

組み込みネットワーク技術の動向と展望

高 正博*¹

Trend and Prospect of Embedded Network Technology

by

Masahiro TAKA

(received on November 30, 2010 & accepted on February 12, 2011)

Abstract

Embedded technology is widely used in cars, home electronics products, and so on. Network technology is a basic technology of the internet. Embedded network technology is that of bridging and implementing these technologies that make it possible to realize various application systems. This paper describes the trend and prospect of the embedded network technology as follows. Firstly, embedded network technology and systems are categorized as the viewpoints of embedded network sizes and communication systems of wired and wireless embedded networks. Secondly, applications of embedded network systems reported in public are described. Thirdly, the prospect of embedded network technology toward the future is discussed. Finally, it is stated that this paper is expected to be valuable as a reference for the R&D of future embedded network technology and systems.

Keywords: Embedded Technology, Embedded Network, Ethernet, LAN, TCP/IP

キーワード: 組み込み技術, 組み込みネットワーク, Ethernet, LAN, TCP/IP

1. はじめに

組み込みシステムとは「装置や機器に組み込まれた、それらを制御するコンピュータシステム」であり、その製品や機器の機能を実現するだけではなく、小型化・省電力化・高信頼化・高品質化・高機能化・コストパフォーマンス向上などの多くの効果をもたらすものである¹⁾。このような組み込みシステムを実現する技術が組み込み技術（ないしは組み込みシステム技術）であり、組み込みソフトウェアがその中心的な役割を果たしている。そして、組み込みシステムにおいて入出力信号や制御信号をやり取りするのが組み込みネットワークである。このような組み込みネットワークとしては、例えば車載組み込みシステムの制御系ネットワークや、家庭内 LAN で情報機器類を制御するネットワークなどがある²⁾。

特定の分野の組み込みシステムでは他の汎用機器との間の通信機能を必要としないことから、組み込みネットワークは独自の方式、ないしはその分野のデファクト標準（業界標準等）でよい。一方、組み込みシステムの構成機器を LAN などの汎用ネットワークに接続する場合、ネットワーク技術としてインターネットで用いられている通信方式や通信プロトコル（通信規約）を用いることができ、汎用性やコスト等の点でメリットがある。このような背景から、組み込みネットワークにインターネット技術を適用する流れが拡大している。

「いつでも、どこでも、何でも、誰でもがインターネットネットワークにつながるにより、様々なサービスが提供され、人々の生活をより豊かにする」ユビキタ

ス社会の実現に向けて、組み込みネットワーク技術は重要な構成技術となっている。一方、ユビキタス情報通信環境の実現に向けてインターネットの世界では、自前でサーバーを設置しないでネットワーク内の共有サーバーを利用するクラウドコンピューティングが利用され始めている³⁾。また、最近ではスマートフォンなどネットワークに接続される携帯情報端末が普及し、さらに次世代モバイル通信システムとして LTE (Long Term Evolution) の開発が進められている⁴⁾。このようなネットワーク技術の進展が組み込みネットワーク技術およびシステムの展開にも大きなインパクトを与えている。

最近「グリーン ICT」や「スマートグリッド」などが話題となっている。これらの動向は、今後組み込みネットワークの分野にも影響を与えるものであり、関連した研究開発の課題も多いと考えられる。

本文では、このような組み込みネットワーク技術およびシステムについてその動向を概観し、そこから見えてくる今後の組み込みネットワーク技術の研究開発の方向や課題について述べる。

2. 組み込みネットワーク技術の動向

2.1 組み込みネットワークの分類

(1) ネットワーク規模

情報通信ネットワークが情報を送受信するのに対して、組み込みネットワークは一般には制御系ネットワークとしてセンサデータや機器の制御信号をやり取りする。組み込みネットワークを通信範囲（制御情報等をやり取りするネットワークの規模）で分類すると、Fig.1 のように表

*1 情報通信学部組み込みソフトウェア工学科教授

すことができる。Fig.1 でセンサと制御対象が同一機器内の範囲のネットワークを CAN, その周辺の機器間のネットワークを PAN, 宅内, オフィス内や構内のネットワークを LAN, 都市や地域のネットワークを MAN, 世界規模のネットワークを WAN と呼ぶ。公衆網である MAN および WAN については, 将来的に組込みネットワークとして利用される可能性があることから Fig.1 に含めた。なお, 人間を中心にその周辺ネットワークという意味で, PAN を Personal Area Network とも言う。また, 宅内のネットワークを LAN と区別して, HAM (Home Area Network) と呼ぶこともある。

