解説

自律型海中ロボット r2D4 の製作と佐渡沖および黒島海丘海底観測

Development of Autonomous Underwater Vehicle "r2D4" and its Operation off Sado and at Kurosima Knoll

浦

環* *東京大学生産技術研究所海中工学研究センター

Tamaki Ura* *Underwater Technology Research Center, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

1. はじめに

東京大学生産技術研究所では、1984年から自律型海中ロボット (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) [1][2] の研究開発を始め、多様なロボットを建造し、湖水や海域に展開してきた。その成果を踏まえて、2001年度より5年計画で、熱水地帯の広域観測を行う実用ロボットの開発に着手した。これは、1990年から行っている「アールワン計画 [3]」の第二段階で「アールツー計画 [4]」と呼んでいる。2003年7月に進水したロボット r2D4 は表 1 に示すように駿河湾、佐渡島両津港沖、石垣島南方黒島海丘の潜航を順次行い、2004年5月に予定されているマリアナ背弧海盆の熱水地帯の観測の準備を行っている。ロボット名の r は中央海嶺を意味する Ridge System から、D4 は最大潜航深度 4,000 [m] からきている。本稿では、r2D4 の概要とその設計思想、実海域への潜航内容を示し、航行型の自律型海中ロボットの可能性を示す。

2. ロボットの概要

2.1 計画の概要

本プロジェクトの目的は、まず初めに、高度に知能化された信頼性の高いロボットを短期間で研究開発し、次いで、これを熱水地帯の連続広域観測に利用して、熱水地帯で起こっている現象を観測し、新しい海中観測システムを構築することである。

アールワン計画で得た技術、特にソフトウェア技術をそのまま新しいロボット r2D4 に移植し、短い開発期間で高い性能のロボットを実現して、熱水地帯の観測に用いようとしている。図 1 に概形が示されている r2D4 はアールワン・ロボットと同等以上の運動性能、潜航性能、および観測性能を実現しようとしている。表 2 に比較されるように、ロボットシステムの全体構成には大きな変更を加えずソフトウェアの開発を容易にしている。

2.2 r2D4 の概要と基本的なミッション

r2D4 は、アールワン・ロボットと同じく、緯度経度深度で与えられた航路点 (Way Point) を逐次通過し、サイドスキャンソナーやインターフェロメトリソナー [5] などを用いて海底面や海底近傍の広域観測を行う。その途中で特異な観測値を得たときには、航路計画を変更して、その地点近傍のより詳細な観測を得る構成とする。

ロボットの主な特徴は、以下に示される。

- ・小型軽量 (全長 4 [m], 空中重量 1.5 トン): 支援船を特定しない
- ・自己完結型: トランスポンダ設置などの支援が不必要
- ・高精度位置標定が可能 (INS とドップラーソナー)
- ・観測経路のダイナミックな変更
- ・高度の信頼性と十分な安全対策

r2D4 は、潜航直前に航路点および航路点間の行動様式が書かれた潜航計画表を受け取る。海面上に降ろされた r2D4 は、潜航開始の指示を無線で受けるとこの計画表に従って潜航する。障害物を回避する行動や自身の状態をモニターして行動計画を変更することに関して、r2D4 はオペレータの指示を仰ぐことはせず、自ら決定する。したがって、支援船上の我々は、r2D4 に取り付けられた音響発信器 (トランスポンダ) からくる信号により r2D4 の位置を知って、帰ってくることをただ待つことになる。

2.3 システム構成

(1) 構造

主要構造は、いわゆる内骨方式を採用しており、艇体下部中心に強度メンバーとしてチタン合金製の中心フレームが貫通し、3本の耐圧容器および種々の装置類が取り付けられる。フレーム上にある電子機器のための耐圧容器は、縦強度を補強する (図 2~4)。これらをシタックチックフォーム製のブロックで取り囲み、必要な浮力をまかない、高密度ポリエチレン製のフェアリングで包み込むことにより流体抵抗を軽減する外形を形成する。

