自律移動ロボットの視覚によるナビゲーションシステム* (階層形ナビゲーションシステム HALAS の提案とエラーリカバリー移動実験)

福田 敏男^{*1}, 横山 誉成^{*2}, 新井 史人^{*1}
下島 康嗣^{*1}, 伊藤 茂則^{*2}, 阿部 靖則^{*3}
田中 幸悦^{*3}, 田中 祥夫^{*4}

Vision Based Navigation System of Autonomous Mobile Robot (Proposal and Error Recovery Locomotion Experiments of Hierarchical Navigation System HALAS)

Toshio FUKUDA, Yasunari YOKOYAMA, Fumihito ARAI,
Koji SHIMOJIMA, Shigenori ITO, Yasunori ABE,
Kouetsu TANAKA and Yoshio TANAKA

The role of a robot is to save money and manpower in the real world. When the robot accomplishes this role to realize an autonomous function, unification of the system is a central issue. Hence, it is a subject to construct the control architecture as an unified method of intelligent control. Some research works about the error recovery system are carried out on manipulators, manufacturing systems, computer networks and so on. However, the hierarchical error recovery system has not been studied so much for autonomous mobile robots. In this paper, we propose a hierarchical control architecture HALAS (Hierarchical Adaptive and Learning Architecture System) as a control architecture for an autonomous mobile robot. The main feature of HALAS is the hierarchical error recovery function. We applied HALAS to an air conditioning equipment inspection robot. The validity of the proposed system is shown through some experimental results.

Key Words: Hierarchical Control Architecture, Autonomous Mobile Robot, Navigation System, Measurement and Control, Robust Control, Error Recovery

1. は じ め に

近年, ロボットは活躍の場所を広げ, さまざまな分野においてその能力を発揮している。ロボットの果たす役割の一つは, 人間によって人工的に作り出されたコンピュータ上の世界からインタフェースを介して接続された現実世界において, さまざまなタスクを人間に代わって行うことである。人間は, コンピュータ上の世界において, CAD を用いた設計, 工程管理・物流管理などを行い, ロボットは, 現実世界の省力化, 省人化などを実現する役割を担う(図1)。

著者らは, 視覚を有する自律移動ロボットとして, 風量検査ロボットについて研究を行っている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾⁽¹⁴⁾。建設現場における風量検査は作業の自動化が望まれる分野であり, 風量検査ロボットは, 従来人間が行っている風量検査を自律移動して行い, 現実世界の省力化・省人化を図ることを目的としている。これまでに, ロボットが自律移動する際に必要となる

環境認識に関して研究を行い, 視覚を用いたランドマーク認識手法として, 四角形認識法やファジィ・テンプレートマッチングを提案した⁽³⁾⁽⁴⁾。

しかし, 画像認識の機能だけでは, ロボットが精度よく自律移動するのは不可能であるので, マップを利用するといった別の機能をロボットにもたせることで, システム全体の信頼性の向上を図る必要がある。図1で示したようにロボットが現実世界での役割を果たすためには, 自律的な機能が求められるようになっており, システムを統合することが, 自律的な機能を搭載する際の中心的な課題となっている⁽¹⁾。つまり,

Fig. 1 Role of robot

* 原稿受付 1996年1月18日.

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町).

^{*2} 名古屋大学大学院.

^{*3} 正員, 三菱冷熱工業(株) (〒300-42 つくば市和台41).

^{*4} 三菱冷熱工業(株).

自律移動ロボットがその役割を遂行するには、与えられた指示に対して適切な行動を計画・決定する機能や、計画した行動を実行するために環境を知覚・認識する機能が必要となる⁽²⁾。このように、自律移動ロボットのナビゲーションシステムの開発では、さまざまな機能を統一的に扱うことができる制御アーキテクチャを構築することが課題となる。

