

# 役割を保持するマルチロボットを用いた避難誘導システムの提案

ANDO, Takanori / 安藤, 孝徳

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院情報科学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 情報科学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 情報科学研究科編

(巻 / Volume)

8

(開始ページ / Start Page)

87

(終了ページ / End Page)

92

(発行年 / Year)

2013-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00009576>

# 役割を持つマルチロボットを用いた避難誘導システムの提案 Evacuation Guidance System in a Disaster Situation based on Multi-robot

安藤 孝徳

Takanori Ando

法政大学大学院情報科学研究科情報科学専攻

E-mail: takanori.ando.pu@stu.hosei.ac.jp

## Abstract

*When a disaster such as fire or earthquake occurs in a certain place such as underground street or city, the disaster situation is dynamically changing every moment. People in such disorder situation are not possible or difficult from the disaster situation without any confirmed information about the current situation and appropriate evacuation guidance. This research proposes a multiple robots based evacuation guidance system that uses robots to acquire environment and disaster situation data and information, with which each robot can share the global situation collected by all robots and at the same time can make appropriate evacuation suggestion based on the local situation and gives guidance to people nearby in the range of its responsibility. To achieve that, each robot is equipped with a wireless LAN for communication and multiple sensors for sensing disaster situation. Besides, each robot searches for an optimal path based on a weighted graph algorithm for people nearby toward to an exit and give the sound guidance to them. This system is simulated for a scenario of the harmful gases leaking in a particular underground space, called Yaesu underground shopping city.*

## 1. 序説

現在多くの市町村では巨大なショッピングモールが存在しており、各都市部には巨大な地下街が存在している。このように多くの人で賑わい、巨大な構造物が密集している場所で災害が発生した場合、出口まで避難するための対策が必要である。しかし、新たに避難対策用のシステムを導入するには導入日数やコストの問題がある。また、災害状況は時間と共に変化していくのでそれに対応した判断も必要である。さらに、想定される災害についても多種多様であり、それぞれに対応するシステムを個々に実働させるのは現実的ではない、そこで災害状況に対応できるロボットシステムを提案する。ここで用いられるロボットは複数の役割を持つマルチロボットであり、災害発生後の環境情報の取得から人々の避難誘導を行なうことで災害に対してリアルタイムで対応する。さらに災害発生後の状況把握の高速化、及び出口への脱出支援の向上につながる。本論文では災害状況のうち、ガ

スが発生した場合の災害について想定し、ガスが発生してからガスを避けて人々を出口まで誘導する事を目的としたロボットについて考察する。

このシステムを提案することにより発生するメリットが2点ある。第一に設置のコストである。システムを置くという点では集中制御システムでは場所ごとにデータの設定、サーバーの構築と手間と費用がかかるが分散制御システムを設置する場合はその手間と費用が少なくなるので分散制御のシステムの導入が容易であると考えられる。

さらに、このシステムは集中制御システムではなく分散制御システムを取り入れている。その理由として、分散制御を実現することで、集中制御の部分が壊れて稼働しなくなるといったトラブルを回避することが出来る。

第二に誘導の際の正確性である。既存のシステムで誘導の際に音声のみを用いて誘導を促すものがあるが、これは避難する人に対して客観的な誘導である。音声での誘導になると指示が多方向的に捉えることが可能であり、避難者それぞれが確実に想定されているとおりに行動するかどうかの確証がない。また、看板等の目印になる物を目安にした場合、停電などの現象により周囲の環境が判断不能となる場合があり、必ずしも目安に出来るとは限らない。他にも、それを解消するために非常灯を設置等[1]をし、周辺状況の認知を行なうという考えもあるが、コストがかかる。それに比べるとロボットによる誘導ではロボット自身が避難者を出口まで誘導する際の目印となる。これにより非常灯といった追加設備等の新規導入がなくなる。以上により、音声誘導の不安定さをなくし、かつ非常灯等の追加コストをなくすことが出来る。

