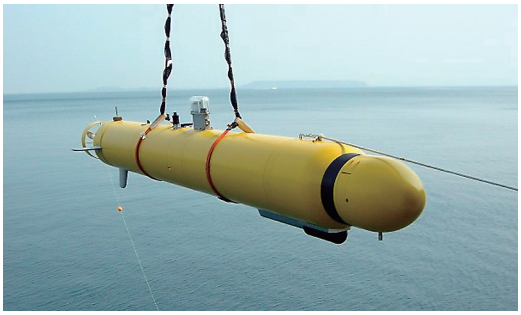
特 集 論 文

水中航走体向け海底地形照合航法技術の開発

Terrain Aided Navigation for Unmanned Underwater Vehicles



長 倉 博[*1] Hiroshi Nagakura
浅野陽一郎[*2] Yoichiro Asano
秋山勝俊[*2] Katsutoshi Akiyama
帋田祐二[*3] Yuuji Torada
阿久根大成[*3] Taisei Akune

海中における高精度自己位置認識は水中航走体にとって重要技術課題である．本論文では，航走体が測深ソーナーで計測するローカルな海底地形とあらかじめ保有する水深データベースとのパターンマッチングにより自己位置を同定する技術について，コンセプト及び有用性を示す．さらに海底地形照合航法の技術的可能性を実証する目的で，水中無人機を用いて行った実海域試験の結果を報告する．

1. は じ め に

移動体にとって自己位置の認識は必須であるが，電波が実質的に使用できない海中において，水中航走体は通常は慣性航法装置により自己位置を同定する．慣性航法装置は時間とともに位置誤差が蓄積する欠点を有するため，正確な自己位置を保持するためには定期的に海面に浮上してGPS測位を行うことなどが考えられるが，浮上・潜航の繰り返しは運用に著しい制約を与える．水中航走体が海底地形を計測するセンサを備え，航走経路に沿って取得される海底地形情報をあらかじめ保有する三次元水深データベースと照合して自律的に自己位置を特定する海底地形照合航法が確立されれば，長時間の連続潜航が可能となり，運用の自由度が飛躍的に向上する．

本論文では，海底地形照合による自己位置同定技術の成立性を検証することを目的とし，海底測量データを用いて照合アルゴリズムの検討を行い，さらに無人水中航走体（Unmanned Underwater Vehicle：UUV）にマルチビーム測深ソーナー（Multibeam Echo Sounder：MBES）を搭載して実海域実証試験を行った結果を報告する．試験ではUUVをあえて潜航させずに水面航走させてGPSによる航跡も同時に取得し，海底地形照合による推定航跡とGPS航跡を比較し，地形照合による位置同定の妥当性を検証した．

2. 海底地形照合航法のコンセプト

図1に海底地形照合による位置同定法の概念を示す．UUVは1回の探信で左右方向多点同時に自身と海底との距離を計測することが可能なセンサを備え，進行しながら探信を繰り返すことで経路に沿った三次元的な海底地形を取得できる．この地形データはUUV深度が基準であるが，UUVの深度センサ値を加算すれば三次元水深データが得られる．航走中に経路に沿って取得するローカル水深マップをあらかじめ保有する水深データベースと照合してUUVの自己位置を推定し，慣性航法装置やその他の航法センサデータと統合して自己位置を同定する．

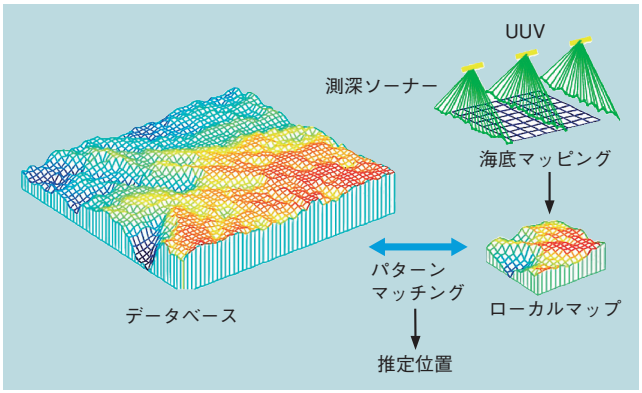


図1　海底地形照合によるUUVの自己位置同定

この位置同定法の航法への適用にあたっては，地形照合を連続的に行って，慣性航法装置に推定位置を常時フィードバックする運用以外に，浮上してGPS測位する代替手段としてウェイポイントでスポット的に地形照合して慣性航法装置の位置をアップデートする運用も考えられる．