一般に、自律移動ロボットが、マップだけを用いて、デッドレコニングで移動すると累積誤差を生じる。同様に、外界センサだけでも、環境の認識がうまく行えなかった際には、正確に移動できなくなる。ここで、視覚センサを用いて画像認識において生じるエラーを考えると、エラーには2種類のものがある。一つは、ランドマークがあるのにないと思ってしまう場合であり、“第1種のエラー”と定義する。もう一つは、ランドマークがないのにあると思ってしまう場合であり、“第2種のエラー”と定義する。著者らは、第2種のエラーのうちランドマーク認識の際に生じた誤認識からリカバリーするためにマイナスプリミティブを適応することで認識率の向上を図った⁽¹⁰⁾。しかし、すべてのエラーを画像認識機能だけで取り除くことはできない。そのため、マップ情報や移動機構など別の機能を用いて、復旧する必要がある。エラーリカバリーに関する従来研究としては、ロボティクスの分野において、マニピュレータ、マニファクチャリングシステムに関する研究⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹⁶⁾、コンピュータソフトウェアの分野において、ネットワーク間の通信などに関する研究⁽¹³⁾がなされている。しかしながら、自律移動ロボットのナビゲーションにおいては、エラーリカバリーを考慮した階層形制御システムは、ほとんど提案されていない。また、エラーリカバリーを考慮した階層構造アーキテクチャとしては、渡辺・坂村によって提案されたコンピューテーションに関する研究⁽¹⁵⁾や、高橋らによるハンドアイロボットに関する研究⁽¹¹⁾があるが、自律移動ロボットに適用されていない。そこで、自律移動ロボットのナビゲーションシステムを開発する際に、例えばセンシングによる誤差とマップの誤差を相互に補うように、異なった機能間でのエラーリカバリーを考慮した階層構造を構成する制御システムが必要となる。

本論文では、エラーリカバリーを考慮した階層形制御アーキテクチャの構造をHALAS(Hierarchical Adaptive and Learning Architecture System)として提案する。HALASでは、自律移動ロボットの機能をモジュールに分割することで、階層形制御アーキテクチャのモジュール間のリカバリー機能により、ナビ

ゲーションにおいて生じるエラーの検出から復旧をすることができる。本論文では、HALASを風量検査ロボットに適用する。そして、ランドマーク探索においてマイナスプリミティブを適応しても、画像認識機能だけでは取り除くことのできなかった第1種・第2種のエラーを、画像認識機能とマップ情報を利用する適応機能を用いることにより、リカバリーして移動制御する実験を行い、システムの有効性を示す。

2. 階層制御アーキテクチャ

2.1 制御アーキテクチャ 自律移動ロボットの知的制御を実現する際には、適切な行動を決定し、環境を知覚・認識することのできる制御アーキテクチャを構成することが課題となっている。そのため、本論文では、自律移動ロボットをナビゲーションする際に必要となる制御アーキテクチャの一手法を提案する。

2.2 階層制御アーキテクチャ 脊椎動物の運動には、主体的意志によって起こると認められる随意運動と、意志や意識と無関係な過程で起こる不随意運動がある⁽¹⁷⁾。例えば、随意運動は、手足を意のままに動かす運動であり、不随意運動は、反射運動や心臓筋の自動性による運動などがこれに該当する。自律移動ロボットの制御においても、このようなことを規範とすると、異なった機能に関しては、異なったレベルの制御を行う必要があり、そのためには制御構造を階層化するとよいと考えられる。また、自律移動ロボットを効率よく知的に制御を行うには、制御アーキテクチャが不可欠なものとなり⁽¹⁾、これまでにさまざまな階層構造を形成した制御アーキテクチャが、提案されている。例えば、Albusらは、ロボットの階層制御法としてReal-Time Control Systemを考慮したうえで、NASREMを提案している⁽⁶⁾。Brooksは、昆虫などの自律システムを模倣し、サブサンクションアーキテクチャを提案している⁽⁷⁾。Isikらは、プランナ、ナビゲータ、パイロットレベルで階層構造を構成するIMASを提案している⁽⁸⁾。Rasmussenは、知識ベース・ルールベース・スキルベースの行動により階層を構成するアーキテクチャを提案している⁽⁹⁾。また、柴田・福田は、システムを学習レベル、スキルレベル、適応レベルの三つの制御レベルにより構成した階層形アーキテクチャを提案した⁽⁵⁾。移動ロボットでは、センシング、認識、経路計画など移動に伴って環境が変化する中で、運搬、設置、検査といった種々の作業を行うために作業が複雑化する。そのため、タスクごとにモジュール構造にすることによりシステムの柔軟性を高め、さらにロバスタな階層形の適応と学習を考慮

