

Ethernet LANを用いた知的適応構造の概念

Smart Adaptive Structures using Ethernet LAN

正 轟 章 (東工大)

Akira TODOROKI

Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayam, Meguro-ku, Tokyo

E-mail: atodorok@mes.titech.ac.jp

Smart structures for health monitoring is noticeable technology for advanced composite structures. For the health monitoring, embedded optical fiber sensors are getting popular. For the practical objectives of health monitoring, several kinds of sensors are required, and these sensors are not limited to optical fiber sensors. The new technology for making conventional sensors distributed ones is required. The present study proposes the ethernet LAN technologies for the sensor integration technology. The present paper addresses the ethernet LAN technology for the health monitoring, and advantages of adoption of ethernet LAN. As an example, dynamic strain of a composite cantilever is measured by using this new system.

Key words : Ethernet, LAN, Smart Structure, Composites, Adaptive Structures, Health Monitoring

1. 緒言

多数のアクチュエーターを配置して構造の形状や機能を外力などの環境に適応させる適応構造や多関節再構成ロボットなどではアクチュエーターまでの配線をアナログ線で配置した場合には構造の付け根部分や分岐点などで巨大なリード線の束を取り扱わなければならない、構造内部に収納することすら不可能になってしまう。また、構造物にセンサーを取り付けて構造健全性をリアルタイムに評価するヘルスマonitoringはスマート構造の中で、重要な技術課題の一つである。複合材料では特に目視できない層間はく離が発生するため、信頼性の観点からもヘルスマonitoringは重要である。ヘルスマonitoringには分布型センサーの光ファイバーセンサーを埋め込み、多点ひずみ・温度を測定する方法が多く用いられている。しかしながら現実のヘルスマonitoringには液量計や回転計、ひずみゲージなどの多種類の従来型センサーを多数設置する要求がある。これらの多種類かつ多数のセンサーを分布させると、アナログリード線の引き回しが非常に面倒になるばかりでなく、列車の車両編成がえや機器の部品変更などの際に多数のアナログリード線の接続変更が要求され、ヘルスマonitoringは非現実的ともいえる。

このような背景から、従来型のセンサーやアクチュエーターを容易に引き回し可能かつ接続変更が容易な手法として近年インターネットで活用されているEthernet LANに着目し、ヘルスマonitoringのセンサーシステムインテグレーション技術としてのEthernet LANの可能性について検討を加え、実例を示すことが本研究の目的である。

2. ネットワーク技術を用いた現状

センサー情報をEthernetで転送することについては既にいくつもの研究例がある⁽¹⁾⁻⁽³⁾。USAではTateらが1993年に退役上陸用艦艇Shadwellを使用して火災時のデータを取るため、艦艇内に600のセンサーを配置し、引き回しの容易さとノイズ環境に対する強靭さからデータ転送に10Base2のEthernet LANを用いることを推奨している⁽¹⁾。

BallardとChen⁽²⁾らはN.Y.のOrchard Parkの電光掲示塔の風荷重もモニタリングをケーススタディーとしてセンサーを取り付けモニタリングを行った。センサーデータはPCに取

り込まれ、モデムを介してWorkstationにKermitプロトコルでデータ転送される。Workstationではデータを整理し、それをinternetにWebを通して公開する。このようにすることで、モニタリングをinternetを介して行うことを実験している。

これらはいずれもデスクトップPCにAD変換カードとEthernetカードを搭載し、データ通信しており機器のヘルスマonitoringという観点からは実用的でない。近年開発されたセンサー直結型のインテリジェント端末はAD変換CPU、メモリ、Ethernetをすべて小型化している^{(3),(4)}。本研究ではこのインテリジェント端末を用いてヘルスマonitoringへの適用の実用性を検討した。

機械加工分野においてはDaniel⁽⁵⁾やWinkler⁽⁶⁾らが工場内の工作機械の監視用センサーやカメラのデータ送信のためにEthernetを使うことを提案し、既に実用化された例を示している。これらではランチボックスサイズに小型化されたEthernetカード+CPU+メモリ+A/Dボードの統合システムを利用している。WinklerはRS-232Cなどのシリアル転送方式との比較についても述べており多数のセンサーを1本のEthernetで接続できるEthernet方式の有利性を指摘している。

