展 望

実用ロボットに使える通信技術

Useful Communication Technology to Build Practical Robots

福島 E. 文彦* *東京工業大学大学院理工学研究科

Edwardo F. Fukushima* *Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

ロボットは数多くのセンサ、アクチュエータやコントローラを分散配置して構成される。そのため、制御用計算機と入出力インターフェースを1箇所に集中させる古典的な配線と制御方式は、(i) 配線の引き回しが煩雑になる、(ii) 構成要素数が増えるに従い配線長さや総質量が増大する、(iii) 新たな構成要素の増設が困難である、といった基本的な問題を有する。

さて、規模や要求仕様等は異なるが、上記の問題はシステムの複雑さや構成要素数が増すに従って、自動車の電装系や工場内の機器の接続、家電製品や計算機の内部通信や周辺機器との接続でも顕著に現れる。これらの産業用分野ではすでにシリアル通信やネットワーク技術を駆使し、効率的な車載 LAN や産業用ネットワークを構成するために、多くのシリアル通信規格が策定され実用化されている。ロボット分野では、ロボット内部のシリアル通信網を一般的に「体内 LAN」と称しているが、他の産業分野に比べると標準化が遅れている。

本稿では、ロボットの体内 LAN を構成するために使える通信技術や、筆者が開発したロボット(図1)で使われている技術について紹介する。

2. シリアル通信技術のロボットへの応用

主なシリアル通信やネットワーク技術と開発時期を表1に示す。自由競争の元で、各社から競合する技術が数多く開発されてきたが、すでに競争によって淘汰されたり、時代遅れになったりした技術や製品も数多く存在する。ロボット技術者が新たに体内 LAN を検討する際には、他分野の過去の開発例と今後の技術展開も見極めることが重要である。

2.1 コンピュータ分野のシリアル通信技術

1970年代には計算機の LAN (Local Area Network) 技術として Ethernet, ARCNET や Token Ring が次々と発

図1 人道的地雷探知ロボット GRYPHON-V[1]. SS 無線モデム (遠隔操縦), 無線 LAN (データ通信), CAN2.0B (モータ駆動), IEEE1394 (ステレオビジョンカメラ), RS232C (金属探知機), Ethernet (地雷センサ) 通信技術搭載

表されたが、現在では Ethernet はオフィス、研究室、家庭、工場内といったあらゆる環境で広く普及し、ネットワークのデファクトスタンダードとなっている。

1990 年半ばには、パーソナルコンピュータ (パソコン) の普及に伴い、周辺機器との接続のために通信速度 12 [Mbps] の USB (Universal Serial Bus) や 400 [Mbps] の IEEE1394 (Firewire) が開発された。その後、通信速度は USB2.0 で 480 [Mbps], IEEE1394b で 800 [Mbps] に向上した。なお、USB は送受信に 1 対のツイストペア線を使い半二重通信方式であるが、IEEE1394 は送受信に独立のツイストペアを使うため全二重通信が可能である。しかしながら、多くの用途では双方向の同時通信は必要でないため、USB でも十分な性能が得られる。USB は富士通オートメーションの小型ヒューマノイドロボット HOAP (Humanoid Open Architecture Platform) シリーズの体内 LAN に採用されている実績がある。また、現在はパソコンのみでなく、デジタルカメラやビデオカメラにも標準的に搭載されている。

無線 LAN 規格 IEEE 802.11 も当時の 2 [Mbps] から通信速度や到達距離が向上し、ロボットの遠隔制御に適用される例が多い。最近では、100 [Mbps] 以上の通信速度を実現する次世代の無線 LAN 方式 IEEE 802.11n (規格はドラフト段階) も製品化されている。ほかにも、PHS (Personal

