

CC-Link IEフィールドネットワーク対応 インテリジェントHUB

中安俊行* 川手竜介**
笠原三郎* 谷口幸子**
酒井謙行*

Intelligent HUB Applicable for CC-Link IE Field Network

Toshiyuki Nakayasu, Saburo Kasahara, Kaneyuki Sakai, Ryusuke Kawate, Sachiko Taniguchi

要 旨

近年、Ethernet^(注1)の汎用性・高速性・廉価性を背景としてEthernetベースの産業用ネットワークが増加している。特に、ネットワークの中継機能を担うHUBには能動的にネットワークを構築することが要求されており、今後インテリジェント機能を持つHUBの需要増加が予測される。

三菱電機はEthernet技術を用いた産業用ネットワークであるCC-Link^(注2) IE(Industrial Ethernet)フィールドネットワーク(以下“CC-Link IE”という。)を開発し、当社が幹事を務めるCC-Link協会を通じて普及を推進している。

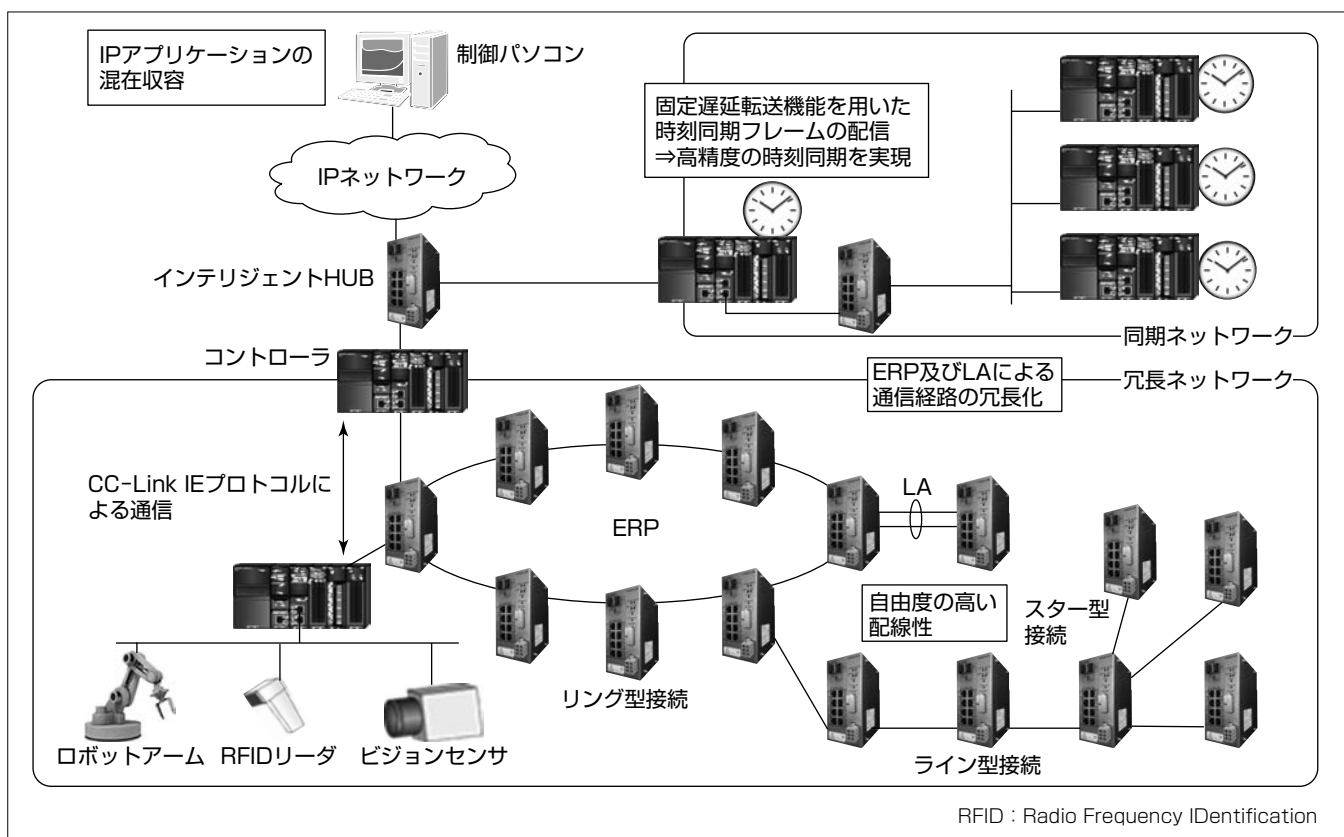
今回、CC-Link IEに適用可能なインテリジェントHUBを開発した。この装置は、産業用ネットワークに必要な