ネットワークの遅延は, 物理的な距離よりもむしろネットワーク内の中継ノードや処理ノードの数に比例して増大し, これが組込みネットワークの遅延となり適用上の制約条件となる。Fig.1 では概念的にネットワーク規模と比例して伝送遅延が増大するとしている。

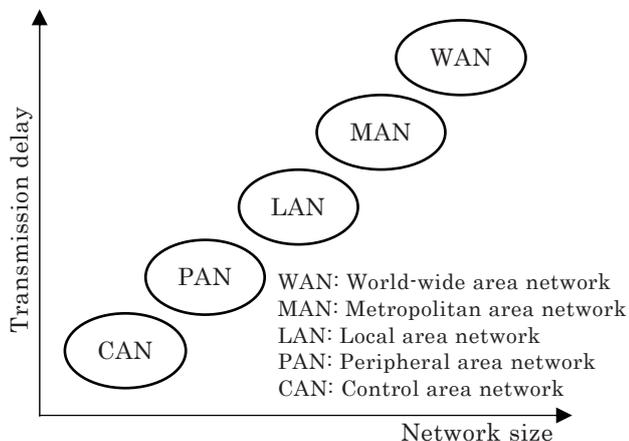


Fig. 1 Classification of embedded networks according to their network sizes

(2) 有線ネットワーク

ここでは有線ネットワークによる組込みネットワークについて述べる。有線の組込みネットワークに適用される通信方式および通信プロトコルは Table 1 のように分類される。

Table 1 Communication systems and protocols of wired embedded network

Communication system	Protocol (examples)
Serial interface, etc. (Non-IP)	RS232, RS485
Ethernet (IP via Internet)	CDMA/CD (TCP/IP, UDP/IP)

シリアルインタフェースはほとんど全ての PC で標準的に搭載されているデバイス通信規格で, モデムやセンサなどとの接続や計測機器制御などに使用される。シリアル通信は ASCII データの送受信を行うもので, RS232 および RS485 と呼ばれるインタフェース規格(プロトコル)がある。

Ethernet は現在最も広く使われている LAN の方式で

あり, CDMA/CD (Carrier Sense, Multiple Access with Collision Detection) アクセス方式(プロトコル)を採用している。Ethernet はデータリンク層に位置し, LAN などの通信用機器の NIC (Network Interface Card) に搭載され, 送信元および宛先 MAC アドレスによりデータのやり取りを行う。現在は PC や通信機器に止まらず, デジタルビデオカメラや家電製品にも搭載されるようになっている。Ethernet の上位レイヤであるインターネット層が IP であり, インターネットに接続される機器全てに用いられる通信方式(プロトコル)である。IP レイヤでは IP アドレスによりネットワークに接続されている機器を特定して IP パケットの送受信を行う。さらに, IP レイヤの上位のトランスポート層プロトコルである TCP ないしは UDP により, アプリケーションデータの送受信が行われる。

(3) 無線ネットワーク

以上の有線ネットワークによる組込みネットワークに対して, 組込みシステムにモビリティが要求される適用領域では, 組込みネットワークとして無線ネットワークが必須である。公衆通信網を利用する MAN および WAN では, 無線ネットワークの遅延は中継ノードを含むネットワーク全体の遅延特性に左右される。一方, LAN はネットワークの遅延量が推定でき, また, 配線が不要となることから LAN 領域の組込みネットワークには無線ネットワークが有効である。

無線方式による PAN および LAN の組込みネットワークには, 2.4GHz 帯の無線通信技術である 802.11b, Bluetooth および ZigBee が適用されている。Table 2 にこれらの無線通信方式の仕様⁵⁾を示す。

Table 2 Specifications of wireless communication systems using a 2.4GHz Frequency Band

	IEEE802.11b	Bluetooth	ZigBee
Application	Data trans., Ethernet	Speech, Peripherals	Monitoring, Controlling
Security	SSID, 802.1x	64/128-bit	128-bit AES
Battery life	A few hours	A few weeks	~1 Year
Number of nodes	32	7	63,535
Transmission distance	100-1,600m	10m	100-1,600m
Data rate	11Mbps	700k-2Mbps	20k-250kbps
Power consumption	700mW	100mW	30mW

