潜水機による局所海底地形図作成および パスプランニング

正員 荒 牧 浩 二* 正員 浦 環**

Local Map Drawing and Path-Planning for Submersible Vehicles

by Koji Aramaki, *Member* Tamaki Ura, *Member*

Summary

This paper introduces a system to draw a local map based on range data which are measured by ultrasonic sensors on a submersible vehicle. Topography is represented as the depth values at two-dimensional square cells. Measured depth values and their weights to represent their certainty at each cell are accumulated as the information about the obstacle occupancy and emptiness. The depth of seabed is conjectured with these values, or judged "unknown" when the amount of information is not sufficient.

The features of the system are as follows: 1) Topography is conjectured by combining a large number of sensor readings from multiple positions although each reading has uncertainty of the point where the ultrasonic wave is reflected. 2) The system offers the amount of information which represents the index of reliability of that depth value. 3) The maximum depth for the vehicle to work safely is available when the depth of the seabed has not been conjectured. 4) The path-plan is generated to survey the target area, which is more efficient than a prescribed path-plan such as simply tracing the orthogonal lines.

Experiments at a testing pool and simulations on workstations demonstrate that the proposed system is significantly advantageous for detailed local mapping by a submersible vehicle.

1. 結 言

有索無索を問わず潜水機は、海中活動において重要な役割を担うものとして期待されている。熱水噴出や遺失物を発見するためなどといった目的のため、潜水機は海底のすぐ近くを航行する場合が多くある (Fig. 1 参照)。海底の近くで安全に活動するためには、周囲の環境、特に幾何学的な特徴に基づいたパスプランを生成することが必要である。

潜水機による探査活動に先立ちオペレータから与えられる地形図は、通常は情報量が不足し精度が充分になく、予め詳細なパスプランを設定できない。そのため、探査活動

中に潜水機自身によって計測される測距データに基づいて、その地形図を逐次更新していく必要がある。すなわち、適切なパスを計画するためには正確な地形図が必要であり、正確な地形図を作成するためには、適切なパスプランが必要とされる。このことから、潜水機自身による自動的な局所海底地形図作成と、未知の領域を減少させるためのパスプランニングは、相互作用関係にあるといえ、双方とも

Fig. 1 Finding hydrothermal vents

* 東京大学大学院工学系研究科

** 東京大学生産技術研究所

Fig. 2 Essential two elements of submersible activities

海底近くに於ける潜水機の活動に必要な不可欠な要素となる (Fig. 2 参照)。

これら2つの要素が調和した自動的な局所的地形図作成システムを形成するために、本論では以下の2つのアルゴリズムを導入する：

- (1) 潜水機に搭載された超音波センサから得られ誤差を含んでいる測距データに基づいて、周囲の地形図を作成するアルゴリズム。
- (2) 完全ではない地図上の与えられた未知の海域を探索する、パスプランニングのアルゴリズム。

次に、各アルゴリズムのパラメータを実験によって決定し、それらを用いて数値シミュレーションにより提案する手法の妥当性を示す。

なお、本論では、潜水機の位置 (x, y, z) は LBL (Long Base-Line Acoustic System) や、SSBL (Super Short Base-Line Acoustic System) などの測位システムによって逐次決定され、潜水機に提供されていることを前提とする。また、超音波を反射する物という観点から、天然の海底面と人工的な海中構造物の双方をまとめて、障害物あるいは海底と呼ぶ。さらに、海底にオーバーハングはないものとする。

2. 地形図の作成

2.1 反射点の不確定性

どのような超音波測距装置であっても、個々の測距値からは超音波の反射点を指向角の範囲内でしか特定することができない (Fig. 3 参照)。指向角は装置の性能に依存するが、例えば $1^\circ \sim 15^\circ$ と広く、離れた地点から正確な地形図を得るためには、複数の位置からの数多くの計測値を組み合わせることによって確率的に推測する必要がある (Fig. 4 参照)。Elfes^{1),2)} は、平面に配置した格子点における障害物の有無の確率を測距センサのデータによって逐次更新することによって、陸上用自立型ピークルのための2次元的地図を作成する手法を提案したが、本論ではその手法を基にして、各格子点における海底深度を決定するアル

