

モバイルロボット間における 先読み機能を有した経路予約システムの提案

東原大記[†] Rami Yared[†] Xavier Defago[†]

本稿では、複数台の自律分散型モバイルロボット間での協調的行動を用いる群ロボット向けの衝突回避システムに関して述べる。センサーを用いて衝突回避を行った場合、移動をしながらモバイルロボット間の衝突回避を行う事が重要である。また、センサーの有効範囲は狭いため、多数の複雑な処理を高速におこなう事が重要となる。ワイヤレスネットワークを用いる事により広範囲で利用可能であるが時間的制約に強いシステムである事が重要である。我々は、非同期なモバイルロボットの移動経路予約システムを提案する。また、経路の予約を先読みする機能をもつ予約システムも提案する。

Motion reservation system with looking a head for multiple mobile robots

DAIKI HIGASHIHARA,[†] RAMI YARED[†] and XAVIER DEFAGO[†]

In this paper, we consider about collision avoidance system for multiple autonomous distributed mobile robots. If we use sensor for collision avoidance then the robot has to collision avoidance with robot motion. Moreover, the sensor have limited for reaching distance. We have to quickly compute with much of complex task. Wireless network can be used much more distance than the sensors. However, wireless network is week for timely working. So, we considered moving path reservation system with asynchronous system. And we also consider the reservation system with looking a head.

1. はじめに

近年、ロボット技術の発展により、ロボットに複雑な処理を実行させる事が可能となってきた。しかし、ロボットが複雑な処理を実行するためには、処理に合わせてロボットも複雑化させ大型化させる事が重要となる。複雑かつ大型なロボットを開発するためには、大きな開発費と長い時間を要する。また、特定の処理に特化したモバイルロボットは、他の処理に応用する事が困難な場合もある。さらに、ロボットを用いて実行しようとする処理の中には、複数の場所で同時に実行する事が重要な場合もある。以上のような理由により、単独のロボットを用いて処理を実行する事には限界があり、群ロボットの利用が注目されている。

群ロボットとは、複数台の自律分散型のモバイルロボットが協調的行動をとり、1つの処理を実行するロボット技術である。群ロボットを用いる事により、単独のロボットを用いて処理を実行する場合と比べ、比較的単純かつ小型のロボットを用いる事ができる。また、単独のロボットを用いた場合、ロボットの故障に

より処理の実行ができなくなる。しかし、複数台のモバイルロボットを用いた場合には、1台のモバイルロボットが故障したとしても処理の実行が可能な場合もある。

群ロボットにおいて、モバイルロボット間の協調は処理を実行するうえで重要な要素である。モバイルロボット間における協調的行動には、ロボットが行う実際の処理や、処理を行うために利用する基本的な処理がある。モバイルロボットの実際の処理を行うためには、様々な協調のための基本的な処理を用いる事が重要である。モバイルロボットの協調的移動は、モバイルロボット間における基本的な協調処理の重要な要素である。モバイルロボットの協調的移動を適切に制御する事は、モバイルロボットの高度な協調動作を制御するために有用である。モバイルロボットが移動中に他のモバイルロボットと衝突をした場合には、ハードウェア的な損傷につながり、実際のモバイルロボットの処理を実行する事が困難になる。モバイルロボットが適切な協調的移動をおこなうためには、各々の衝突を確実に回避する事が重要である。本稿では、複数台のモバイルロボット間における衝突回避システムに関して述べる。

モバイルロボットが移動中に衝突回避を行う方法と

[†] 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

して、モバイルロボットの視覚^{4), 5)}を用いる方法がある。モバイルロボットの視覚とは、赤外線や超音波などのセンサーを用いる。視覚的情報をもとに衝突回避を行う場合、モバイルロボットは移動をしながら同時に衝突を回避する。視覚的情報を基に衝突回避をおこなうため、モバイルロボットどうしの衝突を回避すると同時に、モバイルロボット以外の障害物との衝突も回避する事ができる。モバイルロボットの移動と同時に衝突回避を行うため、複雑な計算を高速に行う事が重要となる。多種多様なモバイルロボットを利用する環境下においては、双方のモバイルロボットが移動物体であるため次の事を考慮する事が重要となる。モバイルロボットは、双方の視覚が利用可能な距離を考慮した上で、衝突を回避できる移動速度を計算する事が重要となり、衝突回避を行うためには衝突回避以外の多数の要素を計算が必要となる。しかし、モバイルロボットの視覚のためのセンサーは、有効範囲が数十センチメートルから数メートルと非常に小さい距離でのみ利用可能であるため、モバイルロボット間の衝突回避のみにおいても、複雑な計算を高速に行う事が重要となる。また、モバイルロボット間に障害物が存在する場合、お互いの存在を認識する事が困難であるため、相手のモバイルロボットの発見が遅くなり衝突する可能性がある。

