GPS計測と制御を組み込んだ水中模擬充電システムの構築

〇李想 Khin Nwe Lwin 許弘毅 山田大喜 戸田雄一郎 松野隆幸 見浪護 (岡山大学)

Construction of Underwater Simulated Charging System Incorporating GPS Measurement and Control

*X.Li K.Lwin H.Xu D.Yamada Y.Toda T.Matsuno M.Minami (Okayama University)

Abstract- Today, many robots are being researched and developed for various underwater tasks such as seabed exploration. Furthermore, research on autonomous underwater robot (AUV) is still in the developing stage and it can be said that it will become very important in the future. Currently, our research group is working on development of an automatic charging system based on visual servo technology for underwater robot which can perform various tasks such as automatic management of marine ranch, sea bottom search. However the measure of sailing to the working area and returning to the charging equipment have not been completed yet. In this paper, an automatic underwater simulation charging system for realizing the automatic control of underwater robot will be proposed. The system is using GPS measurement and guidance control method. And the usefulness of this automatic guidance system will be discussed by a repetition accuracy experiment and a guidance control experiment using mobile robot. Finally, the result of the newest simulated charging experiment in the actual sea of Okayama will be report.

Key Words: Underwater robot, GPS guidance, Automatic charging

1 緒言

今日,水中ロボットは様々な場面で用いられている. 例えば,魚の養殖業において水底に沈んだ死魚の回収 や,地震で被災した漁港の被害調査,また,水力発電 所での水中の壁面や設備検査などが挙げられる.なか でも,水深数百~数千メートルの海底調査といった人 が立ち入ることができない過酷な環境下において,こ れらのロボットの利用は大きく期待されている.この ような場面で海底調査,海底マッピング,生物調査等 を行う際には水中ロボットの長時間航行が必要である. 海上から有線で電力供給することを想定した Remotely Operated Vehicle(ROV)を用いる場合,ケーブルの張力 の外乱による水中ロボットの制御への悪影響,ケーブ ルの摩耗や絡まり,波による消耗,メンテナンス等様々 な問題がある.

そこでバッテリーを搭載し,給電ケーブルをなくした Autonomous Underwater Vehicle(AUV)を用いることを想定すると,現在利用されている水中ロボットのバッテリーの持続時間は長くても十数時間程度と短いため,充電のために海上と海底を行き来しなくてはならないことが問題となる.したがって,水中での長時間稼働を実現するには海中に給電設備を設置しロボットが自動で充電を行えることが理想である.

そこで、水中充電施設を想定した装置に対して水中ロ ボットが自動で接近し嵌合を行う誘導制御システムの 研究が盛んに行われてきた.著者らは、複眼で3次元立 体マーカー(3Dマーカー)の3次元位置・姿勢を動画像 列の中で実時間認識する手法(Three Dimensional Move on Sensing(3D-MoS)と呼んでいる)を提案し、プール でのアプローチ・嵌合実験¹⁾、動画像中に映り込む外乱 に対するロバスト性の研究²⁾、光環境の変化に適応す る画像処理の研究³⁾、また動画像中で3次元マーカー を認識する際の認識時間応答改善方法に関する研究を 行ってきた.なお、著者らは、3Dマーカーを用いたビ ジュアルサーボによってプールでの実験だけでなく和 歌山県と岡山県の海においても嵌合実験を成功させた 4)5). 実際の運用時には、我々の認識システムは様々な種 類の水中ロボットに搭載可能かつ、有効かを確認する 必要がある.これまでの研究には、広和株式会社製作の ROVを用いてきた.AUVにおいて我々の認識システム の有効性を確認するために、東京大学所有のTuna-Sand 2に提案認識システムを搭載し嵌合実験を行った.嵌合 実験は東京大学生産技術研究所内の実験プールにて行 い、成功した⁶⁾⁷⁾.これにより、AUVにおいても我々 の提案認識システムの有効性を確認することができた.

