

論文の内容の要旨

論文題目：複数自律型水中ロボットによる局所領域の知的調査行動に関する研究

氏名：柳 善鉄 (YU Son-Cheol)

1. 研究目的

ダムや橋や港などの水中構造物は社会的に重要であるのみならず，その安全は社会性の安全に直結するものとして極めて重要である．しかし，現在，水中構造物の修理や補修作業は主に潜水土や有索遠隔操縦ロボットによってマニュアルで行われており，そのため様々な難点を抱えている．特に水中構造物の安全状態を調べるための定期的な調査任務は，調査対象面積が広大であり，複雑な構造物中の移動は人身事故をおこし易く，有索遠隔操縦ロボットではケーブルが絡まり易いなど多くの問題が生じている．

本研究では自律型水中ロボット(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)を水中構造物の調査任務に導入し，水中構造物の調査任務を自動化することを提案する．移動能力が優れた自律型水中ロボットは複雑な水中構造物中を自由に移動することが可能で，移動範囲が広いことから大型構造物の調査に適している．

2. Hand-in-hand System の導入

水中構造物の調査任務は，特定対象物のある地点まで移動してその対象物を調査する「点到達任務」と対象物の全面を画像などによってくまなくスキャンする「面被覆任務」に大別される．従来の自律型水中ロボットのセンシング方法では水中構造物付近の位置同定が難しく，自律型水中ロボットによる点到達任務遂行は困難である．また，水中構造物は港やダムなど公共施設物が多く，常時稼働させる必要があるので極力短時間で調査を行わなければならないが，従来の自律型水中ロボットのスキャン方法では時間がかかることや対象面をくまなくスキャンすることが難しいなど面被覆任務についても問題がある．

本研究ではこのような自律型水中ロボットによる点到達任務と面被覆任務に関する問題を克服し，水中構造物の調査を自動化できる群ロボットシステムによる Hand-in-hand System を提案する．

まず，Hand-in-hand System では以下のような方法で位置同定と移動を行うことにより，自律型水中ロボットによる点到達任務遂行の問題を克服できる．ロボット A, B が既知の a 点から既知の b 点まで移動する場合，長さが a 点から b 点までの距離と等しい索の両端にロボット A とロボット B を連結する．ロボット A が a 点の保持を行っている間，ロボット B が索の長さ分離れた b 点を探索する．索が張っていれば b 点は a 点を中心にした円上あ

り、b 点の位置は既知なのでロボット B は容易に b 点を発見できる。ロボット B が b 点を発見すれば、ロボット A とロボット B は互いに役割を替わって、ロボット B は b 点の定点保持を行っている間、ロボット A は索の長さ分離れた新たな目標点を向かって移動できる。

しかし、水中で索は障害物に絡んだり、潮流に流されるなど、その長さが保証されない場合がある。この解決策としてスマート索を導入する。スマート索の中には角度が計れる光ファイバーセンサーが内蔵されており、その角度を積分して索の 3 次元の模様を計測している。この索の導入により、索の形状が分かるのでロボットは障害物に引っ掛かってもそれをほどくことが可能であり、索の両端の相対位置、即ち二つのロボットの位置関係が明確になり、前述のような索を利用した移動が容易になる。また、スマート索にロボット間の通信機能をもたせることによって、ロボット間の水中通信の問題とロボット間の位置把握の問題が同時に解決できる。

水中構造物には防食用犠牲陽極のように一定間隔おきに設置されたロボット移動用のランドマークとして用いることができる対象物が多数存在する。このランドマークの設置間隔以上の長さを持つスマート索の両端に複数のロボットを結びこれを利用すれば、片端のロボットが対象物を画像で認識しながら定点保持を行う場合、その定点を原点にするスマート索の半径内の空間ではスマート索による位置特定が可能になる。そして、他端のロボットはスマート索による自己位置特定が可能である。スマート索の長さはランドマーク間の距離より長いので、ロボットはランドマーク等を移動しながら、水中構造物内の全ての対象物の調査を行うことができる。

次に、Hand-in-hand System では、以下のような方法で水中構造物の表面スキャンを行うことにより、自律型水中ロボットによる面被覆達任務遂行の問題を克服できる。スマート索で結ばれた複数のロボットが一行に並び、それぞれ自分の画角の端に Laser の反射点を発射する。それぞれのロボットはその Laser の反射点を Tied Point として、隣り合うロボットの画角を認識して自分の画角が隣り合うロボットと重なるように調節することによって、ロボット全体が一つのパノラマ画像を作るように Formation を作る事が可能になる。

水中では見失った対象物の再発見が極めて難しいが、ロボット群が他のロボットの Laser の反射点を見失っても、スマート索によって全てのロボット群の位置情報が共有されているので Laser の反射点の再発見が容易である。群ロボットによりパノラマ画像が作られると、スキャンする画像の幅がロボットの台数に比例して増加するので、その分表面調査が高速化される。