IEEE802.11b は無線 LAN の通信方式であり, 有線 LAN の MAC 層に用いられる CDMA/CD によく似た方式の CDMA/CA (Carrie Sense Multiple Access with Collision) が採用されている。IEEE802.11b はスペクトル拡散方式を用いノイズに強いという特徴を持ち, ノート PC や PDA, スマートフォンなどの移動端末に用いられている。さらに IEEE802.11b と互換性を持ち 2.4GHz 帯で 54Mbps の伝送速度を実現する IEEE802.11g が標準化され, 無線 LAN ルータなどに使用されている。

Bluetooth は近距離の情報機器間で簡易に情報のやり

取りを行うために使用される。PC のマウスやキーボードを始め、携帯電話やヘッドフォン、家庭用ゲーム機のコントローラなど多様な分野で普及が進んでいる。最新バージョン（バージョン 4.0）では転送速度は 1Mbps であるが大幅に省電力化されており、家電製品などに搭載されたセンサとのデータ通信向けの仕様となっている。

Bluetooth は様々なデバイス、機器との通信に使用されるため、機器の種類毎に策定されたプロファイルと呼ばれるプロトコルを実装しており、同じ機能のプロファイルを持つ機器同士が通信できる。

ZigBee は両者に比べると通信速度が遅いが低電力であることから、組込みネットワークへの応用が期待されている。ZigBee プロトコルは IEEE802.15.4 で規定された物理層と MAC 層を採用し、ネットワーク層およびトランスポート層をカバーしている。ZigBee は親ノードが自動的に子ノードにネットワークアドレスを割り当てて接続経路を確立する。このようにネットワークを自在に構築、拡大できる点が特徴である。

これらの無線ネットワークによる組込みネットワークは、モビリティが必要な適用領域に加え、有線ケーブルの配線を避けたい適用領域に有効である。

2. 2 組込みネットワークの適用領域

組込みネットワークシステムはこれまで、Fig.1 のネットワーク規模の CAN および PAN の範囲が中心であった。具体的には、自動車の車載組込みネットワークや家電製品内組込みネットワークが挙げられる。このような機器内および機器相互での通信を行う従来の組込みネットワークでは適用領域が限定されているため、それぞれのシステムないしは製造メーカ、さらには業界独自仕様の通信プロトコルが使用され、デファクト標準となっている。

このような組込みネットワークの代表的な例が自動車に搭載される電子制御システムの組込みネットワークである⁶⁾。この組込みネットワークは車載ネットワークと呼ばれている。従来は、各自動車メーカ独自のネットワーク仕様が用いられてきたが、最近では開発期間の短縮やコスト削減のために業界標準とも言える制御系車載ネットワークが用いられるようになってきている。代表的な車載ネットワークである CAN (固有名詞として使用されている) は、ドイツの自動車メーカが提唱し欧州の代表的な自動車メーカが使い始め、続いて米国や日本の自動車メーカも採用し始めている。このようにして、CAN は車載ネットワークのデファクト標準となっている。

その後、CAN に比べコストパフォーマンスの良いバス通信を実現するシリアル通信プロトコルとして LIN (Local Inter-connection Network) 規格が策定された。LIN は主にボディー系の組込みネットワークとして実現されている。車載組込みシステムが広範囲化、高度化、高機能化するのに伴い CAN では不十分なことから、車載 PAN の高速化を目指して、欧米と日本の大手自動車メーカおよび電装機器メーカによって FlexRay と呼ばれる車載ネットワークの規格化と開発が進められた⁶⁾。今後は、自動車の高機能化、インテリジェント化に伴い、電子制御システムのアーキテクチャが従来の集中方式か

ら分散方式に代わっていくと考えられることから、分散方式との親和性が高い FlexRay が CAN に置き換わっていくと考えられる。

他の組込みネットワークには、機械・機器類の制御を行う制御ネットワークがある⁷⁾。これは工場自動化 (FA) のための制御ネットワークであり、工場全体や生産ラインごとの管理・制御情報を扱うネットワーク、製造機器さらにデバイスの制御を行うネットワークに階層化されている。このうち工場全体のネットワークにはインターネットのレイヤー 2 に用いられる Ethernet が使われる例が多いが、機器やデバイスのレベルになるとこの分野固有のネットワーク技術・規格が用いられている。

