

# 水中ランドマークを利用した水中ロボットの航法制御

Navigation of Underwater Vehicle using Artificial Landmark

柳 善鉄\*・浦 環\*・藤井輝夫\*

Son-Cheol YU, Tamaki URA and Teruo FUJII

## 1. はじめに

従来の水中ロボットの航行は様々な問題を生じている。本論では水中ランドマークを利用した新しい航法を提案する。水中ランドマークを利用した具体的なミッションと活用方法などについて述べる。

## 2. 水中ランドマークの必要性

今まで水中ロボットの自律航行方法は概ね二種類に分けられる。トランスポンダや水底に設置されたケーブルなどの外部のガイド装置によってロボットをガイドする方法と慣性航法装置 (INS) やドップラソナーなどを用いた推測航法による方法である。前者は常にガイドされるので決められたコース上に安定した航行が可能となる長所がある。しかし、既設物がない場合に航行が難しくなるし、決められた航路の変更も困難である。航行が長距離になると外部のガイド装置の設置と維持保守に経済的な問題が大きくなる。後者は柔軟な航行コース設計が可能であり、外部の施設が不要で経済的な長所がある。しかし、時間経過に従って蓄積される距離誤差が問題である。

前述した今までの水中ロボットの航法の問題を解決するため、本論では主な航行を推測航行にして距離誤差が貯まれば外部のガイド装置によって距離誤差を補正する方法を提案する。距離誤差を補正するツールの条件としては、設置後維持保守の負担が少なく、経済性が良いもの、ROVや潜水士にも利用可能な広い適用性を持つものなどが望ましい。このような条件を満たすツールとしてビジョンによる水中ランドマークを提案する。

水中は視界が悪くて水中独特の画像ノイズが多い。また、常にロボットを6自由度で制御しなければならない負担もある。したがって、本論ではこのような問題点を克服して水中ランドマークを有効に使える方法について述べる。

\*東京大学生産技術研究所 海中工学研究センター

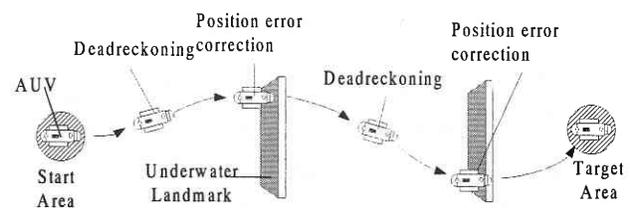


Fig. 1 Mission overview to get to a target

## 3. 水中ランドマーク形状と配置

水中ロボットが自律機能で発見的にしやすい水中ランドマークの形状と配置はミッションと環境によって異なる。

本論は Fig. 1 のような推測航行の距離誤差を補正するミッションを想定している。ロボットは特定の経路を経て遠方の目標点に向かう。この場合はランドマークの形状は推測航行の予想誤差範囲を全部カバーする細長い形状が望ましい。設置の方向は、Fig. 1 のように航路に直交方向にすればよく、こうすればランドマークの発見信頼度が高くなる。

## 4. 水中情報認識方法

画像から情報を認識するためには直線、図形、点などが利用される。その中で直線は著者等のケーブルトラッキング実験<sup>3)</sup>を通じて水中で高い認識率を得られることが確認された。Fig. 1 のようなランドマークは2次元平板で長方形の上下、左右が平行な直線で内部が全部直角である。この特徴を活用したランドマークから情報認識の方法と陸上実験について述べる。

## 5. パターンマッチング

### 5.1 パターンマッチングを利用する方法

パターンマッチングは複雑な模様や文字が認識可能で、水中ランドマークに応用すれば水中で作業する人間も使える

研 究 速 報

利点がある。しかし、パタンマッチングでは、画像のサイズ変化、回転、斜め検出などの画像変化に弱い問題点がある。水中ロボットが自律で水中ランドマークを発見する状況を勘案すれば画像の変化は避けられないことである。この問題の解決策として長方形の特徴を活用して画像を補正する方法を提案する。Fig. 2 のようにランドマークの上下に一組ずつの直線を引いてこの直線をパタンマッチングの先に検出すれば画像の変化が分かる。この画像の変化を画像処理かロボットを動かすことによって補正した後、パタンマッチングを行えば前述の問題は解決できる。直線の検出はハフ変換を利用する。ハフ変換は一つの直線*i*を原点から直線までの垂線距離  $\rho_i$ 、X 軸と直線*i*との反時計方向の角度  $\theta_i$  に変わる。画像変化の発見方法は次のようである。

