

海から迅速な展開が可能な陸海域自律調査システムの開発に関する研究

報 告 書

平成26年3月31日

東京海洋大学海洋工学部
一般社団法人日本海事検定協会
(検査第一サービスセンター)

目 次

1. 研究目的および概要	2
2. 平成 25 年度計画	4
3. 本年度の実施内容および成果	5
3.1 マルチコプタ開発	5
3.1.1 設計	5
3.1.2 モータ、プロペラおよびバッテリー選定のための特性試験	6
3.2 電波通信システム開発	8
3.2.1 通信方式の検討	8
3.2.2 マルチホップネットワークの通信ノードの開発	9
3.2.3 通信ノードの構成	10
3.2.4 通信ノードのプロトタイプシステム開発	11
3.3 自律小型船開発	13
3.4 発表論文等	15

1. 研究目的および概要

震災や事故などで起きる異変を迅速に調査し、状況を正確に把握することは対応策を講じるための初期段階に非常に重要である。我が国がこれまでに経験した大震災では、交通網が寸断されて当該区域に近づくことが困難になったり、陸のインフラストラクチャが破壊されることにより電気の供給ができなくなるなどの問題が具体的に浮かび上がった。

海や河川に面する陸域や島嶼地域では、海域からの迅速なアクセスが可能であり、震災などの非常時にはこれを有効に活用することが可能と考えられている。船舶の発電機から陸へ給電する試みなども始まっている。本研究は、陸域や沿岸域、あるいは接近が危険な活動中の海底火山海域や石油流出の起きた海域などを想定し、ここに海上の船舶を起点として迅速に展開する無人自律型の調査システムを開発するものである。

本研究で開発する調査システムは、空へ展開するマルチコプタ編隊、海上へ展開する自律小型船、海中へ展開する自律型水中ロボットにより構成する。マルチコプタとは4枚、6枚など複数のロータを持って安定した飛行が行える飛行体であり、無人空撮プラットフォームとして知られるようになっている。この役割は調査域を迅速に撮影してリアルタイムにこれを船舶へ無線通信により伝送するとともに、複数台のマルチコプタを空へ展開して、長距離のアドホック通信網を確保するために用いる。自律小型船は、海上にある船舶では接近困難な海域や沿岸の浅海域へ展開して、海上から画像撮影を行ったり、環境センサなどにより空中や水中のモニタリングを行ったり、ソナーを使って海底の概要を調査したりする。海上の船舶から陸へ給電するケーブルを導くためのヒービングラインを陸まで届け渡す役割も想定する。自律型水中ロボットは、水中や海底の様子をソナーやカメラを使って詳細に把握する役割を果たす。

本研究で提案するシステムは、海上の船舶を基点に展開することを想定している点が特徴であり、船舶から手の届かないところ（浅い沿岸域や危険域）に、自律観測システムを展開するものである。システムの構成要素それぞれは自律的な自動制御機能を持つとともに、これにより構成される調査システムはネットワークとして、船舶側から統括制御する。すなわち、空中、海上、水中に展開するシステムは、それぞれ個別に調査行動を指示することができ、船舶からその個体までは、空中と水中のネットワークで通信が確保されるように自動的に配置が再構成される。開発するシステムの概念図を図1に示す。

具体的には、本学の保有する練習船をモデルケースとして、この調査システムの基本形を構築する。このシステム開発にあたっては、これまでに培ってきた小型船や自律型水中ロボットに関する技術および資産を有効に活用しながら、3年間で開発するテストシステムを使った海域試験により自律調査システムの基礎技術確立を目指す。

本提案の調査システムが開発されれば、災害時の対応や危険地域の調査のみならず、国民の生活に不可欠な物資を輸送する商船の安全運航を確保するための、有効かつ安価なツールとしても活用できる。すなわち、霧の立ちこめたような視界が悪い海域や、夜航海にあつて、進路の前方上空にマルチコプタを飛行させ、赤外線カメラにより監視を行うと、目視では発見できないものまで、はっきりと確認できるようになる。大型のコンテナ船、タンカー、LNG船などでは、進路前方の広い範囲に死角が生じるが、これをマルチコプタのカメラで補うことも可

能である。視点を変えて、監視の対象を船舶に移すと、マルチコプタにより大型船の積荷の状態や、船体外板から艀装の状態までを迅速に撮影したり、センサを搭載して船舶の煙突から排出されるガスをモニタリングすることも可能となり、船舶の検査にも活用が考えられる。外航船の場合には、海賊船が自船に接近する前に対策を講じるための監視システムとしての役割も想定され、物資輸送の安全確保に貢献できる。

