

ラピッドプロトタイピングのための汎用ボード “マイクロキューブ” の設計と活用

和田雅昭[†] 畑中勝守^{††} 上瀧實^{†††}

[†] 公立はこだて未来大学 ^{††} 東京農業大学 ^{†††} 東海大学

本報では、センサネットワークシステムやロボットの制御システムなどの組込みシステムにおけるラピッドプロトタイピングを目的として開発した汎用ボード“マイクロキューブ”について、その設計思想と活用事例を紹介する。拡張性の高い汎用ボードを実現するため、マイクロキューブにはCPUボードに拡張ボードを積み重ねるスタッカブル構造を採用した。また、ソフトウェアリソースの再利用性と移植性の向上を目的としてリアルタイムOSを導入した。マイクロキューブは多種類の拡張ボードを揃えている点が大きな特徴であり、複数の拡張ボードを組み合わせるにより、多彩な組込みシステムのラピッドプロトタイピングを実現している。

キーワード：ラピッドプロトタイピング，組込みシステム，センサネットワークシステム，リアルタイムOS

Design and Applications of “Microcube” for Rapid Prototyping

Masaaki WADA[†], Katsumori HATANAKA^{††} and Minoru KOTAKI^{†††}

[†] FUTURE UNIVERSITY-HAKODATE, ^{††} TOKYO UNIVERSITY OF AGRICULTURE
^{†††} TOKAI UNIVERSITY

In this paper, we report the design and applications of general-purpose circuit board "Microcube" developed aiming at rapid prototyping in embedded systems of the sensor network systems and the control systems for the robots. To achieve a general-purpose circuit board with a high extensibility, we choose a stackable structure to pile the expansion boards to a CPU board. Moreover, the real-time operating system is mounted with reusing the software resources. Because the Microcube has variegated expansion boards, we can do rapid prototyping of any kinds of embedded systems by combining two or more expansion boards.

Keywords: Rapid Prototyping, Embedded System, Sensor Network System, Real-time Operating System

1. はじめに

平成13年3月に閣議決定された第2期科学技術基本計画をうけ、文部科学省では平成14年度から「知的クラスター創成事業」を実施している。初年度となる平成14年度には全国の12地域で事業が開始され、札幌地域では情報通信を核とした「札幌ITカロッツェリア」[1]が平成18年度までの5ヶ年に渡り実施された。

札幌ITカロッツェリアでは、地域の多様な産業分野にITを浸透させることを目的として、短期間開発、短期間設計を実現するためのラピッドプロトタイピングが主要なコンセプトとして掲

げられた。研究のメインテーマは組込み技術、デザイン、ユーザビリティの3テーマであり、筆者らは組込み技術のサブテーマであるムーバブルコンピュータ(ムバコン)の研究開発に携わった。ムバコンとは、空間情報をセンシングする、または、移動体をコントロールする小型コンピュータを総称する造語であり、センサネットワークシステムや移動体の自律走行システム等のラピッドプロトタイピングを目的としたものである。

本報では、筆者らがムバコンの一つとして平成15年度より開発に着手したスタッカブル構造の汎用ボード“マイクロキューブ”について、その設計思想と活用事例を紹介する。

2. マイクロキューブの設計

2.1 スタッカブル構造

拡張性の高い汎用的な組込みボードを実現するためには、多様なインタフェースへの対応が必要である。例えば、センサインタフェースとしては、RS-232C に代表されるシリアルインタフェースや電流/電圧出力のアナログインタフェースが挙げられる。また、ネットワークインタフェースとしては、有線/無線 LAN や CAN バス、無線モデム、携帯電話などの利用が考えられる。さらに、データを記録するためのストレージデバイスの利用も想定される。しかしながら、一般的にはこれらの機能の全てが同時に利用されることはなく、目的に合わせた機能のみを選択して利用することになる。

そこで、必要とする機能を組み合わせることにより目的とする組込みボードを構成するスタッカブル構造を採用した。マイクロコンピュータを搭載した CPU ボードをベースに、必要とする機能を有した拡張ボードを積み重ねることによりマイクロキューブを構成する。図 1 は CPU ボードに Ethernet ボード、CF ボードを組み合わせた代表的なマイクロキューブの構成例である。



