

接続相手を考慮した適合化通信の研究
—単線下における通信速度の
ハンドシェイク手法の提案—

丹野 嘉信

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程
電気情報工学専攻

目次

第1章 序論.....	1
第2章 物理層の役割と既存の規格特定手法.....	7
2.1 物理層の役割.....	7
2.2 既存の規格特定手法.....	9
2.2.1 コネクタ形状による制限.....	9
2.2.2 イーサネットの電気信号規格のハンドシェイク.....	10
2.2.3 USBの電気信号規格のハンドシェイク.....	11
2.3 既存の規格特定手法の不足点.....	11
2.4 本研究の立ち位置.....	12
第3章 通信速度のハンドシェイクの提案.....	15
第4章 アナログ信号におけるハンドシェイク.....	16
4.1 アナログ信号における手法.....	16
4.2 評価用シミュレーション環境について.....	19
4.3 検証.....	21
4.3.1 検証1：波形の一致判定精度.....	21
4.3.2 検証1の結果.....	22
4.3.3 検証2：提案手法の収束挙動.....	25
4.3.4 検証2の結果.....	25
第5章 デジタル信号におけるハンドシェイク.....	28
5.1 デジタル信号における手法.....	28
5.2 検証環境.....	32
5.3 検証.....	36

5.3.1 検証1：実機による電気通信の挙動確認.....	36
5.3.2 検証1の結果.....	37
5.3.3 検証2：実機環境による解析手法の機能確認.....	37
5.3.4 検証2の結果.....	38
5.3.5 検証3：判定で用いた閾値の検証.....	41
5.3.6 検証3の結果と考察.....	42
5.3.7 検証まとめ.....	44
第6章 議論.....	45
6.1 ハンドシェイクにおけるアナログとデジタルの振る舞い.....	45
6.2 今後の課題.....	47
6.3 提案手法の発展性.....	48
6.3.1 断線時に通信継続可能な規格としての利用.....	48
6.3.2 電子部品の配線条件の緩和と配線による通信規格の自動化.....	49
6.3.3 デジタルとアナログの識別によるスイッチング.....	51
6.3.4 ユニバーサルコネクタ.....	51
7章 まとめ.....	54

第1章 序論

インターネットの普及により，世界中のデジタル機器が相互に通信しデータを転送できる環境が出来つつある．これは，Mark Weiser がユビキタスコンピューティング[1][2][3]で提唱していることである．そこには，人が知覚するしに関わらず存在する様々な機器が，それぞれ通信することで情報共有し，利用者の状況に応じて機能を変化させることで利用者の生活を豊かにすることが示唆されている．実際に，Mark Weiser により提案された内容に合致するように，大小様々な多種多様な通信機器が開発され，Internet of Things[4][5][6]（IoT と以降省略）に代表されるセンサー情報を共有することで新たな発見[7][8]や，異常検知[9]を迅速に行う仕組みが提案されている．また，工場設備内[10][11]だけでなく，外部と連携することでより効率的・効果的に運用できるように開発がすすめられ一部は実現している．同時に，インターネットにセンサー情報を転送する種々の小型機器[12][13]の開発が盛んである．図 1.1 に示すように総務省が提供している情報通信白書の世界の IoT デバイス数の推移及び予測[14]では，IoT デバイスの総数は 2014 年で 170.7 億台であった．しかし，5 年後の 2019 年には 2014 年のおおよそ 2 倍の 348.7 億台まで数が膨れ上がっている．そして，今後も増加の一途を辿り，予測では，2021 年で 447.9 億台になると予想されている．今後も通信機器が増加することが容易に予想され，より多くの通信機器がお互いに情報を共有するために通信することが想定される．

技術の発展[15][16]は，導入障壁が低くなるので，IoT の導入が加速される．それに伴い通信制御が課題に挙がる．例えば，インターネットの普及とパーソナルコンピュータの普及により，高価であった機器が安くなり手に入りやすくなった．そして，多くの機材がインターネットに接続できるようになり問題になったことが IP アドレス枯渇問題[17][18]である．インターネットにおいて，機器同士が通信する際に，どの機材と通信を行うのかを指定するために使用するのが IP アドレスである．当時の仕様である Internet Protocol version 4.0 [19]（以降 IPv4 と省略）では，約 43 億個（約 2 の 32 乗）まで割り振ることができた．しかし，パーソナルコンピュータだけでなく，携帯や IoT で用いられるセンサーネットの機器など様々な機器がインターネットを利用するようになり，配布できる IP アドレスではいずれ枯渇して新しいアドレスを割り振ることがで

きないと考えられていた。そこで、枯渇しない数を扱えるように IP アドレスを拡張し、また IPv4 策定当時では想定されていない活用の仕方に対応出来るように考え出されたのが、Internet Protocol version 6.0[20]（以降 IPv6 と省略）である。IPv6 では、約 340 澗個（約 2 の 128 乗）のアドレスを割り振る事ができる。しかしながら、全ての普及している機材に対応させるには数が多くすぐに更新することが出来ないため、IPv6 環境下でも IPv4 通信対応の機材も従来の IPv4 を用いて通信する仕組みである IPv4 over IPv6[21]も考案された。また、映像を生配信するインターネットサービスの普及により通信帯域制御の重要性が高まった。それら需要に沿う形で設計されている[22][23]。

このように、インターネットをはじめとしたネットワークとその利用が普及することで新たな社会サービスが生まれ、発展し、その結果として、新たな需要が生まれる。それに伴い、問題や新たな活用方法が生み出され、それに対応するために IPv6 のような新しい規格が生まれる。更に、通信技術の発展により、一度に転送できる情報量が増加し、今までできなかったことができるようになる。この循環により更に通信に対して新たな需要が生まれ、様々な要求に応えるために、また通信方法を使用事例に適應できるように、新たな通信規格が提案されることになる。すなわち、技術の発展が続く限り、機器が増えれば使用用途が増えるほど、通信規格もそれに合わせて今後も増え続けて行くことになると考えられる。

そもそも通信規格は、機器同士で情報を伝送するための仕組みを統一し、個々に実装しなくても、その規格に準拠することで、準拠した機器同士で容易に伝送できるようにするものである。準拠することで、同じ通信規格に対応している機器と通信が可能になり、通信規格を独自にあえて作る必要がなく、より多くの機材と通信が可能になる。そのために、通信規格では、通信に必要な様々な事柄について取り決めている。ソケット形状、接続機器間の電気信号のやり取りに関する取り決め、通信経路探索、伝送手段、情報伝送の担保、暗号化など、それぞれ規定している項目が異なり、役割を規格毎に分担する場合や、包括して規定している規格など多様である。インターネットにおいては、複数の通信規格[24][25]を用いて通信を実現している。同じ通信規格によって成り立つので、異なる規格を用いた場合、通信ができない。その規格が多くなり特定が難しいため、管理するために通信規格の役割を整理した OSI 参照モデル[26][27][28]が提案されている。

国際標準化機構が策定した OSI 参照モデルは、図 1.2 に示すようように通信機能を階層構造に分割して機能を整理している。通信機能に分けた各階層は通信成立において全て必要であり、下層から上層にデータが流れる仕組みであるため、階層を飛び越えて通信できない。通信処理は、最初の階層である物理層から始めに処理され、上位の層へデータを引き継ぐことで処理される。すなわち、データを渡す際に、物理層を必ず通る。必要な処理が行える階層で処理するだけで、全ての層に対してデータを渡す必要はない。各階層は独立しているため、各階層の変更が他の層へ影響を与えず、層内の変更は自由に選択できる。

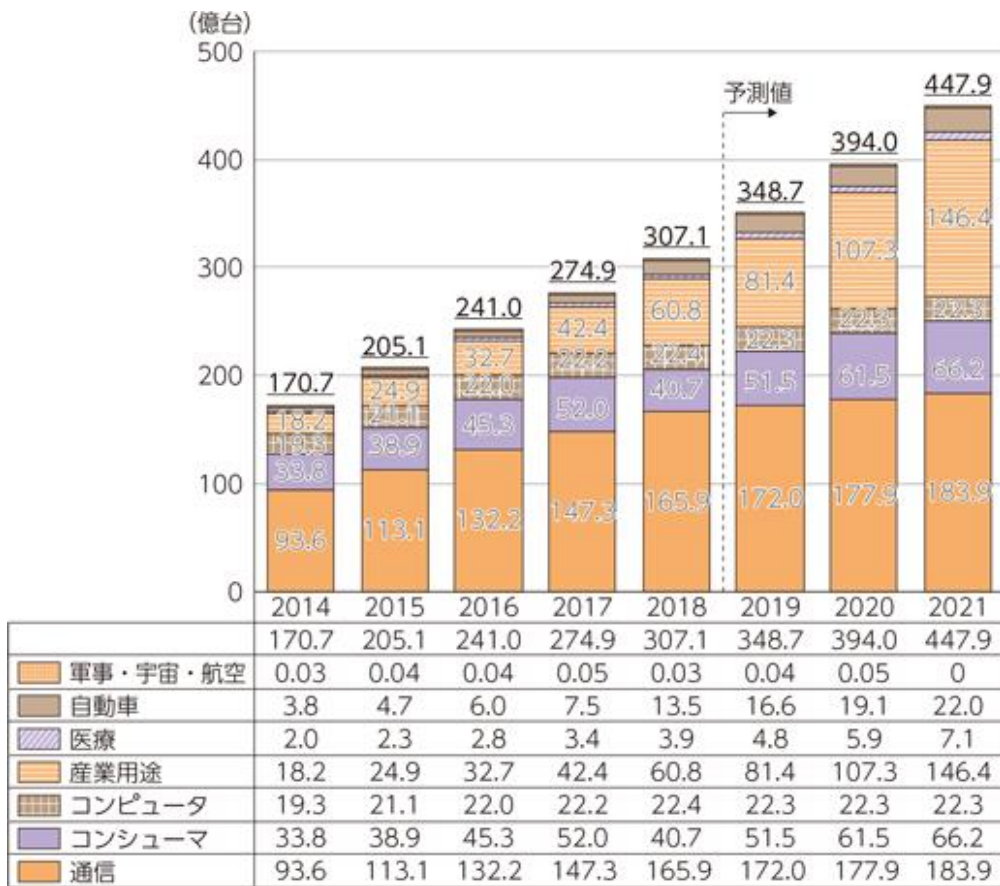
各階層の通信規格はそれぞれ目的に沿って設計されており、データ転送時には各階層の通信規格が一致しなければならず、OSI 参照モデルを基軸においても階層にある通信規格が増加し続けた場合、増加した分だけ一致が難しくなる。

人々の様々な通信の需要に応じてきた結果、通信規格は発展・増加してきた。今後も通通信規格の増加が続くと考えられる。通信規格が増加し続けることで、通信したい機器間で通信規格の一致が難しくなる。自動で通信規格を一致させるか、接続相手毎に自動的に通信規格を作成することができれば、通信規格の増加の問題を解決できる。

本論文では、通信規格の一致に関する問題の解決手段として、OSI 参照モデルにおける物理層の電送信号処理に用いる信号の周波数に着目し、通信に用いる周波数を接続機器同士で決定する手法について提案する。OSI 参照モデルでは物理層からデータが上層へと流れていくため、物理層の通信規格について考える必要がある。そして、ほとんどの通信においては、相互通信のための電送周波数が決まらなければ、デジタル機器同士の通信を行うことができない。この周波数は、デジタル機器で用いる 2 進数の論理値を相手に電送するために用いる。電圧の高さを閾値にした場合、ノイズや電圧降下により正しく電送できない場合がある。また、複数送信したい場合のタイミングを図ることができない。そこで、電送周波数で区切るにより決められた時間内に受信した電圧の変化により論理値を識別する。そのため、周波数が決まらなければデジタル機器はお互いに情報を伝送することができない。物理層ではソケット形状によりプロトコルを限定することが可能であるが、同じ形状でも異なる通信規格が存在する。そこでは何かしらの制約条件として、事前に規格認識に用いる通信周波数などが決められているか通信開始前のやりとりを決めておかなければな

らない。接続機器同士で相互に通信し合い、物事を取り決める行為はハンドシェイクと呼ばれている。既存の物理層のハンドシェイク手法は初期通信速度や通信順序等のハンドシェイクに最低必要な仕様を機器が満たさなくてはならず、ソケットが同形状の場合、規格が増えると調べる数が増えてしまい通信すること自体が困難になる。そこで、ソケット形状や仕様に関係なく、また送信手順を決定せずとも、電送周波数を決められる手法を提案する。

本論文は、図 1.3 に示すように7つの章で構成されている。1章では研究動機となる通信機器と通信規格の増加による通信問題の説明、通信規格の設計である OSI 参照モデルの構造の説明を行い、提案手法の土台となる OSI 参照モデルの物理層の規格一致について説明を行った。2章では、物理層の持つ規格についての説明と規格を一致させるために用いられる手法、その手法の不足点について関連研究として説明する。3章では、物理層の規格決定のために、電気信号を用いた提案手法の概要の説明を行う。電気信号にはアナログ信号とデジタル信号の二種類が存在するため、4章と5章では電気信号の種類別に分けて、手法、評価環境、評価項目とその結果についてそれぞれ説明する。6章の議論では、4章と5章の評価結果を含めた提案内容の考察に加え、提案の応用例を説明する。最後に、7章のまとめでは、それまでの内容の総括を記載する。



(出典) IHS Technology

図 1.1 世界の IoT デバイス数の推移及び予測
 情報通信白書（総務省）より引用[14]

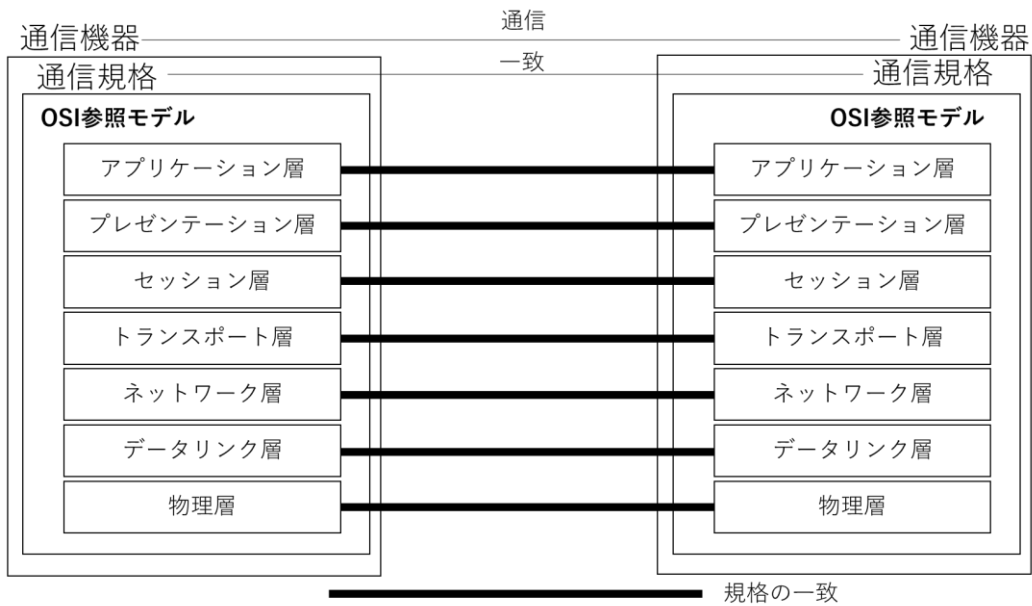


図 1.2 通信機器間の通信と通信規格（OSI 参照モデル）の関係

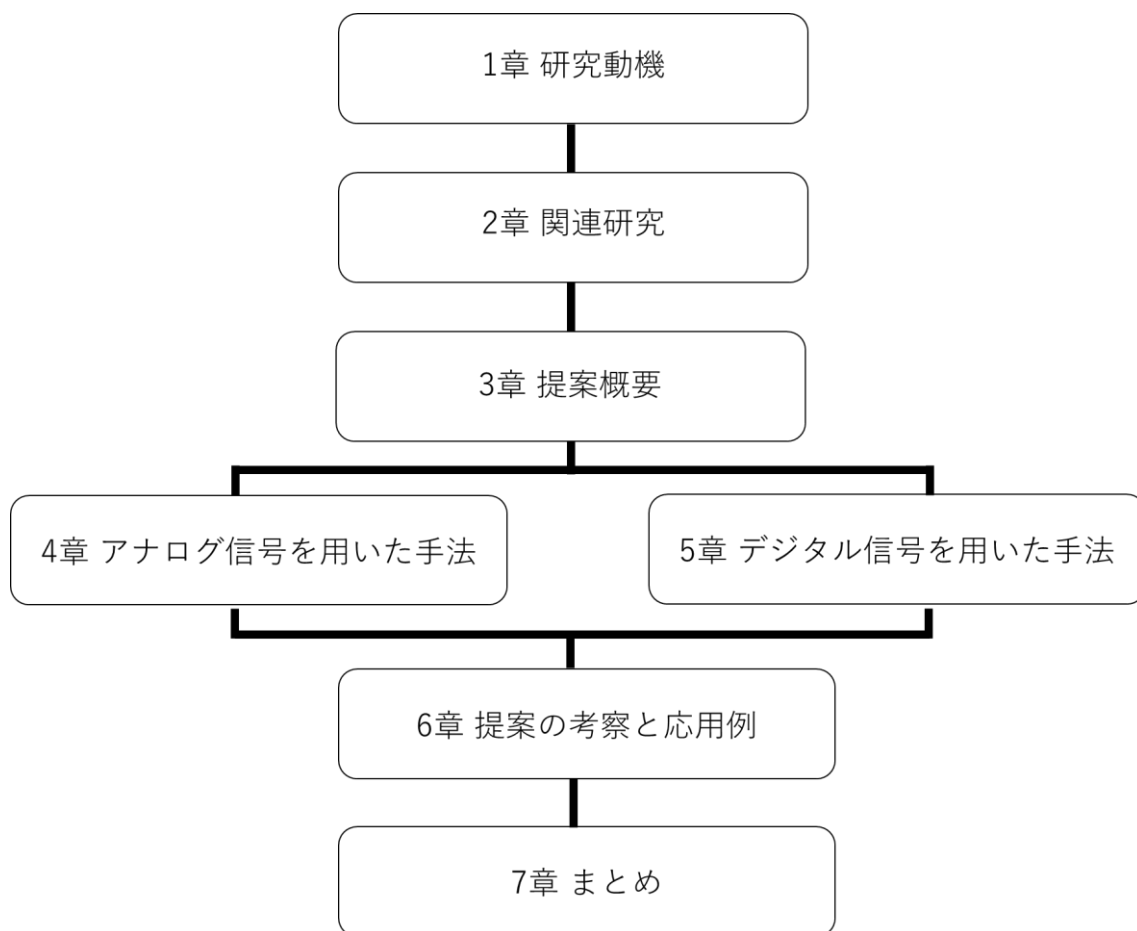


図 1.3 論文の各章の内容

第2章 物理層の役割と既存の規格特定手法

2.1 物理層の役割

通信規格を通信機能毎に分けた OSI 参照モデルにおける最下層の物理層[29]では当該通信で用いられる電気信号処理についての取り決めに示す (図 2.1 参照). そして, 電気信号はアナログやデジタル形式で様々な信号表現[30][31]により伝送できるので, 信号の伝送方式の取り決めや, 物理形状に関わる仕様, 通信確立前の接続相手に対する接続確認や通信方法の確認の仕方等を定めている [32].