一方、インターネットの普及に伴い組込みネットワークの適用範囲も広がり、Fig.1 で示した LAN を組込みネットワークとして使用するアプリケーションが出てきた。具体的には、家庭内の LAN に家電製品や制御対象の機器を接続して、インターネット接続を使用する組込みネットワークシステムが開発されている⁷⁾。

インターネット接続機能を有するインタフェース機器が安価に入手できるようになったのに伴い、従来の PAN の範囲でもインターネットを利用するケースが増えている⁸⁾。また、監視制御の分野でシリアルインタフェースから無線通信によるリモート監視制御に移行する傾向が見られることから、インターネット利用の広がりがうかがえる。Fig.2 に上述した組込みネットワークの各通信方式/プロトコルの適用領域を示す。

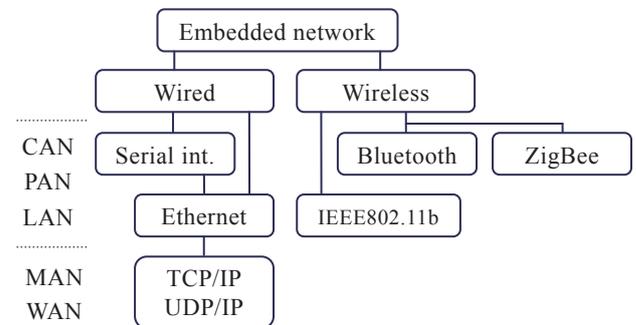


Fig.2 Application areas of communication systems/ protocols in embedded network

組込みネットワークにはリアルタイム性が要求されるため伝送遅延が問題となる。近年インターネットの通信速度が飛躍的に増大したため、ネットワークの特性として遅延がさほど問題とならなくなったことも導入が促進される要因である (通信速度に対する要求条件が厳しい適用領域は除く)。さらに、組込みネットワークにインターネットのネットワーク機能を搭載することで利便性を向上させることができる。また、開発コストの低減およびスケールメリットによる製品コストの低減などメリットが大きい。一方、スマートフォンや携帯情報端末などの端末技術の進展が、無線ネットワークの利用を後押ししている。このような背景から、組込みネットワークにインターネットおよび無線ネットワーク技術を適用する流れが拡大している⁸⁾。

2. 3 組込みネットワークの応用例

(1) 有線による組込みネットワーク

LAN 領域の組込みネットワークシステムには、インターネットの通信方式をサポートするインタフェースデバイスとして PICNIC (PIC Network Interface Card) が用いられる。PICNIC はワンチップマイコンに Ethernet および TCP/IP, UDP/IP のプロトコルスタックを内蔵するデバイスを組み合わせてボード化したものである⁹⁾。このような PICNIC の機能に Web サーバー機能を取り込んだデバイス・サーバーと呼ばれる XPort (米国 LANTRONIX 社製)⁹⁾ や ProDigio (日本ティアンドディ社)⁹⁾ などがある。これらのデバイスをインターネットに接続し、必要な処理を行うアプリケーションソフトウェアを Web サーバー上に実現し、クライアントの PC や携帯端末のブラウザから制御のための入力を行う。応用例としては、XPort を用いて家庭内などの遠隔の機器(家電製品等)をインターネット接続し、携帯端末のブラウザから制御を行う応用例が示されている⁹⁾。また、気象観測用センサに ProDigio を接続して、定期的に気象観測データを取得して表示すると共に、基準値を超えると警報を出す応用例が示されている⁹⁾。

また、携帯端末のネイティブな機能や携帯端末上のアプリケーションにより、例えば位置情報等のデータを利用してサーバーサイドでデータ処理を行った上で XPort から機器類の制御を行うアプリケーションが考えられる。なお、より高度な処理を実現するアプリケーションの場合に、クライアント側やクラウド上の Server にアプリケーションプログラムを実装して制御することが考えられる。これらのアプリケーションの構成イメージを Fig.3 に示す。