図 1 マイクロキューブの構成例

2.2 micro80 (マイクロハチマル) 規格

スタッカブル構造を実現するためには、ボードサイズ、コネクタの配置、ピンアサインを規格化しておく必要がある。最初に、ベースとなる CPU ボードの仕様を検討した。その結果、CPU ボードは最小限の構成とし、マイクロコンピュータの内蔵フラッシュメモリを書き換えるためのシリアルインタフェースと動作確認用の LED、ならびに、スタッキングコネク

タのみを実装することとした。スタッキングコネクタには入手の容易性を考慮し PC/104[2] で使われている 40pin のコネクタを採用した。図 2 に CPU ボードのシルク図を示す。40pin のコネクタは基板の上端と下端の 2 箇所配置し、上端を I/O コネクタ、下端をバスコネクタとしている。

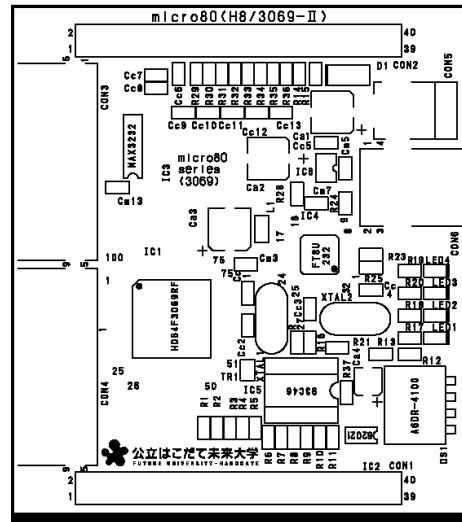


図 2 CPU ボードのシルク図

I/O コネクタにはマイクロコンピュータの入出力ポート、A/D ポート、シリアルポート等のほか、拡張ボードへの電源供給のための電源ラインをアサインした。さらに、将来の拡張を考慮し、ユーザが自由に設計することのできるユーザ領域もアサインしている。表 1 に I/O コネクタのピンアサインを示す。一方、バスコネクタには 512kbyte (128kbyte×4) の空間をもつアドレスバスと、8bit 幅のデータバス、ならびに、コントロールバスをアサインした。表 2 にバスコネクタのピンアサインを示す。

また、CPU ボードにはノンスタッカブルのスタッキングコネクタの実装と電源供給のための DC ジャック (2.1mm タイプ) の実装を規定しており、拡張ボードにはスタッカブルのスタッキングコネクタの実装と、電子部品の片面実装を規定している。各ボードサイズは 70mm×80mm とし、スタッキングの際、組み違えることのないようバスコネクタが実装されている側の基板端を白いラインでマーキングすることとし、部品高を最大 10mm と制限した。

表1 I/O コネクタのピンアサイン

No.	Func.	I/O	No.	Func.	I/O
1	DIO0	I/O	2	DIO1	I/O
3	DIO2	I/O	4	DIO3	I/O
5	DIO4	I/O	6	DIO5	I/O
7	DIO6	I/O	8	DIO7	I/O
9	DIO8	I/O	10	DIO9	I/O
11	DIO10	I/O	12	DIO11	I/O
13	DIO12 PWM0A	I/O	14	DIO13 PWM0B	I/O
15	DIO14 PWM1A	I/O	16	DIO15 PWM1B	I/O
17	A/D0	I	18	A/D1	I
19	A/D2	I	20	A/D3	I
21	A/D4	I	22	A/D5	I
23	A/D6 D/A0	I/O	24	A/D7 D/A1	I/O
25	RX0	I	26	TX0	O
27	RX1	I	28	TX1	O
29	USER0	I/O	30	USER1	I/O
31	USER2	I/O	32	USER3	I/O
33	POWER	-	34	POWER	-
35	GND	-	36	GND	-
37	GND	-	38	GND	-
39	VCC	-	40	VCC	-

その他、CPU ボードは拡張ボードに対して100mA 以上の VCC の供給能力を持つものとし、拡張ボードは VCC の最大消費電流が50mA を超える場合は、内部にレギュレータを設けることと規定した。さらに、スタッキングのためのスタット穴位置についても規定している。

