

ポインティングにより動作する
光空間通信デバイスの研究

光藤雄一

システム情報工学研究科
筑波大学

2009年11月

目次

1	はじめに	7
2	光信号を用いたポインティングデバイス	13
2.1	実世界環境とポインティング	13
2.2	タグへのポインティングと情報取得	15
2.3	光信号による情報の読み出しとポインティング	16
3	GhostTag システムの仕組み	19
3.1	光信号への干渉とその映像	19
3.1.1	映像と光信号	19
3.1.2	光信号への干渉	20
3.1.3	光信号への干渉が可能な範囲	21
3.2	干渉された光信号の検出	22
3.3	タグシステムの形成	24
4	GhostTag システムの実装	27
4.1	全体の構造	27
4.2	送信器 (タグ)	30
4.2.1	タグの基本的な構造	30
4.2.2	発光部	30

4.2.3	信号制御部	33
4.2.4	タグの実装の一例	35
4.3	受信器	40
4.3.1	光信号の受信	40
4.3.2	光信号の反射と、フォトダイオードへの入射	43
4.3.3	イメージセンサの組み込み	48
4.3.4	イメージセンサ表面からの反射による信号領域の発生	50
4.4	受信器の構成例	57
4.4.1	2つの情報の流れ	57
4.4.2	イメージセンサ系とフォトダイオード系の組み合わせ	58
4.4.3	ポインティングと情報の流れ	60
4.5	RealEyeCommunicator	60
4.6	VisionCommunicator	61
4.7	送信器の構成とポインティング	62
4.7.1	テレクリックとポインティング	62
4.7.2	タグの発見	63
4.7.3	2つの発光素子群の配置	64
5	GhostTag システムによるアプリケーション	71
5.1	GhostTag の機能とユーザに提供できるサービス	71
5.1.1	タグの添付とポインティング	74
5.1.2	大容量タグデバイスとしてのサービス	75
5.2	PointSpeech	77
5.2.1	音声と場所の関係の理解	77
5.2.2	音声案内	78
5.3	PointSearch	78
5.4	PointSpeech の実装	79

目次	5
5.4.1 送信器	79
5.4.2 受信器	80
5.4.3 フィルタの設計の例	81
6 関連研究	85
6.1 実世界の物体への情報添付	85
6.1.1 RFID	85
6.1.2 Augmented Reality 環境と2次元コード	86
6.1.3 動的に変化する2次元タグ	87
6.1.4 アドホック通信とインタラクション	87
6.1.5 光空間通信	88
6.2 実世界でのポインティング	89
6.2.1 ポインティング動作に関する研究	89
6.2.2 ポインティングが有効なケース	89
6.2.3 レーザポインタ	90
6.2.4 画像認識	91
6.2.5 その他の手法によるポインティング	92
7 評価と検討	93
7.1 GhostTag システムの評価	93
7.1.1 光信号への干渉可能領域と通信の品質	93
7.1.2 空間分解能	94
7.1.3 GhostTag システムの評価	95
7.2 光信号の干渉可能領域の実測	95
7.2.1 VisionCommunicator の干渉可能領域の実測	95
7.2.2 RealEyeCommunicator の干渉可能領域の実測	98
7.3 視野角とタグの視角の関係	103

7.4	実装の容易さ	104
7.5	タグからの情報転送	104
7.6	今後の研究	105
8	まとめ	107

第 1 章

はじめに

Ubiquitous Computing 環境 [1] は、実世界のあらゆる場所で情報機器によるサービスを楽しむことができる環境と定義される。このサービスのひとつとして、実世界の物体に様々なアノテーション（注釈）情報を電子的、あるいは別の手段で添付し、これを適宜読み出して情報支援を行う方法が提案されている。情報の添付は、一般には、情報を封入したタグと呼ばれる小さな物体を、実世界の物体に添付することでおこなわれる。近年さまざまな場面で普及している RF タグ [2] はこうしたタグの中でも代表的なものであり、また二次元コード [3] のような、印刷物として取り扱うことの出来るタグも、広く使用されている。

タグに封入された情報は、専用の読み取りデバイスを用いて読み取る。このとき、特別な動作で情報を読み取ることはやや煩雑である。ユーザが情報を得たいタグを自然な動作で選ぶと、同時に情報も読み取られるような仕組みであることが望ましい。

例えば、RF タグでは、ユーザがタグに接触または近接することでタグを選択している。接触は、実世界の物体を選ぶ際に行われる自然な動作の一つである。RF タグは、微弱な電波で情報を送受信しているので、読み出しは、タグに読み出し器を「接触」または「近接」させることで行われる [2]。このシステムでは、ユーザによるタグの指示と、タグからの情報の読み出しが、同じ「接触」または「近接」

という動作の中に含まれている。

また、二次元コードでは、ユーザは対象のタグを「撮影」することで選択する。撮影は接触ほど一般的な動作ではないが、実世界の対象物を直感的に指定することが可能である。このシステムでは、タグからの情報の読み取りを画像処理によって行っている [3, 4]。このシステムでも、ユーザによるタグの指示と、タグからの情報の読み出しが、同じ「撮影」という動作の中に含まれている。

このように、ユーザによる「選択」と、デバイスの「情報取得」の方法が一致しているデバイスは、ユーザがストレス無く使用することが出来る。

ところが、タグとユーザの距離が離れるにつれて、ユーザによる「選択」と、「情報取得」の方法を一致させることが困難になる。我々がやや離れた位置にある物体を指定する方法は、「指差し」か、「言葉による指定」のほぼ 2 つに限られる。このうち言語による指定は、ユーザにタグに関する事前の知識を求めることになるので直感性を欠く。特に、インターネット空間で用いられている接続のための手続きは、最も一般的な手続きでも URL を指定する必要があり、更に低レベルのネットワークでの接続にはホスト名、ポート番号、MAC アドレスなど、また、ネットワークの種類によっては SSID など、様々な情報が必要になる。こうした手続きは実世界環境で行うにはあまりにも煩雑である。