したモジュール構造のアーキテクチャが構成できると考えられる。

本論文では、エラーリカバリーを考慮したナビゲーション制御アーキテクチャを構築するために、制御アーキテクチャの構造を階層構造とする。階層構造にすることにより、

◇モジュール内で、エラーを検出できたときには、パラメータのチューニングを行った後に、タスクを下層に送ることによりリカバリーが可能である。

◇モジュールから送られる情報にエラーが含まれていた場合にも、異なった知識を用いることで、上層でリカバリーすることが可能である。

という特徴がある。そして、自律移動ロボットに取り付けられたセンサから得た情報を基に、ロボットが自らの状態や周囲の環境の状況を判断し、アクチュエータへ指令信号を送るまでの制御システムについて考察する。3章において、エラーリカバリーを考慮した自律移動ロボット制御アーキテクチャとして階層形適応・学習アーキテクチャシステム HALAS(Hierarchical Adaptive and Learning Architecture System)を提案する。

3. 自律移動ロボット制御 アーキテクチャ

3.1 階層形適応・学習アーキテクチャシステム (HALAS)

本論文で提案する制御アーキテクチャは、図2, 3の階層形適応・学習アーキテクチャシステム HALASである。図2は、HALASの全体構造を示しており、センサ入力からアクチュエータ出力が得られるまでのシステムモジュールの関係を示している。図3は、そのシステムモジュールの構成を示した

Fig. 2 Structure of HALAS
(Hierarchical Adaptive and Learning
Architecture System)

もので、各システムモジュールには、学習機能と適応機能を有するものとする。

次に制御アーキテクチャ内の情報の流れを示す。ロボットには、さまざまなセンサが搭載されており、それらから得られる情報もさまざまである。そこで、まず初めに図2に示すセンサセクションにより、各システムモジュールが必要としているセンサ入力を選択する。システムモジュールは、センサ入力に基づき、知識データベースを利用することでシステムのパラメータの改善などを行う適応機能を用いてタスクを行う。学習機能は、繰返し過程による構造の変化を得る過程であり、下層のモジュールのタスク行動パターンを学習し、制御結果を評価するものである。ここで、知識データベースは、事前知識や学習機能により繰返しロボットが移動することで獲得する知識を蓄えておくものである。例えば、ロボットがあらかじめもっているマップや初期のパスプランなども知識データベースに含まれる。最後にアクチュエータセクションは、システムモジュールの制御信号によって適切な行動を選択し、システムモジュールの出力に基づきアクチュエータを作動させる。

さらに、各システムモジュール内では、センサ入力に基づき、図3に示すような階層構造を構成する各サブモジュールにおいて、さまざまなタスクを行う。サブモジュールは、センサ入力もしくは、下層のサブモ

Fig. 3 System module

ジュールの出力を入力としてタスクを行う。また、サブモジュールは、異なったレベルのタスクを行う。その中には、随意運動と不随意運動のように異なったレベルの制御がある。そして、各レベルの制御が、階層構造を構成しアクチュエータに制御信号を送り、各モジュールからの出力は、図2のHALASの構造で示した、アクチュエータセレクションで選択、結合する。サブモジュール内では、エラーを検出した際に、知識データベースに基づいた適応機能を用いて、パラメータのチューニングを行った後にタスクを下層のサブモジュールに送ることによりリカバリーすることが可能である。また、サブモジュールから送られた情報にエラーが含まれていた場合には、上層のモジュールにおいて、異なった知識を用いたレベルの制御を行うことで、リカバリーすることが可能である。

このように、HALASは、異なった機能間のエラーリカバリーを考慮した階層制御アーキテクチャであるという特徴がある。

3.2 風量検査ロボットへの適用 著者らは、一般的なオフィスビルで用いられるシステムラインと呼ばれる構造物上のアネモスタット形吹出し口(図4. 以下アネモ)をランドマークとして図5に示す風量検査ロボットを用いて研究を行っている。しかし、ランドマーク探索においては、誤認識を生じることがあり、前報において、ランドマークの視覚認識率の向上を図るため、ファジィ・テンプレートマッチングにマイナスプリミティブを考慮することを提案した⁽¹⁰⁾。その結果として、ランドマーク探索の際の誤差を低減でき、エラーリカバリーできることを示した。また、アネモ直下で用いる小形カメラのセンシングの際に、自己位置姿勢の認識結果を基に移動した後であっても、移動履歴に基づいてエラーリカバリー可能であることを示した。しかし、画像認識機能だけでは、ロボットが認識に失敗すると、自律移動できなくなる。このような場合、画像認識機能とマップ情報を用いる適応機能を用いることで、エラーリカバリー可能となる。本節では、HALASに則して風量検査ロボットが行っている