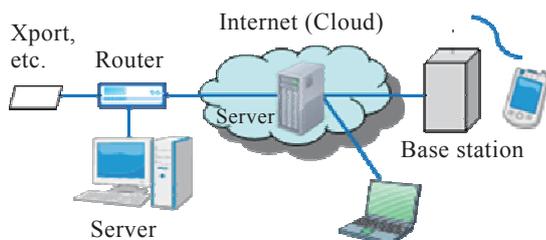


Fig. 3 Embedded network application system

(2) 無線による組込みネットワーク

ここでは、Table2 に示した無線通信方式 IEEE802.11, Bluetooth および ZigBee について、組込みネットワークへの応用例を述べる。

IEEE802.11 はノート PC の無線 LAN 接続用に開発されたものであり、その消費電力から、移動する組込みシステムへの搭載には問題がある。そのため、消費電力の小さい Bluetooth や ZigBee に比べ、応用例は余り見受けられない。但し、据え付けで既存のインターネット接続を利用する組込みシステムには、インターネット環境をそのまま利用できる点で適用可能な領域もあると考えられる。

Bluetooth による組込みネットワークは、近距離情報

機器間での簡易なデータ送受信が基本の Bluetooth の特性から、従来の RS232C などのシリアルインタフェースの代替が一般的である。Bluetooth で家庭内 LAN (HAN) に接続されたデジタル情報家電などの組込み機器をネットワーク化するシステムのプラットフォームを開発したとの報告がある⁷⁾。

また、在宅医療システムにおいて、RS232C および USB 接続された心電図、血圧計などの生体情報センサのデータを USB-Bluetooth 変換モジュールで無線化して送信する組込みネットワークが開発され、実証実験が行われている¹⁰⁾。

Bluetooth を組込みネットワークに使用する応用例の 1 つに家庭用ゲーム機がある。Wii と呼ばれるゲーム機のコントローラである WiiRemote に Bluetooth が搭載されており、近くの Wii 本体または PC に搭載されている Bluetooth ホストアダプタにコントロールデータを送信してゲームをおこなったり、PC 上のアプリケーションを操作する。WiiRemote には XYZ の 3 軸モーションセンサーと赤外線を利用した 2 次元位置センサが実装されており、位置と加速度のデータを送信することができる¹¹⁾。WiiRemote を利用した例として、巨大なイカ型ロボットの操作、天井から自由に氷柱を生やす作品、ネオイの吹き矢で遊ぶゲーム、などが紹介されている¹¹⁾。

一方、組込みネットワークへの ZigBee の応用例が幾つか報告されている^{5),12)}。これは、ZigBee の特徴である低消費電力、低コストおよびネットワーク構築の容易さから、組込みネットワークへの適用性が高いことによる。具体的には、風力発電の風力タービンセンサからの情報を ZigBee で運用者に送信し、その処理結果に基づく制御信号を ZigBee で風力タービンに送信する組込みネットワークに、また、ゴルフ場の排水管理やフィットネス機器の動作監視などを行う組込みネットワークに応用する例が示されている⁵⁾。また、ZigBee による家電製品のリモート操作への応用も報告されている¹²⁾。

3. 組込みネットワーク技術の展望

組込みネットワーク技術を取り巻く技術動向について概観し、それらによってもたらされる影響等も考慮しつつ、今後の展望について考察する。

近年、地球環境保護の観点からのグリーン ICT^{13),14),15)} やグリーンコンピューティング¹⁶⁾ の概念が注目されている。これらはいずれも地球環境負荷を軽減するために ICT やコンピュータシステムを利用する (Green by ICT/ Computing) ことや、ICT やコンピュータシステムの消費電力削減、リサイクルなどを行う (Green of ICT/Computing) ことを意味している。

前者については、近年米国においてスマートグリッドが推進されている。スマートグリッドは電力系統運用のスマート化であり、電力供給の安定化、最適運用と電力利用の最適化 (省エネ化) などにより、クリーンな社会の電力インフラを構築することが狙いである¹⁷⁾。

後者は、クラウドコンピューティングによるサーバーの効率的な利用とデータセンターの集約化により、低消

費電力化を実現するものである。これはグリーン ICT とグリーンコンピューティングの利点を合わせたものとして、グリーンクラウドコンピューティングの名称でも呼ばれている¹⁸⁾。

これらのグリーン対応（地球環境への配慮）の必要性はエンベデッド技術においても同様であり、グリーンエンベデッドとも言うべき概念が考えられる。すなわち、グリーン ICT やグリーンコンピューティングにより組込みシステムや組込みネットワークのグリーン対応を図るものである。上述のスマートグリッドにおいて次世代電力計量インフラとされるスマートメータ¹⁷⁾は、このようなグリーンエンベデッドネットワークとも捉えられる。

