

ボロノイ図を用いた移動センサノードのための巡回経路探索 アルゴリズムの提案

山本 真也^{1,a)} 勝間 亮^{2,b)}

概要：スマートホームやスマートオフィスなどの間取り図と、そこに固定配置されたセンサの数と配置が既知である環境において、移動センサノードを用いることで固定配置されたセンサでは観測できない領域に移動し環境情報をセンシングしたり、物理的にネットワークから分断されたセンサからセンシング情報を収集したり、監視カメラでモニタリングできない範囲を警らしたりすることができる。本研究では、これら複数のタスクを一つの移動ノードに集約して、一度の巡回で複数のタスクを解決できるように効率化したシステムを提案する。さらに、間取り図やセンサ配置図から生成したボロノイ図によって効率的な巡回経路を決定するための経路探索アルゴリズムを提案する。

A Patrol Route Search Algorithm for Mobile Sensor Nodes with Voronoi Diagram

SHINYA YAMAMOTO^{1,a)} Ryo KATSUMA^{2,b)}

1. はじめに

近年、掃除ロボットの普及をはじめとして、ユビキタスコンピューティングやセンサネットワークなどの分野において、自律に動作する移動ノードが一般的なものとなった。この移動ノードは、固定配置されたセンサでは観測できない領域に移動し環境情報をセンシングしたり、物理的にネットワークから分断されたセンサからセンシング情報を収集したり、監視カメラの観測できない領域を警らしたり、掃除ロボットのように特定のタスクを解決したりすることを目的とする。今後、各種情報家電の自動制御、環境モニタリングをはじめとして、様々な目的を持ったアプリケーションがホームサーバで複数同時に稼働することが予想される。このような環境において、複数のアプリケーションが移動ノードを動作させることを想定したとき、アプリケーションごとに使用する移動ノードが決まっている場合には、特定のタスクをスケジュール通りに解決するた

めだけの移動ノードが数多く導入されることになる。このような状況は、待機状態では移動ノードを持って余し、稼働状態では複数の移動ノードがそれぞれの別の目的を持って所狭しと稼働することになり、好ましくない。また、1台の移動ノードを複数のアプリケーションで共有する場合には、それぞれのアプリケーションが目的を達成するために移動ノードを占有して動作させてしまうと、似たような経路を何周も巡回することになり効率が悪い。そこで、本研究では、様々なセンサや無線通信モジュールを備えた複数のタスクを解決できる汎用性の高い多目的移動ノードを1台だけ導入し、一度の巡回で複数のタスクを解決できるシステムを提案する。また、その際の移動ノードの経路を効率的に生成する移動ノード経路探索アルゴリズムを提案する。提案システムは、アプリケーションからタスクを受信すると、できる限り保留し蓄えておく。あるタスクの解決期限が迫ると、それまでに蓄えられた複数のタスクを一度に解決するための経路をデータベースに蓄えられた対象空間の間取り図やタスク解決に必要なセンサの配置図を用いて経路を生成し、移動ノードへその経路を送信する。移動ノードは、提案システムによって与えられた経路図に基づ

¹ 山陽小野田市立山口東京理科大学

² 大阪府立大学

a) shiny-ya@rs.tusuy.ac.jp

b) katsuma@cs.osakafu-u.ac.jp

き、行動を開始し、タスクの解決を図る。また、このシステムで用いる複数のタスクを解決するための経路を生成する手法として、ポロノイ図を用いた経路探索アルゴリズムを提案する。

2. 関連研究

スマートオフィスなどの情報家電の自動制御が行われる環境ではセンサネットワークにより環境情報を収集することが想定されている [6]。あらかじめ設置された固定センサでは、環境の変化によって求められるセンシング場所や内容が変化したときに対応できないため、一部に移動ノードを用いてセンシングや通信の補助を行う研究が行われている [7]。