用途に応じて通信の仕方やコネクタやケーブルなどの機器形状が変わってくるので, 物理層で取り扱う通信規格は信号処理だけではなく, 機器の物理的形狀にまで及んだ設計が含まれている. 信機器同士等を接続する器具であるコネクタ [33][34][35]や, 高速通信やノイズ処理を考慮するための配線数やピン配置, ケーブルの材質, 太さ, シールドなど種々のことについて定められている. 例えば, 図 2.2 に示すようにコネクタや通信機器には電気信号の役割であるピン配置[36][37]が存在する. 電気信号の役割には受信や送信等あり, これらが正しい組み合わせで接続されなければ通信できない[38][39]. 信号を送信するピンを Tx, 信号を受信する側のピンを Rx と呼び, Tx 同士の配線はお互いが送信し続け通信が成立せず, Rx 同士の配線はお互いが受信しようと待つため通信が成立しない (図 2.2 参照). 対応した役割を持った導線同士の接続が必要となる. これらピン配置の規格も物理層で行っている.

また, 導線の役割や数と言った物理的な仕様だけでなく, 通信速度等などに関する特定の通信ルール[40][41]を満たす電気信号が送信と受信を繰り返すことで通信が成立する. 図 2.3 では 1 秒間に電気信号を二回受信する相手に対して, 1 秒間に一回分の電気信号を送った時, 受信側は送信側の意図した一回分のデータではなく, 二回分のデータ受け取ったと解釈するので通信機器間で通信の食い違いが生じる. これら流れる電気信号の規格化も物理層で行っている.

物理層における通信確立とは, これらの取り決めが通信相手と一致することである. 一致しない場合, 電気信号からデータをうまく抽出できないため, OSI 参照モデルで最初に信号を扱う物理層の規格が一致しないことには通信が成立しない.

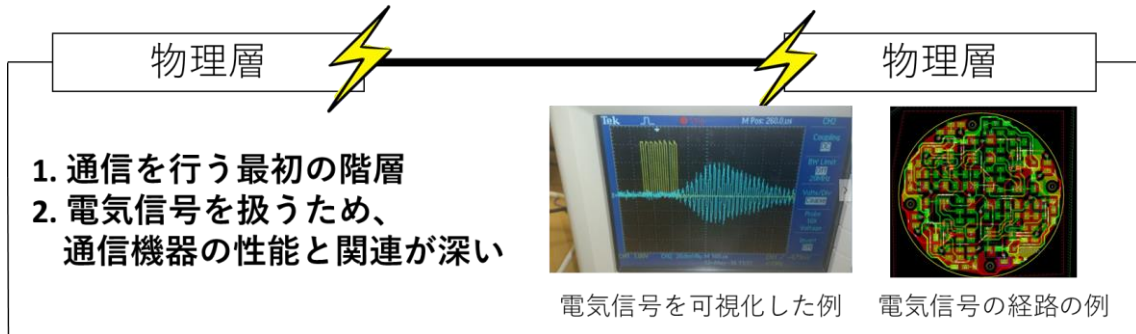


図 2.1 物理層の概要

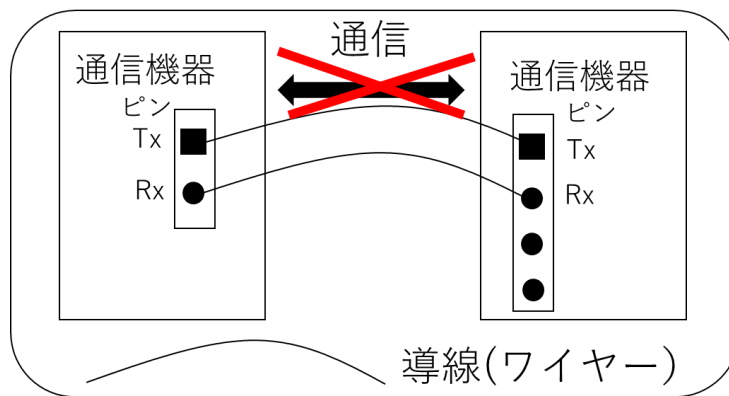


図 2.2 ピン配置不一致の例

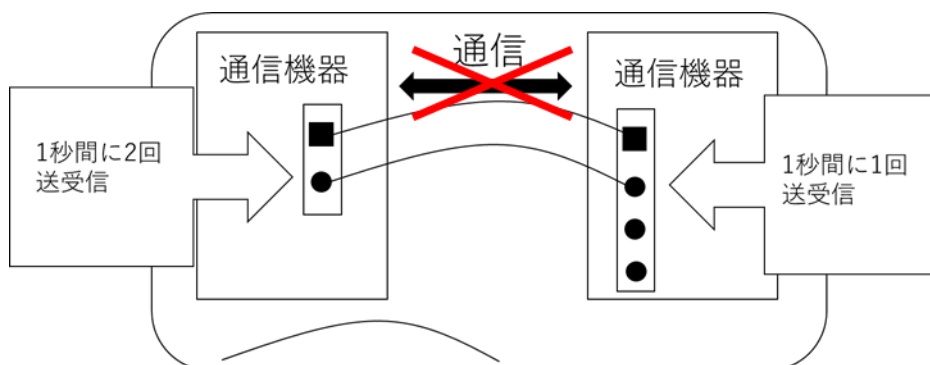


図 2.3 通信速度等の通信手法の不一致の例

2.2 既存の規格特定手法

物理層の規格を一致させる工夫として、規格を特定する手法が考えられている。この節では、物理層の規格を接続相手と同じにするためにどのような仕組みが存在するかを物理層の規格を取り決める本研究の関連研究として説明する。

2.2.1 コネクタ形状による制限

物理層の規格の一致は、導線の接続数や導線を通る電気信号やピン配置の規格についての専門知識が必要となるため、手間がかかる。電気信号の専門知識を持たずに物理層の規格を特定する方法の一つに、コネクタの形状を利用し、コネクタが挿せるか挿せないかで判定する方法が存在する。コネクタの種類毎に、ピンの数やピンの役割、ピンを通る電気信号の規格など予め決められている。加えて、コネクタには凹型のソケットと凸型のプラグ、二つの形状が存在し、ソケットが通信機器に組み込まれ、プラグを通信したい通信機器同士のソケットに挿すことで通信の試行を行う仕組みも存在する。プラグとソケットの形状が一致しない場合、物理的に挿し込みができないため、通信が成立しない。一方、プラグとソケットの形状が一致する場合、挿し込みが成功すると、予め決められたコネクタ内のピンや導線等の規格の特定に成功する。コネクタの形状を用いた制限は、可視化が容易である挿し込みの成否で判断可能であるため、専門知識を必要とせずに物理層の規格を特定する手法として貢献している。

コネクタの形状だけでは規格が決まらない場合もある。コネクタの形状により、ピンや導線等の規格の特定は可能であるが、ピンや導線上を通る電気信号の規格が複数存在する場合、電気信号のやり取りから特定する必要がある。コネクタの形状が同じであっても電気信号の規格が複数存在する代表例にインターネット通信で利用されるイーサネット[42][43][44]、コンピュータと周辺機器の通信に使われる USB[45]、の二点がある。イーサネットや USB は複数電気信号の規格が存在し、本格的に通信を行う前に通信機器間で通信に必要な要素を取り決めるハンドシェイクが用いられている。

2.2.2 イーサネットの電気信号規格のハンドシェイク

インターネット通信で利用されるイーサネット規格には、コネクタ形状は同じでありながら、10BASE-T 半二重、10BASE-T 全二重、100BASE-TX 半二重、等複数の電気信号の規格が存在する。これら電気信号の規格は、通信時に利用する通信速度や信号を流すピンの場所のルール等を取り決めている。接続相手と電気信号の規格が異なる場合、通信ができなくなるため、イーサネットでは電気信号の規格をハンドシェイクによって行っている。

ハンドシェイクでは、OSI 参照モデルのトランスポート層で利用される 3way ハンドシェイク [46][47] が有名であるが、コネクタを挿した後の電気信号の規格の交渉を行うオートネゴシエーション [48][49][50] も存在する。イーサネットのオートネゴシエーションは、接続開始時に特定の電気信号を用いて通信機器間で交渉を行い、両者が利用可能な通信規格を選択する仕組みである。加えて、接続開始時に交渉する際、図 2.4 に示すように、Normal Link Pulse (NLP) と呼ばれる 8 ミリ秒の許容誤差を持つ 125 マイクロ秒間隔の通信速度を持った電気信号を使用する。予め決められた通信速度を利用しているため、決められた通信速度を送受信できない機材はオートネゴシエーションの対象外となる。

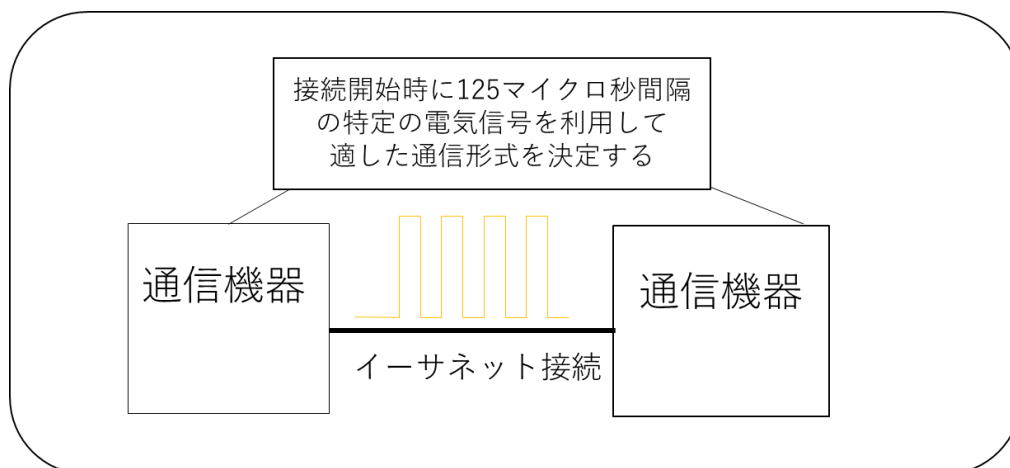


図 2.4 イーサネットのハンドシェイク（オートネゴシエーション）の仕組み

2.2.3 USB の電気信号規格のハンドシェイク

USB もイーサネットと同様にコネクタ形状が同じでありながら，電気信号の規格が複数存在する．複数の電気信号の規格から一つを決定するために，USB1.1 間でハンドシェイク [51][52]が行われている．USB1.1 には共に D+，D- というピンが存在し，接続開始時にデバイス側の D+ の電圧がある閾値よりも高い場合，通信速度を高速で行うフルスピードを選択をする．一方，D- の電圧がある閾値よりも高い場合，通信速度を低速で行うロースピードを選択する [53]．電圧の大きさのみでフルスピードやロースピードと言った通信手法を確定しているため，通信速度の事前決定を必要としない．しかし，USB はホストとデバイスと言った明確な通信関係が存在しているため，通信順序が事前に決まっている．通信関係や通信順序の規定により特定の通信機器間の組み合わせのみでハンドシェイクが行われる．

2.3 既存の規格特定手法の不足点

本提案手法と物理層の規格特定方法の比較を表 2.1 に示す．コネクタの形状による制限は挿し込みの成否のみで物理層の規格の特定が容易になるが，コネクタに存在するピンの数やピンの役割は予め決められているために変更ができず，コネクタを利用した独自仕様に対応できない．加えて，通信機器に備わったコネクタの形状は後から変更することができないため，更新ができない．通信機器の利用者の需要により新しい通信規格が追加された場合，それだけコネクタの種類も新しく増え続けることが予測され，増えた種類の分だけコネクタの接続の組み合わせが増大してしまうことになり，利便性が低下してしまう．

コネクタの形状が一致した場合でもイーサネットや USB のように通信手法が複数存在し，ハンドシェイクを用いることで複数ある通信手法の中から選択することが可能になる．イーサネットのハンドシェイクは，通信速度の決定に予め決められた周波数の信号をお互いに送信する必要がある．そのため，通信機器は決められた周波数の信号を送信するために処理性能の下限が決められている．よって，特定の処理性能を持たない通信機器は，ハンドシェイクの対象外となるため，全ての機材仕様に対応できているわけではない．USB のハンドシェイクは，特定のピンに流す電圧が高いか低いかで通信速度を高速にするか低速に

するかを決定するため、通信機器の処理性能に依存しない。通信機器の処理性能に依存しないが、USBの通信方式はコンピュータと周辺機器を想定して作られた規格であるため、明確な通信関係が存在し、通信順序が決まっている。これらの決定事項はほぼ通信手法が決まっていることと等しく、決定事項を満たさない通信機器を通信の対象外と見なすため、通信相手を限定してしまう。これらのハンドシェイクは、予め通信速度や通信順序等の仕様が厳密に決まっているため、通信相手となる機器を限定してしまい、通信の需要に対応しきれない。

従来の物理層の特定方法では、ピン配置や初期通信速度や通信順序やホスト・デバイス等の役割と言った規格が事前に決まっているため、通信相手をあらかじめ限定している。初期通信速度が決まっている場合、初期通信速度を扱えない通信機器には対応できない。通信順序やホスト・デバイス等の役割が決まっている場合、ホスト同士・デバイス同士と言った通信の優先順位が同列の通信機器の通信が行えない。通信の需要に伴う通信の利用用途の増加と通信機器の増加に対応するには、全ての通信機器の性能に対応し、初期通信速度や通信順序やホスト・デバイス等の役割と言った規格を事前に決めずに通信を行える手法が必要になる。

表 2.1 本提案手法と物理層の規格特定方法の比較

	ソケットの形状	イーサネットのハンドシェイク	USBのハンドシェイク	提案
ピン配置・ワイヤー接続	予め決定			未決定
初期通信速度		予め決定	未決定	未決定
通信順序		未決定	予め決定	未決定

2.4 本研究の立ち位置

本論文はソケット形状に関係なく、送信手順や通信速度を予め決定しない通信実現のために通信周波数を取り決める手法を提案する。機器同士の通信を行うために、相互通信のための通信周波数を決める必要がある。通信周波数とは機器が電気信号を意味ある信号として認識できるようにするための読み取り間隔を定めたものである。読み取り間隔が異なると送信された内容を誤認するため通信ができない。よって、この通信周波数が決定すれば信号を接続機器同士

が認識することが可能になり、その後の通信規格の取り決めが行えるようになる。しかし、既存の手法ではそれらが固定であり制限がある。それを改善するための提案である。

これまで物理層の規格を取り決めるためにソケット形状やハンドシェイクが使われている。ソケット形状を利用した方法はピン配置や導線接続等の規格を挿し込みの成否で取り決めることが可能であるため、規格の取り決めが容易となる。しかし、今後ソケット形状の種類が増えた場合、接続する組み合わせが増加してしまうため、利便性が低下してしまう。ハンドシェイクを利用した方法は、機器間が交渉することにより、通信速度や通信経路の規格を決定するため、ソケット形状が同じでも規格が複数ある場合等で有効である。しかし、既存のハンドシェイクは交渉に用いる通信速度や通信順序が規格として予め決まっているため、接続相手となる通信機器を限定しまう。通信機器や通信規格が増え続けた場合、これまでの物理層の取り決め方法では利便性の低下に加え、接続相手を限定し、対応しきれなくなる。

本提案手法では、ピンの機能や、規格決定のための初期通信速度や通信順序が定まっていない状況下において、機器同士が信号のやり取りをするための通信周波数を決定することが目的である。通信周波数が確定し機器で信号のやり取りができるようになると、通信速度が確定し相互通信ができるようになる。そのためには、「ピン配置」「通信優劣性」「初期通信速度」の要素について対策する必要がある。

ピン配置で対策すべきことは送受信の役割と双方の信号が合成される可能性の二点である。本来であれば、送信用ピンと受信用ピンと言った適切な組み合わせの接続で通信は成立するが、本提案手法は、ソケット形状に依存しない通信、つまりソケットに含まれるピン配置や導線接続等の規格に依存しない通信を実現するため、ピンの機能（送受信等の役割）が未定の状態となる。送受信の役割が未定であるため、それぞれのピンから送信する信号が合成される可能性も対策する必要がある。

通信優劣性で対策すべきことは通信順序と通信に最も適した瞬間の二点である。通信機器間でホスト・デバイス等の役割が明確である場合、ホストからデバイス宛に最初に通信を開始すると言った通信順序が事前に定められている。これを“通信優劣性”と本論文で定義している。本提案手法では、役割に依存した接続関係で通信相手を限定しないため、通信順序が定まっていない状況下を

想定している。すなわち、接続相手と自身の間で送受信に適した瞬間を互いが認識できない問題を対策する必要がある。

初期通信速度で対策すべきことは、相手が認識可能であるかという点である。双方の通信機器の初期通信速度が同じであれば双方で通信が可能になるが、今後も技術発展するので古い通信機器が新しい通信機器の初期通信速度を認識できないことが考えられる。よって、常に通信機器が相手の初期通信速度を認識可能であるかどうかは分からない問題を対策する必要がある。以上の「ピン配置」「通信優劣性」「初期通信速度」の要素について対策した上で通信周波数を決定する必要がある。

第3章 通信速度のハンドシェイクの提案

どのような状況下においても接続機器同士が信号を認識できる初期通信速度を求められるようなハンドシェイクを提案する。これには、送信順序や送受信用のピン配置など決定していない状況で、通信周波数を決定し、初期通信速度を求める。

本提案手法では、接続時に、自身の信号解析可能な通信周波数の信号をそれぞれ同時に送る。それぞれ相手から送信された信号を抽出し、その信号の通信周波数を分析する機構を保持する。そして、受信した信号から、相手の通信周波数の信号を相手に問い合わせることなく分析解析するものである。

この手法を用いることにより、接続時に同時に信号をそれぞれ発信するため、接続機器同士で通信順序の取り決めが必要ない。ピンの役割が確定しない状況であるため、双方が同じピンに信号を送信する場合があります。その場合は信号が合成されてしまうが、その中から相手の信号のみを抽出する機構があるため、複線でも単線でも実現可能である。通信が確立する前に接続相手に問い合わせることがないため、相手の解析可能な通信周波数を予め自身が理解せずに済むので、決められた初期通信速度を用いる必要が無い。

以上の方針に基づいた提案手法を、アナログ信号の場合とデジタル信号の場合でそれぞれ提案する。なお、複線でも単線でも信号が合成される可能性があるため、単線下で本提案をそれぞれ評価した。

アナログ信号を利用した単線下における通信速度のハンドシェイクは4章で解説する。アナログ信号による伝送手法は、接続相手の送信する信号の周波数の探索を相手と周波数が一致するまで繰り返すため、周波数の探索に用いる周波数一致率の解析が重要となる。周波数一致率の解析が重要であるため、シミュレーションを用いて異なる周波数を持つ機器間で周波数が一致するまでの周波数一致率の解析結果の推移を検証した。加えて、周波数の位相が異なる場合での影響を考え、通信機器間で位相が異なる環境下で周波数一致率の解析結果の推移を検証として求めた。

デジタル信号を利用した単線における通信速度のハンドシェイクは5章で解説する。デジタル信号による手法も、アナログ手法と同様に相手から送られてくる電気信号の周波数の解析が重要であるため、実機やシミュレーションを用いて、波形の解析が可能であるか検証を行った。

第4章 アナログ信号におけるハンドシェイク

本研究では物理層における周波数決定に着目し，接続機器同士が相手の状況を事前に知ることなく通信に用いる周波数を決定する手法を提案する．この章では，アナログ信号を用いたハンドシェイクの提案について，手法，実装，評価の内容を説明する．

4.1 アナログ信号における手法

アナログ信号は，受信した電気信号がそのまま信号になる．そのため，相手の送信してくる信号の波形を解析しなければならない特徴があり，同一線上で互いに送信した場合には合成波になる．この節では，提案手法を実現するために，それぞれの配線に役割が与えられていない状況下において，相互に同じ銅線に信号を非同期に送りあえる単線上での通信状態を想定する．その状況で，どのように相手の信号を解析し，通信速度のハンドシェイクを確立していくかについて解説する．