このため、「指差し」に代表される、身体動作による指定を用いることが多い。

また、このような距離にあるタグから情報を読み出すためには無線通信による情報転送が必要である。RF タグの場合、遠距離からタグの情報を読み取ろうとすると、読み取り可能な範囲を広くしなければならない。ユーザがタグを読み取ろうとすると、読み取り範囲の中にある全てのタグからの情報が受信されてしまう。さらに、特に電波の領域の周波数を持つ電磁波を使用した情報通信は、ある程度の大きさの遮蔽物があっても回折し、幾何学的な影の領域にまで電磁波が到達する。これは、多少の遮蔽物がある空間でも情報通信が可能な利点をもたらしているが、ある特定の空間から情報を読み出す用途での使用は想定から外れている。

二次元タグとカメラを組み合わせた情報転送手法では、映像を用いて情報を読

み出しているので、タグとの距離が離れてもタグを特定することは可能である。また、映像を用いていることから、タグとユーザの動作を同時に撮影することが出来る。ユーザの指示動作を画像認識することが出来れば、ユーザが指したタグを特定することが出来るので、タグの指定と読み取りを同時に行うことが出来る利点がある[5]。

しかし、タグの視角は距離に反比例して減少する。映像による情報読み出しでは、読み出せる情報量はタグの視角に比例する。このため、遠距離から読み出しには寸法の大きなタグが必要となる。タグが大きくなると物体に添付することは困難になり、運用しづらいシステムとなる。

これらのシステムは、RF タグは旧来の電波をもちいた無線機の技術を、二次元コードはCCD やCMOS イメージセンサといった、撮影用の機材を応用して作成された情報通信システムである。これらの技術は元々ユビキタス環境で、タグとの通信を目的に作成されたものではない。電波を用いた無線通信技術は、主に遠方にある無線局と安定した情報通信を行うことを目的として開発されている。これに対してタグ環境は、見通し距離内に無数の無線局があり、交信の相手は常に変化する。また、イメージセンサは人間の見る映像を撮影するための機材である。一方で、タグ環境では映像ではなく、実世界のタグからの情報の読み出しが求められる。

このなかで、特に遠距離にある無線局（タグ）を指定し、情報を読み出す手法は旧来の技術の想定からは離れたものである。

本論文は以下の構成で記されている。

2章では、このシステムの全体像を説明する。本研究で用いている無線通信技術は、本来は広範囲に情報を配信するために開発された技術である。本研究の目的である、タグとの通信システムは、空間的に限られた範囲から情報を読み出すことが目的である。無線通信技術を用いてタグシステムを構築する場合には、空間的に限られた場所からの信号を読み出すための工夫が必要である。本研究では、空間内への信号へ直接干渉することで特定のタグからの信号を読み出す機能を実現した。この技法を用いたシステムの全体像について説明を行う。

3 章では、ポインティングによって無線信号への干渉を行うための技法について説明する。一般に、電波などの長めの波長を持った無線信号は通信路上に小さな障害物があった場合でも、これらの影響を受けずに伝播する特性がある。ポインティングに用いられる物体（ポインタ）は、特性上それほど大きな物体ではないため、長い波長をもった信号媒体では干渉させることが困難である。このため、本研究では可視光に近い波長の信号を使用して情報転送を行う。また、ポインタを用いて光信号に干渉するということは、光信号を遮断する事になる。これはタグからの信号が受信器に到達しなくなるということなので、タグからの信号が読み取れなくなる。この問題の解決のために、1つのタグに複数の光源を組み合わせ設置し、一部のタグからの信号が途絶えると他の光源からの光信号が受光される技法を新たに開発した。この技法を用いると、光信号の一部が遮断されることにより変調成分が発生する仕組みを持つ。このため、ポイントされないタグからの光信号は受信器に受信されても情報を伝えることは出来ない。この機能により、ポイントされたタグからの信号を受信できるとともに、ポイントされないタグからの信号が自動的に除外されるようになった。

4 章では、2、3 章で挙げた技法を用いて実働するシステムを構成した。2、3 章で提案した技法は、タグへのポインティングと情報読み出しを、画像処理や位置検出を使用することなく行うことを可能とするものである。この技法では、光空間信号の通信路に干渉することにより信号を変調させている。この過程はタグと受信器の間の空間内で行われるので、タグおよび受信器の両方で、画像処理や位置検出を行う必要がなくなる。このため、実装部分には複雑な集積回路を使用することはなく、簡潔な回路を用いて実装することが可能である。このことは、高速信号を処理する回路を用いることが可能であるということにつながる。本研究では、市販の電子回路部品数点を用いることで、タグからの高速信号の読み出しが可能なシステムを実装した。

このシステムは、ユーザがポイントするとタグから発せられた光信号が受信される。光信号の変調周波数の上限は、画像処理システム等の様に処理系によって上限

を定められない。このため、音声情報のリアルタイム配信と、そのポインティングによる選択を同時に行うことが出来る。また、通信路内でポインティングを行い、画像処理や位置検出が必要ないという性質上、様々なイメージセンサを用いたアプリケーションを構築も出来る。このため、人間の眼球をシステム内に組み込むことも可能である。眼球を組み込むことで、ユーザは自らの視野内でポインティングを行い、タグからの情報（音声）を読み出すことが可能な実世界ポインティングシステムが構築される。このように本論文で述べる技法を用いて実装することが可能なアプリケーションを5章で示す。

