

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「ファクトリーオートメーション機器用無線インタフェースの研究開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 7月

委託者 北海道経済産業局

委託先 株式会社 iD

目 次

第1章	研究開発の概要	2
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-1-1	研究開発の背景	3
1-1-2	研究目的及び目標	4
1-2	研究体制	6
1-2-1	研究組織	6
1-2-2	管理体制	6
1-2-3	研究体制	6
1-3	成果概要	7
1-4	当該研究開発の連絡窓口	8
第2章	本論	9
2-1	ExpEther カードの無線化	9
2-2	I/O カード収容機器の開発	10
2-3	無線優先混在型ネットワークのモデリングと通信品質解析	10
2-3-1	無線 LAN におけるデータフレームの送信成功/失敗パターンのモデル化	10
2-3-1-1	実トラフィックデータの概要	11
2-3-1-2	実トラフィックデータを用いたモデル化とシミュレーション	12
2-3-2	ExpEther の有線無線混在ネットワークのモデル化	16
2-3-2-1	ExpEther の概要	16
2-3-2-2	ExpEther の改良点	17
2-3-3	通信品質の解析シミュレーション	18
2-4	輻輳制御回路の設計	22
2-4-1	輻輳制御 FPGA の設計	22
2-5	ExpEther ボードによる性能測定	22
2-5-1	通信品質測定	23
2-5-1-1	データロス	23
2-5-1-2	レイテンシ	24
2-5-2	開発成果	25
第3章	全体総括	26
3-1	研究開発後の課題	26
3-1-1	通信性能	26
3-1-2	無線通信距離	26
3-1-3	コスト削減	26
3-2	事業化展開	26
3-2-1	市場調査	26
3-2-2	製品化のための技術課題	26
3-3	研究発表等の状況	27
3-3-1	研究発表	27
3-3-2	その他公表	27
3-4	専門用語解説	28
3-5	参考文献	28

第1章 研究開発の概要

現在のファクトリーオートメーション（以下、FA）化された生産ラインの課題は、FA 機器を制御する高信頼だが高価な工業用コンピュータのコスト削減と、省配線と有線並みの通信確実性を提供する新しい無線方式の導入である。本提案は、新型イーサネット技術と無線 LAN を組み合わせ、不確実性を解決した無線で設置自由度を上げ、かつ高信頼な FA 機器間接続装置で高価なコンピュータを置換し、生産ラインのコスト削減する研究開発である。

以下に従来技術に対する新技術の優位性について述べる。

（従来技術）

従来の FA 化された生産ラインでは、FA 機器を制御する高価な工業用コンピュータ（FA 制御用コンピュータ）と、それを管理するコンピュータで構成され、コンピュータ間を有線ネットワークにて接続されるのが一般的であった。図 1－1 に従来技術による生産ライン構成を示す。

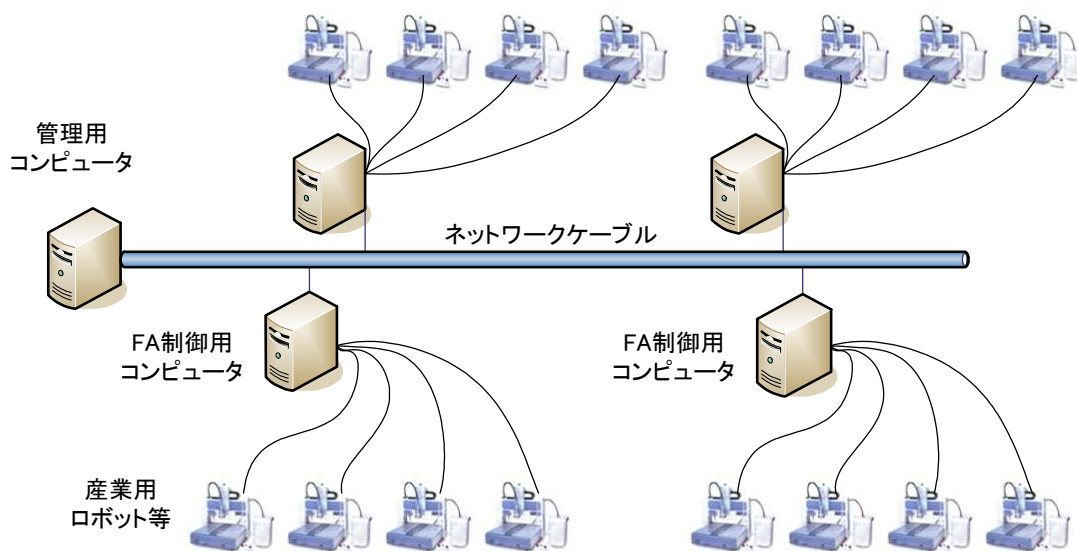


図 1－1 従来技術による生産ライン構成

（従来技術における問題と課題）

- ①多数の FA 機器を制御するための管理用コンピュータ及び多数の FA 制御用コンピュータが必要
⇒ 高価な制御コンピュータ削減によるコスト削減が課題
- ②無線化の要望は強いが、通信の不確実性が問題となっている
⇒ 導入する無線通信の不確実性の解決が課題
- ③管理用コンピュータと FA 制御用コンピュータを接続するためのネットワークケーブルが必要であり、機器の設置や移設時間及びコストが掛かる
⇒ 無線化による省配線化が課題

(新技術)

新型イーサネット技術（ExpEther：2－3－2－1 節にて解説）と無線 LAN との組み合わせにより、FA 機器を制御する高価な工業用コンピュータと FA 機器間接続装置（IO-BOX）を置換え、かつ不確実性を解決した無線通信により機器の設置自由度を上げ、生産ラインのコストを削減する。

図 1－2 に新技術による生産ライン構成を示す。

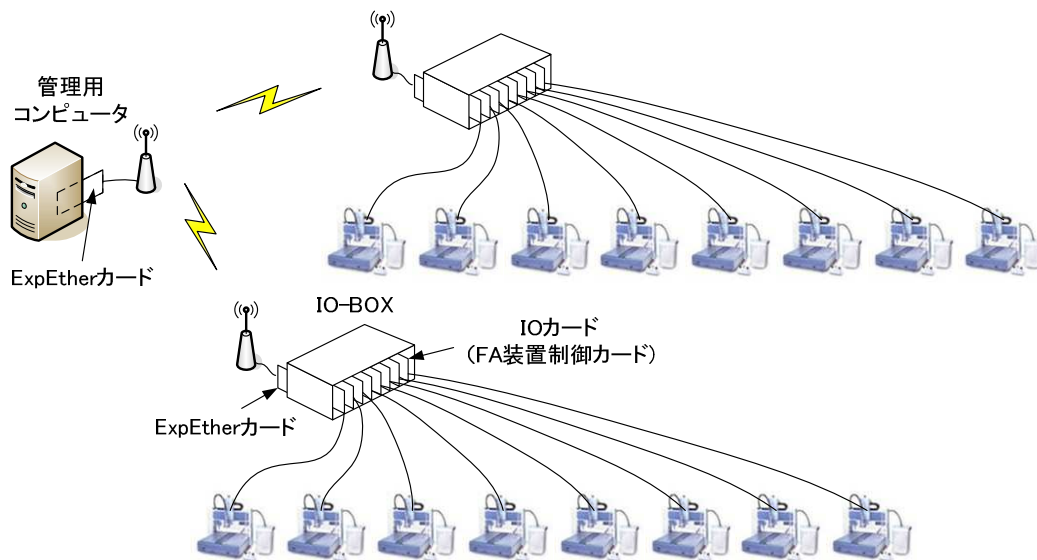


図 1－2 新技術による生産ライン構成

(特徴)

- ①新型イーサネット技術により、多数の FA 制御用コンピュータが不要となり、コスト削減可能
⇒ 本提案装置（IO-BOX）一台で FA 制御コンピュータを 2 台置き換えることが可能であり、その場合約 100 万円のコスト削減が見込まれる。
- ②新型イーサネット技術により、通信品質が向上し、通信の不確実性が解決する
⇒ データロスがほぼ 100%解消できる
- ③②によって無線化が可能となり、ネットワークケーブルの配線が不要となる
⇒ 無線化により、配線に掛かる時間が半分程度に削減可能

1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1－1－1 研究開発の背景

日本の情報家電、自動車等をはじめとした「ものづくり」分野では、品質は高いが高価な製品が多いといわれている。今後、発展途上国の低価格を武器にした追い上げをかわして、日本が該当分野のリーダーであり続けるためには、高機能化と高効率化による更なる低コスト性と高信頼性を具備した生産システムを作る必要がある。

これを受けて、近年、工場でのオートメーション化が進んできており、FA 機器の市場は拡大の一途を辿っている。FA 機器の多くは、信頼性を高めるために RS-232C や

RS-422 などの低速での制御が一般的である。それら FA 機器を制御するための多数の FA 制御用コンピュータや、それを管理するための管理用コンピュータが必要とされており、制御機器のコスト削減が課題となっている。

また管理用コンピュータと FA 制御用コンピュータはネットワークケーブルでの接続が必要であり、配線や機器の移動に掛かる時間やコストが増えている。このように工場においては省配線化や設置の自由度を高めたいという要望も高まり、ネットワークの無線化への期待も高まっている。しかし、無線化においては通信の不確実性の問題も抱えており、この不確実性を解決することが無線化の課題となっている。

本提案では、新型イーサネット技術である ExpEther の利点である PCI Express をイーサネットで延長する技術を用い、1 台の FA 制御用コンピュータと複数の FA 機器を容易に接続することができる。さらに再送／輻輳制御を取り入れることで無線通信における品質や信頼性を高めることができ、無線 LAN での課題であるデータロスを防ぐことができる。これにより大幅な省配線化や設置の自由度が向上、また FA 制御用コンピュータの削減も可能となり、大幅なコスト低減が実現可能である。しかし、これまでの ExpEther では通信品質を確保した無線有線混在型ネットワークへの応用実績は無いので、本提案により通信品質の解析研究を実施した上でシステム開発を行う。