高精度時刻同期やネットワークの冗長化／高信頼化を実現するために固定遅延転送機能、ERP(Ethernet Ring Protection switching)機能、LA(Link Aggregation)機能、及びループ検出機能をハードウェアで実装した。

また、この装置はFPGA(Field-Programmable Gate Array)によってハードウェアプラットフォームを実現しているため、特定機能を選択的に実装できるとともに、用途に応じた柔軟な機能拡張が可能であるという特長がある。今後、この特長を最大限に活用して次世代産業用ネットワークや産業用途以外のネットワークに適用を進めていく。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス㈱の登録商標である。

(注2) CC-Linkは、CC-Link協会の登録商標である。



インテリジェントHUBの運用形態

CC-Link IE対応インテリジェントHUBでは、産業用ネットワークで必要となる高精度の時刻同期を実現するために時刻同期用フレームの“固定遅延転送機能”や機器の故障やネットワークの一部障害が発生した場合でもネットワーク全体をダウンさせない冗長化／高信頼化機能として“ERP機能”及び“LA機能”を実装している。また、開発したインテリジェントHUBでは、用途に応じた柔軟な機能拡張が可能であり、交通ネットワークや公共ネットワーク等の様々な用途への適用が可能である。

1. ま え が き

近年、Ethernetの汎用性・高速性・廉価性を背景としてEthernetベースの産業用ネットワーク(以下“N/W”という。)が増加している。

特に、N/Wの中継機能を担うHUBには、能動的なN/W構築が要求されており、インテリジェント機能を持つHUBの需要増加が予測される。今回、当社が推進するEthernetベースのFA(Factory Automation) N/WであるCC-Link IEに適用可能なインテリジェントHUBを開発した。

本稿では、開発したインテリジェントHUBによって実現される適用事例とシステム要件、機能の特長と構成技術について述べる。

2. 開発の背景

産業用Ethernet機器は、国内外で普及が拡大しており、Cisco, Siemens, Hirschmann, PHOENIX CONTACT等の海外メーカーがインテリジェント機能を持つHUBを先行して展開している。市場要求としては、高速通信、同期通信機能の精度向上、耐障害性、保守性の向上、冗長比機能による高信頼化等があり、シームレスなN/Wの構築と自由度の高い配線を実現するとともに当社が推進するFA統合ソリューション“e-F@ctory”やIIoT(Industrial Internet of Things), 又はIndustrie 4.0への展開を見据えた拡張性が求められている。

今回、これらの市場要求を満足するCC-Link IE対応のインテリジェントHUBを開発した。

3. FA N/Wの要件整理

オフィスや家庭向けに広く普及しているEthernetとFA N/Wに適用するEthernetでは、用途の違いに伴って様々な要件差異⁽¹⁾がある。FA N/Wの主な要件を次に述べる。

(1) 高精度の時刻同期

FAシステムでのコントローラ間の通信やモーション制御通信では、高速・高精度な同期制御が必要。

(2) IPアプリケーションの混在収容

FAシステムで固有のアプリケーションに加え、ファイル転送用途のFTP(File Transfer Protocol), 監視制御用途のSNMP(Simple Network Management Protocol)等、IPプロトコルを利用するアプリケーションの収容が必要。