移動ノードを使用したセンサネットワークではポロノイ図を利用した研究が多数存在する。Wang らは限られた数の移動ノードでセンシング可能な領域を最大化することを目的とし、ポロノイ図を用いてノードの効率的な配置を決定している [1]。ポロノイ図の境界線付近は他のノードがセンシングできていない可能性が高いため、その周辺にノードを配置することで効率的にセンシング領域を広げている。Ruble らは自律分散処理で通信リンク状況からセンシングできていない領域を推定し、センサを追加すべき位置をポロノイ図を利用して決定している [2]。Habibi らは、あらかじめ決められたセンサの位置と現実に設置されたセンサの位置との差を考慮し、ポロノイ図を用いて設置誤差に対してロバストなセンサ配置を決定している [3]。Zheng らは反射音からオブジェクトの位置を推定するために、ポロノイ図を利用している。音は距離に応じて減衰するため、オブジェクトがどのポロノイ領域に存在するかを目安にして位置推定を行っている [4]。これらのように、計算パワーの乏しいセンサノードでもポロノイ図を生成できるため、通信の中継ができるセンサの位置決定や、ノードの故障の影響を軽減するセンサの補完位置の決定や、オブジェクトの位置推定などの目的のためにポロノイ図が使用されている。

一方、著者らの知る限り、移動ノードの移動経路を決定するための手法でポロノイ図を利用している研究は無い。既存研究では、データを収集するだけの移動シンクノード、あるいはセンシングを行うための移動ノードなど、いずれかのタスクに特化させた移動ノードに対して、用途に応じた適切な移動経路決定方法が取られている [5]。しかし、複数のタスクをもつ移動ノードに対してこれらの手法を単純に組み合わせて適用してしまうと、あるタスクのための移動が完了してから次のタスクのための移動を開始することになり、似た経路を複数回通過するなどの無駄が発生する可能性がある。さらに、計算に必要な情報をタスクごとに他のノードから収集するなどのオーバヘッドの増加により、計算時間が長くなってしまいう問題がある。そのため、

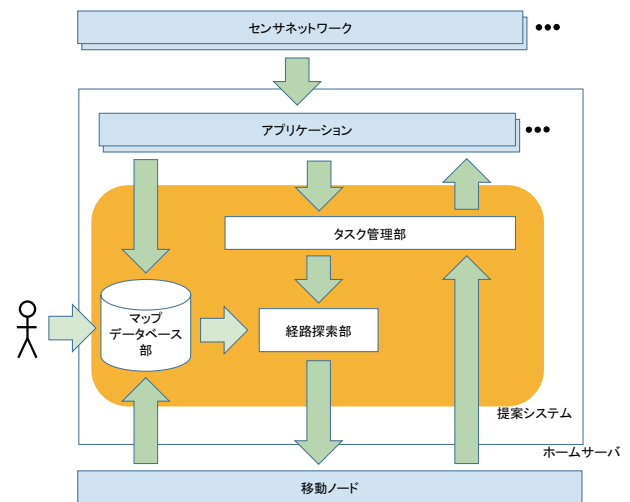


図 1 提案システムの概要

複数のタスクを統合して集約するシステムが必要である。そこで本論文では、自動制御アプリケーションが多数稼動している環境で構築されたセンサネットワークにおいて、複数のタスクを一つの移動ノードに集約して効率化するための新たなシステムを提案する。また、複数のタスクをもつ移動ノードの効率の良い移動経路を短い計算時間で求めるため、ポロノイ図をベースとした移動経路の構築手法を提案する。

3. 提案手法

本章では、まず 3.1 節で提案システムの全体像について述べ、3.2 節で提案システムで用いる経路探索アルゴリズムについて説明する。

3.1 提案システム

想定する環境では、ホームサーバに複数のユビキタスアプリケーションが動作しており、固定配置されたセンサ群からなる 1 つ以上のセンサネットワークが存在すると仮定する。このとき、ユビキタスアプリケーションは、センサネットワークから送られてくる情報を使って動作し、固定配置されたセンサではセンシングできない領域のセンシングなど、任意の目的を達成するために、SLAM [8] や屋内位置推定用マーカ [9], [10] により対象空間において自己位置が推定可能な自律的に動作する移動ノードを用いるものと仮定する。また、移動ノードとホームサーバは、移動ノードが非稼働時に待機するベースステーションでのみ通信可能とする。