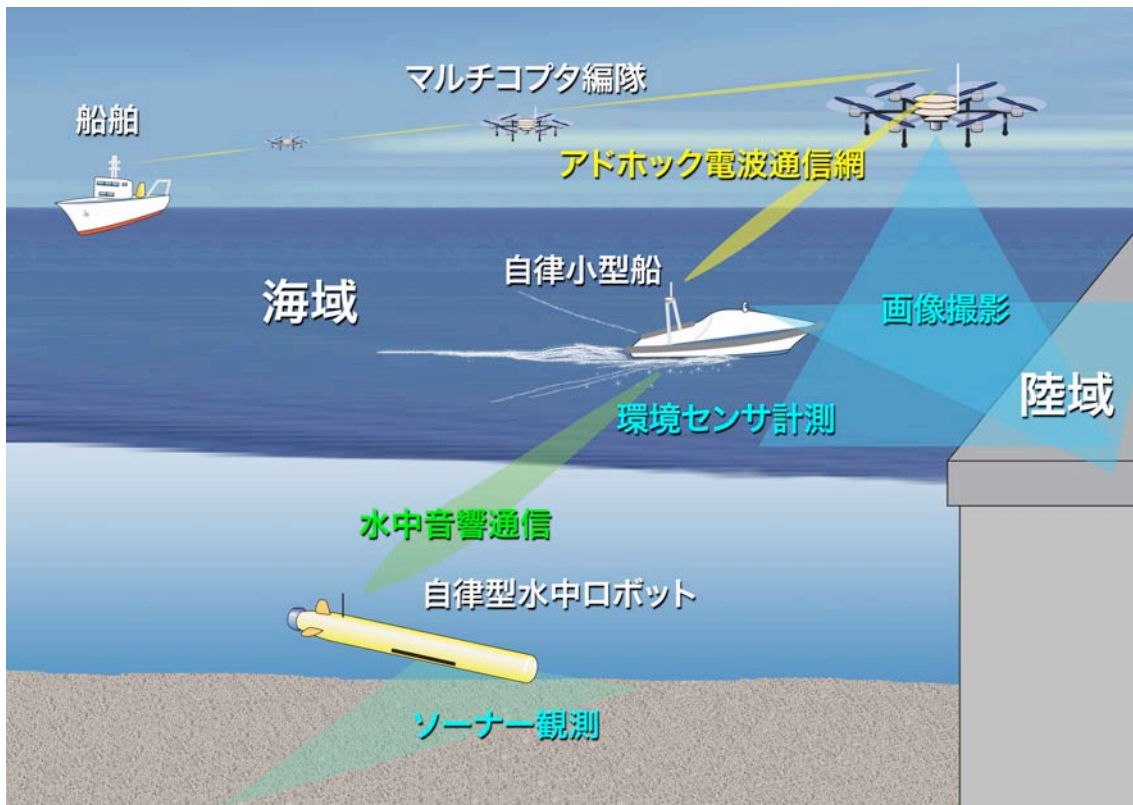


図1 開発するシステムの概念図

2. 平成 25 年度計画

マルチコプタの設計、製作、および船舶・マルチコプタ・自律小型船を結ぶ電波通信システムの構築を行う。マルチコプタには自律飛行のためのソフトウェアを開発して実装し、単体の飛行試験および編隊飛行試験を行う。さらに搭載する電波通信システムにより、機体間の相互通信およびマルチホップ通信を確立して、隊形指示や位置の入れ替え等の遠隔指示を可能とすることを旨とする。自律小型船については、大学側の予算にて開発を進める予定である。予定するタイムラインを表 1 に示す。

表 1 平成 25 年度の実施計画

	H25			
マルチコプタ開発	ハードウェア設計			
		ハードウェア製作		
		ソフトウェア設計		
			ソフトウェア実装	
			自律飛行試験(個体・編隊)	
電波通信システム開発	移動ノードによる通信ネットワークシミュレーションとソフトウェア設計			
		ハードウェア実装		
			ソフトウェア実装	
			空中マルチホップ通信試験	
自律小型船開発 (本研究関連分)			通信システム実装	
			マルチホップ通信試験	
自律型水中ロボット開発			概要設計	

3. 本年度の実施内容および成果

3.1 マルチコプタ開発

3.1.1 設計

マルチコプタの機体検討では、以下の要件を設定した。

- ・ ペイロードはカラーカメラとする。
- ・ カメラ撮影のための動揺補正機構を有する。
- ・ 自律飛行を可能とするコンピュータを搭載する。
- ・ オペレーションの利便性と安全性確保のために、ラジコンによるマニュアル操縦にも飛行中に切り替えられるようにする。
- ・ 陸上または船上のベースステーションからの通信が途絶えても、自律飛行を継続できるようにする。
- ・ 自動帰還機能を持つ。
- ・ 船舶からの展開と万一の落水を考慮する。
- ・ 飛行時間を可能な限り長くとる。
- ・ 人間が1, 2人で扱える程度の大きさ、重量とする。
- ・ 人体や船舶等の構造物に触れた場合の安全性確保を考慮する。
- ・ 複数機体を構築する際、同等のペイロード、通信装置、コンピュータ等を搭載して、機能を相互に代替できるようにする。

上述の要件を考慮して、以下の仕様決定および機種選定を行った。

(1) ペイロード

カラーカメラ

Allied Vision Technology 社 Prosilica GT3300C (本試験用)、F マウントレンズを搭載可能な高解像度カメラ。マルチコプタの自律飛行の信頼性が確保されるまではGoProにて代用。

GoPro 社 HERO3+ (調整実験用)