ワイヤレスネットワークの利用可能な範囲は、数メートルから数十メートルとセンサーを用いた場合の利用可能な範囲と比べると非常に広い。ワイヤレスネットワークを用いて、センサーを用いた衝突回避と同様の効果を得る事ができる。モバイルロボットは、一定のタイミングで各々の位置情報を他のモバイルロボットに通知しあう事で、衝突を回避することができる。位置情報を交換するタイミングがモバイルロボットの移動速度に対して長過ぎる場合には、古い情報を基に衝突回避を行うため他のモバイルロボットの位置が分からず衝突する可能性がある。一方、タイミングが短すぎる場合は、位置情報を交換するための通信の頻度が多くなるため、ネットワークに大きな負荷をかけるため通信遅延が発生する。また、視覚的情報等を用いる場合には実時間性の高いシステムである事が重要であるにも関わらず、ワイヤレスネットワークは、ケーブルを用いた通信と比べ不安定であるため通信遅延が発生する場合がある。ワイヤレスネットワークを用いる場合、時間的制約に弱いシステムである事が重要である。

我々は、¹⁾において時間的制約に強いモバイルロボット間に置ける衝突回避システムの概要に関して述べた。詳細は後述するが、¹⁾は、モバイルロボットの移動経路を予約する事により、他のモバイルロボットとの衝突を回避するシステムである。予約の方法は、移動経路を小さな経路に切断し、最初の経路から順にワイヤレスネットワークを用いてブロードキャストする事によ

り予約情報を共有する事により移動経路を占有する。本稿では、¹⁾で述べた方法に、1つ次の経路も予約する先読み機能を追加した。

本稿では、環境にインフラストラクチャとしてワイヤレスネットワークが整っている場合にのみ利用可能である。しかし、モバイルロボットの利用環境の中には、環境にインフラストラクチャが無い場合やインフラストラクチャを用意できない場合などもある。²⁾は、本稿で述べる衝突回避システムをインフラストラクチャのない場合に利用可能である。本稿で述べるシステムがインフラストラクチャのワイヤレスネットワークを用いる方法である事に対して、²⁾では周辺のモバイルロボットとアドホックなネットワークを構築する事により衝突回避を行うメッセージを交換する。

2章では、衝突回避システムのシステムモデルとして、モバイルロボットの利用環境のモデルとモバイルロボットのモデル、衝突を回避するための予約範囲のモデルに関して述べる。3章では、システムのアーキテクチャに関して述べる。

2. システムモデル

本章では、本稿で述べる衝突回避システムのシステムモデルに関して述べる。モバイルロボットを利用する環境の前提条件に関して述べ、その後、モバイルロボットの前提条件に関して述べる。

2.1 環境

本節では、モバイルロボットを利用する環境のモデルに関して述べる。

モバイルロボットを利用する環境は、インフラストラクチャとして次の2項目が安定して利用できる事を前提とする。まず、モバイルロボットを利用する全ての環境において、任意の場所で各々のモバイルロボットが各々の絶対位置の情報を取得可能である Global Positioning System (GPS) が利用できる。また、Wireless LAN Access Point などを用いる事により、全ての場所においてワイヤレスネットワークにアクセス可能である。

モバイルロボットを利用する環境は、前述の両方のインフラストラクチャが十分に利用可能な範囲のみとする。また、モバイルロボットを利用する環境は、地面の高低差などは問題としない。しかし、地面が立体交差などをする事は無く、絶対座標は2次元のみ表現できるものとする。