機械加工分野では既に類似のDeviceNet⁽⁷⁾が存在する。これはCAN (Controller Area Network) と呼ばれるBosch社が車両のABSやエアバックの制御の配線のために開発したリアルタイム性を重視したデータ送受信プロトコルを用いている。CANではデータを小さなパケットに分割してシリアル回線で転送するピアツーピアのネットワークである。転送速度は125kbps~500kbps、ノード間距離は125kbps時に500m、500kbpsで125mである。CANでは11ビットのCANIDを使用し、そのうち6ビットがMACIDであるため最大接続数は64ノードである。接続されるデバイスはネットワークから電源が供給される。DeviceNetはEthernetに類似しているがデータ送信のコリジョン発生時の対応が異なっている。コリジョン発生時には11ビットIDの低いほうが優先順位が高いとみなされ、リアルタイム性が確保される。DeviceNet利用には専用チップが必要であり、IntelやMotorola、Phillipsから市販されている。DeviceNetはEthernetの強力なライバルではあるが、Ethernetとの比較は後述する。

United AirlinesのB777ではNational Semiconductor社製の新型光ファイバーEthernet Tipを搭載し、旅客機の制御情報、

アクチュエータ制御から旅客用のビデオまでを光ファイバー Ethernet LANで実現する予定であることを述べている⁽⁸⁾。

このように分布型センサー/アクチュエータを利用するシステムはアナログ式からEthernetを用いたデジタルパケット通信方式に現在転換しつつある。しかしながら適応構造やヘルスマonitoringへの積極的適用例はまだない。これらの分野への適応は今後増大すると思われる。

3. Ethernet LAN

3.1 Ethernet LANの動作原理

Ethernet/802.3規格は伝送速度10Mbpsのコンピュータネットワーク用デジタル通信の標準的なLAN仕様である。Ethernet LANはコンピュータネットワークのためのパケット通信の7層分割された通信システムの最下層2層(物理層, データリンク層)の規格である。インターネットにおいてはこの上のネットワーク層, トランスポート層でTCP/IPプロトコルが使用されている。TCP/IPプロトコルについては後述する。

Ethernetでは任意の2ステーション間の最大距離は2.8km, 最大ステーション数は1024個である。ルーターを使用してサブネット化することによりネットワーク全体の長さやステーション数を増加させることが可能である。

Ethernetでは半2重通信が採用されている。すべてのデータはデータリンク層でデータリンクフレームにパケット化される。データリンクフレームでは先頭12バイトが宛先アドレス, 次の12バイトは発信アドレス, 4バイトがプロトコル型, 次の92~3000バイトがユーザデータ, 最後の8バイトがフレームチェックシーケンスとなっている。3000バイトを超えるデータは複数のパケットに分割される。

Ethernetではあるステーションが送信中はネットワーク全体にパケットが送信されるため, 1ステーションに占有されてしまう。しかし転送速度が10Mbpsもあるため, 秒単位では全ステーションに均等の通信機会を分配している。あるステーションが送信中に他ステーションが送信を試みるとネットワークコリジョンが発生し, 既に送信中のデータも破壊されてしまう。コリジョンは通常自動的に検出され, 乱数で設定された待ち時間後に再送信を試みることになっている。このためリアルタイム性に関してはEthernetは問題点を有している。また, 全てのステーションが平等の権利を有しているため, データ送受信に際し, コリジョン発生時に優位性をもたせることはできない。

3.2 接続規格

Ethernetには10-Base-5, 10-Base-2, 10-Base-T, 10-Base-Fの4種類のケーブルがある。

10Base5と10Base2は同軸ケーブルを使用しており, ノイズに強く, バストポロジの接続に適用される。10Base5では, 最大セグメント長が500mであり, リピーターを使用することで1500mまで延長可能である。10Base5にコンピュータやハブを接続するにはトランシーバを取り付ける必要がある。トランシーバは最低2.5m間隔でトランシーバケーブルは50mまで許容される。10Base5の同軸ケーブルの絶縁破壊電圧は最低270Vであり, 落雷時の屋外での電圧差には対応できないため, 屋外での使用は進められない。10Base2はBNCケーブルを使用しており, 最大セグメント長が185mである。リピーターを使用することで更に延長することは可能である。10Base2ではBNCのTコネクタで接続を行う。

10Base2は配線が楽であるが一個所の接続不良が全体のネットワークに障害を与える。

10BaseTはシールドなしのケーブルであり, 引き回しは楽

である。通常はハブを用いてスタートポロジの接続を行う。接続も楽であるが電磁ノイズに弱い。

10BaseFLは850nmのマルチモード光ファイバーを使用する。10BaseFLでは最大セグメントが2000mまで, FPの場合には500mまで使用できる。10BaseFはノイズに非常に強いため屋外の配線に適しているがその反面, 途中での接続は困難である。