上述したように今回の提案は、通信の最先端技術を用いて低コストで高信頼なシステム実現を目指している。これは I T 戦略本部が検討を進めている「デジタル新時代に向けた新たな戦略（案）2009 年 6 月 4 日付」の 14 ページ目に記述されている「（3）情報家電、自動車等の分野におけるものづくりとデジタル技術の融合、その他組込みソフトウェアの高機能化・高信頼化等を図り、世界をリードする」を具現化する活動と位置付けられる。

1-1-2 研究目的及び目標

1) 「高度化指針」において定める高度化目標

イ．高性能化及び機能の向上

2) 本提案による研究開発の目標

ExpEther と無線 LAN の融合により、多数必要であった FA 制御用コンピュータやネットワークケーブルの配線を不要とする。また、装置コスト及び敷設や移設時間の短縮によるコストや消費電力を低減させる効果のある無線ネットワークを実現するため、ExpEther カード及び IO カード収容機器を開発する。また、これまで FA 産業で通信品質が課題となっていた無線通信において、通信品質及び性能を向上させるため、無線有線混在型ネットワークにおけるネットワークモデルでの通信品質の解析及び最適な通信性能を確保するためのアルゴリズムの研究を実施する。

本提案による技術的目標値を、以下に設定する。

- ・ 本提案装置 (IO-BOX) 1 台と FA 制御コンピュータ 2 台を置き換えることにより、約 100 万円のコスト低減を可能とする。
- ・ 無線化による配線時間を、現状の半分程度に削減する。

- ・通信品質を 10%向上させる。

【1】 ExpEther カードの無線化

既存の ExpEther カードは、サーバとして使用する目的として有線通信用カードのみ開発されており、無線 LAN 対応のカードは開発の対象外となっていた。そのため、本提案による無線 LAN ネットワーク対応の ExpEther カードの開発が必須となる。

【2】 IO カード収容機器の開発

本提案において、FA 機器用無線インタフェースの通信品質の検証及びコスト削減の効果を上げるためには複数枚の IO カード（FA 装置制御カード）が収容可能な IO-BOX を開発する必要がある。

収容可能な IO カード数は最大 8 枚を目標とし、大幅な FA 制御用コンピュータの削減を図る。

【3】 無線有線混在型ネットワークのモデリングと通信品質解析

既存の ExpEther では有線通信における通信品質の検証は実証済みだが、無線有線混在型ネットワークでの通信品質を確保するためには、新しいアルゴリズムが必要である。また有線部分と無線部分で通信帯域の大幅な相違があるため、実際の使用環境に近いトラフィックモデルにて解析することが必要となる。そのため、通信品質の解析研究が必要となる。

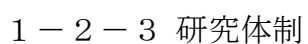
【4】 輻輳制御回路の設計

既存の ExpEther カード用 FPGA (Field Programmable Gate Array) では、有線通信における通信品質を向上させるための輻輳制御回路が実装されており、通信品質確保が実証されている。しかし、無線有線混在型ネットワークにおける通信品質については実証されておらず、本提案にて研究が実施される。本研究成果を既存の輻輳制御回路と置き換え、システムとしての品質、性能を検証するための FPGA 開発を実施する。

【5】 ExpEther ボードによる性能測定

本提案の無線有線混在型ネットワークにおける通信品質解析の研究成果をもとに開発した ExpEther カード、IO-BOX 及び FPGA での制御回路にて、実際の工場に近いシステムを構築する。このシステムを用いて、ネットワーク負荷試験機や無線 LAN アナライザにて通信品質及び性能を検証する。

1-2-1 研究組織



氏名	所属	実施項目
内田 真人	九州工業大学 ネットワークデザインセンター 准教授（工学博士）	【3】
飯塚 秀明	九州工業大学 ネットワークデザインセンター 准教授（理学博士）	【3】
福寿 康行	株式会社 iD 部長	【1】，【2】，【3】， 【4】，【5】
成澤 孝悦	株式会社 iD 部長	【1】，【2】
大室 孝司	株式会社 iD 執行役員部長	【3】，【5】
横山 直樹	株式会社 iD 部長	【3】，【5】
寺尾 貴明	株式会社 iD 課長	【3】，【4】，【5】
佐々木 聡	株式会社 iD 課長	【1】，【2】
田野岡 貴之	株式会社 iD 課長	【1】，【2】

加藤 貴光	株式会社 iD 課長	【3】，【5】
見陣 一郎	株式会社 iD 課長代理	【3】，【4】，【5】
沼田 亘宏	株式会社 iD 課長代理	【1】，【2】
吉野 利幸	株式会社 iD 課長代理	【3】，【5】
後藤 慶太	株式会社 iD 主任	【3】，【4】，【5】
岡 雅幸	株式会社 iD 主任	【3】，【4】，【5】
矢野 陽介	株式会社 iD 主任	【3】，【4】，【5】
佐藤 良人	株式会社 iD 主任	【3】，【5】
亀山 康広	株式会社 iD 主任	【3】，【5】
池下 良	株式会社 iD	【4】
福田 啓介	株式会社 iD	【4】

※実施項目

- 【1】 ExpEther カードの無線化
- 【2】 IO カード収容機器の開発
- 【3】 無線有線混在型ネットワークのモデリングと通信品質解析
- 【4】 輻輳制御回路の設計
- 【5】 ExpEther ボードによる性能測定

1－3 成果概要

新型イーサネット技術（ExpEther）の1つとしてイーサネットにおける再送制御機能がある。これは無線化において課題となっている通信品質、信頼性を向上させ、無線通信におけるデータロス等の問題を回避することを可能とする。本提案における研究開発の成果として、無線 LAN を用いたネットワークへ適用するため、将来的な無線 LAN 搭載を視野に入れた 1GbE 対応 ExpEther カードを開発した。また、FA 機器を制御する高価な工業用コンピュータからの置換えを可能とする FA 機器間接続装置（IO-BOX）を開発した。

従来の ExpEther 技術は、有線通信方式であるイーサネットのみで構成されたネットワークを前提としたものに限られていた。そこで無線通信方式である無線 LAN において計測された実トラフィックデータに基づいて、実際の使用環境に近いトラフィックモデルを構築することが出来た。このトラフィックモデルにて通信品質解析を行い、新しいアルゴリズムが無線通信に適していることが実証できた。

また、新しいアルゴリズムをコード化し、FPGA への組み込みを行い、従来のアルゴリズムに比べて、無線通信における性能改善を実機環境にて実証した。

上記の通り、本年度の成果目標は達成することが出来たが、事業化に向けて更なる品質改善及びコスト低減が必要である。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

会社名 : 株式会社 iD
所属 : 開発部
氏名 : 福寿 康行 (フクジュ ヤスユキ)
電話 : 0138-35-3315
FAX : 0138-35-3603
E-mail : fukuju@intelligent-design.co.jp

第2章 本論

2-1 ExpEther カードの無線化

FA ネットワークの省配線化は、これまで FA 産業界で抱えてきた課題であり、その要望に応えるべく新たな FA ネットワークの開発が期待されている。しかし、特に無線化においては通信品質、信頼性及びリアルタイム性が課題となっていたため、対応が遅れているのが実情である。

ExpEther の技術の1つとしてイーサネットにおける再送制御機能がある。これは無線化において課題となっている通信品質、信頼性を向上させ、無線通信におけるデータロス等の問題を回避することを可能とする。現在、ExpEther カードはサーバ等の高速アクセスが必要なアプリケーションとして、10GbE (10Gigabit Ethernet) 対応版が既に開発されている。しかし、無線 LAN を用いたネットワークへ適用するためには、1Gbps (1Gigabit per second) 以下の帯域に対応したカードの開発が必須となる。そこで今後の無線 LAN 搭載の ExpEther カードの開発を視野に入れた 1GbE (1Gigabit Ethernet) 対応 ExpEther カードの開発を実施した。現時点では無線化における通信品質の検証を重点的に行うことを目的とし、無線 LAN 機器に関しては市販品にて評価を実施した。



図 2-1 1GbE 対応 ExpEther カード

2-2 IOカード収容機器の開発

本提案において、FA 機器用無線インタフェースの通信品質を検証するうえで、FA 機器と接続するための IO カードが必要である。この IO カードを多数収容して FA 機器当りの接続コストを削減するために、本提案による IO-BOX の開発を実施した。コスト削減の効果を上げるためには 8 枚以上の IO カードが収容可能な IO-BOX を設計する必要があったが、筐体サイズや電源容量の検討結果から、収容枚数は 8 枚とした。



図 2-2 IO-BOX

2-3 無線優先混在型ネットワークのモデリングと通信品質解析

既存の ExpEther では有線通信における通信品質の検証は実証済みだが、無線有線混在型ネットワークでの通信品質を確保するためには、新しいアルゴリズムが必要である。また有線部分と無線部分で通信帯域の大幅な相違があるため、実際の使用環境に近いトラフィックモデルにて解析することが必要となり、そのための通信品質の解析研究を実施した。

2-3-1 無線 LAN におけるデータフレームの送信成功/失敗パターンのモデル化

本提案 FA システムにおける無線有線混在型ネットワークのモデリングと通信品質解析を行うためには、無線と有線の通信特性の大幅な相違を考慮に入れた上で、実際の使用環境に近いトラフィックモデルを想定した検討を行わなければならない。しかしながら、従来の検討は、有線通信方式であるイーサネットのみで構成されたネットワークを前提としたものに限られていた。そこで以下では、無線通信方式である無線 LAN において計測された実トラフィックデータに基づいて、実際の使用環境に近いトラフィックモデルを構築するための方法について検討した結果を報告する。2-3-1-1 節では、まず、本検討で用いる実トラフィックデータの概要について説明する。次に、2-3-1-2 節では、この実トラフィックデータを用いて所望のトラフィックモデルを構築するための数学的前処理について検討した結果を報告する。

2-3-1-1 実トラフィックデータの概要

本検討では、文献[1]で計測された、無線 LAN におけるデータフレームの再送回数に関する実トラフィックデータを用いる。そこでまず、無線 LAN におけるデータフレームの再送の仕組みについて説明する。無線 LAN における送信側の端末は、送信したデータフレームに対する ACK フレームを受信することによって、無線区間での送信が成功したことを確認する。もし無線区間の品質劣化によりデータフレームもしくは ACK フレームが送信に失敗した場合、送信側は予め決められた再送回数に達するまで同じデータフレームを再送する。このとき 1 つのデータフレームが正しく送信されるまでに再送された回数をフレーム再送回数と呼ぶ。しかし、送信側は規定の再送回数以内で ACK フレームを受信できなかった場合、そのデータフレームをパケットロスとして廃棄する。