なお，一般に，リングレーザジャイロを搭載した慣性航法装置であっても純慣性では1時間当たり1海里程度の位置誤差が蓄積するので，音響灯台などの外部支援なしでは長時間運用に耐えないが，海底地形照合による位置同定が可能となれば，GPS測位のための浮上と潜航による時間とエネルギーの損失がなくな

[*1] 技術本部長崎研究所制御システム研究室主席 工博
[*2] 長崎造船所特殊機械部主席
[*3] 長崎造船所特殊機械部水中機器設計課

る．

3. 位置推定アルゴリズムの検討

3. 1 評価用データ取得のための海底測量

マッチングアルゴリズム検討のため，実海域にて海底測量を行って評価用データを取得した．海上保安庁などが水路測量業務に使用するのとほぼ同等なマルチビーム測深システムを小型漁船に仮設し，海面から海底測量を実施した．

測量は１つの海域に対して２度行った．１回目は水深データベース用測量で，通常の水路測量と同じ方法で測量した．２回目は UUV が取得するローカルマップの模擬データ用で，水深マップエリアの一部を横切るように一方通行して測量を行い，ここから照合用テンプレート(ローカルマップ)を切り出した．したがって，水深マップと照合用テンプレートは互いに独立な測量から生成されている．

測量は，起伏の大きい岩場エリアとなだらかな砂地エリアの２箇所で実施した．図２に等水深線図を示す．水深マップの大きさは岩場エリアが約 200 m × 500 m，砂地エリアが約 500 m × 1 000 m で，メッシュ間隔は１m である．等水深線図中の水色と黄色で塗りつぶされた領域は，UUV ローカルマップ模擬データ用測量のフットプリントを表しており，この中から無作為に矩形状の小領域を切り出してテンプレートとした．テンプレートは岩場から 10 サンプル，砂地から 20 サンプル切り出し，メッシュ間隔は１m，画素数は 32 × 32 である．水深マップとローカルマップは

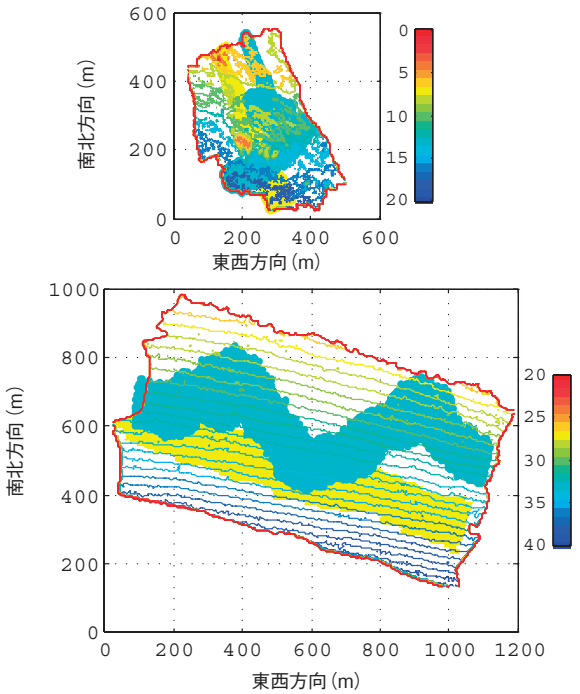


図２　水深データベース（上：岩場，下：砂地）

それぞれ D-GPS 測位による緯度経度と関連付けられているので，照合による位置同定の成否は緯度経度情報を用いて評価することができる．

3. 2 照合アルゴリズム

データベースからテンプレートと同じ 32 × 32 画素を順次切り出していき，マッチングの目的関数が最小となる切り出し位置を，地形照合による推定位置とする．目的関数としては，画素ごとの両者の絶対水深の差の二乗和平方根，すなわち距離を用いた．簡単のため UUV の方位は既知として，テンプレートとメッシュ方位が合致するようにデータベースをあらかじめ回転させ，並進についてのみ探索を行った．

