

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院情報システム学究科情報ネットワークシステム学専攻博士前期課程		
氏 名	小木 真人	学籍番号	1152014
論 文 題 目	I P通信開始時における レーザ光を利用した直観的な接続方法の提案		
<p>要 旨</p> <p>ネットワークに接続できるデバイスが普及し、各々のデバイスが持つデータや機能をネットワーク上で共有するデバイス連携が増加している。しかし、既存技術によるデバイス接続は、特定のデバイスを任意に指定して接続することが難しくデバイス連携を行う上での障壁となっている。そこで本論文では、通信したいデバイスに対して直観的に接続を行う方法として、レーザを利用した接続方法UDU-Lを提案する。</p> <p>UDU-Lでは、自分の操作する端末のIPアドレスを、接続したいデバイスにレーザによる可視光通信で送信する。接続したいデバイス側は、レーザで受信したIPアドレスに対してコールバックし接続を行う。つまり、接続したいデバイスにレーザを照射することで、デバイスの指定ができる。また、レーザを照射した後の接続手順は全て自動的に行われたため、簡単な操作でデバイスと接続できる。</p> <p>本論文では、レーザの送信回路と受光回路をそれぞれ製作して、スマートフォンとノートPC間の接続を行い、以下の点について以下の点について評価を行った。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. レーザ通信で可能な通信速度 2. デバイス間の距離と通信速度がレーザ通信の精度に及ぼす影響 3. 実システムとしてのユーザ評価 <p>1の通信速度の評価から、通信速度4800[bps]のレーザ通信でデバイス間接続を行うシステムの実現を確認した。2のデバイス間の距離と通信速度による通信精度の検証から、通信速度が速いほど通信精度が向上することが確認できた。また、5[m]までの距離のデバイス接続の実用性を確認した。3の実システムによるユーザ評価から、UDU-Lのレーザを用いたデバイス接続は、直観的で使いやすいとの評価を得た。</p> <p>提案手法UDU-Lの応用として、既存のデバイス接続手法への適用を考察した。結果、屋内・屋外ともに、存手法よりも容易な接続の実現を確認した。また、既存手法の課題であった、通信したいデバイスを指定する煩雑さを解消し、提案手法の有用性を示した。</p>			



電気通信大学大学院情報システム学研究科

2013 Jan.

修士論文

I P 通信開始時における レーザー光を利用した直観的な接続方法の提案

指導教員 入江 英嗣 准教授

副指導教員 吉永 努 教授

副指導教員 森田 啓義 教授

平成 25 年 1 月 24 日

提出者

所属 大学院情報システム学研究科
情報ネットワークシステム学専攻
学籍番号 1152014
氏名 小木 真人

(表紙裏)

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	関連手法	4
2.1	デバイス連携技術の背景	4
2.2	デバイス間通信の関連技術	5
2.2.1	無線通信によるデバイス連携	5
2.2.2	光学マーカを用いた手法	6
2.2.3	光無線通信	6
2.3	既存手法の課題と研究の動機	7
第 3 章	UDU-L: レーザ光を利用した直観的な IP 通信の接続方法	8
3.1	提案手法 UDU-L の概要	8
3.2	UDU-L の詳細	8
3.2.1	システム構成	8
3.2.2	レーザによる通信	9
3.2.3	接続手順	11
第 4 章	実装	15
4.1	UDU-L の実装	15
4.2	送信回路	15
4.3	受光回路	16
4.3.1	受光回路の実装	16
4.3.2	フィルタ	20
4.4	レーザ通信後の接続手順	20
第 5 章	初期実装と性能評価	22
5.1	レーザによる可視光通信の速度	22
5.2	レーザによる通信の精度	24
5.2.1	通信速度による通信データへの影響を検証	24
5.2.2	距離の離れたデバイスに対する UDU-L の有効性の検証	28
5.2.3	レーザの通信速度の変化によるデータ通信の精度の検証	29
5.3	システム UDU-L の性能評価	29
5.3.1	デバイス間通信に要する時間	30
5.3.2	接続回数	30
5.3.3	UDU-L によるアプリケーション評価	31
5.4	性能評価から得られた今後の課題	34

第 6 章 応用例	35
第 7 章 結論	36
謝辞	37
参考文献	39
発表論文	39

目次

1.0.1 デバイス連携のイメージ図	3
3.2.1 UDU-L の構成図	10
3.2.2 UDU-L によるデバイス接続の概略	10
3.2.3 シリアル通信の具体例	12
3.2.4 UDU-L の送信信号	13
3.2.5 レーザによる信号の繰り返し送信のイメージ	14
3.2.6 SSL を用いた UDU-L の通信確立の手順	14
4.1.1 UDU-L 実装の概略図	17
4.2.1 送信回路の回路図	17
4.2.2 送信回路の実装	18
4.3.1 受光回路の回路図	19
4.3.2 受光回路の実装	19
4.4.1 レーザ通信後の接続手順	21
5.1.1 4800[bps] でのレーザー通信 (Android 側)	23
5.1.2 4800[bps] でのレーザー通信 (ノート PC 側)	23
5.1.3 9600[bps] でのレーザー通信 (Android 側)	23
5.1.4 9600[bps] でのレーザー通信 (ノート PC 側)	23
5.2.1 レーザによる通信精度 1200[bps]	25
5.2.2 レーザによる通信精度 2400[bps]	26
5.2.3 レーザによる通信精度 4800[bps]	27
5.2.4 レーザの繰り返し送信による接続のイメージ	32
5.3.1 画像通信アプリ	32
5.3.2 画像通信アプリ (PC 側)	32
5.3.3 UDU-L による画像送信実験の様子	33

表目次

2.1	既存手法の利点と欠点	7
3.1	シリアル通信の設定	9
4.1	送信回路の各パラメータ	16
4.2	受光回路の各パラメータ	18
4.3	フィルタの効果	20
5.1	実験環境	22
5.2	通信速度ごとの最適基準電圧	24
5.3	通信精度 (1200[bps])	25
5.4	通信精度 (2400[bps])	25
5.5	通信精度 (4800[bps])	25
5.6	連続照射での成功率と時間	28
5.7	速度による通信精度の比較	29
5.8	接続に要した平均時間	30
5.9	接続回数	30
5.10	アプリによる画像の送信回数	31
5.11	送信データと受信データの比較	34

第1章 序論

ネットワークに接続できるデバイスが普及し，各々のデバイスが持つデータや機能を共有するデバイス連携が増加している．代表的な例としては，テレビやエアコンなどのネットワーク接続による遠隔制御や，コンテンツのダウンロードといった機能を持つネットワーク家電が挙げられる [1]．また，室内だけではなく，パブリックディスプレイと呼ばれる屋外に設置された誰もが利用できるディスプレイに対して，携帯端末から画像やメッセージを表示させる技術 [2] も提案されている．図 1.0.1 にデバイス連携のイメージ図を示す．このようなデバイス連携は，今後もさらに広がっていくと考えられる．しかし，ネットワーク上で特定のデバイスと接続するためには，接続したいデバイスのネットワークアドレスが必要となる．そのため，仮に接続したいデバイスがユーザの目の前にあるような場合でも，ネットワークアドレスを知らなければ接続できない．このため，特定のデバイスを任意に指定して接続することは難しく，デバイス連携を行う上での障壁となっている．

デバイス連携の既存技術としては，ユーザの周辺にあるデバイス同士で通信を行うためのネットワークである Personal Area Network(PAN)[3]がある．PAN によるデバイス間の接続には Bluetooth[4] が一般的に用いられる．しかし，Bluetooth を用いて特定のデバイスと接続するためには，接続したいデバイスをネットワーク上から検索し選択する必要がある．そのため，ネットワーク上に多数のデバイスが接続している場合，特定のデバイスを選択するだけでも大きな労力が必要となってしまう．デバイス間の接続を直観的な方法で実現できれば，デバイス連携の用途は今よりも遙かに広がる．

そこで本論文では，ユーザが通信したいデバイスに対して直観的に接続を行う方法として，レーザーを利用した接続方法を提案する．提案手法では，レーザーによる可視光通信を利用することで，通信したいデバイスと IP 通信を確立する．ユーザは自分の操作する端末にレーザーを装着し，レーザーポインタの要領で接続したいデバイスを照射する．このときレーザーにはデバイス接続に必要な情報(例えば IP アドレス)を，レーザーによる可視光通信で送信する．レーザーを照射されたデバイスは，受信した情報から，ユーザの操作端末に対してコールバックすることで通信を確立させる．提案手法の利点は，レーザーを用いることで目的のデバイスを直接指定できる点である．この手法による接続は，レーザーを照射した後の手順は全て自動的に行われる．つまり，レーザーによる照射をトリガーとして接続したいデバイスと IP 通信の接続を行えるため，ユーザは複雑な操作を行うことなく接続したいデバイスと通信ができる．

本論文では，提案手法の有用性を示すためにシステムの実装と初期評価を行った．実装では，ユーザの操作する端末からレーザーによる可視光通信で IP アドレスを送信する回路，レーザーを受光してデータを受け取るための回路をそれぞれ製作し，提案手法の実装を行った．初期評価では，実装した回路を用いてスマートフォンとノート PC 間の接続を提案手法で行い，レーザーによる通信速度，デバイス間の距離と通信速度によるレーザー通信の精度をそれぞれ評価した．また，実際に提案手法を用いた画像送信のアプリケーションを実装しユーザ評価を行い，実システムとしての評価も行った．

以下，本論文は次のように構成される．2章では，関連研究とデバイス間通信の現状の課題について述べる．3章では提案手法の概要を述べ，4章で提案手法の実装について述べる．5章では4章で実装した提案手法の初期評価を行い，本システムの有用性について考察する．6章では，初期評価によって得られた結果から，本システムの応用例や既存のデバイス連携技術への適用について述べ，7章でまとめとする．

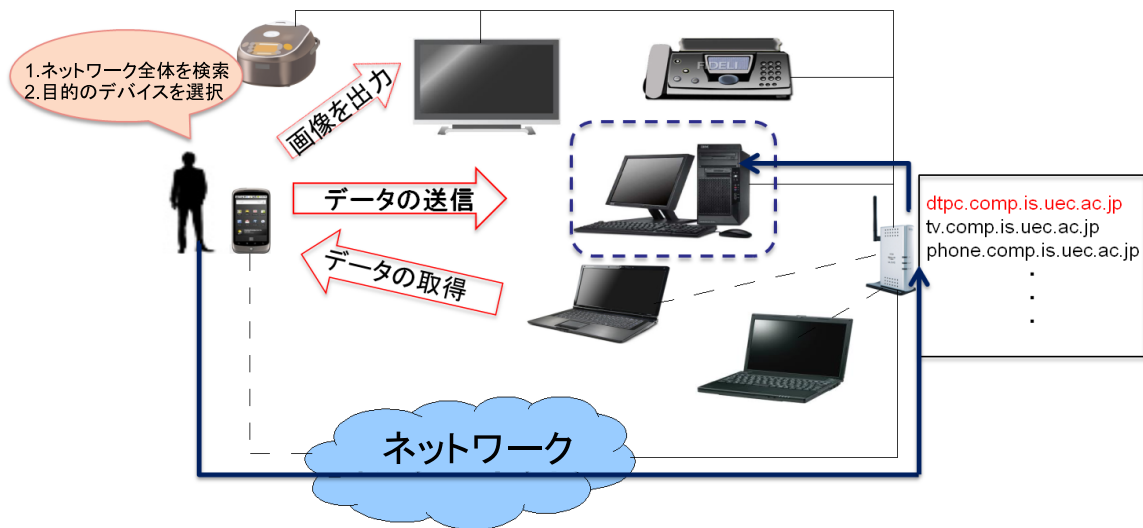


図 1.0.1: デバイス連携のイメージ図

第2章 関連手法

2.1 デバイス連携技術の背景

ネットワークに接続できるデバイスが普及し、各々のデバイスが持つデータや機能をネットワーク上で共有するデバイス連携が増加している。例えばネットワーク家電と呼ばれるネットワーク接続可能なテレビやレコーダ、エアコンは、家庭内で構築された通信ネットワークであるホームネットワークで相互接続でき、スマートフォンによる外部からの遠隔操作が可能である。他にも、デバイスの連携を行うために専用のデバイスを用いた連携技術として、大場らはポインティングデバイスと呼ばれる端末で、連携したいデバイス同士にそれぞれ命令を送ることで、デバイスの連携動作を提案している [5]。この手法では、個人認証機能 (指紋認証など) を持たせたポインティングデバイスから、近距離無線通信でホームネットワークに所属しているデバイスと接続を行う。接続が行われると、ポインティングデバイスが認証した個人認識情報と、どのデバイスと接続したかの情報がサーバに記録される。ユーザはさらに他のデバイスに同様の操作を行うことで、サーバを介して複数デバイス間の連携動作を行う。具体的な例としては、同じネットワークに接続された二台の PC をポインティングデバイスで接続し、片方の PC 画面上の文字をコピーしてもう片方の PC の画面上にペーストする動作が行える。

屋外でのデバイス連携では、斉藤らは携帯端末の発信電波中の識別情報と、携帯端末の表示の変化を利用した携帯端末とサイネージのユーザインタフェースの連携手法を提案している [2]。この手法では、デジタルサイネージディスプレイ装置を操作するサーバに対して、ユーザが操作する端末 (携帯電話や PDA) の識別情報と位置情報を電波で発信し、サーバ側でその識別情報と端末 ID を登録することで、デジタルサイネージディスプレイと携帯端末の連携を行っている。

このように、ネットワークを通じたデバイス連携は多く提案されている。しかし、デバイス連携は未だ一般的な技術ではない。その理由として、特定のデバイスを任意に指定して接続することが難しいという点がある。ネットワーク上で特定のデバイスに接続するためには、接続したいデバイスのネットワークアドレスが必要である。そのため、仮に接続したいデバイスがユーザの目の前にあるような場合でも、接続したいデバイスのネットワークアドレスが既知でなければ接続できない。Bluetooth などの既存の無線通信技術では、周囲にあるデバイスを検出しリストから選択する操作を GUI(Graphical User Interface)で行っているが、検出するデバイスが多くなるとリストから任意のデバイスを指定することに大きな労力が必要である。特にスマートフォンなど個人が携帯できる計算機が増えている昨今、街中のオープンなネットワーク環境でデバイス通信を行うためには、通信相手の指定が大きな問題となる。このような環境でデバイス接続を行うためには、以下の 2 点を満たす接続方法が求められる。