(3) 冗長化／高信頼化

機器の故障やN/Wの一部障害が発生した場合でも、N/W全体がダウンしないような冗長化／高信頼化が必要。

(4) 自由度の高い配線性

製造現場の環境に応じて、FAシステムを構成する機器をライン型、スター型、リング型及びこれらの形態を組み合わせた柔軟なトポロジーで接続できることが必要⁽²⁾。

4. インテリジェントHUBの主要機能

図1に装置の外観、表1にCC-Link IEに適用するインテリジェントHUBの主要諸元を示す。



図1. インテリジェントHUB

表1. インテリジェントHUBの主要諸元

項目		内容	
伝送速度(通信方式)	10BASE-T	10Mbps(全二重)	
	100BASE-TX	100Mbps(全二重)	
	1000BASE-T	1 Gbps(全二重)	
	1000BASE-SX		
	1000BASE-LX		
通信インタフェース	Ethernetポート(RJ-45)	8ポート	
	光ファイバポート(SFP)	2ポート(Ethernetポートと排他設定)	
フレームサイズ(ジャンボフレーム対応)		64~9,022byte(VLAN含む)	
転送方式		カットスルー方式(固定遅延転送) ストア&フォワード方式	
MACアドレス学習数		最大2,048個	
MACアドレスエージングタイム		300s	
VLAN機能	VLAN ID	0 ~4,095	
	ポートVLAN VLAN ID設定数	1ポートにつき1個	
	タグVLAN VLAN ID設定数	1ポートにつき最大4,096個	
	高信頼化／ 冗長化機能	ERP	ERP設定可能ポート数
ERP経路切替え時間			障害発生から10ms以内 (接続性確認用フレームの送信周期を1msに設定時)
LA		LA設定可能ポート数	4ペア(1ペア2ポート)
		LA経路切替え時間	障害発生から1s以内
ループ検出		ループ検出フレーム方式 CC-Linkフレーム方式	最大8個(VLANごと)
保守機能	ログ管理	操作ログ, アラームログ	
	遠隔保守	Telnetによるリモート操作, 遠隔バージョンアップ, SNMP	
	その他	ミラーリング, SDカードメモリによる初期設定及びログ保存	
ハードウェア諸元	動作環境条件	0 ~60℃, 5 ~95% (結露なきこと)	
	定格入力電圧	DC24V(許容電圧範囲 DC20.4~28.8V)	
	定格入力電流	1.20A	
	外形寸法	147(H)×70(W)×122(D) (mm)	
	質量	0.95kg	

RJ45: Registered Jack 45, SFP: Small Form-factor Pluggable,
MAC: Media Access Control, VLAN: Virtual LAN,
ERP: Ethernet Ring Protection Switching, LA: Link Aggregation,
Telnet: Teletype network

この装置は、10/100/1000BASE-T対応のEthernetポートを8ポート、Ethernetポートと選択して使用可能な光ファイバポートを2ポート持っており、最大8ポートを同時に使用した8Gbpsの通信が可能である。

この装置では、高精度な同期制御が求められる時刻同期用の制御フレームを識別し、常に一定の遅延時間で転送が可能なカットスルー方式(固定遅延転送機能)を採用して高精度時刻同期を実現する。さらに、カットスルー方式とストア&フォワード方式を併用することでCC-Link IEとEthernetを混在させて収容することが可能である。

また、この装置は、冗長化機能としてERP機能及びLA機能、高信頼化機能としてループ検出機能を具備し、ケーブル断線等のN/W障害が発生しても通信経路を切り替えることで通信を維持することができる。

この装置は、FPGAによってハードウェアプラットフォームを実現しており、特定機能を選択的に実装できるとともに、用途に応じた柔軟な機能拡張が可能である。

4.1 固定遅延転送機能

一般的なHUBは、Ethernetフレームを一旦蓄積して優先順に送信するストア&フォワード方式で転送する。ストア&フォワード方式は、可変長のフレームを転送する場合にフレーム長に依存して処理時間が変動し、フレームが出力されるまでの遅延時間の揺らぎ(以下“遅延揺らぎ”という。)が大きくなる。これに伴い、一般的なHUBでスター型のFA N/Wを構成した場合、時刻同期用途のフレームの遅延揺らぎが大きく、FA機器間で高精度の同期制御ができないという課題があった。

