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* (プラスプリミティブとマイナスプリミティブを用いた ランドマーク認識による移動制御)

福田 敏男^{*1}, 横山 誉成^{*2}, 新井 史人^{*1}, 下島 康嗣^{*3}
伊藤 茂則^{*2}, 阿部 靖則^{*4}, 田中 幸悦^{*4}, 田中 祥夫^{*5}

Vision Based Navigation System of Autonomous Mobile Robot (Position/Orientation Control by Landmark Recognition with Plus and Minus Primitives)

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

Template matching is a popular method for visual recognition. However the method has two major problems: (1) Much time is required to detect the target object, and (2) Mistakes in recognition of the target object occur in some cases. In order to solve problem, (1) we apply a fuzzy neural network algorithm. However, problem (2) remains to be solved. In this paper, we propose a robust visual recognition algorithm for autonomous mobile robot navigation. The proposed algorithm employs Fuzzy Template Matching with a target object as well as similar objects in the environment. As a result, the robot verifies its tentative recognition by comparing the likelihood of plus elements (target objects) with that of minus elements (similar objects). The validity of the proposed navigation system is shown through some experimental results.

Key Words: Minus Primitive, Error Recovery, Robust Recognition, Autonomous Mobile Robot, Navigation System, Measurement and Control, Image Processing, Landmark Detection, Fuzzy Template Matching

1. はじめに

現在, さまざまなロボットが, 工場内にとどまらず医療, 宇宙, 娯楽などさまざまな分野で活躍している。ロボット化が進められた大きな要因は, ロボットが連続して仕事を行ったり, 苦役作業を人間に代わって行えるようになったからである。建設の分野においても例外ではなく, 建設ロボットに関する研究開発が推進され, 要素技術の開発から建設現場への導入を目的とするものまで数多くなされている。しかし, 建設現場は, 工事が進むにつれて時時刻々環境が変化するので, ロボットによって作業の自動化を図るのが難しい。そのような建設現場の中で, 作業の自動化, 効率化を図るために, 自律移動ロボットのナビゲーションシステムの開発が要求される。

そこで, 著者らはオフィスビルの天井として一般的

に用いられているシステムラインと呼ばれる構造物内に設置されているアネモスタット型吹出し口(図1 アネモ)をランドマークとして用いて, 図2に示すロボットが自己位置認識をして自律移動するための研究を行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾。天井のランドマークを用いると, 地上のランドマークとは異なり障害物に遮られることが少ないという特徴がある。ロボットが自己位置を認識するために, 超音波⁽³⁾, レーザ⁽⁴⁾⁽⁵⁾, CCDカメラ⁽⁶⁾などさまざまなセンサを用いてロボットをナビゲーションする研究が行われている。特に, 視覚に基づいた自律移動ロボットの研究も数多くなされている^{(7)~(9)}。著者らはロボットが自己位置認識をするために, ロボットとランドマークの相対位置を計測する手段として, CCDカメラによる画像認識の手法を適用した。画像内から目標とする対象物を探索する手法として, テンプレートマッチングがあり, それを進めたものとして著者らは, テンプレートをファジィ集合で表現したファジィテンプレートとしてマッチングを行うファジィテンプレートマッチング(FTM)を提案した⁽²⁾。

しかしながら, 本手法では2値化変換後の画像にFTMを適用するため, この変換において情報量が不

* 原稿受付 1995年10月19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, 名古屋工業技術研究所(〒462 名古屋市北区平手町1-1)。

^{*4} 正員, 新菱冷熱工業(株)(〒300-42 つくば市和台41)。

^{*5} 新菱冷熱工業(株)。

適当に削減されると、アネモ以外の構造物が、アネモと同程度の適合度を出力してしまう恐れがある。ロボットは、あらかじめロボットが持っている環境のマップとFTMの探索結果を利用して自律移動しているので、探索の際に誤認識が生じると、ロボットは誤った位置に進み自己位置姿勢の認識ができなくなってしまう。そこで、従来のFTMでは認識対象であるランドマークのテンプレートだけを用いていたのに対し、本論文では、ロボットがランドマークと誤認識する恐れのある構造物のテンプレートも同時に持つことで、エラーリカバリーを行う。ここで、テンプレートを構成する基本的な構成要素のことをプリミティブと定義する。ここで、ランドマークのテンプレートを構成する基本的な構成要素をプラスプリミティブと呼ぶ。これに対して、ランドマーク以外のテンプレートを構成する構成要素をマイナスプリミティブと呼ぶ。