以上により、本システムの提案は有効であると考えられる。

## 2. 関連技術

### 2.1 自律分散協調による避難誘導システム[2]

この技術は地下街や建物内等の空間において災害が発生した場合の避難をセンサユニットで行なうものである。このセンサユニットを実際の建物内に配置して火災が発生したと想定して検証を行なっている。このシステムではセンサユニットを閉空間内の出入り口、曲がり角や交差点の天井に設置し、火災などが発生した場合、センサユニットが一斉に無線LANで接続されている隣接したセンサユニットに情報を送信し続ける。その情報を元に避難者のいる地点に最も近いセンサユニットから直接音声誘導装置を用いた避難誘導が行われる。



## 2.2 SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) [3]

従来の自己位置推定法(Localization)ではロボットによるホイールやジャイロといった内部センサ等から自己推定を行ってきたが、この場合センサノイズによる誤差、つまり測定環境によってスリップや石等の原因により正確に測ったつもりでも誤差が発生している。そして、その誤差を内部センサから修正することは不可能である。この誤差がたまると自己位置推定がまったくうまく働かなくなってしまう。その問題を解決するために SLAM を用いることで解決する。SLAM では自己位置推定と地図構築を同時に行い、それを関連付け出来る。つまり、以前観測した地点の周辺情報(ランドマーク)を観測することによりセンサノイズのよって発生した誤差を修正することが出来る。

## 2.3 Multi-Agent Deterministic Graph Mapping via Robot Rendezvous [4]

このシステムは複数の同期エージェントを用い、無向グラフの世界をマッピングするためのアルゴリズムを用いて、オフィスという出入り口が限定された密閉空間での地図構築を行なうものである。

このシステムでは全てのエージェントが共通の頂点から始動し、地図を無向グラフ上での構築を行なっていく。すでに探索したかもしれないノードにたどり着いた時にエージェントに役割を与え他エージェントを探索が完了しているノード呼び出し、そこにエージェントがいるのかいないかで確認を行なっていく。これを繰り返すことにより、地図の作成を完了させる。

## 2.4 マルチロボットシステム[5]

マルチロボットシステムでは通信を使用した協調行動をさせることで、個々のロボットがそれぞれに定まったタスクを独立して実行するよりも、ロボットチーム全体としてのタスクの実行を効率化でき、単体では実行が困難なタスクが実行可能になる場合がある。

## 3. システムの概要

このシステムは複数の役割を持ったロボットと通信のためのユニットを用いる。

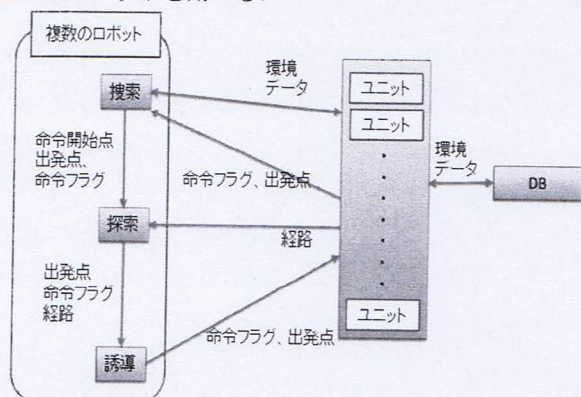


図1 システム図。

本システムの概要は図1のようになっている。このシステムは複数の配置されたセンサを持ったロボットが動き、環境情報を収集する。収集された情報をユニットに送信し、ユニットから収集されたデータを受信する[6]。そしてロボットが実世界でスイッチを押された時に初めて人を安全なルートで出口まで案内する。この時探索する出口が複数ある状況を想定して出口の探索を行なう。そしてユニットをランドマークとみなす事により、ロボットがそのユニットを観測する事で自己位置推定を行なう。

本システムではユニットが地図を無向グラフで持っている。このグラフのエッジ情報とノード情報を書き換える事により避難誘導の補助を行なう。このシステムではユニットの配置する場所をノードとし、エッジの情報をロボットに収集させることにより、正確に環境情報を入力して、正確な避難誘導の補助を行なう。