- ユーザに負担を掛けず、少ない手順で接続ができること
- 通信したい任意のデバイスを正確に指定できること

そこで本章では、既存のデバイス接続手法について調査し、既存手法の特徴とその問題点について考察する。

2.2 デバイス間通信の関連技術

デバイス同士を接続して連携させる技術として、Personal Area Network(PAN)がある。PANは、ユーザの周辺にあるデバイス同士を通信してデータの共有や機能の連携を行うことを目的としたネットワークである。デバイス間の通信にはBluetoothやIrDA[6]などの近距離通信の技術が用いられている。また、PANを拡張した研究として、Personal Network(PN)[7]がある。PNは、自分の所有するデバイスが手元にない場合でも、インターネットなどを通じて手元のデバイスと連携できる技術である。PNには、MAGNET[8][9]やFednets[10]がある。MAGNETは、デバイス連携のセキュリティ向上のために、ユーザの持つデバイスの中で最も計算能力の高いデバイス(masterデバイスと呼ぶ)で暗号通信を行う。他のデバイスはmasterデバイスを通じて通信を行い、通信の秘匿性を確保する「Group Security Access」を提案している。Fednetsは、他人のPNと接続してデータの共有を行うPNの手法である。

これらのネットワークで用いられるデバイス間の通信の多くは近距離の無線通信で行われる。この近距離無線通信の接続方法として以下の3種類がある。

- Bluetoothなどの無線通信
- 光学マーカによるアドレスの取得による通信
- 赤外線や可視光を用いた光無線通信

本節では、これらの接続手法について検討する。

2.2.1 無線通信によるデバイス連携

電波による無線通信は、障害物を回り込むことができる物理的な特性から赤外線などの光通信に比べて通信可能範囲が広く、様々な通信に利用されている。前述のPANのデバイス間通信で用いられる無線通信としては、BluetoothやZigbee[11]などがある。本節では、スマートフォンなど広く普及しているBluetoothによるデバイス接続について説明する。Bluetoothを用いて目的のデバイスと通信するために次の手順が必要になる。

1. 接続するデバイスをペアリングモードにする
2. 接続される側の機器でペアリング操作を行い、接続するデバイスを検索する
3. 接続される側の機器上で、接続するデバイスを指定する
4. 接続される側の機器上で、パスコードを入力し、接続を確認する

このように、Bluetoothではネットワーク上のデバイスを検索し、表示されたリスト上から接続するデバイスを選択しデバイス間の接続を行う。

2.2.2 光学マーカを用いた手法

光学マーカを用いたデバイス接続の手法として、Gaze-Link[12]やUDU[13]がある。Gaze-Linkは、ネットワークに接続しているデバイスのアドレスをサーバに登録し、そのアドレスと紐付けされたサイバーコードをデバイスに貼り付ける。このサイバーコードをカメラで「見る」ことでデバイスのアドレスを取得する。したがって、ユーザは接続したいデバイスのサイバーコードをカメラで撮影することによって、ネットワーク上からデバイスを探索する必要なく、容易にデバイス接続が実現できる。またUDUでは、ネットワークに接続しているディスプレイに、自身のアドレスをQRコードとして表示させ、携帯端末のカメラで撮影し、携帯端末とディスプレイを接続する。

このGaze-LinkとUDUは、ネットワークアドレスをデバイス自身に付け、カメラによる画像認識でアドレスを取得することにより、接続対象のデバイスを直観的に指定することができる。よって、既存の無線通信による接続手法に比べて容易なデバイス接続を実現している。具体的に比較すると、例えばBluetoothでデバイス通信を行う場合、2.2.1節で述べた手順で接続する。対して、UDUでは以下の手順で接続する。

1. カメラを起動する
2. QRコードなどの識別子をカメラで読み取る

このように光学マーカを用いたデバイス接続は、無線通信による接続のようなデバイスの検出や指定を必要とせず、接続対象をカメラで写すという直観的な方法でデバイス間通信を実現している。

2.2.3 光無線通信

光無線通信は、赤外線や可視光域の波長の光を用いた無線通信手段である。赤外線や可視光域の光は、2.2.1節で述べたBluetooth(2.4Ghz)などの電波に比べて直進性が強く、テレビのリモコンや携帯電話の赤外線通信のように直接的な通信ができる。この光無線通信の中で、波長400[nm]~800[nm]の可視光を用いた通信は可視光通信[14][15]と呼ばれる。可視光通信の特徴として以下の点が挙げられる。

- 通信経路が目視で確認できる
- 直進性が強く、遮蔽物による反射・回折・散乱が小さい
- 電波法による制限がない(赤外線も同様)

このように、可視光通信の利点は、送信したデータの到達可能な範囲を視覚的に認識でき、通信の可否が直観的に分かることである。また、通信データが遮蔽物を通り抜けていかないため、電波による無線通信と比べて盗聴の危険性が低い利点がある。この可視光通信を用いた既存研究として、照明を高速で変調させて室内の近距離通信を行うもの[16]や、レーザーを用いた通信[17]がある。レーザーを用いた可視光通信には以下の特徴がある。

- 指向性が強く拡散が少ないため遠くまで届く
- 焦点を絞ることで通信路を制限できる

表 2.1: 既存手法の利点と欠点

	利点	欠点
無線通信	通信の持続性がある	デバイスの選択が困難
光学マーカ	接続が直観的で手順が少ない	認識可能な距離が短い
光無線通信	直接的な通信が可能	光を当て続ける必要がある

これらの特徴から，レーザによる可視光では特定の相手とのみ通信を行うことができる．実用化されているレーザの通信としては，宇宙空間などの障害物の少ない空間での通信や，ビル間での通信用途がある．また通信用途ではないが，レーザポインタの点滅を利用してオブジェクトを選択する InfoRoom[18] や，レーザポインタのストロークによって大画面環境における音量調整などのパラメータの操作を行う研究 [19] など，レーザを用いることによる直観的な操作の研究も行われている．

2.3 既存手法の課題と研究の動機

屋外環境での公共の場所に設置されたデバイスに対する接続を，2.2 節で調査した既存の接続手法で行う場合を考察する．

2.2.1 節で述べた無線通信によるデバイス通信は，無線通信可能な範囲内では一度通信が確立すれば移動しながらでも自由に通信が可能である．しかし最初の接続では，ネットワーク上から接続したいデバイスを個別に指定する必要がある．このため，ネットワーク上に多数のデバイスが存在する場合，デバイスを選択するには大きな労力が必要となってしまう欠点がある．

2.2.2 節で述べた光学マーカを用いた通信では，接続したいデバイスのマーカを撮影するという直観的な方法でデバイス接続ができる．しかしカメラによる画像認識は，対象のマーカが一定の距離よりも離れてしまうと認識率が低下するため，指定できるデバイスの範囲が限られてしまう．実際に，UDU による QR コードの認識は 2[m] 程の距離が限界であった．そのため，通信可能なデバイスの範囲が限られてしまい，屋外でのデバイス接続に用いる手法としては不適である．

光通信では，2.2.3 節で述べたように直接的な通信が可能である．特に可視光線を用いた光通信は，通信路や通信可能な範囲をユーザが目視で認識できる点が直観的である．しかし，赤外線による通信規格の IrDA の通信距離は最大で 1[m] であるため，光学マーカによる通信と同様に選択できるデバイスの範囲が限られる．また可視光通信は，遮蔽物に弱く電波による無線通信に比べて通信可能範囲が制限されてしまう．加えて，光通信では通信を継続するために光を当て続ける必要があるため，携帯端末のように移動しながら自由に通信を行うことは難しい．

表 4.2 に各接続方法の利点と欠点をまとめる．

このように，屋外環境でのデバイス接続を行う場合，既存のデバイス連携手法は一長一短でユーザが接続したいデバイスと直観的な接続は実現できていない．そこで本論文では，屋外環境でもデバイス接続を実現するために，ネットワーク上にある任意のデバイスを容易かつ正確に指定し接続する技術を提案する．

第3章 UDU-L: レーザ光を利用した直観的な IP 通信の接続方法

3.1 提案手法 UDU-L の概要

本節では、レーザを利用したデバイス接続システム Universal Device Usage by Laser(UDU-L) について述べる [20]。2 章で述べたようにデバイス連携の接続手法は多数提案されている。しかし、既存手法でデバイス同士を接続するためには、連携したいデバイス同士を事前に登録する、またはネットワーク上から目的のデバイスを直接指定する必要がある。そのため、現状では街中などのオープンなネットワーク上でデバイス連携を行うことは難しい。

そこで、可視光のレーザを用いて接続したいデバイスと容易且つ直観的に接続する手法 UDU-L を提案する。UDU-L では、スマートフォンなどのユーザが操作する端末にレーザを装着し、接続したいデバイスに対してレーザを照射することで通信を開始する。このとき、レーザ光にはユーザが操作する端末の IP アドレスを乗せて、接続したいデバイスに送信する。レーザを照射されたデバイスは、受光した IP アドレスに対してコールバックを行い、デバイス間の IP 通信を確立する。可視光のレーザを用いる利点は以下の 3 点がある。

- 通信相手のデバイスを直観的に指定できる
- 指定したデバイスをユーザが目視で把握できる
- 受光したデバイスのみがレーザ光の情報を取得できる

この直観的にデバイスを指定できる特性から、街中などのオープンで多数のデバイスが接続しているネットワーク上でも、接続したいデバイスと容易に接続できる。加えて、接続したデバイスを目視で把握できることから、赤外線通信のような従来の接続方法に比べて、ユーザの意図していないデバイスに接続することを防止でき、通信経路の安全性を保證できる。さらに、受光したデバイスのみがレーザ光の情報を取得するため、送信する情報を盗聴されることはない。

UDU-L では、この可視光の利点を活かして直観的且つセキュアに IP 通信の接続を行う。また、接続後の通信を無線 LAN による IP 通信で行うことにより、可視光通信の弱点である障害物や接続範囲が限られる点を克服し、煩雑な接続の設定も解消できる。

3.2 UDU-L の詳細

3.2.1 システム構成

UDU-L の構成を図 3.2.1 に示す。UDU-L はユーザの操作する端末、ネットワークに接続したデバイスで構成される。ユーザが操作する端末にレーザを装着し、接続したいデバイス側にはレーザを受信する受光器を装着する。UDU-L による通信の概略を図 3.2.2 に示す。UDU-L では、まず

表 3.1: シリアル通信の設定

ボーレート	1200 ~ 4800 bps
データ長	8bit
ストップビット	1bit
パリティ	なし

自分の操作する端末から、接続したいデバイスに向けてレーザを照射することで、接続に必要な情報を目的のデバイスに送信する(1)。次に、通信相手のデバイスはレーザによる通信で受信した情報を用いてユーザが操作する端末と無線で IP 接続する(2)。このように通信の開始をレーザで行い、接続後の通信を無線 LANで行うことにより、容易な接続が実現できる(3)。

また、ネット通販での個人情報入力のように通信の秘匿性を要求される場合もある。このような用途の通信にも対応するため、UDU-LではSSL通信を行うため認証局の設置も想定している。認証局は、上記のように通信の秘匿性を必要とする場合、レーザによる通信で確立した後のIP通信をSSLで行うため、ネットワークに接続するデバイスに対して証明書を発行する。デバイスはユーザが操作する端末とIP通信を確立した後、SSL通信のための公開鍵と証明書をユーザが操作する端末に送信し、デバイス間の通信をSSL通信で行う。この認証局は、上位のroot認証局から証明書を受け取ることで、中間認証局として機能する。

3.2.2 レーザによる通信

レーザによる可視光通信の詳細について述べる。可視光通信では、レーザ光の明・滅をデジタル信号の '1', '0' とすることで情報の送信を行う。提案手法UDU-Lで用いるレーザの通信方式は、シリアル通信のEIA-232-Dを用いた。シリアル通信は表3.1の設定で行った。シリアル通信では、Startbitが'0', Sopbitが'1'となっており、表3.1の設定のシリアル通信では、1byteのデータをStartbitとStopbitを1bitずつ合わせた計10byteで送信する。また、送信する8bitのデータは、逆順に送信される。具体的なシリアル通信の例として、1byteの文字データ'A'を送信した場合の信号を図3.2.3に示す。

提案手法UDU-Lでは、このシリアル通信を用いてレーザを装着したデバイス自身のIPアドレス情報4byteを送信する。UDU-Lで送信する信号を図3.2.4に示す。また、レーザで送信する信号の作製手順を以下に示す。

1. ユーザの操作する端末のIPアドレス4byteを取得
2. IPアドレス4byteからCRC2byteを計算し、IPアドレスの後に挿入
3. レーザで送信する信号の最初に開始文字を挿入
4. 3の後に信号の終了文字を挿入

シリアル通信では、どのタイミングで通信が開始するかを判断する必要がある。そこで、手順3と手順4で開始文字と終了文字を挿入する。この開始文字と終了文字に、通常のシリアル通信で使用しないデータ(例えば'1'が10bit続く信号)を用いて受信信号の同期を行うことで、通信の精度は向上が見込める。受光器側はこの開始文字の直後6byteを通信データとして受信する。手順2で