2.2 モバイルロボット

本節では、モバイルロボットのモデルに関して述べる。

モバイルロボットは、モバイルロボットを利用する環境のインフラストラクチャにあるワイヤレスネットワークを用いる事でのみ互いに通信することができる。また、モバイルロボットは、ワイヤレスネットワーク

を用いた1度の通信により、環境内に存在する全てのモバイルロボットとメッセージの交換をすることができる。交換するメッセージは、ネットワークの状態などにより遅延が発生することができる。

全てのモバイルロボットは、正の整数などで表現可能な固有のIDを有している。しかし、全てのモバイルロボットのIDが連続している必要はない。モバイルロボットは、IDでのみ個体識別をすることができ、同一のIDは複数存在することなく一意に決定することができる。モバイルロボットのIDは、ワイヤレスネットワークによるメッセージでみ交換可能である。よって、モバイルロボットは、お互いのIDをセンサー等を用いた視覚で識別する必要はない。

各々のモバイルロボットは、自律的に移動可能であるが、移動経路は移動経路の設計システムによってのみ制御可能とする。しかし、モバイルロボットの移動速度は、各々のモバイルロボットが自律的に制御する事ができる。

モバイルロボットは、故障などの理由により利用不可能な状態になることがある。故障とは、物理的な損傷によりモバイルロボットが移動できない状態になる事を示す。ただし、モバイルロボットの車輪などが空転し実際には移動していないのにも関わらず、モバイルロボットが移動したと誤認識するような場合は除く。

2.3 システム

モバイルロボット間の衝突回避を行うために、お互いの位置情報をメッセージとして交換しあい移動する方法が考えられる。しかし、メッセージの遅延などが発生した場合には、最新の情報を基に移動することができないため、古い情報を基に移動しなければならない場合がある。古い情報をもとに移動した場合には、衝突の可能性がある相手のモバイルロボットは既に移動している場合もあり、衝突する可能でもある。よって、全てのモバイルロボット間において、モバイルロボットの位置情報は完全に同期のとれた状態である事が望ましい。しかし、ワイヤレスネットワークは、ケーブルを用いたネットワーク通信と比べ、通信遅延などが発生する不安定な通信方法である。ワイヤレスネットワークを用いて通信を行うモバイルロボットを用いる場合、時間の制約に強い非同期なシステムである事が望ましい。よって、本稿では、モバイルロボット間で情報交換は非同期に管理する。

2.4 予約と誤差

本節では、モバイルロボットが移動のために予約する予約範囲のモデルとモバイルロボットの位置情報に関する誤差のモデルに関して述べる。

2.4.1 予約

本稿では、モバイルロボットが移動するために予約する範囲をzoneと呼ぶ。zoneは、次の3つの部分から構成される。

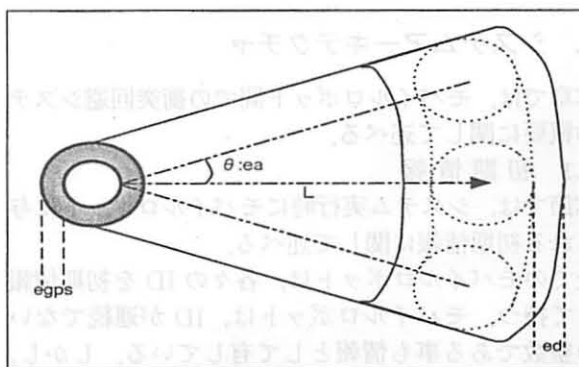


図1 予約 Zone

Fig.1 reservation zone

- pre-zone
- post-zone
- motion-zone

pre-zoneとは、モバイルロボットが移動経路の予約をおこなった場合の始点となる範囲を示す。モバイルロボットが予約範囲を移動する場合、モバイルロボットは必ずpre-zone内に存在する必要がある。post-zoneとは、モバイルロボットが移動経路を予約する場合の到着予定範囲を示す。モバイルロボットは、予約した移動経路を移動し終えた場合、必ずpost-zoneの内側で停止する必要がある。motion-zoneとは、モバイルロボットがpre-zoneからpost-zoneまで移動するための移動経路を示す。モバイルロボットは、予約経路を移動する場合、必ずmotion-zone内のみを移動する必要がある。