運動制御は、後尾に水平首振り装置付き主スラスト、艇体の前後に取り付けられた二つの垂直スラスト、水平尾翼のエレベータにより行う。この形式は、アールワン・ロボットのものを踏襲しているので、行動制御アルゴリズムの構

原稿受付 2004 年 5 月 24 日

キーワード: Underwater Robot, AUV, r2D4, Sado, Kurosima Knoll

〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1

*Meguro-ku, Tokyo

表 1 r2D4 の潜航一覧表

潜航 番号	年	月	日	潜航場所	潜航開始 (時刻は現地時間)			浮上 時刻	潜水 時間	総潜水 時間	最大潜航 深度	目的	備考
					緯度	経度	時刻						
					度:分:秒	時:分	時:分	時:分	時:分	時:分	m		
1	2003	7	7	駿河湾奥	35:04:11N	138:49:15E	10:26	11:01	0:35	0:35	188	全体調整	
2	2003	7	7	駿河湾奥	35:04:13N	138:49:19E	11:13	12:24	1:11	1:46	413	大陸棚斜面観測	11:57コネクタ漏水
3	2003	7	15	佐渡両津湾	38:05:54N	138:28:34E	12:10	14:06	1:56	3:42	266	中央部	高度30m・完遂
4	2003	7	18	佐渡両津湾	38:06:35N	138:28:38E	11:59	16:43	4:44	8:26	502	断層に沿った観測	高度30m・完遂
5	2003	7	19	佐渡両津湾	38:06:15N	138:28:00E	10:37	14:36	3:59	12:25	388	断層に沿った観測	高度15m・完遂
6	2003	12	15	相模海丘	35:09:09N	139:24:01E	11:59	12:56	0:57	13:22	426	INS・音響装置調整	
7	2003	12	15	相模海丘	35:09:02N	139:24:07E	13:12	13:19	0:07	13:29	69	Gain調整	
8	2003	12	18	黒島海丘	24:07:27N	124:09:51E	13:15	16:16	3:01	16:30	626	冷水湧水観測	626m定深度・完遂
9	2003	12	20	黒島海丘	24:06:50N	124:09:39E	8:36	9:50	1:14	17:44	631	冷水湧水観測	INSバグで浮上
10	2003	12	21	黒島海丘	24:06:33N	124:09:59E	9:34	10:03	0:29	18:13	629	冷水湧水観測	海底に接近して浮上
11	2003	12	21	黒島海丘	24:07:22N	124:09:52E	11:32	14:22	2:50	21:03	663	冷水湧水観測	高度20m・完遂

図 1 r2D4 の一般配置図

表 2 r2D4 とアールワンロボットの緒元の比較

	r2D4	R-One Robot
全長(m)	4.4	8.27
空中重量(kg)	1.63	4.74
本体	1.51	4.55
ペイロード	0.12	0.19
最大潜航深度(m)	4,000	400
航続距離(km)	60	100
エネルギー源	Li Ion 二次電池	CCDE
エネルギー容量(kWh)	15	60
巡航速度(kn)	3	3
主コンピュータ	Power PC 233MHz	MC68040*2
OS	VxWorks	VxWorks
航法装置	INS(FOG)+DVL	INS(RLG)+DVL

図 2 艇体構造、電子部品容器と背骨

造が同じものが使え、海で使えるレベルのソフトウェアの開発が短期間で終了する。

(2) エネルギー

37.5 [V], 100 [Ah] の容量を持つリチウムイオン二次電池

4 ユニートを直列接続して DC150 [V] を作り、耐圧容器の中に入れてエネルギー源としている。

図3 圧力容器の周囲に取り付けられた浮力材

図4 フェアリングに覆われて完成した r2D4

(3) 航行機器

AUV は、外部から位置を教えられことなく精度の高い位置標定を行う必要がある。光ファイバジャイロを基本とした慣性航法装置を採用し、これに高度 200 [m] まで対地速度が計れるドップラーソナーからの速度を入力して、速度補正を行うシステムを採用している。浮上時には GPS で位置補正ができる。支援船から SSBL (Super Short Base-Line: 超短基線方式) 音響位置測定装置により AUV 位置を計測し、その情報を音響通信装置にて送り、INS の位置補正を行うことも可能である。