図 2-3 は、アクセスポイント (AP) からの距離を変化させて FTP 通信を行ったときに経験するフレーム再送回数の確率を示したものである。図 2-3 において、あるデータフレームが再送を 1 回経験する確率 (初回送信に失敗し、1 回目の再送に成功する確率) を p_1 、2 回経験する確率 (初回送信と 1 回目の再送に失敗し、2 回目の再送に成功する確率) を p_2 、3 回経験する確率 (初回送信と 1 回目、2 回目の再送に失敗し、3 回目の再送に成功する確率) を p_3 と表す。なお、本検討で用いるトラフィックデータの計測環境では RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send) を用いていることから、送信側は同じデータフレームを初回送信を含めて 4 回 (初回送信+再送 3 回) までしか送信することができない。そのため、あるデータフレームが再送を 4 回以上経験することはなく、再送に 3 回失敗した場合はパケットロスとなるが、標記を簡単にするためにその確率を便宜的に $p_{\geq 4}$ と表す。図 2-3 より、これらの確率は 25 メートル付近まではほぼ一定となっており、それ以降で徐々に増加し、40 メートル以降では大きく変化している様子が分かる。

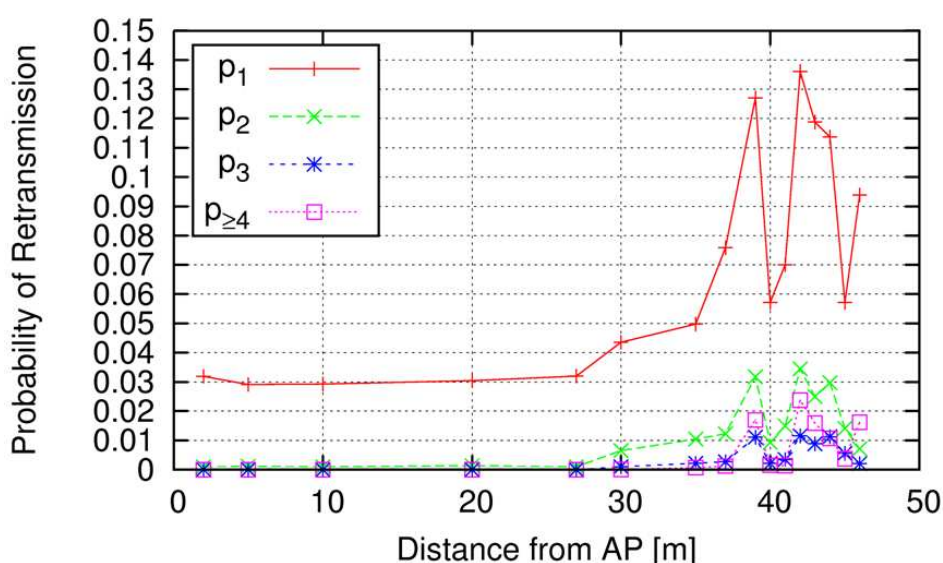


図 2-3 フレーム再送率

2-3-1-2 実トラフィックデータを用いたモデル化とシミュレーション

前節で説明したように、本検討で用いる実トラフィックデータは、無線 LAN においてデータフレームが経験する再送回数に関するものである。そこで以下では、この実トラフィックデータを用いて、シミュレーションによる通信品質解析を行うために必要となる、無線 LAN におけるデータフレームの送信成功/失敗パターンを表すモデルを得るための数学的前処理について説明する。具体的には、データフレームの送信成功/失敗パターンが再送回数に依存せずにランダムであることを仮定したモデル（2-3-1-2-1 節）、及び、データフレームの送信成功/失敗パターンが再送回数に依存するモデル（2-3-1-2-2 節）について検討した結果を報告する。なお、いずれのモデルにおいても、ACK フレームのロスが発生しないものと仮定した。

2-3-1-2-1 ランダムなフレーム送信成功/失敗パターンモデル

初回送信フレームの総数を n とおくと、このうち np_1 個のフレームが再送を 1 回経験し、 np_2 個のフレームが再送を 2 回経験し、 np_3 個のフレームが再送を 3 回経験し、 $np_{\geq 4}$ 個のフレームが再送を 3 回経験する。したがって、再送フレームを含めた全送信フレームは $n(1+p_1+2p_2+3p_3+3p_{\geq 4})$ 個となる。また、 np_1 個のフレームが送信に 1 回失敗し、 np_2 個のフレームが送信に 2 回失敗し、 np_3 個のフレームが送信に 3 回失敗し、 $np_{\geq 4}$ 個のフレームが送信に 4 回失敗する。したがって、再送フレームを含めた全送信フレームのうち送信に失敗するフレームは $n(p_1+2p_2+3p_3+4p_{\geq 4})$ 個となる。以上より、再送フレームを含めた全送信フレームのうち、送信に失敗するフレームの割合（フレーム送信失敗確率）は

$$r = \frac{p_1+2p_2+3p_3+4p_{\geq 4}}{1+p_1+2p_2+3p_3+3p_{\geq 4}}$$

となる。図 2-3 を用いて計算したフレーム送信失敗確率 r を図 2-4 (actual) に示す。

この結果を用いることで、無線 LAN におけるフレームの送信成功/失敗パターンがランダムであることを仮定したモデルに基づいたシミュレーションを実行することができる。すなわち、あるフレームが再送フレームであるかどうかにかかわらず、そのフレームは確率 r で送信に失敗して再送され、再送回数が規定回数に達した場合はパケットロスとなるようにシミュレーションを実行すれば良い。

一方、図 2-4 より、実トラフィックデータを用いて上記で求めたフレーム送信失敗確率は、特に AP からの距離が長くなるほど大きく変動する傾向にあることが分かる。これは、無線環境における様々に起因するものと考えられる。そのため、上記で求めたフレーム送信失敗確率をそのまま用いてシミュレーションを行った場合は、こうした変動による影響を避けることができないという問題がある。さらに、実際に計測を行った AP からの距離とは異なる無線環境を想定したシ

ミュレーションを行うことができないという問題もある。そこで、以下では、これらの問題を解決するために、上記で求めたフレーム送信失敗確率を近似する手法について検討する。

まず、フレーム送信失敗確率を近似するためのモデルについて検討する。いま、AP からの距離は x であるとし、そのときのフレーム送信失敗確率を $r(x)$ とおく。

ここで、AP からの距離を Δx だけ微小に増加させた場合を考える。このとき、距離 x において送信に失敗したフレームは、距離 $x + \Delta x$ においても送信に失敗するものと仮定する。さらに、距離 x において送信に成功したフレームは、距離 $x + \Delta x$

において、距離 x におけるフレーム送信失敗確率 $r(x)$ と、微小距離 Δx にそれぞれ比例した確率で、フレームの送信に失敗するものと仮定する。すなわち、AP からの距離を Δx だけ微小に増加させたときのフレーム送信失敗確率の増分 $r(x + \Delta x) - r(x)$ は、距離 x における送信成功確率 $1 - r(x)$ 、距離 x における送信失

敗確率 $r(x)$ 、微小距離 Δx にそれぞれ比例するものと仮定する。このとき

$$r(x + \Delta x) - r(x) = \beta(1 - r(x))r(x)\Delta x$$

が成り立つ。ただし、 $\beta > 0$ である。ここで、 $\Delta x \rightarrow 0$ とすると

$$\frac{dr(x)}{dx} = \beta(1 - r(x))r(x)$$

が成り立つ。この微分方程式の解は

$$r(x) = \frac{1}{1 + \alpha e^{-\beta x}}$$

と与えられ、ロジスティック曲線と呼ばれる。ただし、 $\alpha > 0$ である。

次に、実トラフィックデータに基づいて、ロジスティック曲線のパラメータ α 、 β を推定する方法について説明する。まず、上記のロジスティック曲線を

$$\ln(1 - r(x)) = -\beta x + \ln \alpha$$

と変形する。この表式は、 x を説明変数、 $\ln(1 - r(x))$ を従属変数とした線形回帰

によってパラメータ α 、 β を推定することができることを意味する。したがって、

AP からの距離 x と、その距離に対応するフレーム送信失敗確率 $r(x)$ の組からなる

データの集合 $\{(x_i, r_i) : i = 1, 2, \dots, n\}$ に対して

$$y = \begin{bmatrix} \ln(1-r_1) \\ \ln(1-r_2) \\ \vdots \\ \ln(1-r_n) \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} \ln \alpha \\ -\beta \end{bmatrix}$$

とおくと、最小二乗法を用いることで、 θ の推定値は

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T y$$

と求めることができる。これらの推定値を代入したロジスティック曲線を図 2-4 (estimation) に示す。この結果より、実トラフィックデータから計算されたフレーム送信失敗確率は、ロジスティック曲線により精度良く近似できることが分かる。