異なったレベルの制御機能を述べる(図2)。

ロボットの構成は、センサシステムとして、2台のCCDカメラが視覚センサとして取付けられ、他に超音波センサや接触センサが搭載されている。移動機構は、独立二輪駆動方式で、前後にキャスタを設けることでランドマーク直下での回転も可能である。ロボットは実験環境の中で、視覚センサからHALASへ入力があると、画像前処理によってプリミティブを抽出し、そのうちマイナスプリミティブを考慮することで、アネモの探索の際にロバスト性が向上する適応機能がある⁽¹⁰⁾。アネモの探索では、ロボットはテンプレートの移動方向をファジィ・ニューラルネットワークにより学習することで、サッケードを生じアネモを探索することができる。そして、ロボットは探索結果に基づいてロボットが自己位置姿勢を認識する⁽⁴⁾。そして、ロボットは、アネモ直下に誘導され風量検査を行うことができる。最終的に、ロボットはマップを用いて、パスプランを作成して自律移動することができる。

本論文では、ナビゲーションにCCDカメラを用いた場合について述べているが、センサシステムとして、レンジファインダ、ジャイロなどをロボットに搭載した場合にも、HALASを適用可能である。また、風量検査ロボットのナビゲーションにおいて、HALASを用いて考慮すべきエラーには、画像認識・サーボ・マップのエラーなどがある。

3.3 サブモジュールのタスク HALASを風量検査ロボットに適用した場合のサブモジュールの構成が、図3に示したものである。ただし、ロボットは、あらかじめ移動する環境のマップとその情報に基づい

Fig. 4 Anemo (Air diffuser)

Fig. 5 Autonomous mobile robot

た初期のグローバルパスプランをもち自律移動するものとする。以下に各サブモジュールでのタスクを示す。

(1) Primitive Extraction:

画像前処理。

(平滑化, 一次微分, 二値化, 弧立点除去)

プラスプリミティブ, マイナスプリミティブの抽出。

(2) Anemo Perception:

システムラインの検出。

プリミティブの結合によるランドマーク認識。

プラスプリミティブ, マイナスプリミティブの学習。

(3) Selflocation:

ランドマーク探索結果から自己位置・姿勢の認識。

(4) Map Correspondence:

CAD Data と自己位置認識結果の対応確認。

ランドマークどうしの相関の確識。

デッドレコニングの結果とセンシング結果の比較。

(5) Obstacle Avoidance:

障害物の探索ならびに検出。

障害物回避に伴う経路変更。

(6) Local Path Planning:

局所経路計画の訂正。

(7) Motion Feature Analysis:

ロボットの行動特性の解析。

(8) Global Path Re-planning:

最短経路の計画。

タスクを実行する際には, 各サブモジュール内では, どうしても取除くことができないエラーが存在する場合が考えられる。そこで, 3.1節で述べたとおり HALAS では各階層でエラーリカバリーを考慮した構造になっている。したがって, 仮に下層でエラーが生じたままタスクが実行された場合であっても, 上層では, そのエラーを低減することが可能である。結果として, システム全体では, タスクを実行する際のロバスト性が向上することになる。

4. HALAS による エラーリカバリー方法

本章では, HALAS 内のエラーリカバリー機能として, Map Correspondence Module でのエラーリカバリー動作が有効に働くことを実験的に示す。

4.1 Map Correspondence Module Map Cor-

Fig. 6 Locations of robot and landmark

respondence Module は, CAD data により構成されたマップ情報とセンシングに基づいた認識結果との対応を行うモジュールである。そして, 下層のモジュールである Perception Module, Self Location Module においてマイナスプリミティブとプラスプリミティブを考慮しても取除くことのできなかったエラーを, マップ情報を用いることでリカバリーする機能がある。以下の節では, 下層のモジュールでリカバリーできないロボットの位置誤差に起因する動作と姿勢誤差に起因する動作の二つからリカバリーする実験方法を示す。

4.2 自己位置リカバリー方法 ロボットとアネモの相対位置関係を図6に示す。また, ロボットが, センシングした結果によって得られた位置・方位 (P_s, D_s) と CAD データから構成したマップ情報により得られる位置・方向 (P_m, D_m) を以下のように定義する。

