

修士論文

赤外線通信を用いた室内マルチホップネットワーク環境の設計と実装

Design and Implementation of Multihop
Network System Using Infra-Red
Communication Technology in Indoor
Environment

平成 27 年 2 月 5 日提出

指導教官 江崎 浩

情報理工学系研究科

48-136404 大筒 裕之

概要

近年、エネルギー管理システムをはじめとして、センサやアクチュエータなど、コンピュータではない機械をネットワークに接続してデータ通信を行うようなシステムが増えてきている。これらのIoT(Internet of Things) や M2M(Machine-to-Machine) 型システムは、これまでコンピュータネットワークに接続されることがなかった多様なデジタルデバイスを相互接続し、新しい利用法やビジネスを創生しようとしている。

これらの、デバイスやネットワークは、ローカルに閉じた閉域ネットワークとしての運用ではなく、インターネットへの接続を前提としたものであることも、システム設計上、重要な前提条件として考慮しなければならない。

HEMS(Home Energy Management System) や BEMS(Building Energy Management System) に代表される、家庭やオフィスなどの室内環境において、多数のデジタル機器や電化製品が、デジタル化・ネットワーク化され、管理・制御されることを目的としたアーキテクチャの研究開発や技術規格策定の取り組みが進められている。すなわち、今後、室内ネットワークに接続されるデジタル機器は爆発的に増加していく事を想定したシステム・ネットワーク環境の実現と普及が必要となる。本研究では、このような「モノのインターネット (IoT: Internet of Things)」時代の到来にそなえて、室内環境におけるセンサや家電に代表される多様なデジタル機器の管理・制御システムの必要条件を考察・整理し、その基盤となるバックボーンネットワークを構築する機器の設計・実装・動作検証を行った。

「モノのインターネット」の世界を室内環境において実現するためには、モノ同士を接続する技術が以下の6つの要素・要求を同時に満足させる必要がある。

1. インターネットに接続可能であること。
2. 接続装置(ネットワーク・インタフェース)が安価であること。
3. ネットワークへの接続が容易であること。
4. ネットワークの管理が容易であること。
5. プライバシ・セキュリティの観点から、ネットワークが物理的にセキュアであること。
6. オープン技術であること。

物理的セキュリティとは、物理層のレベルでセキュアにすることが可能な通信のことである。例えば、通信の存在すら周囲に知られないようにできることが、物理的セキュリティを持った通信の特徴である。現実的には、比較的容易に遮蔽が可能な特性を持つ媒体を利用した通信である。UTP ケーブル(Ethernet) は、物理的に遮蔽ができるという点では、セキュアであるが、室内を張り巡らす用途には向いているとは言えない。現在、多くの室内ネットワーク構築で用いられるデータリンクは、電波で通信する IEEE802.11(通称 WiFi) が主流であるが、特に第5番目に挙げた物理的セキュリティとプライバシーの要請を満たしていない。そこで、本研究では屋内のバックボーンネットワークとして、安価なネットワークインタフェースを提供することが可能であり、かつ、送信信号の伝搬領域を容易に管理制御可能である赤外線通信技術を用いたマルチホップネットワークを採用することを提案し、そのシステム設計と実装を行った。実装システムは、学会会議の環境において実証評価を行い、その動作を確認するとともに基礎的な通信特性の評価を行った。

目次

1	はじめに	1
2	IoTにおけるネットワークインフラ	4
2.1	Local Area Network 構築技術	4
2.1.1	Ethernet	4
2.1.2	IEEE802.11(WiFi)	4
2.1.3	Power Line Communication	6
2.1.4	その他	6
2.2	Light Communication	6
2.2.1	Infrared Communication	7
2.3	関連研究	7
2.3.1	ECHONET Lite	7
2.3.2	Pluto, iRemocon	8
3	提案アーキテクチャ	10
3.1	概要	10
3.2	赤外線マルチホップ通信	10
3.3	赤外線マルチホップのメリット・デメリット	10
4	赤外線マルチホップ通信装置の実装	11
4.1	物理層	11
4.1.1	変調方式	12
4.1.2	回路	13
4.1.3	Arduino	13
4.2	データリンク層	16
4.3	ノイズ対策	17
5	実証実験	20
5.1	実験の目的	20
5.2	実験方法	20
5.3	結果	20

5.4	考察	24
6	おわりに	26
6.1	まとめ	26
6.2	今後の課題	26

1 はじめに

20 世紀のインターネットが向かう方向性とされていた「Internet for Everyone」は、半導体技術の発展とインターネットそのものの普及と発展に伴い、21 世紀を迎えて「Internet for Everything」すなわち、人のインターネットから「モノのインターネット (IoT; Internet of Things)」へと発展・進化した。IoT の時代では、モノとモノとが直接デジタル情報を伝送・共有・加工するような環境、すなわち、M2M(Machine-to-Machine)[5] の環境が実現されなければならない。IoT の世界では、コンピュータに限らずあらゆるモノ (Thing) が、グローバルな接続環境を提供するインターネットを含むデジタルネットワークに接続される。近年においては、テレビや空調のような、生活に欠かせない比較的大きな電化製品ばかりではなく、スマートフォンやウェアラブル端末、あるいは各種センサをはじめとして、インターネット接続に対応する「モノ」が多数登場、市場投入されている。

IoT は、21 世紀の社会産業活動を支える基盤となることが想定されており、社会・産業の高効率化と高機能化、さらに、信頼性の向上に象徴される「スマート化」を実現し、今後の人類の継続的・持続的発展に必須の方向性とされている。効率化は、結果的には、少ないエネルギーでより大きい活動やアウトプットを実現することになり、有限である地球上の資源問題の解決、さらには、(産業) 廃棄物の削減を実現することで地球の温暖化を含む地球環境対策への貢献にすることが期待されている。さらに、センサ技術の進展とそのネットワーク化は、我々の生活の質の向上と新しいアプリケーション・サービスを創出し、より安全で快適な環境、創造性の向上を誘導する生活および業務環境を提供することが期待されている。

例えば、IoT 技術の有用な生活に密着した展開領域のひとつとしては、家庭を上げることができる。すでに普及している技術の中にも、実は IoT の一種である例は数多く存在する。その中でも特に生活に密着したものとして、家庭における電力やその他のエネルギー管理・制御を行う HEMS(Home Energy Management)[3] と呼ばれるシステムと、各戸の電力使用量のリアルタイム管理と電力会社の電力負荷に対応して家庭の電力消費量を制御するデマンド制御 (DR: Demand Response)[8] を実現するためにすべての住居に導入されるスマートメータの例が挙げられる。HEMS とは、テレビ、エアコンなどの電化製品や、家庭に導入されている太陽光発電システム、蓄電池などを相互接続し、エネルギーの生成・利用情報の収集・可視化・解析を行うことで、各機器の管理制御を行うシステムである。スマートメータ自体は、検針にかかる業務の自動化を目指したもののだが、宅内にスマートメータ対応の HEMS 機器が設置されている場合は、HEMS 機器へ消費電力などの情報を送受信することが可能となる。HEMS は、家庭内に存在するさまざまな機器の動作状況や家庭内の温度・湿度などの環境・状況に関する情報を利用することで、快適性を維持しながら、より効果的に省電力化が実現可能とされている [13]。家庭内の電気機

器やセンサを相互接続し、管理・制御を行う HEMS は、それ自身が IoT のいち形態・実装であるといえる。HEMS における機器やセンサ間の通信は、大きく分けて次の 2 つの方法が主流となっている。