本論文では、マイナスプリミティブとプラスプリミティブを用いたFTMでアネモを探索することでロボットな認識を行うことができ、その結果ロボットの移

動精度が向上したので報告する。

2. マイナスプリミティブを考慮したファジィテンプレートマッチング

2.1 マイナスプリミティブの定義 一般に、ランドマークとして認識する対象が存在する環境は複雑である。そこで、この種の問題を解決する方法の一つとして、複雑なパターンを単純なサブパターンを用いて表現する。しかし、単純なサブパターンに分割してもまだ複雑な場合には、さらに単純なサブパターンつまりパターンプリミティブを用いる。すると、複雑なパターンも単純なパターンプリミティブを用いて表現することができ、取扱いが楽になる^{(10)~(12)}。

本論文のように四角型アネモを探索する場合であれば、アネモがパターンでありアネモを構成するサブパターンとしては四角形要素が対応し、四角形を構成する辺がパターンプリミティブである。本論文では、ランドマークとして用いる構成要素を表すプリミティブのことをプラスプリミティブと定義し、それ以外の構造物の構成要素を表すプリミティブのことをマイナスプリミティブと定義する。マイナスプリミティブはアネモの認識においては誤認識を防ぐために用いられる。

2.2 マイナスプリミティブの分類 オフィスビルにおいて一般的に用いられる、天井にある構造物としてシステムラインがある。本研究の認識対象のアネモは、このシステムライン上に存在する。システムライン上で、先に述べたマイナスプリミティブに該当する構造物としては、図3に示すようなルーバ、蛍光灯、スピーカ、非常灯、火災報知器などの構造物がある。

これらの構造物をプリミティブを考慮して分類すると、格子、平行線群、円で表現することができる。これらは先に述べた定義において、サブパターンに該当する。これらのサブパターンは、さらにパターンプリミ

Fig. 1 Anemos

Fig. 2 Air Conditioning Equipment Inspection Robot

Fig. 3 Minus Primitives

タイプに分割することができ線分や円弧で表現することができる。

2.3 認識状態の表現方法 自律移動ロボットのナビゲーションのために、本研究ではアネモをランドマークとして選定しているので、アネモがプラスプリミティブであり、マイナスプリミティブは図3に挙げたとおりである。オペレータは、モニタを見ることでロボットがアネモを見つけているのか誤認識しているのか判断できるが、ロボット自身にはそれは難しい。

このため本論文では、ロボット自身で認識結果を検証できるように、メンバシップ関数の適合度⁽²⁾を評価し比較する。ファジィメンバシップ関数で構成されたファジィテンプレートの適合度によって比較を行う際に、アネモとマイナスプリミティブを同一の基準で扱うために、式(1)を定義する。式(1)に従えば、アネモのテンプレートもマイナスプリミティブのテンプレートも、教師データに対してどれだけ一致しているかという同一の基準で認識状態を表現することが可能である。

$$\text{Grande}(i, j) = 1 - |\text{train_data}(i, j) - \text{recog_data}(i, j)| \dots\dots\dots (1)$$

$\text{Grand}(i, j)$: (i, j) における適合度 [i には x または y が対応, j には 0~12 が対応する (図4 参照)]

$\text{train_data}(i, j)$: 教師データ作成時にランドマークとテンプレートが一致している際に得られたメンバシップ (i, j) の値

$\text{recog_data}(i, j)$: ランドマーク探索中に得られたメンバシップ (i, j) の値

2.4 認識状態の比較方法 画像中からランドマークを探索してナビゲーションを行う際に、従来の手法では、アネモ以外の構造物をアネモと誤認識してしまう場合があった。そこで、本論文ではマイナスプリミティブを考慮して認識を行う。しかし、アネモの探索とマイナスプリミティブの探索を別々に行ったので

Fig. 4 Membership Function

は、ランドマーク探索に時間がかかってしまう。そのため本論文では、まず画像中でアネモの探索を行い、探索が終了した時点でマイナスプリミティブを適用して認識状態を比較することで高速化を図る。

GA(Grade of Anemo)とGP(Grade of Minus Primitive)を定義すると、二つの適合度の大小関係により、アネモであるのかマイナスプリミティブであるのかを決定することができる。

3. センシング戦略

本論文では、自律移動ロボットのナビゲーションシステムの開発にあたり、図2に示したようなロボットを用いている。ロボットには外界センサとして二つのCCDカメラが搭載されており、一つは、遠くのランドマークをセンシングする際に用いるメインカメラである。ロボット上部のユニットには、内部に風速計や温度計とともにもう一つのカメラが取り付けられており小型カメラと呼び、ランドマーク直下でロボットの位置姿勢を微調整するのに用いる⁽¹⁾⁽²⁾。

