

# 未知環境における自律移動ロボットのタグナビゲーション

北海道大学大学院

○高氏秀則

金子 俊一

田中 孝之

## 要旨

未知環境におけるロバストなランドマーク生成法を用いた自律移動ロボットのナビゲーション手法を提案する。未知環境における自由観測画像からエントロピーに基づき豊富度を定義し、ロバスト画像照合法である方向符号照合法に基づき類似度及び個別度を定義する。ロボットはこれらを基本特徴量として用いて信頼性の高いロバストなタグを生成し、その配置情報をランドマークにユーザから与えられた目的地まで自律的に移動する。

## 1. はじめに

本論文の目的は、未知環境におけるロバストなランドマーク生成法を用いた自律移動ロボットのナビゲーション手法を提案し、その有効性を検討することである。

視覚情報を利用した移動ロボットのナビゲーション手法は従来から数多く提案されている。観測画像における垂直エッジを基本特徴としてマップ生成と自己位置同定に利用する方法 [1] や画像自体を標識的に利用するビューベースアプローチによって、未知環境に対応しようとする方法などがある。視覚情報をロボットの環境認識に用いる際の問題点の一つに、照明変動などのノイズに対して弱いことがあげられる。本稿では、観測画像からのランドマーク生成に対象画像の局所的な明度変動、アフィン変換歪みに強いロバスト性を有する方向符号照合法 (Orientation Code Matching) [2] を用いるアプローチについて検討し、これを用いた自律移動ロボットのナビゲーション手法を提案する。

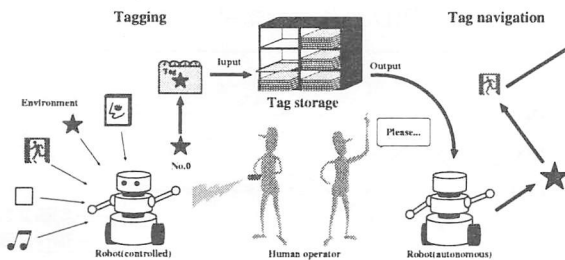


図1 タグナビゲーション

## 2. タグナビゲーション

ロボットが自己位置推定に利用する地図やランドマークなど、利用者が予め環境を整備する必要がある手法は利用者の負担が大きい。提案手法では利用者がロボットを操縦し環境内を一度誘導すれば、その後は自律移動を行うことができる。

図1は提案するタグナビゲーションの概念を示す。移動ロボットは、まず、利用者による誘導時に周囲の環境情報として、図2のような観測画像 (パノラマ画像) を取得する。そして、画像から顕著な特徴を有する部分画像群をタグとして逐次生成し、タグストレージを構築する [3]。利用者から目的地を指示されると現在位置から目的地まで至る際に観測されると予想されるタグ系列をタグストレージから生成し、自律移動の際のランドマークとして利用する。

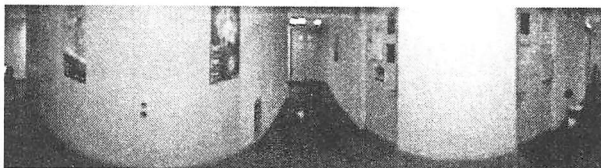


図2 観測画像 (パノラマ) の一例 (640 × 174 画素)

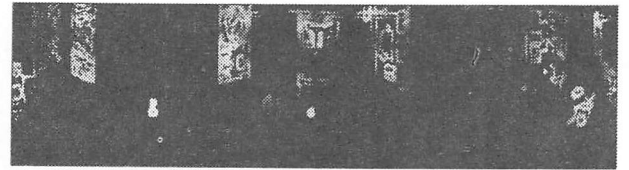


図3 豊富度画像

## 3. ロバストタギング

エントロピーに基づく豊富度を評価することによって、相対的に顕著な部分画像を抽出する。また、ランドマーク検出の安定性の評価基準として類似度を定義する。更にランドマーク検出の確実性を保証するためには周囲画像に対し、類似度に関して余剰が高いことが望ましい。これを個別度として定義しタグ生成に利用する。