2.4.2 誤差

モバイルロボットの位置情報の誤差は、インフラストラクチャに起因する誤差と移動に起因する誤差の2種類がある。

インフラストラクチャに起因する誤差とは、GPSから位置情報を取得時に発生する計算誤差である。GPSの誤差は、位置情報を取得した場合に発生するため、GPSから情報を取得した時点でのモバイルロボットの実際の位置から円形に発生する。

移動に起因する誤差は、モバイルロボットの移動により発生する距離的な誤差と、移動する方向により発生する角度的な誤差がある。距離的な誤差とは、モバイルロボットが移動する場合には、移動する地面の状態や摩擦などにより実際に移動した移動距離とタイヤの回転などから計算した移動距離との間に発生する。距離的な誤差により、post-zoneの範囲はモバイルロボットの移動方向と平行方向に誤差分が大きくなる。一方、角度的な誤差とは、モバイルロボットがpre-zoneを出発する時やモバイルロボットが方向転換などを行う場合に発生する誤差である。

3. システムアーキテクチャ

本章では、モバイルロボット間での衝突回避システムの概要に関して述べる。

3.1 初期情報

本節では、システム実行時にモバイルロボットに与えられる初期情報に関して述べる。

全てのモバイルロボットは、各々の ID を初期情報として持つ。モバイルロボットは、ID が連続でない正の整数である事も情報として有している。しかし、モバイルロボットは、他のモバイルロボットの ID を初期情報として有する必要は無い。モバイルロボットは、モバイルロボットを利用する環境内に存在するモバイルロボットの総数を初期情報として有する必要は無い。

また、各々のモバイルロボットの物理的な大きさと移動速度に関しても情報を得ることができる。モバイルロボットの物理的な大きさは、モバイルロボットの中心から半径 r の円であるものとする。モバイルロボットの移動速度とは、モバイルロボットが移動を開始する時の加速度と減速する場合の負の加速度、さらにモバイルロボットの最大の移動速度を示す。

モバイルロボットの初期の予約範囲は、モバイルロボットが配置された pre-zone のみを予約する。

3.2 予約システム

本節では、基本的な移動経路の予約システムに関して述べる。まず、予約システムの概要に関して述べ、その後詳細を述べる。

本稿で述べる予約システムは、モバイルロボットの移動経路の設計システムが生成したモバイルロボットの移動経路の情報を入力として受ける。モバイルロボットが予約した移動経路の予約が受理された場合、モバイルロボットに対して予約が受理された範囲の移動の許可を与える出力をする。移動経路の予約システムが移動の許可を与えられたモバイルロボットのみが予約された移動経路を予約する事ができる。

モバイルロボットが移動する場合、移動経路の設計システムから移動経路の情報を受け取り、衝突回避システムにより移動経路を予約する事により移動する。しかし、移動経路の設計システムは、モバイルロボットの移動経路のみを設計し移動経路の予約システムを考慮していない場合が多い。予約する移動経路が長過ぎる場合は、あるモバイルロボットのが移動経路を予約すると、予約した移動経路をモバイルロボットが移動し終わるまで他のモバイルロボットが移動する事ができない。モバイルロボットの台数が多くなった場合には、移動経路が予約できなかったモバイルロボットは長い時間を待機する必要がある。移動経路の予約システムは、入力された移動経路が一定距離よりも長い場合には、移動経路を切断し短い移動経路群に分割

し、入力された移動経路を少しずつ予約して移動をする。移動のために予約システムに対して予約をおこない、予約システムが許可をだすとモバイルロボットが移動を開始し、移動が終了するとモバイルロボットは静止して予約システムに予約の解放をおこなう。

次に、移動経路の予約システムの管理方法に関して述べる。移動経路の予約システムは、特定のロボットや計算能力の高い計算機などで管理する方法がある。特定の計算機が予約の管理を集中的に管理する場合、予約とモバイルロボットの管理が用意である利点がある。しかし、管理する計算機が故障等の理由により利用できない状態になった場合、全てのモバイルロボットが予約をする事ができず移動する事ができない single point of failure がある。よって、移動経路の予約システムは分散管理される事が望ましい。我々は、全てのモバイルロボット上で移動経路の予約システムのレプリカを実行する事により、特定の計算機が集中的に管理する場合の single point of failure の問題を解決した。予約システムの全てのレプリカは、入力に対して各々が独自に衝突回避のための計算をする。したがって、全てのレプリカは、全く同様の入力を受信する事が重要となる。また、受信した入力に対して、全てのレプリカが全く同様の処理をおこなう事が重要となる。