原稿受付 2008 年 2 月 1 日

キーワード: Serial Bus, Network, Mobile Robot, Embedded Control

*〒152-8550 目黒区大岡山 2-12-1

*Meguro-ku, Tokyo

表 1 主なシリアル通信とネットワーク技術

発表年	技術名	開発者, 管理団体等
1976	Ethernet	DEC, Intel, XEROX
1977	ARCNET	Datapoint
1980	I ² C	Philips
1989	SERCOS	SERCOS
1995	IEEE 1394 (FireWire)	Apple
1996	USB	Intel
1997	IEEE 802.11 (WLAN)	IEEE
2002	PCI-Express	PCI SIG
2004	ZigBee	ZigBee Alliance
2005	Redtacton	NTT
車載ネットワーク		
1982	CAN	Bosch
1997	MOST	SMSC
1999	LIN	LIN
2000	FlexRay	FlexRay Cons.
リアルタイム, 産業用 Ethernet		
2001	Ethernet Powerlink	Bernecker+Rainer
2001	PROFInet	Siemens, Profibus
2001	EtherNet/IP	Rockwell, ODVA
2001	Modbus/TCP	Modbus-IDA
2001	SynqNet	SynqNet
2003	EtherCAT	Beckhoff
2005	SERCOS III	SERCOS
ロボット制御用ネットワーク		
1997	Communication Link	MHI
1997	Open-R	SONY
1997	Responsive Processor	ETL(AIST)
2000	Sage Network (I ² C)	Aoyama Gakuin
2000	USB motor controller	Osaka Univ.
2001	HOAP-1 (USB1.0)	FUJITSU
2001	TITech Wire	Tokyo Tech
2004	Real-time Ethernet	AIST

Handy-phone System), Bluetooth, ZigBee などの技術もロボットの遠隔制御に用いられる。

2.2 車載ネットワーク

自動車産業では1982年にCAN (Controller Area Network) が発表され, 現在は全世界に普及し自動車に限らず様々な分野で適用されている。図2に示すように, CAN プロトコルはOSI 基本参照モデルの物理層の一部とデータリンク層を定義するが, 物理層の信号レベル, 通信速度やバスの電気的特性はユーザ自身が決めてよい。産業界では, 互換性を保つため標準化団体が各用途の要求に最適化する規格を策定している。ロボット制御用にCAN を最適化する試みも発表されている[2]。

ただし, 自動車産業ではコスト削減は必須の課題であるため, 単純な用途向けには低価格なLIN (Local Interconnect Network) が使われる。また, 大容量データの高速度通信が必要なマルチメディア情報系車載ネットワークプロトコルとして最大通信速度 400 [Mbps] の, MOST (Media

Oriented Systems Transport) やIEEE1394技術をベースにしたIDB-1394が提唱されている。さらに, 自動車のステアリングやブレーキ等を電子制御する X-by-wire 方式に移行するために, CAN の通信速度 (最大伝送速度 1 [Mbps]) の限界を補い 10 [Mbps] に高速化した, リアルタイム性と信頼性の高い次世代車載制御系ネットワーク FlexRay が開発された。このように, 車載ネットワークでは, 多種のプロトコルを適材適所に混在させ, コストパフォーマンスの高いシステムを構成している。

2.3 産業用ネットワーク

ファクトリーオートメーション (FA) 分野では, 特に耐ノイズ性とリアルタイム性を重視したモーションコントロールやリモート I/O, また工場内での計測・制御用機器間の通信全般に用いるフィールドバス (Fieldbus) と分類される様々なネットワーク規格が開発されてきた。

ところが, 2001 年から実時間制御に対応した産業用 Ethernet プロトコルが相次いで発表され, 現在は工場管理や監視・制御レベルのみでなく, モーションコントロールやリモート I/O レベルまで適用範囲を広げ, その地位を揺るぎないものになっている。すべての用途で従来のフィールドバス技術を置き換えることはないと考えられるが, 多くの技術が淘汰されるのは間違いない。なお, 産業用 Ethernet プロトコルも統一規格ではなく, 現在も過酷な生き残り競争が進行している。日本でも, ヒューマノイドロボットの体内 LAN 用に実時間 Ethernet が開発された[3]。

2.4 ロボット用の独自通信技術

ロボット独自のネットワーク技術は, 1997 年ごろに多く発表された。例えば, 三菱重工の RS-485 を用いた 20 [Mbps] の高速バスや小型のカスタム IC の開発[4], ソニーの 12 [Mbps] のエンターテインメントロボット用アーキテクチャー OpenR [5], 分散制御用に開発されたプロセッサを移動ロボットの制御に用いる試み[6], そして並列分散リアルタイム制御用レスポンスプロセッサもこの時期に発表された[7][8]。また, 集積回路 (IC) や周辺回路間の省配線化を目的としてフィリップ社が開発した Inter IC (I²C) バスのロボット体内 LAN への適用[9][10]や, 共通バス接続のロボット用情報共有型システムバスが提案された[11]。筆者も, 2001 年に高速シリアルバス TITech Wire [12]の研究開発を始めた。

3. ロボットに必要な通信技術とは

ロボットの体内 LAN ではハードリアルタイム性, つまり要求に対して応答時間の確定要件が絶対であるような特性が重要となる。実際には, システム全体のリアルタイム性は上位のファームウェアやオペレーティングシステムに依存するが, 通信プロトコル部については次の基本的な仕様が重要である。