- (1) ロボットが水中ランドマークを正しく正対して得られた場合の画像を Standard case (Fig. 2 の(1)参照) とする。この時の上下直線の角度は  $\theta_s$ 、Line1 から Line4 までの  $\rho$  値をそれぞれ  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$  とする。変化がある画像の  $\rho$  と  $\theta$  値は Line1 から Line4 までそれぞれ、 $\rho_1^*, \rho_2^*, \rho_3^*, \rho_4^*, \theta_1^*, \theta_2^*, \theta_3^*, \theta_4^*$  とする。
- (2) ロボットのローリングによる画像の回転の場合 (Fig. 2 の(2)Rotation 参照) は測定された上下直線の角度  $\theta_s^*$  と  $\theta_s$  を比較すれば回転された角度が検出される。 $\theta_1^* = \theta_2^* = \theta_3^* = \theta_4^* = \theta_s^* \neq \theta_s$  で、画像の回転角度 =  $\theta_s^* - \theta_s$  になる。画像の回転の補正角度 =  $\theta_s - \theta_s^*$  である。回転された画像を補正角度分回転させれば Standard case の画像になる。
- (3) ロボットのサージによる画像サイズ変化の場合 (Fig. 2 の(3)Size change 参照) は上下の直線間距離  $\rho_4$

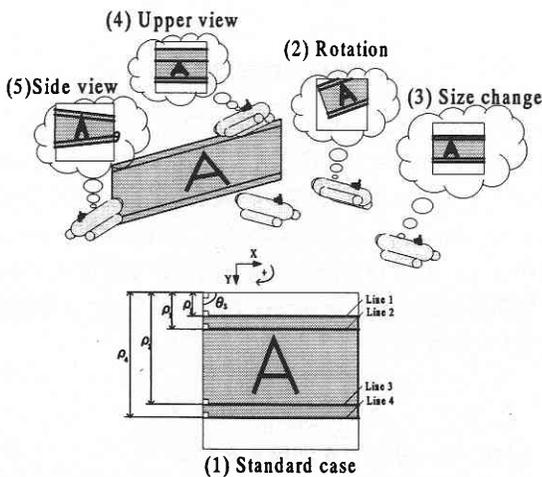


Fig. 2 Image change detection

\*  $\rho_1^*$  を Standard case の  $\rho_4 - \rho_1$  と比較すればサイズ変化率が検出される。

画像のサイズ変化率 =  $(\rho_4^* - \rho_1^*) / (\rho_4 - \rho_1) \neq 1$  画像のサイズ変化の補正率 =  $(\rho_4 - \rho_1) / (\rho_4^* - \rho_1^*)$  で、選ばれた画像にこの補正率分、拡大/縮小すれば Standard case の画像になる。

- (4) ロボットが上か下から斜めでランドマークを見た場合 (Fig. 2 の(4)Upper view 参照) は同じ幅が遠近によって近いところは広く見えるし遠いところは狭く見えることを利用することができる。 $\rho_4^* - \rho_3^* < \rho_2^* - \rho_1^*$  では、ロボットが上から斜めでランドマークを見ていることが検出される。 $\rho_4^* - \rho_3^* > \rho_2^* - \rho_1^*$  の場合には、ロボットが下から斜めに見ているのである。
- (5) ロボットが左から斜めでランドマークを見ている場合 (Fig. 2 の(5)Side view, Fig. 3 の Side view image 参照) は平行な上下の直線が遠近によって台形に見える。上下の直線の角度は  $\theta_1^* = \theta_2^* = \theta_A > \theta_B = \theta_3^* = \theta_4^*$  でロボットがランドマークを左から斜めで見ていることが検出される。 $\theta_A < \theta_B$  の場合にはロボットが右から斜めで見ているのである。また  $\theta_A$  と  $\theta_B$  の差を利用すれば斜めの角度も計算可能である。

ランドマークが斜めに検出された場合の画像処理による補正は画像の3次元の遠近変化を補正して2次元平面に変換する画像処理が必要である。この画像処理はかなりの演算が必要で、補正した画像の画質低下の恐れもある。この時にはロボットを動かして画像を補正する方法が望ましい。

以上のような手法を導入することにより、ロボットから得られたランドマークの画像が回転、サイズ変化率、斜め検出されてもそれを検出/補正して信頼度の高いパタンマッチングが可能である。2種類以上の画像の変化があるときも Fig. 4 のように順次的補正で解決可能になる。

