研究速報

自律型海中ロボット“Tri-Dog 1”の設計とミッション

Design of Autonomous Underwater Vehicle “Tri-Dog 1” and Her Mission

近藤逸人*・浦　環*・能勢義昭*
Hayato KONDO, Tamaki URA and Yoshiaki NOSE

1. はじめに

21世紀を目前にした現在，技術開発は環境問題を抜きに考えることはできなくなっており，人間の生活や生命と密接な関わりを持つ海洋や湖沼などの環境調査は，非常に重要な意味を持つといえる．自律的に水中を泳ぎまわりながら調査をおこなえる自律型の海中ロボット（AUV: Autonomous Underwater Vehicle）は実用機としても用いられる段階に入ってきており，環境調査プラットフォームとしても大きな期待を集めている．水流や未知の障害物など予測が難しい環境下で行動するこのようなロボットの開発では，現場での実験に基づく研究開発が更に重要となるため，実用機と同レベルの機能を持つテストベッドの構築が必要とされる．筆者らはこれまでにツインバーガー（Twin-Burger）[1), 2), 3)] を2台開発し成果を上げてきたが，今回，より実用化を指向した後継機としてトライドッグ－1（Tri-Dog 1）（Fig. 1）を完成させ，1999年11月に東京大学生産技術研究所内の実験プールにおいて進水した．本報ではその設計と仕様およびミッションについて述べる．

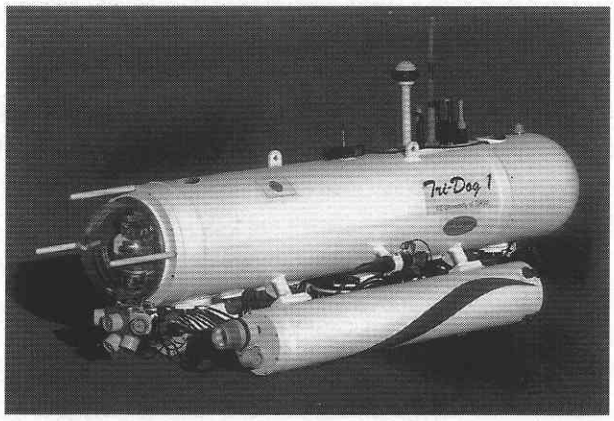

Fig. 1　Tri–Dog 1

*東京大学生産技術研究所　海中工学研究センター

2. Tri-Dog 1の設計と仕様

Tri-Dog 1の設計方針としては，Twin-Burgerの後継機として基本的にはそのコンセプトを受け継ぎながら，さらに実用に向けた実験や検討が可能となるような仕様を加えた．具体的にはドップラ式流速計とRTK-GPS（リアルタイム・キネマティックGPS）を搭載し，ロボットが海中で，より複雑なミッションをおこなうために不可欠の要素であるポジショニングの性能を飛躍的に向上させた．これらの搭載機器は実用機とまったく同等のものである．さらにフィールドでの実験を考慮して最大潜航深度を深くした．

テストベッドとして用いるロボットは，ソフトウェアの開発に合わせて実験が常に容易におこなえるようでなければならない．このことから以下に示す条件に基づいてTri-Dog 1の設計をおこなった．

(1) 人間が数人で扱える程度の大きさであり，実験用の水槽で実験が可能であること．同時に，湖沼や浅海域での試験が可能であること．
(2) 研究開発のために必要な十分な計算能力を備えること．
(3) プログラムの変更や入れ替えが容易におこなえること．
(4) 汎用の入出力ボードを搭載可能とし，改良や交換が容易であること．また，研究者が高レベルのプログラム開発に集中できるように，低レベルのドライバやプログラム等はあらかじめ準備されていること．
(5) 研究者の負担を減らすため，ロボットのプログラムとインタフェース等のプログラムを同じ環境で開発可能なこと．
(6) 自律的な航行を可能とするのに必要なセンサ類を備えること．