図2 OSI基本参照モデルとCANプロトコルやTITech Wireとの関係

- 応答や遅延時間：接続ノード数を増やしても入出力の要求に対して確実に実行される時間の確定性（deterministic）が保証されるか。
- 通信速度：応答や遅延時間は通信速度以外にプロトコルの複雑さによって決定される。
- CPU 負荷の大小：通信プロトコルの一部を CPU が処理するか。また、ユーザがデバイスドライバや上位プロトコルを開発する際の負担。
- その他：電気的仕様、最大接続可能な物理ノードや論理ノード数、半導体デバイス（コントローラ、トランシーバ等）の入手性や価格、デバイスの消費パワー等。

さて、筆者は前述の TITech Wire 技術を多くの研究用ロボットに導入してきたが、制御する軸数が少ない場合や制御周期がそれほど速くなくてもよい場合がある。開発コスト、性能やデバイスの入手性から、現在は CAN バスも使用している。ただし、完全独自の CAN 上位プロトコルを実装するのではなく、標準化された CANopen 等の規格に準拠するよう努めている。また、図 1 に示したようにロボットは体内 LAN のみでなく、様々な仕様の入出力装置に接続する必要があるため、今後もロボットでは多くの通信技術を扱う必要があると考えられる。

3.1 ロボット制御用シリアルバス TITech Wire

これまで紹介したロボット研究や他分野ですでに確立された通信技術や解決法に対して、目的が似ているシリアルバスを一から作ってしまうことは一見無意味で無駄な労力、つまり“reinventing the wheel”作業であると映るかもしれない。しかしながら、ほとんどの既存プロトコルは、(1) 汎用性が高いがロボットの制御に必要な機能の数多く

有する、(2) オープン化を提唱しているが細部まで仕様公開されていない、(3) 所有権問題でプロトコルを自由に変更できない、(4) 開発環境が高価、(5) 習得時間が長い、などの諸問題点を有する。そのため、知能ロボットの制御に最適化したプロトコルを追及することは有用だと筆者は考え、試行錯誤を繰り返しながら TITech Wire プロトコルの規格策定を進めている。

図 2 左側に TITech Wire ノードの基本構成例を示す。通信プロトコルはハードウェア記述言語（HDL）で設計し、FPGA（Field Programmable Gate Array）に実装する。また、LVDS（Low Voltage Differential Signaling）等の高速差動信号 I/O ポートを内蔵した FPGA 素子を使うことでトランシーバ IC を省くこともできる。この開発プロセスには高価な費用は必要なく、また集積度、小型化そして低価格化が進む最新のデバイスに迅速に対応できる利点がある。

TITech Wire の基本パケット（図 3）は、コマンド、アドレス、データ（ペイロード）、エラーチェックのフィールドを持ち、一般的な調歩同期式で構成する。現行では、パケットを LVDS 信号としてそのままバスに流し、4～20 倍のクロックサンプリングを行って受信する。このような方式でも 50 [Mbps] の安定な高速通信が実現できることを確認している。ただし、さらなる信頼性向上と高速化を目指し、今後はクロック情報をデータに埋め込む 8B/10B 符号化の導入も検討している。仕様の変更や拡張があった場合、FPGA のファームウェアを書き換えればよい。

アナログ入力（A/D）や出力（D/A）、そして各種デジタル I/O（PWM 出力、パルス入力、エンコーダ入力等）機

図3 TITech Wire のパケット

図4 極限環境適用型アクチュエータ実証ロボット (TITechWire と無線 LAN を利用)

能は開発当初から実現していたが、最近では TITech Wire に対応した 3 相同期式永久磁石モータ用ドライバも開発し、その有効性を長時間の恒温槽試験や寒冷地試験 (図 4) で検証した [13]。

なお、TITech Wire ではすべてのノードの入出力データをマッピングするルートノードをネットワーク上に置く。ルートノードは、PCI バスや USB2.0 バスを介して制御用のホスト計算機と通信する。ルートノードの特定のメモリを読み書きすることで、間接的に各ノードの入出力データをアクセスする仕組みになっているため、使用が簡単である。

4. お わ り に

ロボットでは、通信速度の要求が異なる、ビジョンセンサ、温度センサ、モーションコントローラ等、様々な入出力装置が混在する。そのため、高性能デバイスをロボットの各部に配置した体内 LAN 構成は高価になり、必ずしも最適なソリューションといえない。今後のロボットの製品化を促進するためには、他の産業分野同様、適材適所に各通信技術やデバイスを使うことが重要であると考えられる。