図2に開発したインテリジェントHUBの転送方式を示す。この装置は、低遅延かつ高精度が求められる時刻同期用途の高優先フレーム(以下“制御フレーム”という。)を識別し、転送ポートを決定した後に内部処理に必要な固定時間分だけ遅延させてカットスルー方式で転送する(固定遅延転送)。これによって、制御フレームを低遅延で転送するとともに遅延揺らぎを最小限に抑えるようにした。一方、精度が要求されない制御系フレームや転送時間の要求がない情報系フレーム(以下“一般フレーム”という。)は一般的なHUBと同様にストア&フォワード方式で転送する。

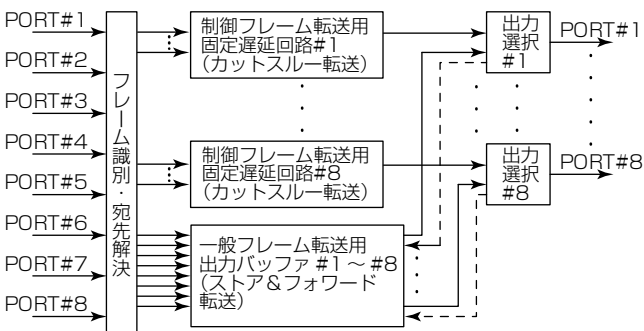


図2. インテリジェントHUBの転送方式

しかし、2種類の転送方式を併用することで一般フレーム送信中に制御フレームの送信タイミングが重なる場合がある。また、この装置は複数ポートから制御フレームを受信する可能性があり、1つの転送ポートで複数の制御フレームの送信タイミングが重なる場合もある。これらの送信タイミングの競合時の処理として、前者の場合は一般フレームの送信を中断して優先度の高い制御フレームを送信することとし、後者の場合にはより優先して固定遅延で転送したい制御フレームを転送できるようにした。

制御フレームの固定遅延時間は、送信タイミングが重なったことで送信を中断した一般フレームを後段装置で廃棄できること、一般フレームの送信中断後に送信された制御フレームが後段装置で正常に受信できること、また、受信タイミングが重なり転送できない制御フレームを廃棄すること等を考慮して決定した。

その結果、この装置は一般的なHUBと比較して1台当たりの転送遅延時間を約1/4、遅延揺らぎを約1/165まで短縮し、制御フレームの高速かつ固定遅延転送を実現し、スター型のN/Wにおける高精度な同期制御を可能とした。

4.2 冗長化機能

経済的かつ高信頼なN/Wを実現するため、この装置では、リング冗長化機能として国際規格ITU-T G.8032に準拠したERPを実装した。この装置は、Ethernetポートと光ファイバポートを選択可能な2ポートでERP機能をサポートするため、この装置の設置間隔が100m以上と長くなる場合でも高信頼なネットワークを実現することができる。

図3にERP有効時の動作を示す。ERPでは、リングを構成するインテリジェントHUBの1台をRPL(Ring Protection Link)オーナーに設定し、RPLオーナーがリング上の片側ポートを閉塞することでリングN/W内をフレームが循環することを回避する。障害が発生した場合は、障害検出箇所を閉塞するとともにRPLオーナーの閉塞を解除し、リング