- 920MHz 電波を用いた無線通信
- 既設の電力線を用いた電力線通信

これら 2 つの通信方法それぞれに共通して挙げられる、運用からのメリットとしては、管理対象機器との接続・HEMS 機器の設置が容易で、かつ、大掛かりな工事が必要ないことである。既設の住居や事務所に、新しい機器を設置し、これをネットワークに接続する作業の軽減、特に、構造体への修正を最小にすることは、コストのみならず、居住・業務空間の景観・意匠に大きな影響を与えることになり、技術・方式の選定にあたって大きな評価項目となる。しかし、無線通信、電力線通信で実現した場合、それぞれに物理的脆弱性が存在する。まず、電波を用いた無線通信では、電波が居住空間・業務空間を構成する「壁」を通り抜けてしまう事が物理的脆弱性に繋がる。宅内ばかりではなく、信号が宅外まで届いてしまうため、盗聴を防ぐことは難しくなる。内容の傍受は通信を暗号化することで防げるとされているが、最新の技術を用いれば、多くの暗号方式は解読可能であることがよく知られている [6, 2] し、通信の存在は結局暴かれてしまうことになり、強力な電磁波を用いた混信等の妨害を受ける結果になりかねない [10, 11]。さらに、スマートメータに関しては、一般的にはスマートメータは家の外に設置されているため、攻撃者はスマートメータの生データと暗号化済みの通信信号の両方を比較的容易に入手できることになり、非常に危険である。電力線通信の場合も、電力供給側（宅内の配電盤など）に信号を終端する機器がなければ、信号が宅外に漏れる可能性があるし、逆を言えば、外部から妨害を受ける可能性もある。また、ネットワークを構成する機器が全て同じサブネットに所属することになり、管理を分けるのが難しくなる。

現在の HEMS に関する研究開発においては、上述した問題に関する考慮が十分ではないのが実情である。そこで、本研究では、上述したデメリットを持たず、かつ、設置が容易で低コストなシステムを構築可能な室内環境向けのバックボーンネットワークの設計と実装・実現を目的とする。

IoT を実現するネットワーク環境を構築するためには、モノをネットワークに繋げる技術が必要となる。その技術に求められる重要な要求条件としては、

- 低コストであること。
- 高セキュリティ(物理的に外界と隔離できる)であること。

が挙げられる。

多種多様で多数のモノ (Things) を接続する必要があるため、接続するためのコストは低いことが望まれる。ここでのコストとは、(1) 接続するための装置の価格コスト、(2) 装置同士を接続するために配線

する労力コストの両方を指している。また，機器同士の通信は，その機器を使う人，関わる人の個人情報のような，外部には知られたくない情報を含む可能性があるため，セキュリティが考慮されている必要がある。そこで，本研究では，以下の構成で，IoT を安価に・安全に，家庭や事業所で実現するために必要となるバックボーンネットワークを構築・運用するために必要となる技術の整理を行い，赤外線通信技術を用いたマルチホップ型の無線通信バックボーンシステムの提案を行うとともに，その実装を行い，実証実験環境を用いた基礎的な動作検証と通信特性の評価を行った。以下が，本論文の構成である。第 2 章では，IoT の領域におけるネットワークインフラの方向性や展望を整理し，第 3 章では，本研究に関連する既存研究や開発に関する整理を行っている。第 4 章で，本研究で提案する赤外線通信技術を用いたマルチホップ型の無線通信バックボーンシステムの概要およびその利点・問題点を整理している。第 5 章では，提案システムにおいて重要となる変調方式とノイズ対策に関する議論を行い，第 6 章でシステムの実装に関する議論を行っている。第 7 章で，実証実験環境とその結果に関する整理と分析を行い，第 8 章で本研究の今後の課題と貢献に関する整理を行っている。

2 IoTにおけるネットワークインフラ

IoTを実現するためのネットワーク技術は、Local Area Networkを構築する技術である。

ネットワークは、その大きさによって分類され、規模の小さいものから順に、Local Area Network、Metropolitan Area Network、Wide Area Networkなどと呼ばれる。Local Area Networkは、広くても一施設に収まる程度の大きさのネットワークを指して呼ぶ事が多い。更に規模が大きくなると、小さなLocal Area Network同士を複数繋ぐネットワークが出来上がる。これを繰り返すと、階層構造の大きなネットワークができあがり、現代で最も大きなものがインターネットである。すなわち、狭い空間で大量のモノをインターネットに接続することは、モノ同士のLocal Area Networkを構成することにほかならない。

以下では、既存のLocal Area Network構成技術をまとめ、その問題点を洗い出す。

2.1 Local Area Network 構築技術

Local Area Networkを構築する技術には様々あるが、ここでは、OSIの参照モデル(図.1)におけるレイヤ1の物理層、レイヤ2のデータリンク層に特に着目する。

2.1.1 Ethernet

Local Area Networkを構築する技術として古くから使われているのは、UTPケーブルを用いたEthernetである。通信速度も高く、コンピュータの接続はとても直感的でわかりやすい。しかし、これは接続するコンピュータ・機械が少ない場合の話で、IoTのインフラとして利用するには多くの問題点がある。

まず、複数機器で通信を行うためにはスイッチングハブなどの機械が必要になるが、ポートの数には限りがあるため、これを超える機器を接続するためにはスイッチングハブの増設が必要になる。また、機器の数と同じだけのケーブルが敷かれることになるため、管理の労力コストが膨大になることが容易に想像できる。

2.1.2 IEEE802.11(WiFi)

複数機器を繋ぐための規格として登場したのが、電波無線を用いて通信を行うIEEE802.11[1]である。現在では、WiFiという通称で世界に広く浸透しており、いたるところでインターネットへの接続を可能にしている。一般に、WiFiの無線通信には、指向性のないアンテナが使われることが多く、電波の強度が十分強ければたとえ遮蔽物があっても全方向から通信が可能である。

Layer 7 : アプリケーション
Layer 6 : プレゼンテーション
Layer 5 : セッション
Layer 4 : トランスポート
Layer 3 : ネットワーク
Layer 2 : データリンク
Layer 1 : 物理

図 1. OSI Reference Model.

IEEE802.11 を IoT のインフラとして利用する場合には、この広いエリアをカバーする特性が問題となる。電波信号が壁などの遮蔽物を通り抜けてしまうため、接続したいエリアを物理的に明確に区切ることが難しい。本研究では特に、室内環境のための IoT を想定しているため、室外に信号が漏洩するのは物理的にセキュアとは言いがたい。

2.1.3 Power Line Communication

上記以外で、室内環境で通信を行う規格として、既設の電力線を用いた電力線通信 (PLC; Power Line Communication) がある。50Hz/60Hz の交流電圧に対し、これよりも大きい周波数の信号を混ぜて電力線に流す。すると、同じ電力線に繋がっている機器は信号の混ざった交流電圧を受け取るため、これを分けることで信号の送受信が可能となっている。電力線通信を用いるメリットは、既に出来上がっている建物に対して線を通すための工事が不要なく、導入が簡単な事である。

電力線通信にも、IoT のインフラとして利用する場合に問題が存在する。まず、有線通信でも似たようなことを書いたが、ネットワークに接続できる機器の数は、コンセントの数に制限される。また、一つの電力線に全ての機器が接続するため、物理的にネットワークを分けることができず、ネットワークに接続される機器が増えた時に管理コストが大きくなる。さらに、電力供給側、宅内の配電盤などに信号を終端するための機器がなければ、意図しない範囲にまで信号が漏れる可能性があり、物理的にセキュアではない。ローパスフィルタを通すことで元の 50Hz/60Hz の電圧へ戻すことが可能だが、それには電気工事が必要となる。

2.1.4 その他

2.2 Light Communication

電波が壁を透過してしまうのであれば、より周波数の高い電磁波を用いればよい。電波法第 2 条の 1 によれば、電波は 3THz 以下の周波数の電磁波であるため、3THz 以上の周波数の電磁波を用いることを考える。3THz 以上の周波数の電磁波といえば、赤外線、可視光、紫外線と続く。つまり、光を使って通信を行うことを考える。

照明は室内に必ずある器具である。現代は蛍光灯から LED へと転換の時期にある。LED は modulation が簡単で、通信にはもってこい。既に、照明 LED とスマホカメラの間で情報をやりとりする研究も行われている。実は何も考えずに LED へと交換した人は多く、全ての照明が modulator 付きの LED への交換されるのは数年～数十年先となる。照明 LED の modulator だけを導入するのであれば、よりコストの