以上の条件を考慮して設計したTri-Dog 1の一般配置図を

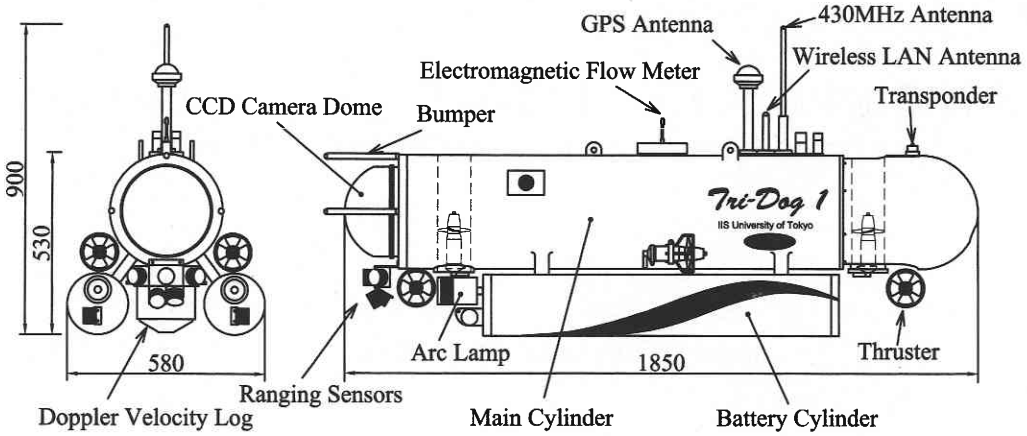

Fig. 2　Tri-Dog 1の一般配置図

Fig. 2に，主要目と搭載機器をTable 1に示す．

2.1　構造系

ロボットは3本の圧力容器からなる．これらは構造部材としての役割も兼ねている．メイン・シリンダにはコンピュータのほか各センサのドライバ回路や記録装置等が収納される．下の2本のバッテリ・シリンダにはNi-Cd電池が合計4群収納される．流速計は中心軸上に，スラスタは中心軸に対して対称となるように配置し，運動の解析や制御が極力容易になるよう配慮した．また，水中での重心を下方にとり浮心－重心距離を長く取るために，比較的重量の大きいバッテリ・シリンダはメイン・シリンダの下に配置している．ロボットの乾燥重量は約170 kgであり，水中ではほぼ中性浮力となるように調整する．

Table 1　主要目と搭載機器

Length over all	1.85m
Breadth over all	0.58m
Depth	0.53m (0.90m includes antennas)
Dry weight	170kg
Operating depth	100m max
Maximum speed	more than 2knots
Duration	more than 2hours
Structures	Aluminum Pressure Hulls (Main Cylinder x1, Battery Cylinder x2)
Actuators	100W Thrusters x6 (Rotation, Amp. feed back)
Processors	Intel Pentium MMX 233MHz x3 (High Level, Low Level, Vision)
Sensors	Attitude and Heading Reference System Doppler Velocity Log Electromagnetic Flow Meter Pressure Sensor (Depth Sensor) Real Time Kinematics GPS Acoustic Ranging Sensor x8 CCD Camera with Pan & Tilt Mechanism
Communications	Transponder Wireless LAN 430MHz Wireless Modem for RTK-GPS
Lights	24W Arc Lamp x2
Batteries	25.2V Ni-Cd Battery 20Ah x4

2.2　推進器系

運動の制御には100 Wのスラスタを6基搭載した．サージ，スウェイ，ヒーブの3方向にそれぞれ2基を配置してヨー，ピッチを加えた5自由度の運動制御が可能である．アクチュエータはDCブラシレスモータであり耐水圧仕様のためにマグネットカップリングによりプロペラが連動する機構としている．また，電源電圧の変動や急激なスラスタへの負荷変動などの外乱に対して回転数や推力を一定に保てるように，回転数とモータに流れる電流値をフィードバックできる回路をロボット内部に設置した．この回路によりコンピュータに余分な負担をかけずに制御がおこなえるとともに，電源電圧の低下などを気にせずに実験をおこなうことができる．

電源は2時間程度の実験を想定し，動力系と電気回路系のバランスを考慮して4群ある電池のうち1つをコンピュータおよびセンサ系用とし，残りの3つをそれぞれスラスタ2基ごとに配分した．ライトの電源はスラスタ用の電池のうち比較的消費の少ない電池から分配した．実験用水槽などではケーブルにより外部電源を供給することで長時間の実験もおこなえる．

2.3　演算装置

ロボットの演算装置は，その用途が研究開発であるために十分な計算能力を有する必要がある．本ロボットでは，各機器との入出力や低レベル制御のためのコンピュータ，自律機能を実現する高レベル制御のためのコンピュータ，CCDカメラの画像情報処理を担当するコンピュータの3台を搭載し，計算負荷を分散してイーサネットにより相互に必要な情報のみをやりとりするようにした．それぞれの