なお，マッチングの目的関数として上述した絶対水深同士の距離を採用する以外に，水深を平均成分と平均からの偏差である起伏成分に分離して，平均水深の差と起伏成分の距離の重み付き和を目的関数とする方法も試みた．これは，計測する絶対水深に深度センサ誤差や潮位補正誤差などのオフセット誤差があっても，海底の形状さえ一致していれば照合がヒットしやすくするためである．

3. 3 照 合 結 果

岩場では 10 個のテンプレートすべてが正解位置 ± 1 メッシュにヒットした．砂地では，絶対水深でのマッチングでは 20 個のテンプレートの 50 %がヒットし，平均及び偏差それぞれの距離の重み付き和で照合した場合，重みによってヒット率は変化し，最高で 90%のヒット率が得られた [(1)]．

照合例を図３に示す．図は左からローカルマップ，データベース，目的関数の順で，ローカルマップに最もマッチする切り出し位置をデータベース内で探索した結果が目的関数のハイライト点である．起伏の多い岩場では目的関数の極小点近傍での等高線間隔が概して密であるのに対して，起伏に乏しい砂地では等高線間隔が相対的に粗で，推定位置の第一候補と次点以下の候補が僅差で並ぶ傾向にある．平均成分と偏差（起伏）成分の距離の重み付き和での照合で起伏の比重を増すと，テンプレート内に存在する局所の隆起や窪みなどが手掛かりになって正解位置にヒットする確率が上昇した．

4. 実　証　試　験

UUV に関わるキー技術のデモンストレーションを目的として開発された多目的 UUV 実証機 Marine Challenger 150 を改修し，前方部に古野電気(株)製の MBES 型番 HS-600 を搭載した（図４）．

通常の船舶搭載型 MBES 測量システムでは，D-GPS データがシリアル通信で MBES に入力され，

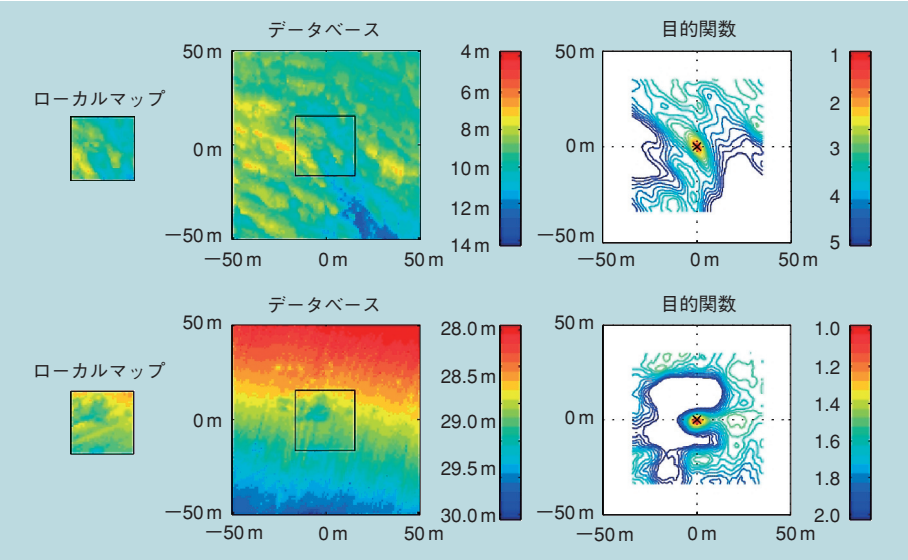
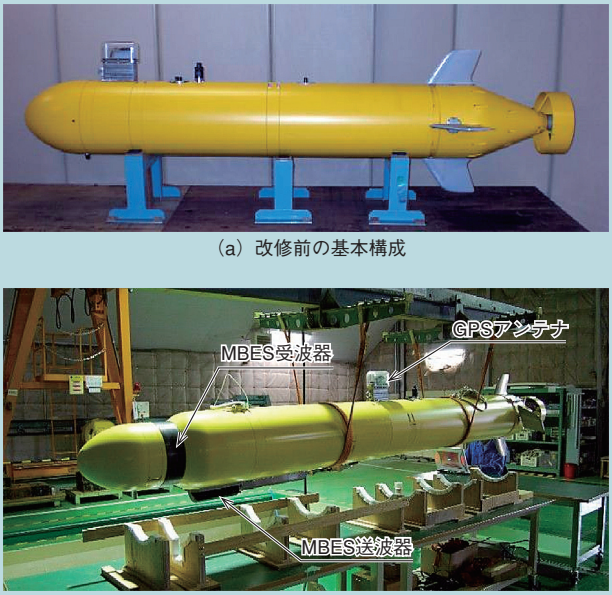