本手法の目的は，接続機器同士が，相手と通信可能な周波数帯域を検知することである．しかし，接続時には相互に相手の通信可能な周波数帯域を認知していない．そこで，最初に通信機器は自身の処理速度を元に特定の周波数のアナログ信号を接続相手に送る．その受信した信号を元にして接続先相手と通信可能な周波数帯域を探る．そのためには，受信した信号を理解できる必要がある．検知手法は，図4.1に示すように，無線の電波の認識等で使われるIQ復調[54][55][56]を用いてアナログ信号の周波数を特定する．提案ではアナログ信号の周波数の一致判定を有線通信で行うためにIQ復調を利用する．IQ復調の計算式を次に示す．

IQ復調では，2つのアナログ信号を比較することで，それら信号が同一であるのかを判断する．サンプリング数を n とし，それぞれのアナログ信号を tw ， cw と定義し， tw の信号が cw と一致しているのかをIQ復調により調べるとする．ある時刻 i ($<n$)のそれぞれの信号の値を $tw[i]$ ， $cw[i]$ と表記する．さらに cw の位相が90度ずれた信号を $cw90$ と表記した場合に，下記 $P0$ と $P90$ を求める．

$$P_0 = \left(\sum_{i=1}^n tw[i] * cw[i] \right) / n \dots\dots\dots(1a)$$

$$P_{90} = \left(\sum_{i=1}^n tw[i] * cw90[i] \right) / n \dots\dots\dots(1b)$$

アナログ信号が同じ周波数である時、 P_0 と P_{90} の得られた値の絶対値が0.5と0の組み合わせになる。一方、二つのアナログ信号が異なる周波数である場合、 P_0 と P_{90} の得られた値の絶対値は0.5と0の組み合わせにならない。得られた値の組み合わせにより周波数一致判定を行することができる。

IQ復調だけでは位相差が発生する場合、計算結果が特定の組み合わせにならないため、位相差を考慮して再計算する必要がある。IQ復調は周波数が同じであつても位相差がある場合、下記式により位相差を求める。

$$m\theta = 180/\pi * \tan^{-1}(P_{90}/P_0) \dots\dots\dots(2)$$

式2で求めた位相分 cw の信号をずらし、再度IQ復調を行うことで、一致判定が可能である。

提案手法では、単線下でもお互いが通信可能な周波数帯域を検知できなければならない。そして、単線下では複数の信号が重畳された合成波から自身の周波数を除外し、接続相手が送信する信号の周波数を解析する必要がある。そこで、接続相手のアナログ信号の周波数を検知するためにもIQ復調を利用する。以上の手法を用いて複線・単線に関わらず、アナログ信号の周波数検知が可能である。それらにより検知を可能にした状態で、通信速度のハンドシェイクを行う(図4.2参照)。

接続時直後、最初に各通信機器はある決められた周波数を持つアナログ信号の出力を行う。出力に用いる周波数は、通信以外の処理による負荷を考慮して、機器自身で取り扱いが十分可能な範囲から選ぶ。本論文の出力に用いる周波数(図4.2中のA1, B1に該当)は、処理に影響が及ばない十分可能な範囲として各機器が持つ自身の最大処理速度の半分とした。各機器が接続相手の周波数を解析し終わるまで出力する周波数は一定とする。これは、通信手法が確立していない状況下で接続相手の解析状態を理解できないので、接続相手が解析す

るための信号を提供し続ける必要があるためである。

そして、各機器は自身が受信したアナログ信号を数式 1a, 1b, 2 を用いて一致判定を行う。図 4.2 を例に取り上げると、数式に用いる信号は、Device A では、単線で取得した信号から自身で送信している信号を除去した A2 と機器内部に事前に用意している参考信号の A3 を用いる。Device B では、B2 と B3 の箇所に流れる信号が該当する。それぞれの機器で自身が設定して保持している参考信号と受信した信号から自身の信号を取り除いた信号を IQ 復調で一致しなかった場合、参考周波数を下げて行く。なお、導線上に出力される周波数はこの時点では変更しない。一方、一致した場合、参考周波数の周波数を下げを止め、一致した時の参考周波数を導線へ出力する。出力可能な周波数が低い機器は、周波数出力が高い機器が最初出力する周波数信号よりも低い周波数出力し、処理の工程上一致することがない。そのため、参考周波数を下げていき、最終的に参考周波数が 0Hz になる。参考周波数が 0Hz になった場合、自身の周波数に合わせて相互通信すると判断し、参考周波数を初期に戻す。参考周波数を初期に戻した際、参考周波数の周波数は初期値で固定し、接続相手が出力した周波数と一致するまで比較し続ける。

それぞれの機器内で、参考周波数と接続相手の出力周波数が一致した場合、通信に用いる周波数が確定したと見なす。各機器が異なる処理速度を持つ場合、図 4.2 中の Process End に到達した段階で、接続相手の波形の探索に成功した機器と失敗した機器のどちらかに分かれる。探索に成功した機器は、探索に成功した段階で参考周波数の更新を止め、出力波形を一回だけ参考周波数と同じ周波数に変更し（図 4.2 中の “Change A1 to B1”, “Change B1 to A1” に該当）、通信に用いる周波数を確定したと見なす。一方、探索に失敗した機器は、参考周波数を初期の値に戻し（図 4.2 中の “Change A3 to A1”, “Change B3 to B1” に該当）、参考周波数の値を変更せず、アナログ信号の周波数の検知を継続する。探索に失敗した機器も、検知の継続と探索に成功した機器の出力波形の更新により、通信に用いる周波数を確定する。尚、探索に失敗した機器は出力するアナログ信号の周波数を変更していない。

IQ復調によりアナログ信号の周波数の検知が可能

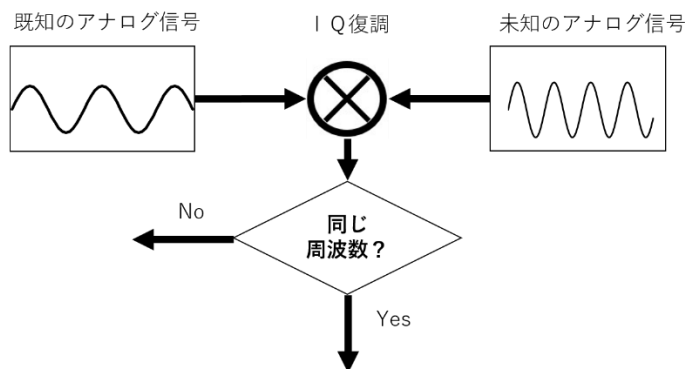


図 4.1 アナログ信号の周波数検知法の概略図

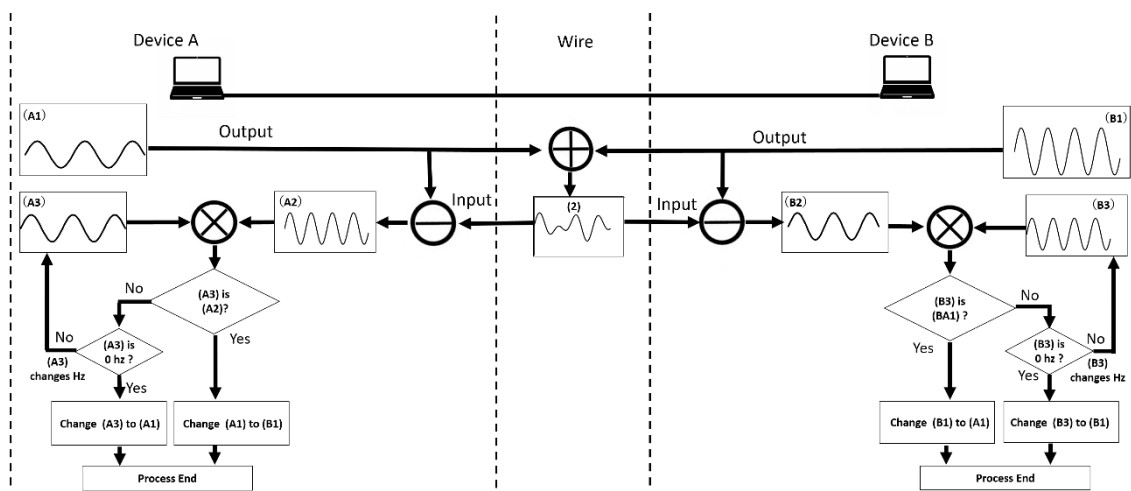


図 4.2 アナログ信号における提案手法のフローチャート

4.2 評価用シミュレーション環境について

単線で信号が合成されている状況下から、自身の信号と相手の信号を分離し比較することで通信に用いる周波数を決定できるのかシミュレーションを行った。事前検証として、通信機器内のアナログ信号の処理を可視化するシミュレーションソフトを Visual C# Windows Forms Application で実装した。実装したシミュレーションでは、提案手法の動作確認のため、接続相手のアナログ信号と同じ周波数に合わせることが可能であることを評価する。本論文では、接続相手のアナログ信号と同じ周波数に合わせることが周波数の協調と定義し、実装したシミュレーションを周波数の協調のシミュレーションと表現する。

周波数の協調シミュレーションのグラフは全てアナログ信号を示す。グラフ内のアナログ信号は電気ノイズが発生しない環境で行われると定義する。シミュレーションのグラフの縦軸は電圧の大きさを示し、横軸は1秒間のサンプリング数を示す。接続元となる機器はそれぞれ、Device A、Device Bと規定する。シミュレーションのグラフは、単線上で行われる通信と解析過程のアナログ信号を可視化する。

図 4.3 を元に実装したシミュレーションについて説明する。図 4.3 は A1、A3、B1、B3 が図 4.2 の各記号に対応し、左、中央、右の三つのブロックに分かれる。左のブロックは Device A が単線下で行う処理を表示している。左上部のグラフは接続相手の Device B に対して送信するアナログ信号を示している。左下部は接続相手のアナログ信号を解析するための参考周波数に該当するアナログ信号を示す。左最下部にある“Match rate”は現在表示している左下部の参考周波数（図 4.2 中の A3）と合成波から取り出した出力相手のアナログ信号周波数（図 4.2 中の A2）の一致度合いを示している。

アナログ信号の周波数の一致度合い“Match rate”の計算方法を図 4.4 に示す。まずアナログ信号の一致度合いを求めるために、IQ 復調を利用する。IQ 復調はアナログ信号が一致した時、絶対値が 0 と 0.5 となる二つの値を返す。“Match rate”の、IQ 復調で求めた二つの値の絶対値の中で大きい値を選択し、選択した大きい値が 0.5 の時、100%となるように表示する。

中央のブロックは Device A、Device B が出力するアナログ信号の合成波を示す。右のブロックは Device B により、左のブロックと同様に Device A を対象に送信と解析が行われる。

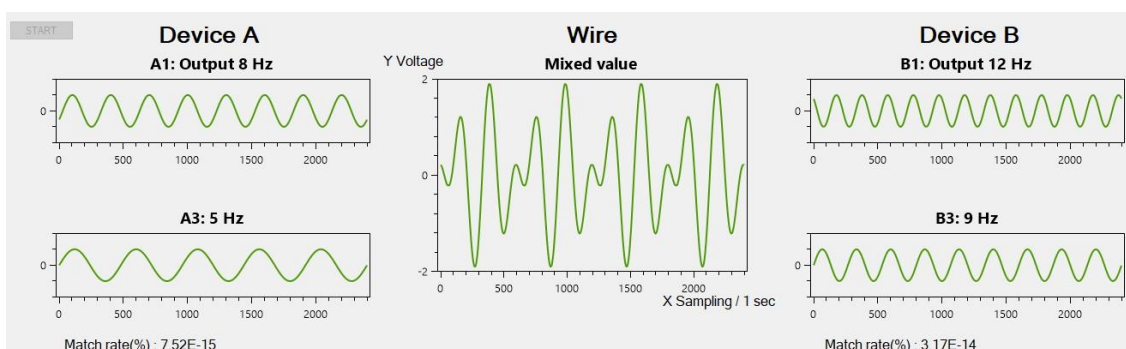


図 4.3 シミュレーションを使った解析例

Match Rateの求め方

4.1手法 数式1aと1bより

1. 1aと1bの計算結果の絶対値をそれぞれ計算する。
2. 1.の結果から大きい値を選択する。
3. 2.の結果を0を例外値として0.5で割る。
(0.5が1=100%、0で0%になるように計算する。)
4. 3.の値がMatch Rateである。

図 4.4 アナログ信号の周波数一致率の計算方法

4.3 検証

提案したアナログ手法におけるハンドシェイクの検証を行った。まず、信号の識別にIQ復調を取り入れている。IQ復調を用いた場合の波形判定精度を評価した。そして、提案手法により接続機器同士がそれぞれ通信速度決定のための周波数を導けるのかの挙動を確認した。これらの観測には、構築した評価用シミュレーションソフトを用いた。サンプリング数は1秒間（2400点）とし、受信した信号をサンプリングしたデータにより比較した。

4.3.1 検証1：波形の一致判定精度

提案手法では、IQ復調により自身の送信する波形と接続相手が送信する波形の一致率を解析し、解析結果を元に分岐処理を行う。そこで、分岐処理の正誤は波形の一致率に依存するため、波形の一致率の評価を事前検証として行う。送信に利用する電圧の値が最小で $-1v$ 、最大で $1v$ とし、1秒間のサンプリング数は2400とする。波形の一致率を検証するために、基準となる既知の周波数を12Hz、8Hz、4Hzの三種類を用意する。この基準となるそれぞれの既知の周波数に対して、接続相手から送信される周波数を12Hz、8Hz、4Hzを三種類用意し、位相を0度から359度変化させた上で波形の一致率の推移を求める。

この12Hz、8Hz、4Hzの組み合わせは二点の条件を元に選択している。一点目の条件は、自身の周波数が相手の周波数と同期して更に大きくなる共振の有無を考慮した組み合わせになる。共振は周波数の倍数の組み合わせ時に発生するため、4Hzを元にした時、2倍の8Hz、3倍の12Hzの組み合わせ時、共振の組み合わせに該当する。加えて、12Hzと8Hzの組み合わせのように共振の条件を満

たさない組み合わせを網羅している。二点目の条件は、位相を変える相手と大小・等しい関係を考慮した組み合わせになる。例えば、8Hz を基準にした時、位相を変える相手の組み合わせは基準よりも大きい 12Hz、基準と等しい 8Hz、基準よりも小さい 4Hz が成立するため、基準と比較した時の大小・等しい関係の組み合わせが成立する。検証に用いたこれら 12Hz、8Hz、4Hz の周波数の組み合わせは自由に選択可能であるが、共振の有無と大小・等しい組み合わせの二つの条件に沿う組み合わせを今回は選択した。

加えて、高周波時の波形の比較を想定して、自身と相手の周波数の数値が近い場合の一致率を補足として求める。数値が近い組み合わせとして 12Hz と 11Hz を選択し、基準となる 12Hz の位相を 0 度から 359 度変化させた上で波形の一致率の推移を求める。

4.3.2 検証 1 の結果

本検証では共振と大小・等しい組み合わせの二つの条件に沿う組み合わせとして 12Hz、8Hz、4Hz をそれぞれ三種類の周波数信号で評価した。また、それら信号の 0 度から 359 度まで位相差が異なる波形を用意し、その一致率の推移を求めた。各一致率の推移を表したグラフを図 4.5、図 4.6、図 4.7 にそれぞれ示す。各グラフの縦軸の値は波形の一致率を最小 0% から最大 100% までで示した。ただし、浮動小数点の演算上厳密に計算されない場合があるため少数第一位で四捨五入している。各グラフの横軸は基準となる周波数と比較した時の位相の違いを表し、最小 0、最大 359 となる。これら図 4.5、図 4.6、図 4.7 の結果から、周波数が同じ時の波形の一致率は位相の変化に関わらず 100% を示している。一方、周波数が異なる場合、波形の一致率は位相の変化に関わらず 0% を示している。

補足として数値が近い例として取り上げた 12Hz と 11Hz の波形一致率の推移を図 4.8 に示す。図 4.8 中の波形の一致率は、少数第一位で四捨五入すると 0% であった。この結果から位相差を持つ波形のずれによる変化でも精度に影響がなかった。

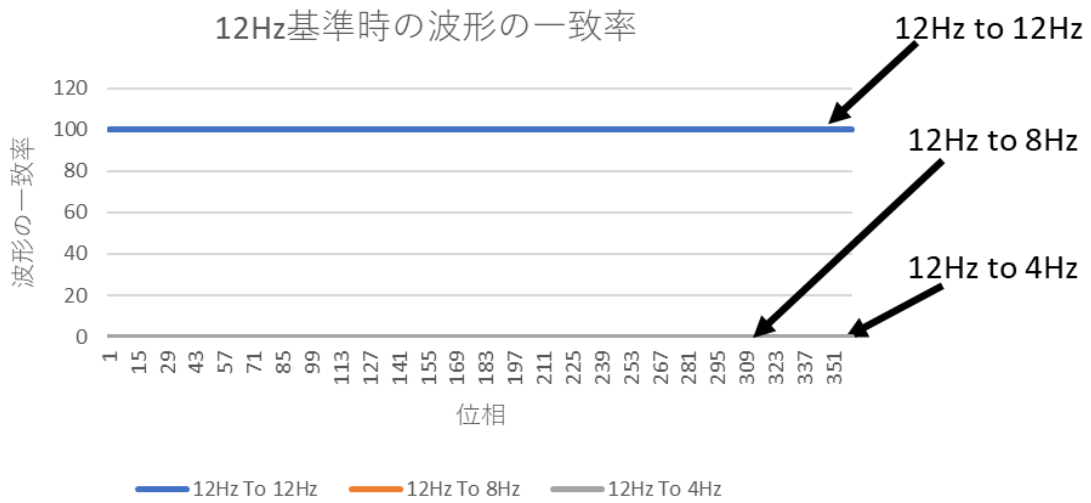


図 4.5 12Hz 基準時の波形の一致率. 自身が送信する既知の周波数を 12Hz, 相手が送信する未知の周波数を 12Hz, 8Hz, 4Hz とした時, 基準となる 12Hz の位相を 0 から 359 度までそれぞれずらした波形で比較した際の一致率の推移

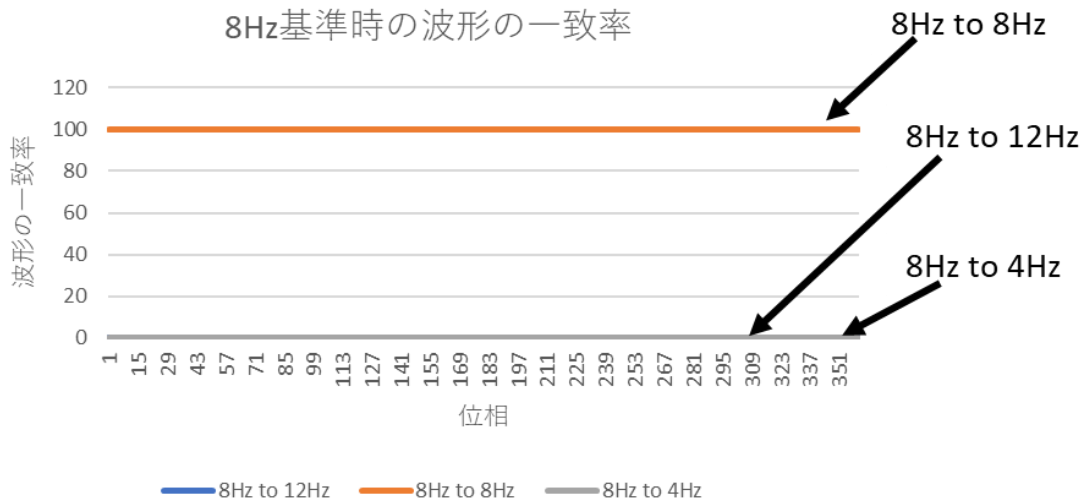


図 4.6 8Hz 基準時の波形の一致率. 既知の周波数を 8Hz, 未知の周波数を 12Hz, 8Hz, 4Hz とした時, 基準となる 8Hz に位相 0 から 359 度までそれぞれずらした波形で比較した際の一致率の推移

