を実現する経路探索手法をそれぞれ提案する。本研究では、消費電力量の平均または消費電力量のノード間での標準偏差、および計算量に関してシミュレーションによる最適解との比較を行い、提案手法は計算量を大幅に削減しながらも最適解に近い経路が探索できていることを示す。

以下、2章で想定環境について述べ、3章で先行研究である移動経路探索手法について簡単に述べる。4章で提案手法およびシミュレーションによる性能評価について詳述し、5章で考察を行い、6章で結論と今後の課題について述べる。

2. 想定環境

本研究では、ビル内や地下鉄の構内などの地形が変化しない静的な環境におけるセンシングを想定し、地形の情報は図1に示すような2次元格子状に区切られたフィールドマップとしてあらかじめ与えられているものとする。フィールドマップの1つの格子を本研究ではセルと呼び、セル毎に、凹凸の多い地面や障害物といったノードの移動に影響を及ぼす情報が、地形コストとして設定されている。このような状況において、ノードの移動を制御するサーバに対してユーザから単一ノードではまかなえないような複数箇所での広範囲に渡るセンシングデータの要求があり、要求に対して多種のノードを複数台使用して協調的にセンシングを行うよう経路を指示する。移動型ノードを用いたセンサネットワークではノードが移動する際の消費電力を低く抑えることが重要であることから、本研究ではノードの消費電力をコストと定義し、コストの削減を第1の目的とする。さらに、実運用を考える上では単純にコストを削減するだけでなく、ネットワーク全体のライフタイムを長くするためにノード間の移

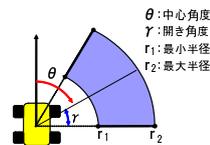


図2 センシングモデル

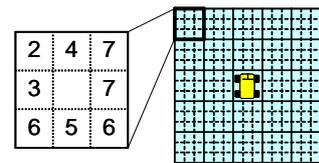


図3 ベースコスト

動コストの偏りを小さくすることも重要となる。そこで本研究ではノード間のコスト平均化を第2の目的とし、これら2つの要件を満たす手法をそれぞれ提案する。

移動型センサネットワークで使用するノードの種類としては、車型ノードや2足歩行型ノードなど様々な種類が考えられる。それぞれ移動方法に特性をもち有利な環境が異なるため、移動型センサネットワークでは同じ種類のノードを複数台利用するのではなく、様々な種類のノードを併用してセンシングすることが望ましい。また、最近は様々なセンサが日常生活で利用されており、センサネットワークにおいても、ユーザが知りたい情報により使用するセンサが異なるため、ノードに多種のセンサを搭載することが望ましい。このような観点から、本研究では多種のセンサを複数搭載し、多種の移動特性をもつノードを併用してセンシングを行う環境を想定する。

3. コストマップを用いた経路探索手法

提案手法におけるセンシング領域間の経路探索には、筆者らがこれまでに提案したコストマップを用いた移動型センサノードのための経路探索手法を用いる。

3.1 センシングモデル

センサネットワークではユーザの要求に応じるために様々な種類のセンサの利用が考えられ、温度センサのようにセンシング可能な範囲が円形で表されるセンサだけでなく焦電型赤外線センサのようにセンシング範囲に指向性があるセンサに対応する手法が必要となる。本手法では、センサのセンシング範囲を図2に示すように4つのパラメータで定義する。ノードは、このセンシングモデルにより定義された範囲とセンシング領域が重なる位置および方向で静止してセンシングを行う。

3.2 経路探索アルゴリズム

戦車型や車型、2足歩行型といった様々な種類のノードを併用してセンシングを行うためには、例えば車型ノードは90度方向へ移動するために前後動を繰り返す必要があるといった移動特性を考慮した移動経路を探索する必要がある。従来手法では経路探索を行う前に、ノードが周辺のセルへの移動する際に要する実際の消費電力、ベースコスト(図3)を測定する。ここでベースコストの測定においてはノードの向く方向別に移動コストを区別する。例えば左上のセルへ移動した後に上方向を向くよう移動する場合のコストは4とな