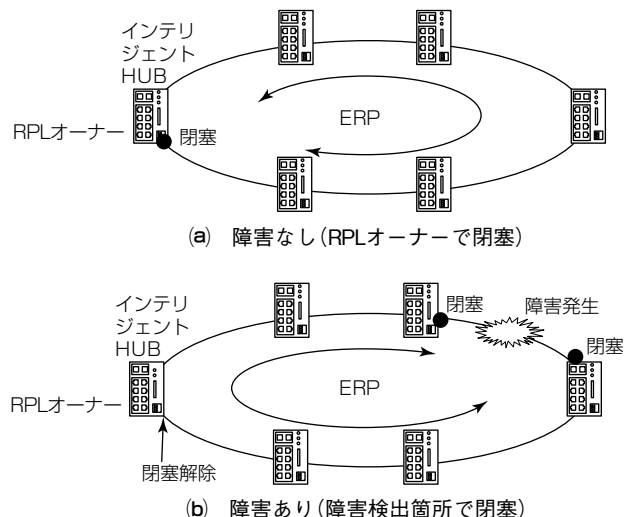


図3. ERP有効時の動作

内の閉塞箇所を切り替えることで通信を継続できる。

また、リング内で隣接するインテリジェントHUB間の接続性の確認やリングを構成する全てのインテリジェントHUBに障害検出／回復状態を通知するため、Ethernet OAM(Operation, Administration and Maintenance) (ITU-T Y.1731)の制御フレームを使用する。この装置は、障害検出用に最短3.33ms周期と規定されているEthernet OAMの接続性確認フレームの送信周期を1ms周期まで短縮することで障害検出時間の高速化を図った。その結果、インテリジェントHUB 16台で構成したリングで障害発生時の通信断時間(切替え時間) 5ms以内(実測値)を実現し、ITU-T G.8032で規定している切替え時間50msと比較して切替え時間を大幅に短縮した。

なお、この装置は、ERP以外にも回線冗長化機能として静的なLAにも対応し、2ポートのLAグループを最大4組サポートできる。LA動作時は、一般フレームをロードバランシングするが、固定遅延が要求される制御フレームはLAグループ内の片側ポートのみに転送することでフレームの順序逆転を回避し、高度な同期精度を保証する。

4.3 ループ検出機能

CC-Link IE N/W同様、インテリジェントHUBにも自由度の高い配線性の要求がある。このため、N/W構築や機器増設の際に作業者の誤配線等でループ経路が形成されることが考えられる。ループ経路形成時には、ブロードキャストトラフィックがループ経路上で増殖し(ブロードキャストストーム)、時刻同期制御に支障をきたすだけでなくシステム停止のような重大障害を引き起こす可能性がある。

この装置は、ループ状態を自律的に検知し、ループ経路上のポートを閉塞することでループ状態を解消し、システム運用を継続可能とするループ検出機能をハードウェアで実現した。

この装置では、インテリジェントHUBが自律的に送信するフレームを用いる“ループ検出フレーム方式”とCC-Link IEフィールド装置が送信するフレームを用いる“CC-Linkフレーム方式”の2種類のループ検出方式を具備する。ここでは、ループ検出フレーム方式について述べる。

4.3.1 従来のループ検出方式

代表的なループ検出方式として、STP(Spanning Tree Protocol)がある。STPでは、BPDU(Bridge Protocol Data Unit)をHUB間で交換することでルートブリッジと閉塞箇所を選出する。閉塞箇所は、自身とルートブリッジ間の通信経路の帯域幅やHOP数等の指標から算出した、通信経路の優先度を示すパスコストに基づいて決定する。STPでは、ルートブリッジを基準としたツリー型トポロジを構築することでループ経路の形成を回避する。

STPは、新規接続した経路のパスコストに伴って通信経路が切り替わり、同期通信に弊害を及ぼす場合がある。

図4を用いて具体例を述べる。

(1) ループ形成前

HUBを介してコントローラ間で同期通信している。

(2) ループ形成(HUB追加)

1台のHUBを追加することでループが形成される。

(3) ループ解除(ポート閉塞)

通信ポートのパスコストがリンクアップポートより大きい場合、当該ポートを閉塞する。

(4) 経路切替え

通信経路切替えが発生し、制御フレームの伝搬遅延時間が増加することで同期通信を維持できない。

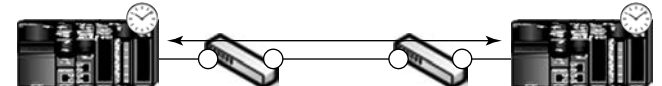
さらに、STPでは、一般的に閉塞ポート決定までに30～50秒の処理時間がかかるため、その間にブロードキャストストームが発生し、重大障害を引き起こす可能性がある。