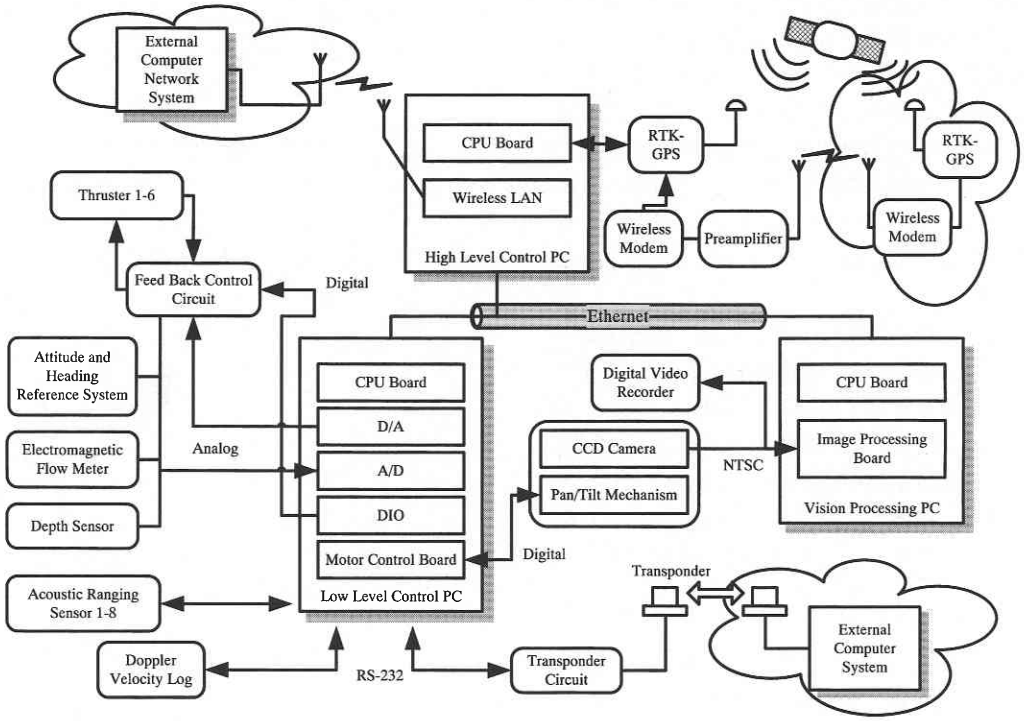

Fig. 3　システムの構成

コンピュータは汎用の入出力ボードを搭載可能とするため，工業用ボードパソコンとバックプレーンによる構成とし，ISA および PCI バスを備えている．各コンピュータと機器の構成を Fig. 3 に示す．

ロボットが浮上している際は，無線 LAN により外部のコンピュータとも通信が可能となるので，実験中にプログラムの変更作業も容易におこなえる．また，ロボットを有線で繋げば，各プログラムがモジュール化しているため，その一部を外部のコンピュータで実行することも可能であり，研究者がリアルタイムに制御系の定数を変更したり，仮想環境シミュレータと連携させた実験等もおこなえる．

2.4　オペレーティング・システム

OS には以下のような理由で WindowsNT 4.0 Workstation を採用した．

(1) 汎用の入出力ボードのドライバ・プログラムが入手しやすい．
(2) 外部インタフェース等をロボットと同じ環境で開発がしやすい．
(3) 3次元グラフィクスを用いた GUI プログラミングの環境として，近年大幅に用いられるようになってきた．

2.5　センサおよび記録装置

ロボットの運動に関するセンサとしては，AHRS（姿勢センサ），ドップラ式流速計，電磁流速計，圧力センサを搭載している．AHRS はロール，ピッチ，ヨーに関する姿勢角度および角速度を計測する．ドップラ式流速計は海底との相対速度や対水速度，海底に対する高度等を計測できる．これまで Twin-Burger などでは流速計により得られる対水速度を積分してポジショニングをおこなっていたが，

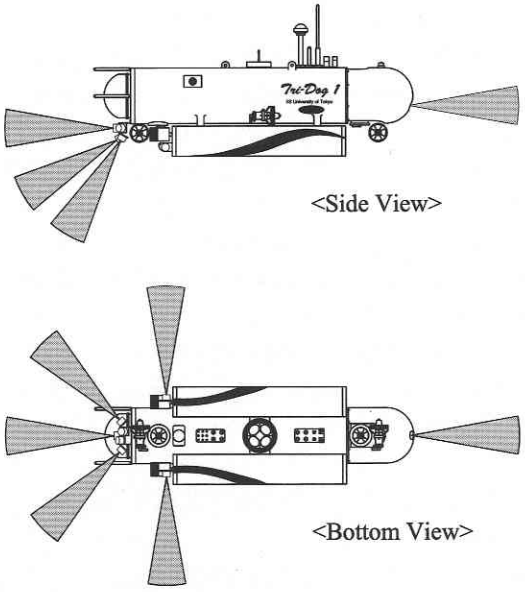

Fig. 4　超音波レンジセンサの配置

この方法では測定誤差が極めて大きかった．本センサにより海中での対地速度を計測できるようになり，ポジショニングの性能が飛躍的に向上した．これは，海中ロボットの開発においては非常に重要なことであり不可欠なものである．ロボットの浮上時にはGPSにより位置情報を取得し，水中でのポジショニング誤差を補正できる．本ロボットのGPSはリアルタイム・キネマティック方式で固定局からの情報を無線モデムにより受信することで約20 cmの位置決め精度を出せる．