浮上時には、低軌道を周回する通信衛星を利用して浮上位置を支援船に連絡する装置を備え、回収を確実にしている。

これら航行機器類および運動制御装置類は、PowerPC 233 [MHz] の艇体制御用コンピュータ (M-CPU と呼ぶ) にて制御される。また、後に述べる各ペイロードセンサは専用のコンピュータ (P-CPU と呼ぶ) により管理され、P-CPU はセンサ情報を M-CPU に送り、航行管理に役立てる。

(4) 観測装置

r2D4 は観測活動を行うことにより存在意義を発揮する。

図5 佐渡両津港沖の潜航計画

したがって、ロボットの運動機能を最大限に利用できるセンサを選別しなければならない。熱水地帯を観測することから、以下の装置を同時に搭載できるように設計されている。

- ・サイドスキャンソナー
- ・インターフェロメトリソナー
- ・CTDO 計
- ・酸化還元電位計
- ・磁場計
- ・現場型化学成分分析計
- ・pH 計
- ・濁度計

3. 佐渡島両津湾沖の断層に沿った潜航

駿河湾における予備的な潜航調査の後に、東京大学所属の淡青丸を支援船として、図 5 に示すように、佐渡島両津湾沖の断層線に沿った観測を行った。本潜航は、ドップラーソナーが対地速度を計測できる 200 [m] より浅い海域から潜航を開始し、断層線に沿って往復し、ほぼ同一地点に戻ってくる航路を設定した。

潜航終了後に GPS を使って INS の累積誤差を確認したところ、約 4 時間の潜航で約 30 [m] であった。3 回の潜航で得られたサイドスキャンソナーデータ [6] を海底面の三次元形状に貼り付けたものを図 6 に示す。音響の反射が強いところが黒い色で表されている。

4. 黒島潜航

4.1 黒島の概要

図 7 に示す黒島海丘は、沖縄県石垣島の南方約 25 [km] にあり、その頂部は約 620 [m] の深度である。海底下にはメタンハイドレートが存在し、メタンガス噴出口からメタ

図6 潜航により得られたサイドスキャンソナーによる海底の音響画像（浅田研究室提供）. 3回の潜航データが合成されている

図7 琉球列島の南の縁にある黒島海丘

ンや冷水が湧出していることが知られている[6]. 東シナ海では冬季には強い季節風が吹き、波が高いのでr2D4を潜水させることは容易でないが、黒島海丘海域では石垣島や西表島の島影になるので、波は緩和され潜航するチャンスがある。海洋科学技術センターの「よこすか」を支援船として2003年12月にr2D4をここに展開した。

有人潜水船やケーブル付き遠隔操縦機（ROV: Remotely Operated Vehicle）が黒島海丘に潜って調査をしているが[7], 航路線上の線的な情報しか得られない。AUVを単独で運転するばかりでなく、有人潜水艇やROVを展開する場合に事前にAUVを展開して面的なデータを得て、これを参考にして航路計画を行えば、より効果的な運用ができると期待される

4.2 潜航方法

r2D4の内部状態は、音響通信装置を使ってモニターすることができる。しかし、それは、支援船上の我々が安心するためにのみ使い、海況が急に悪くなるなどの緊急の場合や、慣性航法装置に誤差がたまってきて位置誤差を補正する必要性が生じた場合など以外に、支援船から何かを命令することはない。

図8にr2D4の航跡の平面図、図9に第11潜航の鉛直プロフィールを示す。佐渡沖での潜航と異なり、深度0[m]～

図8 黒島における4回の潜航の平面図. 測深データは海洋科学技術センターのYK03-05 Leg1（主席研究者布浦拓郎）による

図9 第11潜航の鉛直プロフィール

約400[m]の間は対地速度が計測できないので、対水速度でINSの補正を行っている。そのために、約300[m]程度の水平距離の誤差が降下していくときに蓄積されている。