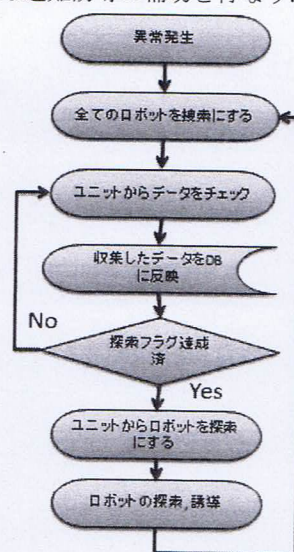


図2 システムの処理の流れ。

システムは図2のように進行し、各ロボットは起動時に探索の役割を持っている。そして、ロボットが探索を開始し、ロボット事態の周辺状況の情報を取得する。そして、収集した情報をユニットに送受信することにより全てのロボットで情報を共有する。そして、ノードに到着する毎に役割が探索に移行されるフラグが達成されているかを確認する。このフラグは2種類あり、外部操作によりフラグが達成されているか、または他ロボットの命令によりフラグを達成しているかである。フラグが達成されていない場合は役割が探索のままである。達成されている場合は役割が探索から探索に切り替わり、命令開始点を保持しているかを確認する。保持している場合は受け取っている出発点へ移動する。保持していなかった場合は切り替わったノード位置を出発点として、出口までの安全な経路を導き出す。そして、ロボットの役割が探索から誘導に切り替わる。この時、ロボットが他ロボットの命令を受けて切り替わった場合、役割が誘導になったロボットはロボット自体が出口まで移動する。役



割が誘導に切り替わったロボットは周辺のロボットに命令を与えて役割を探索にする。この命令で役割が探索になるロボットは役割が探索のロボットだけである。この時に役割が探索となったロボットはそのノードから出口までの経路を導き出すのではなく、命令で与えられたノード（出発点）から出口までの経路を導き出し、出口まで移動する。出口まで移動したロボットはそのロボットが保持する命令開始点、もしくは出発点のノード位置まで移動した後役割が探索になる。この時の優先度は命令開始点が上位となる。これを繰り返す事により人の避難誘導を補助する。

#### 4. ロボットの役割

このシステムで用いられるロボットは3つの役割をもつ、3つの役割はそれぞれ、探索、探索、誘導の3つである。この3つの役割をロボットが持つことにより、災害が発生した時の対処を可能とする。それぞれの役割は、環境情報を取得するための探索、安全な経路を求めるための探索、人の避難誘導を補助するための誘導。この3つの役割を持ちこれらが切り替わることにより目的を達成する。

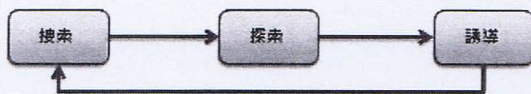


図3 ロボットの役割の遷移。

ロボットは図3のようにロボットの役割を変化させて目的を達成する。

#### 4.1 探索の役割

探索の役割は環境情報の取得である。環境情報を収集して、ユニットに送受信し、その後にロボットの役割は探索に変更される。

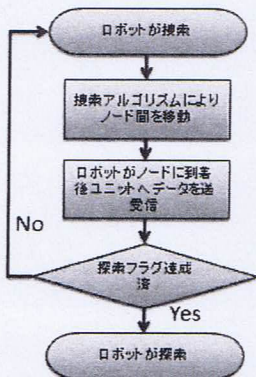


図4 探索の処理の流れ。

図4のようにロボットが処理を行なうことで、ロボットの探索の役割が行われる。ロボットの役割が探索の時にロボットがあらかじめ用意されてある無向グラフのノード間を移動することでそのエッジのコストを収集し、ノードに訪れた時間と共にユニットに送信し、各ロボットからマージされた情報を受信する。この動作を後述の

探索アルゴリズムにそって行なう。そして探索の役割から別な役割に切り替わる場合、探索からは探索にしか役割を変更出来ない。そしてその探索の役割に移行する条件が2つある。

役割が探索に切り替わる条件は外部操作による切り替えと役割が誘導のロボットからの命令による切り替えである。外部操作による切り替えはロボット本体にスイッチを取り付けられており、災害時等に避難者がそのスイッチを入れる事により役割が探索から探索に移行する。そしてもう1つの条件は役割が誘導のロボットから発信された命令を受け取ったノードに到着した時にロボットは役割が探索から探索へ切り替わる。この役割が誘導のロボットからの命令は条件を満たした役割が探索のロボットに送られる。この2つの条件でロボットの役割を探索から探索に切り替える。