Fig. 3 Uncertainty of the reflecting point

Fig. 4 Combining sensor readings from multiple positions

Fig. 5 Horizontal square cells in the target area

ゴリズムを提案する。

2.2 地形図のための変数

Fig. 5 に示すように水平面 ($x-y$ 平面) を等幅の矩形のセルに区切り、ここで深さを定義する。オーバーハングが存在しない前提では、海底は各セルに於ける深さの集合として表現することができる。個々のセルについて、 Z_c , Z_s , および Z_t の3種類の深さを定義する (Fig. 6 参照)。 Z_t は、海底の真の深度である。 Z_c は、本システムによって計算される海底の推測深度である。 Z_s は、障害物が存在しないと推定される最大の深度を表し、以後安全限界深度と呼ぶ。潜

水機は、たとえ情報不足のために推測深度 Z_c が得られていない場合にも、 Z_s まで降下する事ができる。

ひとつの測距データは、対応するいくつかのセルの、海底の深度の計測値 z_i およびその重み w_i に変換され、障害物の存在性に関する情報として蓄積される。同じ測距データから、その超音波が通過したことにより、安全限界深度の計測値 z_{sj} が対応するセルに対して得られ、障害物の不存在性に関する情報として別に蓄積される。これらの数値に基づいて、次節以下に示すように Z_c および Z_s を決定する (Fig. 7 参照)。

2.3 障害物の存在性

センサ前方の局所的な座標系を、Fig. 8 に示すように定義する。

Fig. 6 Three definitions of depths

Fig. 7 Variables for each cell

Fig. 8 Sensor coordinate system

S : センサの位置

P : センサ前方の任意の点の位置

δ : ベクトル SP の長さ

θ : センサの主軸とベクトル SP のなす角

R : 測距センサの計測値

測距センサのひとつの計測値に対して、センサ前方の空間に超音波の反射点である確率(障害物の存在する確率)の密度分布がひとつ得られる。確率密度分布 $f_o(\delta, \theta)$ はセンサの性能に依存するが、 $f_o(\delta, \theta)$ は指向角と測定精度に対応する Ω と ϵ という2つのパラメータによって、次式のように簡略に表すことができる (Fig. 9 参照)。

$$f_o(\delta, \theta) = \frac{1}{K} \cdot f_o^r(\delta) \cdot f_o^a(\theta), \quad (1a)$$

$$f_o^r(\delta) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\delta - R}{\epsilon} \right)^2 & \text{for } R - \epsilon \leq \delta \leq R + \epsilon \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1b)$$

$$f_o^a(\theta) = \begin{cases} 1 - \frac{1 - \cos \theta}{1 - \cos(\Omega/2)} & \text{for } 0 \leq \theta \leq \frac{\Omega}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1c)$$

$$K = \iiint_{D_o} f_o^r(\delta) \cdot f_o^a(\theta) dV. \quad (1d)$$

Fig. 10 のように、 $f_o(\delta, \theta)$ がゼロでない空間 D_o のうちセル (x, y) に属する部分空間を $D_o(x, y)$ とする。セル (x, y) における海底の深度の候補 z_i は、部分空間 $D_o(x, y)$ における $f_o(\delta, \theta)$ の重心の深さとして定義する。 z_i の重み w_i

Fig. 9 Distribution of probability density to be the reflecting point

Fig. 10 Subspace $D_o(x, y)$

Fig. 11 Distribution of probability density to be the passing point

は $D_o(x, y)$ 内での $f_o(\delta, \theta)$ の積分値と定義する。すなわち

$$z_i = \frac{1}{F} \iiint_{D_o(x, y)} z f_o(\delta, \theta) dV, \quad (2a)$$

$$F = \iiint_{D_o(x, y)} f_o(\delta, \theta) dV, \quad (2b)$$

$$w_i = \lambda F. \quad (2c)$$

ここで、 λ ($0 \leq \lambda \leq 1$) は、海底における超音波の反射の特性を表すパラメータである。

以上のように、ひとつの測距データに基づいて、いくつかのセルの候補リストに z_i および w_i が一組づつ加えられる。

2.4 障害物の不存在性

測距データによって、センサ前方の空間に超音波の通過点である確率(障害物の存在しない確率)の密度分布も得られる。点 (δ, θ) における確率密度 $f_E(\delta, \theta)$ は、以下のように3つのパラメータ Ω, ϵ および $R_{\min}$ によって表す (Fig. 11 参照)。

$$f_E(\delta, \theta) = f_E^r(\delta) \cdot f_E^a(\theta), \quad (3a)$$

$$f_E^r(\delta) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\delta - R_{\min}}{R - \epsilon - R_{\min}} \right)^2 & \text{for } R_{\min} \leq \delta \leq R - \epsilon \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (3b)$$

$$f_E^a(\theta) = \begin{cases} 1 - \frac{1 - \cos \theta}{1 - \cos(\Omega/2)} & \text{for } 0 \leq \theta \leq \frac{\Omega}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (3c)$$