図３　照合結果の例（上：岩場，下：砂地）



（a）改修前の基本構成

（b）前方部にMBESを搭載した構成

図４　UUV 実証機の概観

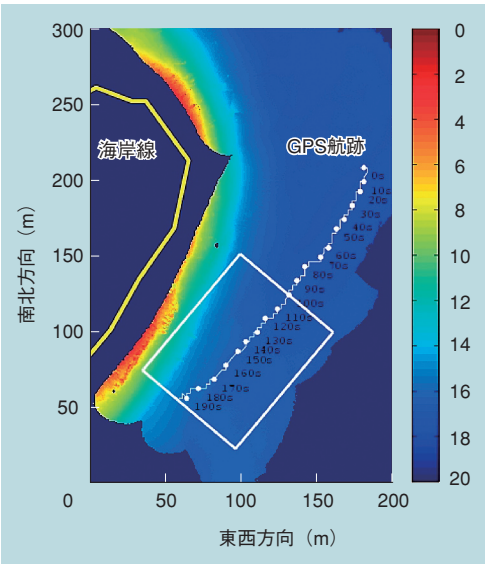


図５　試験海域の水深マップと UUV の GPS 航跡

測深データと緯度経度データが関連付けられるが，本システムでは MBES 測深データは UUV 慣性位置と関連付けられる．

試験海域として長崎県大村湾内を選定し，事前に通常の MBES システムによる海底測量を行って水深マップを作成した．マップのメッシュ間隔は約 0.5 m である．このマップ内で UUV を水面航走させ，UUV に搭載された MBES により海底測量を行うと同時に，比較のため GPS 航跡も取得した．潜航と水面航走では MBES の作動に関して違いはない．

図５は事前測量で作成した水深マップ上に UUV の GPS 航跡を重ねて表示したものである．水深マップから図中の白線で示される部分をデータベースとして切り出して，UUV のローカルマップと照合した．

図６に地形照合による位置推定の例を示す．UUV の MBES 測深データから図６(a)の赤線枠で示すような長さ 30 m，幅 40 m のローカルマップを作成し，このローカルマップに最もマッチする地形を図６(b)のデータベース内で探索した．目的関数のコンターマップは図６(c)のようになり，照合により推定された位置を図６(b)中に赤線枠で表示した．ローカルマップの右舷側に局所的な隆起が存在しており，これが照合の手掛かりになっていると推測される．

次に，５秒ごとに UUV ローカルマップを作成して照合による位置推定を繰り返し，その軌跡を図７にプロットした．地形照合による推定航跡は GPS 航跡に対し約 25 m オフセットしているが，GPS 航跡より滑