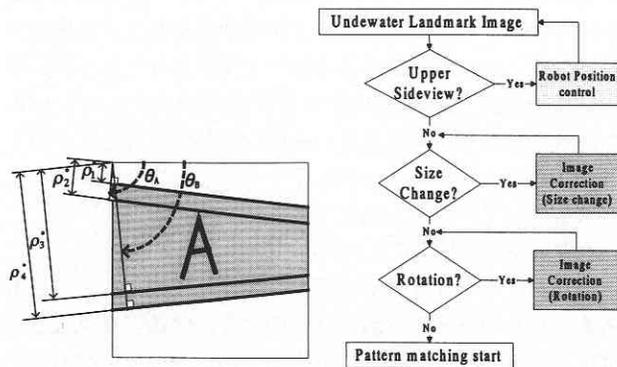


Fig. 3 Side view image

Fig. 4 Image correction flow chart

## 5.2 パタンマッチングの陸上実験

本論のミッションが行なわれる水中環境を想定し、陸上で模型のランドマークを製作してパタンマッチングの実験を実施した。ミッションを計画している水中環境は、自然光が入らない深い水中で、ロボットはライトでランドマークを発見する環境である。そこで Fig. 5 のように黒い背景に白い地を利用して 2 次元平面形の実験用の模型ランドマークとして検討した。ランドマークの情報としては人間が読めるアルファベット「W」を使用したのである。実験内容は Fig. 5 画像の回転とサイズ変化に対し、前述の補正がない通常のパタンマッチングと前述の補正があるパタンマッチングの認識率を調べた。すなわち、模試になる線は 2 本で十分であり、Fig. 5 の中の白い地の端線を利用する。画像の回転は 0 度から 360 度まで、画像のサイズ変化は 0.5 倍から 2.0 倍まで変化させる。パタンマッチングの認識率は Fig. 5 の画像と「W」文字のテンプレートとを 0 から 1.0 範囲の正規化相関値で調べた。

## 5.3 パタンマッチングの実験結果

回転とサイズを補正しない通常のパタンマッチングでは、Fig. 5 の画像が約 5 度以上の回転、10% 以上のサイズ変化がある場合には相関値が 0.8 以下に下がったが、前述の補正付きパタンマッチングはいつも 0.8 以上の優れた相関値を見せた。実験結果は Fig. 6、Fig. 7 のグラフに示される。

## 6. 1 次元バーコード

### 6.1 1 次元バーコードを利用する方法

水中の画像には水の浮遊物によるノイズが多い。このようなノイズが雪や霧のように水中の画像全体に散らされる。従って、水中のランドマークに書かれる情報の処理はこのようなノイズに対して強くなければならない。直線は特にこのようなノイズに強い特性を持っている。なぜならば、ノイズが一直線にならんで直線全体を遮断することは滅多にないからである。陸上で一般的に使われている 1 次元バーコードは全て平行な直線で構成されていて、同様に平行線間の距離を情報化すれば浮遊物によるノイズに対して信頼性の高いシステムになる。



Still image: (512 x 440, True color)

Template: 'W' character in this image (128 x 128, True color)

Fig. 5 Test landmark

平行な直線を情報化する方法は一定おきに直線の有無を情報化する方法と直線間の距離を情報化する方法が考えられる。情報の認識の時は陸上の 1 次元バーコードと同じように情報の読み取りを開始するスタートラインと終了するエンドラインを決めなければならない。遠近によってロボットの画面上の直線間距離が変わることは特定直線の直線間距離を利用する。特定の直線間距離をいつも先に測って遠近による距離変化を補正する。

前述の特定の直線には特定の色を使えば他の平行線と区別可能である。平行線の数を減らすためスタートラインを距離測定の基本線にしてスタートラインとエンドラインを遠近補正に利用する方法も考えられる。

### 6.2 1 次元バーコードの陸上実験

以下に 1 次元バーコードの陸上実験を実施した結果を示す。平行線を情報化する時、直線間距離を情報化する方法は高い精度で遠近による補正が要求される。そして厳しい水中の画像環境を考慮して、一定おきに直線の有無を調査する方法を使った。一定間隔で連続的に平行線を配置し、平行線の有無を情報化すれば、2 進数の情報が得られる。例えば 5 本の平行線を使えば  $2^5=32$  個の情報が表現可能となり、アルファベット全文字を含ませられる。実験用の模型ランドマークは白い地に情報は黒い平行線、特定の直線は黄色を使用した。情報の配置は Fig. 8 のように「10」は W という文字を、「11」は I、「01」は N を当てた。Fig. 9