従来のユビキタスアプリケーションが移動ノードを必要とする場合、それぞれのアプリケーションがそれぞれ占有する移動ノードをもつことになる。提案システムは、このような複数の移動ノードが別々の目的を達成するために協調なく動作することによる煩雑さを解決することを目的として、各アプリケーションが移動ノードによって解決した

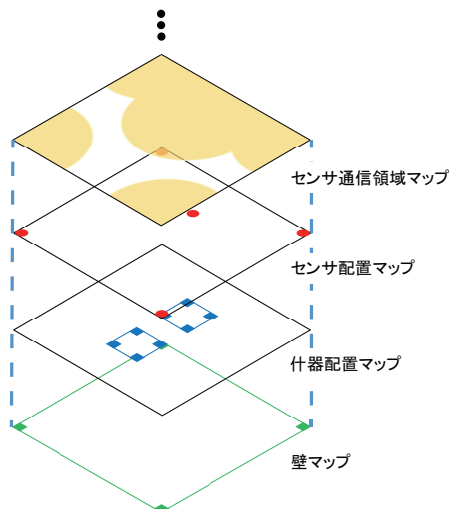


図 2 マップレイヤ

いタスクの集約とそれにもとづく移動ノードの経路を決定する。提案システムの概要図を図 1 に示す。提案システムは、タスク管理部、経路探索部、マップデータベース部からなるものとし、複数のタスクを一度に解決できる 1 台の多目的移動ノードを管理しているものとする。

- タスク管理部は、アプリケーションからタスクとその解決期限が送られてくると、期限を越えない範囲でタスクをバッファする。そして、任意のタスクの解決期限が迫ると、それまでにバッファされたタスクを一度に全て解決するための経路の作成を経路探索部に依頼する。また、移動ノードがタスクを解決し、ベースステーションに戻ってきたとき、移動ノードは、タスクの解決をタスク管理部へと報告する。このとき、データの収集がタスク内容であった場合には、収集したデータをタスク管理部へと送信する。タスクの解決報告と収集データを受け取ったタスク管理部は、それらをそれぞれのタスクを依頼したアプリケーションへと送信する。
- 経路探索部では、タスク管理部からクエリを受け取ると経路作成に必要な対象環境マップをマップデータベース部に問い合わせ、それを用いて 3.2 節の提案アルゴリズムで移動ノードの移動経路を作成する。経路図が作成できたら、それを移動ノードへと送り、移動ノードはタスクの解決を開始する。
- マップデータベース部は、図 2 に示すように、間取り図から壁のみを抽出した壁マップ、什器の位置やサイズをあらわす什器配置マップ、固定配置されたセンサ位置をあらわすセンサ配置マップ、センサの通信可能領域をあらわすセンサ通信可能領域マップなど、表現する種類と目的・用途に応じてタグで分類されたレイヤ構造を持つものとする。マップデータをマップデータベース部に登録する際には、レイヤとして重ね合わせることができるよう縦横比を統一しておくものと

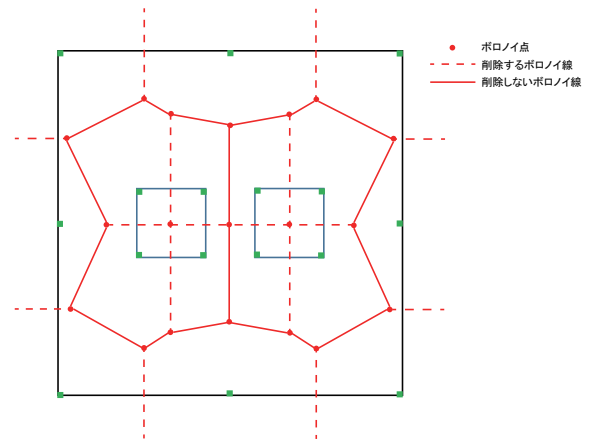


図 3 巡回可能路

し、利用するアプリケーションや用途に応じたタグを付けて保存され、タグによって任意のレイヤだけを取得することができるものとする。

マップデータ $G = \{V, E\}$ は、頂点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ とそれを結ぶ線分集合 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ からなるシンプルなベクトルデータであるとする。このとき、頂点集合 V のみからなり、線分集合 E を持たないマップ \bar{G} も存在するものとする。このマップデータは、自己位置推定システム SLAM [8] を応用し、位置推定のために生成した環境マップを間取り図に変換したり、著者らが提案する間取り図自動作成システム [11], [12] を用いたりすることで移動ノードで自動作成することができ、フォーマットに則っていれば手動で作成することも可能であると仮定する。これによって、さまざまな移動ノードにおける性能・機能の違いを乗り越え、マップを手軽に共有・修正・更新を行うことができる。