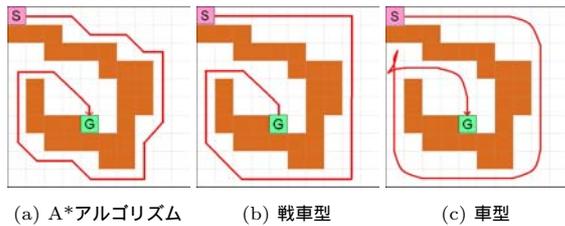


図 4 経路探索結果例

る。この局所的な移動コストの情報であるベースコスト、および地形コストの情報を用いてノードの予測移動コストを示すコストマップを作成することで、経路上の障害物及びノードの移動特性を考慮した経路探索が可能となる。また、通過時間を同時に計算することでノード同士の衝突を回避する。具体的には、衝突する直前で停止する経路および迂回する経路の両方を同時に探索し、最終的に移動コストがより小さい経路を選択する。

3.3 従来手法における経路探索結果の比較

図 4 に、人工知能の分野で経路探索に広く使用されている A* アルゴリズム、戦車型ノードを想定した提案アルゴリズム、および車型ノードを想定した提案アルゴリズムによる経路探索結果の一例を示す。A* アルゴリズム (図 4(a)) はゴール地点までの最短経路を求めるが、最短経路が複数ある場合、ゴール地点により早く近づく経路を優先的に選択するため、このように方向転換の回数が多い移動経路が得られる場合がある。しかし戦車型ノードは方向転換ごとに停車、旋回、前進を行うため、方向転換が少ない場合に比べて消費電力が増加したり、ノードの移動誤差により指定された経路から外れやすくなる。提案アルゴリズムで戦車型ノードを想定した結果 (図 4(b)) では A* アルゴリズムの結果と比べて、方向転換の回数が少ない経路が探索されていることがわかる。これは、提案アルゴリズムでは経路探索前に実際のベースコストを測定しており、方向転換に消費する電力を考慮した経路探索を行うためである。車型ノードを想定した場合 (図 4(c))、広い道での曲がり角では、緩やかな曲線を描きながら 90° 右方向へ曲がっているが、狭い道では、いったん曲がり角を通過して停車後、後退しながら進行方向に向き、前進するという経路が選択されている。これは、車型ノードが進行方向から見て 90° 方向へは移動できないという移動特性が考慮されていることを意味する。

4. センシング順序決定アルゴリズム

複数台の移動型ノードを用いて複数領域をセンシングする場合、ノードが担当するセンシング領域および巡回順序を決定しなければならない。本研究ではノードの総移動コストの削減およびノード間での移動コス

トのばらつき低減を目的とし、総移動コスト削減を目的とした手法として最小コスト逐次選択 (LCS: Least Cost Selection) 法を、移動コストの平均化を目的とした手法として、センシング領域入替え (SAE: Sensing Area Exchange) 法をそれぞれ提案する。なお、センシング領域はいずれかのノードが一度巡ることによってセンシングが完了するものとする。

4.1 最小コスト逐次選択法

ノードの総移動コストを削減するために、現在地から各センシング領域までの移動コストを計算し、全ノードの中で移動コストが最小であるノードを該当するセンシング領域へ逐次的に移動させていく。具体的には以下の手順にそってノードの現在地および未訪問であるセンシング領域までの移動コストを更新しながら、ノードが担当するセンシング領域および巡回順序を同時に決定する。

Step1 全ノードについて、初期配置位置からノードが搭載するセンサの種類が同じセンシング領域までの移動コストを前述した経路探索アルゴリズムにより求める。

Step2 計算済みの移動コストの中から最小となる経路をもつノードに注目し、ノードの現在地を該当するセンシング領域に更新する。

Step3 センシングされていない領域が残っている場合、Step2 で現在地を更新したノードについて、移動後の位置から未訪問である領域までの移動コストを経路探索アルゴリズムにより求め、Step2 へ戻る。全センシング領域が訪問されていれば終了する。