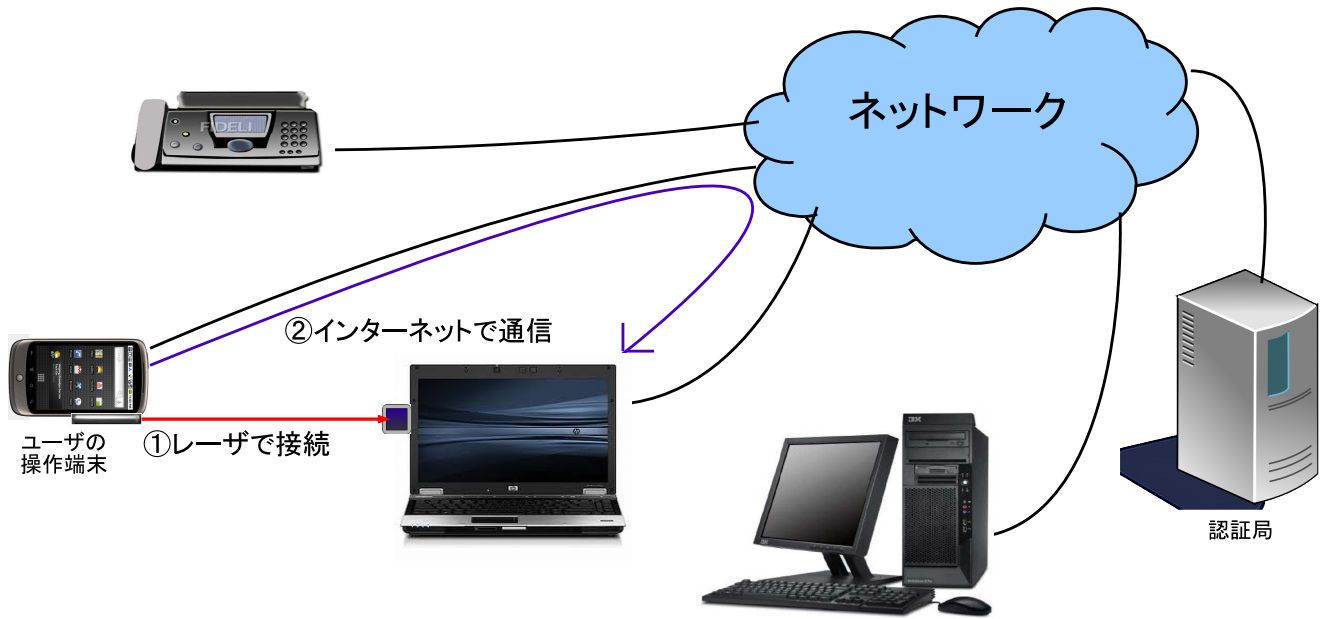


図 3.2.1: UDU-L の構成図

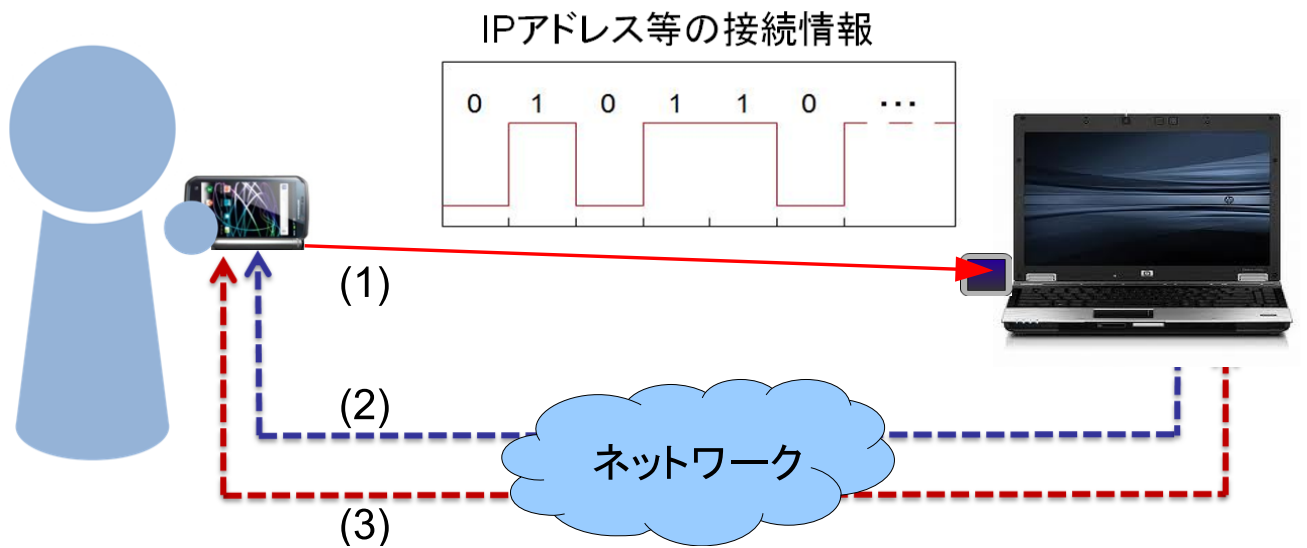


図 3.2.2: UDU-L によるデバイス接続の概略

求めた CRC を用いて受信したエラーの検出を行うことでレーザによる IP アドレスの受信を行う。UDU-L では、CRC の方式として CRC-ccitt を用いた。信号を繰り返しレーザで連続送信し、接続したいデバイス側が一回でも受信できれば接続が確立できる。レーザによる信号の繰り返し送信のイメージを図 3.2.5 に示す。

3.2.3 接続手順

UDU-L によるデバイス接続の手順を以下に示す。

1. 接続したいデバイスの受光器に向けて、ユーザ側のデバイスからレーザを照射
2. CRC を用いて受信した IP アドレスが正確か判定
3. 受信した IP アドレスに対してコールバック
4. 接続が確立

UDU-L では少ない手順でデバイス間の通信を確立することができる。加えて、手順 2 以降はシステム側が自動で行うため、ユーザが行う手順は 1 のレーザを接続したいデバイスに照射することのみである。また、通信の内容によって秘匿性が求められる場合は以下の手順で通信を行う。

1. 接続したいデバイスの受光器に向けて、ユーザ側のデバイスからレーザを照射
2. CRC を用いて受信した IP アドレスが正確か判定
3. 通信の用途に応じて公開鍵を送信
4. 受信した IP アドレスに対してコールバックし、同時に公開鍵と証明書を送信
5. 公開鍵を用いて SSL による通信を開始

SSL を用いた場合の通信手順を図 3.2.6 に示す。SSL を用いた通信では、前述の手順に加えて、認証局の証明書と公開鍵をコールバックの際に送信する。この証明書を送信することで、接続したいデバイスが正規のものであるか判断する。また、送信された公開鍵を用いて暗号通信を行うことで秘匿性の高い通信ができる。SSL を用いた通信においても、ユーザが自発的に行う動作は 1 の接続したいデバイスをレーザで照射するだけなので、容易にデバイス通信が確立できる。

$$'A' = (0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1)$$

d₀ d₁ d₂ d₃ d₄ d₅ d₆ d₇

'0' '1' '0' '0' '0' '0' '0' '1' '0' '1'

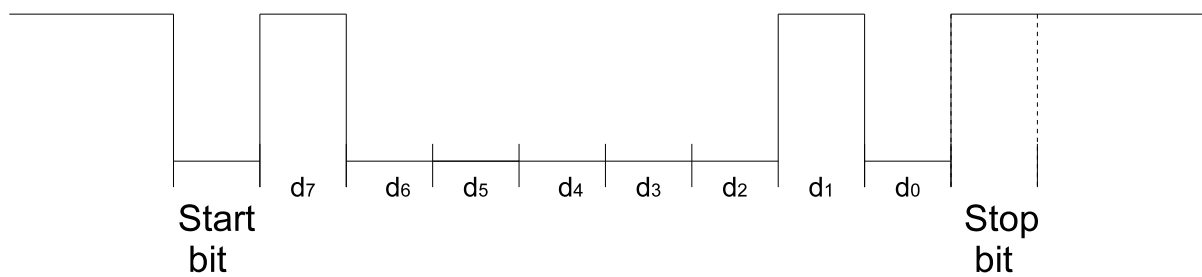


図 3.2.3: シリアル通信の具体例

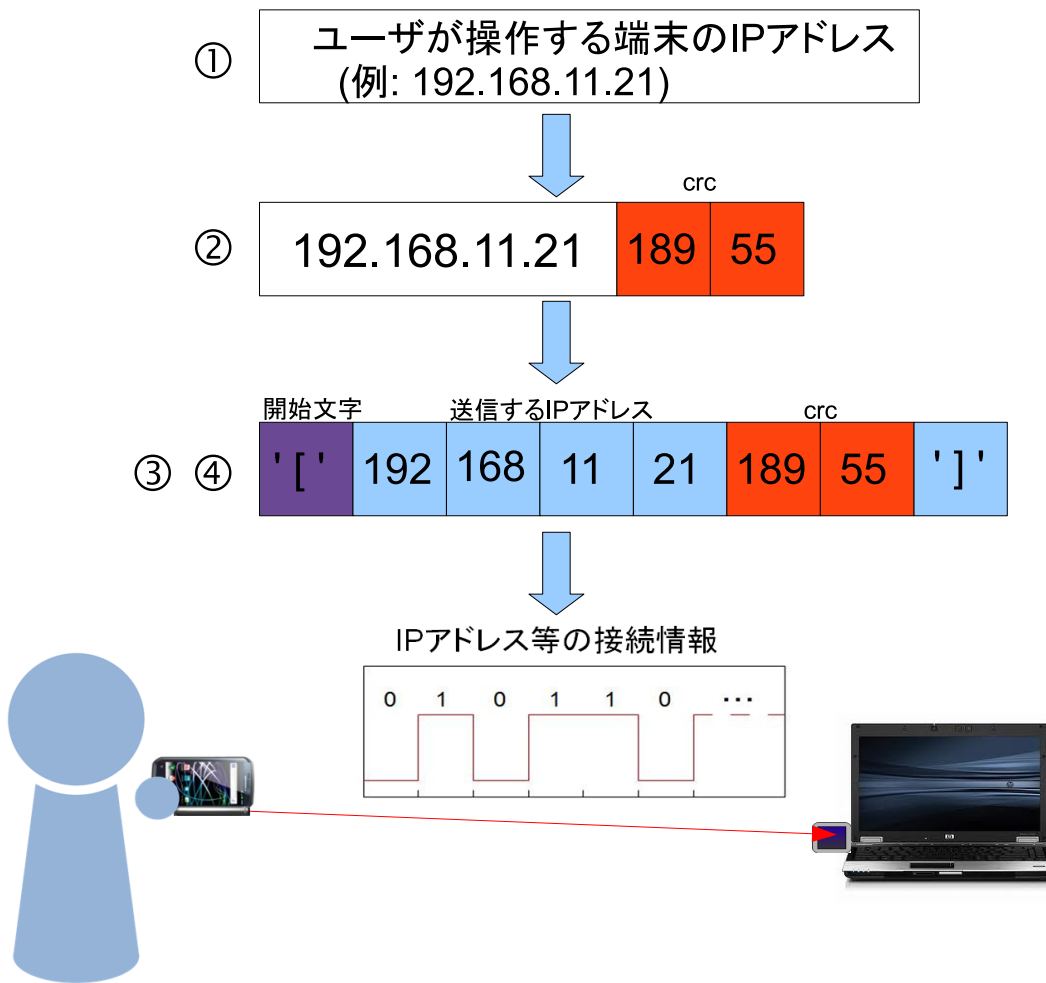


図 3.2.4: UDU-L の送信信号

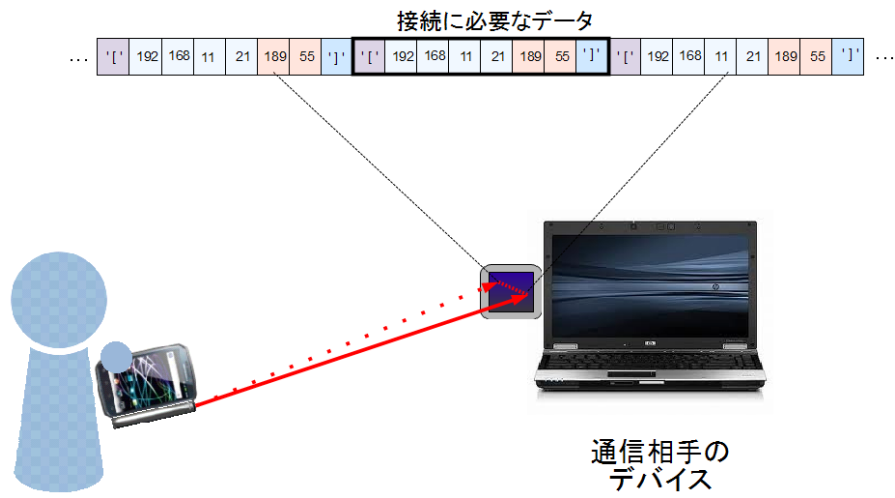


図 3.2.5: レーザによる信号の繰り返し送信のイメージ

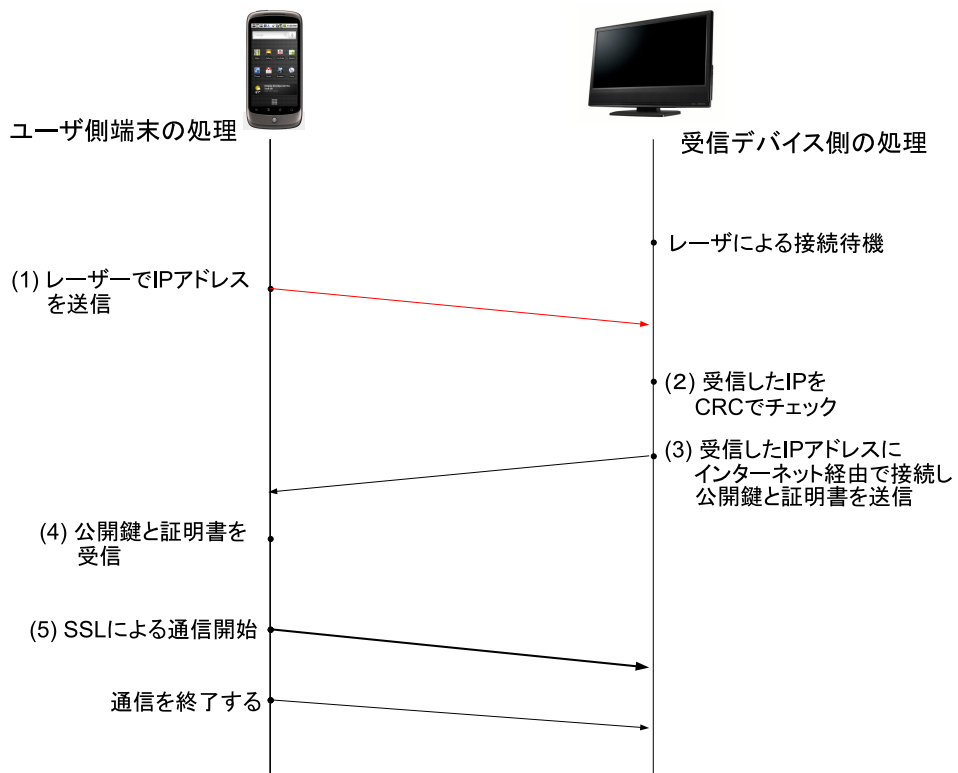


図 3.2.6: SSL を用いた UDU-L の通信確立の手順

第4章 実装

4.1 UDU-Lの実装

UDU-L実装として、レーザを用いた Android スマートフォンとノート PC 間の IP 接続を実装した。実装したシステムの概略を図 4.1.1 に示す。本実装では、ユーザの操作端末の IP アドレスをレーザで送信するための送信回路と、レーザによる IP アドレスを受信するための受光回路で構成する。Android スマートフォンとノート PC 間の接続は以下の手順で行う。