全てのレプリカに同じ入力をするために、我々は atomic broadcast³⁾ を用いる。atomic broadcast を用いる事により、全てのレプリカに全く同じ順序のメッセージを入力する事ができる。atomic broadcast は、a-broadcast(m) と a-deliver(m) の 2 つの操作から成る、(m は、メッセージ。) また、atomic broadcast は、次の保証をする。

- 正確性: 正しいモバイルロボットが a-broadcast(m) をする場合、最終的に a-deliver(m) する。
- 合意性: 正しいモバイルロボットが a-broadcast(m) した場合、最終的には全ての正しいモバイルロボットは a-deliver(m) をする。
- 完全性: 任意のメッセージ m に対して、全てのモバイルロボットはメッセージ m を最大 1 回しか a-broadcast(m) しない。
- 全順序性: 正しいモバイルロボットが r_1 と r_2 がメッセージ m_1 と m_2 を a-deliver したとする。モバイルロボット r_1 が a-deliver(m_1) をした後で a-deliver(m_2) した場合には、モバイルロボット r_2 も a-deliver(m_1) をした後で a-deliver(m_2) をする。

atomic broadcast は、以上のふるまいを保証するため、モバイルロボットが移動経路の予約を全てのモバイルロボット上のレプリカに、全く同じメッセージを同順序で通知する事ができる。

次に、モバイルロボットの移動経路の予約システム内部での動きに関して述べる。移動経路の予約システ

ムは、モバイルロボットの予約を管理するために双方向リンクのグラフを用いる。グラフは、reserved と pending の 2 つの部分で構成される。reserved とは、予約が受理されている状態を示す。pending とは、予約の要求がされた zone が既に予約されている zone と衝突の可能性がある状態を示す。予約が受理されている状態とは、移動経路の予約が許可されている zone 全体の場合と、静止状態で予約はしていないモバイルロボットも物理的には存在するための予約である pre-zone のみの場合がある。任意のモバイルロボット A が移動経路 zoneA を予約するために、予約システムに対して予約メッセージを atomic broadcast する。予約のメッセージを受信した予約システムは、メッセージの受信前に予約した予約がある場合には予約を解放し、グラフの全ての要素と衝突の可能性があるかを確認する。受信したメッセージとグラフ内の要素と相互的にリンクを張る。全ての要素と衝突の可能性の確認をおこない、受信したメッセージが他の要素と 1 つ以上のリンクがある場合には衝突の可能性があるため、リンクの要素が予約を解放するまで待機する。受信したメッセージが他の要素とリンクがない場合、衝突の可能性が無いので、メッセージを送信したモバイルロボットの予約システムはモバイルロボットに対して移動の許可をだす。予約システムから移動の許可を得たモバイルロボットは予約した経路を移動する。モバイルロボットが移動を終了すると、前述の誤差を補正するため、GPS を用いて位置情報を取得し、次の Zone を作成しメッセージを全ての予約システムへ対して atomic broadcast する。

モバイルロボットが故障をした場合には、目的地に達していないため新しい予約をおこなわない。予約と同時に解放をおこなうため、予約している zone 解放されないため他のモバイルロボットは、zone を予約する事ができなくなる。予約ができない場合、モバイルロボットどうしが衝突をすることはない。

3.3 先読み予約システム

前章で述べた基本的な移動経路予約システムは、1 回の予約を移動するたびに停止する必要があった。予約の都度モバイルロボットが停止する事は、センサーを用いた場合と同様に、モバイルロボットの移動能力を制限することになる。本節では、基本的な移動経路の予約システムに他のモバイルロボットと衝突の可能性がない場合には停止をしない方法に関してのべる。

モバイルロボットが移動を終了し停止するまでに次の予約が許可された場合、モバイルロボットは停止する事無く移動を続ける事ができる。しかし、停止する事無く移動を続けると、前述の誤差を修正する事ができないため、停止する事無く予約の先読みを続けた場合、誤差が大きくなり予約する zone の大きさが大きくなる、zone が大きくなった場合は、他のモバイルロボットの予約との交差する可能性が大きくなるため、