4.3.2 ループ検出フレーム方式

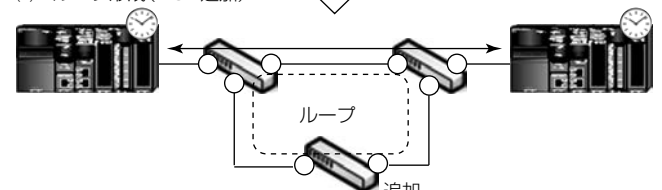
この装置は、ループ検出用に新規定義したフレーム(以下“ループ検出フレーム”という。)を1秒周期で自律的に送信し、自身が送信したループ検出フレームを受信した際にループを検出する。また、ループ検出フレームを用いて、ループ経路内の最低優先ポートの情報を収集し、ループ経路内の最低優先ポートのみを閉塞することで無作為なポート閉塞によるN/W分離を回避する。

ポート間の優先度を決定するため、インテリジェントHUBのポート状態として表2に示す3種類のポート状態を定義した。ポート状態の優先度は、優先度の高い順に運用状態>主信号フィルタ状態>全フレームフィルタ状態とした。

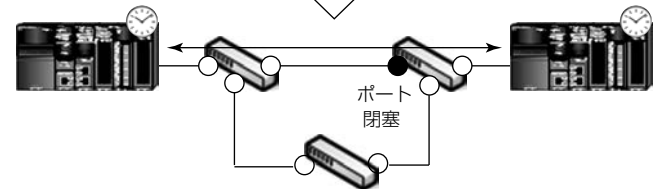
(1) ループ形成前



(2) ループ形成(HUB追加)



(3) ループ解除(ポート閉塞)



(4) 経路切替え

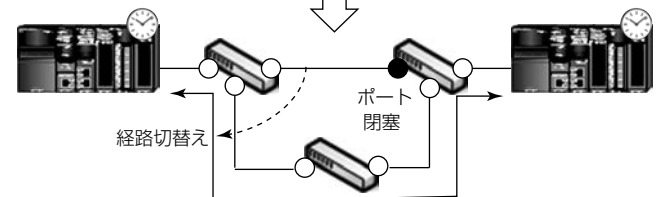


図4. STPによるループ検出の弊害例

インテリジェントHUB間でポート状態が同一の場合にはMACアドレスの大小を比較し、MACアドレスが小さいインテリジェントHUBを高優先とした。また、インテリジェントHUB内のポートの優先度は、若番ポートを高優先とした。

ループ検出フレーム方式は、ポート間の優先度を表2に示すポート状態で比較することで既存の同期通信に影響を及ぼすことなくループ経路の形成を回避することができる。図5を用いてループ解除の具体例を述べる。なお、3台のインテリジェントHUBのMACアドレスの内、インテリジェントHUB#2のMACアドレスを最大と仮定する。

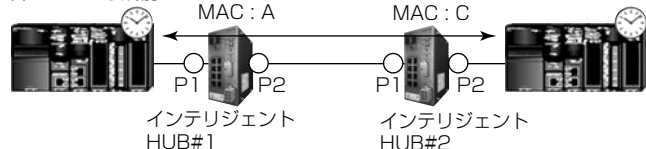
(1) ループ形成前

インテリジェントHUBを介してコントローラ間で同期通信している。通信経路上のポートは通信状態である。

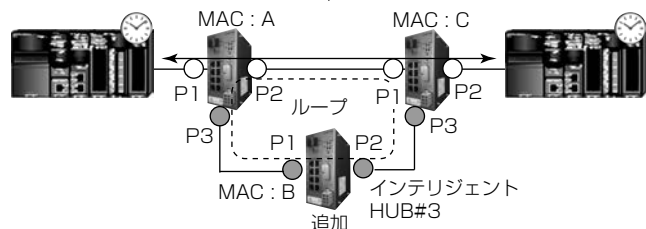
表2. ポート状態の定義

ポート状態	優先度	主信号転送可否	ループ検出フレーム	
			転送可否	送信可否
運用状態	高	可	可	可
主信号フィルタ状態	中	不可	可	可
全フレームフィルタ状態	低	不可	不可	可