1. ユーザの操作端末の IP アドレスを含む送信信号を送信回路に入力
2. 入力された信号を電気的に変換し、レーザで送信
3. レーザを受光し IP アドレスをデバイスに送る
4. 受信した IP アドレスに対して接続する

送信回路は、手順 1 のユーザの操作端末の IP アドレスを受信し、手順 2 のレーザで送信を行う。手順 1 のスマートフォンと送信回路の接続は Bluetooth で実装した。Bluetooth での接続は、2.3 節で述べた課題がある。しかし、スマートフォンと送信回路の接続では、接続する相手(送信回路)が固定であるため一度ペアリングすれば設定が不変である。また、実システムとして UDU-L を想定した場合、スマートフォンと送信回路はユーザ個人の所有物であるため、接続の設定が容易に行える。よって、スマートフォンと送信回路の接続では 2.3 節で述べた問題は無い。受光回路は、手順 3 のレーザによる IP アドレスの受光を行う。受光回路とデバイス間の接続は、USB による有線接続で行った。以下本章では、この送信回路及び受光回路の実装と、レーザ通信後の接続手順について述べる。

4.2 送信回路

スマートフォンの IP アドレスをレーザで送信する回路について述べる。送信回路は、スマートフォンを接続して IP アドレスを電気的に変換する。回路に入力する信号は、スマートフォン側のプログラムで IP アドレスを取得し、3.2.2 節で述べた形に変換する。変換した信号は、シリアル通信で 1byte 単位で送信回路に入力する。本実装では、このスマートフォンと送信回路のシリアル通信を Bluetooth で実装した。Bluetooth を用いた理由は以下の 3 点である。

- シリアル通信が可能であること
- スマートフォンの microUSB 端子を占有しないこと
- 実装が容易であること

表 4.1: 送信回路の各パラメータ

回路記号	部品名
REG1	三端子レギュレータ TA78L05S(F)
REG2	三端子レギュレータ XC6202P332TB
OPA	OPA2134
R1	カーボン抵抗 1 / 4 W 10[k]
R2	カーボン抵抗 1 / 4 W 10[k]
R3	カーボン抵抗 1 / 4 W 10[k]
R4	カーボン抵抗 1 / 4 W 100[]
Rv	半固定抵抗 1 / 2 W 10[k]
BT モジュール	FB155BC
Tr	2SC1815
LD	LM-101-A2

実装した送信回路の回路図を図 4.2.1 に、またプリントボードに実装した送信回路の写真を図 4.2.2 に示す。また、表 4.2 に送信回路で用いた部品を載せる。

送信回路の Bluetooth のモジュールは、FB155BC を用いた。FB155BC は、Bluetooth のシリアル通信に対応したモジュールで、1200 ~ 230400[bps] に対応し、3.3[V] の電圧で駆動する。信号の変換は、図 4.2.1 のオペアンプで行っている。オペアンプはコンパレータとして使い、- 側に入力する電圧と Bluetooth モジュールからの出力を比較し、高い場合は HIGH、低い場合は LOW として出力することでレーザの発光を制御して信号とする。オペアンプの後にあるトランジスタは、レーザに入力する信号の調整のため、電流を増幅させている。実装した送信回路では、Bluetooth モジュールに 3.3[V]、オペアンプとトランジスタに 5[V] の電圧が必要であるため、9[V] 電池から三端子レギュレータによる電圧変換を行っている。

4.3 受光回路

4.3.1 受光回路の実装

受光回路は、4.2 節の送信回路によるレーザの信号をデバイスが受信するための回路である。受光回路の回路図を図 4.3.1 に、プリントボードに実装した受光回路の写真を図 4.3.2 に示す。また、表 4.2 に受光回路で用いた部品等を載せる。

レーザ信号の受光は、回路上のフォトダイオード (PD) で行う。PD は、レーザを受光すると微弱電流を出力するので、オペアンプ OPA2134 を用いた電流電圧変換回路で電圧として増幅し出力する。増幅した電圧は、4.2 節で述べた送信回路と同様に、コンパレータで基準電圧と比較してデジタル信号に復調し、受光回路を接続したデバイスに出力する。受光回路とデバイスの接続は USB シリアル変換モジュールを通じて用いて実装した。

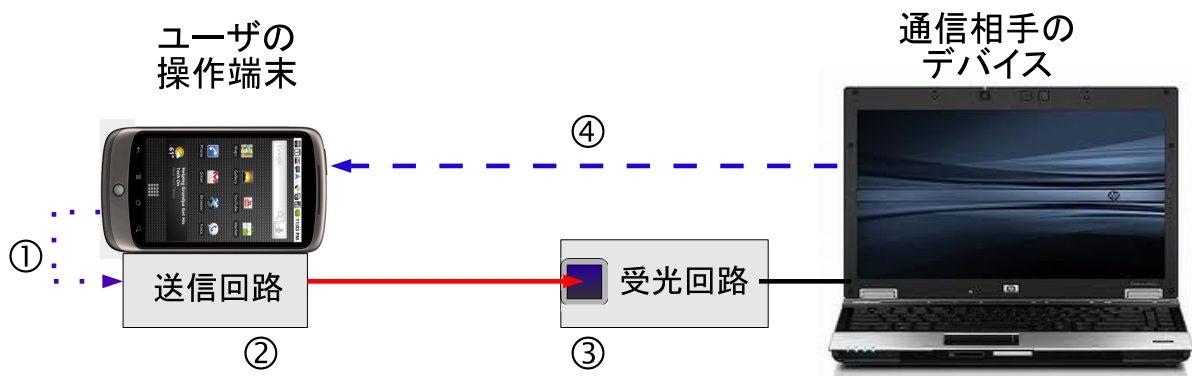


図 4.1.1: UDU-L 実装の概略図

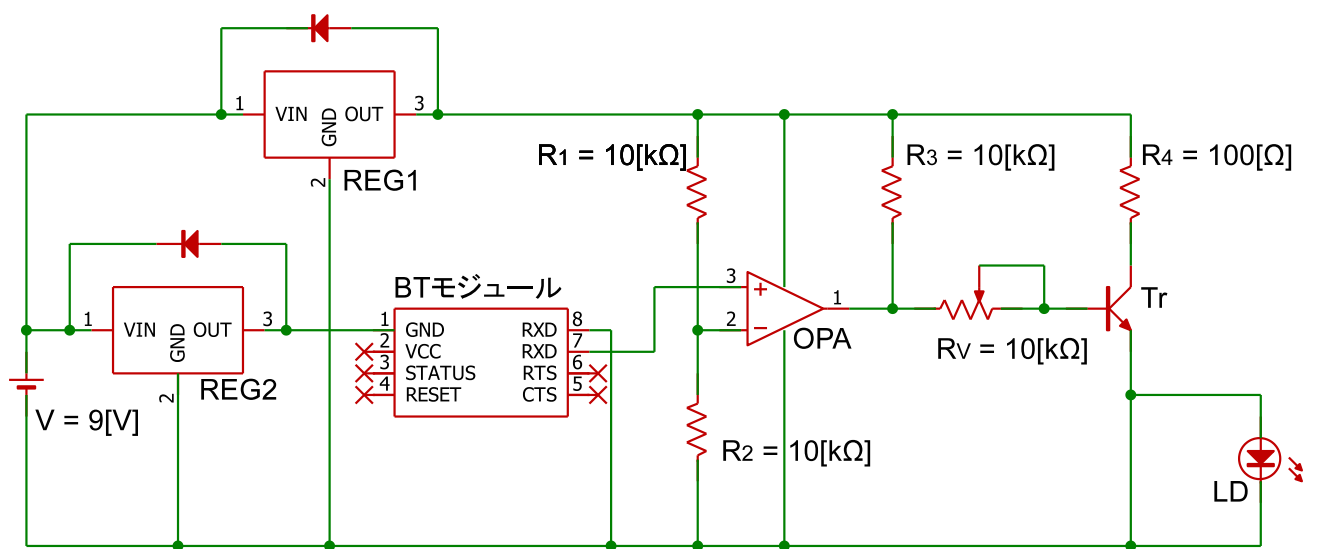


図 4.2.1: 送信回路の回路図

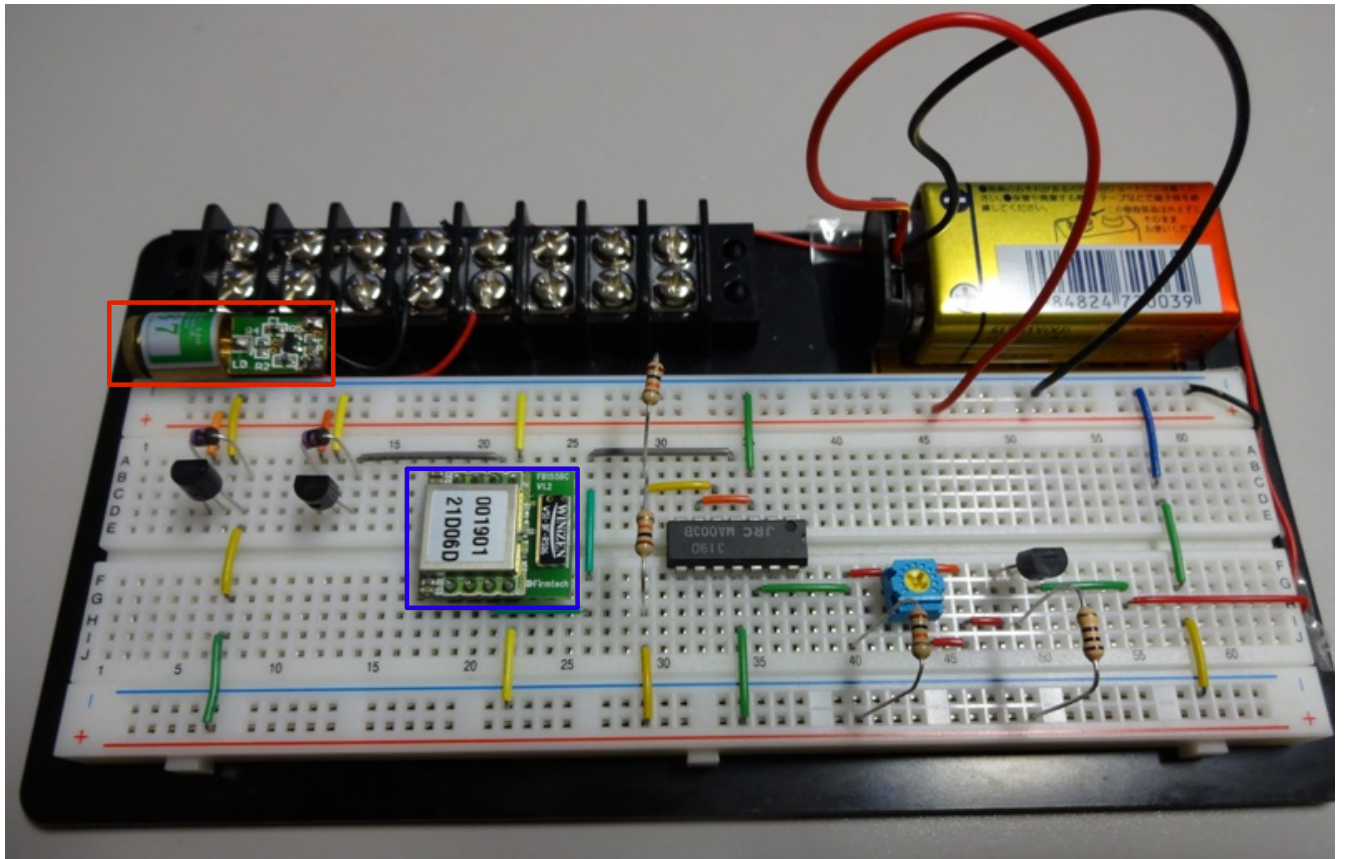


図 4.2.2: 送信回路の実装

表 4.2: 受光回路の各パラメータ

回路記号	部品名
PD	Si PIN フォトダイオード S3204-08
OPA1	OPA2134
OPA2	NJM319
R1	カーボン抵抗 1 / 4 W 15[k]
R2	カーボン抵抗 1 / 4 W 5.1[k]
R3	カーボン抵抗 1 / 4 W 1[k]
R4	カーボン抵抗 1 / 4 W 10[k]
Rv	半固定抵抗 1 / 2 W 10[k]