6章では、「実世界の物体への情報添付」および「実世界でのポインティングシステム」に関する関連研究について述べる。本研究で述べる手法は、情報添付の機能および、ポインティングシステムの機能の双方を持つ。これらの機能は、従来の研究ではそれぞれ独立した研究分野であり、多数の研究が行われている。本研究の特徴は、これら2つの機能を1つのデバイスで実現することが可能な手法を提示していることである。従来のシステムがどのような仕組みを持ち、どのような環境で動作していたかを説明することにより、本研究で述べる手法の位置づけが明らかになる。

7章においては、6章で述べた位置づけを踏まえて実装実験を行い、評価を行う。この評価は、タグの大きさに該当する「光信号の干渉可能領域の実測」、「視野角とタグの視角の関係」、タグに収められる情報量に該当する「タグからの情報転送」、また、システム自体の特徴である「実装の容易さ」などの観点から行う。また、今後の研究課題について述べる。

第 2 章

光信号を用いたポインティングデバイス

2.1 実世界環境とポインティング

実世界にある物体を指定する際に、指差しなどのポインティングのための動作を使用することは極めて一般的に行われている。実世界環境では、実世界にある情報システムを指示する時にポインティングによって指定する方法について、多くの研究がなされている。ポイントによって実世界の物体を指定するためには、原理的にはポイントのためのベクトルと、物体の座標を同じ座標系で検知することが必要である。ポイントのためのベクトルが交差している物体がポイントされた物体となる。

ポイントのためのベクトルの検出のために磁気や映像を使用することが提案されている [6]。このシステムではポイントのための棒の向きをベクトルとしているがこのようなデバイスの延長線のベクトルを用いるだけでなく、指先と目を結ぶベクトルを用いたり [7]、自然な指差し動作からベクトルを推定する [8, 9] など、さまざまなベクトルを生成して使用する事ができる。この原理を用いたポインティングシステムを実現するためには、ある程度の範囲にある、ポインティングの目標となりうる全ての物体の座標と、ポイントのベクトルを同時に、一つの座標系内で常時検出することが要求される。

プレゼンテーション時に行われる、レーザポインタによるスクリーンのポインティングも、実世界へのポインティングであると言える。このタイプのポインティングは古くから研究されている [10, 11]。レーザは発信器の延長線上に伸び、目標と交わると光点を生じる。このことから、光点のあたっている場所がポイントのためのベクトルと物体が交差する点である。このシステムでは、レーザを使用することにより、ポイントのためのベクトルと物体との交差点が光点として示されるので、ベクトルと物体の交差点を直接求めることができる。目標が大画面に投影されているオブジェクトであれば、この画面の座標と光点の座標から、どのオブジェクトがポイントされたかを算定することができる。光点の座標検出には、イメージセンサを使用することが多い。

こうしたポインティングシステムは、「ポインタによって生じるカーソル等の座標と、目標の座標の関係からポインティングを判定する」という点から見れば、GUI 環境におけるポインティングシステム (図 2.1 上) と同じ構造を持つと考えることができる。GUI 環境のポインティングシステムは、表示されているアイコンの全ての座標を管理し、これらの座標とカーソルの座標を比較することで、ユーザがどのアイコンを指しているかを判断している。特にレーザポインタの光点を用いたポインティングは、GUI と同じ方式でポインティングを行っていると考えることができる。

こうした手法は、ある空間内の、ポイントのためのデバイスを含めた全ての物体の座標を常に把握する必要がある。座標検出のためには磁気センサやカメラが使用されているが [6]、これらのセンサで検知・撮影できる範囲は限られている。そのため、この方式のポインティングデバイスは室内 [6, 7] や大画面インターフェース [7, 11, 12] など限られた範囲で使用することを目的としたものである。これらのベクトルを用いて指示対象物を算定する方法では、実世界にある情報システムの 3 次元座標を管理するための監視システムが必要になり、技術的に管理システムが監視することが可能な、限られた範囲で使用するようになる。

本研究では、これらのシステムとは逆に、ボトムアップな環境の構築を目指す。

本研究で試みる形式は、物体にタグを張り付け、タグをポイントすることによってタグからの情報を読み出す手法を採る。

2.2 タグへのポインティングと情報取得

実世界環境では、実世界の物体にアノテーションと呼ばれる注釈情報を添付する手法が多用される。このときにアノテーションは、タグと呼ばれる小さなデバイスに格納される。タグは、RFIDのような電子デバイスであったり、または2次元コードのような印刷物である事もある。

実世界の物体をポインティングする時に必要なことは、物体の座標やポイントのベクトルそのものではなく、物体に関する情報である。したがって、アノテーションをおさめたタグをポイントすることによって、アノテーションを読み出すことができれば、そのシステムはポインティングシステムとしての機能を持つと考えることができる。

実世界の情報を得るときに映像を用いることはごく自然な発想である。綾塚らのシステム [5] では、ユーザの指と、2次元コード状のタグを同時に画像認識し、指によってタグの指定を行い、タグを画像認識することによって情報を読み出している。2次元コードの画像認識によってアノテーションを読み出す手法は広く普及した技術であるが、タグが遠方にあった場合、タグの視角が小さくなり、ある一定の距離以上では情報の取得が困難になる。情報の転送の効率を考えた場合、距離に関わらず安定して情報を得るためには、情報を時間的な変調で表現した光空間信号を利用するほうが有利である。