安い赤外線を使った方が理にかなっていると考えられる．VLC は，人間の目に点滅が認識されないように信号が偏らないように処理をする必要がある．

2.2.1 Infrared Communication

赤外線通信は，様々な形で進化を遂げている．赤外線リモコン，携帯電話のアドレス交換のための近距離高速通信 (IrDA)，など，生活の中でも特に身近なところに赤外線通信は多数使われている．特に赤外線リモコンは全世界どこでも使われているため，赤外線の送受信ユニットは大量生産の恩恵にあずかって非常に安価である．インフラ構築のために物理は赤外線を使うこととする．

2.3 関連研究

以下では，本研究の目的の一つである室内環境における電化製品の制御を目的とした研究・開発を紹介する．

2.3.1 ECHONET Lite

1997年の京都議定書の制定を受け，CO₂排出量の削減などに対応するため，家電機器の遠隔制御やモニタリングに活用できるホームネットワークの基盤開発を進めるエコネットコンソーシアムが同年に設立された．エコネットコンソーシアムは，従来の家電機器および住宅設備機器に関するホームネットワーク技術を発展させ，より利用しやすい規格として”ECHONET Lite”を発表している [15]．同規格は，2013年に国際標準化規格として承認されており，ホームネットワークの構築技術として高く評価されている．

ECHONET Lite は，家庭内にある様々な機器を接続し，相互通信するための規格となっている．通信装置仕様なども規定されているが，図2のように，物理層からトランスポート層までは特に規定しないとしている [4]．

すなわち，ECHONET Lite は，それ単体では物理セキュリティに関して特に考慮されていない規格であるといえる．ECHONET Lite の下位層に Ethernet や WiFi を採用すると，2章で言及したように，機器の管理が大変になったり物理セキュリティが脆弱なものになってしまう．このことは逆に，物理セキュリティが強固な物理層，データリンク層を採用することで，ECHONET Lite を利用したネットワークの物理セキュリティ向上が望めると言える．

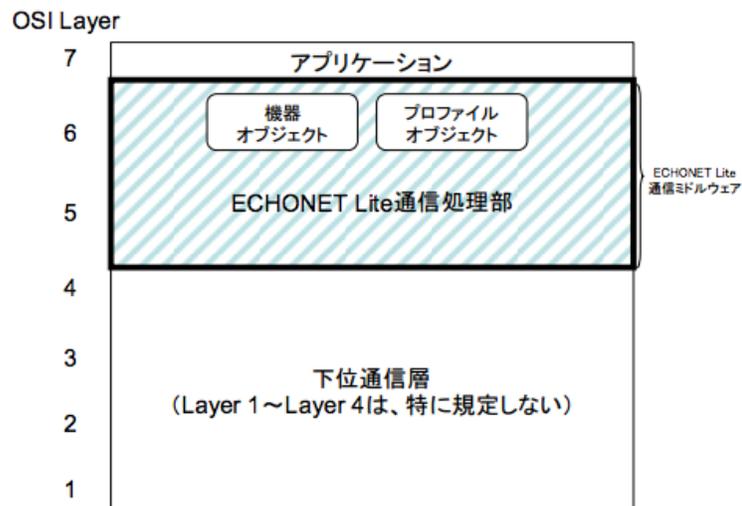


図 2. ECHONET Lite の通信レイヤ構成 (出典：[4],p16,3-2)

2.3.2 Pluto, iRemocon

Pluto, iRemocon は、それぞれ株式会社 Pluto¹, 株式会社グラモ²の商品名である。これらの商品は、ネットワーク接続型の高性能学習リモコンである。赤外線リモコンと同様の信号を発信できるゲートウェイをインターネットに接続し、室内に一つ設置して用いる。使用者は、インターネットを通じてゲートウェイを操作し、あらかじめ学習しておいた赤外線リモコンの信号を発信させることにより、家電の制御を行うことができるとしている。

これらの商品のポイントは、ゲートウェイが直接インターネットに接続していなければ動かない点にある。ゲートウェイは、インターネットを通じて送られてくる情報を赤外線の信号に置き換えて送信するだけの装置であり、センサなどから得られるデータを用いた自動制御などはできない。また、赤外線は反射や回折はほとんどしないため、line of sight の外には信号が届かず、障害物が多い場所などでは複数設置が必要になる可能性がある。両製品は Ethernet でのインターネット接続に対応しているため、設置数が増えるとケーブルの管理が難しくなることが懸念される。

これらの商品は、赤外線リモコンで電化製品の制御を行うのに優れており、ゲートウェイから電化製品への一方通行の通信ではあるが使いやすく作られている。しかし、ゲートウェイから発信される赤外線は、高出力・無指向なものとなっており、窓などから簡単に室外に漏れてしまう可能性が高い。赤外線

¹<http://pluto.io>

²<http://glamo.co.jp>

通信は、壁や障害物は透過しないため物理セキュリティが強固な無線通信であると言えるが、無指向であるというのは、窓などから室外に信号が漏れる危険を高めてしまう。より強固な物理セキュリティを目指すのであれば、これらの商品を利用するのは避けるか、カーテンを締め切って窓からの信号漏れを遮断する必要があると考えられる。

3 提案アーキテクチャ

3.1 概要

本研究で提案するのは，IoT のインフラとして赤外線通信でのマルチホップネットワークを構築することである．以下，IoT を構築する手順を説明する．まず，赤外線通信ユニットをインターネットに接続したい「モノ」に取り付ける．「モノ」と赤外線通信ユニット間の通信は，USB やシリアルバス，赤外線通信などを使う．任意の赤外線通信ユニット同士の通信は，隣接する赤外線通信ユニットを経由したマルチホップ通信で行う．複数ある赤外線通信ユニットのうち，いくつかをゲートウェイとしてインターネットに接続する．これによって，赤外線マルチホップネットワークに接続された「モノ」は，ゲートウェイを通してインターネットとの接続が可能になる．このシステムを利用して，赤外線マルチホップネットワークに接続された「モノ」をユーザが制御する手法は，関連研究 [14] で既に議論されている手法を適用する．

3.2 赤外線マルチホップ通信

マルチホップ通信とは，複数ユニットを経由して行う通信のことを指す．一般には赤外線通信は，1 対 1 の通信であるため，本研究では特にマルチホップであることを強調している．赤外線通信は，それ単体では信号強度の問題もあって通信距離を稼ぐことができず，複数のユニットを経由して通信できるように設計することで，通信可能範囲を広げている．

3.3 赤外線マルチホップのメリット・デメリット

これまで述べてきたように，赤外線は，電波とくらべても波長が短く，壁を透過しないため，物理的にセキュアなネットワークを構築することが可能である．

4 赤外線マルチホップ通信装置の実装

本研究のために試作した赤外線マルチホップネットワークを構成するための装置を図.3 に、その概要を図.8 に示す。

本実装では、OSI 参照モデルにおける物理層とデータリンク層に相当する機器・プログラムを実装している。また、実験のために一部ネットワーク層に当たる部分を実装している。ハードウェアは Arduino³と拡張シールド上に電子回路を構築して実装を行った。Arduino 拡張シールド上の回路図は、図.9 のようになっている。

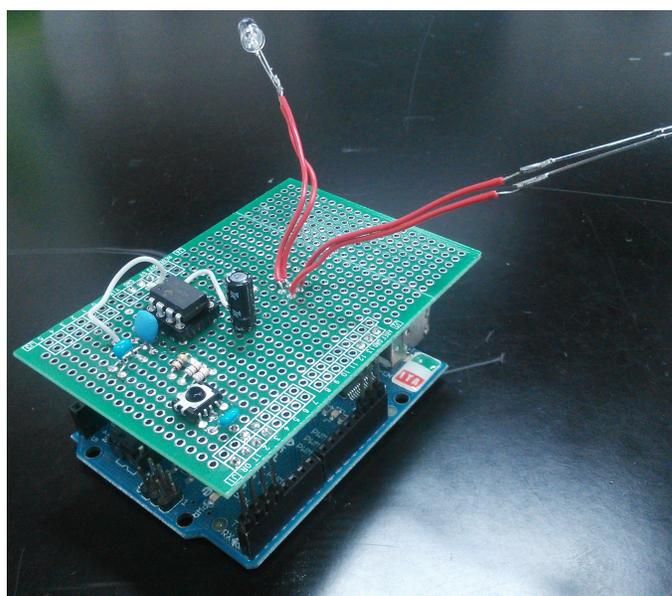


図 3. Infrared communication module

データリンク層にあたるプログラムは、機器を接続するコンピュータに導入した。C 言語を用いて記述しているため、他モジュールへの移植も比較的容易である。

4.1 物理層

物理層では、機器が通信をするために必要な物理的な約束事を決めている。本実装での物理的な仕様について詳しく述べる。

³<http://www.arduino.cc>

4.1.1 変調方式

変調方式として代表的なものには、振幅変調、オンオフ変調、パルス位置変調、位相変調などがある。振幅変調は、値を信号の強さとして送受信するアナログ変調方式で、ラジオなどに用いられている。これはデジタル変調の場合はオンオフ変調となる。オンオフ変調は、信号の有無で0と1を表現する変調方式である(図.4)。パルス位置変調は、パルスとパルス間の時間を0,1に割り当てて表現するデジタル変調方式で、特に家庭用電化製品の赤外線リモコンで多く用いられている(図.5)。位相変調は、搬送波の位相を変える事で0と1を表現するデジタル変調方式である。アマチュア無線などで用いられる(図.6)。