3. 要素技術の開発

本研究では、Hand-in-hand System に必要な要素技術の研究開発を行った。具体的にはスマート索による水中位置計測技術、照明活用によって画像認識の信頼確度を向上させる方法、パノラマ画像形成のための Laser の反射点を作る方法とその Laser の反射点による

対象物までの距離計測方法の研究開発である。以下、要素技術について説明する。

スマート索による水中位置計測技術開発のために、ロボットに搭載するスマート索を設計製作して水中位置測定のための水中精度測定実験を行ったの結果、索の位置測定精度は長さに対して約 5% で、索の精度は水圧や水温とは関係なく、主に索の形状に依存することが明らかになり、水中ロボットの新たな位置計測センシングとして活用可能という結論を得た。

照明活用により画像認識の信頼性を向上させる方法を考案し、その具体的な例として犠牲陽極の認識実験を行った。犠牲陽極は防食のため殆どの水中施設物や船舶に設置されている重要な定期検査の対象物の一つである。犠牲陽極は高さが僅か 8~15 センチしかなく、また、海洋生物に覆われた場合には、認識が難しい。この犠牲陽極に指向性が強い平行光線を低高度から照らすと犠牲陽極の後ろに四角い大きな影が現れ、通常の照明に比べ、認識が容易になる。本法は、海洋生物の高さは不規則だが犠牲陽極は海洋生物に覆われてもある程度一定の高さになること、水中は光の吸収が激しいのでコントラストが強く影を作りやすいという水中の光学特性を利用することで認識の柔軟性を向上させている。Mega-Float での実海域実験の結果、本法による犠牲陽極の認識実験に成功し、その有効性が証明された。

Laser の反射点によるパノラマ画像形成方法と距離計測方法の開発では、複数のロボットがパノラマ画像を生成するための Formation の運営方法として中央集中的な運営方法を導入し、問題の対処方法としては、ロボット群を最寄の既知点まで復帰させシステムを再起動させる Reset Policy を考案した。Laser の反射点を利用した距離測定方法としては、汎用 Laser の反射点と自律型水中ロボットの内部に搭載されたカメラを利用した CCD 方式の距離測定方法による距離測定システムを採用、水中実験の結果、水中構造物の調査を行うのに妥当な 1~2m の距離で 1cm 以下の距離計測精度を得た。

4. 協調行動の実験

最後に、本論では本研究で提案した Hand-in-hand System の有効性を証明するために、前方にカメラを設置した 2 台の自律型水中ロボットを利用した三種類の協調行動に関する水槽実験を行った。実験は次のようなものである。

- 1) 点到達実験：水槽の壁に六つの既知位置の対象物を設置し、2 台のロボットのうち一台は画像認識による対象物の定点保持を行い、他のロボットは異なる対象物までスマート索による移動を行う Hand-in-hand System による位置同定と移動実験であり、六つの対象物を巡回しながら全ての対象物を調査することに成功した。
- 2) 障害物回避実験：水槽の壁に突出障害物を設置し、スマート索がその障害物に引っ掛かった場合、引っ掛かったスマート索の模様から障害物を探知して回避行動に移る実験である。スマート索が棒に引っ掛かった時、ロボットはその状況を認識して索を解くための移動を行った後、索が引っ掛かった障害物の位置を記憶して、障害物を回避

するための経路計画を立て直した。そしてロボットは索が障害物に引っ掛からない経路へ移動し、目標点まで到達することに成功した。

- 3) 面被覆実験：2台のロボットが Laser の反射点によりパノラマ画像を作りながら一斉に潜航し、水槽の壁をスキャンするという実験を行う。一台のロボットの時に比べ、画角が倍近く広くなったパノラマ画像が利用でき、水槽の壁を高速でスキャンすることに成功した。

上記実験結果に基づき、以下のことが結論される。

本研究で提案する Hand-in-hand System によって水中構造物中の任意の既知点をスマート索の長さを半径とする既知のローカル空間にまで拡張させることが可能になり、水中構造物内の既知空間の拡張が実現できる。それぞれの既知点から索によって生成されたそれぞれ既知のローカル空間がすべて重なる面を持つように索の長さを調節することによって、水中構造物の内部の既知空間が拡張され、ロボットの移動信頼度が向上し、自律型水中ロボットによる点到達任務を実現する。

本研究の Hand-in-hand System に人工的 Tied Point を使用する方法は、ロボットがパノラマ画像の生成に必要な自分のカメラの位置情報を自分の横のロボットに Laser の反射点によって、横のロボットの画像に自分のカメラの位置情報を直接「書き込む」方法を使用し、追加的な Redundancy が必要なく、常に一定条件の特徴点を作ることによって画像認識の計算負担を大幅に削減する上、信頼性を向上させる。そして、複数ロボットによるパノラマ画像を生成し、対象物を高速でスキャンすることによって前述した自律型水中ロボットによる面被覆任務を実現した。

以上のように、本研究で提案する Hand-in-hand System の導入により、水中構造物の調査任務の大半を占めている点到達任務と面被覆任務の自律型水中ロボットによる遂行が可能なり、調査の自動化への道が拓かれたといえよう。