P_s : Position based on sensing result

D_s : Direction based on sensing result

P_m : Position based on map

D_m : Direction based on map

センシング結果 P_s はセンシング状況によって変化する(図6)。そこで, センシング結果 P_s として以下のような結果が得られたとする。

Level 1: $|P_s - P_m| \leq Pr$

Level 2: $|P_s - P_m| > Pr$

ただし, Pr : Recoverable Position とする。

Pr は, メインカメラのセンシングの後に行う, ランドマーク直下において小形カメラのセンシングにより, エラーリカバリー可能な範囲の限界を示す値である。

それぞれのレベルにおける移動制御方法を, 以下の様に設定した。

Level 1: メインカメラセンシング結果に従って, そのまま動く。小形カメラでリカバリーできる範囲なので, ランドマーク直下までナビゲーションした後に

Fig. 7 Experimental Environment

風量検査を行うことができる。

Level 2: 暫定的な距離として, Pm から Pt (Tentative position) だけ前進する。前進した位置から改めてメインカメラでセンシングを行う。

Level 2 のエラーリカバリー動作を設定した理由は, 以下のとおりである。理想的な環境においてセンシング結果は, $Ps \equiv Pm$ となるが, 環境のさまざまな要因や下層のモジュールにおいて生じたエラーなどにより Ps と Pm は必ずしも一致するとは限らない。その解決策として, 上位の階層である Map Correspondence Module により,

(1) ランドマークの誤認識に起因する誤動作の防止。

(2) ランドマークの認識からの立て直し, というタスクを行いエラーリカバリーする。(2)の具体的な対策として,

(I) 計測距離精度の向上。

(II) センシングの悪環境からの脱却。

があげられる。

4.3 自己姿勢リカバリー方法 実験環境を図7に示す。ロボットは, 初期状態において①の地点のアネモの直下におき, 姿勢はシステムラインと平行とする。その位置から雲台を制御して③の地点のアネモをセンシングするものとする。

センシング結果 Ds として以下のような結果が得られたとする。

Level A: $|Ds - Dm| \leq \theta \text{ small}$

Level B: $|Ds - Dm| > \theta \text{ small}$

$\theta \text{ small}$: Recoverable angle by sensing with small camera

$\theta \text{ small}$ は, 4.2 節の Pr と同様にエラーリカバリー可能な範囲の限界を示す値である。エラーリカバリー方法を, 次の二つに分けて説明する。

Condition 1): ロボットが初期状態から③の地点のアネモをセンシングしたとき

Fig. 8 Flowchart of orientation error recovery

Level A: センシング結果 Ds に従って移動する。

Level B: センシング結果 Ds に従って移動すると, アネモを見失う可能性があるため, システムラインをはずさないで③の地点に近づくために $Lm1$ だけ移動して, Condition 2) に移る。

Condition 2): ロボットが②の地点から③の地点のアネモをセンシングしたとき

Level A: センシング結果 Ds に従って移動する。

Level B: センシング結果 Ds に従って移動すると, アネモを見失う可能性があるため, $Lm2$ だけ移動して, マップの間違いを発見できるように③の地点に移る。

ただし, ロボットが①の地点から②の地点に移動した後は, ロボットの機構上そのままでは, ③の地点のアネモをセンシングすることができないので, 90 deg 回転してセンシングを行う。その際回転が不足するというエラーが生じた場合には, 以下の式

$$|D_{sys} - D_m| < \theta \text{ anemo}$$

D_{sys} : Direction based on inclination of systemline

$\theta \text{ anemo}$: Suitable angle for sensing anemo

に従って, ロボットが $|D_{sys} - D_m|$ だけ回転することによりリカバリー可能である。図8は, 以上の制御方法をフローチャートにまとめたものである。

5. HALAS によるエラー

リカバリー移動実験

5.1 自己位置リカバリー実験結果 4.2 節で示した Map Correspondence Module による計測距離精度の向上を図るエラーリカバリー機能として, セン