今回の実装では、455kHzの搬送波を用いたオンオフ変調方式を採用している。パルス位置変調は、信号に偏りがある場合に通信速度が20%前後変動する可能性があるため、適していない。また、位相変調は、変調・復調が技術的に難しく、445kHzの搬送波を用いるので、実際の赤外線の強度は図.7のように、ONの時に445kHzでON/OFFを繰り返す。一般的な電気機器の赤外線リモコンは、38kHzの搬送波を用いているため、実装に用いる搬送波の周波数を445kHzとすることにより、室内環境でノイズとなりうる赤外線リモコンの信号を機械的に受け付けないようにしている。

この変調方式の通信速度は、図.4の信号1つ分の送信にかかる時間の逆数となる。つまり、通信速度を s にしたい場合は、信号1つ分の送信時間を $1/s$ とすればよい。今回の実装では、通信速度 $s = 20.8[kbps]$ とし、信号1つ分の送信時間はおよそ 48μ 秒とした。

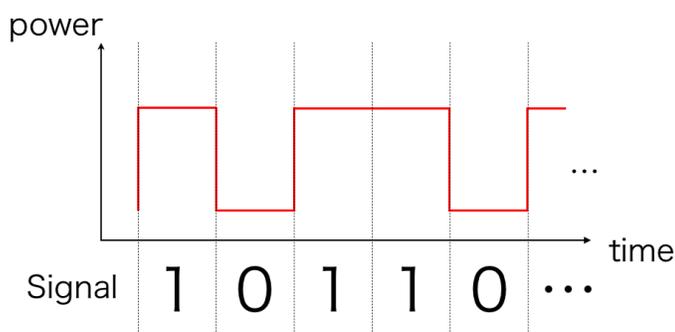


図 4. On-Off Keying

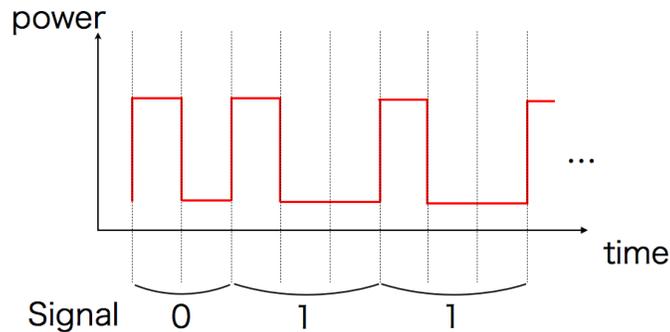


図 5. Pulse Position modulation

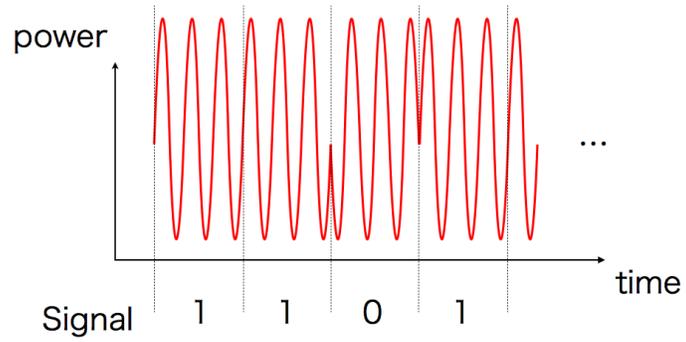
4.1.2 回路

拡張シールドに実装した回路の回路図は、図.9 のようになっている。8 ビットマイクロコンピュータである ATmega328P を用いて 455kHz 復調器付き赤外線受光モジュールの TSOP7000 と赤外線 LED を制御するという構成になっている。図.9 において、 $Signal_{in}$ と $Signal_{out}$ はそれぞれ ATmega328P と接続される線である。

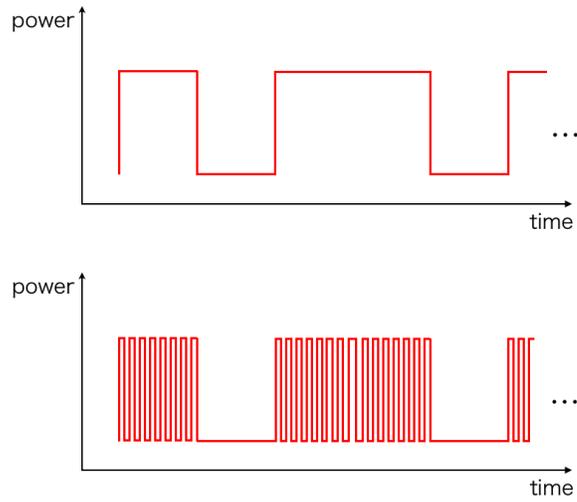
4.1.3 Arduino

物理層の実装は、ATmega328P が搭載された Arduino を用いて行った。Arduino の動作原理を以下に簡単に説明する。まず、ボードが持つ複数のピンを I/O とし、入力と出力は HIGH/LOW の 2 値である。電気的には、HIGH と LOW はそれぞれ 5V、0V の電圧に対応している。プログラム上の任意のタイミングで、各ピンの入力が HIGH/LOW どちらか、あるいはあるピンに HIGH/LOW を出力する事ができるようになっている。

Arduino 上で動くプログラムは、基本的には C 言語の文法で記述される。Arduino デベロッパは、`setup()` 関数と `loop()` 関数を最低限記述する必要がある。`setup()` 関数は、Arduino に電源を入れた時・ボード上のリセットボタンを押した時などに 1 度だけ呼び出される。この関数の中で、ピンの I/O モードなどの