お互いに移動する事が困難になる。よって、予約の先読みを続ける回数には閾値をもうけ、予約の先読みが閾値を超えた場合には、モバイルロボットは停止する事が重要である。

移動経路の予約システムが予約の先読みをするシステムの動作概要に関して述べる。まず、初期の知識として、モバイルロボットは、移動経路の予約を先読みを続ける事ができる閾値を初期知識としてもつ。

モバイルロボットの最高の移動速度は、モバイルロボットが移動する場合の 1 度の予約で加速し停止可能な距離以上である物とする。

モバイルロボットは、移動経路を経路設計システムを用いて作成する。作成された移動経路は、モバイルロボットが移動をするさいに移動経路の予約システムへ入力としてわたす。移動経路の予約システムは、移動経路が長い場合、移動経路を切断し小さな zone に分けて予約の要求をする。モバイルロボットは、移動のために最初の zone を atomic broadcast を用いて全てのモバイルロボット上で動作する予約システムのレプリカに入力する。受信したメッセージが既に予約されているモバイルロボットの新しい予約である場合には、古い予約を解放して、次の予約の要求を行う。要求していた予約が許可された場合、許可されたモバイルロボットの予約システムはモバイルロボットにたいして移動の許可をだす。移動の許可を得たモバイルロボットは、移動を開始すると同時に予約の先読みの回数が閾値を超えていない場合には、次の zone の予約の要求をおこなう。モバイルロボットの予約要求は、モバイルロボットが移動中に同時に行われる。移動中のモバイルロボットが、zone 内で停止するためにブレーキをかけなければならない時点で、モバイルロボットは次の予約が許可されているかどうかを確認する。次の予約が許可されている場合には、移動速度を維持し、許可されていない場合にはブレーキをかけはじめる。ブレーキをかけている間に、次の予約が許可された場合には再度加速する。モバイルロボットが zone の移動が終了し次の予約である zone の移動を始めた場合に次の予約の要求をする。モバイルロボットが post-zone で停止した場合、GPS により位置情報を更新し新しい zone を生成して予約を要求する。

以上を繰り返す事により、モバイルロボットの移動経路を先読みしながら予約する。

4. ま と め

本稿では、モバイルロボット間における衝突回避のための、モバイルロボットの移動経路予約システムの基本的なシステムと先読み機能のあるシステムに関して述べた。ワイアレスネットワークを用いた予約システムであるため、時間的な制約に強いシステムである事が重要であるため、非同期な予約システムである。

予約の先読みをする事により、他のモバイルロボットとの衝突の可能性がない場合には、モバイルロボットは停止する事無く次の zone を移動する事ができる。しかし、停止する事なく次の zone の移動を続けた場合、様々な誤差が大きくなるため予約に必要な zone の大きさが大きくなる問題点がある。

今後の予定は、本稿で述べた 2 つの予約システムをシミュレーションにより実装し、1 度に予約する予約の長さともモバイルロボットの密度の関係を調べる事が重要である。また、予約の先読みの有用性を基本的な予約システムとのモバイルロボットの平均移動速度などの比較をする事が重要である。

参 考 文 献

- 1) 東原大記, Rami Yared, Xavier Defago, Matthias Wiesman, 自律分散型モバイルロボット向け移動経路予約システムの検討, 研究報告—マルチメディア通信と分散処理, Vol. 2006, No. 121, pp.59-64(2006).
- 2) Rami YARED, "Fail-safe Mobility Management and Collision Prevention Platform for Cooperative Mobile Robots with Asynchronous Communications", Ph.D thesis, Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST), 2006. 9.
- 3) X. Defago, A. Schiper, and P. Urban, Total order broadcast and multicast algorithms: Taxonomy and survey, ACM Computing Surveys, ACM Press.DOI link, Vol.36, No.4, pp.372-421, 2004/12.
- 4) 高橋 一成, 柿倉 正義: "複数台移動ロボットにおける協調捕獲に関する研究" 第 回日本ロボット学会学術講演予稿集, pp1077-1078, 2000.
- 5) 浅間 一: "群ロボット環境における局所的通信に基づく衝突回避" 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1, pp.45-58, 2001.