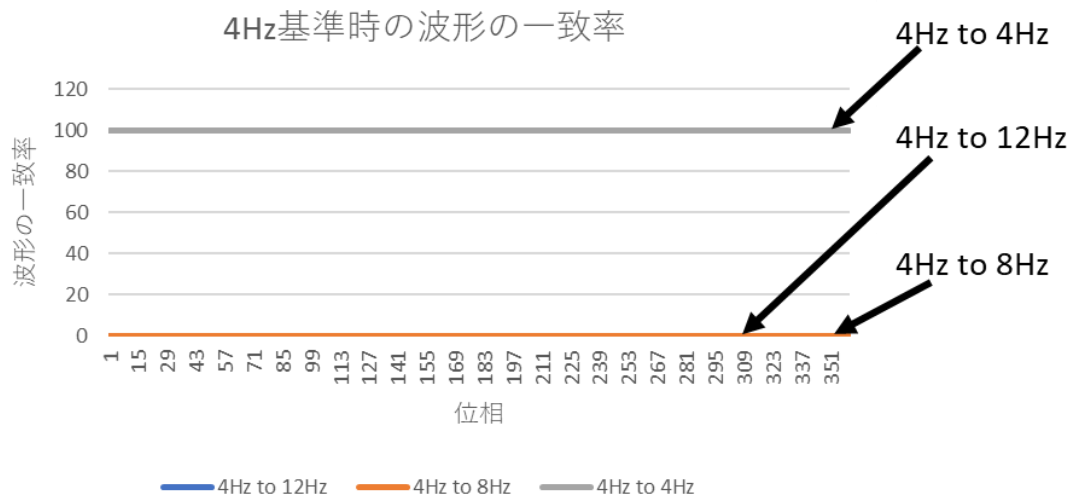


図 4.7 4Hz 基準時の波形の一致率. 既知の周波数を 4Hz, 未知の周波数を 12Hz, 8Hz, 4Hz とした時, 基準となる 4Hz の位相を 0 から 359 度までそれぞれずらした波形で比較した際の一致率の推移

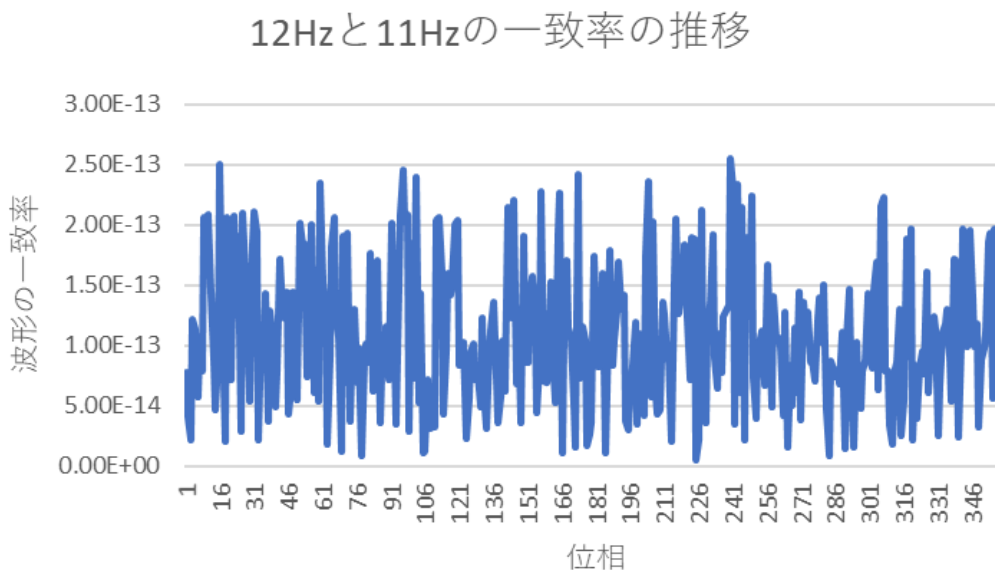


図 4.8 12Hz と 11Hz の一致率の推移. 基準となる 12Hz の位相を 0 から 359 度変更させた際の一致率の推移

4.3.3 検証 2：提案手法の収束挙動

波形の一致判定精度の検証結果より、波形が一致する場合約 100%であり、一致しない場合は約 0%になる。これは近似している周波数信号でも同様であるため、明確に区別可能である。本検証では最初に送信する Device A と Device B の周波数の組み合わせを 12Hz・8Hz, 4Hz・12Hz, 12Hz・12Hz とした。12Hz・8Hz と 4Hz・12Hz の組み合わせは、接続相手と送信する周波数が異なり判定が難しいと想定される信号として、検証 1 で利用した組み合わせの中から相手の周波数と比較して倍数関係を満たす・満たさない関係の中から選択した。12Hz・12Hz の組み合わせも同様に、接続相手と送信する周波数が同じ場合を想定し、選択したものである。

4.3.4 検証 2 の結果

最初に送信する周波数を Device A と Device B でそれぞれ、12Hz・8Hz, 4Hz・12Hz, 12Hz・12Hz の組み合わせで行った提案手法の検証結果を表 4.1, 表 4.2, 表 4.3 に示す。

表 4.1 中の Device A の表では A3（参考周波数）を波形の一致率が 100%になるまで落として行く。A3 が 8Hz に到達した段階で波形の一致率が 100%になるため、A1（Device A が送信する周波数）を 1 回だけ 8 Hz に切り替える。一致率が 100%になった時点で Device A は通信に用いる周波数を 8Hz であると決定する。一方 Device B の表も同様に B3（参考周波数）を波形の一致率が 100%になるまで落としていき、1 Hz まで到達する。1 Hz まで到達した後、最初に送信した周波数に戻り、波形の一致率が 100%になるまで待ち続ける。Device B の表の Step 9 の段階で、Device A が送信する周波数を 8Hz に切り替えたことにより、波形の一致率が 100%となるため、Device B も通信に用いる周波数を決定したと言える。結果的に両方の Device が通信に用いる周波数を決定している。

表 4.2 中の Device A の表では波形の一致率が低いため、A3（参考周波数）を落としていき、波形の一致率が 100%にならないため、1 Hz に到達する。1 Hz に到達した後、初期の周波数で固定し、アナログ信号の検知を継続する。最終的に、Device B が送信する周波数を 4Hz に切り替えたことにより、Step 10 でアナログ信号の一致率が 100%となり、通信に用いるアナログ信号の周波数

が確定したと見なす。アナログ信号の一致率は A2, A3 が同じ時のみ大きな値を出している。一方、表 4.2 中の Device B の表は、Step9 で 100%の波形の一致率を出しているため、通信に用いる周波数が確定したと見なし、B1 (Device B が送信する波形の周波数) を一度だけ 4Hz に切り替える。Device B の波形の一致率も Device A と同様に、B2, B3 が同じ時のみ大きな値を出している。これらから両 Device は共に通信に用いる周波数を決定できたという結果になる。

表 4.3 では Device A と Device B の両方の表で参考周波数を最初に送信する周波数と同じ周波数の段階で波形の一致率が 100%となっている。最初に送信した周波数とおなじ周波数の段階で波形の一致率が 100%となっているため、両 Device は共に通信に用いる周波数を決定できたという結果になる。

表 4.1, 表 4.2, 表 4.3 の結果から送信する周波数が異なる組み合わせと同じ組み合わせにおいても提案手法の挙動が収束していることが分かる。

表 4.1 最初に送信する周波数の値を Device A を 12Hz, Device B を 8Hz 設定時の検証結果

Device A				Devcie B			
Step	A2(Hz)	A3(Hz)	Match Rate (%)	Step	B2(Hz)	B3(Hz)	Match Rate (%)
Step 1	8	12	0	Step 1	12	8	0
Step 2	8	11	0	Step 2	12	7	0
Step 3	8	10	0	Step 3	12	6	0
Step 4	8	9	0	Step 4	12	5	0
Step 5	8	8	100	Step 5	12	4	0
Step 6	8	8	100	Step 6	8	3	0
Step 7	8	8	100	Step 7	8	2	0
Step 8	8	8	100	Step 8	8	1	0
Step 9	8	8	100	Step 9	8	8	100

表 4.2 最初に送信する周波数の値を Device A を 4Hz, Device B を 12Hz 設定時の検証結果

Device A				Device B			
Step	A2(Hz)	A3(Hz)	Match Rate (%)	Step	B2(Hz)	B3(Hz)	Match Rate (%)
Step 1	12	4	0	Step 1	4	12	0
Step 2	12	3	0	Step 2	4	11	0
Step 3	12	2	0	Step 3	4	10	0
Step 4	12	1	0	Step 4	4	9	0
Step 5	12	4	0	Step 5	4	8	0
Step 6	12	4	0	Step 6	4	7	0
Step 7	12	4	0	Step 7	4	6	0
Step 8	12	4	0	Step 8	4	5	0
Step 9	12	4	0	Step 9	4	4	100
Step 10	4	4	100	Step 10	4	4	100

表 4.3 最初に送信する周波数の値を Device A を 12Hz, Device B を 12Hz 設定時の検証結果

Device A				Device B			
Step	A2(Hz)	A3(Hz)	Match Rate (%)	Step	B2(Hz)	B3(Hz)	Match Rate (%)
Step 1	12	12	100	Step 1	12	12	100

第5章 デジタル信号におけるハンドシェイク

本研究では物理層における周波数決定に着目し，接続機器同士が相手の状況を事前に知ることなく通信に用いる周波数を決定する手法を提案する．この章では，デジタル信号における手法，検証環境，検証の三つに分けて説明する．一節目のデジタル信号における手法では，周波数を決定するために必要な手順やこの手順の中で重要になる接続相手と比較した時の周波数の高低差判定と周波数の一致判定の求め方について説明を行う．二節目の検証環境の節では，検証を行うための実機や配線環境，加えて周波数の高低判定や周波数の一致判定に用いた計算式や閾値について説明を行う．三節目の検証の節では，周波数の決定で重要となる周波数の高低判定と周波数の一致判定が実現可能かどうかを示すための検証を行い，その結果を説明する．

5.1 デジタル信号における手法

接続された機器は，図 5.1 に示す判定基準に従い送信信号を決定する．出力信号は，デューティ比 50%のクロック信号[57][58]（図 5.2 参照）をお互いに送信する．判定により自身の出力信号が接続先信号よりも高周波であるのか低周波であるのかを判定できるので，それにより出力信号を適宜修正する．低周波信号を出力する機器が高周波信号を認識することができるのかが判断できないため，高周波出力信号は，自身の出力信号を低周波から出力し調整する．そのため，出力信号は自身が出力可能な周波数信号の反比例に応じて決定する．高周波出力可能な機材であれば，低い周波数信号を出力することになり，低周波出力機器は高周波出力機器よりも高い周波数信号から出力することになるので，低周波出力しかできない機材でも高周波出力可能な機材から送信される信号を常に認識できる状況における．また，出力波形の更新は，解析に時間を要する．そのため，信号解析期間に処理が行われると分析できなくなるので，出力波形の分析が完了するまで，出力波形は解析以前の波形を出力する．

デジタル信号における通信速度決定手法の成立条件は，相互が認識可能なデジタル周波数信号を決定することである．単線複線関係なく接続先の信号を分析するには，接続先側からの信号を抽出する必要があるが，アナログ信号とデジタル信号の違いは，合成波の表現である．アナログ信号は波の合算であるが，

デジタル信号の場合は、2進数表現なので合算ではなく、論理演算のOR[59][60]と同様の振る舞いになる（図 5.3 参照）。そのため、自身が送信した信号を引き算しても接続先が送信した信号にはならない。ゆえに、デジタル信号における信号の一致判定がアナログ信号の手法では求めることができないので、新しく手法を提案する。

本デジタル信号におけるハンドシェイクも、信号判定が重要であり、その判定により機器からの出力信号が決定される。周波数の一致判定では、取得した特定数の合成されたクロック信号の Low 信号幅の分散を計算する（図 5.4 参照）。分散の値が低い場合、周波数が一致したと見なし、処理を終了する。分散結果が高い場合、周波数が接続相手と一致していないと見なし、周波数の高低判定に向かう。高周波と低周波を合算した場合、高周波の Low 信号が出現する（図 5.5 参照）。そこで、自身の Low 信号と合成された受信信号を比較し、自身の Low 信号が含まれているのかを比較することで、接続先相手の出力している周波数が自身よりも高周波であるのか低周波であるのかを判定することができる（図 5.5 参照）。そこで、受信した合成信号の Low 出力時間と自身の送信信号の Low 出力時間の差を平均することで、接続相手よりも高周波であるのか低周波であるのかを識別できる。それにより求めた値より数値が低い場合は、自身の出力する周波数が高いと判断し、一方、求めた数値が高い場合は、出力周波数が低いと判断できる。

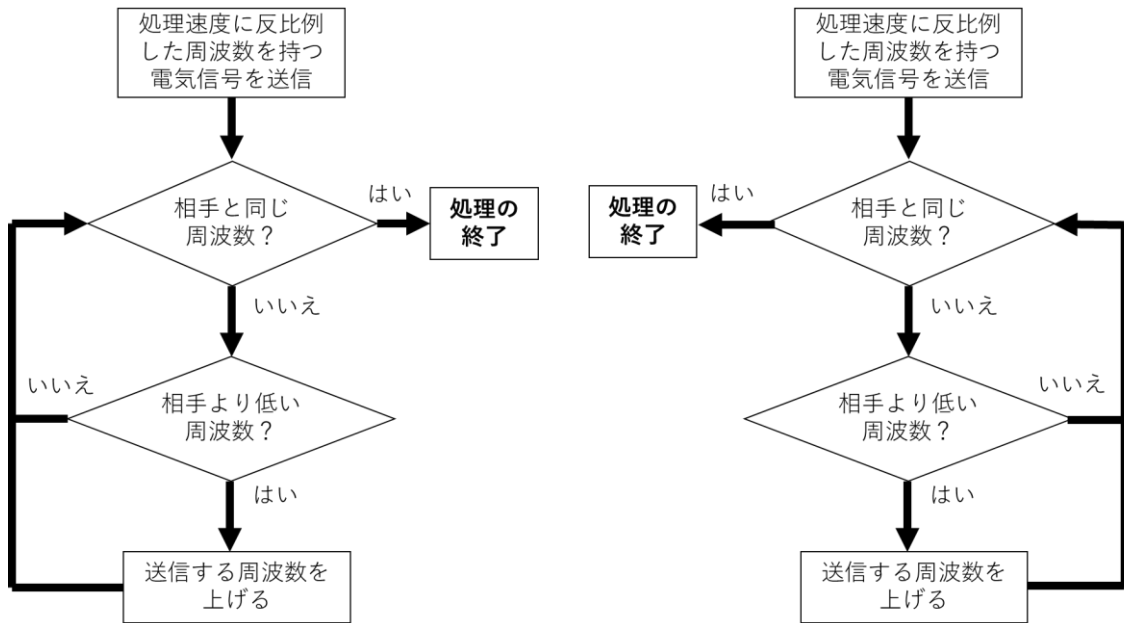
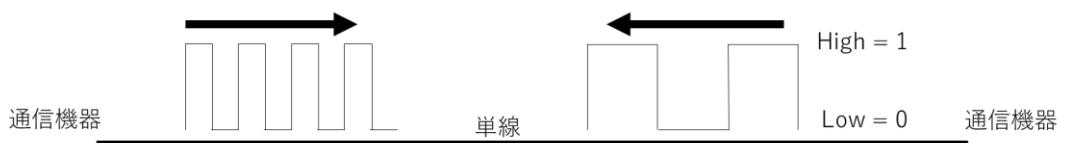