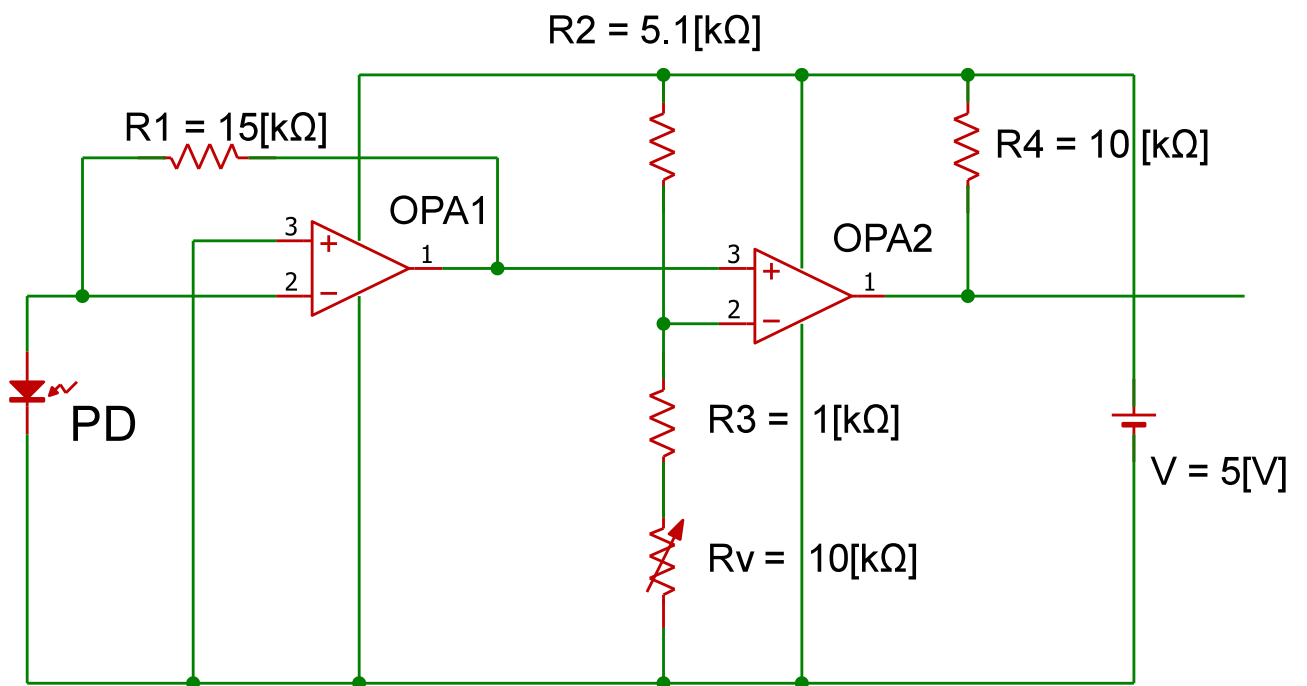


図 4.3.1: 受光回路の回路図

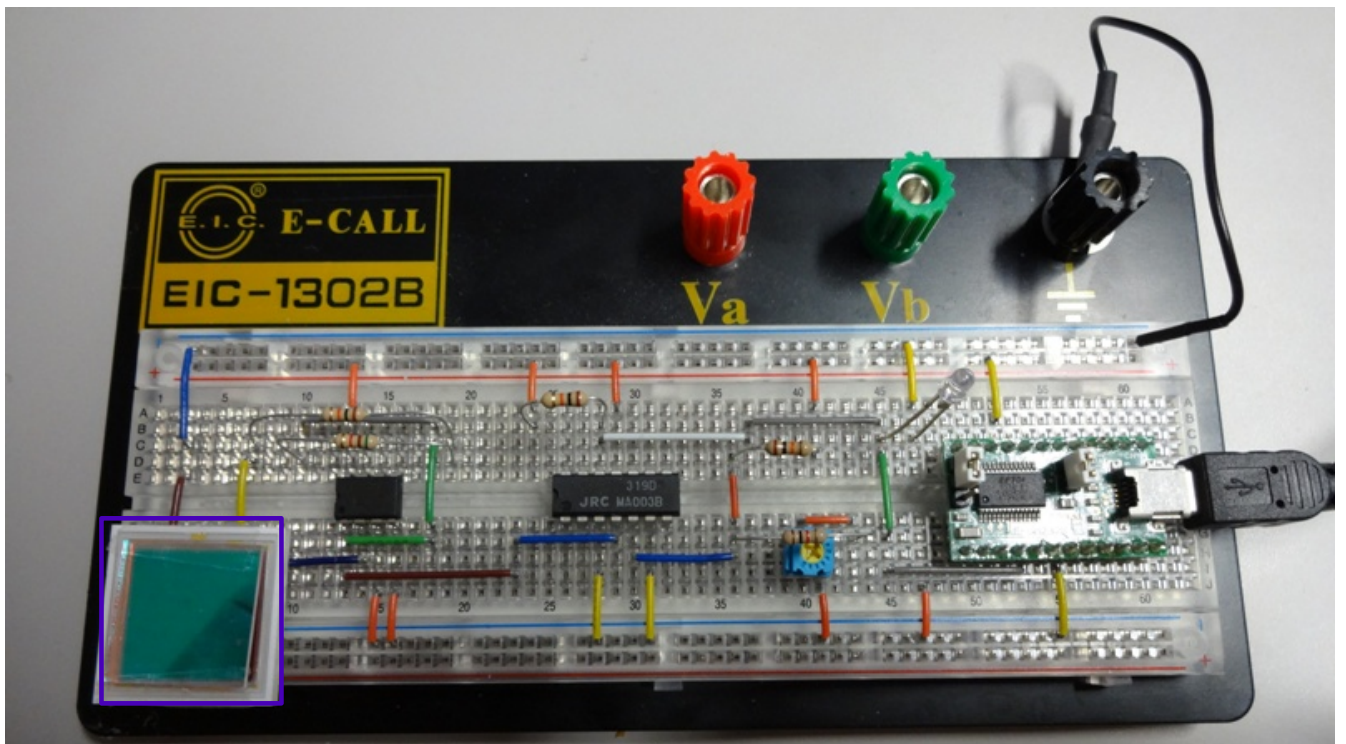


図 4.3.2: 受光回路の実装

表 4.3: フィルタの効果

	フィルタなし	フィルタ有り
蛍光灯	2.0[V]	1.2[V]
レーザー照射	3.1[V]	2.6[V]
SN 比	2.4	4.7

4.3.2 フィルタ

受光回路を実装するにあたり，受光部のフォトダイオード (PD) にダイクロイックフィルタを装着した。ダイクロイックフィルタとは，特定領域の波長を透過・反射する光学的フィルタである。実装した受光回路はレーザーによる信号の受光を目的としているため，レーザー以外の光はノイズとなる。室内で使う場合は，蛍光灯の光などの環境光を受光してしまうとレーザーの受光精度が下がってしまう。そこで，本実装では使用するレーザーの波長 (650[nm]) 付近を透過するフィルタとして，セラテックジャパン社のダイクロイックフィルタ (red) を PD の表面に装着することにより，レーザー以外の環境光の影響を軽減した。表 4.3 にフィルタによる蛍光灯の影響の差を示す。表 4.3 から，フィルタを装着した場合の方が SN 比が大きい。SN 比は，信号 (レーザー) に対する雑音 (蛍光灯) の影響を表す指標で，この値が大きい程信号に対する雑音の影響は小さいため，フィルタは有用であると判断できる。

4.4 レーザ通信後の接続手順

レーザー通信後の接続手順について図 4.4.1 に示し，以下で詳しく述べる。

1. 接続するデバイスからのコールバックに備えて待機
2. 受信した IP アドレスが正しいか CRC を用いてチェック
3. IP アドレスに対しコールバックし，デバイスの機能を通知
4. 通知された機能に対応したアプリケーションを起動し通信開始

手順 1 にあるように，ユーザの操作する端末上のプログラムは，送信回路に IP アドレスのデータを送信する際に，接続するデバイスからのコールバックを受けるために別スレッドで待機する。通信したいデバイス側は，手順 2 で受光回路で受信したデータに対して CRC でチェックを行い，受信したデータ (IP アドレス) が正確か判断する。受信したデータが正確なものと判断できたら，手順 3 にあるように受信した IP アドレスに対してソケット通信で接続を行う。このとき，相手デバイスが持つ機能を同時に通知する。例えば，デバイスがモニターであれば画像や映像表示，プリンターならば印刷可能といった機能である。このように機能を通知することで，ユーザが操作する端末側は自動的に相手デバイスに対応したアプリケーションを起動できる。起動したアプリケーションに，接続したデバイスの IP アドレスを渡すことでデバイス接続を行うことができる。

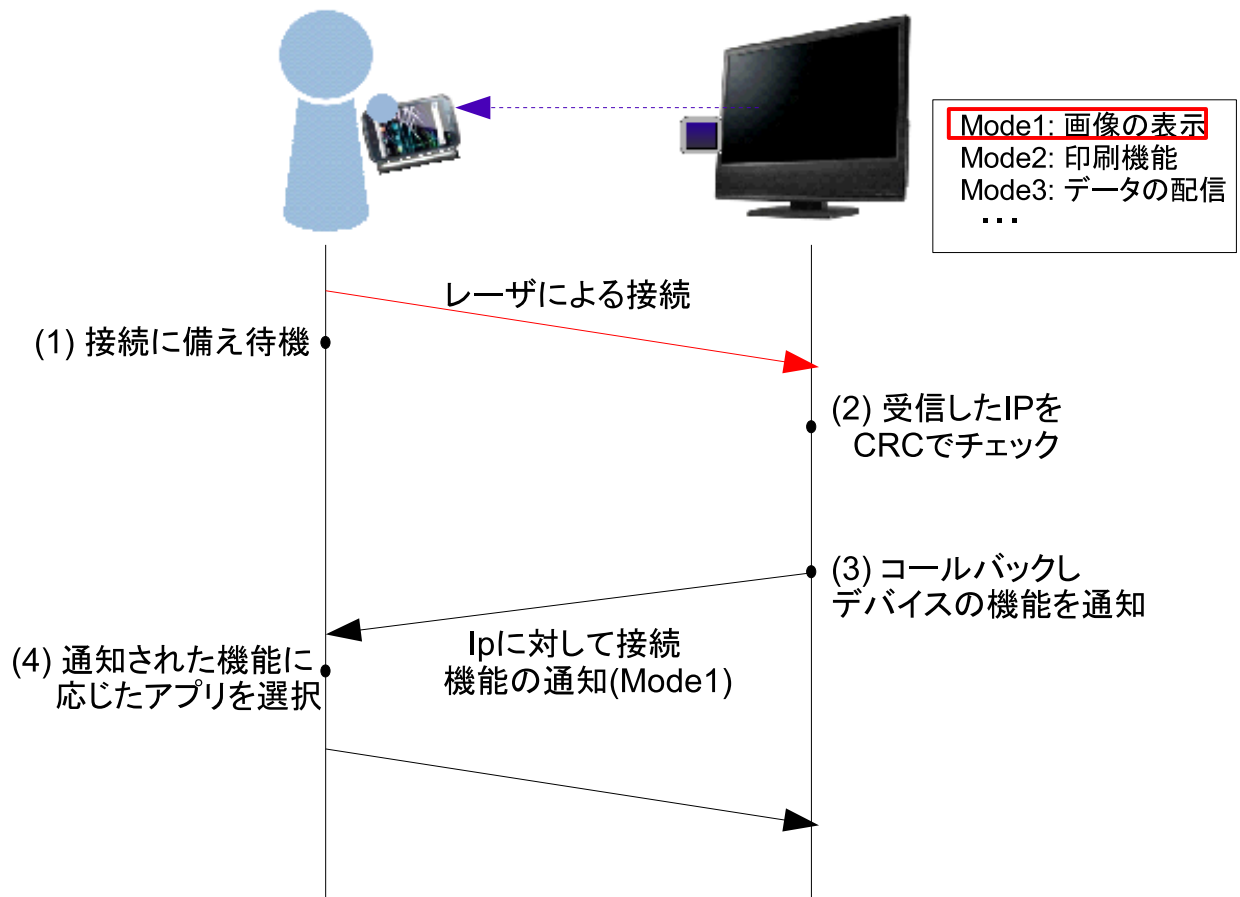


図 4.4.1: レーザ通信後の接続手順

第5章 初期実装と性能評価

提案手法 UDU-L の実装を行いシステムの性能評価を行った。ユーザの操作デバイスとしてスマートフォン，通信の相手デバイスとしてノート PC を用い，上記のデバイス間通信を 4 章で述べた回路による可視光通信によって確立した。レーザによる送信信号は，開始文字を「[」，終了文字を「]」として実装した。レーザによる接続後のデバイス通信は無線 LAN で行った。初期実装では，レーザの照射によるデバイス接続を検証し，システムの有効性を示す。

5.1 レーザによる可視光通信の速度

システム UDU-L を 4 章で述べた回路で実装し，レーザ通信の通信速度を検証した。本システムのレーザ通信の速度は，送信・受光回路のシリアル通信の速度で決定する。このシリアル通信の速度はスマートフォンとノート PC のプログラムから設定できる。本実験では，スマートフォンからレーザ信号に変換した文字データを，ノート PC に接続した受光回路で受信し，ターミナルソフト TeraTerm[21] で確認し送信データを検証した。本実験では通信速度による通信の可否を調べるため，レーザと受光器の距離は 10[cm] の至近距離で行った。実験環境を表 5.1 に示す。

実験の結果，レーザ通信では 4800[bps] までの速度で通信が確認できた。実験の通信の様子 (4800[bps]) を図 5.1.1 と図 5.1.2 に示す。図 5.1.1 と図 5.1.2 から，Android 側から送信した文字データがノート PC 側のターミナルソフト Tera Term で表示できていることがわかる。レーザによる通信データは 3.2.2 節で述べたように 80[bit] であるため，通信速度 4800[bps] でのレーザ通信で通信データを送信するためには，受光器部分を 0.017[s] 照射すればよい。実際にシステムを使用する場合，レーザを照射するタイミングを考慮し通信データ二回分の時間レーザを照射するとしても，0.04[s] の照射で接続に必要なデータを送信することが出来る。

表 5.1: 実験環境

携帯デバイス (OS)	Nexus One(Android2.3.3)
携帯デバイスの CPU	ualcomm QSD8250 Snapdragon 1GHz
携帯デバイスの Memory	512MB
ノート PC(OS)	Dell Vostro3500(WIndows7 Professional)
ノート PC の CPU	Intel Corei5 2.53GHz
ノート PC の Memory	4GB
通信環境	Wi-fi IEEE802.11g 54Mbps

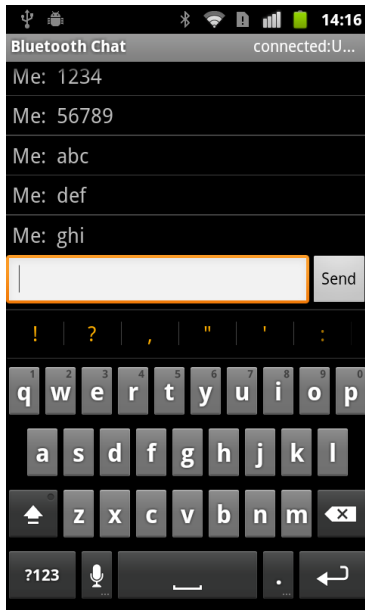


図 5.1.1: 4800[bps] でのレーザ通信 (Android 側)