そして、現段階(第2段階)の研究目標として、従来 の研究に用いてきた広和製水中ロボットとは異なる軸 構成の ROV (DELTA-150)に高精度の GPS 計測と誘 導制御を導入し、ビジュアルサーボ技術と連携するこ とで、現在の水中ロボット(ROV)に欠けている作業 海域への航行や充電装置までの帰投手段を補完し、水 中ロボットの AUV 化を目指している.

本論文では、水中ロボットの AUV 化実現を向けて GPS 計測と誘導制御を組み込んだ自動水中模擬充電シ ステムを提案する.そして、GPS 計測・誘導システム の有用性について、GPS 測位の繰り返し精度や移動ロ ボットを用いた誘導制御実験を用いて議論する.さら に、岡山県の実海域で行われた模擬充電実験について 報告する.

2 システム概要

ビジュアルサーボ技術を GPS 計測・制御と結合した 水中模擬充電システムの概要を Fig.1 に示す. Fig.1 よ り、本システムの開発は3つの段階に分かれている.

第1段階: ROV の前方に搭載している2台の水中カ メラ(前向き)で充電装置(ステーション)に設置した3Dマーカーの位置・姿勢を実時間で認識することで、模擬の充電動作(ドッキング)を実現する.

第2段階(現段階): GPS とビジュアルサーボをベー スとした自律航行システムの開発を行う. Fig.1 (2nd phase)より,この段階では2台の水中カメラ(下向 き),GPS,地磁気センサー,圧力センサーを ROV に 搭載し,PC などの制御類機器は ROV の後方に牽引し ている耐圧容器(MY2)に格納する.この航行システ



Fig. 1: Overview of underwater charging system

ムは ROV が海面(アンテナ類が海面から露出)に留ま るとき,GPSの測位情報を用いて予定の作業海域また は充電装置までの誘導制御を実現する.さらに,ROV が水面下で作業する時は下向きのカメラを利用したビ ジュアルサーボで自己位置を推定し,誘導制御を行う.

第3段階: ROV の後方に2つ目の耐圧容器(Fig.1の MY3部分, ROV の電池を格納)を追加し,実際の水 中充電を行う.

GPS による自動航行・帰投制御

GPS の計測・制御システムを ROV に搭載する前に, GPS 受信機の測位精度と制御有効性について確認実験 を行った.

3.1 繰り返し精度確認実験

RTK-GPS 測位機器の動作確認及び測位の繰り返し精 度を検証するために,GPS 受信機(移動局)を台車に 乗せて100回の模擬帰投実験を行った.

Fig.2 に示すように、繰り返し精度確認実験の場所は 岡山大学工学部1号館前の駐車場とし、実験エリアの 配置と実験装置の寸法はFig.2,3に示す.GPS 基地局 のアンテナは地面から2.1mのところに固定され、座標 原点である嵌合位置より1.8m離した.移動局は台車に 搭載され、アンテナの高さは1.9mである.

実験の流れは:1,移動局台車を初期位置に置き,こ の位置を座標原点(0,0)として設定する.2,移動局台 車をランダムに移動させてから所定位置(0,0)に戻ら せて,台車の位置を記録する.3,手順2を100回行い, 繰り返し精度を確認する.



Fig. 2: Dimensions and layout of the experiment area



Fig. 3: Based side and rover side of GPS receiver

実験結果を Fig.4,5 に示す. Fig.4 は移動局台車がラ ンダム移動してから,座標原点に戻る際の測定位置, Fig.5 は X 方向と Y 方向に対する偏差の近似正規分布 曲線を表している. Fig.4 より,100 回の位置測定結果 の分布は原点から X 方向±30mm, Y 方向±40mmの 範囲内に収まっている.さらに,Fig.5 より,X 方向, Y 方向の測位誤差分布はいずれも3 倍標準偏差(±3σ)以内に入る確率が99% 以上あるため,GPS 測位機器 は良い繰り返し精度を有することが分かった.



Fig. 4: Measurement position of GPS rover side receiver



Fig. 5: Approximate normal distribution curve of deviation in x-direction and y-direction

3.2 移動ロボットを用いた制御確認実験

GPS 制御システムの有効性を検証するために, GPS 受信機を Fig.6 に示した移動ロボットに搭載し,事前に 指定した4つの目標地点への誘導制御実験を行った.