関数値 $f_E(\delta, \theta)$ が閾値 η より大である点 (δ, θ) は、障害物が存在しないものとする。セル (x, y) がこの障害物の存在しない空間の真上にある場合、この空間の (x, y) における最大深度を z_{sj} とし (Fig. 12 参照)、セル (x, y) のリストに加える。

2.5 Z_c および Z_s の算出

前2節で述べたように、障害物の存在性・不存在性に関する2種類の情報が、各セルに対してそれぞれ独立に蓄積される。これらの値は確率的なものであるため、海底の深度は両者を組み合わせて算出される。推測深度 Z_c を z_i の重み付き相加平均値として次式で与える。

Fig. 12 Empty subspace

$$Z_c = \begin{cases} \frac{1}{W} \cdot \sum_{i=1}^m u_i w_i z_i & \text{for } W > W_0 \\ \text{"unknown"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4a)$$

$$u_i = \sqrt{\frac{\text{size}\{j | z_{sj} < z_i\}}{m_s}}, \quad (4b)$$

$$W = \sum_{i=1}^m u_i w_i, \quad (4c)$$

ここで m および m_s は、 Z_c および Z_s のために計測されセル毎に蓄積されているデータ z_j および z_{sj} の個数である。Eq.(4c)に示されるように、各 z_i の重みは Eq.(2b) および (2c) で定義される w_i と、障害物の不存在性を考慮するために Eq.(4b) のように定義される u_i の積とする。それらの積の和 W は Z_c の算出の際に用いられる情報の豊富さを表し、推測深度の信頼性の指標として利用できる。以後 W を情報充足度と呼ぶ。 W が閾値 W_0 以下である場合、算出された Z_c はシステムによって根拠が乏しいと判断され、そのセルの Z_c を「未知」とする。

z_{sj} が全て信頼に足る値であるならば、安全限界深度 Z_s を z_{sj} の最大値とすることができる。しかし z_{sj} にも計測誤差が含まれており、ひとたび過大な z_{sj} がリストに登録されると、 Z_s が訂正されなくなる。これを回避するために、各セルの z_{sj} の平均値と標準偏差 σ とを用い、平均値からの偏差が 3σ 以内である z_{sj} のみを有効とし、その中の最大値を Z_s とする。すなわち、

$$Z_s = \max \{ z_{sj} | z_{sj} \leq \bar{z}_s + 3\sigma \}, \quad (5a)$$

$$\bar{z}_s = \frac{1}{m_s} \sum_{j=1}^{m_s} z_{sj}, \quad (5b)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m_s} \left(\sum_{j=1}^{m_s} (z_{sj} - \bar{z}_s)^2 \right)} \quad (5c)$$

以上のように、目標海域全体の地形図は、全セルの Z_c 、 W および Z_s の組み合わせとして出来上がる。

3. パスプランニング

予め与えられたパスプランが、ある一定深度で格子状に設定されているものを単純にトレースするようなものであれば、それによって得られる超音波測距データを用いた地

形図は、海山や海溝といった海底の起伏によって生じる陰の部分のカバーする事ができない。また、計測値 R が大きくなれば、対応するセルの個々の w_i は小さくなる。すなわち、正確な地形図を描くために十分な情報を得るためには、潜水機はそれ自身の持つ地図に基づいて、場所に応じてなるべく海底面(障害物)の近くにまで接近する必要がある。

本論で提案するパスプランニング用アルゴリズムは、2つの段階により構成される。第1段階では、目標海域全体の大まかな情報を得るために、潜水機は Fig. 13 に示すような予め決められたパスを一定深度で進む。この際、潜水機は目標海域全体の平均深度や最小深度といった粗い情報しか予め提供されていないとしている。目標海域が全体的に浅い場合には、1箇所から計測できる面積が小さいので Fig. 13(a) のように密なパスを与える。この段階において潜水機が活動する深度は、障害物との衝突を避けるために充分浅く設定される。第1段階終了時には、低精度の全体的な地形図が描かれることになる。したがってこの程度の地形図が予め与えられている場合は、第1段階は省略することができる。