#### 4.1.1 探索のアルゴリズム

ここでは役割が探索で用いられるロボットがノード間を移動するアルゴリズムについてふれる。

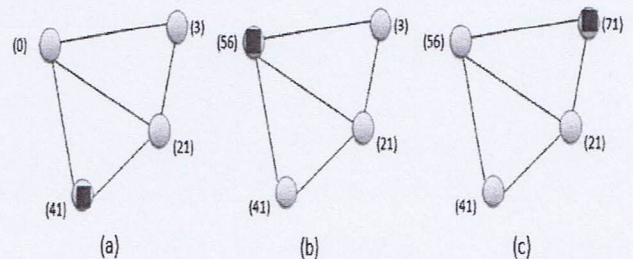


図5 探索アルゴリズムの動き。

この探索アルゴリズムでは、ロボットは図5のようにノード間を移動する。図5ではノードが丸い図形で、そのノードに重なるような四角がロボットであり、そのノードの付近にある数字がそのノードが持つ最終チェックがなされた時間を表現している。そしてa,b,cの順番で役割が移り変わっている。

システムが動き始めてからそのノードにロボットがいつ到着したかを記録している数値であり、この時間のデータを用いることにより刻々と変化する状況に対してロボットをどのノードに移動させるかを判断する。

役割が探索のロボットはaからb、bからcのように隣接するノードからノードが保持する時間の数値の中で一番小さいノードに移動することでノード間の探索を完了させる。このノードが持つ時間は初期状態が0であり、すべての隣接ノードが持つ時間の値が0だった場合、ランダムにノードを移動する。

このシステムが開始されてからの時間を用いることで刻々と状況が変化するという災害時の探索において有効である。

#### 4.2 探索の役割

探索の役割は出口までの安全な経路の探索である。出口までの経路を探索した後にロボットの役割は誘導に変更される。



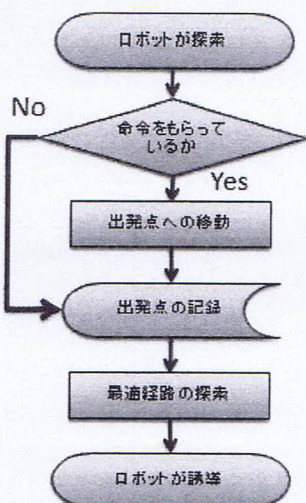


図6 探索の処理の流れ。

この役割ではロボットは図6のように処理を行ない探索の役割から収集されたデータを元に安全なルートを出力する。また、ロボットの役割が探索へ移行した時、ロボットが命令開始点を保持しているか確認する。保持している場合は命令が来た時に渡されたノードを出発点として登録する。保持していない場合は役割が探索のロボットが探索へ切り替わったノードを出発点として登録する。

ここで命令開始点を保持している場合、命令開始点から出発点への移動を行なう。

次に出発点から出口ノードへの経路を探索する。この時、確定した探索の役割で求め出した最適経路の最終到達点の出口ノードを登録することにより、別の探索で同じ出口に集中した誘導が行われ、1つの出口に避難者が殺到するという事態を回避出来る。ここで出発点から出口までの経路を確定させるのにワーシャルフロイド法を用いる。

ここでワーシャルフロイド法を用いる理由はここで求めるべき経路のゴールが複数あるからである。他の最短経路問題を解決するA\*法等があるが本システムではふさわしくない。最適なゴールがどこにあるのかわからない状態で最短経路を探すには全通りを検索するワーシャルフロイド法が適している。役割を探索から誘導に移行する条件は役割が探索のロボットが最短経路を探し出す事である。つまり、探索が終了するとロボットの役割は探索から誘導へ移行するのである。

#### 4.2.1 ワーシャルフロイド法 [7]

役割が探索のアルゴリズムにワーシャルフロイド法を用いる。ワーシャルフロイド法とは最短経路を求めるアルゴリズムの一つである。このアルゴリズムの特徴として、全ての2点間の最短路を求めるという点が挙げられる。