### 3.1 豊富度

画素近傍における明度変化が最大となる勾配方向を量子化した方向符号 [2] を  $i = 0, 1, \dots, N-1$  とし、画素  $(x, y)$  を中心とする局所領域の各方向符号の相対度数を  $P_{xy}(i)$  とするとエントロピーを次式で定義する。

$$E_{xy} = - \sum_{i=0}^{N-1} P_{xy}(i) \log_2 P_{xy}(i) \quad (1)$$

エントロピーの名目的な最大値  $E_{max}$  は各方向符号が一様分布  $P_{xy}(i) = \frac{1}{N}$  に従うときで、その値は  $E_{max} = - \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{N} \log_2 \frac{1}{N} = \log_2 N$  となる。ここで、しきい値  $\alpha_e (0 < \alpha_e < 1)$  を設定し、 $\alpha_e E_{max}$  以上の値を  $0 \sim 1$  に正規化し、それ以下の値を  $0$  とし、豊富度  $R_{xy}$  を次式によって定義する。

$$R_{xy} = \begin{cases} \frac{E_{xy} - \alpha_e E_{max}}{E_{max} - \alpha_e E_{max}} & \text{if } E_{xy} \geq \alpha_e E_{max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

図3は図2に対応する豊富度画像である。明領域は高豊富度を示し、ここからタグ候補領域を抽出する。

### 3.2 類似度・個別度

ロボットを移動させて隣接地点から撮影した画像 (以下、隣接視野画像) を用意し、それぞれのタグ候補領域が隣接視野画像上のどの部分に対応するかを方向符号照合法によって調べる。照合の際に画素  $(x, y)$  を中心とする探索領域内で平均残差絶対値  $D_{xy}$  を求め、その最小値及び平均値をそれぞれ  $D_{min}$ ,  $\bar{D}$  とする。ここでは  $D_{min}$  の逆数を類似度  $S$  と定義し、また、 $\bar{D}$  と  $D_{min}$  との差分を個別度  $Mg$  と定義する。

$$S = \frac{1}{D_{min}} \quad (3)$$

$$Mg = \bar{D} - D_{min} \quad (4)$$

そして、類似度、個別度が共に高い領域をタグ領域として選択する。図4において実線で囲まれた領域がタグ領域であり、破線で囲まれた領域は類似度或いは個別度が小さく除外された領域である。

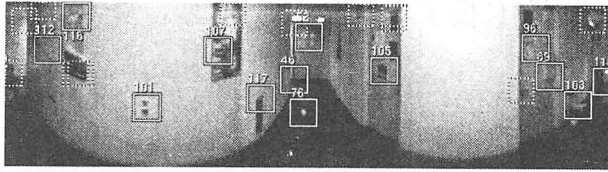


図4 タグ領域

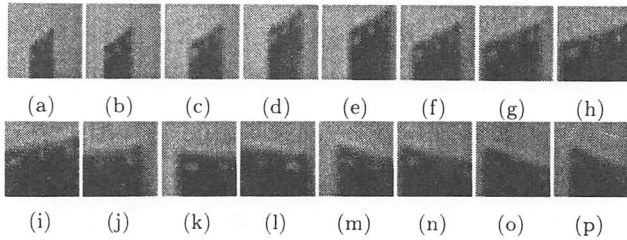


図5 タグ群の一例

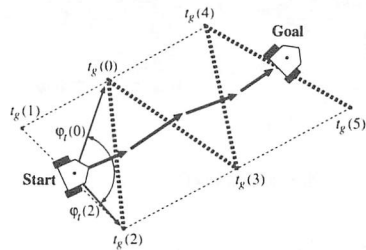


図6 ランドマーク対

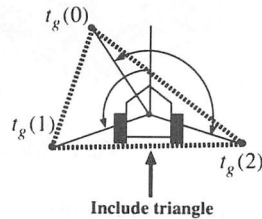


図7 包含三角形

#### 4. タグストレージ

移動ロボットは誘導時、予め決めた移動距離(約 15[cm]), もしくは移動角度(約 15[度])ごとに自動的にパノラマ画像を取得しロボスタタギングを行う。この際、環境中の同一対象物を捉えているタグを一つのタグ群として固有の名前を付けタグストレージに記憶する。図5は図4の117番のタグを含むタグ群を示す。また、パノラマ画像のx座標から算出したロボット座標系(床面座標系)におけるタグの方角情報も同時に記憶する。提案手法では、この方角情報をナビゲーションに利用する。

#### 5. 環境モデル構築

ロボットはパノラマ画像から得られる2個のタグの方角情報を利用することで、タグどうしを結んだ線分まで移動できる。ロボットが自律移動する際に利用する2個のタグを以下ではランドマーク対と呼ぶことにする。図6は目標とするランドマーク対を順次更新して目的地まで移動するタグナビゲーションの様子を示す。ロボットはナビゲーションの際に環境モデルとしてランドマーク対の接続関係を用いる。環境モデル構築には、まず、タグストレージに記憶されているタグからナビゲーションに有用なランドマーク対を選択する。この処理には