ところが、光空間信号の変調速度は、通常のイメージセンサのフレームレートである約30フレーム毎秒よりもはるかに早く、1GHz程度の変調がかけられていることも少なくない。このため、一般的なイメージセンサでは光信号として受信することは困難であり、フォトダイオードなどの撮影機能のない電子機器で受信することが一般的である。したがって、光信号を用いて情報転送をおこなう際には、画

像認識によってタグへのポイントを検知することが困難になる。

2.3 光信号による情報の読み出しとポインティング

そこで本研究では、光信号へのポインティングという新しい考え方を提示する。一般的な光空間通信技術では、可視光に近い波長の光を変調して情報転送に用いる。この光空間信号は、タグから発せられてユーザの携帯する受信器に入射する。受信器の中で光信号を受信する受光部は、入射した光の強弱を電気信号として出力するだけあるので、入射した光の空間的な情報を得ることができない。

光信号へのポインティングは、タグから受信器にいたる空間にある光信号に直接干渉することで選択する行為である。この手法の特徴は、座標検知を行うことなくポインティングを行うことができることに加え [13, 14]、画像処理によるタグやポイントの認識の必要も回避することができることである。

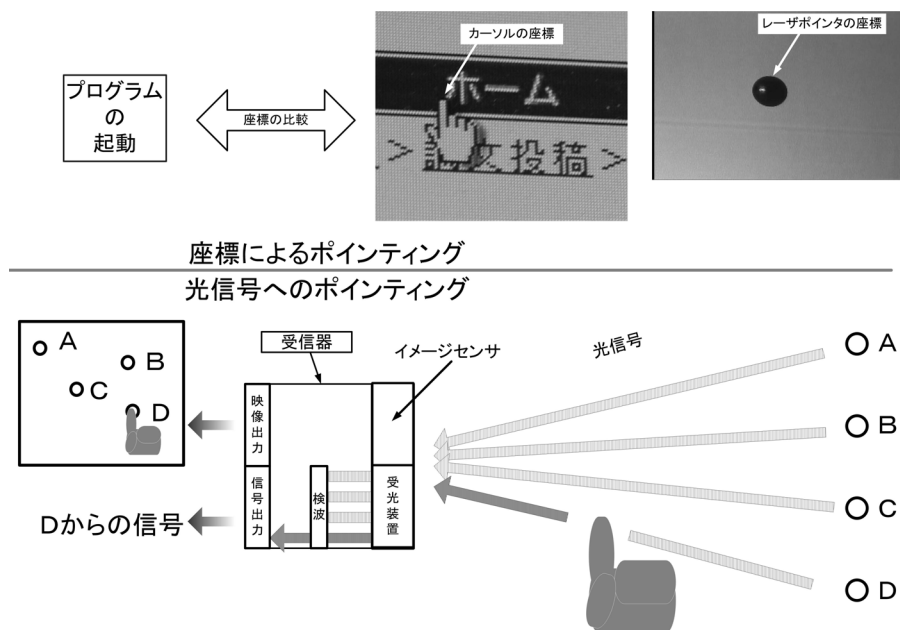


図 2.1: ポイントによって光信号を選択するシステム

いま、ユーザが物体に添付されたタグ ABCD を眺めているとする。ユーザが特定の物体（図中の D）のアノテーションを欲したときに、イメージセンサから物体とタグ D を見て、指などによって物体とタグ D をポイントしたとする（図 2.1 下）。このとき、指などの、タグを指示するための物体をポインタと呼ぶことにする。

イメージセンサから見て物体 D がポイントされたということは、物体 D とイメージセンサを結ぶ直線上、もしくはその近くにポインタが位置すると考えることもできる。この状態のときポインタは、ポイントされたタグを発してイメージセンサに入射する光信号に干渉する位置にある [13]。実世界に多数のタグがある場合、イメージセンサにはそれぞれのタグからの光信号が入射する。これらの入射信号を分離し、ポインタによって干渉されたタグを特定すれば、ユーザがポイントしたタグから発せられた信号を特定することが出来る。

本研究では、ポインタによる干渉によって周波数成分が変化する光信号の変調手法を実現した [15]。この光信号は、ポインタによって干渉されると、周波数成分が高くなる機能を持つ。このことにより、特定の周波数の信号を選択的に受信するだけで、ポイントされたタグからの光信号を検波することが可能となった（図 2.1 下）。

特定の周波数をもった信号を検波する手法は、光空間通信などの無線技術ではごく一般的に行われていることである。したがって、このシステムは、全体としては光信号によってデータを送る光空間通信装置そのものである。映像を使用するのはポインタで光信号に干渉する時だけであり、カーソルやポインタ、物体の座標の検知はシステム内のいかなる場所でも行われない。

この手法は、フレームレートや画像認識の際に必要な、複雑な電子回路や処理を用いる必要性が回避されるので、非常に高速な光空間信号を用いて情報読み出しを行うことが可能になる。このことは、遠距離からのポインティングを可能にするとともに、タグに大量の情報を添付できるという、タグシステムの観点から見ても新しい機能を実現することが可能になった。

第 3 章

GhostTag システムの仕組み

3.1 光信号への干渉とその映像

GhostTag システムは、タグから発せられた光信号をポイントすることで選択し、受信する機能を持つ光空間通信器である。GhostTag システムの特徴は、画像認識や座標計算を行うことなくポインティングを検出することである。GhostTag システムは、光信号を送信する送信器と、受信器の 2 つのモジュールから構成される。