他の最適経路探索アルゴリズムにA\*法やダイクストラ法等があるが、それらは特定の2点間の最短路を求めるというアルゴリズムである。本論文で紹介するシステ

ムではロボットの出発点から安全な経路を探す時に複数ある出口からゴールを決める。つまり、その時の状況によりゴールが変わるのである。よって、特定の2点間の最短路を求めるA\*法やダイクストラ法はここでは適さないのである。

以上によりA\*法やダイクストラ法よりもワーシャルフロイド法の方が適しているといえる。

#### 4.3 誘導の役割

誘導の役割は人を出口まで誘導することと、探索の役割が開始された場所まで戻ることである。その後にロボットの役割は探索に変更される。

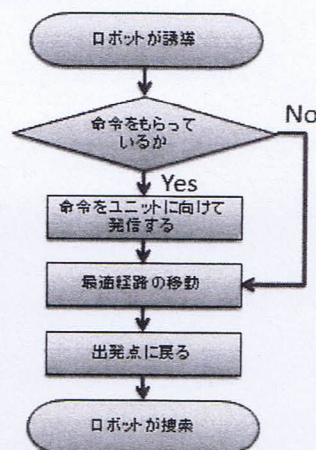


図7 誘導の役割の処理の流れ。

この役割では図7のようにロボットが処理を行なうことで、ロボットの誘導の役割が行われる。役割が誘導になったロボットは人を出口まで避難誘導の補助をする。役割が誘導になったロボットは周辺の探索の役割を持つロボットに対して役割を探索となる命令を出す。この誘導の役割は2つのパターンがある。外部操作により役割を探索から探索になったパターンか誘導の役割を持つロボットの命令を受け取って役割が探索から探索になった誘導の役割を持つロボットかの2パターンである。

最初に行なうことはどちらのパターンから役割が誘導になったかの判定である。命令が与えられていなかった場合には役割が誘導になったロボットは誘導アルゴリズムを用いて、命令開始点、出発点を登録し、他の探索の役割を持つロボットが他のロボットの役割を探索にする命令を出力する。この命令を出す行動は誘導の役割を持つロボットが出発点から出発点以外のノードを通過する度に2回行なう。次に命令が与えられずに役割が誘導に変更されたロボットは他の探索ロボットを変更させる命令を発信せずに役割が探索のロボットで出力された経路から出口ノードへ向かう。

そして、誘導の役割を持つロボットが出口ノードへ到着するとロボットは登録されている出発点、もしくは出発点より優先度が上位の命令開始点までの最短経路をルートコストからA\*法で出力し、最短経路を出口までの経路に保持し、移動する。その後、出発点、命令開始点、



出口までの経路を初期化し、役割を誘導から探索へ変更する。

### 4.3.1 誘導アルゴリズム

役割が誘導のアルゴリズムとは誘導の役割を持つロボットが他の探索の役割を持つロボットの役割を探索へ変更する命令を送る際に、どの探索の役割を持つロボットに役割を探索に変更する命令を送るのかを決定する際に用いるアルゴリズムであり、このアルゴリズムを用いる事により、避難者が1つの出口に集中しないようにする。

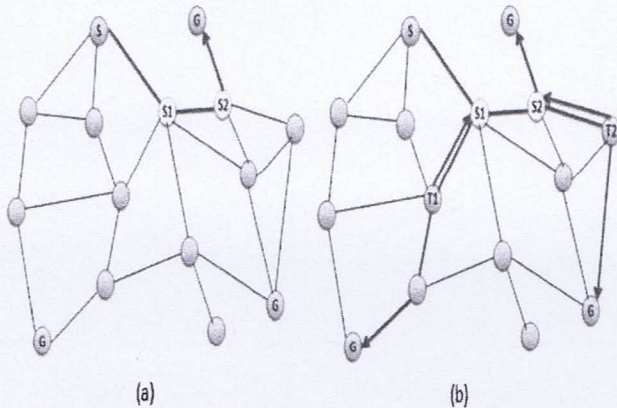


図8 誘導アルゴリズムの動き。

図8は誘導アルゴリズムの動きを表したものでロボットのスタート位置とゴール予定地、通過するノードを用いる。図8ではaからbに移り変わる。出口までの誘導経路は一つだけではなく複数の出口への誘導経路を用意するために、役割が探索のロボットから受け取った経路から2つのノードを図8のS1, S2を出発点と定め、S1, S2の隣接ノードが持つ時間が一番小さいノードT1, T2の命令開始点としてロボットに保持させ、命令フラグを与えて役割を探索に変更する。