赤外線カメラ

FLIR 社 Tau2 640 (1機体のみ)

(2) 動揺補正機構

2軸カメラジンバル

DJI 社 ZENMUSE GoPro 用 (調整実験用)

(3) 自律飛行コンピュータ

オートパイロット

3D Robotics 社 APM2.6、ラジコン受信機からの入力とテレメトリ通信装置からの指示を飛行中に切り替え可能。この機能を利用して、搭載する自律飛行制御コンピュータからも指示を可能とすることにより編隊自律飛行を実現する予定。通信途絶等非常時には、このオートパイロットの自動帰還機能を使用する。GPSの受信を前提とす

るシステムのため、自動操縦が不能となった場合には、ラジコンに切り替える。

自律飛行

東京エレクトロン株式会社 TB-7Z-020-EMC、後述する通信および画像処理機能を兼用する。

(4) 通信装置

3.2 電波通信システムに記述

(5) 機体、モータ、プロペラおよびバッテリー

(1) から (4) までの搭載機器の重量を約 2kg と算出し、さらに機体およびモータ、プロペラ、バッテリーの自重量を合計した重量を十分に飛行させられることがモータ、プロペラおよびバッテリーの選定条件となる。現状入手可能なバッテリーとして、軽量かつ容量の大きい条件にてリチウムポリマバッテリーを選定する。詳細には、搭載機器の消費電力と必要推力を得るための消費電力を総合的に検討し、飛行可能時間をできる限り長くする構成を選択することになる。選択肢は最適として絞り込まれるというよりは、強風に強くきびきび動く傾向をさらに要求するか、飛行効率を優先して比較的ゆったりとした傾向を選択するかを設計にて決定することになる。本研究では、前者のモデルとして 8 枚翼機を、後者のモデルとして 4 枚翼機を構築することに決定した。

(6) 機体の安全性

マルチコプタはいわゆるヘリコプタよりは回転するロータが小径であり、より安全とは言える面はあるが、一方で小型のロータが高速回転をするため、本研究で設計するペイロード 2kg 規模の機体となると、万が一人体に接触した場合には重度の切り傷を負わせる危険性がある。このため、4 枚翼機では機体全体にガードを設けて安全性を確保する構造とする。これにより船体などの構造物に接触しても直ぐに墜落することも防ぐことができ、フレームに浮力材を配置して、万一の墜落、着水でも沈没しない構造とすることができる。

3.1.2 モータ、プロペラおよびバッテリー選定のための特性試験 [文献 1 より図引用]

8 枚翼機のモータ、プロペラおよびバッテリーの選定のために図 2 に示す試験システムを構築して特性試験を行った。

モータには OS モータ社 OMA-5025-375、スピードコントローラに同社 ESC、OCA-170HV、プロペラには APC 社 (12*6E、12*8E、13*6.5E、13*8E、12*4.5MR) (プロペラ径インチ*プロペラピッチ) を選定して、ラジコンプロポ (操縦装置) により回転数指示を変更しながら、推力、回転数、電力をそれぞれ推力計、非接触回転計、電力計により計測した。同様の試験を、リチウムイオンポリマ電池のセル数について検討するため、6 セル(22.2V)、7 セル(25.9V)、8 セル(29.6V)と設定してそれぞれ試験を行った。セル数 8 に相当する電圧 29.6V を電源電圧とした場合の試験結果を例として図 3、図 4 に示す。回転数に対する推力特性はプロペラの性能によるものであるが、ピッチの大きなプロペラは、より大きなモータのトルクが必要であるため、消費電力が大きくなることが確認できる。