パスプランはホロノミックな潜水機ではどのようにでもとれるが、航行型潜水機のような非ホロノミックなものではその運動特性に合致するように決められなければならない。本論では、潜水機の運動性能は、東京大学生産技術研究所で1992年にソフトウェアの研究開発のために作られたテストベッド自律型無人潜水機“Twin-Burger”³⁾の性能を前提とし、ホロノミックな運動を前提とする。

3.1 未知のゾーンの探索

第2段階では、Fig. 14 のように潜水機は以下に示す4つの行動を繰り返し、地形図をより完全なものにしていく。

- (1) 目的地とそこへ至るパスの決定。
- (2) 目的地の方位への定点回頭。
- (3) 決定されたパスのトレース。
- (4) 180° 定点回頭。

行動(1)のために、目標海域を Fig. 15 のようにいくつかのゾーンに区切る。潜水機の目的地は、 Z_c が未知であるセルを最も多く含んでいるゾーンの中心に決定する。潜水機のパスの水平面への写像は直線とし、パスの深さはその時点の Z_c 地図を用いて決定する。この決定方法は、先に述べたように潜水機の性能に依存する。

Fig. 13 Examples of path-plan in phase 1 to get a wide view

Fig. 14 Actions in phase 2

Fig. 15 Target area divided into zones

Fig. 16 Collision avoidance

行動(2)、(3)および(4)で、潜水機は一定時間毎に超音波センサによる測距を行う。

3.2 障害物回避

前節で述べた行動(3)の最中に、 Z_s 地図の不備などの理由で、潜水機が予想以上に障害物に接近してしまう可能性がある。したがって、回避行動を規定しておく必要がある。潜水機に搭載された測距センサのひとつがある閾値を下回る距離を計測した場合には、システムは自動的に障害物回避行動を取り、その後再び行動(1)からやり直すとする (Fig. 16 参照)。

4. システムの検証

4.1 地形図作成の実験

地形図作成のアルゴリズムの有効性を検証するために、東京大学船舶航海性能試験水槽⁵⁾(水深2 m)において実験を行った。使用した超音波センサは16個で、“Twin-Burger”に搭載されているものと同型である。これらを Fig. 17 に示す向きに配置し、試験水槽の x - y 追跡電車上の、上下方向(z 方向)に可動のターンテーブルに固定した。実験中は、直進時には0.1 m 毎に、回頭時には5° 毎に測距した。第1段階で用いるために予め指定しておいたパスは、Fig. 13(a)の通りで、深度は0.55 m である。また、パラメ

Fig. 17 Arrangement of 16 range sensors

ータ Ω , ϵ , $R_{\min}$ および η は、それぞれ 20° , 0.5 m, 0.3 m, 0.05 である。

目標海域は $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ で、その真の海底地形は Fig. 18 の等深度線図に示される。水槽内には、円筒・直方体・ 45° の坂を持つ山そして 30° の坂を持つ2つの山の合計5個の障害物が設置されている。目標海域は一边0.1 m のセルに区切る。Eq.(2 c)の λ は、超音波の主軸と、個々のセルにおける海底面の法線ベクトル n とのなす角の余弦の3乗とした。ベクトル n は、注目しているセルの周囲の8つのセルの推測深度 Z_c を基にして計算した。また、閾値 W_0 は0.1とした。

3.1 節の行動(1)で決定される目的地の深さは、そこに対応するセルの Z_s より1 m 浅くし、そのセルの Z_s が得られていない場合には、対応するゾーン内の全セルの既知の Z_s の平均値で代用した。パスは現在位置と目的地とを直線で結ぶ。また、3.2 節の障害物回避行動は、計測値のひとつが0.4 m 未満になったときに、潜水機はその障害物とは反対の方位に0.3 m 平行移動しながら0.3 m 浮上することにした。

Fig. 19 は、第1段階の1,036回を含む全1,641回の計測が終了した後の地形図と潜水機の航跡である。 Z_c の誤差の平均値は9 cm で、全ての障害物の形状がはっきりと認識されていることがわかる。

Fig. 20 は、実験を通しての、 Z_c が得られたセルの個数と Z_s が得られたセルの個数の移り変わりを表している。 Z_c の個数の増加が緩やかであるのに対し、 Z_s の個数は急激に増加する。探索行動の早期には多くのセルについて、例えば Z_c が決定できなくとも、航行に必要な Z_s を得ることができていることが確認された。このように、3.1 節の行動(1)でパスの深度を決定するに当たり、 Z_c を用いる代わりに Z_s を

Fig. 18 Z_c (true depth) for the experiment ; 5 obstacles on the floor of the pool.