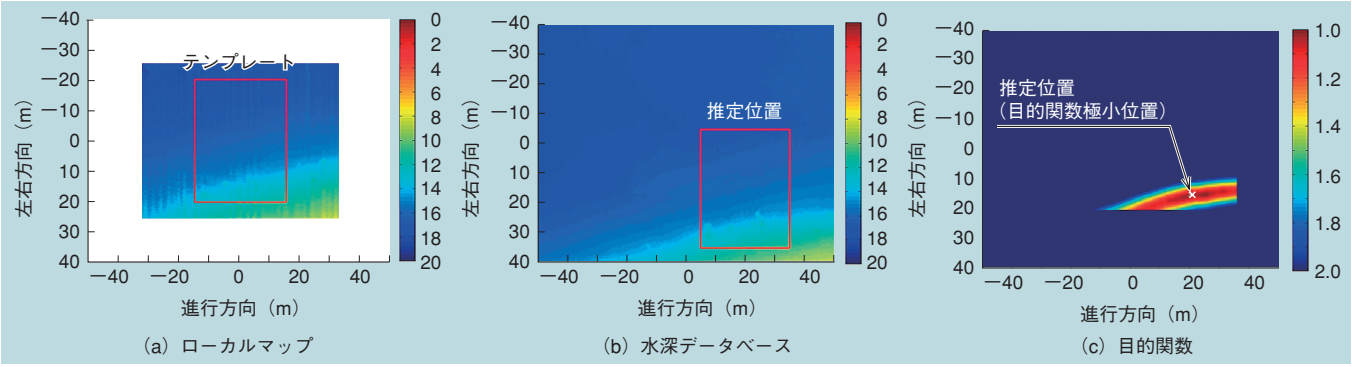


図６　地形照合による位置推定例

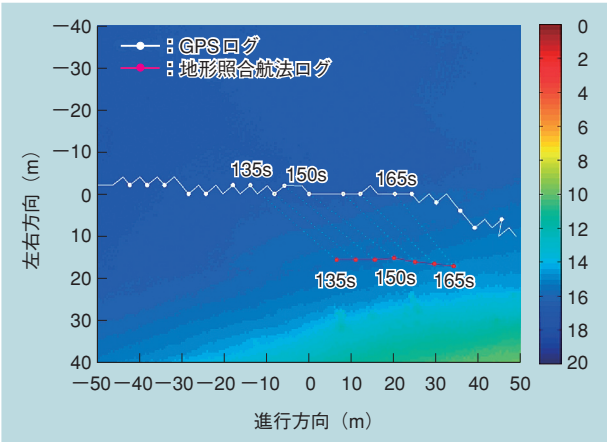


図７　地形照合による推定 UUV 航跡

らかで，時間当たりの移動量は UUV 速力とよく一致している．事前の海底測量で観測された局所的な隆起などの特徴が UUV ローカルマップでもよく捉えられていることと合わせて考えると，地形照合による推定航跡と GPS 航跡の偏差は，主に UUV に搭載された GPS の測位誤差に起因するものであり，海底地形照合による推定航跡の方がより正確と判断される．

5. ま　と　め

海底地形照合による水中航走体の自己位置同定の技術的可能性が，実海域の海底測量データを用いたシミュレーション及び海底地形を計測するセンサを備えた無人水中航走体を用いたデモ実験により証明された．位置誤差は水深データベースのメッシュサイズ内であった．

海底地形照合技術に関しては，(1)海底が平坦なとき位置同定できるのか，(2)海底地形が経年変化しないか，(3)水深データベースが整備されているか，などの疑問点がある．項目(1)については，本論文で示したように，測深ソーナーが検出できる程度の高低差を持つ局所的凹凸がテンプレート内に存在すれば，これが特徴となってマッチングが成立する可能性が十分にある．項目(2)について，筆者らは河川に近い海岸沿いの砂地エリアの同一地点で２年の間隔をおいて海底測量を実施し，地形変化は小さく，かつ照合の手掛かりになる局所の凹凸が２年間変わりなく存在しており，古いデータベースでも照合がヒットすることを確認した例がある[(1)]．項目(3)に関し，海上保安庁から公開されている電子海図データが活用できると考えている．沖合のデータは，測深点の間隔が粗く地形照合のデータベースとしては不十分と判断されるものの，主要港湾の沿岸部は，数 m 程度の間隔で公開されているデータもあり，データを補間処理してメッシュ化するだけで活用できることを確認している．

さらに，既述したように海底地形照合は常時行う必要はなく，海底地形に特徴があるエリアを飛び石的に航走し，その間は慣性航法装置を活用することができるため，最初から膨大なデータベースを必要とする訳ではない．むしろ，点と点を結んで線へ，線から面へと電子海図データベースを拡張構築するためのツールとして，海底測量機能を有する UUV を有効に活用できると考えている．

参　考　文　献

(1) Nagakura, H. et al., Underwater Positioning System Using Terrain Matching, Proc. Undersea Defence Technology Europe 2007

長倉博

浅野陽一郎

秋山勝俊

馬田祐二

阿久根大成