センサの数・配置、間取りの変更など環境の変化に対応するため、各アプリケーションや移動ノードからもアクセス可能であるとし、ユーザが手動で更新することも可能とする。

3.2 経路探索アルゴリズム

提案システムでは、移動ノードの経路探索アルゴリズムとして、目的・用途別にレイヤ分割したマップからボロノイ図を作成し、それらを重ね合わせることで、ボロノイ線による経路を算出する手法を提案する。提案手法は、巡回可能路決定フェイズ、通過点決定フェイズ、走行経路決定フェイズの 3 つのフェイズからなる。

巡回可能路決定フェイズ

移動ノードの走行経路を決定するための準備として、移動ノードが巡回走行可能な通路を算出する。マップデータベース部から間取り図から壁のみを抽出した壁マップ $G_w = \{V_w, E_w\}$ と什器配置マップ $G_f = \{V_f, E_f\}$ を取得

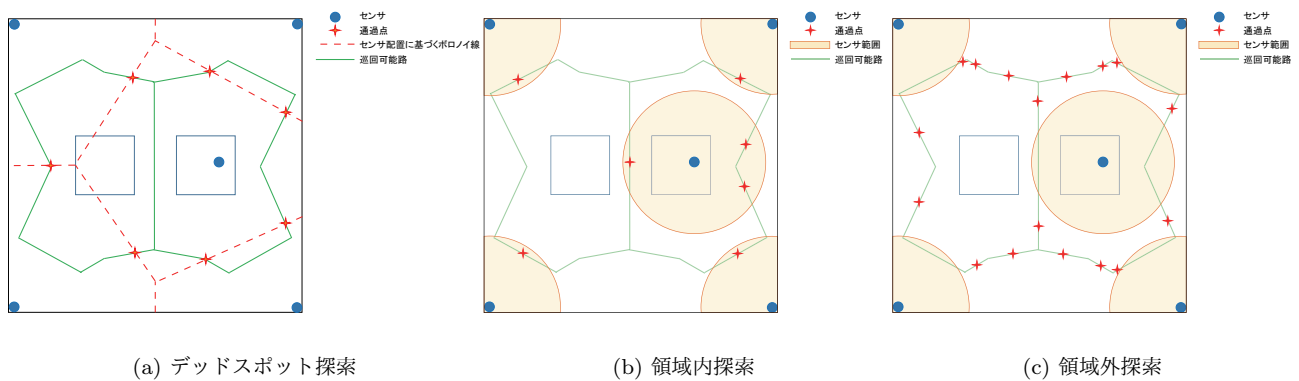


図 4 通過点の決定法

し、重ね合わせ、フロアマップ $G_r = G_w \cup G_f$ を作成する。それらから頂点集合 V_r と線分集合 E_r を取り出す。このとき、簡略化するため、什器が矩形でない場合には、それを内包する最小の矩形の頂点と線分を什器として扱う。また、什器が配置されていない場合では、対象空間の中央に頂点を置き、仮想的な什器として扱うこととする。次に、 V_r を母点するボロノイ図を作成し、そのボロノイ線の集合からマップから取り出した線分集合と交点を持つボロノイ線を削除する。これによって、ボロノイ図が母点間の垂直二等分線の集合からなるという特性上、壁と什器の間を通る通路の一部である線分集合 E_p とそれをなす頂点集合 V_p を抽出することができる。このようにして、生成した線分集合 E_p が閉じているとき、 E_p は、移動ノードが巡回可能な経路の集合としてみなすことができる。もし、 E_p が閉じていない場合には、壁や什器を内包する長方形の線分集合 E_r について、それぞれの線分 e_r の中点を新たに頂点として、 V_r に追加し、 V_p が閉じた線分集合になるまで繰り返す (図 3)。このようにして生成された V_p を巡回可能点、 E_p を巡回可能路、 E_p と V_p からなるマップ G_p を、巡回可能マップと呼ぶ。