8 枚翼機には、これらの試験結果より 12*6E (12 インチ、ピッチ 6) のプロペラを選定し、リチウムポリマバッテリーは 8 セルを選定した。

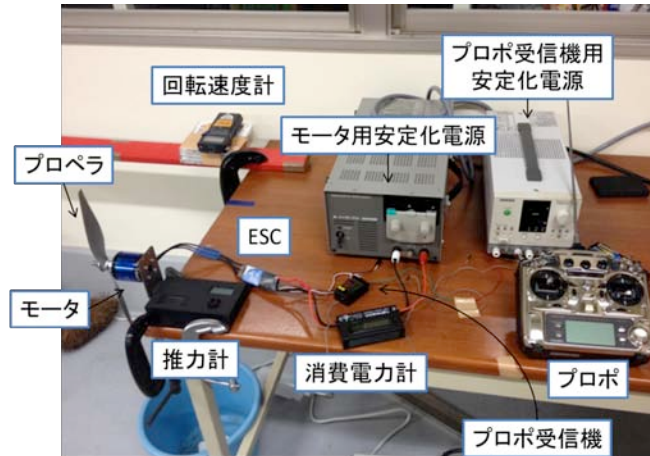


図2 モーター・プロペラ推力試験

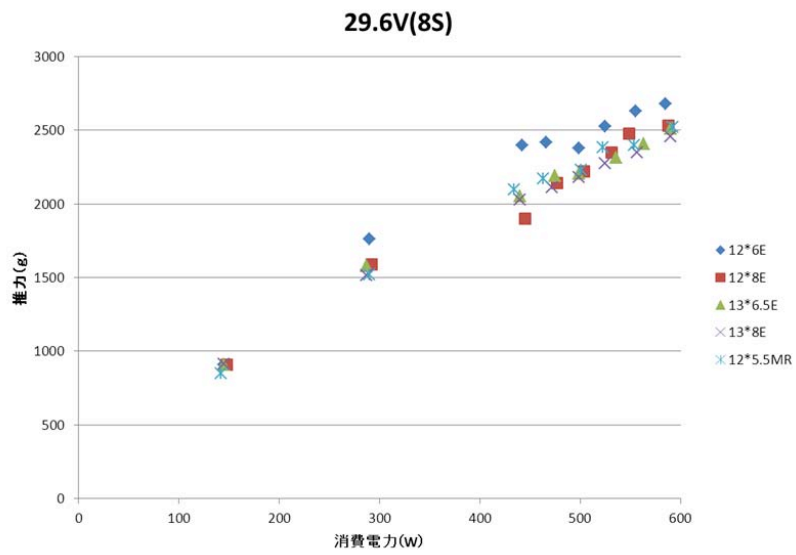


図3 消費電力 - 推力の関係

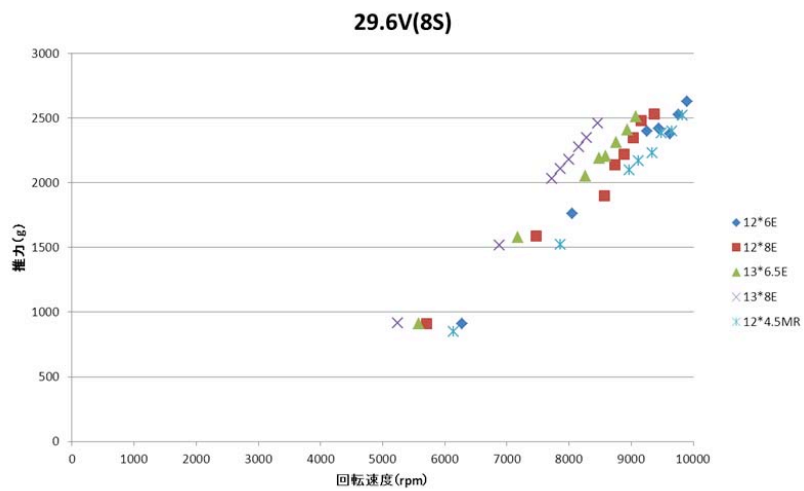


図4 回転数 - 推力の関係

この試験により得られた結果を元に、このモータ、プロペラの組み合わせで飛行させられる推力範囲内にて、バッテリーの個数の違いにより飛行可能時間がどのように変化するかを検討した。この結果を図5に示す。この場合には5個を搭載するのが飛行可能時間を最大とできることがわかる。それ以上に搭載するとバッテリーの容量増加よりも重量増加の影響が大きくなり飛行時間が低下することが確認できる。本設計では、さらに8枚翼機の物理的な配置上の制約を考慮して、8セルバッテリーを4個搭載することに相当する4セルバッテリーを8本、2直列4並列で接続する構成として8枚翼の構造部材に1個ずつを配置して姿勢のバランスを取ることとした。

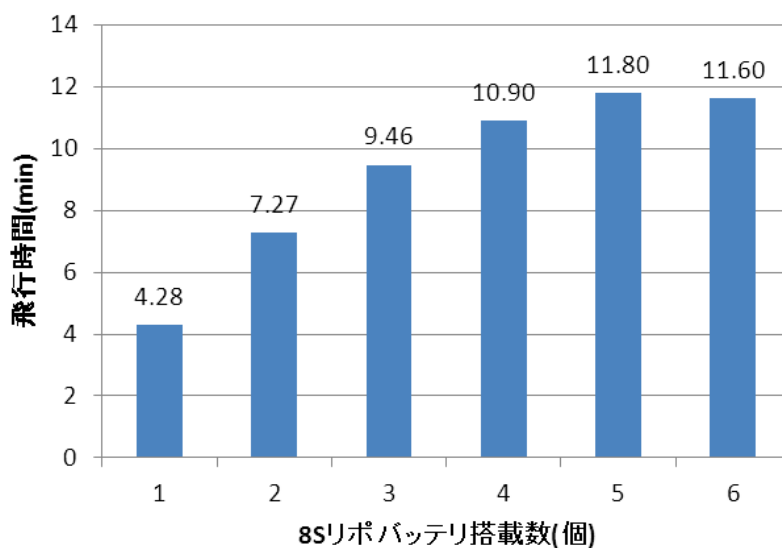


図5 バッテリー搭載個数と飛行可能時間の関係

3.2 電波通信システム開発

3.2.1 通信方式の検討 [文献1より図引用]