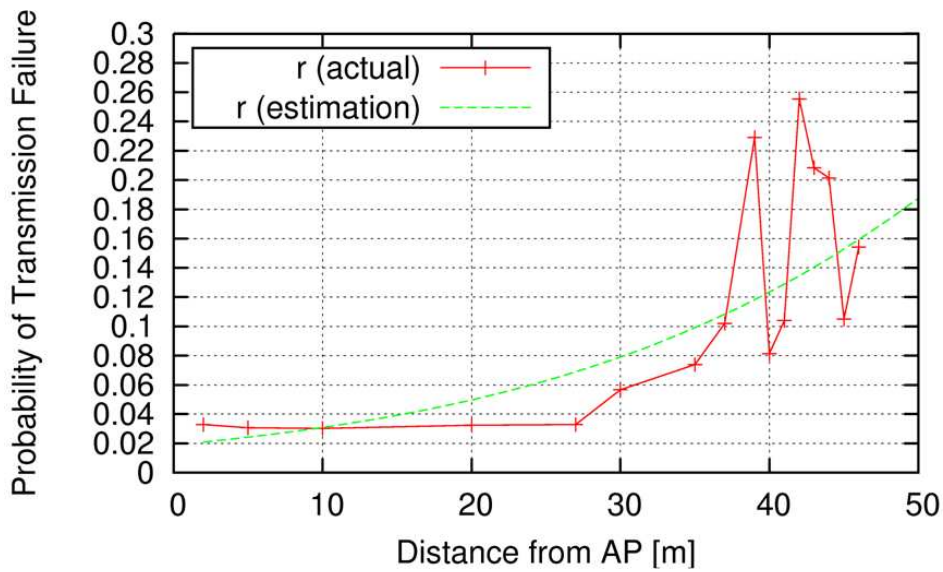


図 2-4 フレーム送信失敗率

2-3-1-2-2 再送回数に依存したフレーム送信成功/失敗パターンモデル

あるフレームが 1 回目の送信に失敗する確率（あるフレームが再送を経験する確率） q_1 は

$$q_1 = p_1 + p_2 + p_3 + p_{\geq 1}$$

となる。また、1 回目の送信に失敗したフレームが 2 回目の送信（1 回目の再送）にも失敗する確率（再送を 1 回以上経験するフレームのうち、再送を 2 回以上経験するフレームの割合） q_2 は

$$q_2 = \frac{p_2 + p_3 + p_{\geq 1}}{p_1 + p_2 + p_3 + p_{\geq 1}}$$

となる。同様に、2 回目の送信（1 回目の再送）に失敗したフレームが 3 回目の送信（2 回目の再送）にも失敗する確率（再送を 2 回以上経験するフレームのうち、再送を 3 回以上経験するフレームの割合） q_3 は

$$q_3 = \frac{p_3 + p_{\geq 1}}{p_2 + p_3 + p_{\geq 1}}$$

となり、3 回目の送信（2 回目の再送）に失敗したフレームが 4 回目の送信（3 回目の再送）にも失敗する確率（再送を 3 回以上経験するフレームのうち、再送を 4 回以上経験（パケットロス）するフレームの割合） q_4 は

$$q_4 = \frac{p_{\geq 4}}{p_3 + p_{\geq 4}}$$

となる。図 2-5 (actual) に、 q_i の計算結果を示す ($i=1,2,3,4$)。また、前節と同様に、ロジスティック曲線を用いて近似した結果を図 3 (estimation) に示す。

この図より、AP からの距離が近い場合は、 j 回目の再送に失敗したフレームは $j+1$ 回目の再送には比較的的成功しやすく、AP からの距離が遠い場合は、 j 回目の再送に失敗したフレームは $j+1$ 回目の再送にも比較的失敗しやすい、という傾向を確認することができる ($j=1,2,3$)。

この結果を用いることで、無線 LAN におけるフレームの送信成功/失敗パターンが再送回数に依存するモデルに基づいたシミュレーションを以下のように実行することができる。すなわち、まず、あるフレームが再送フレームでない場合（1 回目の送信である場合）、そのフレームは確率 q_1 で送信に失敗する。また、あるフレームが j 回目の再送フレームである場合（ $j+1$ 回目の送信である場合）、そのフレームは確率 q_{j+1} で送信に失敗する ($j=1,2,3$)。送信に失敗したフレームは再送されるが、再送に 3 回失敗するとパケットロスとなる。

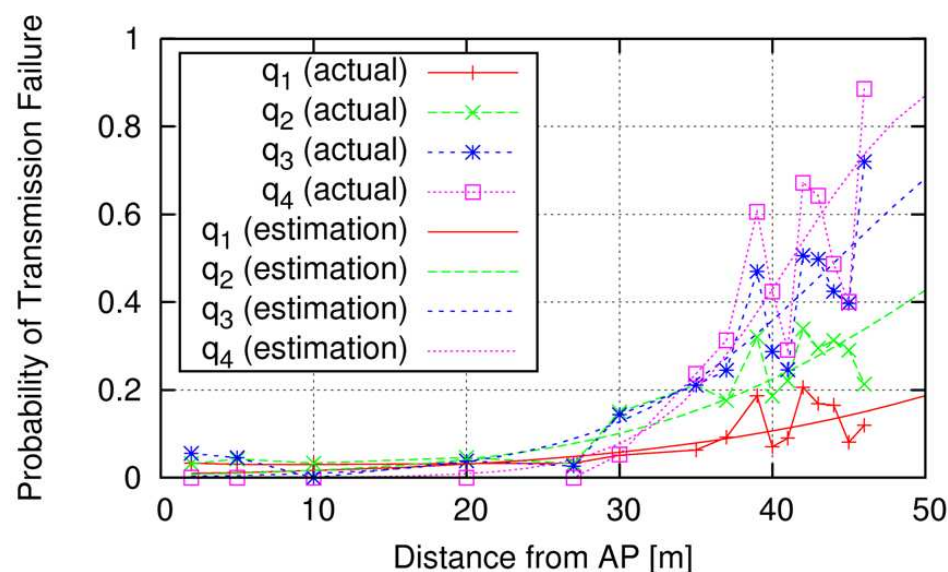


図 2-5 フレーム送信失敗率

2-3-2 ExpEther の有線無線混在ネットワークのモデル化

既存の ExpEther では有線通信における通信品質の検証は実証済みだが、無線有線混在型ネットワークでの通信品質を検証するためには、新しいアルゴリズムが必要である。本研究では、既存の ExpEther を無線環境に適用したネットワークのモデル化及びシミュレーションによる解析を行い、FPGA への最適なコード実装を行うための事前検証を行うことを目的とする。

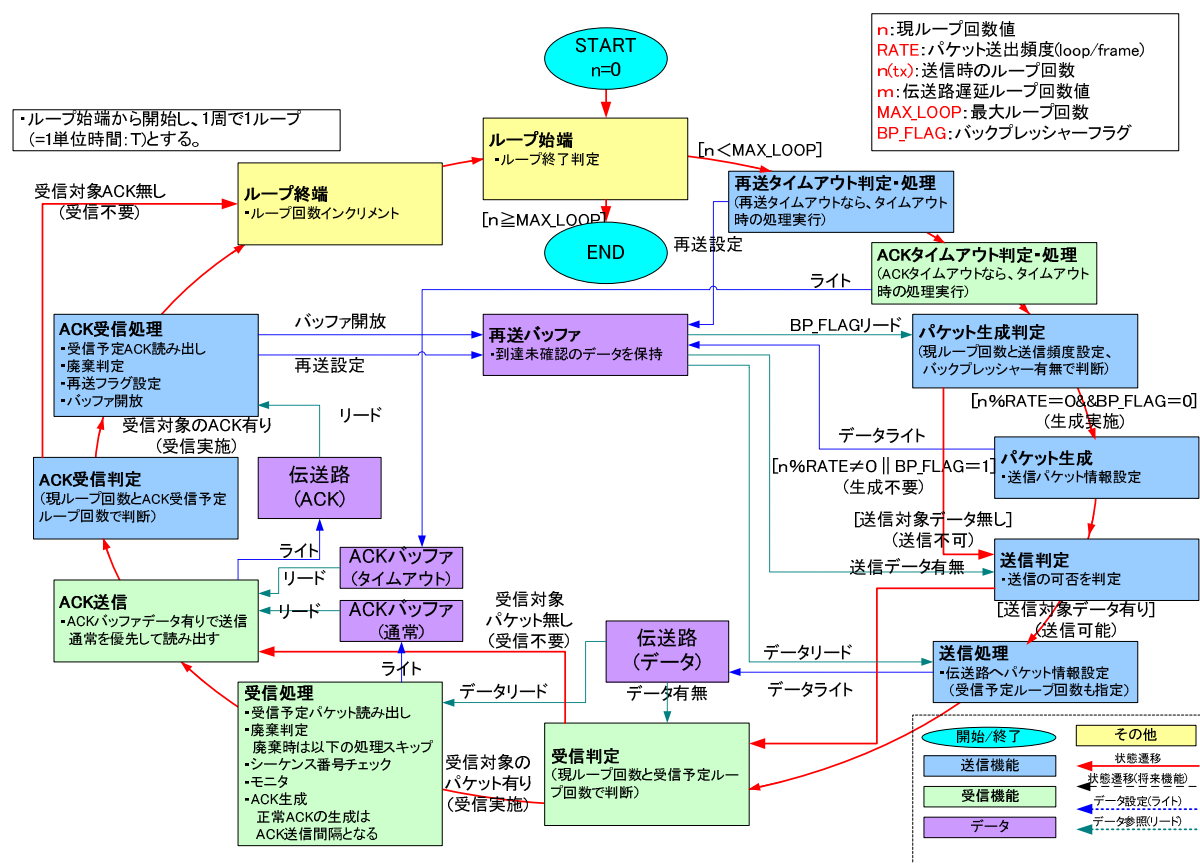


図 2-6 ExpEther の有線無線混在型ネットワークモデルの状態遷移

図 2-6 の状態遷移図より C 言語にてネットワークモデルを構築し、無線通信方式における通信品質のシミュレーション検証を可能とする。無線通信方式における ExpEther の改良点を次節、通信品質の解析シミュレーションの詳細及び結果については、2-3-3 節にて述べる。

2-3-2-1 ExpEther の概要

ExpEther とは、従来独立した 2 大インタフェースであった PCI Express とイーサネットを融合した新しいネットワークであり、PCI Express インタフェースである Host、IO デバイスをイーサネットと親和性の高い ExpEther インタフェースを用いて拡張することが可能となる技術である。以下に ExpEther の機能概要を挙げる。