通過点決定フェイズ

通過点決定フェイズでは、タスクを解決するために通過すべき地点の導出を行う。このフェイズでは、まず、センサ配置マップやセンサ通信可能領域マップなど目的に応じたマップをマップデータベース部から取得する。このとき、移動ノードを利用する目的には、おおまかに、温度センサなどの観測領域が任意の点であり、精度を高めるためになるべくセンサから離れた領域のセンシングを試みる場合 (以後、デッドスポット探索と呼ぶ)、ネットワークから分断されたセンサのデータを収集するなどの、センサがもつ領域内に移動ノードを移動させ、通信を試みる場合 (領域内探索)、監視カメラでは観測できない領域を移動ノードによって定期的に警らするなどの、センサがもつ領域外に移動ノードを移動させ、センサのカバレッジを拡大したい場合 (領域外探索)、の 3 つに分けられるものとする。デッ

ドスポット探索では、移動ノードを使って観測精度を向上させるためには、なるべく固定配置されたセンサから離れた位置に移動ノードを移動させ、その領域を観測することが望ましい。領域内探索では、固定配置されたセンサの通信可能領域内に移動ノードを移動させる必要がある。領域外探索では、固定配置されたセンサの観測領域をできる限り避けることが望ましい。これらの要件を満たす経路を決定するために、タスクを解決するために通過すべき点 (以後、通過点と呼ぶ) を生成する。

まず、デッドスポット探索における通過点の決定法について説明する。このパターンでは、センサ配置マップ $G_{sp} = \{sp_1, sp_2, \dots, sp_n\}$ からセンサ位置を母点とするボロノイ図 $G_{sp_v} = \{V_{sp_v}, E_{sp_v}\}$ を生成する。このとき、ボロノイ線 E_{sp_v} は固定配置された各センサから離れた位置の集合をあらわし、特にボロノイ点 V_{sp_v} はどのセンサからも、もっとも遠い位置をあらわすことになる。このボロノイ図 G_{sp_v} を図 4(a) のように、巡回可能マップ G_p と重ね合わせると、2つのマップにおける線分集合からなる交点はセンサから遠く、かつ、ノードが移動可能な地点となる。これを通過点 v_{pp} とし、これらの集合を通過点集合 V_{pp} とする。このとき、センサ配置マップ G_{sp} から生成されたボロノイ点 V_{sp_v} と巡回可能マップの頂点 V_p を新たな線分で結び、それが壁や什器をあらわす線分集合 V_r との交点を持たないとき、それらを巡回可能点 V_p 、巡回可能路 E_p 、通過点集合 V_{pp} に追加することができる。

領域内探索では、図 4(b) のように、対象となるセンサの領域マップ $G_{sr} = \{V_{sr}, E_{sr}\}$ と巡回可能マップ G_p を重ね合わせる。このとき、領域を示す円弧 $e_{sr} \in E_{sr}$ と巡回可能路 $e_p \in E_p$ が重なる場合には、2つの交点をもつ場合にはその交点を、1つの交点をもつ場合には、その外縁と巡回可能路の交点と領域内に存在する巡回可能点の中点を通過点 v_{pp} とする。巡回可能路 e_p が領域を示す円弧 e_{sr} に完全に含まれる場合には、その巡回可能路 e_p の中点を通過点 v_{pp} とする。領域を示す円弧の集合 E_{sr} に一部分も含まれない巡回可能路 e_p は、通過点を生成しない。