外部環境を認識するためのセンサとしては，超音波レンジセンサとパン・チルト方向の動作が可能なCCDカメラを搭載した．レンジセンサは8個設置し（Fig. 4参照），それぞれの方向にある障害物への距離を計測する．CCDカメラによる画像は観測者が海中の状況を見るのにもっとも有効であると同時に，画像処理用のコンピュータにより海中の情報を取得してナビゲーションの一つの手段とする．

3. ミッション

Tri-Dog 1は広い範囲を航行しながら計測等をおこなう航行型のロボットではなく，ある対象に対して，その位置まで航行したらそこに留まりながら作業をおこなえるロボットである．このことは，より詳細な海中環境の観測や複雑な作業を想定可能であることを意味している．しかしながら，自律型の海中ロボットが水中での環境に応じて，完全に自律的な判断のみで高度なミッションをこなすことは非常に難しい．そこで，ロボット自身だけでは判断できないような複雑なミッションを想定する場合には，観測者が何らかの方法によりロボットに対して指示を与えられるシステムとすれば，こうした海中観測プラットフォーム構築への道が開けてくる．このためには高速な超音波通信装置を用いて直接的に水上から指示を与える方法と，あらかじめロボットの行動範囲に情報を提供するものを設置しておく方法が考えられる．後者の一例として水中ランドマーク[4]を利用したミッション例の概念図（Fig. 5）と内容を以下に示す．

(1) 水上でGPSにより自機位置の基準を定めミッションを開始する．
(2) あるランドマークの位置まで航行する．
(3) ランドマークに示された情報を読み取ってそれに応じた行動をとり，必要であれば次の地点へ航行する．
(4) 航行中に予定しているランドマークが発見できないときは，浮上してGPSによりポジションの補正をおこない，再度発見を試みる．
(5) 帰還する．

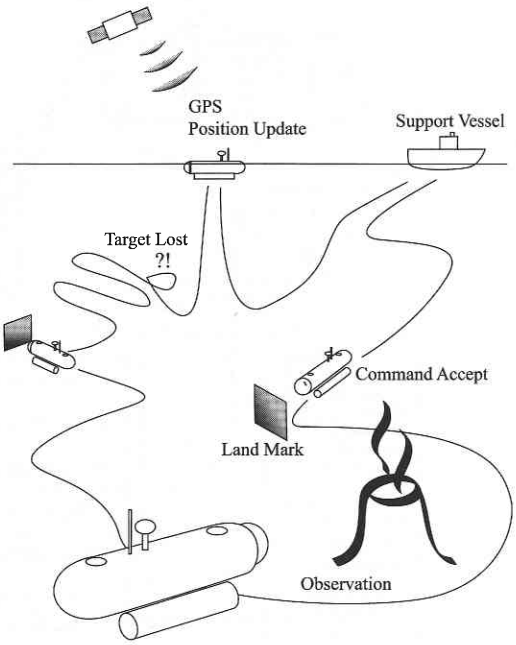

Fig. 5　ミッションの概念図

4. おわりに

本報告では，自律型海中ロボットに関する研究のためのテストベッドとして，実用機とほぼ同等の機能を備えたTri-Dog 1の設計と仕様およびミッションについて述べた．本ロボットを用いることにより，あらかじめすべての行動内容をプログラムして実行するアプローチのみではなく，ロボットが外部環境もしくは観測者とコミュニケーションをとりながら，より高度で知的なミッションを遂行可能としていくために必要となる要件を実験・検証できる．今後は，ロボットを用いた実験に基づきながら，自律もしくは半自律型の海中観測プラットフォームを構築していくことを考えている．

（2000年3月13日受理）

参考文献

1) 藤井輝夫，浦　環："自律型海中ロボットの知的行動の研究—その1：テストベッドの開発とソフトウェア構造—"，生産研究，Vol. 44，No. 9，(1992. 9)，pp. 437-440.
2) 藤井輝夫，浦　環，黒田洋司："自律型海中ロボットの知的行動の研究—その2：テストベット Twin-Burger の建造—"，生産研究，Vol. 45，No. 10，(1993. 10)，pp. 754-757.
3) 藤井輝夫，浦　環，黒田洋司："自律型海中ロボットの知的行動の研究—その3：テストベッド Twin-Burger の動作試験—"，生産研究，Vol. 45，No. 10，(1993. 10)，pp. 758-761.
4) 柳善鉄，浦　環，藤井輝夫："水中ランドマークを利用した水中ロボットの航法"，日本造船学会　第15回海洋工学シンポジウム，(2000. 1)，pp. 317-324.