- PCIe システムをネットワーク上に展開し、ネットワーク上で柔軟なシステム

を構成

- ・ CPU レスのリモートデバイス

■ Bridge 機能部の拡張で、PCIe/Ether 機能を拡張

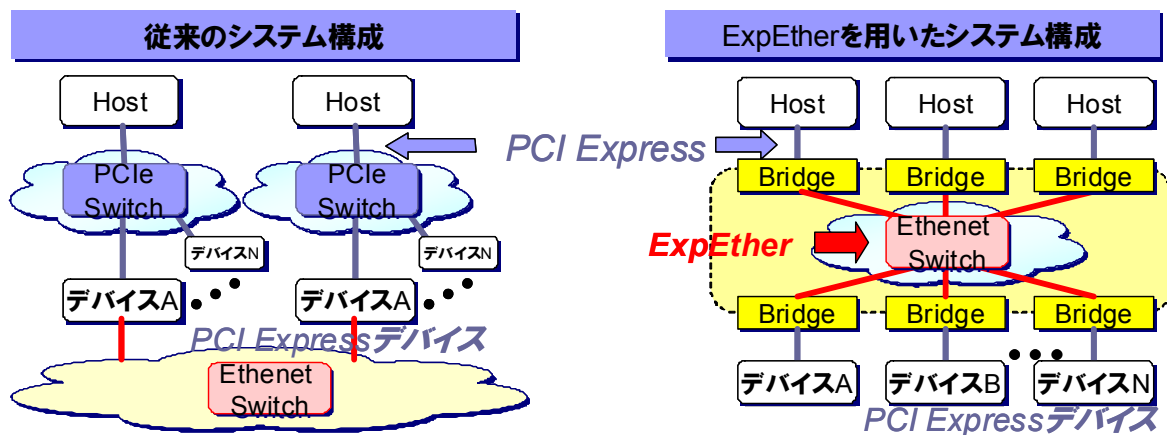
- ・ 従来 OS での HotPlug、接続デバイスの Bridge 間自動認識による Plug-&Play
- ・ 再送・輻輳・経路多重化技術により高信頼・高速データ転送

■ Ether 技術の活用で、システム管理機能の向上

- ・ VLAN でグルーピング、MAC アドレス接続でマルチ CPU、マルチ I/O の柔軟な接

続

- ・ ネットワーク上でのデバイス管理、トラフィック管理、障害管理、etc・・



2-3-2-2 ExpEther の改良点

ExpEther では、イーサネットレベルで End-to-End のデータ到達性を保障するための、高速軽量の再送・順序保障制御を行っている。しかし、無線通信方式での通信品質解析は実施していないため、本研究にて新しいアルゴリズムの研究及びそのモデル化を実施した。

図 2-7 に従来の ExpEther による再送制御方式、図 2-8 に本研究にて改良した無線通信方式による ExpEther の再送制御方式について述べる。

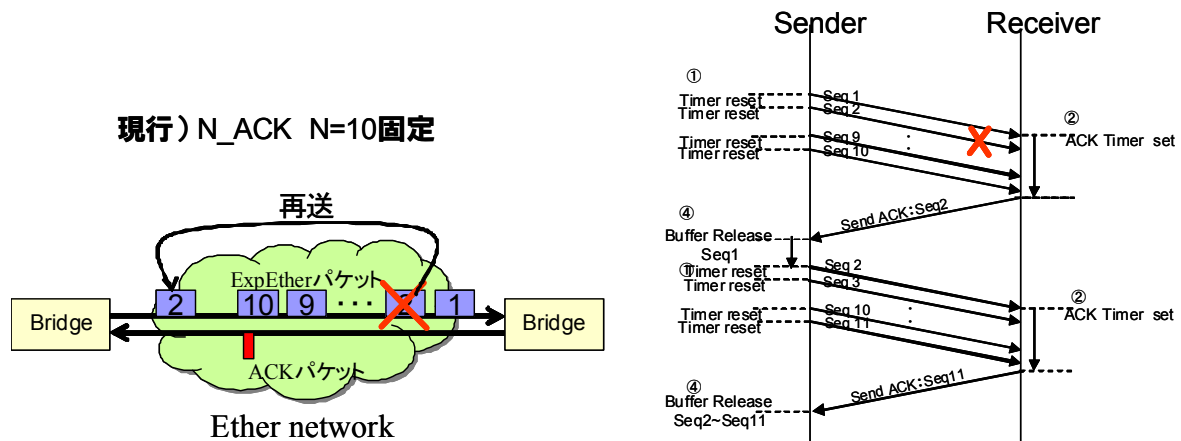


図 2-7 従来 ExpEther による再送制御

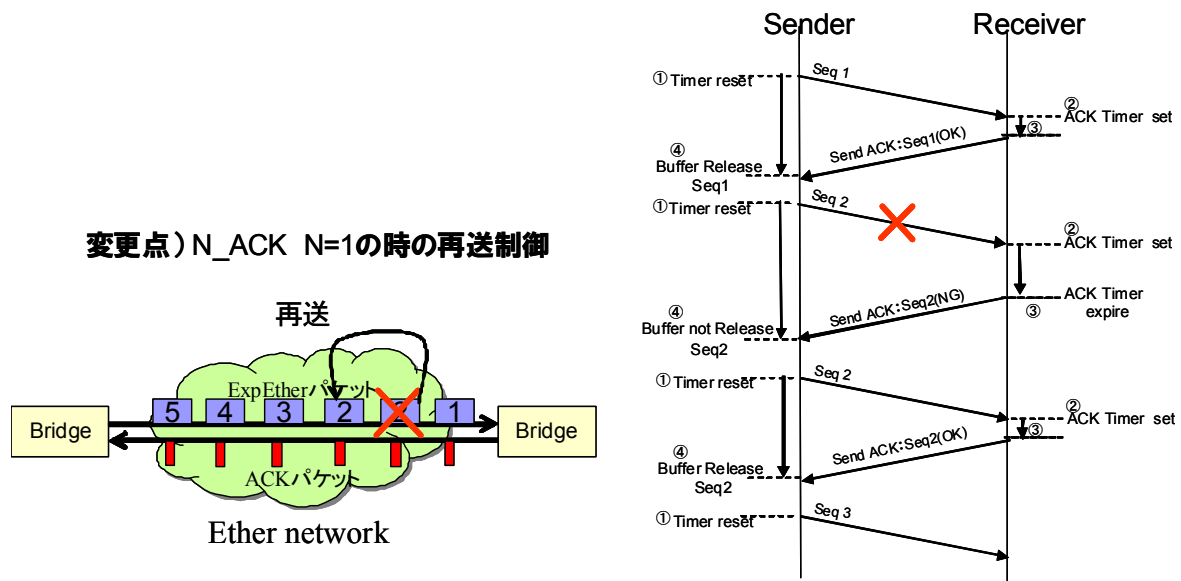


図 2-8 無線通信方式による ExpEther の再送制御

注) 図中の N とは、ACK フレーム送信間隔を示す

2-3-3 通信品質の解析シミュレーション

既存の ExpEther を無線環境に適用する場合、有線通信に比べて遅延（レイテンシ）が大きくなることが予想されるため、本解析シミュレーションでは、レイテンシに着目した、解析を実施した。尚、無線通信方式での再送率については、2-3-1 節での無線 LAN におけるデータフレームの送信成功/失敗パターンのモデル化にて研究した成果を使用した。

無線方式 802.11n (600Mbps) での実効レートとして、約 300Mbps での解析シミュレーションの結果を図 2-9 から図 2-14 に示す。

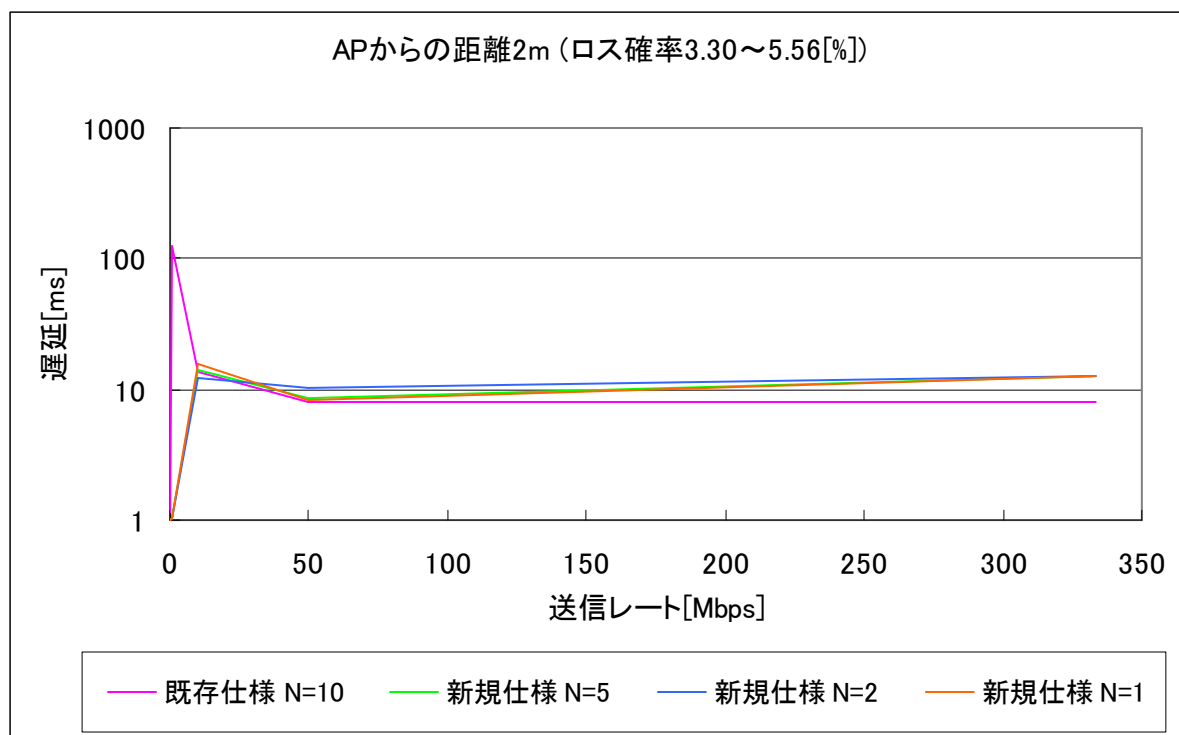


図 2-9 解析シミュレーション結果 (送受信時間=2ms、AP からの距離=2m)