3.1 メインカメラのセンシング 本研究では主に、ロボットをナビゲーションする際に約3m前方のアネモを、遠くのランドマークとして用いる。メインカメラで、アネモを探索し移動制御する際の制御の流れを図5に示す。図5中の判別条件は以下のように分類できる。

(1) 探索の終了 撮影した画像内でアネモの探索が終了した場合にはマイナスプリミティブの認識に移行するが、そうでない場合にはパン・チルトの制御を行い、新たに撮影した画像中で探索を継続する。

(2) 適合度の比較 GAとGP、2種類の適合度の大小関係によってアネモであるのか、マイナスプリミティブであるのか判断を行う。GAが大きければマ

Fig. 5 Flowchart of Main Camera Sensing

基準点としてロボットの初期位置を図8のように変化させ実験を行った。

(a-1) 基準点Omと基準点から200 mm 前後した点を測定位置とし、ロボットの姿勢を真正面と左右6°ずつ傾けた。

(a-2) ロボットの姿勢はすべて真正面として、基準点Omから200 mm 前後した位置から、さらに400 mm 左右した位置を測定位置とした。

(a-3) 基準点Omと基準点から200 mm 前後した点と、さらにそれら3点から400 mm 左右した位置を測定位置とした。ただし、ロボットの姿勢はすべて真正面である。

(b-1) 基準点Osを除いて、 $(X, Y): (120, 150) \sim (-120, -150)$ のメッシュ上の点に測定位置を設定した。

(b-2) 基準点Osを除いて、 $(X, Y): (250, 200) \sim (-250, -200)$ のメッシュ上の点に測定位置を設定した。

4・1 メインカメラのセンシングの信頼度 従来どおりファジィテンプレートマッチングのみで認識した場合と比べ、マイナスプリミティブを考慮した場合、誤認識後からエラーリカバリーすることができるので、FTMとMPを併用することでアネモの認識率が向上した。探索時間の平均値としては、

前処理とFTM：約1分

Fig. 8 Initial Position of Sensing

Fig. 9 Relationship of Experimental Results

MP：約15秒

を要する。図9は、4・1節において示す実験結果のつながりを示すものである。ランドマーク認識においては、認識状態の判定がロボットとオペレータでは異なる(表2)。また、実際の移動においては、計算結果に比べてデッドレコニングの誤差が影響することが考えられる(表3, 4)。

表1には、メインカメラでのランドマークの認識結果を示す。

ロボットは、探索を行いランドマークを発見して自己位置姿勢を計算する。その結果からランドマーク直下へ移動するために算出した距離とOs上で真正面を向いたときの差を表2(a)に示す。しかし、このときロボット自身の判断では、ランドマーク以外のものをランドマークと誤認識している場合も含んでいる。そこで、人間の判断によって誤認識している場合を取り除いたものを表2(b)に示す。表1からわかるようにFTMとMPを併用することでロボットが誤認識して

Table 1 Recognition Results

	Success	Failure
Fuzzy Template Matching	82%	18%
FTM + MP (Recovery rate)	93% (62%)	7%

Table 2 Position/Orientation Accuracy (Exclude Deadreckoning Error)

(a) Include Mistake of Recognition

	Position Error (mm)	Orientation Error (deg)
FTM	115.4 (except divergence)	0.87 (except divergence)
FTM + MP	100.4	0.72

(b) Exclude Mistake of Recognition

	Position Error (mm)	Orientation Error (deg)
FTM	50.7 (except divergence)	0.64 (except divergence)
FTM + MP	50.9	0.67

Table 3 Position/Orientation Accuracy (Include Deadreckoning Error)

FTM		
	Position Error (mm)	Orientation Error (deg)
Forward (200,0)	83.1	1.20
Center (0,0)	64.8	0.57
Backward (-200,0)	106.1	1.21
Average	84.7	1.05

Table 4 Position/Orientation Accuracy (Include Deadreckoning Error)

FTM + MP		
	Position Error (mm)	Orientation Error (deg)
Minus Primitive (by Error Recovery)	103.4	1.01

Fig. 10 Trajectories of Robot (FTM)

Fig. 11 Trajectories of Robot (FTM+MP)

いる割合が減っている。したがって表2(b)で得られるようにほぼ同程度の誤差であれば、システムとしては、FTMとMPを併用したほうが有効である。また、表中の発散という表現は、探索の際にテンプレートの移動方向が、アネモとは無関係の方向へ向かってしまい、結果としてアネモを見失うことを意味する。