3.1.1 映像と光信号

いま、点光源から光信号を発し、点光源から距離 d にある $2a \times 2b$ の大きさの受光面でこの光信号を受ける。受光面に入射する光信号は、点光源を頂点とし、受光面を底面とする四角錐内に存在している。この受光面の中心にピンホールを開け、受光面の背後に投影面を配置すると、投影面には受光面（ピンホール）から見た光景が投影される。この光景には点光源の映像が写っており、その映像は、点光源と焦点（この場合はピンホール）を結んだ線と投影面が交わった場所である（図 3.1）。ピンホールが受光面の中央にあることから、点光源の映像を発生させる光は、受光面に入射する光の中央に必ず位置する。ピンホールと投影面、受光面が GhostTag システムにおける受信器である。

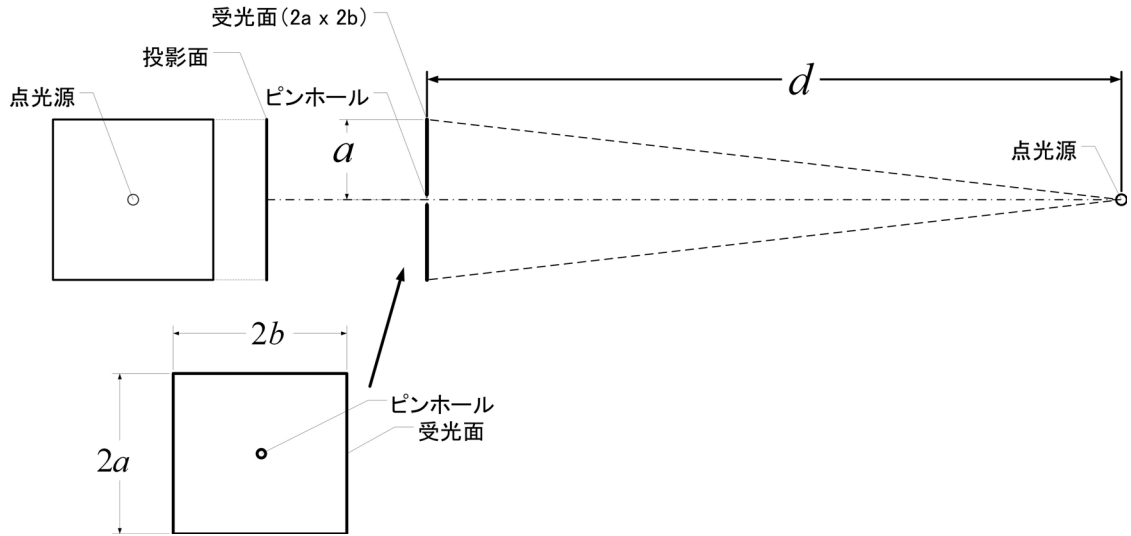


図 3.1: GhostTag システムの光学モデル

3.1.2 光信号への干渉

点光源から発せられて受光面に到達する光信号を遮断すると、受光面に光信号が到達できなくなるので受信器は光信号を受信することが出来なくなる。いま、受光面から距離 d_r の場所に光信号を遮断する性質の物体を位置させるとする。この物体の大きさは、四角錐の切断面と比べて大きいとする。この物体を、四角錐を切断する方向に移動させる。このとき、イメージセンサから見た物体は、点光源の脇から次第に移動し、点光源を覆い隠す。同時に受光面に入射している光信号を観察すると、物体の移動にあわせて受光量が減少し、遂には受光できなくなる (図 3.2)。イメージセンサを物体によって覆い隠す動作は、物体をカーソル、点光源もしくは光信号の領域をアイコンと考えると、GUI 環境におけるカーソルをアイコンに重ねる動作と類似して見え、直感的なポインティング動作と考えることが出来る。つまり、このシステムは、直感的なポインティング動作によって光信号へ干渉することが可能である。