2.3 マイクロキューブの特徴

マイクロキューブのもつ特徴の一つとして、拡張ボードを組み替えることにより、同一の CPU ボードを用いて様々な種類のマイクロキューブを構成できる点が挙げられる。この特徴はラピッドプロトタイピングには極めて重要な要素であり、マイクロコンピュータ周辺のハードウェアデバックが不要となること、ならびに、プログラムの積極的な再利用が図れることから、個別にプロトタイプボードを作成する場合に比べて開発期間の大幅な短縮が可能となる。

表2 バスコネクタのピンアサイン

No.	Func.	I/O	No.	Func.	I/O
1	D0	I/O	2	D1	I/O
3	D2	I/O	4	D3	I/O
5	D4	I/O	6	D5	I/O
7	D6	I/O	8	D7	I/O
9	A0	O	10	A1	O
11	A2	O	12	A3	O
13	A4	O	14	A5	O
15	A6	O	16	A7	O
17	A8	O	18	A9	O
19	A10	O	20	A11	O
21	A12	O	22	A13	O
23	A14	O	24	A15	O
25	A16	O	26	#WAIT	I
27	#CS0	O	28	#CS1	O
29	#CS2	O	30	#CS3	O
31	#IQR0	I	32	#IQR1	I
33	#WR	O	34	#RD	O
35	#RESET	O	36	RESET	O
37	GND	-	38	GND	-
39	VCC	-	40	VCC	-

2.4 CPU ボード

マイクロキューブの性能は主に CPU ボードにより決定する。例えば、センサネットワークシステムでは省電力が、自律走行システムでは演算能力が要求される。そこで、幅広い用途に対応するため、これまでに3種類の CPU ボードを設計した。なお、マイクロコンピュータには参考文献の豊富なルネサステクノロジーの H8 ファミリー、および、H8S ファミリーのフラッシュメモリを内蔵した F-ZTAT 版を選定している。

2.4.1. H8/3069 ボード

H8/3069 ボードは、マイクロコンピュータに16k バイトの RAM を内蔵する HD64F3069RF を搭載した代表的な CPU ボードである。汎用性が高く、センサノード、ロボットのコントローラなどに活用されている。また、3チャンネルのシリアルコミュニケーションインタフェースのうちフラッシュメモリの書き込みに対応したチャンネルを USB-UART コントローラに接続しており、さらに、USB バスパワーで CPU ボードに電源供給ができることから、USB ケーブル1本で PC と接続し、プログラムの開発を行うことができる。

図 3 に H8/3069 ボードを示す。

2.4.2. H8/3048BV ボード

H8/3048BV ボードは、マイクロコンピュータに 3.3V で動作する HD64F3048BVF を搭載したローパワーの CPU ボードである。その特徴を活かし、データロガーなど、主にバッテリー駆動の用途で利用されている。また、16bit タイマを 5 チャンネル内蔵していることから、複数のモータの制御にも適している。

2.4.3. H8S/2638 ボード

H8S/2638 ボードは、マイクロコンピュータに 16bit×16bit の乗算器を内蔵する HD64F2638F を搭載したハイエンドの CPU ボードである。CAN インタフェースを搭載していることから、複数のボードを接続する制御ネットワークを容易に構築することができる。

2.5 拡張ボード

マイクロキューブの汎用性は、主に拡張ボードにより決定する。そこで、多彩なマイクロキューブを構成するため、多種類の拡張ボードを設計した。なお、複数の拡張ボードを組み合わせた際リソースが競合することのないよう、拡張ボードは単機能を基本として設計している。

2.5.1. CF ボード

最も代表的な拡張ボードであり、挿入するコンパクトフラッシュカードの種類により、多様な機能を持たせることができる。これまでに、コンパクトフラッシュ、GPS、シリアル、RFID リーダ/ライター、モデム、LAN、データ通信カードなどで動作を確認しており、携帯電話カードや PHS カードを用いることによって、インターネットへの接続も可能となる。なお、殆どのコンパクトフラッシュカードの動作電圧は 3.3V であることから、5V の CPU ボードとの接続のため、レベル変換のバッファを実装している。図 4 に CF ボードを示す。