出口までの経路を受け取った時、通過するノードが2つより多かった場合、出発点から通過する順番に2つのノードに出発点と命令を与える。

### 4.3.2 A\*法[8]

誘導の役割を持つロボットが出口まで移動した後に探索の役割が開始された場所までの経路を求めるアルゴリズムとしてA\*法を用いる。

このアルゴリズムの特徴として、特定の2点間の最短経路を求めるということができ、本システムでは誘導状態の時に、そのロボットが到達した出口ノードから出発点、もしくは到達した出口ノードから命令開始点といった2点間の最短経路を求めるのに用いる。

この時にA\*法を用いるのは、特定の2点間が定まっているのでこの手法を用いる。

## 5. 実験

実験では東京駅の地下街である八重洲地下街を例にあげ、シミュレーションを行った。

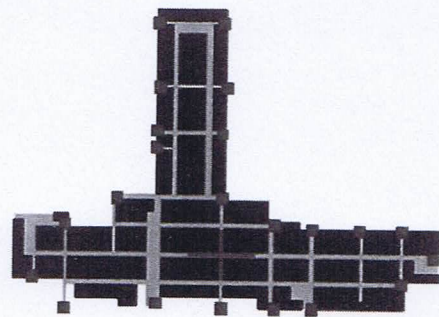


図9 実験に用いる地図。

図9は実験に用いる地図であり、交差点と出口をノードとして設定して、50ノードが用意されており、そのうち図9の四角の部分である22のノードは出口ノードとなり、通路に広がっているのがガスである。この環境ではロボットは1m/sで進むと仮定して実験を行なう。ガスは発生するポイントがノードを中心としてランダムに発生するものとして、ガスが広まる速さはロボットの1/10の速さで拡散していくものと設定する。

### 5.1 実験方法

今回の実験では探索と誘導の効率を別々に実験する。探索の実験は行わない。

#### 5.1.1 探索での実験方法

探索の実験は以下の過程で行なう。

- 1) ガスが発生した後にロボットの役割が探索で起動する。
- 2) 探索の役割を持つロボットはノードに到着する毎にノード間のコストとノードが持つ時間情報を更新する。
- 3) 隣接ノードから時間情報が更新されていないノードへ向かう。

以上の動作で全エッジデータを収集するまで繰り返し、全エッジデータを収集し終わった時の時間を計測する。また、ロボットが移動する際の時間は経過するように設定する。

#### 5.1.2 探索、誘導での実験方法

誘導の実験は以下の過程で行なう。

- 1) 探索の役割を持つロボットの役割を探索に変更する。
- 2) 出口までの経路を検索
- 3) ロボットの役割を誘導に変更
- 4) 命令フラグが無ければ通過するノード2つに命令を送る。
- 5) 経路を移動する。
- 6) 出口から出発点へ移動する。

この実験では、出口までの経路を検索した時間を計測し、最初の誘導ロボットが出口に到着するまでの時間と命令を与えられ、出口まで移動したロボットの到着時間を測定する。

### 5.2 実験結果

探索の実験結果と誘導の実験結果を表示し、その実験結果についてそれぞれ考察を行なう。



### 5.2.1 探索での実験結果

今回はロボットを単体で用いて環境情報を収集した場合と10体のロボットを用いて環境情報を収集したデータを比べる。

表1. 環境収集実験

| 計測形式    | 時間(s) |
|---------|-------|
| シングルの場合 | 6053  |
| マルチの場合  | 1248  |

表2. 使用ロボット数別環境情報収集

| ロボット数 | 時間(s) |
|-------|-------|
| 5     | 1847  |
| 10    | 1248  |
| 15    | 696   |
| 20    | 626   |
| 25    | 519   |
| 30    | 578   |