☒ 6. Phase shift keying



☒ 7. 445kHz modulation

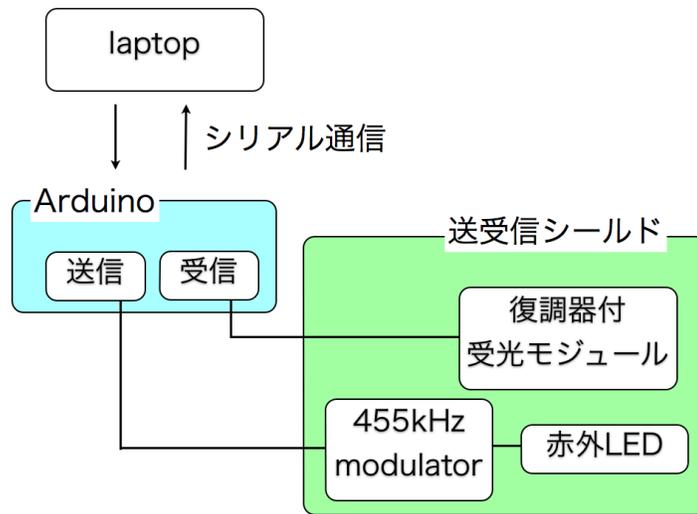


図 8. Infrared Communication Equipment

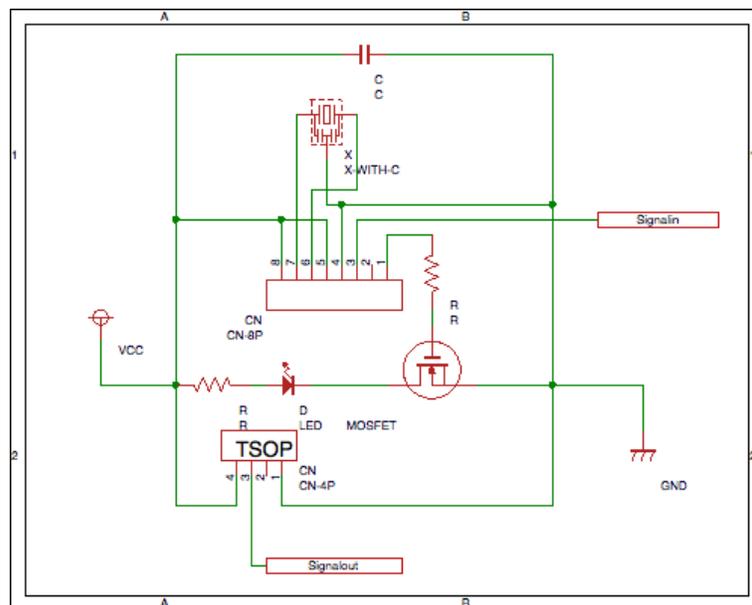


図 9. Moduler circuit diagram.

各種初期設定を行う。また、loop() 関数は、setup() の後に呼ばれ続ける。その名の通り、loop() 関数が最後まで処理が終わると、また loop() 関数が呼ばれ、loop() から抜けて Arduino の動作が終わることはない。

今回の実装では、赤外線受光モジュールの出力を Arduino のピンへ入力して、電圧をプログラムで読み取って信号のデコードを行っている。そのため、Arduino でオンオフ変調を行う場合には、実行プログラムと信号のタイミング同期が重要になる。信号がない時は、受光モジュールからの入力が HIGH になっていないかを常にチェックし、入力が HIGH になっていることに気づいたタイミングから、受信シーケンスを開始する。最初だけ、パルス幅の半分の時間を待機し、入力を取る。それ以降は、パルス幅の時間だけ待機して入力を取る、ということをする。これを繰り返すことで、おおよそ信号の真ん中のタイミングで受信できていることになる。しかし、実際には、「特定の時間だけ待機する」という動作が正確でなく、また、待機した時間とは別にプログラムを数行実行する時間も経過してしまうため、この方法でのタイミング同期は難しい。また、信号読み取りの速度は Arduino のプログラム上から行われるため、通信速度は Arduino のクロック周波数に律速されることになる。

4.2 データリンク層

ここでは、データリンク層とネットワーク層の実装を述べる。

物理層で 0 と 1 の列を送受信することができるようになったので、データリンク層ではひとまとまりのデータ、すなわちパケットのどこに何の情報を格納するのかを決定する。

まず、ノード間の通信に必要な情報は次の 4 つである。

stx パケットの開始を表す

id パケットの通し番号を表す

src パケットの送信者を表す

dst パケットの送信先、受信者を表す

まず最初の stx フィールドには、パケットの始まりを表すビット列を格納する。この値は全てのパケットに共通で、16 進数表記で 0xAA の値（2 進数表記だと 0b10101010）を格納している。次の id フィールドには、パケットの通し番号を格納する。パケットの送信者がそれぞれ発行した id をここに格納し、送信する。伝送路が複数ある場合などに、同じパケットが複数到達することがあるので、受信したパケットごとに送信者 ID とパケット ID の組を記録しておき、受信済みであるかどうかを検査する。src、dst フィールドは、送信者、受信者の ID を格納する。

また、パケットのサイズを可変長にする場合は、これらの情報に加えてパケットサイズの情報もヘッダに含める必要がある。今回は、実装の容易さとヘッダの長さを考慮して、パケットは固定長とすることにした。

ethernet フレームの形式にならい、これらの情報は、ヘッダとしてパケットの先頭に置く。ヘッダに続く領域はペイロード、すなわち上位レイヤから送られてくる送信データを格納する領域である。最後に、復調時にヘッダ・ペイロードにエラーが含まれていないかチェックするため、1バイトごとに4ビットのハミング符号を挿入し、1パケットごとに前方誤り訂正を行っている。

ネットワーク層では、隣接していない特定のノードへのパケットを届けるため、自分宛てではないパケットを受信した時にどういう挙動をするのか、また、機器のアドレッシングをどうするのかを決定する。

まず、パケットのルーティングは、フラッディングで行う。フラッディングとは、自分宛てではないパケットを受信した場合に、送信可能な隣接したノード全てに転送する方法である。この方法をそのまま適用すると、同じパケットがある2点間を無限に行ったり来たりするループが発生する。この無限ループへの対処として、ヘッダの id フィールドの値と、送信者 ID の組で「受信済み」パケットをフィルタする。

また、機器のアドレッシングは、mac アドレスや IP アドレスは用いず、赤外線マルチホップネットワーク内でユニークな数値を機器に割り振って使う。これを、機器の ID として、送信者や受信者を同定するのに用いる。

本実装では、stx、パケット ID、機器の ID、はそれぞれ1バイトずつとした。また、ペイロードの大きさは12バイトとし、ハミング符号を加えて全体で24バイトの固定長パケットとする。よって、パケットレイアウトは図.10 のようになる。

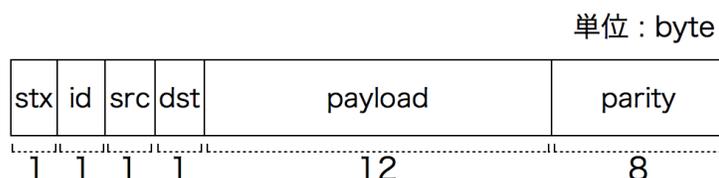


図 10. Packet Layout

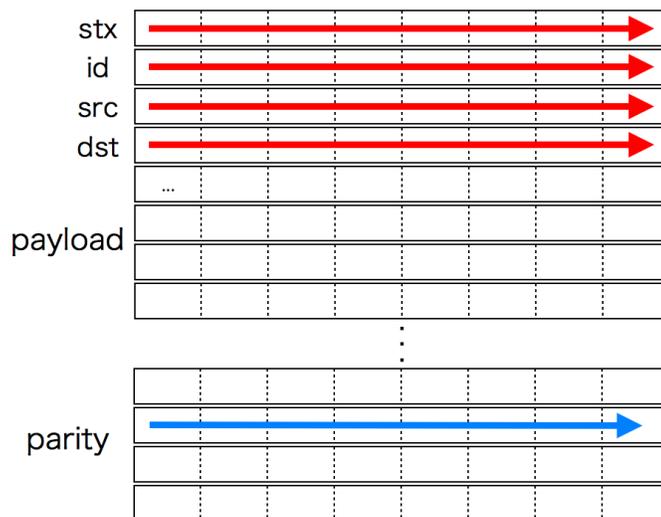
4.3 ノイズ対策

光を用いた通信では、誤りが一箇所に多数出現するケースが多く、これをバースト誤りと呼ぶ。原因は様々あるが、埃や虫などによって通信経路が一瞬遮られることによってその間の信号が全て落ちてしま