4.2 センシング領域入替え法

Franca らは実環境における複数巡回セールスマン問題を解決するために、移動経路長が最大であるセールスマンの移動距離を短くすることが有効であり、ノード間の移動コストの平均化および総移動コストの削減を実現できると述べている¹⁾。そこで本研究においても移動コストが最大であるノードの移動コストを削減する手法を提案する。具体的には、ノード間で担当するセンシング領域の入替えを行うことで総移動コストを削減しつつ移動コストを平均化していく。あらかじめ担当するセンシング領域のパターンごとに移動コストが最小となる巡回順序を近似的に求めておき、担当領域を入れ替えることで削減される移動コストが大きくなるようセンシング領域の入替えを行う。具体的な手順を以下に示す。

Step0-1 全センシング領域間について前述したアルゴリズムを用いて経路探索を行い、移動コストを計算する。

Step0-2 Step0-1 で算出した領域間の移動コストの値を利用し、ノードと担当するセンシング領域のパターン毎に移動コストが最小となる巡回順序を総当り計算により求め、情報を保持しておく。

Step1 ノード毎に担当するセンシング領域をランダ

ノード	種類	センサ
1	戦車型	温度, 湿度
2	戦車型	温度, 赤外線
3	戦車型	温度, 照度
4	車型	湿度, 赤外線
5	車型	湿度, 照度
6	車型	照度, 赤外線

ムに決定する。

Step2 Step0-2 において保持した情報から、ノード毎に移動コストが最小となる巡回順序を決定し、移動コストが大きい順にノードをソートする。

Step3 移動コストが最大であるノードが担当する全てのセンシング領域について、種類が同じセンサを搭載するノードの中で移動コストが最小であるノードに担当させることで削減される移動コストの期待値を計算する。

Step4 期待値が最大となるセンシング領域を交換した後に移動コストの標準偏差が減少する場合、該当するセンシング領域の担当ノードを入れ替えて Step2 へ戻る。標準偏差の値が増加する場合は Step5 へ進む。

Step5 決定した担当センシング領域および巡回順序に従って、衝突を考慮した経路探索アルゴリズムにより移動経路を求める。

4.3 最適解との比較評価

提案手法を評価するためにシミュレーションを行った。地形コストは、壁などのノードが通過できない障害物を想定し、コストが無限大のものを配置した。使用するセンサはセンシング可能な範囲が一般的に円形で表現される温度センサと湿度センサ、扇形で表現される焦電型赤外線センサと照度センサの 4 種類を想定した。ノードは、前進、後退、旋回を行う戦車型ノードと、前輪で角度をつけて前進、後退を行う車型ノードの 2 種類を考える。実際に LEGO 社 MindStorm を用いてこれら 2 種類のノードを製作し、図 5, 6 に示す 3×3 セルのベースコストをあらかじめ測定して経路探索を行った。なお、図 5, 6 はノードが上向きの場合に利用するベースコストであり、ノードが斜め向きの場合のベースコストも測定している。戦車型ノードおよび車型ノードをそれぞれ 3 台ずつ使用し、表 1 に示すようにセンサを 2 種類ずつ搭載してセンシングを行うものとした。フィールドマップにおける 1 つのセルの大きさは実際に作成したノードの大きさ相当とし、20cm 四方とする。このような環境において、1 種類のセンサにつき 5 箇所ずつ計 20 箇所のセンシング領域がランダムに指定されているとする。なお、センシング領域は全て 3 セル四方とし、ノードが搭載するセンサのセンシング可能な範囲の一部がセンシング領域と重なれば良いものとする。