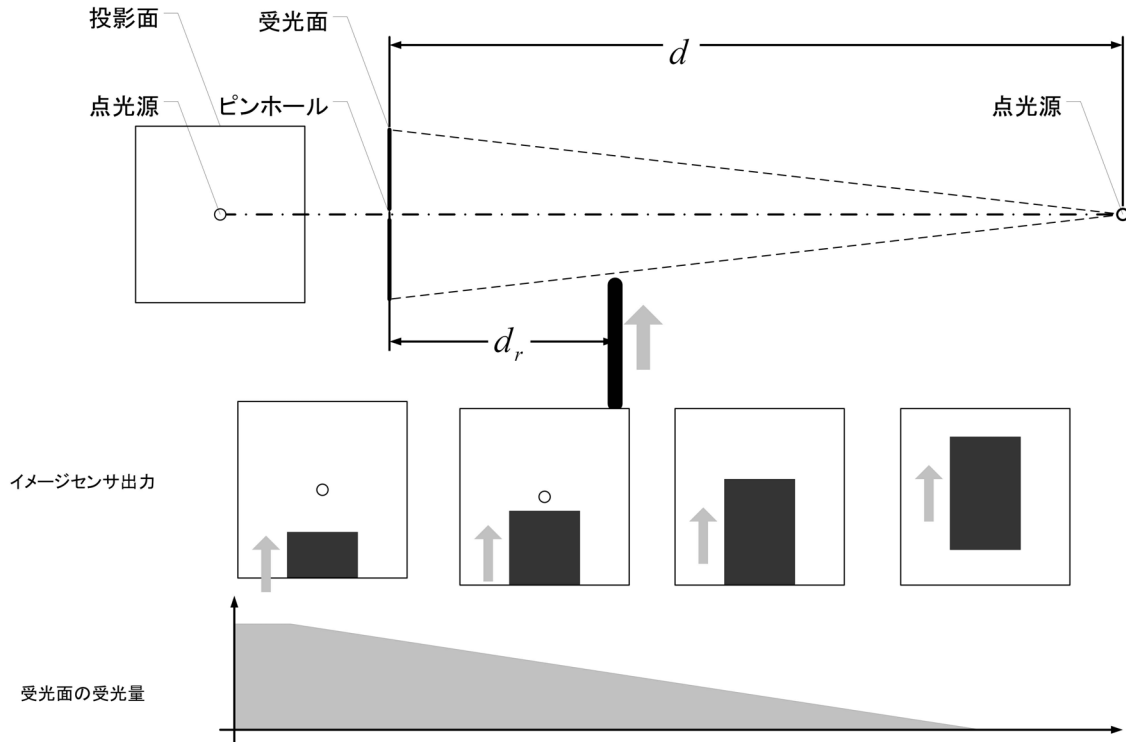


図 3.2: 光信号への干渉と、イメージセンサからの見え方

3.1.3 光信号への干渉が可能な範囲

ここで、光信号を遮断する際に投影面に投影される映像を観察する。遮蔽物が光信号へ干渉し始める場所は、遮蔽物が四角錐に接触し始めるところである (図 3.3)。また、遮蔽物の光信号への干渉が終わる場所は、遮蔽物の四角錐への接触が終わるところである。これは、距離 d_r における四角錐の切断面をピンホールを焦点として結像される映像上で見たものであることに他ならない。距離 d_r の遮蔽物がある点光源からの光信号に遮断できる範囲は、この切断面をピンホールから見たものであることになる。

点光源の映像は、常に四角錐の中央にあることから、この範囲はピンホールから見ると点光源の周囲の一定の範囲に必ず存在することになる。

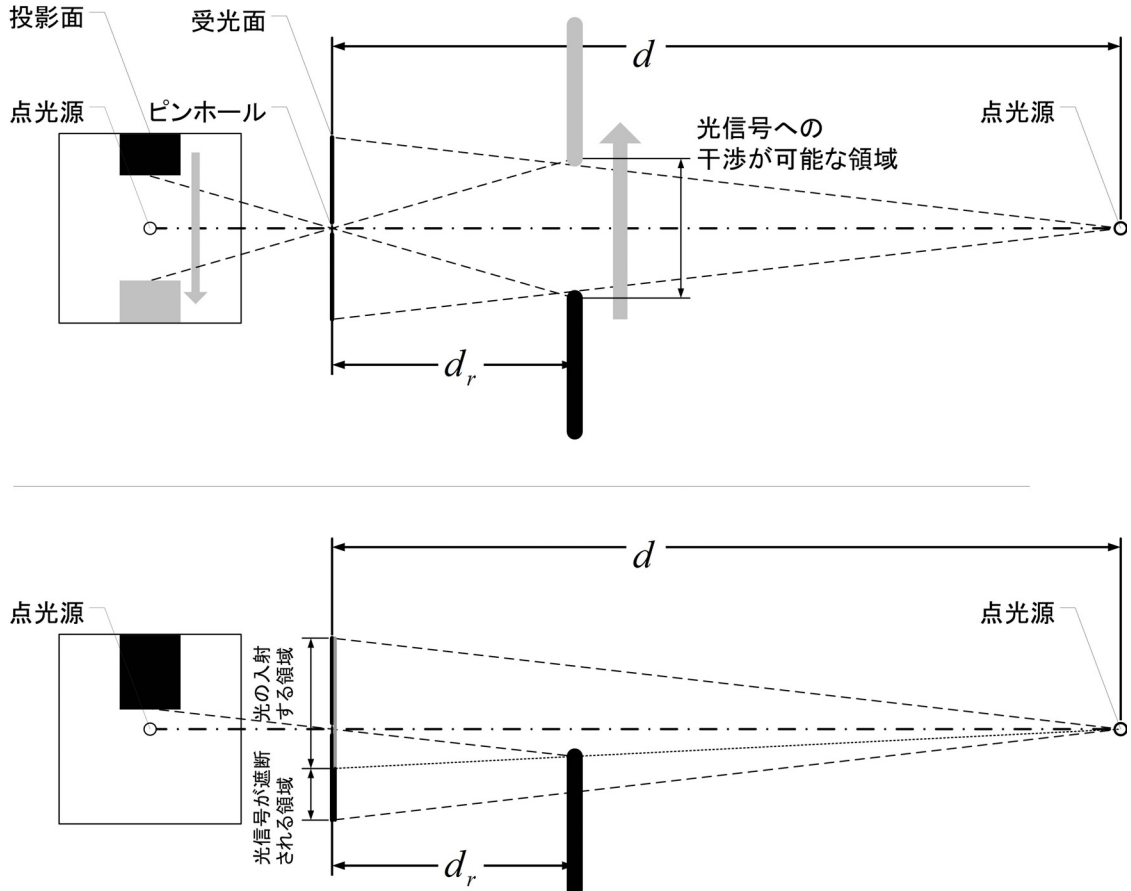


図 3.3: 光信号への干渉が可能な領域と、イメージセンサからの見え方

遮蔽物がこの領域に入ると、受光面の一部に入射する光が遮断される（図 3.3 下）。

3.2 干渉された光信号の検出

このシステムは、干渉された光信号が消失するシステムである。研究の意図するところは干渉された光信号を検出することであり、逆の動作である。そこで、干渉された光信号のみが検出できるように、図 3.4 のような工夫をした。このシステムは、送信器に 2 つの点光源を持たせ、同期反転した光信号を出力させる。このと