スマートグリッド向けの通信プロトコル 6LoWPAN (IPv6 over LoW Power wireless Area Networks) は小電力の無線ネットワークにおいて IPv6 を動作させるためのプロトコルであり、米国で標準化が進められている¹⁹⁾。PC の数十～数百倍の機器が接続されると考えられるスマートグリッド・ネットワークでは、アドレス空間が 128 ビットの IPv6 を用いる必要がある。IPv6 を IEEE802.15.4 上で動作させるため、本来 IPv6 が想定している従来の下位層の Ethernet (IEEE802.3) や無線 LAN (IEEE802.11) と IEEE802.15.4 との特性上の相違を吸収するために 6LoWPAN プロトコルが導入される。上述したように 6LoWPAN は IPv6 を使用する小電力の無線ネットワークプロトコルであり、IPv6 のセキュリティ機能も考えれば、スマートメータ以外の組込みネットワークに適用できる有効な通信方式／プロトコルであり、今後適用の拡大が期待される。

このようなスマートグリッドにおけるスマートメータに対して、我が国では家庭やオフィスなどにおける電力マネジメントの次世代インフラ技術として「エネルギーの情報化」が提唱されている²⁰⁾。このような構想の下で、家庭内などの電力消費を監視、制御して家庭内のスマート化を行うスマートタッグの開発が行われている²¹⁾。

センサーネットワークの技術領域は、温度や湿度などの環境情報、対象物の状況や変化などの監視情報をセンシングするネットワークや、アクチュエータを制御するためのセンサーネットワークなど幅広い。組込みネットワークを広く捉えれば、このようなセンサーネットワークも組込みネットワークと言える。参考文献(22)では組込みネットワークをセンシング、プロセッシング、アクチュエータに分けて、それらの位置をここ (Here) と向こう (There) の組合せで分類し、技術課題を整理および検討している。センシング部 (センサノード) が移動し、プロセッシングがネットワーク内で分散して行われ、複数のアクチュエータが同時または連携して動作するなど、極めて広い概念で捉えられている。そして、その未来像としてスマートコミュニティの実現を目指すとして述べられている。また、参考文献(23)では、上述したグリーン ICT やグリーンコンピューティング技術の進歩に加え政策的な観点からも、今後は低炭素社会を実現するためのパラダイムシフトが進み、ユビキタス社会からスマートコミュニティへと展開していくとの指摘がなされてい

る。

さらに、組込みネットワークシステムにインパクトを与えると考えられる技術開発として、国際標準化の下で各国において実用化が進められている次世代の移動通信ネットワークシステム LTE (Long Term Evolution)がある³⁾。LTE は屋内外シームレスに高速でインターネット接続する高速移動通信ネットワークであり、日常生活における利便性の高いアプリケーションが可能となる。LTE を利用して、LAN や MAN、さらには WAN の規模で組込みネットワークシステムを実現することも十分に考えられる。

一方、MAN や WAN の規模での組込みネットワークシステムでは、通信のリアルタイム性と信頼性の問題が顕在化してくる。ベストエフォートを基本としたインターネットでは、これらの問題は本質的には解決されておらず、組込みネットワークの応用技術および応用システムの研究開発と合わせて今後の重要な課題である。

組込みシステムはハード・ソフトの関連技術の進歩に伴い、多機能化・複合化・ネットワーク化が進んでいる。一方で、ユビキタス社会、グリーン社会の実現に向けて、関連する技術について研究開発が進められている。これらの技術の進展に向けて、組込みネットワーク技術が益々重要な役割を果たすと考えられる。

以上述べた組込みネットワーク技術の展開を Fig.4 に示す。今後の展開シナリオをスマートエンベデッド構想と名付け、組込みネットワーク技術の新しい価値の創造に向けて研究開発を推進することが望まれる。