本研究では、基地局となる船舶、複数のマルチコプタ、自律小型船などが無線電波通信を行うことを想定する。移動体同士による通信を想定するため、通信状態がいつも良好な状態を保つことができるとは限らず、データ伝送中に接続が途絶することも起きることを考慮しなければならない。このため、本研究は中継するノードが単純にデータをリレーするだけの構成とはせず、中継ノードにもデータを保存するようにしながら、通信が途絶した場合には通信が回復されるまで物理的に移動を行い、接続が確立された時点で蓄積したデータを次のノードに転送する仕組みを検討した。この方式は、一般的には蓄積運搬転送方式と呼ばれる。本研究では、現在のマルチコプタのバッテリー持続時間はまだ短時間に限定されていることを考慮して、全てのマルチコプタがリング状に移動しながら、飛行可能時間内に船舶まで帰還するようにし、先端のノードによる撮影画像を船舶に伝送したり、ノードの移動を船舶から指示したりできるようにするシステムを構想している。今年度は、このための基礎研究として、図6に示すように、

固定した基地局と固定した先端の観測ノード、そしてその間を移動する中継ノードで構成する通信システムを構築し、複数マルチコプタに適用することを想定した蓄積運搬転送方式を検討した。ノードとノード間のデータ伝送にはパケット通信方式を採用し、いろいろな場面で想定されるデータパケットの欠落や不達に対応するアルゴリズムを提案し、その効果をモックアップシステムによって実験的に確認した。図7に実験用のシステムを示す。

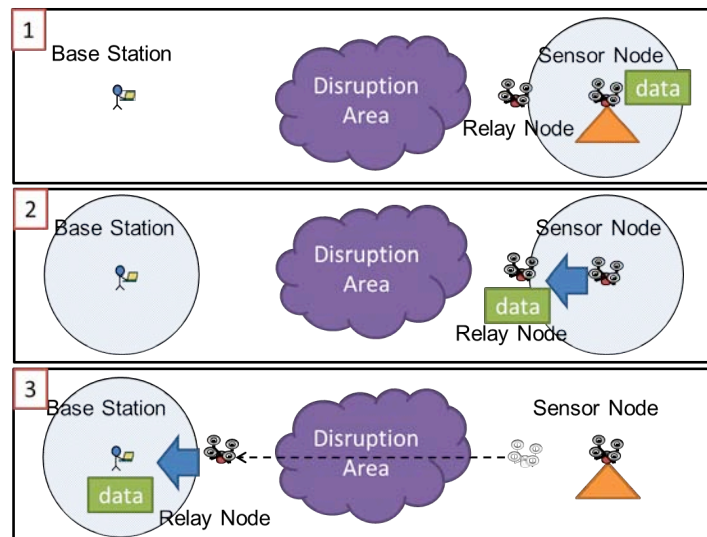


図6 蓄積運搬転送

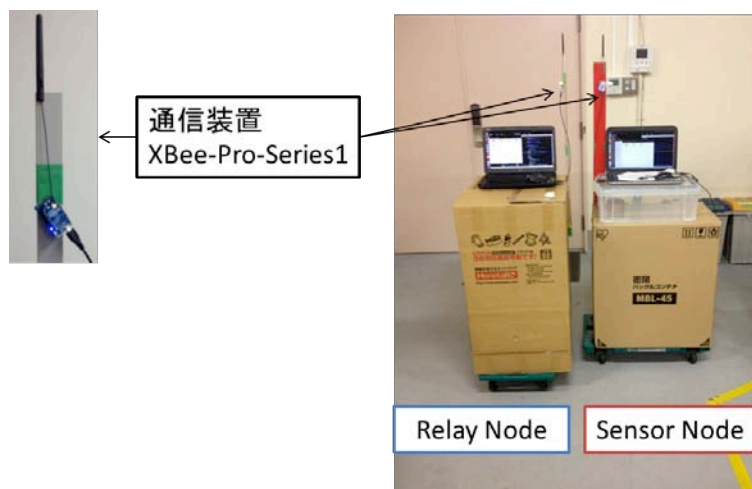


図7 実験用モックアップ通信システム

3.2.2 マルチホップネットワークの通信ノードの開発

本研究では無線 LAN (IEEE802.11bgn)と複数のマルチコプタを用いたマルチホップネットワークを海上に展開することで、高速無線通信を1マイル程度の範囲内で可能とする。

現在複数のマルチコプタを用いたマルチホップネットワークの実証実験を行うために、マルチコプタに搭載する通信ノードの開発を行っている。

3.2.3 通信ノードの構成

マルチコプタに搭載する都合上、通信ノードとなるシステムは小型の組み込みシステムである必要がある。一方で、研究プロジェクトで想定されている高解像度カメラや赤外線カメラから得られる多量の情報を扱うため、高速な信号処理機能を備える必要がある。本研究では FPGA (Field Programmable Gate Array)¹を搭載した回路基板を基礎として開発を行うこととした。図 8 に調達した回路基板を示す。



図 8 通信ノード用回路基板(TB-7Z-020-EMC)