3.3 TCP/IPプロトコル

TCP/IPプロトコルはEthernetの上のネットワーク層, トランスポート層の規格であり, インターネットで使用されている。ネットワーク上のホストはデータリンクフレーム中にIPデータを含めて送信する。TCP/IPプロトコルでは, ホストを32ビットのIPアドレスで区別する。送信IPホストは宛先IPホストが同一ネットワーク上にあるときには直接送信し, 他ネットワークにある場合にはルーターに送信する。ルーターはルーティングテーブルを参照して目的のIPホストに送信する。ルーターが動的ルーティングサービスを採用している場合, ルートに障害が発生した場合でも自動的に別ルートを探して送信することができる。

4. 知的構造物への適用

4.1 インテリジェントターミナル(SmartLink)

Keithley(<http://www.keithley.com>)から長さ169mm, 幅35mm, 高さ28mmのA/D変換ボード, CPU, メモリ, シリアルデータ伝送を備えたインテリジェントターミナルが市販されている(図1参照)。RS-422などのシリアルデータ伝送からEthernetインターフェースへはデータコンバータを取り付ける。SmartLink1台から最大3チャンネルのブリッジ(ひずみゲージ, 加速度計など), または8chのDCが12bit-16bitで取り込まれ, 15000個の測定データがメモリにストレージされる。最大取り込み周波数は33kHzである。重量は250gである。使用可能温度は-5~85である。ただし, トランスポート層にTCPではなくUDPを用いているため経路制御やデータ抜けなどを感知しない。また4chのデジタルOutputも有している。



Fig.1 SmartLink by Keithley



Fig.2 NetEye by Axis

4. 2 インターネットカメラ

インターネットに直接接続し、外部からの要求によって静止画像をインターネットに送信する小型インターネットカメラ（CCDカメラ+メモリ+CPU+Ethernet一体型）は既にAXISからNetEyeとして市販されている。大きさは約15cm×10cm×4cm程度であり、直接10BaseTのケーブルを差し込む。これを図2に示す。既にプログラムを内蔵しており、JAVAを用いることで2秒間隔程度で擬似的な動画撮影も可能である。本来監視カメラであるが航空機の外側などに取り付けられば飛行中の姿勢制御の実態をパイロットがコックピット内のPCからWebで監視・記録することができる。また人間が入れない個所などにあらかじめ取り付けしておくことで人間の目視観察の代用にも使用できる。コスト的にもセンサー取り付けと同等程度である。

4. 3 EthernetLANによる知的構造

SmartLinkなどの小型インテリジェントターミナルを用いることで、PCを使用せずにセンサーデータを直ちにデジタルデータにしてパケット化してEthernet LANで伝送することが可能である。リニアモーターカーにおけるヘルスマニタリングシステム概念図を図3に示す。SmartLinkではデータ経路制御機能がないため、車両ごとにサブネット化し、サブネットごとにPCをセンサーコントローラーとして使用する。このようにEthernet化することで以下の利点が得られる。

- (1) デジタルデータ転送であるのでノイズに強い。10BaseFを用いればノイズの影響を全く受けない。
- (2) TCP/IPプロトコルで転送するため多数のセンサーを1本のケーブルで接続できる。転送データは全てIPアドレスがパケット中に挿入されており、データ解析者はIPアドレスとセンサー/アクチュエータ位置対応表だけ所有していればよい。
- (3) 車両編成替えなどによるネットワークトポロジー変更もケーブル1本の接続変更で対応可能である。
- (4) DC入出力のアクチュエーター&センサーであれば種類に無関係に複数の種類のセンサー/アクチュエータを分布型システムとして作成することができる。
- (5) センサー/アクチュエータ故障はLANシステム全体に影響しない。故障個所を容易に見出し交換することができる。このためセンサー/アクチュエータの信頼性向上を目指した埋め込みは必要ない。
- (6) センサー/アクチュエータの追加、削除がIPアドレス設定だけで容易にできる。
- (7) 複数ケーブルの敷設とサブネット化することでケーブル切断時などのネットワーク障害をRIP機能のルーティング変更により自動的に予備回線に変更可能である。
- (8) Ethernet LAN対応カメラを取り付けて目視による点検が可能である。
- (9) 既にInternetで確立された技術であり、広く用いられているためコストも低い。