図 5.1 提案手法のフローチャート

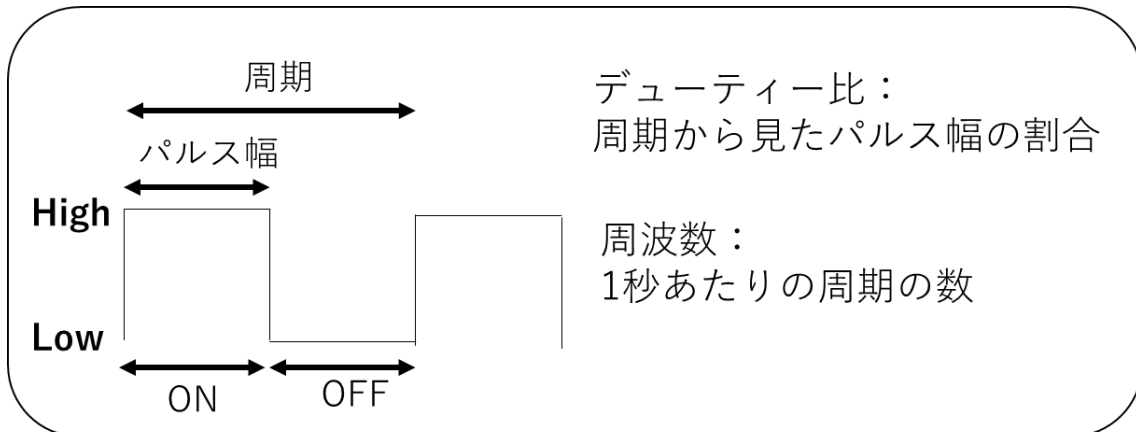


図 5.2 提案で取り扱う信号について

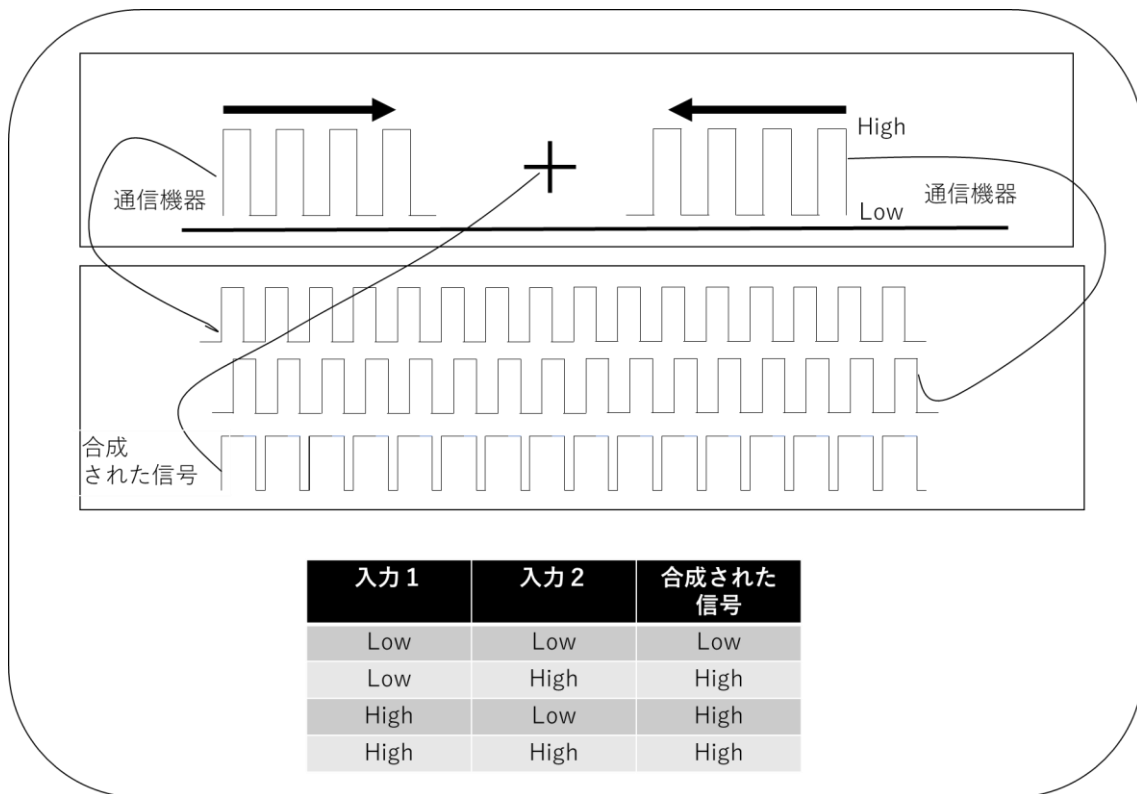


図 5.3 単線下で合成される信号特性

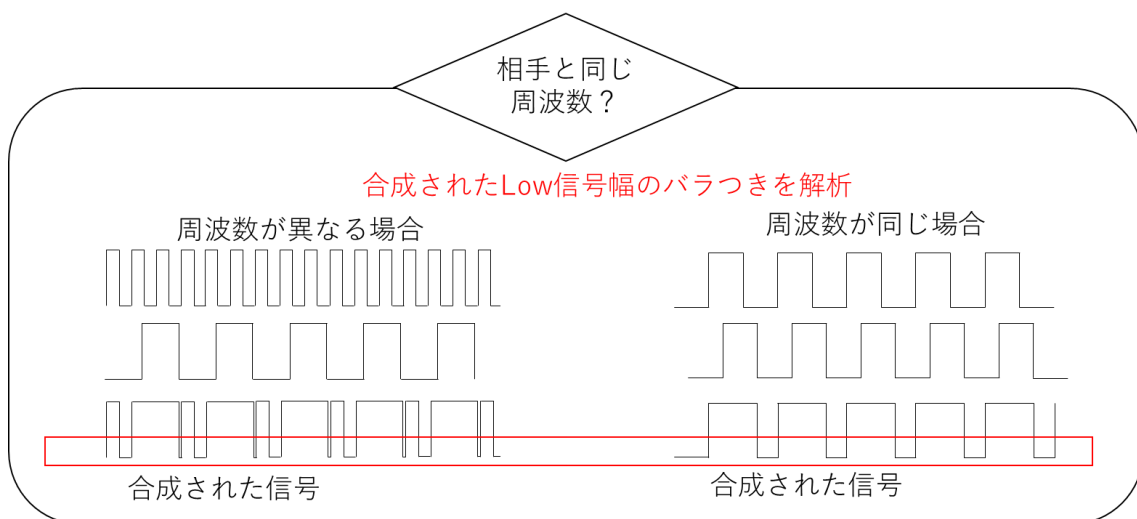


図 5.4 周波数の一致判定の概要

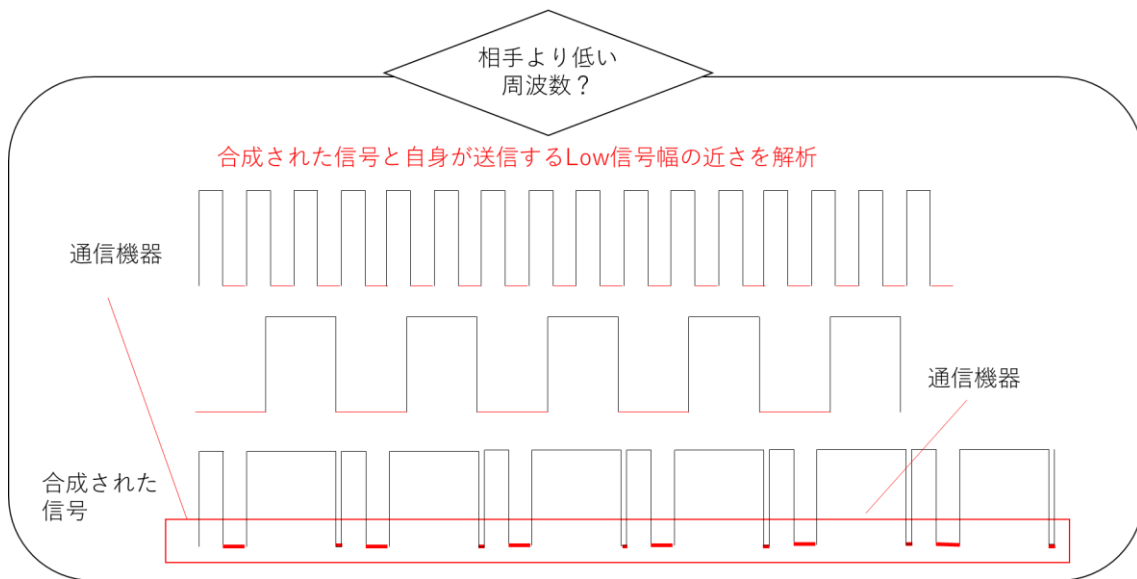


図 5.5 周波数の高低判定の概要

5.2 検証環境

手法の性能評価を行うために実機を用いて実装を行った。実装内容をハードウェアとソフトウェアの二つに分けて説明する。ハードウェアの説明では、接続環境、実機、周波数を調整するために利用した実機の設定の三つを取り扱う。

通信機器同士の接続環境を図 5.6 に示す。図 5.6 中の T と R は電気信号の送信と受信を示し、左右の T と R の処理を通信機器に該当する各実機が担当する。T に接続された矢印のような印は電気信号の逆流を防ぐ電子部品であるダイオードを示している。接続相手から送信される電気信号が自身の T に流れることを防ぐために、ダイオードを配置している。ダイオードは製品名 1N4007 を使用した。ダイオードだけでは合成された電気信号が安定しないため、安定させるために T と R の結合部位のように、抵抗を配線し、抵抗の配線先に回路動作の基準となる電圧となる GND を選択する。抵抗は 10 キロオームのものを使用した。

実機を使った接続では T と R と GND の三つの配線を各実機に組んでいるが、接続相手との接続本数は単線である。回路図 (図 5.6 参照) と実機の接続例 (図 5.7 参照) から機器は、T と R と GND の三本接続することになる。三本の接続が実機で必要になるが、接続相手と接続する導線の本数は一本であるため、単線下のハンドシェイクとして成立する。T と R と GND の三本の接続は接続相手に影響されず、実機自身で補完が可能である。

実機には電子回路の制御を学習するために開発された電子機械である Arduino[61][62]を利用し、図 5.7 のように接続した。図 5.7 では、図 5.6 中の T を Arduino 中のピン番号 10, R をピン番号 2, 抵抗を GND に配線した。利用した Arduino には、電気信号を介して部品に命令を送り、電気信号の処理の実行を促す役割を持つマイクロコントローラ（製品名 ATmega328P）が組み込まれている。

Arduino のマイクロコントローラの演算や実行状態の保持に用いる記憶素子であるレジスタを利用して、接続相手に送信するデジタル信号の周波数の変更を行う。一部のレジスタは値を変更することで、電源入力開始時に信号処理の変更が可能になる。接続相手に送信するデジタル信号の形式を設定するために、レジスタ TCCR1A を 0b00100001, レジスタ TCCR1B を 0b00010010 とした。加えて、送信する信号の周波数を変更するために、レジスタ OCR1A と OCR1B の値を変更する。

ハードウェアの説明では、接続環境、実機、周波数を調整するために利用した設定の三つを取り扱った。接続環境では、実機に送信と受信と GND の三つの接続を単線下で行う。実機には Arduino を利用し、演算処理を行うマイクロコントローラが ATmega328P のものを利用した。ATmega328P からクロック信号の形式と周波数を操作するために、TCCR1A, TCCR1B, OCR1A, OCR1B の 4 つのレジスタの値を変更した。

ソフトウェアの説明では、受信した Low 信号幅のサンプリング数、分岐処理で利用する平均や分散の計算式の詳細、分岐処理で利用する閾値の三つを取り扱う。解析のための下準備に受信した Low 信号幅のデータ数 200 を一時的に保存し昇順に再配置する。実機はクロック信号の送信と共に受信した Low 信号幅の解析を行う。解析を行う際、合成された Low 信号幅を特定数必要になり、特定数を 200 として一時的に保存する。保存する際の信号幅の解像度は、Arduino の処理速度を考慮して 1 マイクロ秒とする。保存した後でデータを昇順に再配置する。実装では昇順に再配置するためにバブルソート [63][64]を用いた。

周波数の一致判定では図 5.8 に示すように、下準備で用意した合成された信号の Low 信号幅の分散を計算する。下準備のデータの再取得と分散の計算を 10 回行い、平均値を求める。平均値の値が 1000 より小さい場合は接続相手と送信する波形の周波数が一致とし、大きい場合は不一致と判定する。

周波数の高低判定では、図 5.9 に示すように、下準備したデータを昇順して、中央区間である 50 から 149 の合成された Low 信号幅を対象に、自身の信号幅を減算した結果の平均値を求め、80 を超えれば自身の送信する信号の周波数は接続相手より低いと見なす。下準備のデータの再取得から平均値の計算を 10 回行い、10 回の計算結果の平均値を計算する。実機は下準備のデータの他に、自身が送信した信号の情報を持っている。自身の信号の情報から Low 信号幅を求める。Low 信号幅と下準備のデータの減算から自身の Low 信号幅の近さを求める。電気ノイズを考慮して、近さの平均値を 10 回求め、さらに求めた値の平均値を計算する。この値が 80 を超えた時、合成された信号の中に自身の Low 信号幅が無いと判断し、接続相手よりも送信する信号の周波数が低いと判定する。80 以下の場合、接続相手よりも送信する信号の周波数が高いと判定する。

周波数の一致判定と高低判定を上記のように行い、送信する信号の周波数の調整を行う。この工程を接続相手と同じ周波数になるまで返す。送信する信号の周波数についての詳細は次節の評価で説明する。

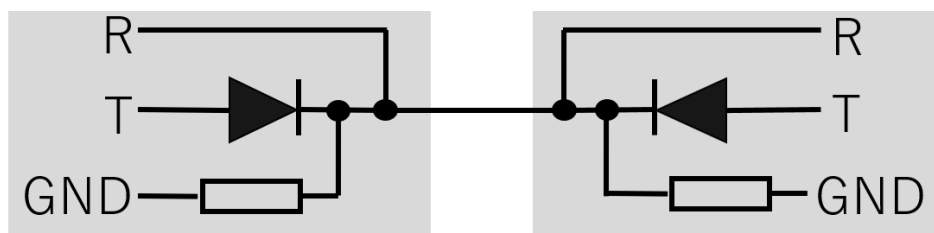


図 5.6 通信機器間の接続回路

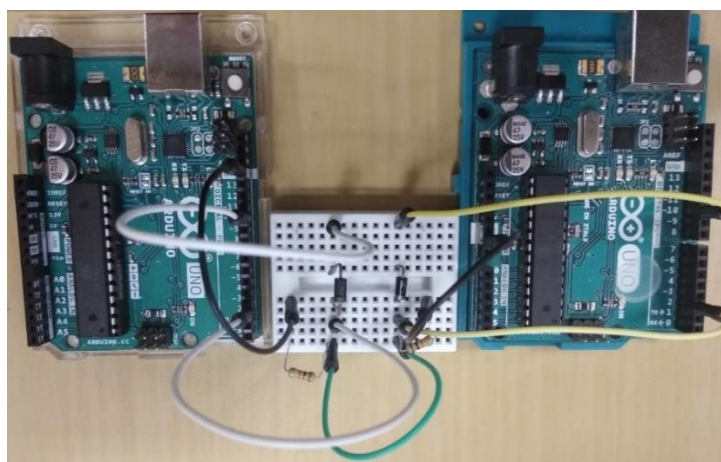


図 5.7 実機による配線

- L_i 合成された信号のLow信号幅の昇順(0 から 199)

$$a = \frac{1}{200} \sum_{i=0}^{199} L_i$$

$$b = \frac{1}{200} \sum_{i=0}^{199} (L_i - a)^2$$

- B_i b のデータセット (0 から 9)

$$u = \frac{1}{10} \sum_{i=0}^9 B_i$$

閾値
1000未満なら周波数が
一致と判定

図 5.8 周波数の一致判定の解析式と閾値

- L_i 合成された信号のLow信号幅の昇順(0 から 199)
- P 自身の送信するLow信号幅

$$s = \frac{1}{100} \sum_{i=0}^{149} \sqrt{(L_i - P)^2}$$

- S_i s のデータセット (0から9)

$$g = \frac{1}{10} \sum_{i=0}^9 S_i$$

閾値
80を超えている時、
周波数が低いと判定

図 5.9 周波数の高低判定の解析式と閾値

5.3 検証

デジタル信号におけるハンドシェイクの動作検証を実機により実施した。まず現実環境においてデジタル信号の合成が理論と一致するのかを調べ、次に本手法解析により相互通信可能な通信周波数が特定可能であるのかを調べた。

5.3.1 検証1：実機による電気通信の挙動確認

まず始めに、デジタル信号の合成波を確認するためにロジックアナライザを用いる。ロジックアナライザは、回路の電気信号を可視化するものであり、電気信号を特定の通信規格に変換した上で表示することが可能になる。ロジックアナライザを図 5.10 に示すように、各実機の送信部と単線部に接続し、電気信号が提案で想定している特定の周波数を持つクロック信号として機能しているか確認する。ロジックアナライザは、基準となる電位と測定したい配線箇所をロジックアナライザの指定箇所接続することで、電気信号を可視化する。基準となる電位を実機の持つ GND に配線する。測定したい配線箇所は各実機の送信する部位、この部位は図 5.10 のダイオードと T の間に該当する。実機は二つあるため、配線箇所は二つになる。加えて、合成された電気信号の振る舞いを確認するために、実機と接続する導線部位にロジックアナライザに理論値と電圧の値を観測するために二つ配線する。ロジックアナライザは USB ロジックアナライザ (Saleae 社 SAL-00109 Logic 4 Black) を用いて評価した。

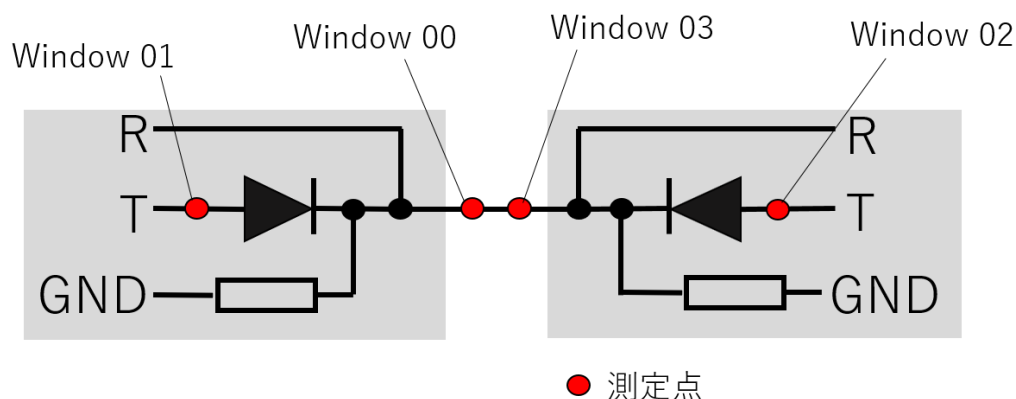


図 5.10 ロジックアナライザを用いた電気信号の性能評価

5.3.2 検証1の結果

合成波の確認結果を図 5.11 に示す。図 5.11 に示されている Window00-03 (Window ラベル)は図 5.10 の Window ラベルに対応している。図 5.11 は、ロジックアナライザから取得した電気信号を可視化した結果である。Windows 00 は合成された信号の理論値、Window 01 は、高い周波数を出力している実機から得られた信号の理論値を示し、Window 02 は低い周波数を送信している実機から得られた信号の理論値である。Window 03 は、合成された信号の電圧の値を示す。電気信号を Low から High, High から Low, に変更する間、短時間であるが遅延が生じる。この遅延を無視して、電気信号を Low と High で可視化したものが信号の理論値である。

図 5.11 の Window 01 から Window 02 までの結果から、各実機はデューティ比 50%の信号を出力しているのが分かる。加えて、Window00 の結果から合成波は OR 回路出力のように合成されていることが分かる。Window 03 における電圧の変化からも理論値だけでなく、実機が実際に出力している電圧も合成されていることが分かる。上記理由により、実機は手法で想定したクロック信号を出力し、単線下で合成されていると言える。



図 5.11 ロジックアナライザによる電気信号の表示結果

5.3.3 検証2：実機環境による解析手法の機能確認

検証1において合成信号が、Low と Low の組み合わせの時に Low となり、それ以外の組み合わせの時は High となっていた為、理論通りの挙動を示した。理論通りに得られた合成信号を元にして本手法で提案した解析手法を実証的に評価した。実機での本システムの手順が円滑に動作するのを確認する。そのた

めに、本検証では出力可能な波形を限定した。それぞれの周波数が倍数にならない周波数解析が容易である素数を送信信号とし、それぞれ 100 番目、200 番目、300 番目、400 番目、500 番目の素数を選んだ。五つの周波数はそれぞれ、541 Hz、1223 Hz、1987 Hz、2741 Hz、3571 Hz に該当する。実機による周波数解析は合成波のノイズ等の外的要因により実現が難しい。今回の評価では各実機が独立してクロック信号の周波数を解析した上で周波数一致まで到達できるかに焦点を置いたため、検証に用いた周波数を限定した。

それぞれの機器が最初に出力する信号の周波数は、五つの指定した周波数の中で図 5.12 のように最小値の周波数（541 Hz）と最大値の周波数（3571 Hz）をそれぞれ実機に割り振った。検証環境において周波数の一致判定と高低判定を行い、接続相手と同じ周波数になるまで処理を継続させる。処理の推移と解析結果の推移から、解析により接続相手と同じ周波数に調整可能か検証した。

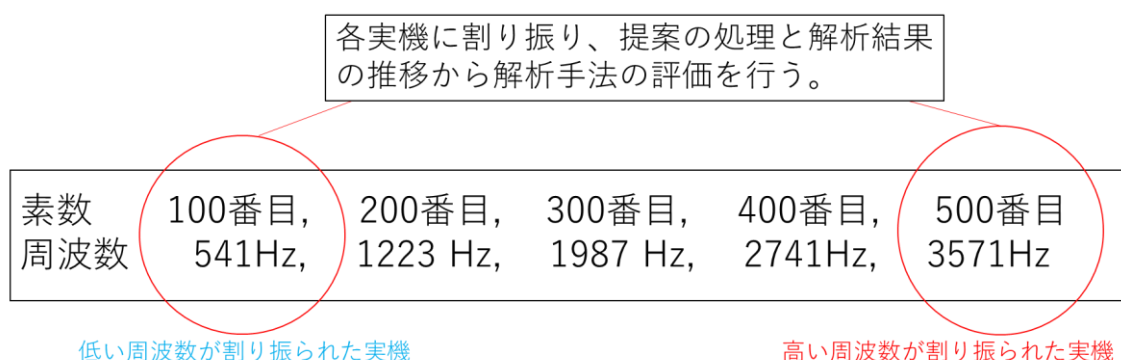


図 5.12 解析の性能評価

5.3.4 検証 2 の結果

実証に用いた機器 Arduino は周波数の更新に時間がかかるため、周波数の更新後に休止を挟んでいる。本結果の図に示される、処理の点が四角のグラフは、最初に高い周波数が割り当てられた実機の推移であり、点が丸のグラフは、低い周波数が割り振られた実機を示す。

接続相手と周波数が一致するまでの処理の推移を図 5.13 に示す。縦軸は、送信するクロック信号の周波数を、横軸は 1 ミリ秒単位で示している。この図から、高い周波数が割り振られた実機は送信する信号の周波数を変えず、低い周

波数が割り振られた実機は送信する周波数を相手と同じになるまで更新し続けている。加えて、各実機が送信する信号の周波数が同じ 3571Hz になった段階で処理を終了している。以上の点から各実機共に手法通りに動作しているのが分かる。図 5.13 の最後の更新点から、高い周波数が割り振られた実機は 14199ms、低い周波数が割り当てられた実機は 14923ms に処理が終了している。