2.5.2. Ethernet ボード

CF ボードに並ぶ代表的な拡張ボードであり、LAN 接続を可能とすることによりマイクロキューブの用途が拡大する。ネットワークコントローラには多くのリアルタイム OS でサポートされている REALTEK の RTL8019AS を搭載している。また、IEEE の Organizationally Unique Identifier も取得済み (00-1A-A4) であり、オリジナルの MAC アドレスを設定することができる。図 5 に Ethernet ボードを示す。

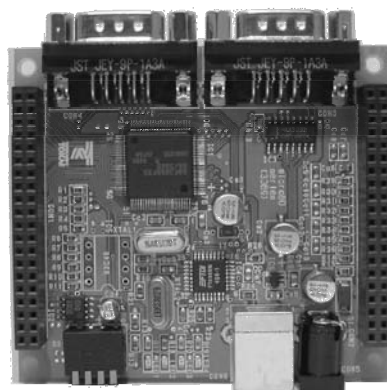


図 3 H8/3069 ボード

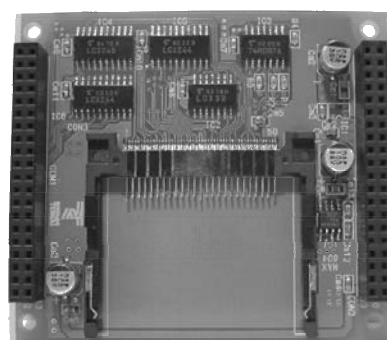


図 4 CF ボード

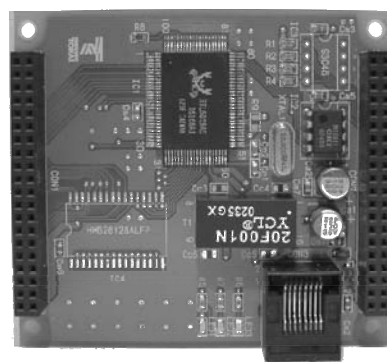


図 5 Ethernet ボード

2.5.3. COM ボード

移動体に搭載されている GPS やサテライトコンパス、モーションセンサ、レーザスキャナなどのセンサでは依然として RS-232C インタフェースが主流である。COM ボードは RS-232C を拡張するためのボードであり、UART コントローラとして送受信に各 16 バイトのバッファを持つ TEXAS INSTRUMENTS の TL16C554 を搭載している。COM ボードを組み合わせることにより 4 ポートの RS-232C が拡張される。

2.5.4. SLAVE ボード

マイクロコンピュータと 256 バイトの DPRAM を搭載した拡張ボードであり、CPU ボードから DPRAM を介してスレッドを起動することにより、単一の CPU では負荷の大きい処理やリアルタイム性の確保が難しい処理などを実行することができる。例えば、フーリエ変換や Wavelet 変換などの処理をスレッドとして実行することが可能である。また、通信機能と制御機能を独立させ分担することもできる。なお、マイクロコンピュータには H8/3069 ボードと同じ HD64F3069RF を搭載している。

2.5.5. その他の拡張ボード

その他、表 3 に示す特定小電力無線モデムを搭載した RF ボード、小型 GPS を搭載した GPS ボード、コンパクトフラッシュの True-IDE モードに対応した IDE ボードなどを作成している。なお、表 4 に示すリソース表により、バスリソースが競合する拡張ボードは同時に組み合わせることができない。また、I/O リソースの競合についても同様である。詳しくはマイクロキューブのホームページ[3]を参照されたい。