最小コスト逐次選択法の比較対象として、総当り計

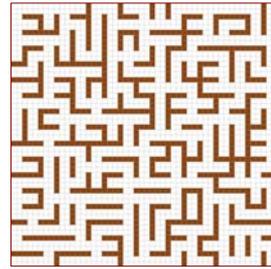


図 7 シミュレーション環境

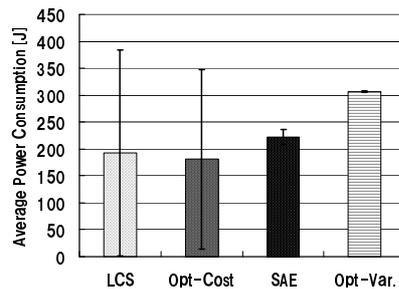


図 8 平均消費電力量および標準偏差

	最悪計算量	実際に要した時間
LCS	$O(m^2)$	1 分
Opt-Cost	$O(n^m)$	28 日
SAE	$O(nm!)$	5 分 20 秒
Opt-Var.	$O(n^m m!)$	約 132 日

マシン名	DELL PowerEdge 1950
CPU	Intel Xeon 5140 (2.33GHz)
メモリ	DDR2 4GB

算により移動コストが最小となる経路を探索した最適解 (Opt-Cost: Optimal Cost) を使用した。最適解を求めるに当たり担当するセンシング領域パターン毎に移動コストが最小となる巡回順序をあらかじめ求めておき、ノードが担当するセンシング領域の全組合せについて総移動コストを計算していく。また、移動コスト平均化を目的とした最適解を総当り計算により求めるためには、担当領域のパターン毎に全てのセンシング順序の移動コストを算出し、それらの全ての組合せについて調べる必要があり、現実的な時間で計算を終わらせることは不可能である。実際にセンシング領域 20 箇所を 6 台のノードを用いてセンシングする想定では計算に約 132 日の時間を要する。そこで本稿ではコスト差補填法の比較対象として、部分的に総当り計算を行い標準偏差が 1 以下となるパターンの中で消費電力量が最小となる部分的最適解 (Opt-Var: Optimal Variance) を使用した。

図 7 に示すように地形コストを迷路型に配置した

5.3	7.2	7.7	5.0	3.1	5.0	7.7	7.2	5.3
7.2	8.3	5.5	5.5	8.3	7.2			
7.7	8.3	6.4	6.0	6.2	6.0	6.4	8.3	7.7
7.0	7.5	7.0	1.9	0.0	1.9	7.0	7.5	7.0
5.2	5.2	2.4	2.4	5.2	5.2			
7.0	7.5	7.0	2.9	3.4	2.9	7.0	7.5	7.0
7.7	7.2	5.4	5.0	3.1	5.0	5.4	7.2	7.7
8.3	7.2	5.5	5.5	7.2	8.3			
6.4	8.3	7.7	6.0	6.2	6.0	7.7	8.3	6.4

図 5 ベースコスト (戦車型)

2.2	5.9	6.9	4.9	1.2	4.9	6.9	5.9	2.2
4.3	6.0	5.1	5.1	6.0	4.3			
7.2	8.6	7.3	6.1	7.0	6.1	7.3	8.6	7.2
5.5	7.5	3.4	3.7	0.0	3.7	3.4	7.5	5.5
5.5	7.4	3.5	3.5	7.4	5.5			
9.6	9.5	10.0	7.7	7.9	7.7	10.0	9.5	9.6
6.5	5.9	4.9	1.8	1.2	1.8	4.9	5.9	6.5
3.9	4.3	5.1	5.1	4.3	3.9			
11.6	10.2	8.0	5.3	8.7	5.3	8.0	10.2	11.6

図 6 ベースコスト (車型)

12m 四方のフィールドにおけるセンシングを想定してシミュレーションを行った。シミュレーションにより得られたノードの平均移動コストおよび標準偏差の結果を図 8 に示す。またそれぞれの手法の計算オーダおよび実際のシミュレーションに要した時間を表 2 に示す。ここで表 2 において n はセンシングに使用するノード数を、 m はセンシング領域数を表す。なお、シミュレーションに使用したマシンのスペックは表 3 の通りである。移動コストの削減を目的とした LCS 法について、最適解である Opt-Cost からの増加率を 6.3% 程度に抑えながら計算量を大幅に削減できている。緊急な場合など実環境においては計算時間の増加が問題となることから、提案手法である LCS 法は有効であるといえる。