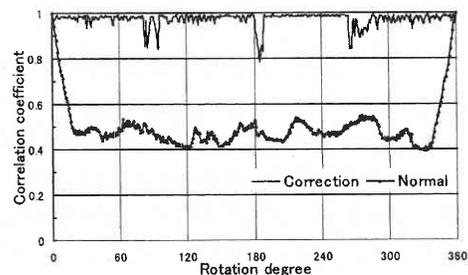


Fig. 6 Rotation test result

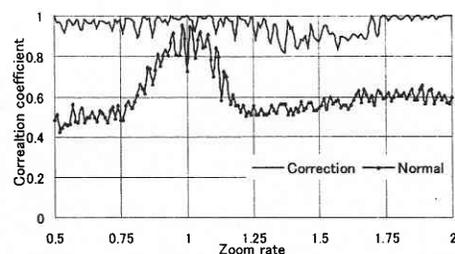


Fig. 7 Size change test result

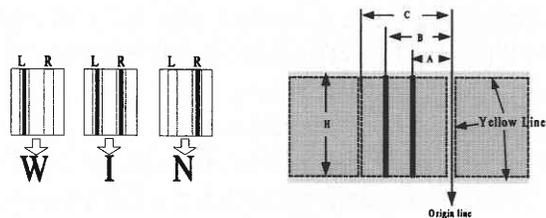


Fig. 8 1 D bar code recognition Fig. 9 1 D bar code model

のように Origin Line から間隔 A, B で直線の有無を調査して 2 進数化する. このような 2 進数の情報セットを Fig. 9 のように間隔 C おきに配置した. 画像の遠近の変化は上下一組の横い平行線間隔 H を測って補正した.

6.3 1次元バーコードの実験結果

- (1) カメラからの画像入力: 情報認識の目標は白い方形の線の中にある黒い縦の平行線である. Fig. 10 参照
- (2) 画像からカラー抽出: 画面上の黄色だけを抽出して距離測定の原点の位置と平行線の長さである上下平行線間の距離を測定する. Fig. 11 参照
- (3) 平行線の検出: ソベルフィルタを利用して縦の平行線を検出し, 平行線の有無を調査する. Fig. 12 参照
- (4) 情報認識: 画像の情報を認識する. すなわち「+」で示される原点位置から距離差で区分して, バーコードを認識する. コード表より「W」「I」「N」の認識に成功. Fig. 13 参照

7. 水中ランドマークの機能拡張

本論で述べた位置情報以外にも様々な情報を取り組む事によって機能拡張が期待される. 陸上の例としては例えば人間が全然知らない場所を歩いても工事中の看板を見てそこを避けて行ける環境情報, 駐車場で床に引いた線にあわせて車を止めさせるポジショニング情報, 速度制限の道路標識を見れば車の速度を落とす行動をさせるコマンド情報などが上げられる.

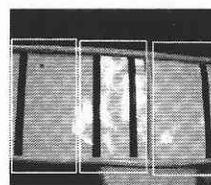


Fig. 10 Raw image

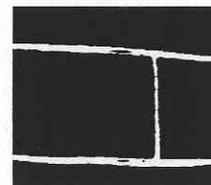


Fig. 11 Yellow extract



Fig. 12 Line extract

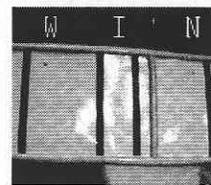


Fig. 13 Recognition

8. ま と め

推測航法の距離誤差を水中ランドマークで補正する手法によって水中ロボットの自律航行能力が高められる. そしてこのような手法によって水中ロボットが複雑なタスクや長距離航行などにも対応可能になる. また, 水中ランドマークにより多様な種類の情報を表現することによって水中ロボットの幅広い機能拡張が期待される.

(2000年3月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 浦 環, 高川真一, “水中ロボット総覧”, pp. 134-136, 成山堂書店, 1994.
- 2) 近藤逸人, 浦 環, “自律型海中ロボット Tri-Dog1 の開発”, 日本機械学会 ROBOMECH'00 講演会講演論文集 CD-ROM 2 A 1-5-002, 2000.
- 3) B.A.A.P. Barasuriya, “Computer vision for autonomous underwater vehicle navigation”, 東京大学環境海洋工学専攻博士論文, 1998.
- 4) 日本工業出版社, “知っておきたいバーコードの知識”, pp. 110-113, 日本工業出版社, 1994.