本回路基板の特徴は ARM CortexA9 マイクロプロセッサと FPGA が混載された Zynq 7Z020 デバイスが搭載されていることである。CortexA9 は携帯電話やタブレット端末等の一般的な組み込み電子機器に搭載されており、Linux が動作することから、ソフトウェアも豊富であり、今回の用途に限ってはネットワークのプロトコルスタックの開発に有利である。Zynq デバイス上に集積された FPGA はボード上の拡張端子(FMC 端子)へ接続しており、この拡張端子に搭載可能なインターフェースメザニンカードも豊富である。今回はここに拡張ピンヘッダカード(TB-FMCL-PH)を装備して、そのピンヘッダを介して無線 LAN モジュールを接続する。無線 LAN モジュールは小型であることが好ましく、今回は XBeeWiFi を 2 つ用いることとした。無線 LAN はマルチホップ機能を備えていないため、受信用と送信用で 2 つ用意する必要がある。

¹ FPGA とは内部の回路構成を自在に書き換えることが可能な集積回路である。専用の回路を内部に構築することで、ソフトウェアに比して 10~1000 倍高速かつ省電力での計算処理が可能である。

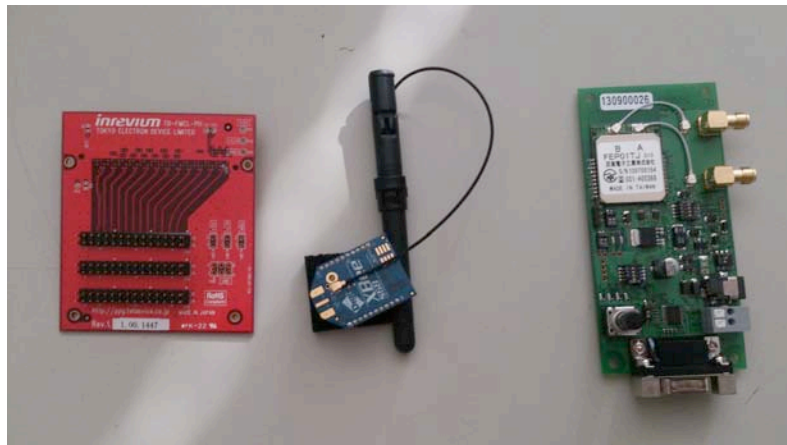


図 9 TB-FMCL-PH(左)と XBeeWiFi(中)と FEP01(右)

また、無線 LAN では 100m 程度の短距離の通信しかできないため、それぞれのマルチコプタが一時的にその通信範囲の外に出てしまうことが考えられる。その際互いの位置を知らせる手段がなければネットワークを維持することが難しいため、低速ではあるが中・長距離の通信が可能な Futaba の FEP01 通信モジュールも搭載することとする。図 9 に TB-FMCL-PH、XBeeWiFi、FEP01 を示す。

まとめると、本構成では FEP01 によってマルチコプタのネットワークを制御するための通信を行い、XBeeWiFi でデータの伝送を行う。そのためのプロトコル等の実装を TB-7Z-020-EMC 上で行う。通信ノードの装備品を以下にまとめる。

- TB-7Z-020-EMC 1 個 (主回路基板)
- TB-FMCL-PH 1 個 (ピンヘッダ拡張カード・各種通信モジュールに接続)
- XBeeWiFi 2 個 (データ転送用通信モジュール)
- FEP01 1 個 (ネットワークコントロール用通信モジュール)

TB-FMCL-PH と通信モジュール 2 種を接続するためには、何らかの回路基板を作成する必要があるが、その前に、これらの装備で目的を達成可能であることを確認する必要がある。

3.2.4 通信ノードのプロトタイプシステム開発

上記の部品を実際に組み合わせて通信ノードのシステムを制作する必要がある。これについては現在制作中であるので、概略を説明する。TB-FMCL-PH に接続する無線通信モジュール搭載ボードやマルチコプタに搭載するための装着具を開発する必要があるが、これを行う以前に、先の構成で目的が達せられることを確認する必要がある。換言すれば、ハードウェアからソフトウェアまでの一連のシステムが構築可能であることを調べる必要がある。

目標とするシステム構成を図 10 に示す。

Subboard が通信モジュールの搭載及びマルチコプタの制御システムへの接続を可能とする、今後開発を必要とするボードの部分になる。緑色の部分が Zynq 内部の構成要素で、PL は FPGA を PS は CortexA9 を示している。PL には Zynq の外部にある Subboard と Zynq の上に構築されるソフトウェアシステムの間の物理的な接続をつかさどる回路を作成する。

XBeeWiFi は SPI(Serial Peripheral Interface)、FEP01 は UART(Universal Asynchronous Receiver Transmitter)でデータ通信を行うため、それらの通信回路を PL 側に用意する必要がある。また、それらにソフトウェアシステムからアクセスできるためにはドライバソフトウェアが必要である。ドライバソフトウェアのプログラミングインターフェイスから動作を確認することが、このシステムの可能性に関する重大な第一の課題である。