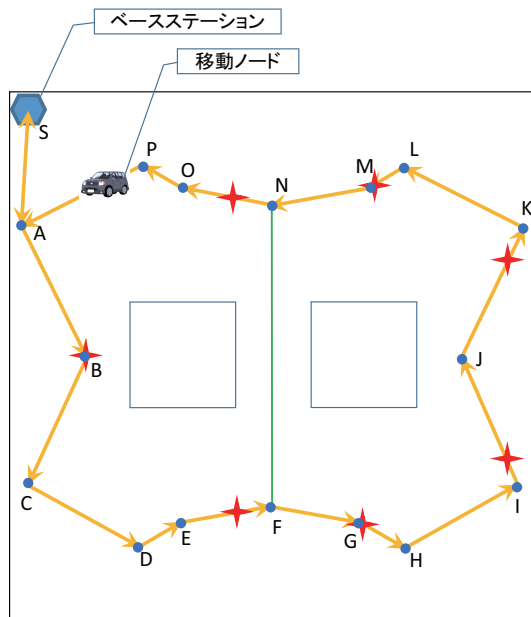


図 5 移動経路の決定

領域外探索では、図 4(c) のように、対象となるセンサの領域マップ $G_{sr} = \{V_{sr}, E_{sr}\}$ と巡回可能マップ G_p を重ね合わせる。このとき、領域を示す円弧 $e_{sr} \in E_{sr}$ と巡回可能路 $e_p \in E_p$ が重なる場合には、その領域外に存在する巡回可能点 v_p と、領域を示す円弧 e_{sr} の外縁と巡回可能路 e_p の交点からなる 3 本もしくは 4 本の線分のうち、領域を示す円弧 e_{sr} に含まれない線分の中点を通過点 v_{pp} とする。もし巡回可能路 e_p が領域を示す円弧 e_{sr} に内包される場合には、通過点を生成しない。領域を示す円弧の集合 E_{sr} に一部分も含まれない巡回可能路 e_p は、その中点を通過点 v_{pp} とする。

走行経路決定フェイズ

走行経路決定フェイズでは、まず、巡回可能マップ G_p にベースステーションを移動ノードの初期位置となる頂点 v_s として新たに追加し、それを一番近い巡回可能点と線分 e_s で結ぶ。次に、作成した通過点集合 V_{pp} を巡回可能マップ G_p に重ね合わせ、すべての通過点を巡回する経路（以後、走行経路と呼ぶ）を生成する。走行経路を決定する手順としては、次のようになる。

Step1 始点を含む線分 e_s を登録する。

Step2 最後に登録した頂点を含む線分を登録する。このとき、線分が複数ある場合には、未通過の経路を優先するものとする。

Step3 どちらも通過済み、もしくは、どちらも未通過の場合には、未登録の通過点をより多くもつ線分を優先する。未登録の通過点と同数の場合には、次の頂点を調べる。このとき分岐している場合は、それぞれ別の走行経路候補として考える。

Step4 すべての通過点を登録し終えるまで Step2-Step3

を繰り返す。すべての通過点を登録し終えたら、始点へ到達するまで始点と近づく線分を選択しつづける。

Step5 始点 v_s を含む線分 e_s を再度登録するとアルゴリズムを終了する。

図 4(a) を例に、巡回経路を決定する手順について、図 5 をもとに説明する。

- (1) ベースステーション位置である始点 S を頂点とする線分 SA を走行経路として登録する。(Step1)
- (2) 線分 AB 、線分 AP を比較し、通過点をもつ線分 AB を登録する。(Step2)
- (3) 未通過の経路を優先し、線分 BC 、 CD 、 DE 、 EF を走行経路として登録する。(Step2)
- (4) 未通過の経路である線分 FG と線分 FN は通過点を持たないので、次の経路を候補に入れる。線分 FGH 、 FNH 、 FNO では、未登録の通過点それぞれ、1、0、1 となるので、線分 FNH の探索を打ち切る。(Step3)
- (5) 続けて、線分 $FGHIJ$ 、線分 $FNOPA$ と続け、未登録通過点の多い線分 $FGHIJ$ を走行経路として登録する。(Step3)
- (6) 未通過の経路を優先し、線分 JK 、 KL 、 LM 、 MN を走行経路として登録する。(Step2)
- (7) 未通過の経路である線分 NO と線分 NP のうち、通過点をもつ線分 NO を走行経路として登録する。(Step3)
- (8) 全ての通過点を登録し終えたので、頂点 O から始点 S へ近づく線分 OP 、 PA 、線分 AS を走行経路として登録する。(Step4)
- (9) 始点 S へ到達したので、経路の完成とする。(Step5)