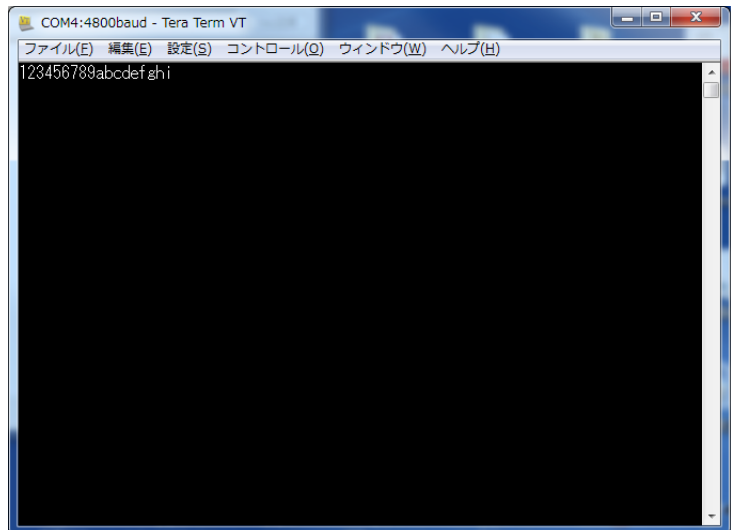


図 5.1.2: 4800[bps] でのレーザ通信 (ノート PC 側)

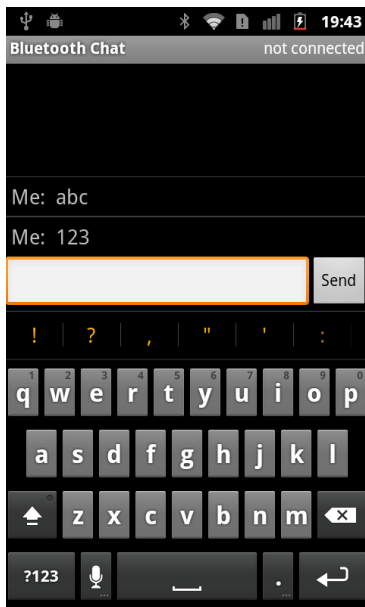


図 5.1.3: 9600[bps] でのレーザ通信 (Android 側)

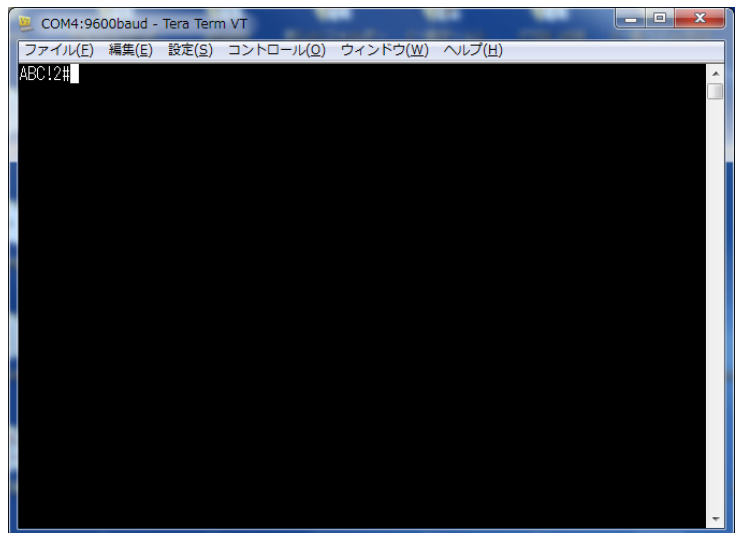


図 5.1.4: 9600[bps] でのレーザ通信 (ノート PC 側)

表 5.2: 通信速度ごとの最適基準電圧

通信速度 [bps]	基準電圧 [V]
1200	1.73
2400	1.49
4800	0.91

5.2 レーザによる通信の精度

実装の結果，通信速度 4800[bps] のレーザによる通信を行うシステムを実現した．そこで本節では，レーザと受光器間の距離と通信速度を変化させた場合の通信データへの影響を検証する．本実験の目的は次の 3 点である．

- 通信速度による通信データへの影響を検証
- 離れた距離のデバイスに対する実システムとして UDU-L 有効性の検証
- レーザの通信速度の変化によるデータ通信の精度検証

本実験では，スマートフォンの IP アドレスを，3.2.2 節で述べた 8[byte] のデータの形で複数回ループさせて送信した．ノート PC 側は，予め IP アドレスを含む 8[byte] のデータを持たせ，レーザで受信したデータと比較し，正しくデータが受信できているかを検証する．受信データの検証は以下の手順で行った．

1. 受信データの最初にある開始文字 (‘\’) を受信するまで待機する
2. 開始文字の後にある 7[byte] のデータを保持する
3. 受信データと予め持たせたデータを比較して，受信した回数を数える
4. 保持したデータ 7[byte] 全てが正しいか判定し，全て受信できた回数を数える

この手順を 100 回繰り返した．レーザによる送信データの最初の文字 (‘\’) を受信できた回数のうち，その後 7[byte] データのそれぞれが何回正しく受信できたかを計測し，レーザによる通信の成功率として評価した．また，7[byte] データ全てが正しく受信できた回数を測定することで，実際に UDU-L によるレーザ通信を行った場合の接続確立の精度を評価した．本実験では，5.1 節でデータの通信が確認できた 1200，2400，4800[bps] について，1～5[m] の距離を 1[m] 間隔で測定し，各通信速度・距離毎に 5 回測定しその平均を求めた．また，予備実験として 1200[bps]，2400[bps]，4800[bps] について，レーザと受光器が至近距離で最も通信精度が良くなる受光回路の基準電圧を測定した．予備実験の結果を表 5.2 に示す．本実験では予備実験で得られた基準電圧で測定を行った．

5.2.1 通信速度による通信データへの影響を検証

実験の結果を図 5.2.1，図 5.2.2，図 5.2.3 に示す．また，各距離・通信速度での送信データ全体の精度については別に以下表 5.3，表 5.4，表 5.5 に示す．実験の結果から，まず通信速度による通

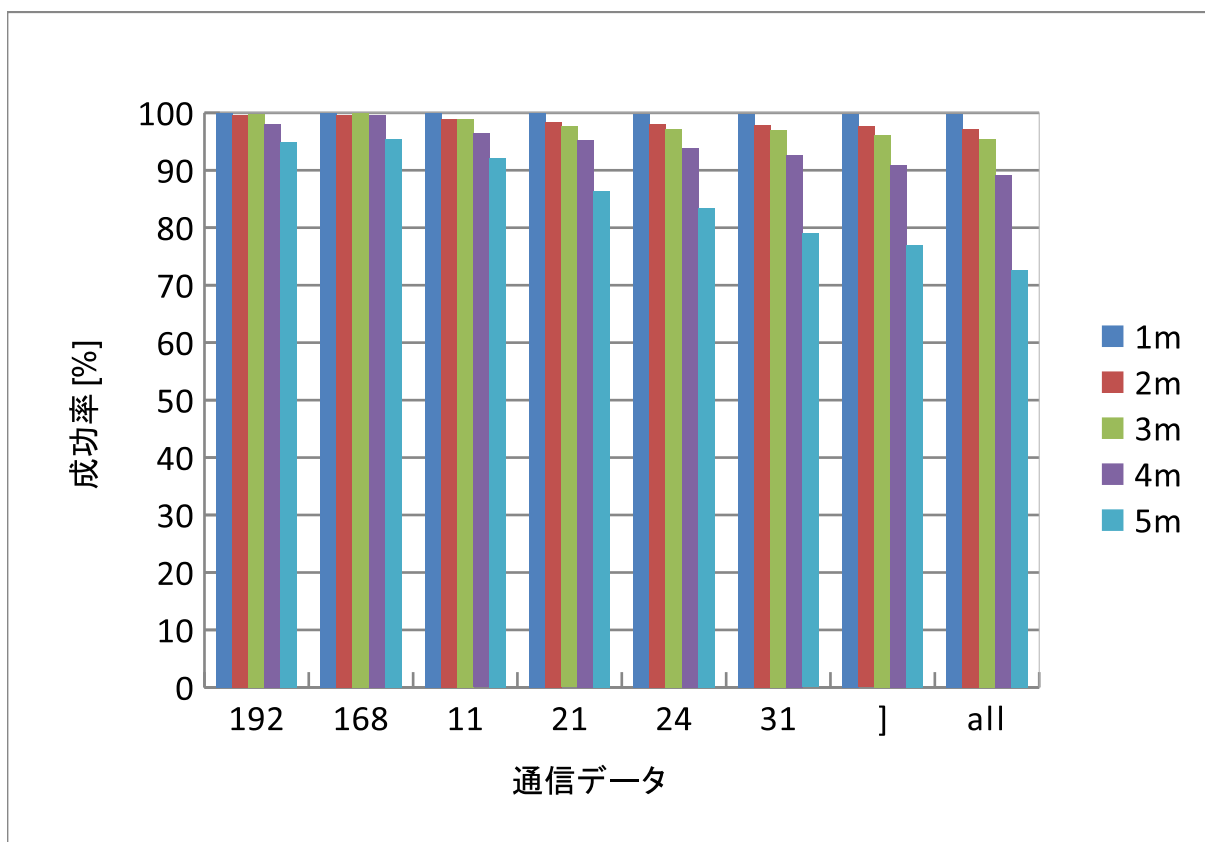


図 5.2.1: レーザによる通信精度 1200[bps]

表 5.3: 通信精度 (1200[bps])

距離 [m]	成功率 [%]
1	99.8
2	97.2
3	95.4
4	89.2
5	72.6

表 5.4: 通信精度 (2400[bps])

距離 [m]	成功率 [%]
1	99.2
2	96.2
3	96.4
4	89.8
5	75.8

表 5.5: 通信精度 (4800[bps])

距離 [m]	成功率 [%]
1	85.0
2	83.2
3	83.0
4	76.4
5	72.4

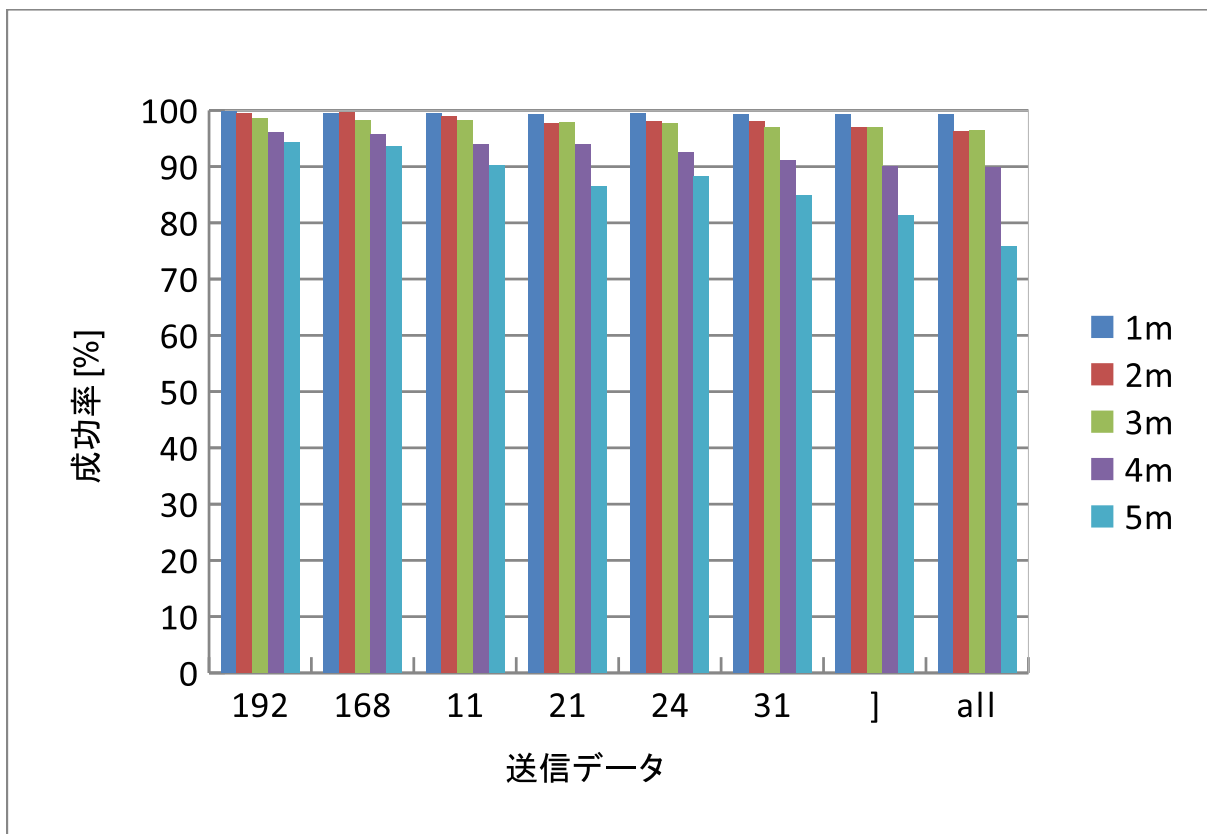


図 5.2.2: レーザによる通信精度 2400[bps]