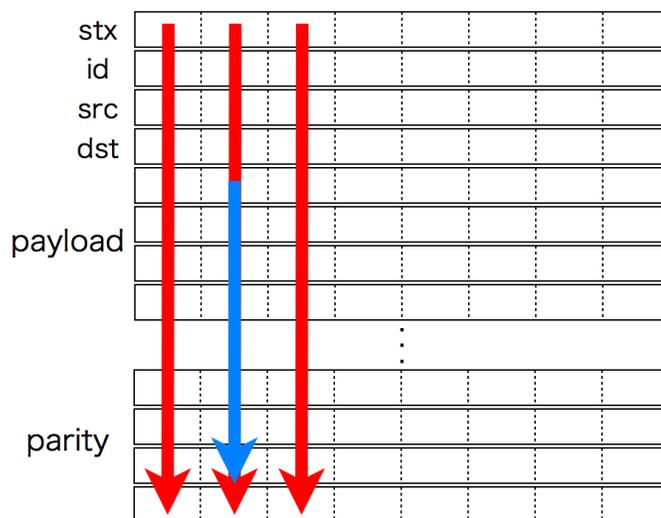
うことなどが考えられる。

今回の実装では、1バイトに対して4ビットのパリティ検査符号を導入しているが、バースト誤りへの対策として、菅野らによって紹介されている交錯処理 [12] を施している。その概要を図.11 に示す。通常は左から右へと1ビットずつ送信し(図.11(a))、1バイト分のデータとそのチェックパリティが送信されたら次の1バイトを送信する。このような送信順序での通信においては、エラーが一箇所に集中した場合(バースト誤り)にパリティでの誤り訂正が出来なくなる場合がある。そこで図.11のように、1つのパケット24バイト分について、まずそれぞれの1ビット目を順番に送信、次にそれぞれの2ビット目を順番に送信、というポリシーを取る(図.11(b))。これによって、図.11において青矢印の範囲にバースト誤りが発生した場合にも、交錯処理を行うことでその誤りが複数のブロックに分散されるため、誤り訂正が可能になる。

交錯処理を行うことにより、最大で24bit分までの連続した誤りに対応できるようになっている。これは、通信速度20.8[kbps]とした今回の実装では、およそ1ミリ秒分の信号に相当する。すなわち、人の移動などによる通信路の遮断などに対しては、また別の手段で対策を取る必要がある。



(a) before



(b) after

☒ 11. Cross sequence process.

5 実証実験

この章では、実装した機器を用いて実際に赤外線マルチホップネットワークを構成し、行った実証実験について説明する。

5.1 実験の目的

本実験における目的は、今回実装した赤外線マルチホップネットワークの動作と特性の検証である。ここでいう特性は、通信遅延とジッタ、エラー率を指す。これらの特性を計測することで、実際にインフラとして使えるかどうか考察を行っていく。

5.2 実験方法

実験は、人が多く生活する環境を想定し、学会会議の会場内で行った。会場の場内地図と、そのうち実験のために使わせてもらったスペースを図.12、図.13 に示す。図.13 に書き込まれている印の場所には、図.8 のラップトップと Arduino で構成されるノードを 1 つずつ配置し、マルチホップの端末とした。

マルチホップネットワークの構成は、図.13 上で矢印で繋がっている一連のノードの一番根本にあるものを 1 番として、それぞれのノードから 8 番へデータを送信する構成となっている。

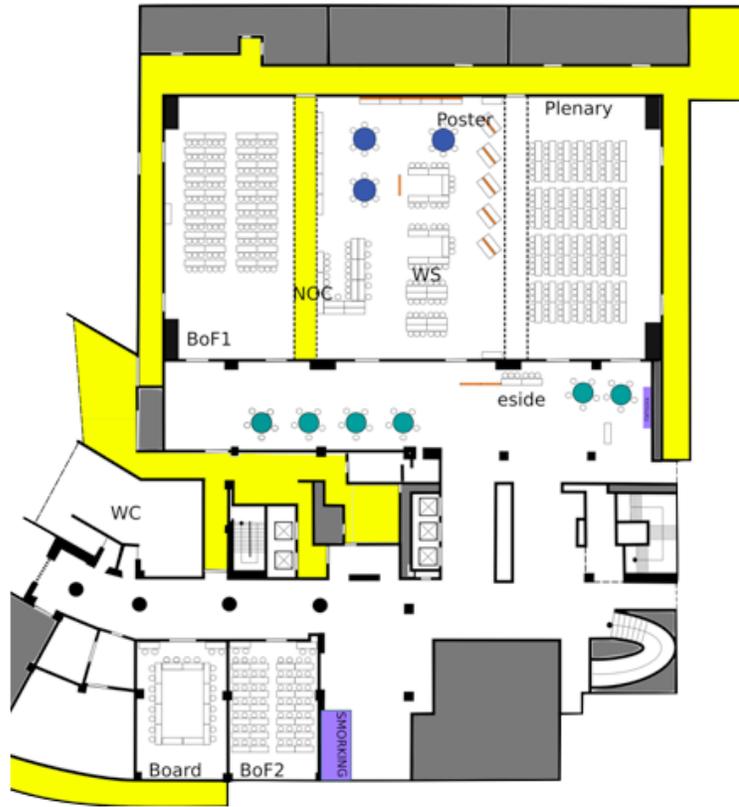
実験の手順は次の通りである。

まず、図.13 のようにノードを配置し、赤外線の通信路を確保する。各ノードのラップトップは、同一の無線 LAN に接続し、それぞれ ntp[7] を用いて研究室のサーバと時刻同期を行う。ペイロードに格納する送信データは、ダミーを準備しておく。

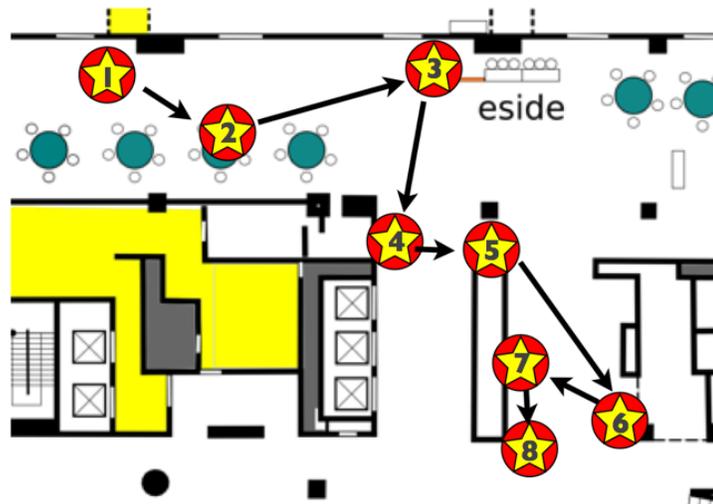
パケットの送信・受信・転送各イベントについて、ローカルの時刻とともにテキストベースでそれぞれのラップトップ内に記録を残しておいた(図.14))。実験終了後に、これらのログを回収して、イベント事にノード間の差分を取って各パケットごとの通信遅延・ジッタを取得した。

5.3 結果

全てのノードから回収したログを解析した結果を以下に示す。まず、各ノードからのパケットについて、各ノードが送信したパケットの数、8 番ノードが受け取れなかった(パケットを損失した)数とその割合を示したものを Table.1 に、割合のみ抜き出したものを図.15 に示す。