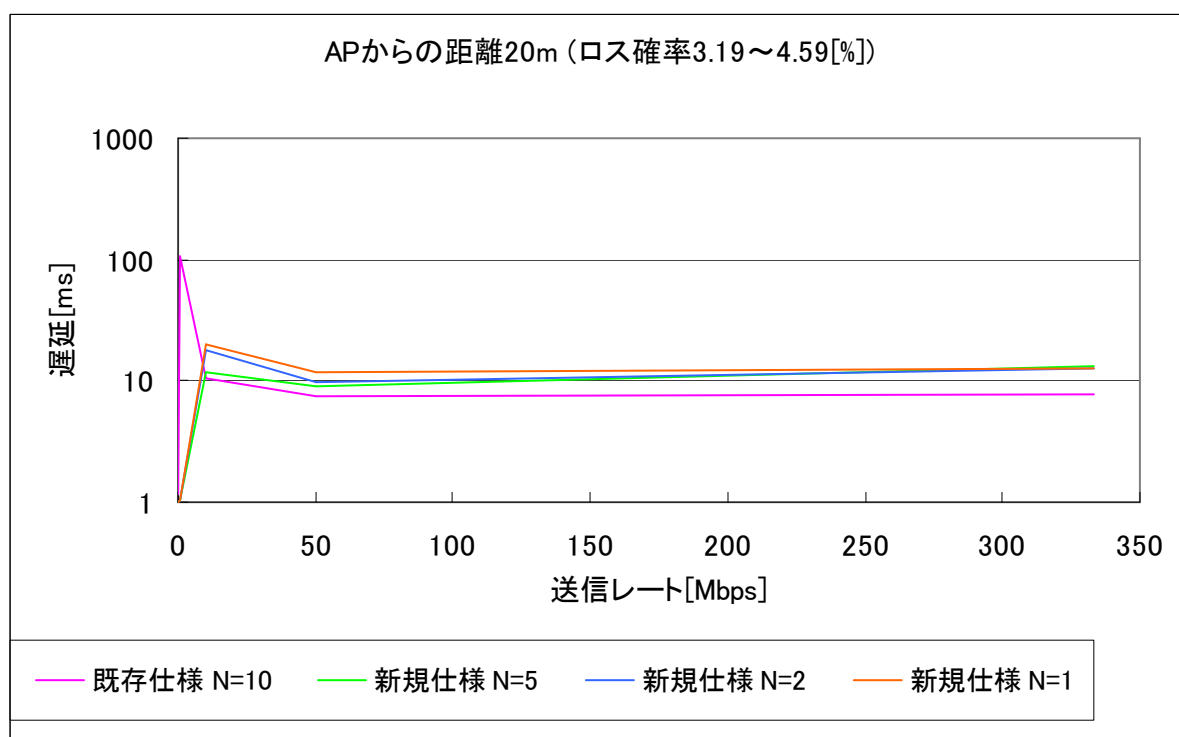


図 2-10 解析シミュレーション結果 (送受信時間=2ms、AP からの距離=20m)

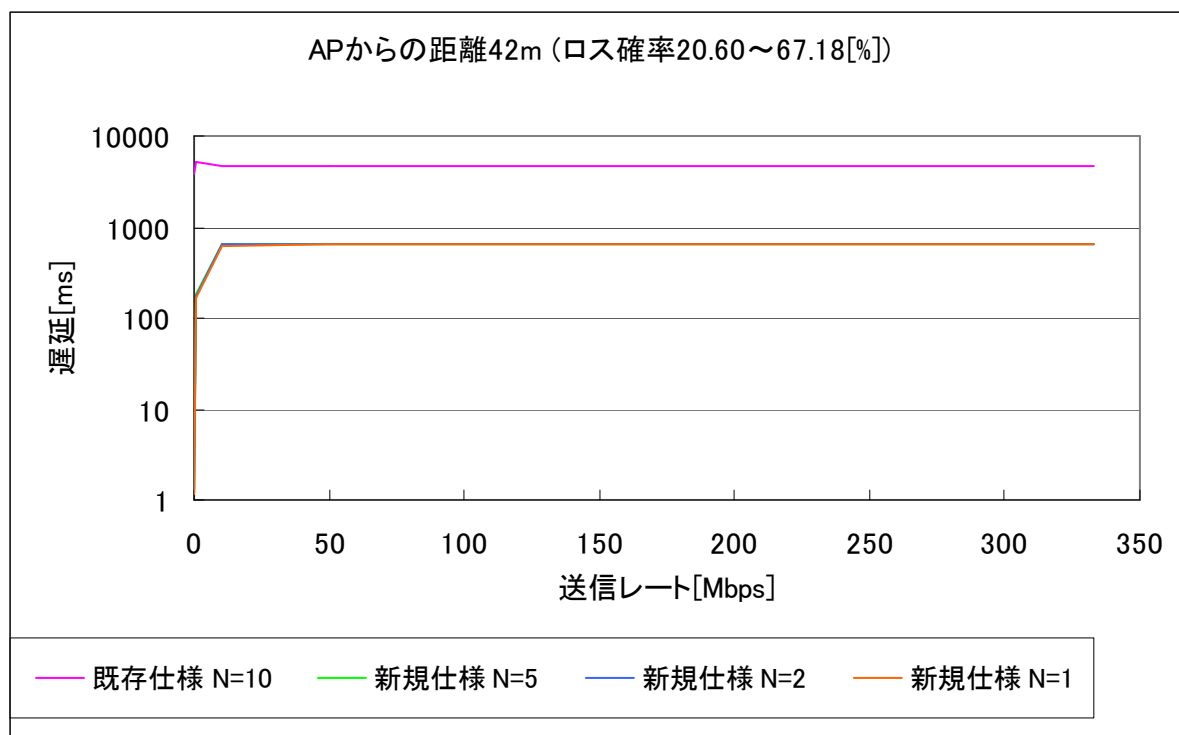


図 2-1-1 解析シミュレーション結果 (送受信時間=2ms、AP からの距離=42m)

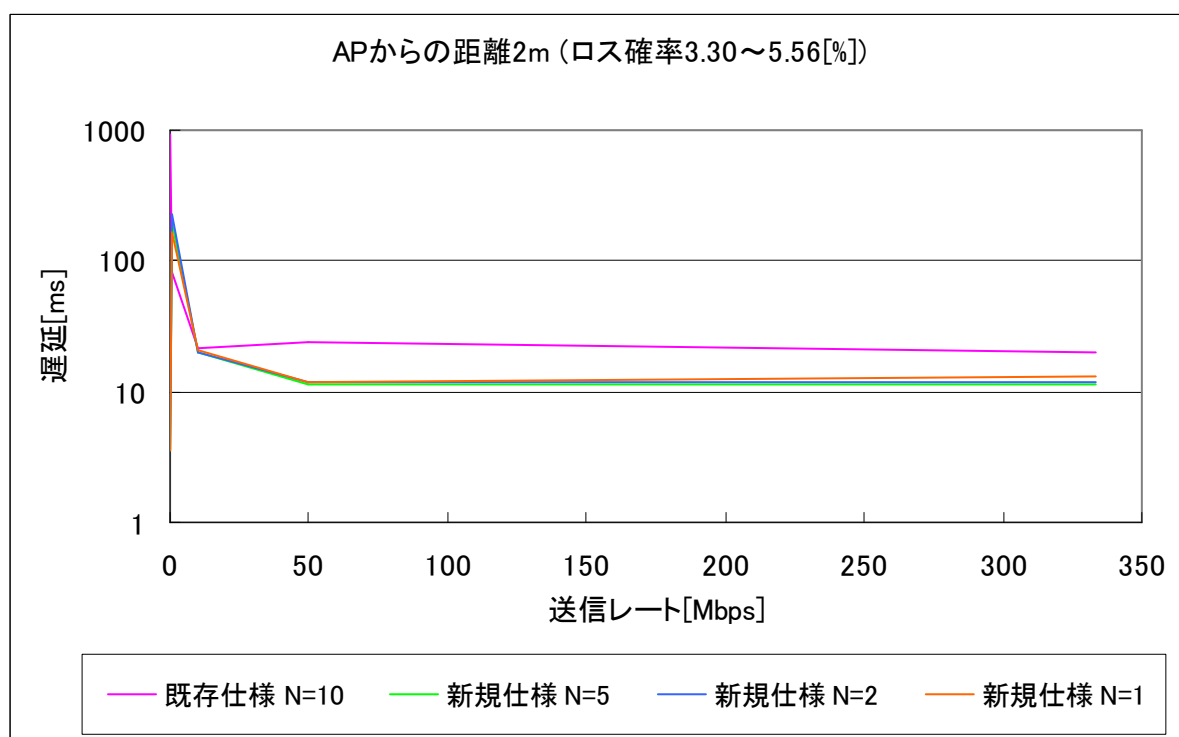


図 2-1-2 解析シミュレーション結果 (送受信時間=7ms、AP からの距離=2m)