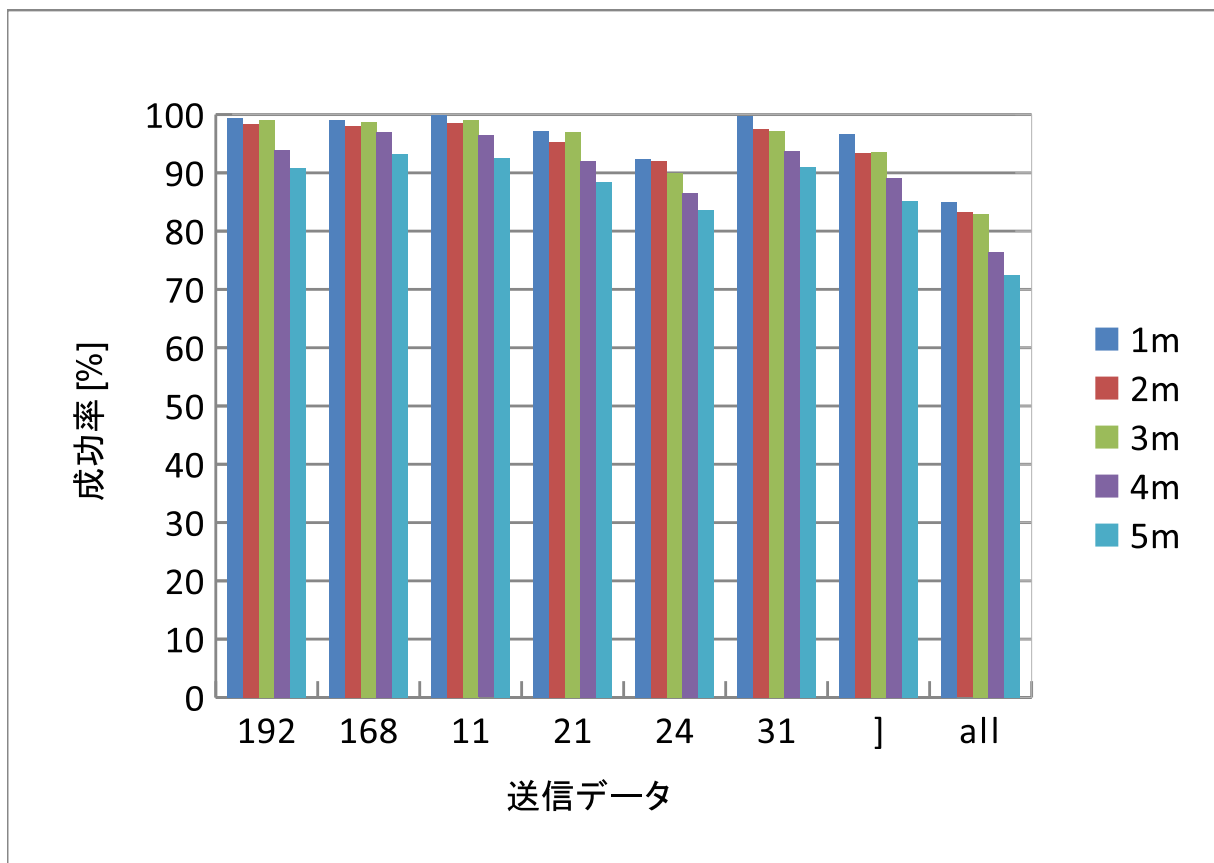


図 5.2.3: レーザによる通信精度 4800[bps]

表 5.6: 連続照射での成功率と時間

連続照射する回数 (通信速度)	成功率 [%]	要した時間 [s]
1(1200[bps])	72.6	0.07
2(1200[bps])	92.5	0.13
3(1200[bps])	98.0	0.20
1(2400[bps])	75.8	0.03
2(2400[bps])	94.2	0.07
3(2400[bps])	98.6	0.10
1(4800[bps])	72.4	0.02
2(4800[bps])	92.4	0.03
3(4800[bps])	97.9	0.05

信データへの影響を検証する。表 5.3, 表 5.4, 表 5.5 の 1[m] の成功率に注目する。通信速度が 1200[bps], 2400[bps] の場合は, ほぼ 100[%] の成功率を示しているが, 4800[bps] の場合は 85[%] と成功率が低下している。この原因としては通信速度が速くなり, 受光器に照射されるレーザーのパワーが減ることにより, レーザの当たる角度やタイミングによって信号として拾えない場合があるためである。5.1 節で述べたように 4800[bps] の場合, 接続に必要なデータの送信には受光器部分を 0.017[s] 照射すればよい。UDU-L は 3.2.2 で述べたように, レーザ信号を複数回ループして送信する。仮にレーザーの受信に失敗しても, 4800[bps] では図 5.2.4 のように 1 回でも 0.017[s] 間信号を受信すれば接続できる。したがって, 4800[bps] の通信速度による接続は十分実用可能と判断した。

5.2.2 距離の離れたデバイスに対する UDU-L の有効性の検証

離れた距離にあるデバイスに対する有効性について考察するため, 通信速度 1200[bps] の結果に注目する。図 5.2.1 にあるように, 受信データの最初の 1byte 目 (192) は, 3[m] までの距離ではほぼ 100 % 受信できていることが分かる。また, 4[m] 以上の距離では, 4[m] のとき 98[%], 5[m] のとき 95[%] の精度で通信が可能である。また, 他の通信データに注目しても, 送信するデータによる通信の成功率のばらつきは見られないことが分かる。次に, レーザによる送信データ全体の精度について注目する。表 5.3 より, 1[m] の距離では 99.8[%] で通信できており, 5[m] の距離でも 72.6[%] の確率で通信が成功している。実システムとして UDU-L を用いる場合は, 通信データ 8[byte] を一度でも受信できれば良い。そこで, 距離 5[m] における各通信速度で接続に必要なデータの成功率を表 5.6 に示し検証する。

表 5.6 の結果から, 各通信速度とも 2 回連続で受光器を照射すれば 90[%] 以上の確率で接続可能と判断できる。この結果, 4800[bps] の通信速度であれば 0.03[s], 1200[bps] でも 0.13[s] 間受光器を照射すれば接続が確立できるため, 5[m] までの距離ならば十分実用可能であるといえる。ただし, レーザの送信機と受光器の距離に応じて通信精度の低下がみられる。この傾向は, 図 5.2.1 から分かるように受信した他のデータでも同様に現れている。通信精度低下の主な原因は, レーザを照射する際のユーザの手振れによる影響である。

表 5.7: 速度による通信精度の比較

送信データ	成功率 (1200[bps])[%]	成功率 (2400[bps])[%]	成功率 (4800[bps])[%]
192	95.0	94.2	90.8
168	95.4	93.6	93.4
11	92.2	90.2	92.6
21	86.4	86.4	88.4
24	83.4	88.2	93.6
31	79.0	84.8	91.0
']	77.0	81.4	85.2
all	72.6	75.8	72.4

5.2.3 レーザの通信速度の変化によるデータ通信の精度の検証

通信速度による通信精度の変化について考察するために、表 5.3 と表 5.4 に注目する。それぞれの距離ごとの通信の成功率を見ると、1[m] での成功率はほとんど差が無いが、3[m] 以上の距離では 2400[bps] の方が高い成功率を示している。具体的に 1[m] と 5[m] での通信成功率の差を見ると、1200[bps] では 27.2[%] に対し 2400[bps] では 23.4[%] であり、距離による通信成功の影響は 2400[bps] の方が小さいことが分かる。同様に、表 5.4 と表 5.5 を比較すると 1[m] と 5[m] での通信成功率の差は、2400[bps] では 23.4[%] に対し、4800[bps] は 12.6[%] である。1200[bps]、2400[bps]、4800[bps] について、それぞれの 5[m] のときの受信データの成功率を表 5.7 に示す。表 5.7 の 1200[bps] と 2400[bps] を比較すると、2400[bps] の方が通信の成功率が高い。特に、5byte 目以降のデータについて高い成功率を示している。同様に 2400[bps] と 4800[bps] を比較すると、7byte 目まで 4800[bps] が高い成功率を示している。これは、通信速度が上がることで、通信のために受光器にレーザを照射する時間が短縮されることによる。実際に通信するために必要な照射時間は、1200[bps] で 0.07[s]、2400[bps] では 0.03[s]、4800[bps] では 0.017[s] となる。このため、通信データの後半部分の成功率が高くなり手振れによる影響が小さくなる。対して、全体の成功率は 4800[bps] よりも 2400[bps] が高いが、これは、5.2.1 節で述べた様に、受光器に照射されるレーザのパワーが減る為である。

5.3 システム UDU-L の性能評価

5.1 節、5.2 節の結果から、システム UDU-L のレーザ通信部は実用可能であると分かった。そこで本項では、システム UDU-L によるデバイス接続のユーザ評価を行い、以下の 3 点について検証する。

- UDU-L によるデバイス間通信に要する時間
- UDU-L による接続の使い勝手
- 正確に IP が通信できなかった場合の挙動

また、実際に UDU-L を用いたアプリケーションを実装し、実システムとしてのユーザ評価を行う。

表 5.8: 接続に要した平均時間

	時間 [s]
被験者 1	2.1
被験者 2	2.1
被験者 3	2.0

表 5.9: 接続回数

	接続回数
被験者 1	23.3
被験者 2	26.0
被験者 3	30.7

5.3.1 デバイス間通信に要する時間

システム UDU-L を用いたデバイス接続に要する時間を測定した。本実験は、レーザから受光器までの距離を 2[m]、5.2 節の結果からこの距離で精度の良い 2400[bps] の通信速度で行い、スマートフォンと送信回路を被験者に持たせ、ノート PC に接続した受光器にレーザを照射させることで、スマートフォンとノート PC 間を接続させた。また、スマートフォンとノート PC 間の接続が確立した際にピープ音を鳴らし、被験者に接続を通知した。測定は、送信回路のレーザを ON にしてから、スマートフォンとノート PC 間の接続してピープ音になるまでの時間をストップウォッチで計測し、3 人の被験者でそれぞれ 3 回ずつ実験して個人ごとの平均時間を求めた。実験の結果を表 5.8 に示す。

結果より、デバイス間接続を行うまでの時間は 2 秒程度であった。UDU-L のデバイス接続と既存手法を比較する。Bluetooth で同様の接続を行う場合、2.2.1 節で述べたように、周囲のデバイスを探索し、ユーザがデバイスリストから手動で選択するペアリング操作が必要である。対して、UDU-L では Bluetooth のユーザが手動で行う設定が無く、短い時間で接続できる。したがって、UDU-L によるデバイス接続は十分実用的である。また、各被験者の結果に大きな差異が見られないことから、UDU-L を使用する場合個人差の影響は小さいことを確認した。

5.3.2 接続回数

5.3.1 節から、UDU-L のレーザによる通信確立に要する時間は実用的であった。そこで本項では、UDU-L による通信確立の容易さを評価するために、一定時間内にスマートフォンとノート PC 間の通信を何回確立できるかを測定した。また、レーザで受信したデータを検証することで、間違っただけ IP を受信して接続していないかを確認した。実験は測定時間 30 秒、5.3.1 節の実験と同様に距離 2[m]、通信速度 2400[bps] で行い、3 人の被験者でそれぞれ 3 回ずつ実験して個人ごとの平均回数を求めた。また、接続が確立した際にピープ音を鳴らし、被験者に接続を通知した。以下に表 5.9 に結果を示す。結果より、30 秒間に確立した接続回数は 25 回前後で、1 秒に 1 回の割合

表 5.10: アプリによる画像の送信回数

	接続回数
被験者 1	6.3
被験者 2	7.0
被験者 3	6.7
被験者 4	6.0
被験者 5	5.3

で接続が確立できていることが分かる。また、被験者による個人差が小さく、安定して接続できていることが確認できる。2400[bps]の速度では、受光器部分をレーザーが通過するだけでレーザーの通信が完了できたため、被験者から受光器をピンポイントに当て続ける必要が無く、容易に接続できたとの意見を得た。したがって、本結果と5.3.1節の結果から、システム UDU-L を用いることで既存手法よりも早く容易にデバイス間の接続が可能なが確認できた。

また、本実験においてレーザーによる通信で受信した IP アドレスを確認した。この結果、被験者 3 人の 3 回の実験で受信した IP アドレスは全て正しいデータであることが確認できた。これは、受信したノート PC 側で IP アドレスの照合を行い、正しい IP アドレスのデータでのみ接続を行ったためである。この実験結果から、UDU-L による接続では、間違った相手 (IP アドレス) に接続する問題は無いことが確認できた。

5.3.3 UDU-L によるアプリケーション評価

UDU-L を用いたアプリケーションを実装し、実システムとしてのユーザ評価を行った。実装したアプリケーションは、スマートフォンからレーザー信号を照射することでノート PC との接続し、無線 LAN で画像データをスマートフォンからノート PC に送信して表示させる。アプリケーションのを図 5.3.1、図 5.3.2 に示す。また、実験の様子を図 5.3.3 に示す。

このアプリケーションでは、図 5.3.1 の画面中央にある send ボタンを押すことで一定時間レーザーから信号を送信する。送信する信号 (IP アドレス) は、アプリケーション側が自動で取得している。信号を送信している間に、レーザーが受光器を照射してスマートフォンとノート PC で接続すると、画面下部に表示されている画像データを無線 LAN 経由でノート PC に送信する。送信する画像データは、画面上部のギャラリーから選択でき、選択した画像は画面下部に表示される。このアプリケーションを用いて、実システムとして UDU-L の使い勝手を評価した。評価方法は、30 秒間でスマートフォンからノート PC に画像データを送信し、何枚の画像をノート PC の画面に表示できるかを計測した。本実験も、5.3.1 節の実験と同様に距離 2[m]、通信速度 2400[bps] で行い、5 人の被験者でそれぞれ 3 回ずつ実験し、個人ごとの平均回数を求めた。表 5.10 に結果を示す。

結果より、送信できた画像データは 6 枚前後で、約 5 秒で一枚の画像送信ができた。ただし、この画像送信にかかった時間のうち、画像データの送信とノート PC 側の画像表示に時間を要しており、実際に UDU-L によるデバイス間接続はより短い時間で行える。また、被験者から本アプリケーションを使用した感想として、「直観的で使いやすかった」、「想像していたよりも早く接続ができた」との意見を得られた。