☒ 12. Conference site map



☒ 13. Nodes arrangements

```

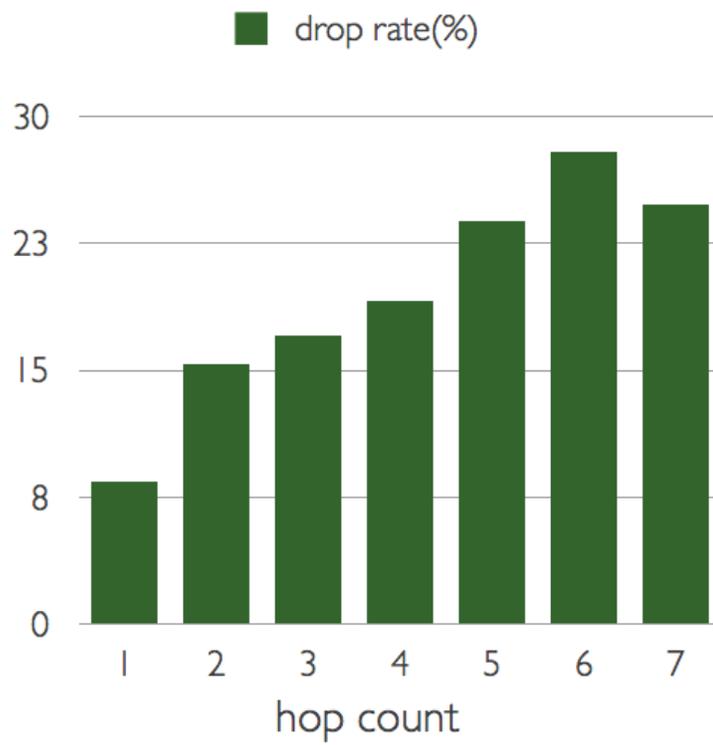
Mar 12 19:58:39 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[116] "-0.004070" from 6 to 20 (aa 74 06 14 2d 30 2e 30 30 34 30 37 30
00 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 19:58:39.463585151
Mar 12 19:58:50 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[147] "-0.004108" from 5 to 20 (aa 93 05 14 2d 30 2e 30 30 34 31 30 38
00 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 19:58:50.576923576
Mar 12 19:58:50 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Inject: Packet[92] "-0.004219" from 7 to 20 (aa 5c 07 14 2d 30 2e 30 30 34 32 31 39 0
0 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 19:58:50.691328061
Mar 12 19:58:53 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[40] "-0.004317" from 9 to 20 (aa 28 09 14 2d 30 2e 30 30 34 33 31 37
00 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 19:58:53.676016338
Mar 12 19:59:05 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[99] "" from 3 to 20 (aa 63 03 14 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
: 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 19:59:05.525417587
Mar 12 19:59:17 irmulti7 ir: xbeeSending: -0.004161 from 7 seq date 20140312195917.043965613
Mar 12 19:59:30 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Drop(stx): Packet[116] "8<A0><B0>8<E7><A9>H<AB><CC>A" from 177 to 48 (30 74 b1 30 38
a0 80 40 e7 a9 48 a8 cc c8 80 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 19:59:30.596258153
Mar 12 19:59:34 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Inject: Packet[93] "-0.004219" from 7 to 20 (aa 5d 07 14 2d 30 2e 30 30 34 32 31 39 0
0 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 19:59:34.703359194
Mar 12 19:59:41 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[100] "" from 3 to 20 (aa 64 03 14 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
: 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 19:59:41.527571488
Mar 12 19:59:41 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[41] "-0.004317" from 9 to 20 (aa 29 09 14 2d 30 2e 30 30 34 33 31 37
00 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 19:59:41.685571179
Mar 12 20:00:01 irmulti7 ir: xbeeSending: -0.004161 from 7 seq date 20140312200001.074741867
Mar 12 20:00:03 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[118] "-0.004070" from 6 to 20 (aa 76 06 14 2d 30 2e 30 30 34 30 37 30
00 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:00:03.499304486
Mar 12 20:00:10 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[149] "-0.004108" from 5 to 20 (aa 95 05 14 2d 30 2e 30 30 34 31 30 38
00 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:00:10.599524764
Mar 12 20:00:18 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Inject: Packet[94] "-0.004219" from 7 to 20 (aa 5e 07 14 2d 30 2e 30 30 34 32 31 39 0
0 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:00:18.715327470
Mar 12 20:00:29 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[42] "-0.004317" from 9 to 20 (aa 2a 09 14 2d 30 2e 30 30 34 33 31 37
00 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:00:29.694140139
Mar 12 20:00:45 irmulti7 ir: xbeeSending: -0.004161 from 7 seq date 20140312200045.115120736
Mar 12 20:00:45 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[119] "-0.004070" from 6 to 20 (aa 77 06 14 2d 30 2e 30 30 34 30 37 30
00 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:00:45.514671519
Mar 12 20:00:50 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[150] "-0.004108" from 5 to 20 (aa 96 05 14 2d 30 2e 30 30 34 31 30 38
00 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:00:50.615813142
Mar 12 20:00:53 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[102] "" from 3 to 20 (aa 66 03 14 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
: 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:00:53.529903060
Mar 12 20:01:02 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Inject: Packet[95] "-0.004219" from 7 to 20 (aa 5f 07 14 2d 30 2e 30 30 34 32 31 39 0
0 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:01:02.731358552
Mar 12 20:01:17 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[43] "-0.004317" from 9 to 20 (aa 2b 09 14 2d 30 2e 30 30 34 33 31 37
00 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:01:17.711702142
Mar 12 20:01:27 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[120] "-0.004070" from 6 to 20 (aa 78 06 14 2d 30 2e 30 30 34 30 37 30
00 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:01:27.535010970
Mar 12 20:01:29 irmulti7 ir: xbeeSending: -0.004161 from 7 seq date 20140312200129.147151618
Mar 12 20:01:29 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[103] "" from 3 to 20 (aa 67 03 14 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
: 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:01:29.527084263
Mar 12 20:01:30 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Forward: Packet[151] "-0.004108" from 5 to 20 (aa 97 05 14 2d 30 2e 30 30 34 31 30 38
00 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:01:30.630101546
Mar 12 20:01:46 irmulti7 infrared-multihop[2577]: Inject: Packet[96] "-0.004219" from 7 to 20 (aa 60 07 14 2d 30 2e 30 30 34 32 31 39 0
0 00 00 : 00 00 00 00 00 00 00 00 ) 2014/03/12 20:01:46.743363425

```

图 14. An example of event dump.

表 1. packet send / receive count & error rate

hop count	send	received	error rate
1	450	412	8.44%
2	377	319	15.38%
3	323	268	17.03%
4	293	237	19.11%
5	327	249	23.85%
6	340	245	27.94%
7	375	282	24.80 %



☒ 15. Packet dropping rate.

7番ノードが送ったパケットのうち、損失したパケットの割合は8.44%となっており、実験実施前の動作確認時の結果とは大きく異なっている。また、ホップ数が増えるほど損失率が高くなるという結果となった。

赤外線マルチホップで通信にかかった時間を図.16に示す。縦軸が通信遅延で単位は秒、横軸はホップ数となっている。また、遅延の標準偏差を取ってエラーバーとして表示し、これをジッタの大きさとしている。

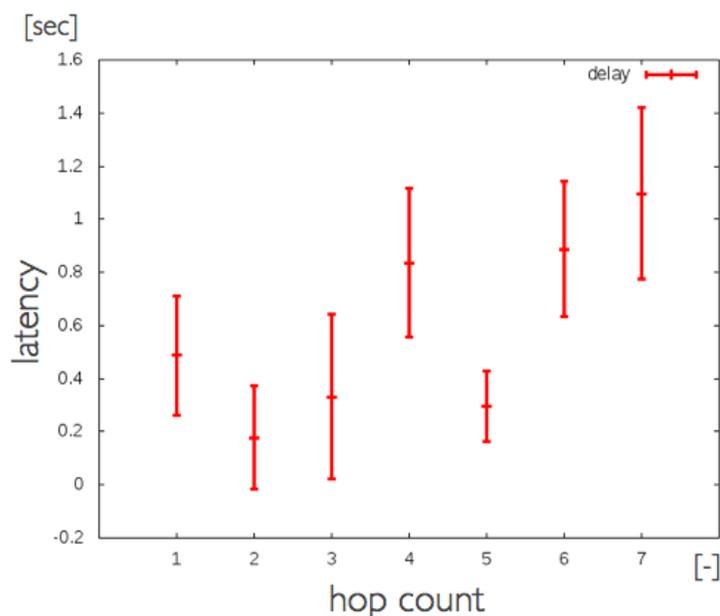


図 16. latency of infrared multihop network

2ホップの時の遅延に着目すると、標準偏差の値が負の領域に入っている。また、5ホップの遅延が4,6ホップ時の遅延よりも小さくなっており、遠いほど遅延が大きくなるという直感に反する結果となっている。

5.4 考察

まず、今回の実験では、遅延・ジッタ・エラー率の特性の他に、赤外線通信のリンクを確率することは難しいということがわかった。物理セキュリティ向上のため、指向性の高いものを選んだが、広い空間では反射光などが受光モジュールに届かないため、レーザーポインタを当てるのと同程度の精度が求められた。あまり広くない室内に、ノードを密集させてマルチホップネットワークを構築する場合には、

反射光で受信する事ができるため，大きな問題とならない可能性があるが，広いスペースに展開する場合には注意が必要である．

結果のパケット損失率のデータから，1 ホップ時のパケット損失が大きい事が読み取れる．これは，学会会場という特殊な環境上，興味を持って装置を眺める人，通信路を遮る人などが多く，そういった要因でパケットを損失しているものと考えられる．言い換えると，赤外線通信リンクの遮断の容易さを強く表していると考えられることができる．