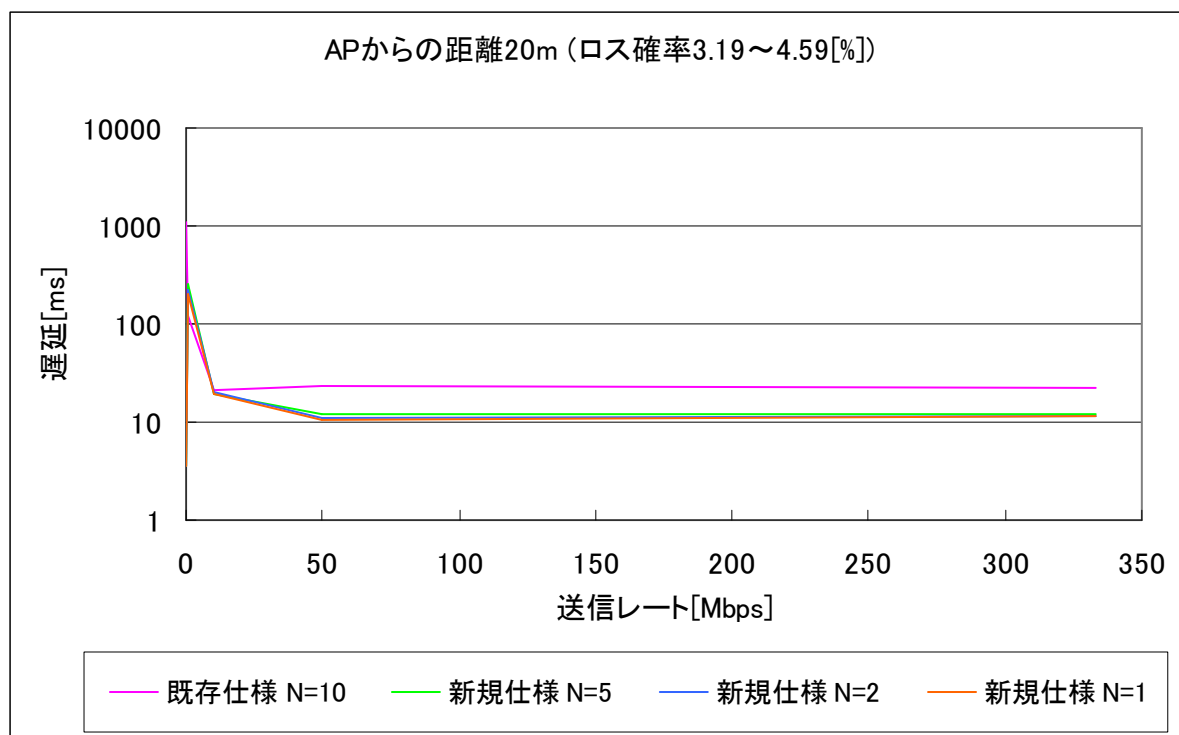


図 2-13 解析シミュレーション結果 (送受信時間=7ms、AP からの距離=20m)

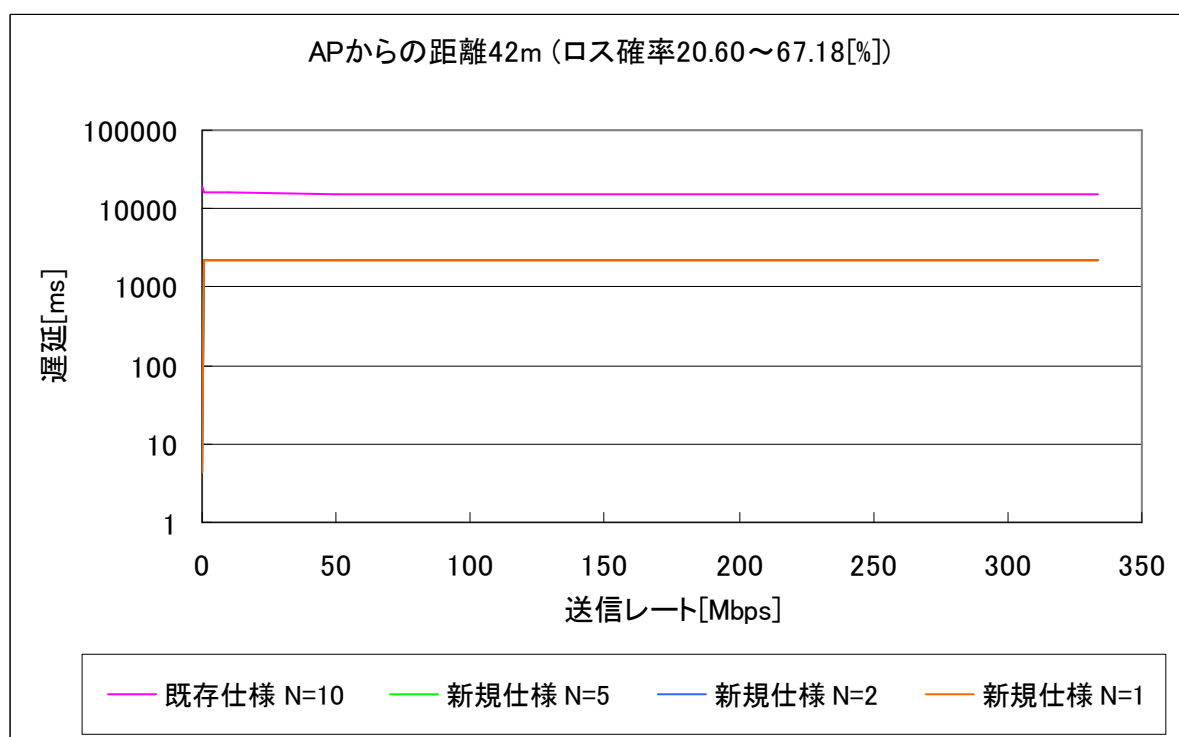


図 2-14 解析シミュレーション結果 (送受信時間=7ms、AP からの距離=42m)

データフレーム送信から ACK フレーム受信までの時間が 2ms、つまり無線通信による再送回数が少ない環境にて、図 2-9 は AP からの距離を 2m、図 2-10 は AP からの距離を 20m、図 2-11 は AP からの距離を 42m として、レイテンシの変化を解析した。この結果より、AP からの距離が 2m、20m では、送信速度（送信レート）約 10Mbps までは、従来の ExpEther に対してレイテンシが改善しているが、10Mbps を超えると逆にレイテンシが悪化していることが分かる。また、ACK フレーム送信間隔 N は、1, 2, 5 で大きな差分は見られない。

次にデータフレーム送信から ACK フレーム受信までの時間が 7ms、つまり無線通信による再送回数が多い環境にて、図 2-12 は AP からの距離を 2m、図 2-13 は AP からの距離を 20m、図 2-14 は AP からの距離を 42m として、レイテンシの変化を解析した。この結果より、全ての AP からの距離、送信レートにて、従来の ExpEther に対してレイテンシが改善していることが分かる。つまり、無線通信品質が悪い環境ほど、改良の効果が高いことが実証された。

2-4 輻輳制御回路の設計

従来の ExpEther ボードでは、有線ネットワークにおいて最適な通信性能を出すためのアルゴリズムが実装されている。これに加えて、本提案の有線と無線の混在型のネットワークにおいて最適な通信品質を実現するための新しいアルゴリズムを実装し、通信性能を検証する必要がある。そのため、ExpEther カード上の FPGA へ実装するために新しいアルゴリズムをコード化し、シミュレータにて事前に動作検証及び性能検証を実施する必要がある。FPGA への実装は VHDL コードとし、最適な通信品質が実現されているか ModelSim シミュレータにより検証を実施した。

2-4-1 輻輳制御 FPGA の設計

本提案の有線と無線の混在型のネットワークにおいて最適な通信品質を実現するための新しいアルゴリズムを VHDL 言語にてコード化し、FPGA への実装を行った。従来の ExpEther に対して実装した新しいアルゴリズムを以下に示す。

- ・ ACK フレーム送信間隔調節機能
- ・ ACK タイムアウト調節機能
- ・ 再送タイムアウト時間調節機能

2-5 ExpEther ボードによる性能測定

従来の ExpEther ボードでは、有線ネットワークにおける性能測定が実施されてきた。本提案の有線と無線の混在型のネットワークにおいて、実際の工場環境に近いネットワーク環境をシステムとして構築し、通信品質及び性能を測定した。

2-5-1 通信品質測定

2-5-1-1 データロス

従来の無線通信におけるデータロスが、本研究により改善されることを検証するため、図 2-15 の構成にて通信品質の測定を実施した。尚、サーバ、無線 AP 等使用した機材をエラー！参照元が見つかりません。に示す。図 2-15 の①は従来の無線通信、②は本研究にて開発した 1GbE 対応 ExpEther での無線通信構成を示す。

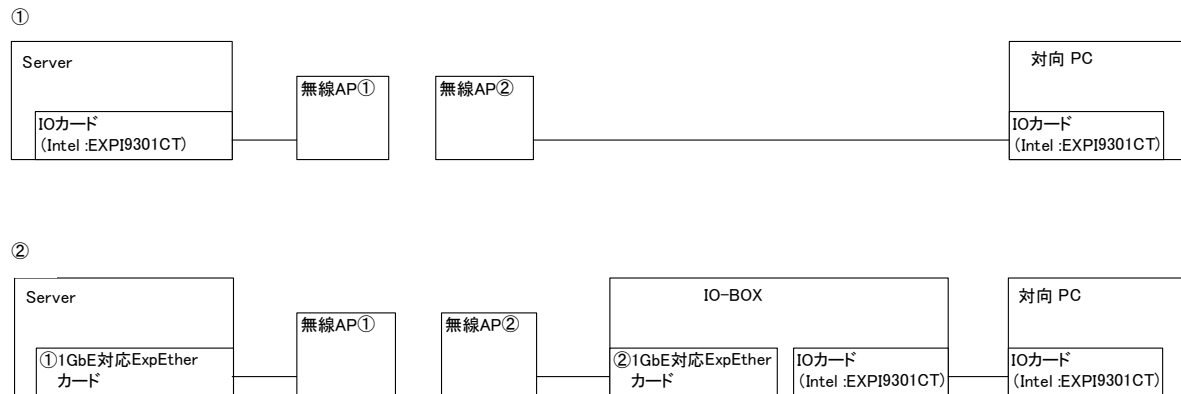


図 2-15 データロス検証構成

Traffic	Captured	Displayed	Marked
Packets	58591	58591	0
Between first and last packet	299.996 sec		
Avg. packets/sec	195.306		
Avg. packet size	106.000 bytes		
Bytes	6210646		
Avg. bytes/sec	20702.459		
Avg. MBit/sec	0.166		

Traffic	Captured	Displayed	Marked
Packets	58416	58416	0
Between first and last packet	299.998 sec		
Avg. packets/sec	194.721		
Avg. packet size	106.000 bytes		
Bytes	6192096		
Avg. bytes/sec	20640.444		
Avg. MBit/sec	0.165		

図 2-16 従来無線通信での測定結果

Traffic	Captured	Displayed	Marked
Packets	58314	58314	0
Between first and last packet	300.014 sec		
Avg. packets/sec	194.371		
Avg. packet size	106.000 bytes		
Bytes	6181284		
Avg. bytes/sec	20603.323		
Avg. MBit/sec	0.165		

Traffic	Captured	Displayed	Marked
Packets	58314	58314	0
Between first and last packet	300.011 sec		
Avg. packets/sec	194.373		
Avg. packet size	106.000 bytes		
Bytes	6181284		
Avg. bytes/sec	20603.508		
Avg. MBit/sec	0.165		