- 人間による誘導時に2個のタグを結ぶ線分を越えたロボットの移動が存在したか

を満たすべき条件とした。

次に、ランドマーク対の接続関係、すなわち2個のランドマーク対の間の移動可能性を表現した隣接行列を作成する。ここで、3個のタグを結ぶ三角形の内部にロボットが位置する場合、この三角形を包含三角形と呼ぶことにする。3個のタグが包含三角形を形成しているかどうかは、タグストレージに記憶されたタグの方角情報を用いることで判定することができる。図7に示す三角形  $t_g(0)t_g(1)t_g(2)$  は包含三角形となる。接続関係にある2個のランドマーク対を求める際には、

- 2個のランドマーク対からなる包含三角形が存在すること

を満たすべき条件とした。

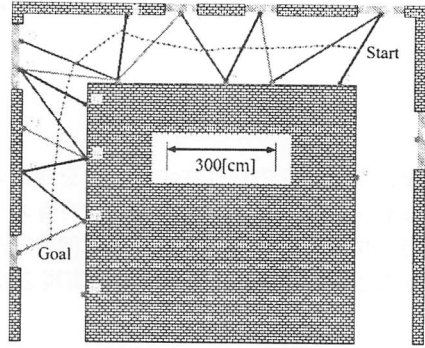


図8 ロボットの軌跡とランドマーク対

#### 6. 経路計画

ロボットが目的地まで移動するためには、経路計画、すなわち現在位置から目的地まで至るランドマーク対系列を探索する必要がある。包含三角形を形成する条件から作成した隣接行列を使い、ダイクストラ法による最短経路探索を行う事で最小ステップで目的地に至るランドマーク対系列  $lp(k) (k=0, \dots, L-1)$  を求められる ( $L$  は最小ステップ数)。ここで、探索されたランドマーク対系列とは、目的地まで移動する際に用いるタグの数が最小となる系列である。タグナビゲーションとは、環境中に存在する多くのランドマークを利用することで、たとえ、不良条件によりあるひとつのランドマークの検出に失敗してもその他のランドマークがその失敗を補うことで、実世界におけるロボスタナビゲーションの実現を目指した手法である。したがって、我々が本来求めたいのは、目的地に至る移動距離は短く、なるべく多くのランドマーク対を経由するような系列である。このような最適な系列を求めることは一般的に困難であるため、提案手法では隣接行列とタグの角度情報を利用して、移動距離は短く、 $lp(k-1)$  から  $lp(k+1)$  に至る最長ステップ数の系列を求め  $lp(k)$  と置き換える処理を  $k=1$  から  $k=L-2$  まで行い、ナビゲーションに利用するタグ数を増やした。

#### 7. シミュレーション

タグストレージを環境モデルとして利用した自律移動ロボットのナビゲーション手法の動作確認のため、シミュレーションを行った。一定距離(300[cm])内から検出可能な仮想的なタグを通路状のシミュレーション環境内に配置し、ロボットを一度環境内を誘導しタグストレージを構築する。次にロボットに目的地として、あるタグを与え、タグストレージを利用したナビゲーションを行わせた。図8は目的地まで自律移動した際のロボットの軌跡とその時利用したランドマーク対(図中で直線で結線)の系列を示す。シミュレーションの結果、ランドマークが連続的に配置されている環境では目的地到達が確認できた。

#### 8. まとめ

未知環境における自由観測画像からロボスタなタグを生成し、その方向符号と配置情報をタグストレージとして構築する手法を提案した。また、タグストレージを環境モデルとして利用した自律移動ロボットのナビゲーション手法を提案し、その動作をシミュレーションで確認した。今後の課題は、実機を使った実験を行い、提案手法の有効性として実環境におけるロボスタ性を検証することである。

#### 参考文献

- [1] 辻安彦, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位視覚センサを用いたロボスタな環境マップ生成と自己位置推定, 日本ロボット学会誌, vol. 19, no. 1, pp.59-67, 2001.
- [2] F.Ullah, S.Kaneko, and S.Igarashi: Orientation code matching for robust object search, IEICE Trans. on Inf. & Sys., no. 8, pp.999-1006, 2001.
- [3] 高氏秀則, 金子俊一, 田中孝之: 未知環境におけるロボスタタギング, 第9回知能メカトロニクスワークショップ, 2004.