4.3 4回の潜航の概要

#8潜航では、626[m]を深度の限度として潜航させ、部分的には30[m]の一定高度で進んでいる。海底に近づくと、最初に門の字の形に旋回し、支援船からのSSBLの観察によりINSに蓄積された誤差を評価している

#9潜航では、INSのバグによりINSから異常な値の出力があり、r2D4はそれをINSの故障と認識して途中で潜航の継続を断念し、非常用バラストを含むすべてのバラストを投棄して浮上している。この原因は、浮上後にデータを調べて突き止められ、今後の潜航に問題がないことを確認した。

#10潜航では、15[m]という高度で海底に接近しようとした。しかし、崖の近くで90度曲がろうとしたときに、海

底面に 9[m] まで接近し、これ以上潜航を続けるのは危険であり、航路計画が不十分であると r2D4 が判断し、上下スラストを駆動して、浮上した。

浮上後、無線で潜航データを支援船のコンピュータに送り、r2D4 がどのような判断で浮上してきたかを突き止め、即座に航路計画を変更して、再度 r2D4 を潜航させている。

#11 潜航では、20[m] の高度および、緯度で約 3 秒（約 100[m] に対応する）の間隔で航路を計画している。浮上中には、磁力計の補正のために 360 度ターンをしている。

5. お わ り に

自律型海中ロボットの研究開発が発展していくためには、実機を製作して、それを海に展開し、これまでの観測方法ではできなかった観測を成し遂げていかなければならない。そのためには多くの人たちの協力が必要である。すなわち、幅広い共同研究の企画があつてこそ前進するものと考え。本プロジェクトには、開発資金を提供し研究の核を形成している文部科学省科学研究助成学術創成研究「深海知能ロボットの研究」チームばかりでなく、三井造船（株）、海洋科学技術センター（現 海洋研究開発機構）、（株）オキシーテック、（有）システム技研、海洋電子（株）ほか多くの組織や研究者との共同研究およびご協力により展開されている。ここで改めて関係各位に深く感謝するものである。

参 考 文 献

- [1] 浦・高川編著：海中ロボット，成山堂書店，1997.
- [2] T. Ura: "Development of autonomous underwater vehicles in Japan," Advanced Robotics, vol.6, no.1, pp.3-15, 2002.
- [3] 浦ほか：“航行型海中ロボット「アールワン・ロボット」による手石海丘観測”，海洋調査技術，vol.13, no.1, pp.11-25, 2001.
- [4] 浦：“新しい自律型海中ロボットで熱水地帯をくまなく探る—ここに至るまでの成果と音響工学的な課題—”，海洋音響学会誌，vol.29, no.4, pp.225-232, 2002.
- [5] 浅田ほか：“Expanded Interferometry and Synthetic Aperture Applied to a Side Scanning Sonar for Seafloor Bathymetry Mapping,” Proc. UT'2004, Taipei, Taiwan, pp.47-50, 2004.
- [6] 浦ほか：“自律型海中ロボット「r2D4」による佐渡島沖断層の観測”，第 15 回海洋調査技術学会研究成果発表会講演要旨集，pp.48-51, 2003.
- [7] 町山ほか：“「しんかい 2000」黒島海丘潜航調査（NT02-07&08 地質系潜航調査）と海底長期計測の概要”，JAMSTEC 深海研究，no.22, pp.199-210, 2003.

浦 環 (Tamaki Ura)

1948 年 5 月 29 日生。1977 年東京大学工学系大学院船舶工学専攻修了，工学博士。同年東京大学生産技術研究所講師。1978 年同助教授。1992 年同教授。1999 年同付属海中工学研究センター長。自律型海中ロボットおよび海事の安全に関する研究に従事。1979 年，1994 年，1997 年日本造船学会賞，1982 年報公賞，1999 年日本機械学会技術賞，2000 年住田海事奨励賞，受賞。日本造船学会，日本航海学会，海洋調査技術学会評議員。（日本ロボット学会正会員）