Fig. 9 Sensing distance accuracy

Fig. 10 Inclination of robot

シング悪環境からの脱却の効果を示す実験を行った。

5・1・1 計測距離精度の向上 マップによるランドマーク-ロボット間の距離 P_m の位置において、メインカメラを用いてセンシングを行い、Level 2の状態のまま移動すると、結果としてランドマークを自失うこととなる。そこで、暫定的な移動をしてランドマークに近づくことにより、ランドマーク認識による計測距離の精度が向上すると推定できる。しかし、ロボットの構造によりカメラの仰え角 ϕ には限界があるので、近づく距離には限界がある。そこで、鉛直軸を基準として最大仰え角を $\phi_{\max}$ 、カメラからランドマークまでの高さを H として、そのときのロボット・ランドマーク間の距離を $P_{m\phi_{\max}}$ とすると、

$$\phi_{\max} \doteq 28 \text{ deg} \quad H = 1\,930 \text{ mm}$$

$$P_{m\phi_{\max}} \doteq 1\,300 \text{ mm}$$

となる。

メインカメラのセンシングにおいては、ズームを用いることで、画像内のランドマークは常に同じ同じ大きさに調整されている。そして、図9は、3 000 mmから徐々にランドマークに近づいた場合の計測距離の精度を求めた結果である。 P_m が短くなるにつれて、計測距離の誤差が減少することがわかる。

5・1・2 センシングの悪環境からの脱却 センシングの悪環境としては、床面の傾き、光、ロボットの

Fig. 11 Relations of inclination and sensing distance error

姿勢による影響などさまざまな要因が考えられる。ここでは、床面の傾き、ロボットの姿勢の影響を模擬するものとしてロボットを図10のようにジャッキを用いあらかじめ傾けておき、センシングを行った。

ロボットを傾けることで図10の状態であれば、センシング結果 P_s は P_m に比べ短くなり、逆にロボット前部をもち上げる(このとき、傾斜角 α を正とする)ことにより、 P_s は P_m に比べ長くなる。傾斜角 α を -3° から 3° までとしたときの実験結果を図11に示す。

傾斜角が、 $\alpha \leq -2$, $\alpha \geq 2$ の領域においては、計測距離が小形カメラによるセンシングでリカバリーできる値を超えている。つまり、4・2節のLevel 2の状態として分類される。ただし、傾斜角が -3° のときは、ランドマーク探索のときに誤認識を生じて計測不可能であった。

このように、悪環境下では、センシングによる計測距離に図11のような誤差を生じる。しかし、センシング結果とマップを照合することで、暫定的な移動をすることが可能になる。その移動距離によって、計測距離精度は図9に示した値となり、ランドマークに近づくことにより距離計測精度は向上し悪環境から脱却できる。以上により、 $P_m = 3\,000 \text{ mm}$ 、傾斜角が 3° のときに誤差が 234.22 mm であったのが、 $P_m = 3\,000 \text{ mm}$ から $P_t = 300 \text{ mm}$ 前進すると $P_m = L = 2\,700 \text{ mm}$ となり、図9のグラフより誤差が約 30 mm となり、エラーリカバリーされていることがわかる。

5・2 自己姿勢リカバリー実験結果 4・3節で示した図8のフローチャートに従って制御したときの実験結果を示す。図7の③の地点のアネモの隣に Perception Module において、①の地点から見ると誤認識を生じるような構造物を設置する。そのような環境において、図7の初期状態①の地点で、ロボットがセ

Table 1 Position/Orientation Accuracy
(Without Map Correspondence)

	Position Error (mm)	Orientation Error (deg)
Without MC	160.90	4.71

Table 2 Position/Orientation Accuracy
(With Map Correspondence)

	Position Error (mm)	Orientation Error (deg)
With MC	9.13	0.36

ンシングを行うと表1のような誤差を生じる。

Map Correspondence Moduleでは、表1の Perception Moduleにおいて生じた姿勢誤差が、リカバリ可能な角度 θ small と比較して大きくなる。よって、4・3節の Condition 1) Level B のようにマップ情報により移動する。マップに従って移動する際に生じる誤差には、デッドレコニングの精度が影響する。デッドレコニングの精度は、3 000 mm の直線移動において位置精度 23.88 mm, 姿勢精度 1.88 deg である。②の地点において 90° 回転するときのエラーリカバリにおいては、撮影した画像上でのシステムラインの傾きから、ロボットの姿勢を求め 1.36° の精度でリカバリすることができる。また、②の地点においては、ロボットがランドマークに近づくことにより、5・1・1 項の図9で示したとおり計測距離精度が向上するという効果が得られる。そして、センシング結果Dsに従って移動したときの位置姿勢誤差は、表2のようになる。ただし、①の地点から③の地点に移動する間のリカバリ動作においては、先に述べたデッドレコニングの精度を考慮しなければならない。