周波数の一致判定の推移を図 5.14 に示す。縦軸は周波数一致判定で指標として扱う分散の値であり、横軸は経過時間である。この図から各実機の最終点とその他において、分散の値が著しく異なることが分かる。最終点において周波数が一致したことからも、本判定が機能し、それぞれが発信する周波数信号が一致しない場合と一致する場合において明確に判定可能であることが分かる。加えて、各実機が同時に処理を開始しているのにも関わらず、グラフ上の青い点が赤い点よりも後に処理が終了している。青い点に該当する実機の振る舞いは初回に送信する周波数の値が小さいため、送信する周波数の値を更新している。また、送信周波数の値を更新する度に休止し、前回の解析結果を元に判定処理を行っているため、赤い点の実機の振る舞いよりも処理が遅れている。

周波数高低判定の推移を図 5.15 に示す。縦軸は、周波数一致判定で指標として扱う受信した合成信号の Low 出力時間と自身の送信信号の Low 出力時間の差の平均値であり、横軸は経過時間である。この図から初回送信の周波数が低い実機は縦軸の値が大きく、周波数が高い実機は Low 時間に多く重なるため自身と合成波の差が少なり、縦軸の値が少ない。しかし、初回の処理から縦軸の値が段々数値が増えている理由は、相手の周波数が近づくことで位相などの関係により重なりが減るためであると考えられる。加えて、送信周波数が低周波の実機、高周波の実機で縦軸の傾向が逆であるため、ある境界を元に周波数の高低判定が可能であると考えられる。

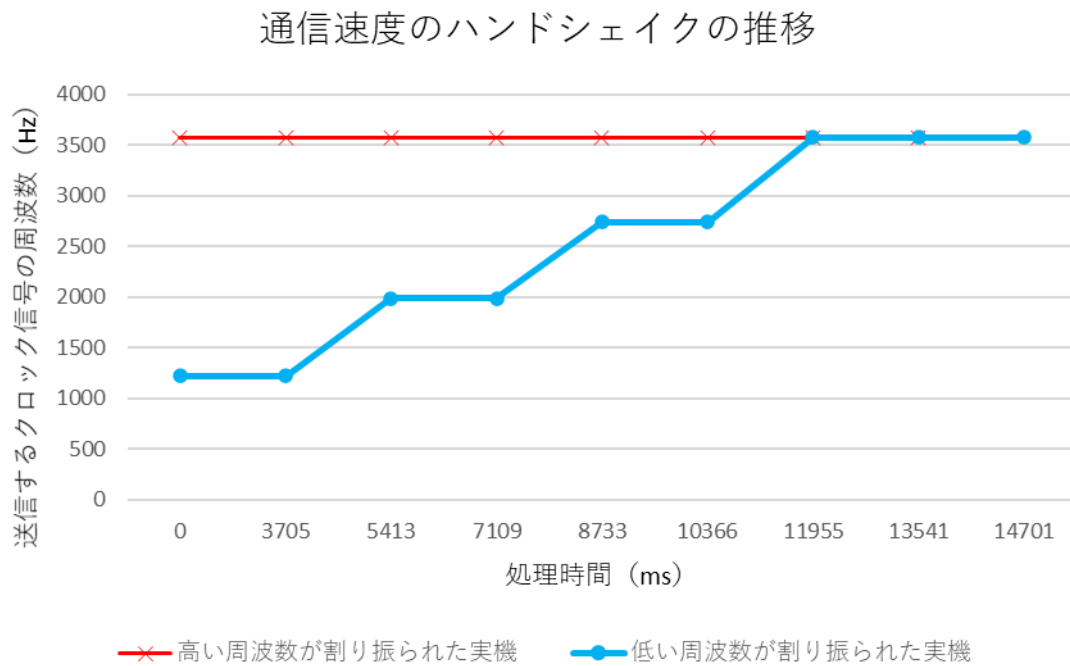


図 5.13 通信速度のハンドシェイクの推移

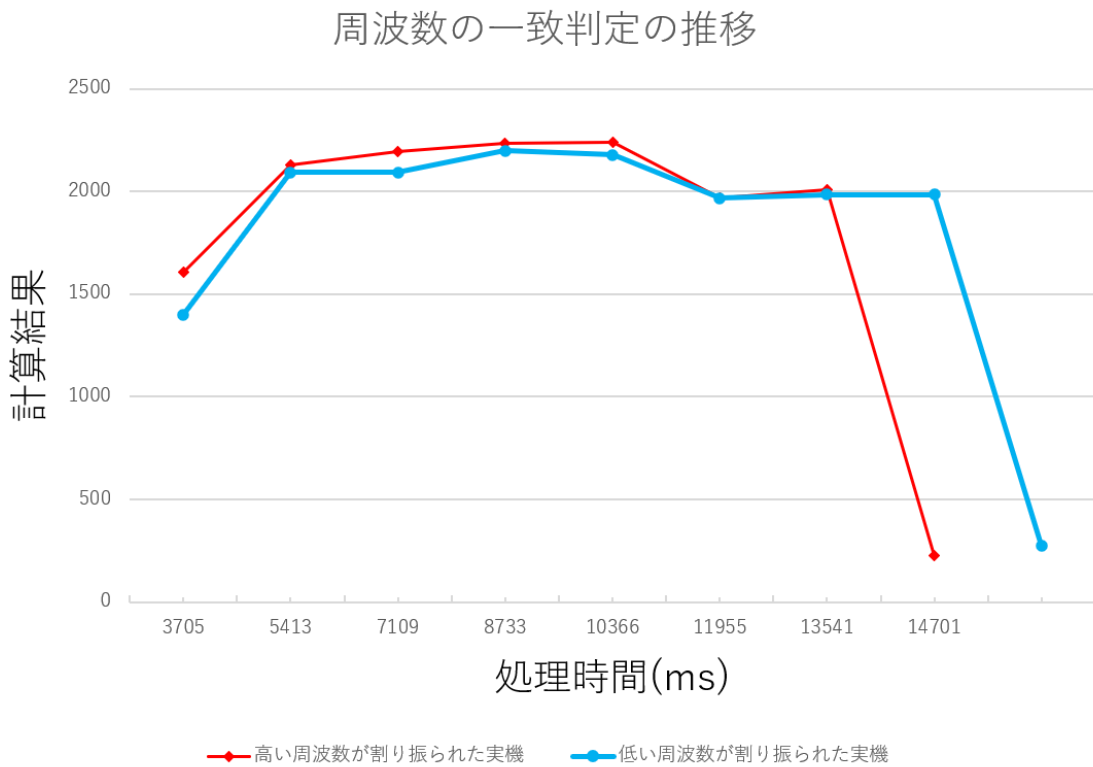


図 5.14 周波数の一致判定の推移. 計算結果は図 5.8 中の u の値を示す.

周波数の高低判定の推移

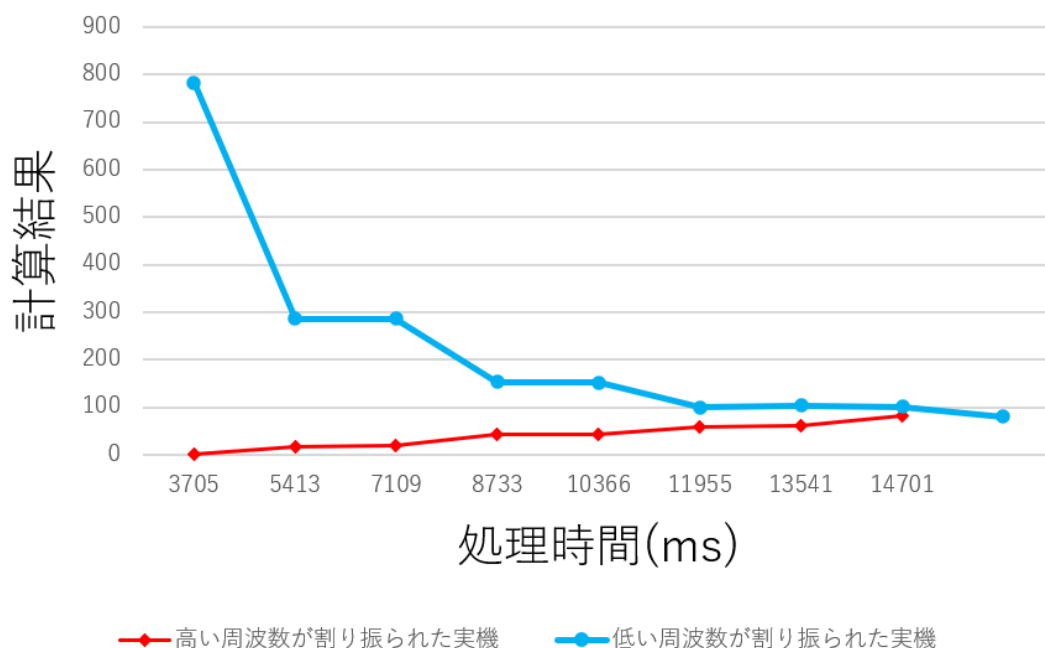


図 5.15 周波数の高低判定の推移. 計算結果は図 5.9 中の g の値を示す.

5.3.5 検証 3 : 判定で用いた閾値の検証

検証 2 では閾値を固定して機能確認に注目した. 周波数の組み合わせは検証環境で利用したもの以外にも想定されるため, 閾値を固定しない場合の挙動を確認し, 一致判定と高低判定の閾値について議論する.

一致判定では不一致時と一致時の境界が明確に認められるが, 検証 2 の高低判定では 80 という閾値が他の周波数比較において成立するかどうか分からないため, 本検証を実施した. 再現性を求めるため, 実機によるノイズがない理想環境下であるシミュレーションを用いて高低判定の検証を行った. 高低判定の検証のために, シミュレーションでは, 本提案手法の一致判定による解析処理終了を外した状態で経過を確認する. シミュレーションで用いたサンプリング数を 1 マイクロ秒間隔とし, 1 秒間分 (1000000 点) としてデジタル信号の解析を行った. また, 初回に送信する周波数や更新する周波数の値は, 検証 2 で利用したものと同等の条件で行い, 各機器の送信する周波数の位相を 0 とした.

高低判定では受信した合成信号の Low 出力時間と自身の送信信号の Low 出

力時間の差の平均を求めていたが、この平均の値では解析の尺度を一般化できないため、この平均の値に自身が送信中の Low 出力時間を乗算することで比重を求めた。この比重の値が 50%を超えている場合、送信する周波数を上げるというルールのもとシミュレーションを行った。

5.3.6 検証 3 の結果と考察

検証 3 の結果を図 5.16、図 5.17、図 5.18 に示す。図 5.16 は相手に送信した周波数の値の推移を示す。縦軸が送信する周波数の値、横軸が解析のステップ数を示している。尚、シミュレーションであるため実機のように送信する周波数を切り替える度に解析を休止する工程をとっていないため、初回 541Hz 送信機器と初回 3571Hz 送信機器の解析のステップに遅延は生じていない。図 5.16 から初回 541Hz 送信機器が送信する周波数を上げ続け、3571Hz で送信する周波数を止めている。一方、初回 3571Hz 送信機器は周波数を上げずに待ちの状態が続いていることから、通信周波数が決定できていると言える。

図 5.17 は一致判定検証結果を示し、縦軸が合成波の分散の値、横軸が解析のステップ数となる。図 5.17 から送信する周波数が異なるステップ 1 から 4 のような場合、分散が高くなり、送信する周波数が一致するステップ 5 において 0 に近い値を示している。以上の点から一致判定時に閾値を固定しなくても判定可能と言える。

図 5.18 は高低判定の解析の推移を示し、縦軸が高低判定の比重の値、横軸が解析のステップ数となる。図 5.18 から、初回 541Hz 送信機器は横軸の解析のステップ 4 まで縦軸の値が 50%以上を示し、ステップ 5 で 0%に収束している。対して、初回 3571Hz 送信機器は 50%未満の値を常に示している。以上の点から閾値を固定せずに高低判定可能であり、50%を超える機器が送信する周波数を上げるというルールを採用することで周波数の一致まで収束することが分かる。

送信する周波数が接続相手と近づく毎に 50%に近づく現象は、送信する周波数が近づく毎に合成波の Low 信号の中に相手の信号が割り込む確率が高くなることで 50%になると考えられる。加えて、周波数が一致した時は、自身の Low 信号幅と合成波の Low 信号幅は同じになるため、0%になると考えられる。

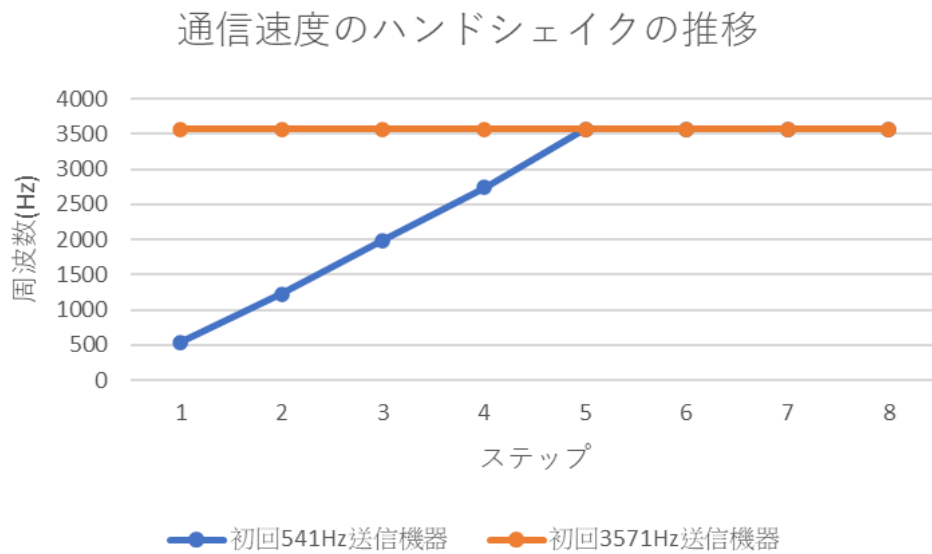


図 5.16 シミュレーションにおける通信速度のハンドシェイクの推移

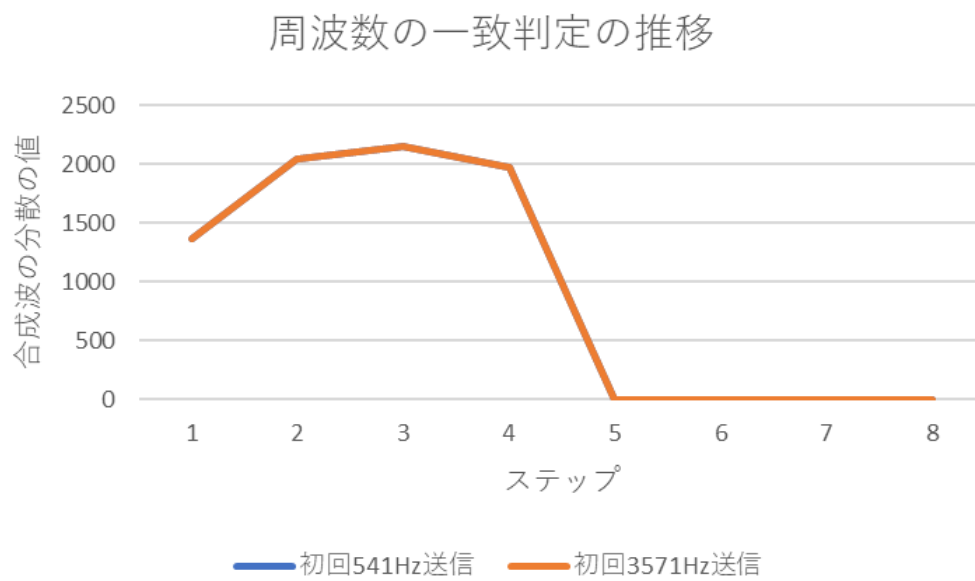


図 5.17 シミュレーションにおける周波数の一致判定の推移

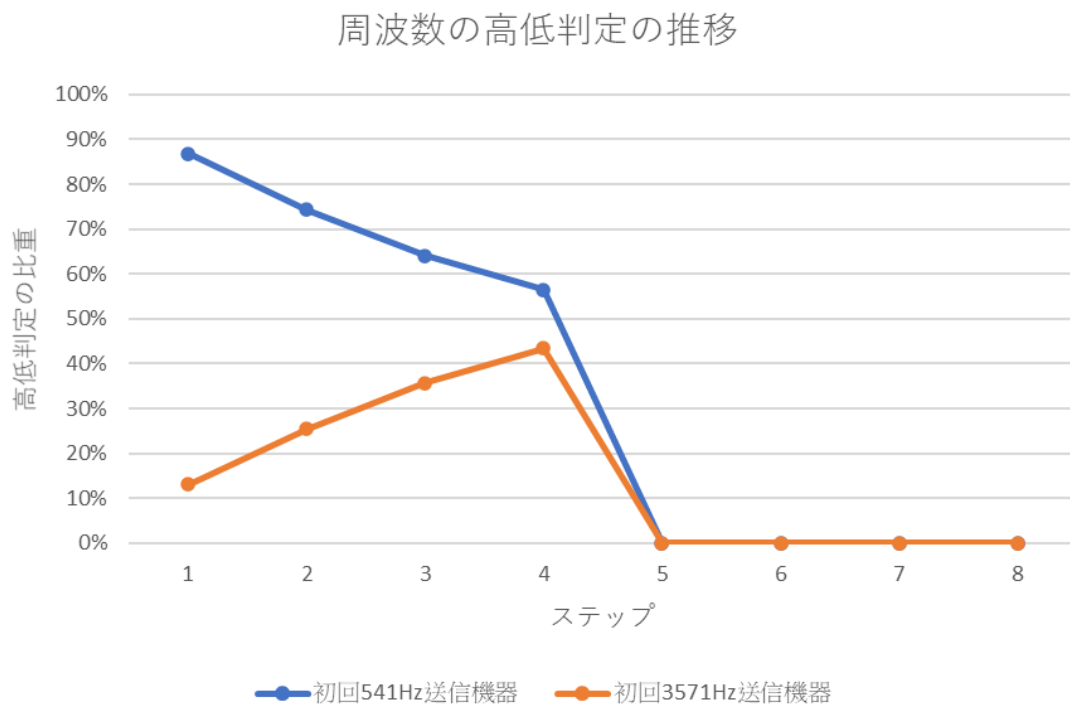


図 5.18 シミュレーションにおける周波数の高低判定の推移

5.3.7 検証まとめ

検証 1 の結果により OR 論理式のように合成される信号の実機動作を示し、検証 2 の結果により処理の推移から実装で説明をした数式を用いて、周波数の一致まで各実機が動作することを示した。加えて、検証 3 の結果によりシミュレーション下で、周波数の一致判定は波形の一致時と不一致時で解析結果が明確に異なるため判定可能であり、高低判定は閾値の有無に関係せず比重を用いることで判定可能であることを示した。以上三点の検証結果により、提案手法のデジタル信号を利用した単線下における通信速度のハンドシェイクの実現性は高いと評価できる。

第6章 議論

6.1 ハンドシェイクにおけるアナログとデジタルの振る舞い

本研究では、通信速度を接続機器同士が事前に決められた速度など無しに決定する手法を提案している。信号にはアナログとデジタルと存在し、それぞれにおいて手法を提案した。

アナログ信号を利用した提案は、IQ復調による周波数の解析を用いて、接続機器同士で通信可能な周波数を決定し、通信速度を決定することである。実装したシミュレーションを用いて、波形の一致判定精度と提案手法の収束挙動、の二つの検証を行った。

波形の一致判定精度の検証では、12Hz・4Hz、8Hz・4Hz のような信号の特性が近い組み合わせや、12Hz・11Hz のように周波数の近い組み合わせにおいて、同じ周波数ではないと認識できる結果になった。特に一致度合いがほぼ0%であったので誤認はないと考えらる。一方、同一周波数の信号は一致率が100%に近いと認識され、IQ復調を用いた波形の一致判定は実用可能なものとする。