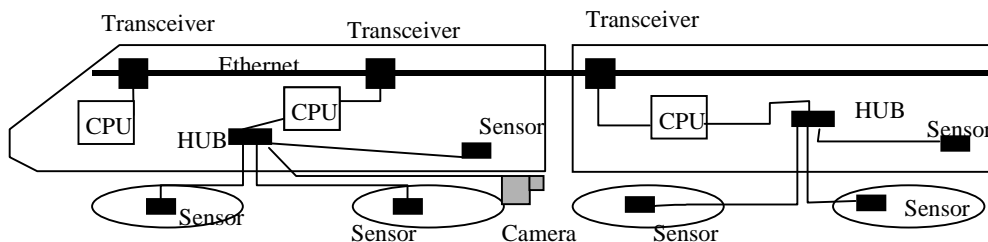


Fig.3 Schema of health monitoring system via Ethernet LAN

4. 4 DeviceNetとの比較

DeviceNetは前述したように、車や機械加工などの制御用ネットワークとして発展している。プロトコルもEthernetと類似しており、情報系ネットワークのEthernetと機械制御系ネットワークのDeviceNetというすみわけが進展している。これらを比較して、その長所短所を以下にまとめる。

- (1) リアルタイム性ではDeviceNetが優れている。ただし、Ethernetでもネットワークの転送速度がGbpsオーダーになれば制御系のリアルタイム性に問題はない。Ethernetではサブネット化することとPC側からのデータ送信制御で技術的にコリジョンを回避できる。
- (2) 転送速度では圧倒的にEthernetが優れている。Ethernetではマルチメディア転送も考慮された新規格が実用化されており、画像情報などでは圧倒的にEthernetが優位である。
- (3) アクチュエータへの電力送電などではDeviceNetがすぐれている。Ethernetは所詮情報ネットワークであり、今後も電力送電までは考慮されていない。
- (4) DeviceNetでは特別にDeviceNet対応センサー/アクチュエータが必要である。現状では機械加工用のアクチュエータや光電センサー程度しか接続できない。Ethernetでは既にインテリジェントターミナルは市販されている。
- (5) プロトコル上の問題からDeviceNetでは64個以上のターミナル接続は不可能である。Ethernetではサブネット化すれば無制限である。
- (6) Ethernetでは複数ネットワークのルーティングが可能であり冗長性が高いがDeviceNetではピアツウピアであり一個所のネットワーク破損が全体のネットワークに問題を及ぼす。

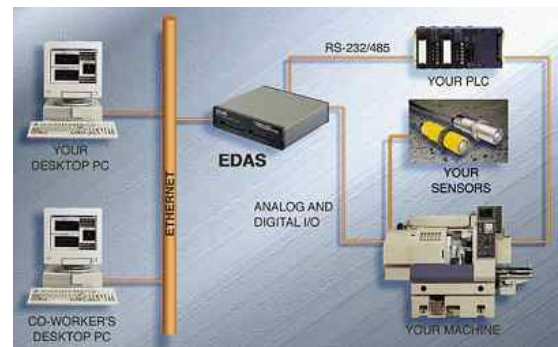


Fig.4 Factory network by Ethernet using EDAS⁽⁴⁾

以上の比較から、工場内のアクチュエータ/センサーだけのネットワークや車などの小型構造のブレーキシステムなどリアルタイム性を最重要とする部分にはDeviceNetが優れているが、静止画像なども送受信できることからヘルスマニタリングではEthernetの10BaseTで十分である。将来的にはGbps程度の高速度LANではリアルタイム性も問題なくなると判断される。事実機械加工分野でもEthernetを採用する

傾向(図4参照)もある⁽⁵⁾。今後のマルチメディア対応の高速LANでは動画像も送信可能であり、将来性という観点からもEthernetが優位である。

5. 複合材料梁の動的ひずみ測定

本システムの検証のため複合材料一方向積層板の片持ち梁にひずみゲージを取り付け、PC側からのコントロールによるひずみ測定システムを検討した。用いた複合材料はT300/epoxy, 16層0°積層板である。長さ250mm, 幅20mmの試験片の片側を固定し、長さ200mmの片持ち梁を作成した。この片持ち梁の固定端から10mmの点にひずみゲージを貼りつけた(図5参照)。この梁をハンマーで加振し、ひずみ測定を実施した。