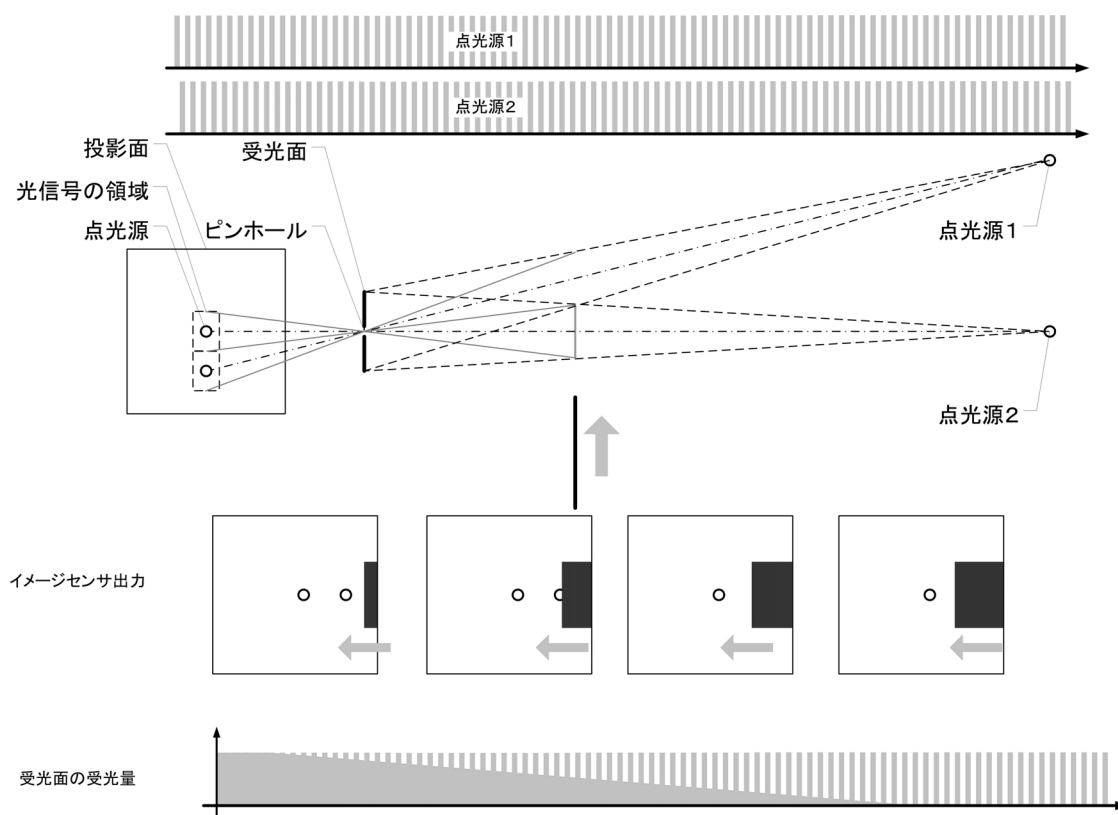


図 3.4: 同期反転信号を使用してポイント時に信号が観察されるモデル

き、両方の光源から光信号を受光した受光面は、0 Hz の信号を出力する。送信器が幾つあったとしても、受信器がそこから情報を受け取ることは出来ない。

受信器が送信器から変調された信号を受け取ることが可能なのは、送信器から発せられる2つの信号光のうち、1つが遮断された場合だけである。ある送信器の片方の点光源からの光信号を遮断した場合、その信号器の同期反転成分の1つが遮断されるため、受光器が信号成分を出力することが出来る。このように、同期反転した光信号を組み合わせることで、「(片方が) 遮断された送信器からの光信号のみを出力する」ことが可能なシステムを構築することが出来る。

3.3 タグシステムの形成

このシステムは、送信器をタグとして実世界の物体に添付し、ユーザが受信器を持つと、ユーザがタグからの光信号を遮断することで、そのタグからの光信号を受信することが可能なタグシステムとして使用することが可能である。受信器に内蔵されたイメージセンサから見ると、光信号を遮断する行為は、ある物体を、受信器から見えるタグに重ねる行為にあたる。

物体をポインタ（カーソル）、タグをアイコンと考えれば、ポインタとアイコンの位置関係は従来のポインティングデバイスにおけるポインティングそのものとなる。光信号を変調するためのこの行為が、同時に、ユーザから見たポインティングであるということが本研究の大きな特徴である。

このシステムにおけるアイコンとは、ポインタが光信号に干渉できる範囲のことをいう。アイコンにあたる領域は、この範囲を受信器のカメラから見たものである。この範囲は受信器のイメージセンサから見ると、常にタグの発光器の周囲の一定の領域に不可視の状態が存在する。この「アイコン」が、いわば幽霊のようなタグが情報をもってタグの光景に添付されているように見えることから、本システムを GhostTag システムと呼ぶ。この「アイコン」はユーザによるインタラクションが可能であり、ユーザがタグの光景をポイントすることで情報を読み出すことが可能になる。このタグを実世界の物体に添付すると、「アイコン」は実世界の物体の光景に重複して生じる事になり、ユーザは物体をポイントすると情報が読み出せるようになる。つまり、GhostTag システムは、ポインティングシステムとして考えた場合、実世界の物体の光景を「ポイント」することで情報を読み出すことが出来るシステムであり、タグシステムと考えた場合、実世界の物体の周囲に光信号の形で情報を添付し、「ポイント」することで読み出すシステムである。

GhostTag システムを使用する環境（GhostTag 環境）では、光送信器を「タグ」として実世界の物体に添付し、ユーザは受信器とポインタを携帯して行動する。ユーザは実世界の物体を適宜ポイントし、情報を得る。この環境では、ユーザは、実世