Fig. 6: Mobile robot with GPS receiver (rover side)

Fig.7 に示すように、本実験の場所は岡山大学工学部 11 号館北側の道路を選んだ.誘導制御実験では、事前 に 4 つの目標点及び目標方位角を順次指定し、GPS の 測位データ用いて、移動ロボットをそれらの目標点ま で誘導する.移動ロボットの初期位置・方位角は (x_0 , y_0 , θ_0)=(0[m], 0[m], -1[°])で、追従の目標は (x_{d1} , y_{d1} , θ_{d1})=(2[m], 0[m], 90[°]), (x_{d2} , y_{d2} , θ_{d2})=(2[m], 2[m], 180[°]), (x_{d3} , y_{d3} , θ_{d3})=(0[m], 2[m], 270[°]), (x_{d4} , y_{d4} , θ_{d4})=(0[m], 0[m], 0[°])である.停止条件は距離偏 差 0.2m 以下,角度偏差 2°以下と設定した.



Fig. 7: Layout of the experiment area

Fig.8 は移動ロボットの移動経路を示している. Fig.8 より,移動ロボットの移動経路は正方形になっていて, 最終の停止位置 (0.092[m], 0.033[m]) と初期位置 (0[m], 0[m])の位置制御偏差も想定の許容範囲 (Fig.8 の赤い破 線丸)内に収まっており, GPS 測位データを利用した制 御システムは有効であることが分かる.

4 ビジュアルサーボ技術による模擬充電実験

本システムの第1段階の実現として,GPS 誘導で, ROV を充電装置に帰投できたことを想定し,ビジュア ルサーボで模擬充電実験を2018年1月16日,岡山県 瀬戸内市牛窓町にある岡山大学理学部付属牛窓臨海実 験場にて行なった.

4.1 嵌合条件

Fig.9 に ROV が嵌合を行う条件をフローチャートで 示す. ロボット前方に搭載された複眼カメラに対象物が



Fig. 8: Movement path of mobile robot (GPS measurement)

映し出されるまで、ロボットを手動操作で対象物に接近 させる.ロボットを対象物にある程度接近させ、適合度 の値が 0.2 以上に上昇したことが確認された後、手動操 作から自動制御へ切り替えることで (a)Visual Servoing 状態へ移行させる.



Fig. 9: Flow chart of ROV docking condition

(a)Visual Servoing

ROV が 3D マーカーを発見し,目標とする相対的位置・姿勢 $[x_d, y_d, z_d] = [600, 0, 0]$ [mm]. 姿勢はクォータニオンで表現し, $\epsilon_d = [\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3] = [0, 0, 0]$ に追従することで対象物と正対する状態である.ここで, ϵ_1, ϵ_2 は x_H, y_H 軸周りの姿勢であるが,重心と浮心の関係により安定に0に保たれている. ROV が 3D マーカーの正面に移動し,嵌合穴の中心から y_H 軸, z_H 軸方向の誤差が±40[mm], ϵ_3 の誤差が±0.0615以下に留まる状態が165[ms]連続すると以下に示す(b)Docking を経てロボットは仮想給電設備への嵌合を実行する.

(b)Docking

ROV が前進して嵌合動作を行なっている状態である. $|y_d - y| \le 40$ [mm] かつ $|z_d - z| \le 40$ を満たすとき,奥 行き方向の目標値を $x_d = 600 - 30t$ [mm] (t: 嵌合を始 めたときを t = 0 [s] とする)と時変で減少させること



Fig. 10: Experimental results of simulated charging experiment. (A)Position in x-direction (B)Position in z-direction (C)Position in y-direction (D)Rotation around z-axis (ϵ_3).

で ROV が 30[mm/s] の速度で x 軸方向に前進し嵌合穴 に嵌合する. x_d が最終値 350[mm] となることで嵌合 を完了する位置に ROV が移動する. ただし途中で嵌合 の条件 (y 軸, z 軸方向の誤差が± 40[mm] 以下)を満 たさなくなった場合, その時点での x 軸方向の時変目 標値を固定して再び (a)Visual Servoing に戻る.