次に、表2(b)の結果に基づいてロボットが正しくランドマークを探索したときに、実際にロボットを移動させる。ランドマークを探索するのにFTMのみを用いた場合では表3のようになり、図5の制御アルゴリズムに従ってロボットを移動させた場合(FTMとMPを併用した場合)の移動精度は、表4のようになる。ただし、表3, 4のいずれの場合も実際にロボットが移動しているので、累積誤差を含んでいる。表4においては、MPを用いることでエラーリカバリーできた場合の平均値を示している。つまり、表3中のForwardやBackwardという状況下でFTMのみの認識では誤認識してアネモが発見できていなかった。しかし、表1で示したようにFTM+MPでは、62%の割合で発見できるようになる。そこで、その認識結果に基づいて移動すると表4程度の誤差で移動できることを示している。

4.2 小型カメラのセンシングの信頼度 ロボッ

Table 5 Position/Orientation Accuracy (Include Deadreckoning Error)

	Position Error (mm)	Orientation Error (deg)
b-1) FTM	22.8	0.51
b-1) FTM + MP	22.0	0.33
b-2) FTM	on the systemline : mistake to recognize surrounding the systemline : divergence	
b-2) FTM + MP	28.4	0.47

トが小形カメラを用いて図8(b)のセンシング初期位置のうち、(b 2)の初期位置からセンシングを行い移動したときの移動軌跡は、FTM だけの場合では図10のようになり、初期位置から外側に向かって探索を進めて移動してしまい、結果としてランドマークを見失うことになる。一方、図6の制御アルゴリズムに従ってロボットを移動させた場合(FTMとMPを併用した場合)は図11のようになる。図11は、ロボットが自己位置姿勢をシステムライン上に補正する動作を行い、ランドマーク探索においてマイナスプリミティブにマッチングした場合でもリカバリー動作によりアネモ直下に移動可能であることを示す。図のX軸は、ロボットの進行方向を表し、Y=0のときシステムライン直下であることを示す。図11中には、ロボットの初期位置をStartで示し、収束位置をGoalで示した。矢印は、ロボットの移動方向を表している。ただし、図10において2, 8では、マイナスプリミティブに収束しており、それ以外の初期位置では、ロボットの移動が発散している。

表5は、図10, 11に示したようなロボットの軌跡をまとめたもので、(b-2)の場合にFTMだけでロボットを移動させるとシステムライン上にある場合は、マイナスプリミティブにマッチングしてしまい、そうでない場合は、発散してしまうという結果となった。これに対して、FTMとMPを併用することで、FTMのみでは生じていた誤認識をエラーリカバリーすることができた。

また、小型カメラのセンシングでは、例えばメインカメラで誤認識したまま移動したときにも、エラーリカバリーが可能である。実際にFTMとMPを併用した場合、表1で最終的に残った誤認識の7%のうち38%がエラーリカバリーできシステム全体でのランドマーク認識率は96%に向上した。

5. ま と め

本論文では、ロバストなランドマーク認識アルゴリズムとして、マイナスプリミティブを考慮した視覚認識法を提案し、また、実験によりその有効性を示した。

さらに、提案する認識アルゴリズムを自律移動ロボ

ットのナビゲーションシステムに適用し、従来の方法に比べて本システムがシステム全体として有効であることを示した。また、移動実験により、本システムはFTMで生じた誤認識をエラーリカバリーできることを示した。

文 献

- (1) 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 5), 257-264.
- (2) 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 2), 670-677.
- (3) Curran, A. and Kyriakopoulos, K. J., Sensor Based Self Localization for wheeled Mobile Robot, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **1** (1993), 8-13.
- (4) Hirano, T., ほか2名, Laser Beam Range Finder and Its Application to Mobile Robot Navigation, *Proc. of JSPE spring pt. 3* (1984), 835-836.
- (5) Kajitani, M., ほか5名, Self Locatig Measurement System for Mobile Robot Working in the Building Site, *J. Robotics Mechatronics*, **3** 6 (1991), 510-515.
- (6) Graefe, V., An Approach to Obstacle Recognition for Autonomous Mobile Robots, *Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, (1990), 151-158.
- (7) Becker, C., ほか3名, Reliable Navigation Using Landmarks, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **1** (1995), 401-406.
- (8) Horn, J. and Schmidt, G., "Continuous Localization for Long-Range Indoor Navigation of Mobile Robots", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **1** (1995), 387-394.
- (9) Yagi, Y., ほか2名, Real Time Omnidirectional Image Sensor (COPIS) for Vision Guided Navigation, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **10** 1 (1994), 11-22.
- (10) Fu, K. S., A Step Towards Unification of Syntactic and Statistical Pattern Recognition, *IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intl.*, Vol. PAMI-8, No. 3 (1986 5), 398-404.
- (11) Pavlidis, T., *Structural Pattern Recognition*, (1977), 216-257, New York: Springer-Verlag.
- (12) Fu, K. S., *Syntactic Pattern Recognition and Applications*, (1982), Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.