提案手法の収束挙動の検証では、送信する周波数が同じ組み合わせと異なる組み合わせの二つの検証を行った。送信する周波数が同じ組み合わせでは12Hzを選択し、各デバイスが最初の解析において100%に近い一致率を示しているため、挙動が収束している。異なる組み合わせの検証では、12Hz・8Hzの結果から高周波側が低周波側よりも先に解析が終了し、一方の解析終了するまで待機していることが確認できた。そして、4Hz・12Hzの検証結果から、低周波側は先に解析が終了し高周波側が解析終了するまで待機していた。提案手法の収束挙動の検証結果から周波数が、同じ場合と異なる場合においても想定された挙動を示した。これによりアナログの提案はシミュレーションで機能することが確認できた。

アナログ信号を用いた手法で問題となるのは、アナログ信号の出力である。アナログ信号は出力が難しく、ファンクションジェネレータのような特殊な機器が存在しなければならず、特定の決められた周波数を持つ連続した信号を自由に出すことは難しい。加えて、ノイズの影響を受けやすく、周波数が異なる複数のアナログ信号を扱う場合制御によるノイズも発生し、ノイズ除去には

複雑な機構が必要になる。例えば、複数の周波数を持つアナログ信号を出力可能な複数の電子部品を組み込んだ、大きさがミリメートルやマイクロメートル単位の微小な電気機械システムを示す MEMS[52][53]が発展した場合、構造が簡素化され、大きさも小さくなると予想されるので、この問題は解決されると思われる。しかし、デジタル機器における通信はデジタル信号である矩形波が利用されるため、自由な波形を出力する必要がない。これらより実在するデジタル機器のデジタル通信を想定したデジタル手法のハンドシェイクを提案した。ただし、アナログ信号という可変な信号処理においても本提案のハンドシェイクがシミュレーション上ではあるが機能することを証明できたことは重要である。

デジタル信号を利用した提案は、合成された Low 信号幅を解析することで、接続相手と同じ周波数に調整するものである。デジタル信号は Low と High の二つの電気信号から成立する。各通信機器が単線下で接続相手にデジタル信号を送ることで、電気信号は合成される。合成されたデジタル信号から接続相手の電気信号を解析するために、Low 信号幅を用いて周波数の一致判定、周波数の高低判定の二つの判定を行った。二つの判定を用いた通信周波数の確立を検証するため、実機を用いて配線を行い、閾値を決めて分岐処理を行った。実機の出力する周波数の性能評価と共に、出力する周波数を予め決めた環境下で解析の性能評価を行った。

提案の実現性を評価するために、提案の根幹である接続相手の周波数の二つの解析手法、周波数の一致判定と周波数高低判定の結果の推移を示した。周波数の一致判定では、接続相手と異なる周波数と同じ場合で違いが明確であった。異なる周波数の場合、解析結果を示す Low 信号幅のバラつきが大きくなる一方、周波数と同じ場合、バラつきが小さくなった。周波数の高低判定では、各通信機器が想定通りの解析結果を示した。低い周波数を割り振った実機の解析結果は、徐々に接続相手と同じ周波数になるため、自身の Low 信号と合成された Low 信号幅が近くなり、解析結果の数値が低下する。一方、高い周波数を割り振った通信機器は、接続相手が周波数をあげるにつれて合成された信号に接続相手の信号の介入する頻度が上がりノイズが増えるため、自身の Low 信号幅と合成された信号の Low 信号幅の近さが大きくなる。低い周波数を割り振った実機と高い周波数を割り振った実機の二つの異なる挙動から高低判定も解析可能と言える。周波数の一致判定と周波数の高低判定は、以上の結果から解析可能

と言える。二つの解析手法の解析可能であるため、デジタル信号を利用した提案の実現性は高いと評価できる。

アナログ信号を用いた手法では、ノイズが発生せず、周波数が異なる複数のアナログ信号を扱える理想環境を想定したシミュレーション内で検証を行った。対して、デジタル信号を用いた手法は、信号の合成と解析のための配線環境、実機を用いて現実に存在する電気信号を送信し、解析を行った。デジタル信号を用いた手法は、電気ノイズや機器性能等の問題が発生することが想定される検証環境下で、実機を使って通信周波数を決定できた点が重要であると考えられる。

実機はクロック信号を送信する処理以外にも、受信処理、受信した信号解析等、複数の処理を行っている。複数の処理を同時に行うことで負荷がかかり、信号を切り替えるスイッチ等に影響を与えてしまうため、実機の性能の違いにより送信する周波数の位相のずれが発生し、信号解析結果に影響を与えると考えられる。検証3におけるデジタル信号処理のシミュレーション結果からもうかがえる。以上の点から実機にかかる負荷を考慮した上で実用化を考える必要がある。

6.2 今後の課題

本研究の提案で重要な点は、接続相手と自身の間で「ピン配置」「通信優劣性」「初期通信速度」が事前に未決定な状態で、通信速度として用いる通信周波数を確定可能かどうかである。通信周波数の決定の実現性に焦点を置いているため、通信周波数決定までの所要時間の考慮をしていない。ただし、本提案は、波形の探索手法や解析方法等、機能毎に独立可能であるため各機能を更新することで通信周波数決定までの所要時間の短縮は可能と考える。提案したシステムは、それぞれ機能が独立しており、一致判定や高低判定など、新たに改善したアルゴリズムに置き換えることで、時間や一致精度問題を改善できる。本研究では接続機器同士が情報交換できる環境にない状態から、相手から送られてくる周波数信号のみを頼りに、通信周波数決定まで行えるのかのモデル検証である。検証結果から相互に情報をやり取りすることなく確立できたことにより、本手法は有効であると考えられる。

本提案で取り上げている電気信号の通信周波数は物理層の規格の一部であるため、物理層全ての規格決めに網羅しているわけではない。通信開始時に相手

の伝えてくる信号の速さを認識できなければ正しく通信が成立しないため、本提案では相手の伝えてくる信号の速さに該当する通信周波数の決定に焦点を置き、実現可能であることを示した。通信周波数の決定が実現可能であることから、通信周波数以外のデータ長やピン配置等の物理層の規格決めも本提案手法を応用することで実現可能であると考え、物理層の規格決めが可能であれば、本手法をさらに応用することで、物理層よりも上位層の規格決めも全て相互依存無しで自動決定可能であると考え、

6.3 提案手法の発展性

6.3.1 断線時に通信継続可能な規格としての利用

接触不良や断線等により接続状況は常に安定するとは限らない。通信機器同士の有線接続を想定した場合、外部の振動や接続時の力加減等の影響で導線同士の接続が不安定な状態である接触不良や接触不良よりも接続が悪化し、導線同士の接続が完全に切れた状態である断線等が考えられる。接触不良や断線により、本来導線を経由して送られてくるはずの電気信号が不安定になる、または送ることができない状態が発生する。この状態では、電気信号が意図した形式で接続相手に届かないため、通信が成立しない。

提案を応用することで、図 6.1 に示すように、全ての導線の接続が切れな限り通信の自動復旧が可能である。提案は、接続開始時に通信規格を規定する機能を持つ。この機能を通信機器が通信の不成立を検知した場合に、接続開始時と同様の工程を経ることで、断線されていない導線同士の接続から通信規格の再規定が可能になる。図 6.1 に通信規格の再規定の例を示す。図 6.1 の左側は、二本の導線を用いて通信を行っている。右側では、断線時に通信不良を検知し、断線箇所を無視して一本の導線接続で通信を行う様子を示している。断線時の通信規格の再規定だけでなく、接触不良に対して、回してもよい電気信号の規格の取捨選択等の柔軟な対応が、提案を応用することで可能になる。

加えて、地震[65][66]や噴火[67][68]と言った災害等で配線状態が悪化することが想定される。提案を応用することで通信不成立時に通信規格の再規定が可能となる。一度は通信の不成立を許容するため、完全な通信の継続を保証するものではないが、再規定した通信規格により復旧されるまでの通信として活

用できると考える。導線接続が一本でも残っていれば、通信の復旧が可能になるため、提案を応用することで災害時の通信にも活用可能と考える。

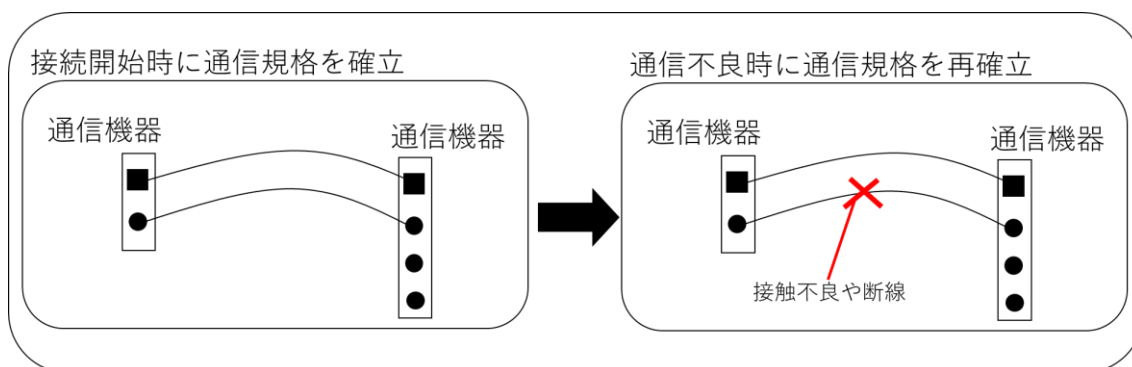


図 6.1 接続相手の変化に対応する例

6.3.2 電子部品の配線条件の緩和と配線による通信規格の自動化

電子部品は、電気信号を受け取り、別の電気信号に加工して送信する部品として機能する。受け取りと加工した電気信号の送信を行うために、接続部位毎に電気信号の規格が規定される。電気信号の規格は、受け取りや送信だけでなく、電気信号の速度や電圧等と言った詳細な情報も含まれる。言い換えれば、電子部品は、特定の電気信号の規格を持つ接続部位で構成された部品といえる。

電子部品の接続部位に流れる電気信号の規格が厳密であり、無作為な場所に接続しても通信が成立しないため、電子部品の配線の組み合わせは限定される。特定の電気信号の規格同士の配線のみでしか通信は実現できない。

電子部品から電子機械を作る際、電子部品間の電気通信を実現するために、プリント配線板[69][70]と呼ばれる板の上に電子部品を接着する。複数の電子部品をプリント回路基板に配置、接続して、何らかの外装で覆ったものが電子機械となる。電子部品間の通信には、電子部品が持つ特定のピン同士の接続が必要となるため、配線時の自由度は低く面積が大きくなり、小型のプリント配線板の設計が困難になる。電子部品間で電気通信を行う配線箇所は限定されるため、プリント回路板の配線面積が大きくなる問題が生じる。

図 6.2 の左側に従来の配線の実例を示す。図 6.2 は製品名 Attiny841 同士の通信を想定した基板設計の例である。電子部品同士の通信を想定しているため、電源周りの配線を省略している。図 6.2 の左側は、I2C[71][72]と呼ばれる通信

規格を利用する際の配線例である。I2C のように特定の規格を利用する際、SCL は SCL 同士で配線、SDA は SDA 同士で配線と言ったように同じ役割を持つ接続部位同士を接続する必要がある。この制限により基板上の配線面積が大きくなる。

配線の面積を緩和するために、接続部位毎に独自実装する方法も存在する。各電子部品の特定の接続部位に、特定の電気信号からデータの定義を行い、通信が成立するように電子部品に命令することで、配線面積の緩和が可能である。配線面積の緩和が可能であるが、接続する相手やプリント回路板の変化時に、毎回電気信号の詳細設定を行い、命令を書き込むことになる。設計と命令を行うのは開発者であるため、生産的ではない。

提案の応用により、配線面積と電気信号の詳細設計の問題緩和が可能と考える。図 6.2 の右側に提案の応用を示す。今後提案の応用により、通信に必要な要素全ての確立が可能と考える。接続開始時に通信に必要な要素を全て確立するため、接続部位の配線制約が緩和可能となり、開発者が設計せずに配線時の面積を抑えることが可能となる。加えて、接続開始時に通信規格を、通信機器同士で自動的に確立するため、電気信号の詳細設計の必要がなくなる、または緩和が可能と考える。

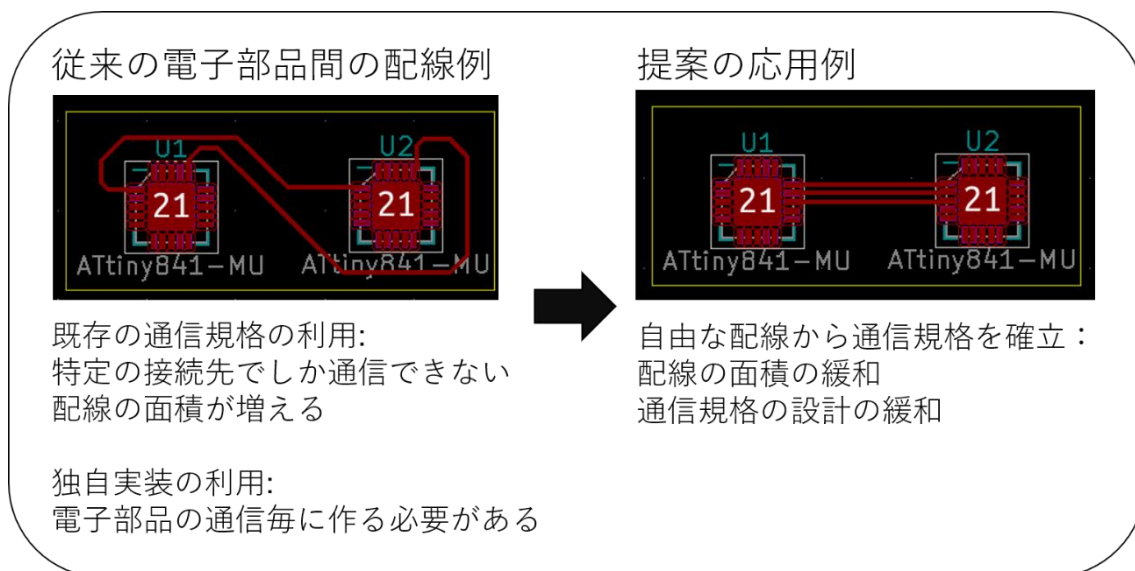


図 6.2 従来の配線例と提案の応用例との比較

6.3.3 デジタルとアナログの識別によるスイッチング

これまでアナログ信号を利用した手法とデジタル信号を利用した手法の考察を行った。これら二つの手法を単独として捉えるのではなく、組み合わせることで、図 6.3 に示すアナログ信号とデジタル信号の二つの信号に対応可能なスイッチングが実現可能であると考えられる。このスイッチングでは、接続相手から送信されてくる電気信号がアナログ信号かデジタル信号かの判断を行う。判断結果から、二つの提案のどちらかに分岐する。分岐することにより、アナログ信号とデジタル信号のどちらの電気信号にも対応可能となり、通信可能な通信機器同士の制約をより緩和可能と考える。

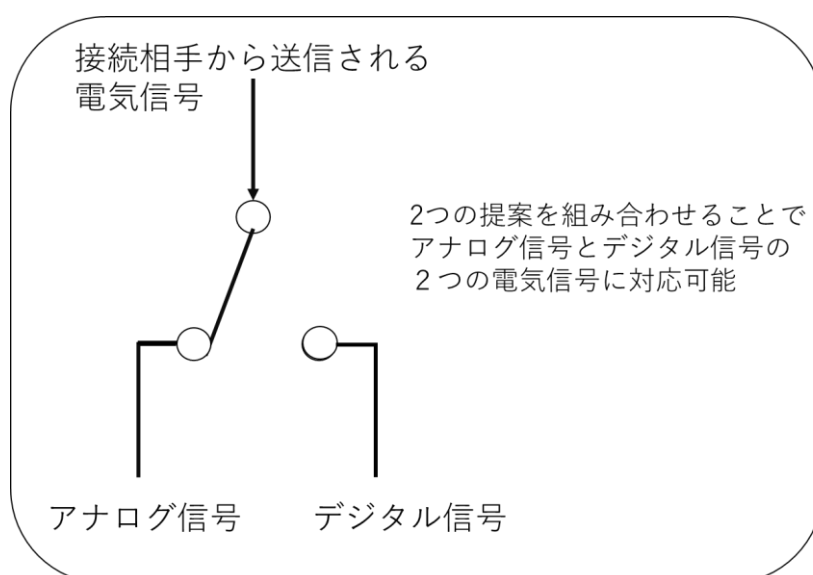


図 6.3 スイッチングの概念図

6.3.4 ユニバーサルコネクタ

特殊な用途を除く通信機器の利用者は、通信規格に拘らず、通信機器同士の通信を目的としている。利用者が通信機器に望むことは、接続相手との通信である。例えば、コンピュータとディスプレイの通信を考える。利用者は、コンピュータとディスプレイと接続した段階で、何らかの通信を行い意図した動作をすることを期待する。意図した通りの動作であれば、PC とディスプレイの接続規格が、DVI[73]や VGA[74]や HDMI[75]やその他であっても気に留めないと考える。一般的な通信機器の利用者にとって、通信という結果が重要であり、過

程は重要でない場合が多い。

しかし、技術の発達と様々な用途により、接続そのものが困難になり通信が益々難しくなる。加えて、電子機械は性能を重視したものや価格を重視したもの等が実現可能となり、種類が増加している。電子機械の種類が増加により、電子機械に望む用途が、安全性の重視や通信速度の重視等、多様化している。多様化に合わせて、通信規格の派生や更新を繰り返し、互換性の低下を招いている。通信規格の派生や更新だけでなく、多様化に合わせて新規で通信規格が作られることで、接続そのものが難しくなる問題が生じる。この問題は、今後も通信規格が派生や新規で開発され続けるため、時間の経過と共に増加し続けることが予想される。

提案を応用することで、導線を接続するだけで通信可能なユニバーサルコネクタが実現可能と考える。ユニバーサルコネクタの概要を図 6.4 に示す。接続相手に電気信号をやり取りするための導線が有線通信を行う通信機器に存在する。ユニバーサルコネクタは、有線で通信可能な通信機器の導線同士を接続することに主眼を置き、接続相手と物理的に接続することに特化した機構である。接続さえできれば、提案を応用することで、通信が可能となる。接続開始時に導線の電気信号の詳細を規定することで、接続相手の持つ導線に対して、何本でもどの導線でも接続が可能になる。接続本数の適合化により、単線による適合化を接続可能な導線数分だけ行い、通信に必要な要素を確立するため、導線の対象を選ばず、複線での接続が可能となる。

ユニバーサルコネクタは、今後新しく開発される通信機器の性能にも対応可能と考える。技術の発展により通信機器間の性能差は大きくなる。性能差は大きくなるが、本研究の目的は接続相手毎に接続相手の性能を考慮した上で通信規格を決定する仕組みの実現であるため、提案の応用であるユニバーサルコネクタは通信機器間の性能差が大きい場合でも対応可能と考える。