4. まとめ

本論文では、ホームサーバに複数のコピキタスアプリケーションが存在するスマートオフィスなどの環境下において、それぞれのタスクをとりまとめ、1 台の多目的移動ノードでタスク解決を図るためのシステムと一度の巡回ですべてのタスクを解決するための効率的な経路を生成する経路探索アルゴリズムを提案した。提案手法では、移動ノードが自己位置推定のために生成した環境マップと固定配置された各種センサの配置マップをもとに、ポロノイ図を作成し、重ね合わせることによって、ポロノイ線から移動ノードの移動経路を導き出す。これによって、移動ノードの導入コスト、複数の移動ノードの同時稼働がもたらす煩雑性を削減することができる。

今後、複数アプリケーションがそれぞれ個別に移動ノードを持ち個別にタスク解決を行う従来手法と比べ、提案手法がどの程度経路長を短縮できるか、センシングカバレッジなどをもとにタスクの解決率について評価を行い、有用性を示す予定である。

今後の課題として、袋小路や相互接続されていないネットワーク間の中継などの巡回経路に方向を持つ場合への対

応を行う必要がある。また、多様な移動ノードが存在する場合にタスクを効率的に再配分するシステムへと拡張を行う予定である。

参考文献

- [1] G.Wang, G. Cao, P. Berman, T.F.L. Porta, : “Bidding protocols for deploying mobile sensors,” *Journal of IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 6, Issue 5, pp.563–576, 2007.
- [2] Zach Ruble and Margareta Stefanovic “A convex optimization method for improved coverage in Mobile Ad hoc Networks,” *Proc. of the 40th IEEE Local Computer Networks Conference Workshops (LCN Workshops)*, 2015.
- [3] Jalal Habibi, Hamid Mahboubi, and Amir G. Aghdam: “Distributed Coverage Control of Mobile Sensor Networks Subject to Measurement Error,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, Volume: 61, Issue 11, pp. 3330–3343, 2016.
- [4] Xueshu Zheng, Shuailing Yang, Naigao Jin, Lei Wang, Mathew L. Wymore, and Daji Qiao “DiVA: Distributed Voronoi-based Acoustic Source Localization with Wireless Sensor Networks,” *Proc. of IEEE INFOCOM2016*, pp. 1–9 (2016).
- [5] Can Tunca, Sinan Isik, M. Yunus Donmez, and Cem Ersoy: “Distributed Mobile Sink Routing for Wireless Sensor Networks: A Survey,” *Journal of IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 16, Issue 2, pp. 877–897, 2014.
- [6] Renuka Bhuyar and Saniya Ansari: “Design and Implementation of Smart Office Automation System,” *International Journal of Computer Applications*, Vol. 151, No. 3, pp. 37–42 2016.
- [7] Ren C. Luo and Ogst Chen: “Mobile Sensor Node Deployment and Asynchronous Power Management for Wireless Sensor Networks,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 5, pp. 2377–2385, 2012.
- [8] H. Durrant-Whyte, T. Bailey : “Simultaneous localization and mapping: part I,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 13 (2), pp 99-108, 2006.
- [9] Shibata, N., Yamamoto, S.: “GPGPU-Assisted Subpixel Tracking Method for Fiducial Markers,” *Journal of Information Processing*, Vol.55, No.1, pp.19–28, 2014.
- [10] GPGPU Marker Tracker:
<http://ito-lab.naist.jp/~n-sibata/software/gpumarkertracker/>
- [11] 寺田 謙伸, 小倉 広大, 勝間 亮, 山本 眞也, 柴田 直樹: “通信を考慮した可動ノードの屋内協調探索手法”, 2016 年度 情報処理学会関西支部 支部大会, pp.1–7, 2016 .
- [12] 山本 眞也, 柴田 直樹: “マーカを利用した間取り図自動作成システムの提案”, 第 24 回 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (*DPSWS2016*), pp.191-192, 2016.