図 2-17 1GbE 対応 ExpEther カードでの測定結果

ネットワーク負荷試験機にて通信品質の比較を行った結果、従来の無線通信による測定結果（図 2-16）では約 0.3%のデータロスが発生していたが、本研究にて開発した 1GbE 対応 ExpEther カードでの測定結果（図 2-17）ではデータロスが発生していないことが分かる。

2-5-1-2 レイテンシ

従来の無線通信におけるレイテンシが、本研究により改善されることを検証するため、図 2-18の構成にて通信品質の測定を実施した。

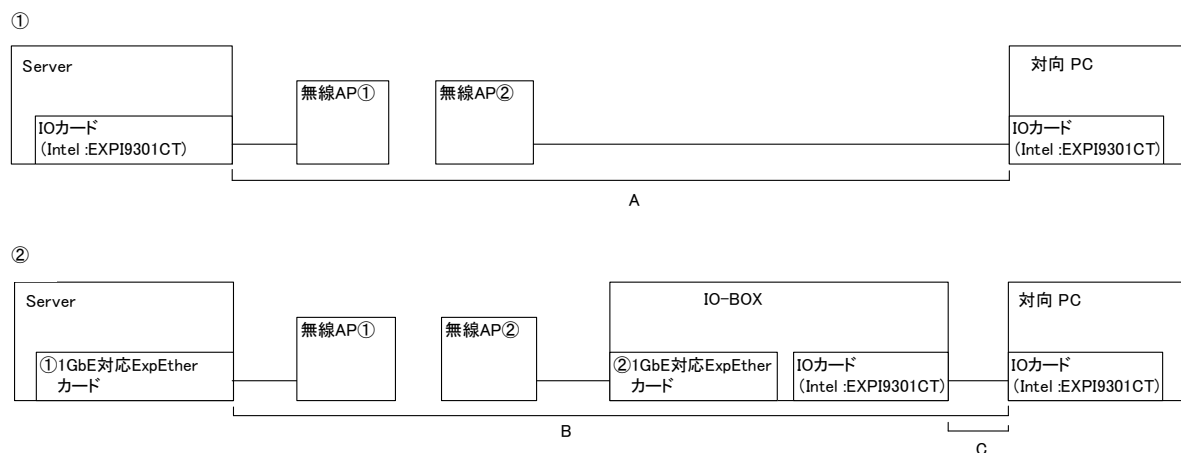


図 2-18 データロス検証構成

従来の無線通信の結果を図 2-18 の A 区間とし、測定器による結果 (A) は

A : 0.0-300.0 sec 3645 KBytes 99.5 Kbits/sec 6.302 ms 2/58314
(0.0034%)

本研究にて開発した 1GbE 対応 ExpEther カードでの通信の結果 (B) は

B : 0.0-300.2 sec 3595 KBytes 98.1 Kbits/sec 6.276 ms 0/57514
(0%)

無線通信品質を比較するため、②での 1GbE 対応 ExpEther カードでの無線通信の結果 (B) から IO カード (EXPI9301CT) - IO カード (EXPI9301CT) 間の有線通信の結果の差分を計算する。

IO カード (EXPI9301CT) - IO カード (EXPI9301CT) 間通信の結果 (C) は

C : 0.0-60.0 sec 733 KBytes 100 Kbits/sec 0.061 ms 0/11720
(0%)

となるため、1GbE 対応 ExpEther カードでの無線通信の結果は

$$6.276 \text{ ms} - 0.061 \text{ ms} = 6.215 \text{ ms}$$

となる。

上記の結果より、従来の無線通信におけるレイテンシ 6.302 ms に比べ、1GbE 対応 ExpEther カードでの無線通信におけるレイテンシは 6.215 ms となり、約 1 % の性能改善結果が得られた。

2-5-2 開発成果

通信品質測定の結果は、0.3%発生していたデータロスが無くなり、かつレイテンシも僅かではあるが低減できる結果が得られたことで、これまで FA 産業で課題となっていた無線通信品質が向上し、無線化の実現目処が立ったと考えられる。これにより、無線化による配線時間、コストの削減効果が期待できる結果となった。

第3章 全体総括

3-1 研究開発後の課題

3-1-1 通信性能

本研究開発の成果として、データロスの解消及び通信におけるレイテンシの削減により、通信品質の向上に関する効果が得られた。しかし、通信品質が向上した半面、通信性能面では無線方式 802.11n にて約 2.7Mbps の結果となった。本研究にて想定している FA 機器の制御としては、約 24 台まで制御が可能となるが、全てのアプリケーションへの対応やコスト削減効果を上げるためには、更なる性能向上が望ましい。

3-1-2 無線通信距離

本研究では無線 LAN におけるデータフレームの再送率に関する研究を行ったが、通常の無線 LAN では 40 メートルを超えた場合の再送率が大きく変化していることが分かった。全ての工場環境へ対応するためには、アドホック通信などによる通信可能距離の向上策を施すことが望ましい。

3-1-3 コスト削減

本研究にて開発した、1GbE 対応 ExpEther カード及び IO-BOX を企業（工場）へ導入加速するためには、製造費用の削減を行う必要がある。現在、1GbE 対応 ExpEther カードは FPGA にて実現しているが、現時点では価格が非常に高いため、廉価版の FPGA への切り替えや ASIC 化によるコスト削減が必要となる。但し、ASIC 開発を行うためには初期費用が非常に高価であるため、今後の事業計画に合わせたコスト計画が必要である。

3-2 事業化展開

3-2-1 市場調査

FA 分野においてオートメーション生産ラインにある産業用ロボットの制御や監視を無線化し、設置性、運用性を向上させたいという市場などを対象としているが、今後の事業化を展開するためには、事前の市場調査が必要である。今回の提案システムを事業化するにあたり、アドバイザーである PALTEK と協調した市場調査や川下分野企業からのニーズを聞き出し、今後の製品へフィードバックすることが必要である。

3-2-2 製品化のための技術課題

製品化を行うための課題として、提案構成では ExpEther ボードと無線 LAN アクセスポイントを分離した構成としている。これは無線方式の自由度を確保することで製品化を行う前に柔軟に無線 LAN 方式を変更可能な構成とし、実験を行うためである。但し、そのままの構成では対象とする組立/検査工場では装置の設置自由度が損なわれるため、製品化においては ExpEther ボードと一体化を検討する必要がある。

(1) 無線 LAN アクセスポイント一体化ボードの開発

より使いやすく高設置性を確保するため無線 LAN アクセスポイントを一体化したボードの作成を行う必要があるが、川下分野企業からのニーズ等も考慮したうえでの検討が必要である。

(2) 無線 LAN アクセスポイント設定ソフトウェアの開発

無線 LAN アクセスポイントを一体化したボードを開発する際、その設定を行うためのソフトウェア開発が必要である。

(3) 無線 LAN メッシュネットワーク対応ソフトウェアの開発

IO-BOX 間で自律的に通信を行えるように無線 LAN メッシュネットワーク対応のソフトウェア開発を行う必要がある。

3-3 研究発表等の状況

3-3-1 研究発表

(1) 電子情報通信学会 全国大会 (2010 年 3 月 17 日)

「FA 機器間接続装置の構成法」

福寿康行・成澤孝悦・寺尾貴明 (iD)・飯塚秀明・内田真人 (九工大)

(2) 電子情報通信学会 全国大会 (2010 年 3 月 17 日)

「FA 機器間接続システムの一検討」

飯塚秀明・内田真人 (九工大)・福寿康行・成澤孝悦・寺尾貴明 (iD)

3-3-2 その他公表

(1) 第一回クラウドコンピューティングジャパン EXPO (2010 年 5 月 12 日～5 月 14 日)

今後の事業化を考え、第一回クラウドコンピューティングジャパン EXPO の ExpEther コンソーシアム展示ブースにて、本委託事業にて開発した「1GbE 対応 ExpEther カード」及び「IO-BOX」を静態展示しました。

3-4 専門用語解説

- RS-232C : 米国電子工業会 (EIA) によって標準化された、シリアル通信の規格の 1 つであり、シリアル通信方式としては最も普及している。
- RS-422 : 米国電子工業会 (EIA) によって標準化された、シリアル通信の規格の 1 つであり、Apple 社のパソコンである Macintosh シリーズなどに搭載されている。
- PCI Express : PCI-SIG によって策定された、PCI バスに代わるパソコン向けシリアル転送インタフェースとして、現在ほとんどのパソコンで採用されている。
- イーサネット : Xerox 社と DEC 社 (現在は Hewlett Packard 社の 1 部門) が考案した LAN 規格であり、IEEE802.3 委員会によって標準化された規格としてほとんどの LAN に採用されている。
- USB : Universal Serial Bus の略であり、コンピュータに周辺機器を接続するためのシリアルバスの 1 つである。
- UART : Universal Asynchronous Receiver Transmitter の略であり、調歩同期方式によるシリアル信号をパラレル信号に変換したり、その逆方向の変換を行うための集積回路である。
- IO カード : コンピュータにおいて、装置の外部に接続する機器との情報の入出力に使用するインタフェースを搭載したカードを指す。
- トラフィック : ネットワーク上を異動する音声や文書、画像などのデジタルデータを指す。
- C 言語 : 1972 年に AT&T ベル研究所が主体となって開発したプログラミング言語である。
- Plug&Play : コンピュータに拡張カードを追加する際、ユーザが手動で設定作業を行わなくても、自動的にカードを検出し、最適な設定を行うシステム。
- VLAN : 企業内ネットワーク等において、物理的な接続形態とは独立に、端末の仮想的なグループを設定すること。
- MAC アドレス : ネットワーク上で、各ノードを識別するために設定されている LAN カードなどのネットワーク機器のハードウェアに一意に割り当てられる物理アドレス。

3-5 参考文献

- [1] K. Tsukamoto, T. Yamaguchi, S. Kashiara, and Y. Oie, ''Experimental Evaluation of Decision Criteria for WLAN handover: Signal Strength and Frame Retransmission,'' IEICE Transactions on Communications, Vol. E90-B, No. 12, pp. 3579-3590, Dec. 2007.