また，図.15 において，ホップ数7のパケット損失率がホップ数6のものよりも小さくなっている事が読み取れる．パケット損失率は，直感的にはホップ数と比例して単調増加すると予想されるが，その予想とは外れている．上にも記述したが，学会会場という特殊な環境のため，予測できない人の動きからこのような誤差が生まれたのだと推測される．

図.16 のグラフについては，ホップ数2の場合の通信遅延が負の値になっている物があるという結果が読み取れる．また，通信遅延はホップ数と強い正の相関を持つはずだが，平均値だけ見ても単調増加になっていない．これは，実験設定の問題であり，通信遅延の大きいWiFiを用いてntp時刻同期を行っているために，各ノードの間で正確な時刻同期ができていなかったのが原因であると考えられる．そのため，今回の実験で得られた遅延データは信用が低く，再度実験を行うことが必要である．再度実験を行うときには，遅延計測にはping-pong型のアプリを用いて，ローカル時刻の差分を取って遅延計測を行う．

ping-pong型のアプリとしては，IPネットワークにおけるICMP[9]を想定している．しかしながら，本研究のパケットレイアウトはICMPに合致しないため，同様の機能をもつプロトコルを再設計・実装を行う予定である．

6 おわりに

6.1 まとめ

IoT や M2M 型システムとも表される，コンピュータではない機械をネットワークに接続してデータ通信を行うシステムは，これまでコンピュータネットワークに接続されることがなかった多様なデジタルデバイスを相互接続し，新しい利用法やビジネスを創生しようとしている．本研究では，このような「モノのインターネット」時代の到来にそなえて，室内環境におけるセンサや家電に代表される，多様なデジタル機器の管理・制御システムの必要条件を考察・整理し，その基板となるバックボーンネットワークを構築する機器の設計・実装・動作検証を行った．本論文では，屋内のバックボーンネットワークとして，安価なネットワークインターフェースが提供可能で，かつ，送信信号の伝搬領域を容易に管理制御可能な赤外線通信技術を用いたマルチホップネットワークを採用することを提案し，そのシステム設計と実装を行った．実装したシステムは，学会環境において実証評価を行い，その動作を確認するとともに基礎的な通信特性の評価を行った．

6.2 今後の課題

赤外線通信ユニットは，一つ一つが通信できる範囲は広くないため，位置測定のためのインフラとして使える可能性がある．照明 LED を用いた位置測定は高い精度が報告されているため，赤外線でも同様に高い精度が期待できる可能性がある．このように他用途への応用がいくつか考えられるが，この研究分野での今後の課題としたい．

また，以下の 2 つの課題を，残りの時間で取り組んでいく予定である．まず，赤外線通信ユニットの通信速度について，4.1.3 節で述べたように，Arduino のクロック周波数に律速されている部分があるが，ここを高速化に取り組む．具体的には，Arduino のプログラムから電圧を直接読み込んでいる部分を，機械的にバッファリングするような回路を作り，Arduino はバッファから信号を読み取る，という風に再設計する．次に，実験について，ping-pong 型アプリケーションの実装を行い，より信頼性の高い遅延測定を行う．

以上を，今後の課題としたい．

参考文献

- [1] IEEE802.11, The Working Group Setting the Standards for Wireless LANs. <http://www.ieee802.org/11/>.
- [2] Alex Biryukov, Orr Dunkelman, Nathan Keller, Dmitry Khovratovich, and Adi Shamir. Key recovery attacks of practical complexity on aes-256 variants with up to 10 rounds. Henri Gilbert, editor, *Advances in Cryptology EUROCRYPT 2010*, 第 6110 卷 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 299–319. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [3] Rashmi Chaudhari, Dhanashree Dhande, and A Chaudhari. Home energy management system. *International Journal of Advanced Electronics and Communication Systems*, Vol. 3, No. 3, 2014.
- [4] ECHONET CONSORTIUM. ECHONET Lite SPECIFICATION 第 1 部 ECHONET Lite の概要. ECHONET CONSORTIUM, 第 1.11 版, July 2014.
- [5] Z.M. Fadlullah, M.M. Fouda, N. Kato, A. Takeuchi, N. Iwasaki, and Y. Nozaki. Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid. *Communications Magazine, IEEE*, Vol. 49, No. 4, pp. 60–65, April 2011.
- [6] Daniel Genkin, Adi Shamir, and Eran Tromer. Rsa key extraction via low-bandwidth acoustic cryptanalysis. JuanA. Garay and Rosario Gennaro, editors, *Advances in Cryptology CRYPTO 2014*, 第 8616 卷 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 444–461. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [7] D.L. Mills. Network time protocol (ntp). RFC hoge, sep 1985.
- [8] P. Palensky and D. Dietrich. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, Vol. 7, No. 3, pp. 381–388, Aug 2011.
- [9] J. Postel. Internet control message protocol. *Network Working Group RFC 792*, September 1981. <http://tools.ietf.org/html/rfc792>.
- [10] Wenyuan Xu, Ke Ma, W. Trappe, and Y. Zhang. Jamming sensor networks: attack and defense strategies. *Network, IEEE*, Vol. 20, No. 3, pp. 41–47, May 2006.

- [11] Zhengjian Zhu, Qingping Tan, and Peidong Zhu. An effective secure routing for false data injection attack in wireless sensor network. In Shingo Ata and ChoongSeon Hong, editors, *Managing Next Generation Networks and Services*, Vol. 4773 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 457–465. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [12] 菅野徳人. Prug96 - 無線による高速データ通信 ~ プロトコルサーバーの実装 ~, 1996. <http://www.nemoto.com/PRUG96/kanno/latex2html/Partech96/index.html>.
- [13] 東京電力. 電力メーター情報発信サービス (b ルートサービス) の試験実施について. <http://www.tepco.co.jp/smartmeter/broute-j.html>.
- [14] 平山陽彦. 非ネットワーク対応デジタル家電ネットワーク制御手法の一考察, 2 2009.
- [15] 平原茂利夫. エコーネットについて | ごあいさつ: echonet consortium. <http://www.echonet.gr.jp/echo/index.htm>.

謝辞

本論文を執筆するにあたって、多くの方の協力をいただきました。順に、ここに感謝の意を述べていきたいと思います。

指導教官である江崎浩教授は、忙しい身であるにも関わらず、時間の合間を縫って論文指導をしてくださいました。また、行き詰まってどうしたらよいのかわからなくなった時、次の道を優しく示し、導いてくださいました。本当に感謝しています。

東京大学保健センターの武井先生には、様々なアドバイスを頂きました。心の持ちよう、生活態度、迷っている時には背中を押す一言をくださることもありました。武井先生の優しい言葉の数々がなければ、今の僕はなかったと言っても過言ではありません。感謝しています。

落合秀也氏、浅井大史氏、塚田学氏には、僕の技術的に至っていない所、研究と向き合うのに足りていない所など、研究生活で様々な指摘を頂きました。感謝しています。

研究室同期の teppei, sat, numata, tanaka, kaew の 5 人には、何度も助けてもらいました。ヤバい時には支えてくれたし、そうでない時は一緒に遊んでくれました。感謝しています。

池上先輩、中村先輩の兩人からは、たくさんのことを学ばせていただきました。研究の進め方、論文の書き方をはじめ、色々なノウハウを伝授してくださいました。感謝しています。

研究室の後輩各位、ダメな先輩で申し訳ない。みなさんのこれからの研究が上手くいくことを願っています。僕のようにならないようぜひ頑張ってください。

僕のくだらない話を笑って聞いてくれて、どうでも良い悩みを笑い飛ばしてくれて、心の拠り所となってくれた友人の渡辺圭一氏、塚谷俊介氏、高木雅氏、どうもありがとう。全部終わったら、よいお酒でも一緒に飲みましょう。

僕の心のスキマを埋めてくれるのはいつだってゲームでした。BEMANI シリーズを製作した株式会社コナミデジタルエンタテインメント、パズル&ドラゴンズ製作のガンホー・オンライン・エンターテイメント株式会社、いつも楽しくプレーさせてもらっています。感謝しています。

最初にも述べましたが、この修士論文は、様々な人の助力のもと執筆されました。皆様、本当にありがとうございました。