表 3 拡張ボードの種類と特徴

種類	特徴
CF	CF カードスロット
Ethernet	10BASE-T
COM	4ch の RS-232C インタフェース
SLAVE	DPRAM, HD64F3069RF
RF	特定小電力無線モデム
GPS	GPS, 2 軸加速度センサ
IDE	True-IDE, 1MbitSRAM
PCMCIA	PC カードスロット
DO	24ch の絶縁型デジタル出力
7SEG	7SEG, 温度計, 照度計
7SEG-II	7SEG, リモコン受光ユニット
Motor	2ch の Hブリッジとエンコーダ入力
Servo	6ch の PWM 出力
485	CF カードスロットと 2ch の RS-485
SIO	2ch の RS-422 インタフェース
ADIO	8ch のアナログ/デジタル入出力
MAG	1 軸ジャイロ, 2 軸加速度センサ
PPH	12ch の絶縁型デジタル入力
UM3	単三形乾電池×4 本のホルダ
univ	両面ユニバーサル基板

表 4 拡張ボードのリソース表

種類	CS	CS	CS	CS	IRQ	IRQ
	0	1	2	3	0	1
CF	○	○			○	
Ethernet			○			○
COM				○		
SLAVE				○		
IDE			○	○		
PCMCIA			○	○		○
485	○	○			○	

2.6 リアルタイム OS

ラピッドプロトタイピングを実現するためには、ハードウェアだけではなくソフトウェアも容易に構築できる必要がある。そこで、ソフトウェア開発の効率化とソフトウェアリソースの再利用性、移植性の向上を目的として、リアルタイム OS の導入を図った。OS には ITRON 仕様ライクな API を持つ SmalightOS[4]を選定した。現在、H8/3069 ボード、および、H8/3048BV ボードで SmalightOS の動作を保証している。

2.7 オープンソース

ラピッドプロトタイピングにはオープンソースの活用も有用な手段である。そこで、筆者らの開発したプログラムのうち、活用が見込めるプログラムについては、オープンソースとしてホームページで公開している。現在は FAT16 のプログラムソースを公開している。FAT16 には、fopen, fclose, putc, puts, format の 5 つの関数を用意しており、マイクロキューブで作成したファイルはパソコンでテキストデータとして読み込むことができる。また、動作確認済みのコンパクトフラッシュカードの CIS (Card Information Structure) 情報も公開している。

3. マイクロキューブの活用

3.1 ラピッドプロトタイピング

マイクロキューブを用いて行ったプロトタイピングの事例を紹介する。

3.1.1. センサネットワークシステム

H8/3069 ボードに Ethernet ボードを組み合わせたマイクロキューブを構成し、これをセンサノードとすることで、地鶏の育雛鶏舎の温湿度管理

を目的としたセンサネットワークシステムのプロトタイピングを実施した. 図 6 にマイクロキューブの設置状況を示す.

マイクロキューブには SmalightOS 上で動作する TCP/IP プロトコルスタック (SmalightTCP/IP) を実装し, httpd サービスを起動している. そして, ダイナミックに HTML を書き換えることにより計測した温湿度のデータを HTML に反映させている. 一方, 事務所に設置した DB サーバは定期的にマイクロキューブに HTTP でアクセスすることにより温湿度データを取得し, DB に蓄積しており, 温湿度に異常が検出された場合には予め登録しておいた宛先に電子メールを送信し, 異常を知らせる. なお, 事務所と育雛鶏舎の間には県道が縦断していることから, 屋外用無線 LAN を用いてネットワークを構築した. ソフトウェアリソースの再利用が図れたことから, 1 日程度でプロトタイピングを完了している.

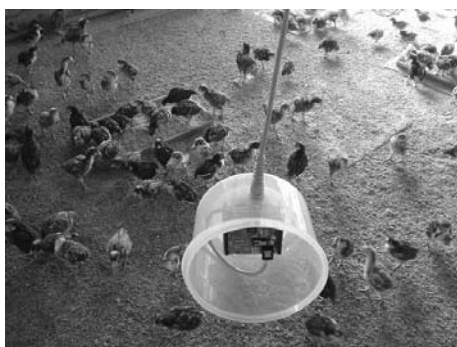


図 6 育雛鶏舎の温湿度管理システム

3.1.2. 無人環境調査船の IP コントロール

H8/3069 ボードに, Ethernet ボード, COM ボードを組み合わせたマイクロキューブを構成し, 無人環境調査船のコントロールユニットのプロトタイピングを行った. マイクロキューブには無人環境調査船を制御するためのスラストアンブと GPS, モーションセンサが RS-232C で接続されており, COM ボードを用いて RS-232C を拡張している. また, 陸上の制御用 PC とは長距離型無線 LAN により通信している. マイクロキューブでは httpd サービスを起動し CGI を記述していることから, 制御用 PC はブラウザを用いて動作指令を与えることができる. なお, GPS, および, モーションセンサのデータも同時にブラウザで閲覧していることから, 制御用ポートと闊

覧用ポートの 2 つのポートをオープンしている. 図 7 に無人環境調査船を示す.