表1で集計されているのは5.1.1の実験方法での完了時の時間を1000回の集計で平均したものである。同じ条件下でロボットを複数用いた場合と1つのロボットを用いて行った場合を計測した。この結果から複数のロボットを用いた計測が有効であることが判る。そして、表2では使用ロボット数が増加するにつれて環境情報収集必要時間が短くなると考えられたが、結果を見ると25体のロボットと30体のロボットの時を比べるとそうではないのがわかる。これはロボットを増やしすぎたために探索効率が上がらなくなり、最大効率に収束したためであると考えられる。

### 5.2.2 誘導での実験結果

この実験では最初の誘導の役割を持つロボットが出口に到着した時間と命令を発信してから受け取ったロボットが出口まで到着する時間を計測した。

表3 ロボット別完了時間

| 計測ロボット    | 時間  |
|-----------|-----|
| 誘導開始      | 71  |
| first 命令  | 123 |
| second 命令 | 175 |

表3で集計されているデータはシステムが実行されてからランダムに1つのロボットの役割を誘導にしたロボットから5.1.2の実験方法で1000回の集計で平均したものである。この結果と表1の結果をあわせて考えると、誘導開始ロボットの誘導結果は良いが、first 命令ロボットの誘導結果は、全ノードをチェックする時間の1/10以上となってしまっている。

他にも second 命令ロボットに注目すると最初に誘導を開始した誘導ロボットと比べて2倍以上の誘導時間の差がある。人の流れを考慮して誘導するロボットと出口を分けたが、このことから誘導を行なうロボットは複数用いるよりは単体の方が良い結果が出る可能性がある。

## 6. まとめ

本論文では災害発生時に複数の役割を持ったマルチロボットで環境情報を収集し、時間と共に変化する状況に対応した避難誘導を目的としたシステムの提案を行い、その提案に対してのシミュレーションによる分析を行った。その分析による現時点での評価は5.2.の結果のようになり、環境情報の収集についてはこのアルゴリズムがマルチロボットでの測定において有効であることが伺える。しかし、環境ごとにロボットがいくつ必要なのかはその場面毎に考える必要があり、その必要ロボット数の推定により、導入は難しく見える。よって、導入が比較的容易なセンサユニットを配置するという試みの方が導入においては容易であるといえる。したがってこのシステムを導入するにあたって予想した場合のメリットとして予想したコストの節約においては適さないといえる。さらに誘導においては、人がどれだけ密集しているかにもよるが、出口と誘導するロボットを分ける必要性は低いと言える。この項目に関しては人がどれだけ密集しており、その密集レベル毎に人がどれだけ速度で移動できるかのデータを用いて実験を行なうことで詳しい結果が出ると推測される。

以上のことから、本論文で提案したような避難誘導では問題があり、環境情報の収集においては前述した試みが必要であり、避難誘導においては、また異なるデータとその計測方法が必要である。

## 参考文献

- [1] Matsuno Masaru, "Active Escape Guiding System", (Future of Disaster Prevention and Emergency Lighting), 90(4), pp. 222-225, 2006.
- [2] 瀧本浩一, 三浦房, 自立分散協調による避難誘導システムの開発, 社会技術研究論文集, Vol. 8, pp.82-90, Apr. 2011.
- [3] Denis F. Wolf and Gaurav S. Das "Mobile Robot Simultaneous Localization and Mapping in Dynamic Environments", Autonomous Robots, Vol.19, No.1, pp.53-65. 2005.
- [4] RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, "Multi-agent deterministic graph mapping via robot rendezvous", USA 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1278-1283 May 14-18, 2012.
- [5] 柏村洋平, 上野敦志, 辰巳昭治, マルチロボットシステムにおける自発的な協調方法を用いた動的役割割当, 人工知能学会全国大会論文, 20th B1-1, 2006.
- [6] 塚本和也, 榎原茂, 安部憲広, 尾家祐二, シームレスハンドオーバー機構を用いた自律移動ロボットの自由な移動の実現, 情報処理学会九州支部若手の会セミナー, pp. 5-11, 2008.
- [7] 佐藤 史隆, 廣安 知之, 三木 光範, 最短経路問題におけるアルゴリズム【ウォーシャル・フロイド法】の調査, ISDL Report No. 20040716001.
- [8] Hart, P. E. Nilsson. N. J. Raphael, B. "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths", IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics SSC4 (2), pp. 100-107. 1968.