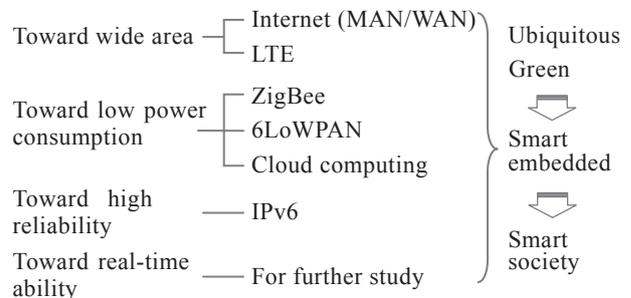


Fig.4 Evolution of embedded network technology

4. おわりに

本拙文では、組込みネットワークの新しい応用技術およびシステムの研究開発に参考となることを目指して解説を試みた。組込みネットワーク技術の応用システムは、日常生活の色々なシーンで、または企業活動などの分野で、今後その貢献度が益々増大すると考える。このような組込みネットワークの応用研究はアイデアが鍵となることから、柔軟な発想でユニークなアプリケーションの研究開発を展開することが望まれる。筆者も、その一端を担っていきたいと考えている。

最後に、本解説をまとめるに当たり有意義なご意見を頂いた情報通信学部組込みソフトウェア工学科・渡辺晴美准教授に感謝致します。

参考文献

- 1) 戸川 望 編著「組込みシステム概論」CQ出版社, 2008
- 2) 情報処理推進機構ソフトウェア・エンジニアリング・センター監修「図解でわかる組込みシステム開発のすべて」日本実業出版社, 2007
- 3) 中田 敦 他「クラウド大全」, 日経BP社, 2009
- 4) 近藤 誠司 他: モバイル通信の最新技術LTE[1]-[12], 日経コミュニケーション, 2009.10.1~2010.3.15
- 5) 江川将峰: ZigBeeの可能性を探る, 組込みプレス Vol.16, 技術評論社, pp68-79, 2009
- 6) 佐藤 道夫「車載ネットワーク・システム」CQ出版社, 2010
- 7) 木村 実 他: ユビキタス情報社会を支える組込みネットワーク技術, 日立評論, pp53-56, 2005
- 8) トランジスタ技術編集部編「LANによるハードウェア制御」CQ出版社, 2008
- 9) 日高 亜友 他「センサとインターネット接続」CQ出版社, 2006
- 10) 田中 義人: 組込み技術の農業、医療、土木への応用, 第5回地域連携研究会, 2010, http://www.nias.ac.jp/eco_town/PDF/100827-2.pdf
- 11) 白井 暁彦 他「WiiRemoteプログラミング」オーム社, 2009
- 12) 松本信幸: ZigBeeモジュールKM-154Aを使った電気機器リモート制御の実験, Interface Dec. 2009, CQ出版社, 2009
- 13) 月尾 嘉男 他「グリーンICTの現状と展望」, 電子情報通信学会東京支部シンポジウム, 2009
- 14) 東京大学グリーンICTプロジェクト, <http://www.gutp.jp/about/>
- 15) 松野 泰也: ICTによる環境負荷の軽減～『グリーンICT』という考え方～, NTTコミュニケーションズ, <http://www.ntt.com/business/kankyo/data/interview01.html>
- 16) IT情報マネジメント用語辞典: グリーンコンピューティング, アイティメディア, <http://www.atmarket.co.jp/aig/04biz/greencomputing.html>
- 17) 村瀬 一郎 他: 米国を中心としたスマートグリッドの動向, 情報処理学会特集 エネルギーの情報化～ITによる電力マネジメント～, 情報処理 Vol.51, No.8, pp924-985, 2010
- 18) 林 雅之: 政府が推進するグリーン・クラウドコンピューティング, アイティメディア, <http://blogs.itmedia.co.jp/business20/2008/09/post-1800.html>
- 19) 村上 哲也: IPv6を小電力無線に適用 通信範囲を極限まで絞る, 日経エレクトロニクス, pp93-105, 2010.
- 20) 松山 隆司: エネルギーの情報化とは - 背景, 目的, 基本アイデア, 実現手法 -, 日経エレクトロニクス, pp926-933, 2010
- 21) 塚本 昌彦 他: スマートタップの共通仕様化に向けて, 情報処理学会特集 エネルギーの情報化～ITによる電力マネジメント～, 情報処理 Vol.51, No.8, pp934-942, 2010
- 22) 中澤 仁 他: センサアクチュエータネットワークの情報処理基盤, 情報処理学会特集 センシングネットワーク, 情報処理 Vol.51, No.9, pp1127-1135, 2010
- 23) 柏木 孝夫: 次世代エネルギーとスマートコミュニティ構想, 特別講演2S-p01, 第82回 2010年度春季低温工学・超電導学会, 2010