図 7 無人環境調査船

3.2 リリース

マイクロキューブを用いて行ったプロトタイピングのうち, これまでに 2 つのシステムが実用化している.

3.2.1. ユビキタスブイ

ホタテ養殖海域の水温をリアルタイムで計測するためのユビキタスブイ[5]のプロトタイピングを, マイクロキューブを用いて行った. ユビキタスブイはバッテリー駆動となることから, H8/3048BV, IDE ボード, 485 ボードを組み合わせたマイクロキューブを構成した. 485 ボードには携帯電話カードを挿入しており, ダイアルアップ接続によりインターネットに接続し, 電子メールで水温情報を送信する. そのため, SmalightTCP/IP を拡張した SmalightPPP を実装した. なお, HD64F3048BVF の内蔵 RAM は 4k バイトであり, SmalightPPP の動作には約 10k バイトの RAM 領域が必要となることから RAM 領域の拡張のため SRAM を搭載した IDE ボードを利用している. 図 8 にユビキタスブイシステムの概要を示す.

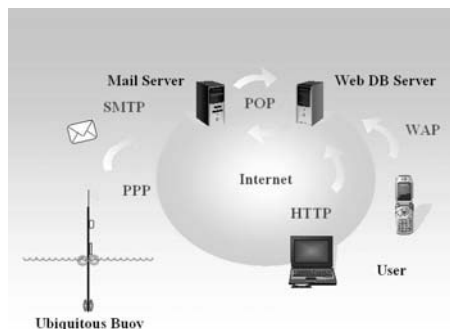


図 8 ユビキタスブイシステム

4 ヶ月間に渡る洋上でのプロトタイプの評価の結果、ユビキタスブイの有用性が確認されたことから、小型化、省電力化を目的として専用ボードの開発を行った。図 9 に開発したボードを、表 5 にその仕様を示す。マイクロコンピュータには 3.3V で動作し、16k バイトの RAM を内蔵する HD64F3029F を選定した。また、低消費電力のマイクロコントローラにより電源を管理することで省電力化を実現しており、4 本の単一形アルカリ乾電池を用いることで 8 ヶ月以上の連続動作が可能である。これまでに、延べ 37 基のユビキタスブイ（図 10）が北海道を中心とする沿岸の養殖漁業海域で利用されている。

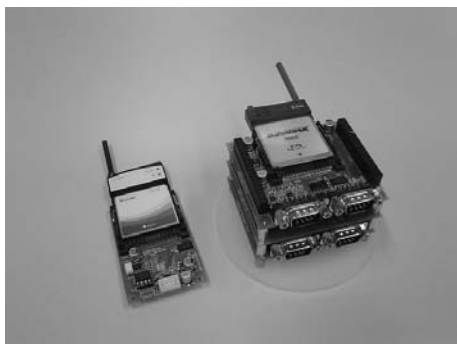


図 9 ユビキタスブイボード（左）

表 5 ユビキタスブイボードの仕様

	専用ボード	プロトタイプ
CPU	HD64F3029F	HD64F3048BVF
OS	SmalightPPP	SmalightPPP
動作時電流	190mA	300mA
待機時電流	170uA	25mA
基板寸法	80mm×50mm	70mm×80mm
基板枚数	1	3
重量	22g	200g



図 10 ユビキタスブイ

3.2.2. 小型漁船用データロガー

小型漁船に搭載されている GPS の位置情報、ならびに、魚群探知機の深度情報を記録するためのデータロガー[6]のプロトタイプピングを、マイクロキューブを用いて行った。マイクロキューブは H8/3069 ボードに CF ボードを組み合わせて構成している。図 11 に小型漁船に設置したプロトタイプを示す。コンパクトフラッシュに蓄積したデータは様々な活用ができ、例えば空間補間することによって海底地形図や表面水温図の作成が可能となるほか、操業日誌としても活用することができる。