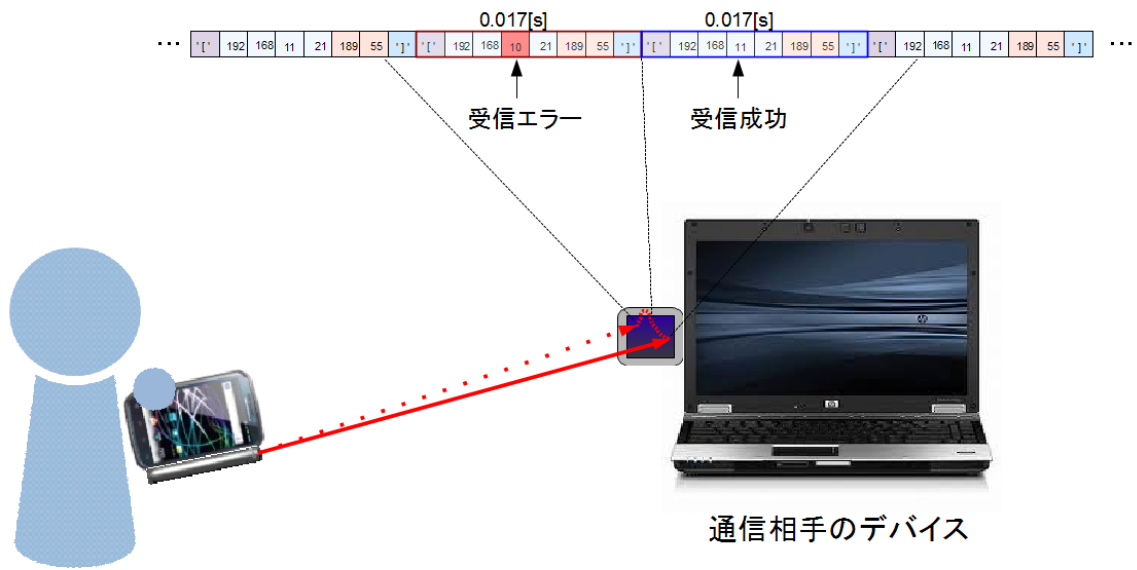


図 5.2.4: レーザの繰り返し送信による接続のイメージ

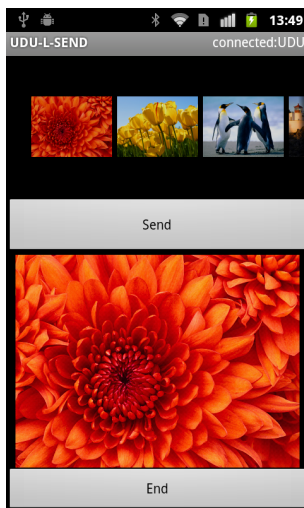


図 5.3.1: 画像通信アプリ



図 5.3.2: 画像通信アプリ (PC 側)



図 5.3.3: UDU-L による画像送信実験の様子

表 5.11: 送信データと受信データの比較

送信 (受信) 文字	表示データ	送信 (受信) 文字	表示データ
'a'	0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1	'b'	0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0
'A'	0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1	'B'	0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0
'c'	0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1	'1'	0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1
'C'	0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1	'!''	0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1
'2'	0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1	'3'	0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1
'2'	0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1	'#''	0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1

5.4 性能評価から得られた今後の課題

初期実装による性能評価から得られた今後の課題について述べる。5.1 節の検証から 4800[bps] の通信速度でのレーザによる通信を行うシステムを実現した。ここでは、今後レーザでの通信速度をより向上させるための課題を挙げる。9600[bps] の通信速度で 5.1 の実験を行った結果を図 5.1.3 と図 5.1.4 に示す。図 5.1.3 と図 5.1.4 より、9600[bps] では'2' 以外の 5 文字は正確に受信できていないことがわかる。この文字のうち、最初の文字'a' に注目する。Android から送信した文字'a' は二進数で表すと (0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1) となる。対して、ノート PC 側の受信文字'A' を二進数で表すと (0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1) となる。シリアル通信では、送信データである 8bit を後ろから送信するため、送信したレーザの信号と受光したデータは Android 側が (1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0)、ノート PC 側が (1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0) となっている。つまり、送信データの低位 3bit が受信できておらず、本来 (1, 1, 0) である部分が (0, 1, 0) と受信している。同様に、各文字での Android 側とノート PC 側での受信データをそれぞれ二進数表示して以下表 5.11 に示す。このように、各文字とも'1, 1' と連続する 2bit を'0, 1' と判定しているため正確に通信できていないことが分かる。これは、回路の立ち上がり時間が十分でないことによる。したがって、9600[bps] 以上の速度で通信を行う場合には、本実装で受光回路の増幅に用いているオペアンプ (OPA2134) のよりも高いスルーレートのオペアンプで回路を作成する必要があることが分かる。

また 5.3.3 によるユーザ評価から、レーザの送信回路が持ちにくかったとの意見も得られた。このデバイス持ち辛さを改善することで、レーザを受光デバイスに当てる際の手振れ改善も期待できるため、デバイス形状の改良も今後の検討課題と考える。

第6章 応用例

既存手法では、デバイス間連携の手法について様々な方法が検討されている。そこで、提案手法 UDU-L を既存手法に適用した場合についての有用性を考察する。

まず、ホームネットワークなどの室内環境におけるデバイス連携へ UDU-L の適応について考察する。室内におけるデバイス連携の既存手法では 2.3 節で述べたポインティングデバイスを用いたデバイスの連携がある。この手法では、ポインティングデバイスと呼ばれる端末から、連携したいデバイス同士にそれぞれ命令を送ることで、デバイスの連携動作を行っている。しかし、この手法では事前に個人情報の登録が必要となる。またサーバを介して連携動作を行うため、各デバイスも事前登録したものしか使用できない。この連携動作を UDU-L を用いて行う場合を考える。UDU-L では、スマートフォンなどユーザが操作する端末で接続を行うため、事前の個人情報の登録が必要ないという利点がある。また、レーザによる IP アドレスの受渡しによって通信を行うため、サーバなどにデバイス情報を登録することなく通信できる。連携動作についても、接続するデバイスに応じたアプリケーションの URL を表示することで、ユーザが自発的な登録を行わずともデバイスに応じた連携動作が可能となる。このように、室内環境におけるデバイス連携への UDU-L の適用は、既存手法と比べて事前設定を必要としない点で有用性があると言える。

屋外に設置されたデバイスとの連携では、2.3 で述べた携帯端末とサイネージのユーザインタフェースの連携手法がある [2]。この連携を UDU-L で行う場合、レーザによる IP アドレスの受渡しで接続を行えるため、サーバ側に携帯端末の識別情報を登録する必要はない。また、接続に使用する IP アドレスもそのネットワークに接続した一時的なものであるため、UDU-Lの方がセキュリティの点で優位である。またこの手法では、複数個のディスプレイへの言及は無いが、UDU-L ならばレーザによるデバイス指定を行うため、ディスプレイが並列する場合でも、ディスプレイ個別に表示を変更や、複数ユーザでの同時使用が可能である。以上の点から、屋外でのデバイス連携について UDU-L は有効である。

このように、UDU-L によるデバイス接続は屋内・屋外ともに既存手法よりも容易な接続ができる。既存手法の課題であった、通信したいデバイスを指定する煩雑さを、レーザで照射するという直観的な方法で解消した。また、IP アドレスを通信相手に直接送信しコールバックさせて接続するため、既存手法のようにデバイス情報をサーバに事前登録する必要なく使える利点もある。

第7章 結論

本論文では、レーザーによる直観的なデバイス接続手法 UDU-L を提案した。この提案手法 UDU-L では、レーザーによって接続相手のデバイスを指定することで、デバイス連携を直観的な操作により実現している。加えて、接続に必要なレーザーの照射時間は非常に短く、受光器にレーザーを横切らせるだけで接続できるため、容易な接続が可能である。

この UDU-L の性能を評価するために、レーザーの送信回路と受光回路をそれぞれ製作し、UDU-L の実装を行い、以下の点について評価を行った。

1. レーザ通信で可能な通信速度の評価
2. デバイス間の距離と通信速度がレーザー通信の精度に及ぼす影響
3. 実システムとして実装した画像送信アプリケーションのユーザ評価

1 の評価から、4800[bps] の通信速度でのレーザーによる通信を行うシステムを実現した。通信速度 4800[bps] では、受光器部分を 0.017[s] 照射しただけで接続できる。レーザーを照射するタイミングを考慮し通信データ二回分の時間レーザーを照射するとしても、0.04[s] の照射で接続に必要なデータを送信できる。2 の評価から、デバイス間の距離が離れる程、手振れが原因で通信精度が落ちるが、5[m] の距離では 7 割以上の精度でデータの送信が行われていた。システム UDU-L では、受光側のデバイスがレーザーによる IP アドレスを 1 回受信できれば接続できるため、5[m] 程の距離ならば十分実用可能である。さらに、通信速度が速くなれば、手振れによる影響が小さくなり、レーザーの通信精度が上昇することが分かった。3 のユーザ評価から、UDU-L によるレーザーを用いたデバイス接続は、直観的で使いやすいとの評価を得た。また、個人差によるデバイス接続への影響について、大きな差異は認められなかった。

UDU-L の既存手法への適用を考察した。結果 UDU-L によるデバイス接続は屋内・屋外ともに、既存手法よりも容易な接続を実現した。また、既存手法の課題であった、通信したいデバイスを指定する煩雑さを解消し、提案手法の有用性を示した。今後の課題としては、回路部品の改良によるレーザーでの通信速度の向上、ユーザ評価で得られたデバイス(送信回路)の改良、UDU-L を実際のデバイス連携サービスに適用し、その評価を行うことが挙げられる。

謝辞

本論文は、電気通信大学大学院情報システム学研究科情報ネットワークシステム学専攻博士前期過程に在籍中の研究成果をまとめたものである。

本研究を進めるにあたり、日々の指導と多大なる助言を頂いた、情報システム学研究科情報ネットワークシステム学専攻ネットワークコンピューティング学講座、入江英嗣准教授に感謝する。他学部から入学し、情報分野の知識を持っていなかった私に、二年間充実した研究生生活を過ごさせて頂いたこと深謝する。また、同講座の吉永努教授ならびに吉見真聡助教にも、多大なる指導と助言頂いたことを感謝する。

そして、研究を手伝って頂いた大木さん、放地さん、システムのロゴを作ってくれた芝さん、先輩である清水さんをはじめ、研究室のメンバーに感謝する。本研究室の皆に支えて頂いたおかげで、二年間の貴重な時間を過ごすことができた。ここに改めて感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 白物家電がスマホと連動 パナソニックが「稼ぎ頭」に託す新機軸. 日本経済新聞 電子版, 8 2012.
- [2] 齋藤吉之. 携帯端末とサイネージの連携による情報処理システム及び方法, 1 2009.
- [3] *IEEE 802.15*. <http://www.ieee.org>.
- [4] *Bluetooth*. <http://www.bluetooth.com>.
- [5] 大場昇. 機器連係動作システム、連係動作実行方法、連係動作可能な機器およびポイントインテイングデバイス, 8 2008.
- [6] *IrDA*. <http://www.irda.org/>.
- [7] Anthony Lo, Weidong Lu, Martin Jacobsson, Venkatesha Prasad, and Ignas Niemegeers. Personal networks: An overlay network of wireless personal area networks and 3g networks. In *Mobile and Ubiquitous Systems - Workshops, 2006. 3rd Annual International Conference on*, july 2006.
- [8] Doru Calin, Andrew R. McGee, Uma Chandrashekhar, and Ramjee Prasad. Magnet: An approach for secure personal networking in beyond 3gwireless networks. Technical report, BELL LABS TECHNICAL JOURNAL, 2006.
- [9] M. Bauer, R. L. Olsen, M. Jacobsson, L. Sanchez, J. Lanza, M. Imine, and N. Prasad. Context management framework for magnet beyond, 2006.
- [10] Ibrohimovna, Malohat, Groot, and Sonia Heemstra de. Reputation-based service management and reward mechanisms in fednets to improve the quality of cooperation between personal networks. In *Digital Telecommunications (ICDT), 2010 Fifth International Conference on*, pp. 98 –103, june 2010.
- [11] *Zigbee*. <http://www.zigbee.org/>.
- [12] 綾塚祐二, 松下伸行, 暦本純一. Gaze-link:実世界指向ユーザインタフェースにおける「見ているものに接続する」というメタファ〈特集〉次世代インタラクションのための情報技術. 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 6, pp. 1330–1337, 6 2001.
- [13] 小木真人, 清水裕基, 三好健文, 吉永努, 入江英嗣. 「覗き込み」を利用した直感的な外部ディスプレイアクセス方式の提案. 情報処理学会研究報告. UBI, [ユビキタスコンピューティングシステム], Vol. 2011, No. 12, 2011-11-17.
- [14] 島田重人, 武田洋子. 可視光通信の動向と its への応用. Technical Report 4, 東芝レビュー, 2009.

- [15] T. Komine and M. Nakagawa. Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 50, No. 1, pp. 100 – 107, feb 2004.
- [16] L.D. Paulson. Accessing the internet via overhead lights. *Computer*, Vol. 44, No. 3, pp. 18 –21, march 2011.
- [17] Li Tianze and Wang Shuyun. The design and analyses of wireless laser communication system. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom '09. 5th International Conference on*, pp. 1 –4, sept 2009.
- [18] 暦本純一. Inforoom : 実世界に拡張された直接操作環境. *インタラクシオン* 2000, pp. 9–16, 2000.
- [19] 進張, 文太郎志築, 二郎田中. 2zd-8 レーザポインタストロークを利用する大画面向けインタラクシオン手法 (動作認識・大画面, 学生セッション, インターフェース). *全国大会講演論文集*, Vol. 70, No. 4, 2008.
- [20] 小木真人, 大木裕太, 吉永努, 入江英嗣. レーザー光を利用したデバイス間通信における直観的な接続方法の提案. *マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム*, pp. 1027–1033, Jul 2012.
- [21] *Tera Term*. <http://sourceforge.jp/projects/ttssh2/>.

発表文献

- [1] 小木 真人, 清水 裕基, 三好 健文, 吉永 努, 入江 英嗣「覗き込み」を利用した直感的なリモートディスプレイアクセス方式の提案．情報処理学会研究報告, Vol.2011-UBI-32 No.12 pp.1-8. 2011年11月24日, お茶の水女子大学
- [2] 小木 真人, 大木 裕太, 吉永 努, 入江 英嗣．レーザー光を利用したデバイス間通信における直観的な接続方法の提案．マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム, pp.1027-1033, Jul. 2012.
- [3] 入江 英嗣, 放地 宏佳, 小木 真人, 榎原 裕大, 芝 星帆, 眞島 一貴．AirTarget: 光学シースルー方式HMDとマーカレス画像認識による高可搬性実世界志向インターフェース．マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム, pp.1295-1304, Jul. 2012.
- [4] 小木 真人, 入江 英嗣, 大木 裕太, 吉永 努: IP通信開始時におけるレーザー光を利用した接続方法, 特願 2012-242584, 出願日 2012.11.02