Fig. 19 Z_c (conjectured depth) and trajectory after 1641 measurements

Fig. 20 Results of the experiment

利用したことの妥当性が示された。

Fig. 21 は、 $W_0=0$ としたときの W と Z_c の誤差との関係を表している。 W が増加するに従い誤差が減少するので、 Z_c の誤差は W によって評価することができる。 W_0 がより大きな値に設定されれば、 Z_c の得られるセルの個数はより小さくなるものの、 Z_c の誤差は全体的に減少に向かう。

4.2 パスプランニングのシミュレーション

本論の提案するパスプランニング用アルゴリズムに基づいて、より複雑な海底地形を舞台にしたシミュレーションを行った。この結果を、予め与えられた単純なパスプランに沿って、同じ地形を探索させた場合の結果と比較した。シミュレーションのプログラムは、仮想的な海中環境で複数

Fig. 21 Relation between W and error of Z_c

の潜水機の行動の研究を行うために著者らの研究室で開発された MVS (Multi-Vehicle Simulator)⁴⁾ を基にしている。

目標海域は $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ で、その海底地形の等深度線図は Fig. 22 の通りである。これは海洋科学技術センター提供による八丈凹地の実測地図を、縮尺を変更して用いている。セルは一辺 0.2 m の正方形で、第 1 段階のために与えたパスは Fig. 13 (b) に示してある。パラメータ $\Omega, \epsilon, R_{\min}$ および η は、それぞれ $20^\circ, 0.5\text{ m}, 0.3\text{ m}, 0.005$ で、実験時と同様に、潜水機は直進時に 0.1 m 毎に、回頭時に 5° 毎に測距データを得る。また、閾値 W_0 は 0.1 とした。

3.1 節の行動 (1) では、一連の (x, y) 座標を各時間ステップ毎に決定した後、個々の (x, y) に対応するセルの Z_s よりも 1 m 浅い深度にパスの深度を決定する。 Z_s が未知で

Fig. 22 Z_t (true depth) defined for the simulations

ある場合には前の時間ステップの (x, y) の Z_s で代用する。また、3.2 節の障害物回避行動は 4.1 節の実験時と同様にした。

第1段階の 748 回の計測を含む 3,000 回の計測の結果得られた地形図とその間の航跡を Fig. 23(a) に示す。また、予め与えられたパス(深度 1 m 一定)に沿って同じ海底地形を計測し得られた地形図を Fig. 23(b) に示す。(a) の地形図では、未知のセルがほとんど残っていないが、(b) の地形図では、深い海底面のエリアは未知のままである。これは、(b) では潜水機が海底面の近くに行くことがなく、測距値が大きな値であるため、ひとつの計測値に対して重み w_i が多数のセルに分散され、その結果このエリアのセルの W がなかなか増加しなかったためである。

これら 2 つのケースのシミュレーションを通しての、 Z_c の誤差の平均値の推移を Fig. 24 に示す。予めパスを与えたケースでは、常に海底から離れた深度から広範囲を見渡しているため、超音波反射点の不確定性の大きな計測情報が蓄積されてしまうため、地形図の誤差の平均値は計測回数を重ねるに従って増加している。それに対してパスプランを自動的に生成したケースでは、探索が進むにつれてより正確な地形図が得られていくことがわかる。

5. 考 察

3 次元空間に存在する障害物を確率的に扱う手法としては、Elfes の 2 次元モデルに倣って等間隔の格子点を 3 次元的に配置する手法がまず考えられるが、各格子点の障害

Fig. 23 Z_c (conjectured depth) and trajectory after simulated 3000 measurements; White areas are "Unknown".