また、データを解析することにより漁場を特定することができ、水揚げ量と関連付けすることによって水産物の資源管理にも活用できることから、水産試験場からの要望により専用のデータロガーを開発した。開発の課題としては、低価格化のための部品点数の削減とカレントループインタフェースへの対応、一般的な小型漁船の電源である DC24V への対応が挙げられた。図 12 に開発したデータロガーを、表 6 にその仕様を示す。低価格なデータロガーを実現したことにより、初年度となる平成 19 年度には 100 台以上のデータロガーが出荷されている。



図 11 プロタイプによるデータ収集

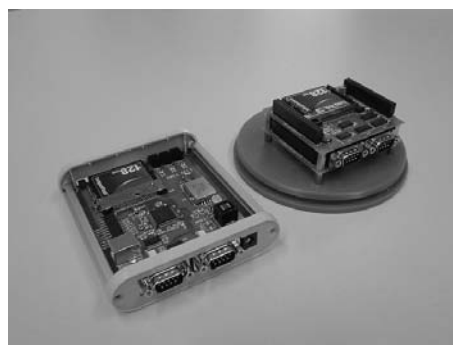


図 12 データロガー（左）

表 6 データロガーの仕様 (ケース含む)

電源	DC12-24V
消費電流	20mA typical (DC12V)
外形寸法	120mm×110mm×30mm
重量	240g
入力ポート	20mA カレントループ×2ch
部品点数	67 点

4. おわりに

本報では、ラピッドプロトタイピングを目的として開発した汎用ボード“マイクロキューブ”について紹介を行った。マイクロキューブは組み込みシステムのラピッドプロトタイピングを目的としていることから、MOTE[7]や同時期に開発された U-cube[8]などのセンサノードとは、コントローラとして活用できる点で大きく異なる。また、他の汎用ボードと比較して拡張ボードが充実しているため、多彩な構成による高い汎用性を実現できる点が大きな特徴である。

全ての CPU ボード、および、拡張ボードの回路図はホームページで公開しており、プロトタイピング後の専用ボードの開発も短期間で行うことができる。また、規格化されていることから、新たな機能を必要とする場合であっても、拡張ボードのみを作成することにより、プロトタイピングの期間を短縮することが可能である。

公立はこだて未来大学ではマイクロキューブを演習用教材として採用しており、学内の共通プラットフォームとしての位置付けを図っている。現在では、卒業研究においてもセンサノードやロボットのコントローラとして活用され始めている。

謝辞

マイクロキューブの開発は、文部科学省の知的クラスター創成事業「札幌 IT カロツェリア」、および、公立はこだて未来大学の特別研究費の支援を受け実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 札幌 IT カロツェリア
<http://www.it-cluster.jp/>
- [2] PC/104 Embedded Consortium
<http://www.pc104.org/>
- [3] Microcube
<http://www.fun.ac.jp/~wada/microcube/>
- [4] ルネサス北日本セミコンダクタ, Smalight OS
<http://www.kitasemi.renesas.com/product/smilight/>
- [5] 和田雅昭, 畑中勝守, 戸田真志, “ホタテ養殖海域における小型海洋観測ブイの実用性評価”, 情報処理学会研究報告, 2006-UBI-12, pp.45-52, 2006
- [6] 和田雅昭, 畑中勝守, 戸田真志, “小型漁船におけるセンシングデータの共有と海底地形図の作成”, 情報処理学会研究報告, 2007-UBI-14, pp.63-67, 2007
- [7] クロスボー, MOTE
<http://www.xbow.jp/motemica.html>
- [8] 永原崇範, 鹿島拓也, 猿渡俊介, 川原圭博, 南正輝, 森川博之, 青山友紀, 篠田庄司, “ユビキタス環境に向けたセンサネットワークアプリケーション構築支援のための開発用モジュール U³ (U-cube) の設計と実装”, 電子情報通信学会技術研究報告, IN2002-243, 2003