移動コストの平均化を目的とした SAE 法について、LCS 法と比較して消費電力量が約 5% 増加しているものの、LCS 法では消費電力量が最大であるノードは最小である移動ノードの約 7 倍の電力を消費するのが、SAE 法では約 1.5 倍に収まっており、ノード間における消費電力量のばらつきを低減できている。平均化の最適解である Opt-Var. は標準偏差をほぼ 0 に抑えることができているが、消費電力量が大幅に増加している。各ノードが担当するセンシング領域のあるパターンにおいて平均化を行うためには、最小で巡回した場合の消費電力量が最大であるノードに対し、他のノードはセンシングを行う順序を入れ替えることで消費電力量を近づける必要がある。さらに、平均化の最適解を求めるためにはノードが担当するセンシング領域の全パターン毎に、通りうる全ての巡回順序について消費電力量を計算する必要があるため膨大な計算量を要する。以上の考察より、SAE 法は現実的な時間内でノード間の移動コストのばらつきを抑える経路を探索するという目的に対し有効であるといえる。

5. 考 察

5.1 センシングの時間制約への対応

筆者らがこれまでに提案した移動型ノードのための問合せ言語を用いることで、ユーザはセンシングの条件としてセンシングしたい場所、センサの種類および

精度を指定できる。実運用を考える上ではセンシング時間に制約がある要求にも対応する必要がある。具体的な解決策として、LCS 法では全ノードの経路が決定した後時間制約を満たしていないセンシング領域の巡回順序を入れ替えたり、SAE 法ではあらかじめ担当するセンシング領域の集合毎に移動コストが最小となる巡回順序を近似的に求める際に、時間制約を考慮した上で最小コストで回る巡回順序とするといった方法を検討している。

5.2 データ転送

現在は、ノードがセンシング領域に到達することでセンシングが完了するものとしている。実際には、センサデータをデータセンタに集約させる必要がある。ノードが多数存在する環境であればセンシング領域からデータセンタまでノードを配置してマルチホップ通信を用いてデータ転送を行えるが、ノードが疎な環境ではノード自身がデータセンタに戻る必要がある。そこで LCS 法では次のセンシング領域までだけでなくデータセンタまでの移動コストを加算した値を用いて次の移動先を決定することを考えている。また SAE 法に対しては、あらかじめ担当するセンシング領域の集合毎に移動コストが最小となる巡回順序を近似的に求める際にデータセンタまでの移動を考慮すればよい。

5.3 定常的巡回への対応

センシング領域について、一度センシングを行えば良いという要求を想定している。今後は一定時間おきにセンサデータが欲しいといったセンシング要求に対応しなければならない。対応するに当たり、既に述べた時間制限およびデータセンタへの移動も同時に考慮する必要がある。特にセンシング時間に制約のある要求が含まれている場合、問題はさらに複雑になり、現在、解決手法を検討中である。

5.4 考慮できていない実用上の問題

実機は、本稿で提案したアルゴリズムにより得られた経路に沿って移動する際に、タイヤのスリップや地形の細かい変化、さらには使用するノード自体の動作精度の低さにより、指定された経路と実際にノードが通過する経路に誤差が生じる。そのため、ノードの位置を推定し、移動誤差が生じていれば指定された経路

上へノードを移動させなければならない。ノードの位置推定の手法としては、加速度センサやジャイロセンサといった内界センサを利用するデッドレコニングと、カメラなどの外界センサを用いる手法に大別できる。外界センサは一般的に高価であり、センサの分解能やノイズ等により誤差が常に生じる恐れがある。一方、内界センサはノードに複数搭載することでより高い精度の位置推定が可能となるが、ノードが大型になったり高価になる。

ノードの位置推定に関しては、複数の光学マウスセンサを利用して移動距離を調節床面から読み取ることによって位置推定を行う研究⁴⁾がなされており、車輪の変形やスリップの影響をなるべく受けない高精度のデッドレコニングを実現している。そこで、本研究においてもノードに安価な内界センサを搭載することを考えている。