以上により、HALAS の構造によって Perception Module で生じた誤差が、Map Correspondence Module においてセンシング結果とマップを対応させることによりリカバリされている。つまり上層のモジュールは、下層のモジュールで発生したエラーを検出・リカバリしていることがわかる。

6. ま と め

本論文では、エラーリカバリを考慮した階層形制御アーキテクチャの構造を HALAS (Hierarchical Adaptive and Learning Architecture System) として提案した。HALAS では、自律移動ロボットの機能をモジュールに分割することで、階層形制御アーキテクチャのモジュール間のリカバリ機能により、ナビゲーションにおいて生じるエラーを検出し、復旧をす

ることができる。

最後に、下層で生じたエラーを上層でリカバリする例として、HALAS を風量検査ロボットに適用した場合の Map Correspondence Module でのリカバリ実験を行った。Perception Module においてマイナсприミティブとプラスプリミティブを適応しても取り除くことのできない画像認識の第1種・第2種のエラーを、Map Correspondence Module で、マップ情報を用いる適応機能によりリカバリできることを示し、移動実験を行うことでシステムの有効性を示した。

今後は、HALAS の学習機能を強化し、自律移動ロボットに応用し、その動作を改善する予定である。

文 献

- (1) Chatila, R., Control Architectures for Autonomous Mobile Robots, *Proceedings From Perception to Action Conference*, (1994), 254-265.
- (2) 浅香俊一・石川繁樹, 動的な環境における自律移動ロボットの行動制御, 日本ロボット学会誌, **12-4**(1994), 583-589.
- (3) 福田敏男・ほか6名, 自律移動ロボットの視覚によるナビゲーションシステム(天井のランドマーク認識による自律移動ロボットのナビゲーションと位置補正実験), 機論, **60-573**, C(1994), 257-264.
- (4) 福田敏男・ほか5名, 自律移動ロボットの視覚によるナビゲーションシステム(ファジィ・テンプレートマッチングによるランドマークの探索), 機論, **61-582**, C(1995), 670-677.
- (5) Shibata, T. and Fukuda, T., Skill Based Control by Using Fuzzy Neural Network for Hierarchical Intelligent Control, *Proc. of IJCNN'92-Baltimore*, **2**(1992), 81-86.
- (6) Brooks, R. A., A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, *IEEE, J. Robotics and Autom.*, RA-2 (1986), 14-23.
- (7) Albus, J. A., ほか2名, NARSEM the NASA/NBS Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture, *Proc. of the 20th ISIR*, (1989), 1-7.
- (8) Isik, C. and Meystel, A. M., Pilot Level of a Hierarchical Controller for an Unmanned Mobile Robot, *IEEE, J. Robotics and Autom.*, **4-3**(1988), 241-255.
- (9) Rasmussen, J., Skills, Rules, and Knowledge: Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models, *IEEE, Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13-3(1983), 257-266.
- (10) 福田敏男・ほか6名, 視覚を有する自律移動ロボットに関する研究(第5報, マイナсприミティブを用いた認識による移動制御), 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, **2**(1995), 571-577.
- (11) 高橋裕信・ほか3名, ハンドアイロボットののためのステレオビジョン, コンピュータビジョン, **91-10**(1991), 37-44.
- (12) Zhou, M. C. and Dicesare, F., Adaptive Design of Petri Net Controllers for Error Recovery in Automated Manufacturing Systems, *IEEE, Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-19-5(1989), 963-973.
- (13) Baum, D. and Lenzini, L., Performance analysis of

- SDN-specific error recovery procedures, *Computer Communication*, **18**-4(1995), 300-306.
- (14) 福田敏男・ほか4名, 室内作業移動型ロボット—建設作業への応用—, 日本ロボット学会誌, **13**-7(1995), 916-919.
- (15) 渡辺亜紀・坂村健, オペレーティングシステムの組み換えを伴う後方エラーリカバリー機構の実装, 信学技法, **94**-402(FTS 94 68-70), (1994), 1-6.
- (16) Donald, B. R., Planning Multi-Step Error Detection and Recovery Strategies, *IEEE, Int. Conf. on Robotics and Autom.*, (1988), 892-897.
- (17) 山田常雄・ほか6名, 岩波生物学事典, 第2版, (1979), 601, 1045, 岩波図書.
-