Fig. 24 Mean error of Z_c in simulations

物存在・不存在を判定して寄せ集めただけでは深度を離散的に扱うことになり、高精度を望むとその3乗のオーダーの密度で格子点を配置する必要がある。それに対して、本論で提案する地形図のモデルは、水平面に配置したセルに変数 z_i および z_{sj} を定義することにより、深さ情報を連続値として扱うことができ、実システムに組み込む際にメモリーの容量の節約や計算の組み合わせの数の抑制などの点で有利であり、より現実的である。

Z_c の算出に用いられる w_i は、セルによってその分布が異なると予想される。 z_i を w_i で重み付き平均するため、値の小さい w_i ばかりが多数存在する場合は、値の大きい少数の w_i の場合に比べて、 $W > W_0$ であっても Z_c が正確でない可能性がある。したがって、今後の課題として Z_c の算出には w_i の分布を考慮することが挙げられる。いずれにせよ、データ集合 $\{z_i, w_i\}$ を基にした Z_c の算出法は、複数の計測データを組み合わせるという点で、より正確な地形図を描くために有効であると考えられる。

本システムは、 $W \leq W_0$ ならば Z_c を「未知」と判断することにより、根拠の乏しい推測を避けている。それは、同じ場所で計測を繰り返すとそれに対応するセルの W ばかりが増加してしまい得られる Z_c が正確でない可能性があるものの、それに留意すれば W は対応するセルに関して得られている情報量の尺度と位置づけられるからである。より正確な地形図が必要であれば、 W_0 をより大きな値に設定することにより実現できる。

本論で提案するパスプラン用のアルゴリズムでは、 Z_s を利用して潜水機の安全性に配慮している。 Z_s の決定には Fig. 12 の η も影響を与える。 η をより大きく取ると、システムが下す判断は安全側に移るので、 η を適切に設定することにより探索活動の性質や潜水機の運動特性などに応じたパスプランを作成できる。

また、提案のアルゴリズムは、ゾーンという固定されたセルの集合について Z_c が未知のセルの個数を比較し、そ

れが最大のゾーンへ探索に向かうというものである。これに対して、 Z_c が未知で隣接しているセルをひとつのゾーンとする手法や、近くのゾーンから順に探索するなどのバリエーションも考えられる。提案する手法では、計算量が少ないので実システムに組み込みやすいという利点がある。

6. 結 言

推測深度 Z_c 、情報充足度 W および安全限界深度 Z_s という値を導入することにより、潜水機の超音波測距センサを用いて海底の複雑な地形を読みとり地形図化する手法を提案した。試験水槽における実験により、その手法の有効性を示した。

Z_s や W という情報を利用することにより、予め潜水機に与えておく形式のパスよりも柔軟性の高いパスプランを生成するためのアルゴリズムを提案した。ワークステーション上のシミュレーションにより、格子状の単純なパスを用いた場合に比べて、提案のアルゴリズムを用いればより優れた地形図を得られることを示した。

本論の提案するこれらのアルゴリズムは、ROV (Remotely Operated Vehicle) や、AUV (Autonomous Underwater Vehicle)、そして有人潜水船などの、様々な潜水機の活動に応用することができる。

謝 辞

超音波センサを製作して頂いた海洋電子の村上英幸氏、実験に際し御援助頂いた東京大学生産技術研究所の能勢義昭助手、鈴木文博氏、坂巻隆氏、東京大学船舶航海性能試験水槽の石井裕司氏、ならびに八丈凹地の地形データを提供して頂いた海洋科学技術センターの松本剛氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) A. Elfes: "Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation", Computer, 22, 6, 1989, pp. 46-57
- 2) A. Elfes: "Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation", Autonomous Robot Vehicles, Springer-Verlag, 1990, pp. 233-249
- 3) 藤井輝夫, 浦環, 黒田洋司, 荒牧浩二, 能勢義昭, 千葉裕之: "海中ロボットの知能化に関する研究(その1: 汎用テストベッドの開発と水槽実験)", 日本造船学会論文集, Vol. 174(1993), pp. 903-916
- 4) 黒田洋司, 浦環, 荒牧浩二: "複数海中ロボット対応型仮想環境シミュレータの開発", 第12回海洋工学シンポジウム, 1994, pp. 543-548
- 5) 元良誠三, 小山健夫, 藤野正隆, 伊田力, 小柳雅志郎: "東京大学船舶航海性能試験水槽について(第1報)", 日本造船学会論文集, Vol. 128(1970), pp. 213-219