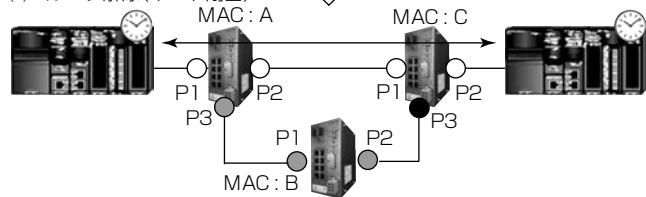
(1) ループ形成前



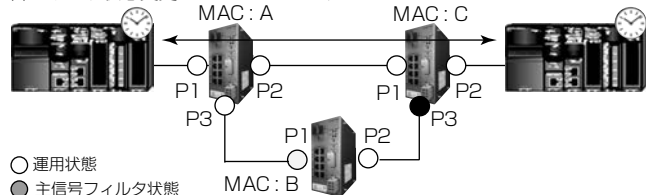
(2) ループ形成 (インテリジェントHUB追加)



(3) ループ解除 (ポート閉塞)



(4) ポート状態変更



○ 運用状態
 ● 主信号フィルタ状態
 ● 全フレームフィルタ状態

MAC: A<B<C

図5. ループ検出フレーム方式によるループ解除例

(2) ループ形成 (インテリジェントHUB追加)

インテリジェントHUB追加時、リンクアップしたポートを主信号フィルタ状態に遷移させる。ループ経路上の全てのインテリジェントHUBは、自身が送信したループ検出フレームを受信することでループを検知する。ループ検出フレームには最低優先ポートのポート状態と最低優先ポートを持つインテリジェントHUBのMACアドレス(以下“最低優先ポート情報”という。)が格納されている。

(3) ループ解除 (ポート閉塞)

自身が送信したループ検出フレームを受信したインテリジェントHUBは、ループ検出フレームの最低優先ポート情報に基づき、自身が最低優先ポートを持っている場合、このポートを全フレームフィルタ状態に遷移させる。図5の例では、主信号フィルタ状態かつ優先度が最も低いインテリジェントHUB#2のP3が該当する。

(4) ポート状態変更

各インテリジェントHUBは、自身が送信したループ検出フレームを一定時間受信しないことで、主信号フィルタ状態のポートを運用状態に遷移させる。

ループ検出フレーム方式では、ループ形成前に通信で使用していたポートの優先度をリンクアップポートより高く設定することでループ形成前後での通信経路の切り替えを回避し、同期通信を維持できる。

また、この方式では“ループ検出フレームの送信周期(1秒)+ループ検出フレームの伝搬遅延時間”で閉塞ポートを決定することができ、ループ解消時間の高速化を実現した。

5. む す び

今回開発したインテリジェントHUBで特長的な機能として、固定遅延転送機能、冗長化機能(ERP, LA)及びループ検出機能について述べた。

開発したインテリジェントHUBはFPGAでハードウェアプラットフォームを実現しているため、特定機能を選択的に実装し、用途に応じた柔軟な機能拡張が可能である。この特長を活用し、次世代の産業用N/Wへの適用に向けた機能拡張と併せ、耐環境性の向上や仕様拡張を実施し、産業用N/W以外の用途にも展開していくことでインテリジェントHUBの市場拡大を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 内藤辰彦, ほか: 産業用イーサネット入門, CQ出版 (2009)
- (2) 河本久文: CC-Link IEフィールドネットワーク, 三菱電機技報, 84, No.3, 179~182 (2010)