半導体技術やデジタル通信技術の発展により、通信速度が劇的に向上している。例えば、Ethernet はすでに 1 [Gbps] 規格が標準的であるが、次世代は 100 [Gbps] を目標に開発が進んでいる。無線 LAN でもすでに 100 [Mbps] を超える通信速度が達成されている。ロボットの運動制御系では極端な通信の高速化は必要なく、現在の技術範囲でも十分実用化は可能であると考えられる。しかしながら、様々な外界セ

ンサやアプリケーションに対応するため、今後も各分野の技術動向に注意する必要がある。

参 考 文 献

- [1] 福島 E. 文彦, 広瀬茂男: “人道的地雷探査システムの実用化に向けて—遠隔操作アーム搭載バギー車両 GRYPHON の開発—”, 計測と制御, vol.45, no.6, pp.529-534, 2006.
- [2] J. Kaiser and M. Mock: “Implementing the Real-Time Publisher/Subscriber Model on the Controller Area Network (CAN),” 2nd Int'l Symposium on ObjectOriented Distributed Real-Time Computing Systems, 1999.
- [3] F. Kanehiro, Y. Ishiwata, H. Saito, K. Akachi, G. Miyamori, T. Isozumi, K. Kaneko and H. Hirukawa: “Distributed Control System of Humanoid Robots based on Real-time Ethernet,” Proc. of IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.2471-2477, 2006.
- [4] T. Omichi, S. Shiotani and R. Miyauchi: “The Design of a Serial Communication Link for Built-in Servo Driver and Sensors in a Robot,” Proc. of the 8th Int. Symp. of Robotics Research, pp.185-194, 1997.
- [5] M. Fujita and K. Kageyama: “An open architecture for robot entertainment,” Proc. of the First Int. Conf. on Autonomous Agents, pp.435-442, 1997.
- [6] T. Miyai and S. Yuta: “Design and Implementation of Distributed Controller and its Operating System for Autonomous Mobile Platform,” Int. Conf. on Field and Service Robotics (FSR'97), pp.342-347, 1997.
- [7] N. Yamasaki and T. Matsui: “A Functionally Distributed Responsive Micro Controller for Distributed Real-time Processing,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol.2, pp.793-798, 1997.
- [8] 松井俊浩, 比留川博久, 石川裕, 山崎信行, 加賀美聡, 堀俊夫, 金広文男, 齊藤元, 稲田哲也: “ヒューマノイド・ロボットのための実時間分散情報処理”, 電子情報通信学会技術研究報告:実時間処理に関するワークショップ (RTP2004), pp.1-8, 2004.
- [9] 清水正晴, 奥村悠, 田原哲雄, 古田貴之, 北野宏明, 富山健: “小型・多関節ヒューマノイドにおける全身運動制御用インテリジェントネットワークデバイスの開発”, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.791-792, 2001.
- [10] 奥村悠, 古田貴之, 山中俊治: “ハルキゲニアプロジェクトにおける制御系のデザイン”, 国際交通安全学会誌, vol.32, no.1, pp.49-56, 2007.
- [11] 於久健太郎, 松坂要佐, 小林哲則: “ロボット用情報共有型システムバスと組み込み CPU 一体型小型モータコントローラの開発”, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.1271-1272, 2001.
- [12] 福島 E. 文彦, 滝田謙介, 広瀬茂男, 中村亨: “TITech Wire: ロボット制御用高速シリアル I/O の開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 予稿集, pp.1A1-A1(1-2), 2001.
- [13] 福島 E. 文彦, 広瀬茂男, 片桐正春, 片桐正和, 鈴木尊人, 三宅和司, 村田五雄, 古館栄次: “極限環境適用型アクチュエータユニットの開発成果と今後の展開”, 日本ロボット工業会 機関誌「ロボット」, vol.170, pp.11-14, 2006.

福島 E. 文彦 (Edoardo F. Fukushima)

1993 年東京工業大学機械物理学専攻修士課程修了。1994 年 8 月同大学工学部助手, 2006 年 11 月より現職の東京工業大学大学院理工学研究科准教授。博士 (工学)。2001 年 8~12 月スタンフォード大学客員研究員。2000 年日本ロボット学会第 5 回実用化技術賞受賞。移動ロボットの機構, センサ, 駆動や制御系, 人道的地雷探知除去ロボットの研究に従事。(日本ロボット学会正会員)