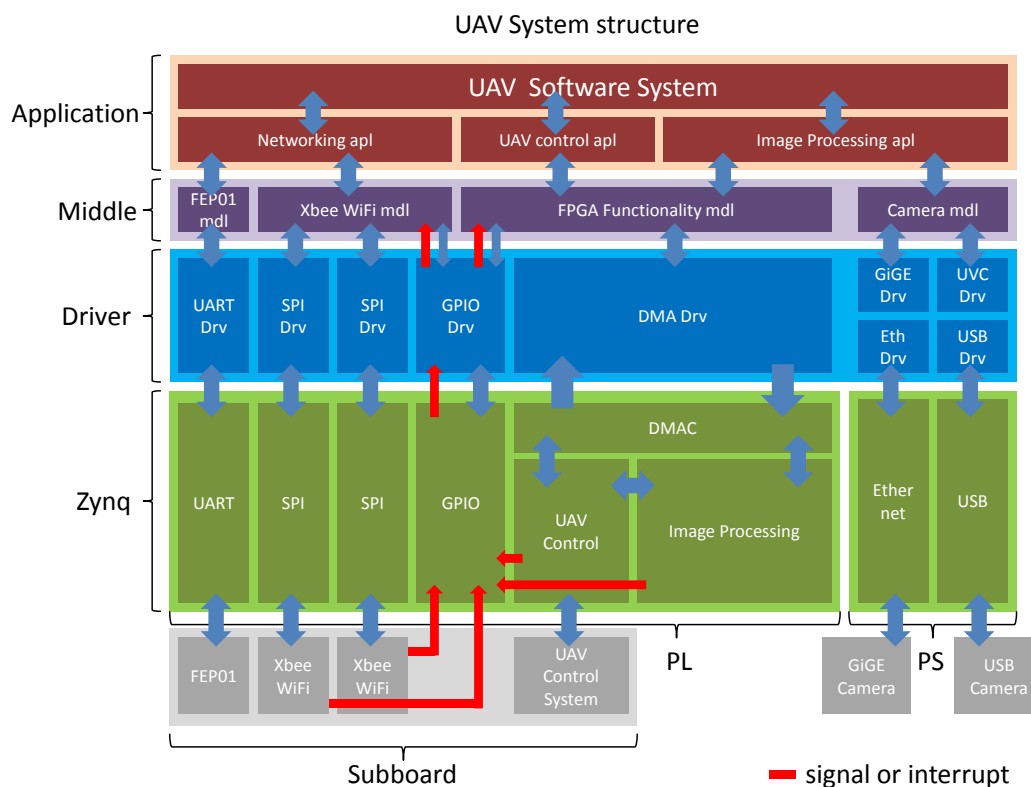


図 10 システムのブロック図

現在 XbeeWiFi の SPI ドライバを介した動作を確認中であり、XbeeWiFi 単独の動作は確認できている。次は 2 つの XbeeWiFi を接続した場合の動作を確認する必要がある。UART の扱いについては実績があるため、FEP01 側の接続に問題はないと考えており、したがって、このシステムは可能であると考えている。図 11 にブレッドボードを用いて構築した XBeeWiFi テストベッドを示す。

テストベッドでの動作確認ができ次第、Subboard の開発を進め、26 年度夏までにマルチコプタに搭載可能な形にする。また、同時にテストベッド上での上位のソフトウェアの開発を進める。

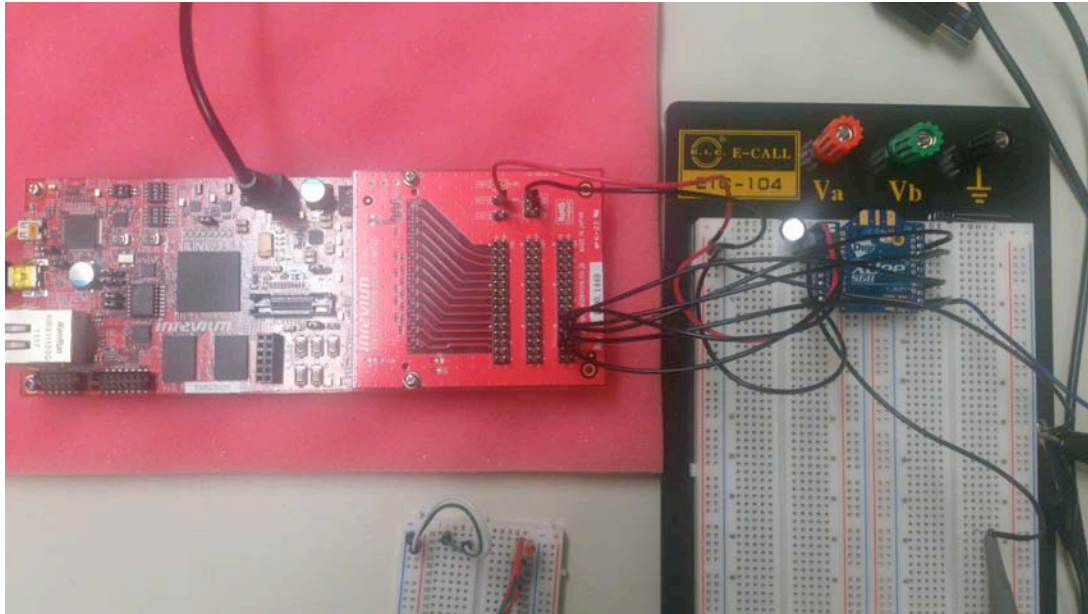


図 11 ブレッドボードを使った XbeeWiFi の接続実験

3.3 自律小型船開発

洋上から探査を行うためのシステム開発基盤として、図 12 に示す船舶「らいちょう N」を建造した。らいちょう N の設計図を図 13 に、主要目を表 2 に示す。