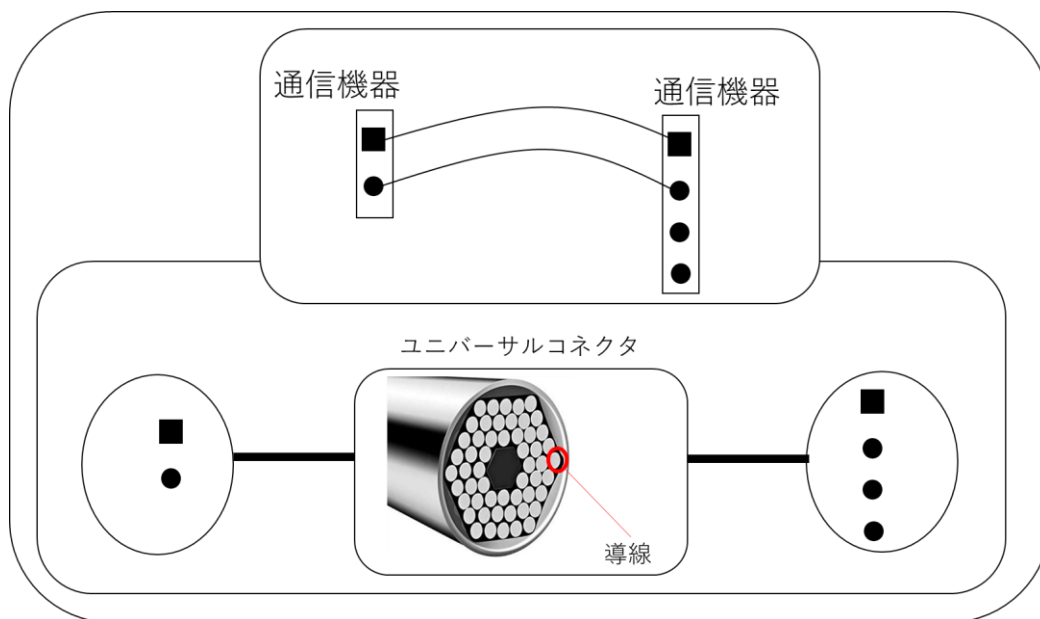


図 6.4 ユニバーサルコネクタの概要

7章 まとめ

IoT等の通信に関する概念ないしは枠組みが普及したことにより、通信の需要は高まり、通信規格は増加傾向にある。今後も通信規格が増加し続けた場合、通信規格の一致が困難となり、機器間の通信が難しくなる。この問題に対して、本研究テーマである接続相手を考慮した適合化通信は、接続相手が変わるたびに通信規格を機器間で取り決めることを目的としているため、通信規格不一致の問題が解決できる。そのため、本研究テーマは、通信需要の発展や通信規格の増加に伴い、今後重要になると考えられる。

接続相手を考慮した適合化通信を実現するために、本論文では通信規格を通信機能毎に階層構造に分けた OSI 参照モデルを参考にした。通信規格には、データの受け渡しだけでなく、受け取るデータの解釈方法や通信経路の確保等決めるべき内容の種類が多く存在する。複雑になった通信規格を通信機能で階層構造に分けたものが OSI 参照モデルである。このモデルでは、各階層の規格の一致が機器間の通信で必要になる。加えて、OSI 参照モデルは下層から上層にデータ処理が受け渡され、階層を飛び越えて通信が行えない、最下層である物理層を必ず通過するため、本研究は OSI 参照モデルの物理層に焦点を置いている。

OSI 参照モデルの物理層は電気信号の伝搬方式を取り決める層である。信号はアナログやデジタル形式で様々な信号表現により伝送できる。物理層は、そのような伝送形式の取り決めや、その形式を使用するコネクタ形状、ピン配置とその役割、通信確立前の接続相手に対する接続確認や通信方法の確認の仕方を取り決めている。物理層では、接続されている一方の機器が接続されている他方の機器から送られてきた信号を理解しているのかを判断できなければならない。そこで、送信確認や最低限 0, 1 の論理値の送信を判断するために電気信号の送信間隔を定める必要があり、通信を開始する前に通信周波数を決定する。既存にはコネクタにより事前に周波数が決まっている方法や、最低周波数が設定されている規格や、通信順序が事前に役割として決定していることで周波数決定を流動的に行えるようにする規格が存在する。しかしながら、多方面からの需要に対応する通信規格の増加により、それぞれの規格で定めた周波数決定手法が多岐にわたることで規格の特定が難しくなる。既存のコネクタによる制限も増加することで、管理が困難になる。また、同じコネクタ形状でも規格が

異なる場合があり、通信順序の関係を把握するか、事前に通信手段が確立されていないなければならない。それでは事前に通信規格と役割が確定していなければならず、今後も増加した規格へ対応するのが困難になる。そこで、送信順序が事前に役割として決めなくても同じ通信手段に則ることで、接続機器同士で自動的に通信可能な周波数を導き出す手段が必要である。

本研究では初期通信速度や送信順序や送受信のピン配置を決定していない状況で、接続機器同士で通信周波数を決定する手法を提案する。本提案では、シミュレーションによりアナログ信号による理想環境下における電送についての検討を行い、実機を用いたデジタル信号による手法の提案検証を実施した。

アナログ信号による伝送手法は、接続相手の送信する信号の周波数の探索を周波数が相手と一致するまで繰り返すため、周波数の探索に用いる周波数一致率の解析が重要となる。周波数一致率の解析が重要であるため、シミュレーションを用いて異なる周波数を持つ機器間で周波数が一致するまでの周波数一致率の解析結果の推移を検証として求めた。加えて、周波数の位相が異なる場合での影響を考え、通信機器間で位相が異なる環境下で周波数一致率の解析結果の推移を検証として求めた。異なる周波数を持つ機器間の検証では、周波数が異なる時、周波数の一致率は 0%に近い値を示し、周波数が一致した時は 100%に近い値を示した。

実機を用いたデジタル信号による手法は、単線下で合成波される信号から接続相手と比較して周波数が一致するまで大小比較を繰り返すため、周波数の一致判定の解析、周波数の大小判定の解析、の二つの解析が重要となる。実機を用いたデジタル信号による手法では、通信を行う二つの実機に配線を行い、予め決められた周波数の中から高い周波数と低い周波数を割り振り、提案手法や解析に用いる閾値を組み込んで実験を行った。実験結果により、二つの実機は共に通信周波数の一致まで処理が行えることを確認した。

これらの結果により、アナログ信号による手法とデジタル信号による手法のどちらも通信周波数を決定する実現性が高いと評価できる。加えて、本提案は物理層の通信周波数の決定が可能かどうかには焦点を置いているため、通信周波数を決定するまでの所要時間の向上や手順の最適化、一度に送信するデータ長等といった通信周波数以外の物理層の規格決定や物理層以外の別階層の規格を確定する仕組みの研究等が今後の課題となる。

提案が発展することで、様々な場面で活躍が可能になると考える。例えば、

断線時に接続された導線だけで通信規格を自動的に再確立する仕組みや電子部品間の配線時に通信規格を自動的に決定する仕組み、不特定のプラグに繋ぐだけで自動的に通信が成立する仕組みを持つユニバーサルコネクタ等が実現可能であると考える。

謝辞

現職であるシンガポール国立大学での研究・開発業務を続けているうちに、研究に興味を持ち、会津大学の学生時代に研究室でお世話になった林隆史教授の元で博士課程に臨む形となりました。シンガポールで労働を続けながら博士学生として修了要件を満たしていくには大変な苦勞がありました。そんな中、林先生は主指導教員を引き受けて頂いただけでなく、履修可能な講義について親身に相談に乗って頂きました。林先生に加え、新しい知見を得られる講義をして下さった新潟大学の阿部貴志教授、大河正志教授、前田義信教授に心より感謝申し上げます。また、阿部先生には講義だけでなく、林先生が別の大学で働くことになった時、主指導教員を引き受けて下さったことに感謝申し上げます。

修了するために必要な論文作成、研究発表を通じて、研究への探求の辛さを痛感しました。論文作成に関しては、学会誌の回答文の書き方について林先生から受けたご指摘が特に参考になりました。研究発表に関しては、博士論文研究成果発表会時の大河先生と阿部先生のご指摘が特に参考になりました。論文作成並びに研究発表に協力・参加して頂いた先生方に感謝申し上げます。

新潟大学の先生方以外にも、社会人博士課程の許可をして頂いた現職の上司にあたる NG Teck Khim 教授、発表や論文の設計に関する相談に乗って頂いた同僚、私の拙いメールでの問い合わせに対して粘り強く対応して下さいました新潟大学事務係、書類郵送の協力や今まで励まし続けてくれた両親に感謝申し上げます。様々な方々のご指摘やご支援により、学位申請論文を提出する段階まで到達することが出来ました。最後にご指摘やご支援して下さいました全ての方々に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] Greenfield, A. (2010). *Everyware: The dawning age of ubiquitous computing*. New Riders.
- [2] Poslad, S. (2011). *Ubiquitous computing: smart devices, environments and interactions*. John Wiley & Sons.
- [3] Krumm, J. (Ed.). (2018). *Ubiquitous computing fundamentals*. CRC Press.
- [4] Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer networks*, 54(15), 2787-2805.
- [5] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660.
- [6] Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431-440.
- [7] Dasarthy, B. V. (1997). Sensor fusion potential exploitation-innovative architectures and illustrative applications. *Proceedings of the IEEE*, 85(1), 24-38.
- [8] Mitchell, H. B. (2007). *Multi-sensor data fusion: an introduction*. Springer Science & Business Media.
- [9] Mobus, R., & Kolbe, U. (2004, June). Multi-target multi-object tracking, sensor fusion of radar and infrared. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004* (pp. 732-737). IEEE.
- [10] Zhong, R. Y., Xu, X., & Wang, L. (2017). IoT-enabled smart factory visibility and traceability using laser-scanners. *Procedia Manufacturing*, 10, 1-14.
- [11] Illa, P. K., & Padhi, N. (2018). Practical guide to smart factory transition using IoT, big data and edge analytics. *IEEE Access*, 6, 55162-55170.
- [12] Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer networks*, 52(12), 2292-2330.
- [13] Yu, W., Liang, F., He, X., Hatcher, W. G., Lu, C., Lin, J., & Yang, X. (2017). A survey on the edge computing for the Internet of Things. *IEEE access*, 6, 6900-6919.
- [14] 総務省, 情報通信白書, 世界の IoT デバイス数の推移及び予測
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r01/html/nd112120.html>

- [15] Ceruzzi, P. E., Paul, E., & Aspray, W. (2003). *A history of modern computing*. MIT press.
- [16] Leiner, B. M., Cerf, V. G., Clark, D. D., Kahn, R. E., Kleinrock, L., Lynch, D. C., ... & Wolff, S. (2009). A brief history of the Internet. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 39(5), 22-31.
- [17] Wang, Z., & Crowcroft, J. (1992). RFC1335: A Two-Tier Address Structure for the Internet: A Solution to the Problem of Address Space Exhaustion.
- [18] Roberts, P. A., & Challinor, S. (2000). IP address management. *BT Technology Journal*, 18(3), 127-136.
- [19] Perkins, C. (2002). IP mobility support for IPv4.
- [20] Hinden, R., & Deering, S. (2003). *Internet protocol version 6 (IPv6) addressing architecture* (p. 2). RFC 3513, April.
- [21] Raste, T. M., & Kulkarni, D. B. (2008). Design and implementation scheme for deploying IPv4 over IPv6 tunnel. *Journal of network and computer applications*, 31(1), 66-72.
- [22] Choi, J., Reaz, A. S., & Mukherjee, B. (2011). A survey of user behavior in VoD service and bandwidth-saving multicast streaming schemes. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(1), 156-169.
- [23] Huang, T. Y., Johari, R., McKeown, N., Trunnell, M., & Watson, M. (2014, August). A buffer-based approach to rate adaptation: Evidence from a large video streaming service. In *Proceedings of the 2014 ACM conference on SIGCOMM* (pp. 187-198).
- [24] Postel, J. (1981). Internet protocol.
- [25] Kent, S., & Atkinson, R. (1998). Security architecture for the internet protocol.
- [26] Zimmermann, H. (1980). OSI reference model-the ISO model of architecture for open systems interconnection. *IEEE Transactions on communications*, 28(4), 425-432.
- [27] Day, J. D., & Zimmermann, H. (1983). The OSI reference model. *Proceedings of the IEEE*, 71(12), 1334-1340.
- [28] Day, J. (1995). The (un) revised OSI reference model. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 25(5), 39-55.

- [29] Zhang, S., Liew, S. C., & Lam, P. P. (2006, September). Hot topic: Physical-layer network coding. In *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking* (pp. 358-365).
- [30] Shanmugam, K. S. (1979). Digital and analog communication systems. *STIA*, 80, 23225.
- [31] Madisetti, V. (Ed.). (1997). *The digital signal processing handbook*. CRC press.
- [32] Shrader, R. (1990). *Electronic communication*. McGraw-Hill, Inc..
- [33] Eisenhart, R. L. (1978, June). A better microstrip connector. In *1978 IEEE-MTT-S International Microwave Symposium Digest* (pp. 318-320). IEEE.
- [34] Clark, B., Cartier, C., Clair, J. S., Triantafyllidou, S., Prévost, M., & Edwards, M. (2013). Effect of connection type on galvanic corrosion between lead and copper pipes. *Journal-American Water Works Association*, 105(10), E576-E586.
- [35] Angadi, S. V., Wilson, W. E., Jackson, R. L., Flowers, G. T., & Rickett, B. I. (2008, October). A multi-physics finite element model of an electrical connector considering rough surface contact. In *2008 Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* (pp. 168-177). IEEE.
- [36] Koren, N. L. (1972, June). Pin assignment in automated printed circuit board design. In *Proceedings of the 9th Design Automation Workshop* (pp. 72-79).
- [37] Hauck, S., & Borriello, G. (1997). Pin assignment for multi-FPGA systems. *IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems*, 16(9), 956-964.
- [38] Machacek, J., & Drapela, J. (2008, March). Control of serial port (RS-232) communication in LabVIEW. In *2008 International Conference-Modern Technique and Technologies* (pp. 36-40). IEEE.
- [39] LaMeres, B. J. (2020). Serial Communication in C. In *Embedded Systems Design using the MSP430FR2355 LaunchPad™* (pp. 349-451). Springer, Cham.
- [40] Shih, E., Cho, S. H., Ickes, N., Min, R., Sinha, A., Wang, A., & Chandrakasan, A. (2001, July). Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking* (pp. 272-287).
- [41] He, T., Stankovic, J. A., Lu, C., & Abdelzaher, T. (2003, May). SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks. In *23rd International Conference on Distributed Computing Systems, 2003. Proceedings.* (pp. 46-55). IEEE.

[42] Boggs, D. R., Mogul, J. C., & Kent, C. A. (1988). Measured capacity of an ethernet: Myths and reality. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 18(4), 222-234.

[43] Spurgeon, C. E. (2000). *Ethernet: the definitive guide*. " O'Reilly Media, Inc."

[44] Felser, M., & Sauter, T. (2004, September). Standardization of industrial Ethernet-the next battlefield?. In *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 2004. Proceedings*. (pp. 413-420). IEEE.

[45] Anderson, D. (1997). *USB system architecture*. Addison-Wesley Professional.

[46] Simpson, W. (1996). PPP challenge handshake authentication protocol (CHAP).

[47] Lopez, J. A., Sun, Y., Blair, P. B., & Mukhtar, M. S. (2015). TCP three-way handshake: linking developmental processes with plant immunity. *Trends in plant science*, 20(4), 238-245.

[48] Frazier, H., & Johnson, H. (1999). Gigabit ethernet: From 100 to 1,000 mbps. *IEEE Internet Computing*, 3(1), 24-31.

[49] Barnes, D., & Sakandar, B. (2005). *Cisco LAN switching fundamentals*. Cisco Press.

[50] Shalunov, S., & Carlson, R. (2005, March). Detecting duplex mismatch on ethernet. In *International Workshop on Passive and Active Network Measurement* (pp. 135-148). Springer, Berlin, Heidelberg.

[51] Depari, A., Flammini, A., Marioli, D., & Taroni, A. (2008). USB sensor network for industrial applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(7), 1344-1349.

[52] Axelson, J. (2015). *USB complete: the developer's guide*. Lakeview research LLC.

[53] Babulu, K., & Rajan, K. S. (2008, July). Fpga implementation of usb transceiver macrocell interface with usb2. 0 specifications. In *2008 First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology* (pp. 966-970). IEEE.

[54] Liu, C. L. (1998). Impacts of i/q imbalance on qpsk-ofdm-qam detection. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 44(3), 984-989.

- [55] Kirkhorn, J. (1999). Introduction to IQ-demodulation of RF-data. *IFBT, NTNU*, 15.
- [56] Tubbax, J., Côme, B., Van der Perre, L., Deneire, L., Donnay, S., & Engels, M. (2003, May). Compensation of IQ imbalance in OFDM systems. In *IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC'03.* (Vol. 5, pp. 3403-3407). IEEE.
- [57] Agarwal, V., Hrishikesh, M. S., Keckler, S. W., & Burger, D. (2000, May). Clock rate versus IPC: The end of the road for conventional microarchitectures. In *Proceedings of the 27th annual international symposium on Computer architecture* (pp. 248-259).
- [58] Mu, F., & Svensson, C. (2000). Pulsewidth control loop in high-speed CMOS clock buffers. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 35(2), 134-141.
- [59] Sasao, T. (1986, June). MACDAS: Multi-level AND-OR circuit synthesis using two-variable function generators. In *23rd ACM/IEEE Design Automation Conference* (pp. 86-93). IEEE.
- [60] Pedroni, V. A. (2004). *Circuit design with VHDL*. MIT press.
- [61] McRoberts, M. (2011). *Beginning Arduino*. Apress.
- [62] Banzi, M., & Shiloh, M. (2014). *Getting started with Arduino: the open source electronics prototyping platform*. Maker Media, Inc..
- [63] Astrachan, O. (2003). Bubble sort: an archaeological algorithmic analysis. *ACM Sigcse Bulletin*, 35(1), 1-5.
- [64] Min, W. (2010, July). Analysis on bubble sort algorithm optimization. In *2010 International Forum on Information Technology and Applications* (Vol. 1, pp. 208-211). IEEE.
- [65] Horwich, G. (2000). Economic lessons of the Kobe earthquake. *Economic development and cultural change*, 48(3), 521-542.
- [66] Mimura, N., Yasuhara, K., Kawagoe, S., Yokoki, H., & Kazama, S. (2011). Damage from the Great East Japan Earthquake and Tsunami-a quick report. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 16(7), 803-818.
- [67] McCormick, M. P., Thomason, L. W., & Trepte, C. R. (1995). Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. *Nature*, 373(6513), 399-404.
- [68] Baxter, P. J., Boyle, R., Cole, P., Neri, A., Spence, R., & Zuccaro, G. (2005). The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat. *Bulletin of volcanology*, 67(4), 292-313.

[69] Mitzner, K. (2011). *Complete PCB design using OrCad capture and layout*. Elsevier.

[70] Archambeault, B. R., & Drewniak, J. (2013). *PCB design for real-world EMI control* (Vol. 696). Springer Science & Business Media

[71] Leens, F. (2009). An introduction to I²C and SPI protocols. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 12(1), 8-13.

[72] Hu, Z. W. (2010, October). I²C protocol design for reusability. In *2010 Third International Symposium on Information Processing* (pp. 83-86). IEEE.

[73] Sung, B., Hwang, S. H., & Da Costa, V. (1999, May). DVI: A standard for the digital monitor interface. In *SID Symposium Digest of Technical Papers* (Vol. 30, No. 1, pp. 130-133). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

[74] Wang, G., Guan, Y., & Zhang, Y. (2009, May). Designing of VGA character string display module based on FPGA. In *2009 International Symposium on Intelligent Ubiquitous Computing and Education* (pp. 499-502). IEEE.

[75] Liu, H., Mohammed, I., Fan, Y., Morgan, M., & Liu, J. (2009). An HDMI cable equalizer with self-generated energy ratio adaptation scheme. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 56(7), 595-599.

研究業績

(1) 学術雑誌等 1件 (査読有り)

丹野嘉信, 林隆史 : ユニバーサルコネクタのためのアナログ波を用いた単線通信手法

2020年6月発行, 電気学会論文誌C雑誌, 第140巻第6号 559~564頁

(2) 国際会議における発表 1件 (査読有り)

Yoshinobu Tanno, Takafumi Hayashi : A novel single-wire digital handshake of communication speed for universal connector (ユニバーサルコネクタのための通信速度の単線デジタルハンドシェイク)

November, 25, 2019, 2019 1st International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE), pp.1~8