(c)Stay

嵌合が完了した状態である. この状態でも Visual Servoing 状態と同様に 3D マーカーに対して一定の相 対的位置・姿勢($[x_d, y_d, z_d] = [350, 0, 0]$ [mm], $\epsilon_d = [\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3] = [0, 0, 0]$)を保つように制御がなされる.

(d)Launching

ROV が後退して初期位置に戻っている状態である. 奥行き方向の目標値を $x_d = 600$ mm までを増加させ, DELTA-150 を後退させる.

4.2 結果·考察

実験結果を Fig.10 に示す.図中青の破線は目標値(適 合度の場合は動作のしきい値),灰色の破線は嵌合条 件の範囲を示している.Fig.10(A)のx方向の目標値は 600[mm]から 350[mm]の減少している.そして,この 際,Fig.10(B)(C)(D)より, y_d, z_d, ϵ_3 について嵌合条件 (165[ms]の間,目標値 y_d, z_d について±40[mm], ϵ_3 に ついて±0.0615)を満たしており,嵌合動作を行なう ことができたということがわかる.ここで ϵ_3 はクォー タニオンの値であるため単位を持たない.おおよその 目安として,[ϵ_1, ϵ_2] = [0,0]とした場合,度数法で約± 7°程度である.

5 結言

本論文では、水中ロボットの AUV 化実現に向けて GPS 計測と誘導制御を組み込んだ自動水中模擬充電シ ステムを提案した.そして、繰り返し精度に関する実 験と移動ロボットの誘導制御実験、そして岡山県の実 海域で行われた模擬充電実験を用いて、このシステム の有用性について議論した.

謝辞

本研究では三井 E& S 造船株式会社と広和株式会社 マリンシステム部の協力を得ました.ここに謝意を表 します.

参考文献

- (1) 矢納陽,大西翔太,石山新太郎,見浪護,"水中自動充電 を目指したビジュアルサーボ型水中ロボットの自動嵌合 制御",日本機械学会論文集 Vol.81, No.832, p.15-00391, 2015.
- Myo Myint, Kenta YONEMORI, Akira YANOU, Shintaro ISHIYAMA and Mamoru MINAMI, "Robustness of Visual-Servo against Air Bubble Disturbance of Underwater Vehicle System Using Three-Dimensional Marker and Dual-Eye Cameras", MTS/IEEE OCEANS, Washington, 18.Oct -22.Oct, 2015.
- 3) Myo Myint, Kenta Yonemori, Akira Yanou, Khin Nwe Lwin, Mamoru Minami and Shintaro Ishiyama, "Visualbased Deep Sea Docking Simulation of Underwater Vehicle Using Dual-eyes Cameras with Lighting Adaptation", MTS/IEEE OCEANS ,Shanghai International Convention Center, April 10-13, 2016.
- 米森 健太, Myo Myint, Khin Nwe Lwin, 向田直樹, 菊池 章, 見浪護, 石山新太郎, ,松野隆幸, 矢納 陽, "ビジュアル サーボを搭載した水中ロボットの実海域嵌合制御", 日本 機械学会論文集, No.16-00410 DOI: 10.1299/transjsme.16-00410.
- 5) Myo Myint, Kenta Yonemori, Khin New Lwin, Akira Yanou and Mamoru Minami, "Dual-eyes Vision-based Docking System for Autonomous Underwater Vehicle: An Approach and Experiments", Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017.
- 6) 松野隆幸,西田祐也,米森健太,李想,向田直樹,加藤直輝, Myo MYINT,山田大喜, Nwe Lwin KHIN,見浪護,"複眼 立体認識を用いた水中嵌合実験 (AUV を用いた制御機能 検証)",日本機械学会論文集, Vol.84, No.858, 2018 年 2 月.
- 7) 向田直樹,西田祐也,李想,米森健太,Myo Myint,Khin Nwe Lwin,松野隆幸,見浪護,"複眼立体認識システムを 搭載させた Tuna-Sand 2の嵌合実験",第 35回日本ロボッ ト学会学術講演会 (RSJ 2017), C3C2-05, 2017.9.11-14.