図 12 電池推進船「らいちょう N」

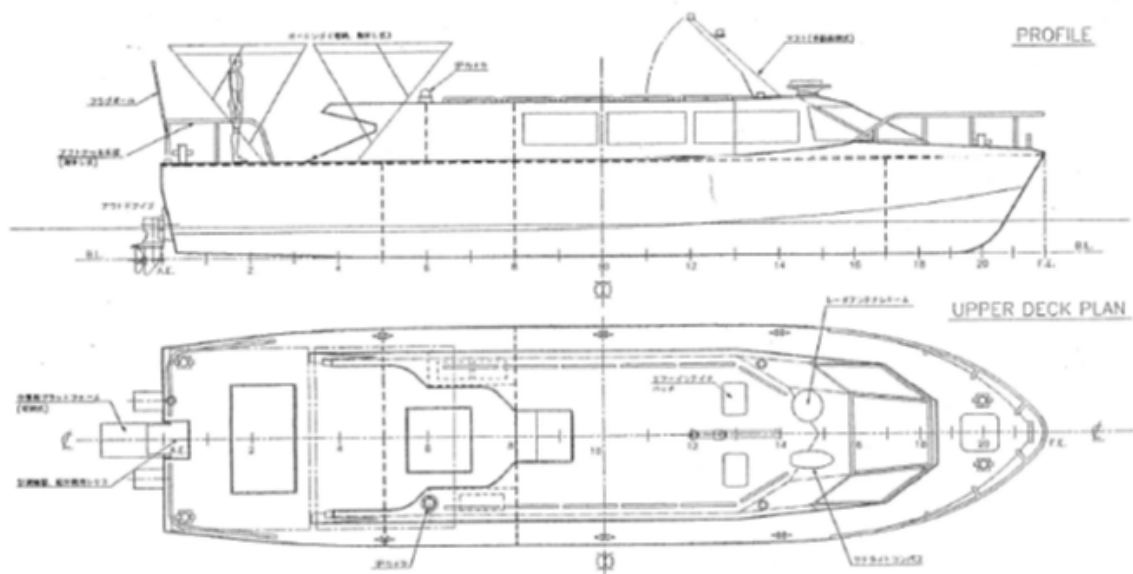


図 13 らいちょうN設計図

表 2 らいちょうN主要目

全長	14 [m]
全幅	3.5 [m]
全深さ	2 [m]
電動機出力	45 [kW]×2
蓄電池容量	140 [kWh]
定員	乗員 2 名、旅客 10 名

らいちょうNは、もともと次世代水上交通システム「水上のゆりかもめ」を目指し、その研究開発環境整備の一部として、平成24年度補正予算により建造した船舶である。「水上のゆりかもめ」、すなわち、最終目標としては、人間は遠隔地にある管制室から監視し、船舶自体は無人で航行する水上バスを目指しているものである。このための研究開発用船舶であるらいちょうNは無人で自律して航行することが可能となるように、操舵機、電動機等、すべてをコンピュータ制御できるようになっている。また、超低照度カメラや霧や逆光時等、通常のカメラでは見えない状況においても画像を鮮明化する画像処理装置を搭載し、夜間や霧中においても障害物等を認識することが可能である。また、すべての運航データ、カメラ撮影データは、遠隔地から監視することを目的に、船内のデータサーバに蓄積される。データサーバにはイーサネットによって、船内から接続する外部PCだけでなく、通信回線網を通じた外部PCからも接続が可能である。また、後部デッキはマルチコプタ等が離発着できる十分な広さを確保している。なお、現在は開発環境を整えたのみの状況であり、今後、自律航行等を可能にするソフトウェアの開発を行っていく。なお、自律機能は、無人化のためだけに開発を進めているのではなく、操船者が乗船している場合でも、安全運航を目的とした操船支援システムとして機能す

るものである。

また、遠隔監視機能に関しては、通信回線の確保が必要となる。沿岸域であれば携帯電話網が整備されているので、それを利用することが可能であるが、沿岸から離れた場所にて調査を行うためには独自で通信回線を整備しなければならない。衛星携帯電話もあるが通信可能容量が非常に少なく画像伝送等は現実的ではない。現在、手軽に利用できる WiFi 通信に関しても、通信可能距離は最大でも 1.5[km]程度であるため、通信可能距離を延長するためには通信の中継をする機器が必要である。このためにマルチコプタを利用することを考え、その運用方法を検討する。

3.4 発表論文等

本研究の一部の内容を、以下に示す東京海洋大学修士論文として発表した。

[文献 1] 中野翔太、「蓄積運搬転送技術による遠隔地観測システムの検討」、平成 25 年度 東京海洋大学 修士学位論文、2014 年 3 月（指導教員：近藤逸人）