5.5 関連研究

本研究で想定するように、複数の移動物体が複数個の定められた地点を全てかつ、いずれかの移動物体がただ一度巡るといった問題は複数巡回セールスマン問題 (MTSP) と呼ばれ、NP 困難な組合せ最適化問題である。複数巡回セールスマン問題には、スクールバス巡回問題やピックアップ&デリバリー問題、支店の預金を収集する銀行員のスケジューリング問題といったような実際に応用できるアプリケーションが数多く存在することから、少ない計算量で近似的な最適解を求める手法がこれまでも数多く考えられてきた。

小野⁵⁾らは c-means クラスタリングによる帰属度を用いてセールスマンに対応させたクラスターを形成し、帰属する都市を球つきの要領で入れ替えていく事で経路を作成する発見的解法を提案している。計算量が小さく、1000 都市程度の問題であっても実用的な時間で解を得る事ができ、各セールスマンの移動経路長の均等化を実現している。しかし、本研究では移動経路上に凹凸のある地面や壁がある環境を想定しているため、都市からクラスター中心までの距離が短いほど都市の帰属度を高く設定する小野らの手法をそのまま適用すると、移動コストを余分に消費する経路が選択される場合がある。

Somhom⁷⁾らは、ニューラルネットワークである自己組織化マップを複数巡回セールスマン問題に応用し、移動距離が最大であるセールスマンの移動距離を短縮することで総移動距離およびノード間のばらつきを低減する手法を提案している。セールスマンの巡回経路 (リング) を複数の点 (ノード) の集まりで表現し、都市に最も近いノードを都市の方向へ徐々に移動させていくことで最終的に巡回経路を得ている。しかし、上で述べたように本研究では移動経路上に凹凸のある地面や壁がある環境を想定しているため、得られた経路通りにノードが移動すると余分に移動コストを消費する場合がある。

6. ま と め

本研究では筆者らがこれまでに提案した手法では考慮できなかった、複数領域センシングに対応する手法を提案した。具体的には、移動コストを削減することを目的とした最小コスト逐次選択法およびノード間の移動コスト平均化を目的としたセンシング領域入替え法を提案し、シミュレーションにより最適解との比較を行い、提案手法は計算量を大幅に削減しつつも有効であることを示した。

今後は時間制約のあるセンシング要求、データセンタへのノードの移動を含めた定常的巡回に対応する手法、およびそれに適応するよう移動型ノードのための問合せ言語を拡張、さらには実際のノードを用いたシミュレーション結果の検証を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省基盤研究 (A)(17200006) の研究助成によるものである。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) P. M. Franca, A. Gendreau, G. Laporte, F.M.Muller, "The m-travelling salesman problem with minmax objective." Transactions of Science, Vol.29, No.3, pp.267-275, 1995.
- 2) 中宮正樹, 岸野泰恵, 寺田 努, 西尾章治郎, "コストマップを用いた移動型センサノードの経路探索手法," 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.3 (2008 年, 掲載決定).
- 3) 中宮正樹, 岸野泰恵, 寺田 努, 西尾章治郎, "移動型センサネットワークにおける複数ノードのための経路探索手法," 電子情報通信学会データ工学ワークショップ論文集 (DEWS 2007), May 2007.
- 4) 関森大輔, 宮崎文夫, "複数の光学マウスセンサを用いた移動ロボットのデッドレコニング," 計測自動制御学会論文集, Vol.41, No.10, pp.775-782, Oct. 2005.
- 5) 小野 勉, 金川明弘, 高橋浩光, "c-means クラスタリングを用いた複数デポ巡回セールスマン問題の発見的解法," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-A, No.7, pp.938-948, 2004.
- 6) G.T.Sibley, M.H.Rahimi, and G.S.Sukhatme, "Robomote: A tiny mobile robot platform for large-scale ad-hoc sensor networks," Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2002), pp.1143-1148, May 2002.
- 7) S.Somhom, A.Modares, T.Enkawa, "Competition-based neural network for the multiple traveling salesman problem with minmax objective," Computers and Operation Research, Vol. 26, No.4, pp.395-407, 1999.