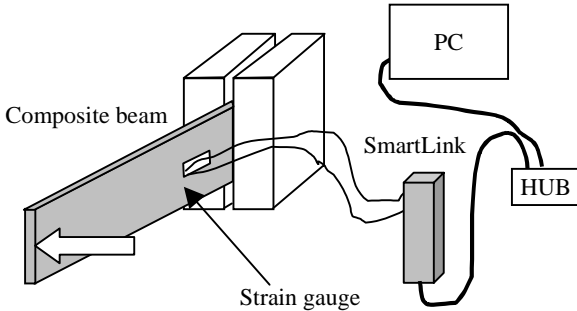


Fig.5 Strain measurement system for Composite beam

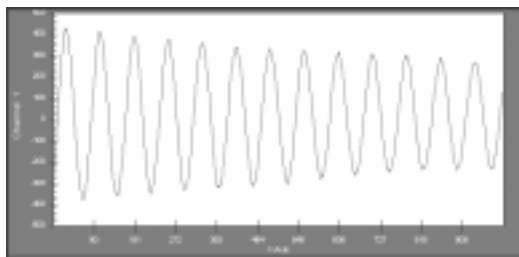


Fig. 6 Measured strain data via Ethernet

測定はPC側から制御して300 μ secごとにSmartLinkにデータ送信命令を送り、データを受け取る方式で実施した。得られた結果を図6に示す。データ送信命令間隔を変えて最短時間を測定した結果、現在のところ最短サンプリング間隔は35 μ secであることが明らかになった。

6. JAVA Beansによるソフトウェアソケット

Ethernetは知的適応構造のセンサー/アクチュエーターへのアクセスに対するハードウェアおよびプリミティブなソフトウェア上のスタンダードである。近年インターネット社会において共通のコンピュータ言語として市民権を得つつあるJAVAにおいてデータの収集、送信、初期化、診断などの手続きのエージェント化を進める事でユーザーはインターネットのブラウザを覗くだけでヘルスマonitoringが可能となる環境も夢ではなくなる。知的構造におけるソフトウェアソケットの提案は既に三木らによってなされており⁽⁹⁾、この具体的発展例となりえる。

JAVAはオブジェクト指向言語であり、多種類のEthernet上のセンサー/アクチュエーターに同一のインターフェースでアクセスするオブジェクトを作成することでハードの差異を吸収するソフトウェアソケットを作成することができ

る。JAVAにおいては汎用的なソフトウェアはBeansとして登録し、ライブラリとして利用できるようになる。

7. 将来の知的構造

EthernetLANによる知的構造はセンサー/アクチュエータの多種類化をもたらすことが容易に創造できる。単一のセンサーによる損傷検出で十分な精度を得られない場合でも、複数の種類のセンサーを組み合わせる事で低コストで高い信頼性のヘルスマonitoringが可能となる可能性も十分にありえる。適応構造においても、同一種アクチュエータの分布ではなく多種類のアクチュエータの分布によって新しい展開が出現する可能性も否定できない。

8. 結論

知的適応構造のデータ送受信にEthernetLANを使用するシステムインテグレーション構想について、現状紹介とDeviceNetとの比較検討を行いながら有効性を述べた。Ethernetは現在でも進歩しつつあり、将来性という観点からDeviceNetよりも有効である。またEthernetの欠点であるリアルタイム性についても高速LANとサブネット化、PCによるデータ送信制御を用いることで克服可能であることを示した。

参考文献

- (1) Tate, D.L. and Williams, F.W., "Ethernet Options for the Ex-USS Shadwell", NRL Letter Report 6180/393A.1, July 1, (1993). <http://www.ait.nrl.navy.mil/DamageControl/>
- (2) Ballard, C.M. and Chen S.S., "Automated Remote Monitoring of Structural Behaviour via the internet", Proc.SPIE Smart Structures and Materials 1996: Smart System for Bridges, Structures and Highways, vol.2719, (1996), p102-111.
- (3) SmartLink, Keithley Co., <http://www.keithley.com>
- (4) EDAS, Intelligent Instrumentation Inc., <http://www.instrument.com/>
- (5) Daniel, R.A., "A case for communication sensor data via Ethernet", Instrumentation & Control Systems, October, (1997) p.37-40.
- (6) Winkler, R., "Ethernet: A Cost-Effective Strategy for Monitoring Remote Signals & Sensors", Sensors EXPO 97, (1997), p.135-138.
- (7) DeviceNet, Open DeviceNet Vendor Association, Inc, <http://www.odva.org/>
- (8) 1996 National Semiconductor Corporation., "NEXT GENERATION OF ELECTRONICS FOR UNITED AIRLINES ' NEW 777" <http://www.national.com/news/1995/9505/corp95006misc.htm>
- (9) 三木, 河岡, 「知的人工物についての基本的考察」, 同志社大学理工学部研究報告, 37,3, (1996)138-158.