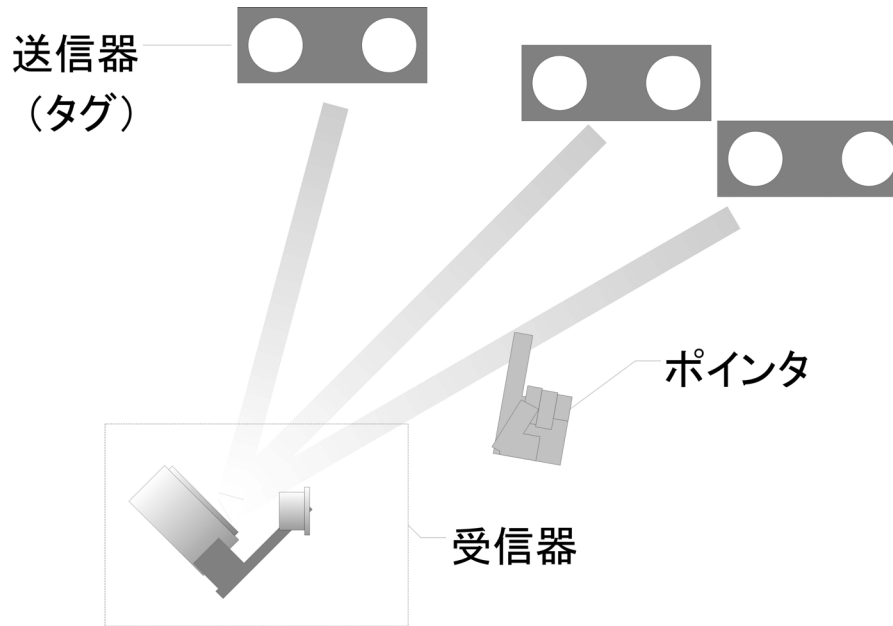


図 3.5: GhostTag システムによるタグシステムの形成

界の光景があたかもインタラクション可能なものであるかのように認識することが出来る。

タグは単体で光信号を発する機器で、実世界に添付される。受信器は光信号を受信する機器である。受信器は、光信号を受信するためのフォトダイオードと、ポイントのための映像を取得するイメージセンサから構成される (図 3.5)。イメージセンサは、CCD や CMOS イメージセンサのような電子的な光学機器の他、ユーザの眼球のような生体であってもシステムを構成することが出来る。

また、光信号を遮断するためのポインタは、光信号を透過しない物体である必要がある。したがって、棒状の物体や、例えばユーザの人差し指などを使用することが出来る。特にイメージセンサが眼球であった場合、ユーザが見ている光景に「アイコン」が添付され、指を重ねることで情報を読み取るシステムを構築することが可能である。

このように、GhostTag システムは画像処理を行わずに、イメージセンサ・受光器・送信器・ポインタの空間的な配置だけで、ポインティング機能を実現している。このことは、大容量のデータの転送を可能にするとともに、システムの簡便性、拡張性を実現しており、様々なタイプのアプリケーションシステムを比較的容易に実現可能であることが特徴である。

第 4 章

GhostTag システムの実装

4.1 全体の構造

GhostTag システムは、受信器と送信器（タグ）によって構成されるタグ環境である。タグは単体で光信号を発する機器で、実世界に添付される。受信器は光信号を受信する機器である。受信器は、光信号を受信するためのフォトダイオードと、ポイントのための映像を取得するイメージセンサから構成される（図 4.1）。GhostTag システムは、光信号にユーザによるポイントを検知する機能を付与していることが特徴である。これに加えて、この機能の実現には複雑な機構が必要とされず、既存のデバイスを幾何学的に組み合わせることで実現できる点が大きな特徴である。

タグに相当する光信号の送信器は、点灯と消灯で HI/LO をあらわす光信号の送信器である。これは一般的な光信号の送信器と同じ構造である。また、同期反転信号を送信するためには、2 つの光送信器を用意し、この送信器を同期反転制御することで実現することが出来る。

また、受信器はイメージセンサと光信号を受信するためのフォトダイオードで構成することが出来る。受信器の構造の特徴は、受光面の中心にピンホールを開け、映像を取得することであった。このような受光器を実現するためには、フォトダイオードの受光面に孔を空ける加工をする必要がある。このような機材は特殊な加工

が必要とされるものである。

しかし、イメージセンサとフォトダイオードの位置関係を工夫することで、同様の機能を持つ光学系を簡単に実現することが可能である。

ピンホールカメラの表面のある一定の範囲に入射した光信号が受信できればよいのであるから、直接入射した信号を受信する必要はない。例えば、ピンホールカメラの表面を乱反射面（均等拡散反射面¹）であるとし、この面に向けてフォトダイオードを設置する。フォトダイオードは、ピンホールカメラの表面からピンホールを除いた部分の面から反射した光信号のうち、フォトダイオードの表面に向けて反射した光を受光する。フォトダイオードが反射面の近傍に固定されていた場合、受光面への入射光と、フォトダイオードに入射する反射光の割合は固定されている。このため、拡散反射によって光エネルギーは減少するものの、受光面全てがフォトダイオードになったのと同じであると仮定することが可能である。この構造は、イメージセンサの焦点の近傍からの反射光を受光すればよい。したがって、反射を捉えるという実装方法を適用することにより、フォトダイオードをイメージセンサ表面に向けて設置するだけで、そのカメラを含んだシステムを GhostTag システムの受信器として使用できるという特性が生じる。

このことから、フォトダイオードとイメージセンサを分離して開発することが可能になる利点が生じる。この点は、システムの実装上大きな自由度をもたらし、様々なバリエーションを持つアプリケーションシステムを容易に構築できる利点につながる。例えば、イメージセンサを改造し、高速信号を受信できるようなビジョンチップ[16]では、CCD/CMOS イメージセンサの各受光素子に高速信号の受信が可能な機能を付与したものである。このビジョンチップは新しい CCD/CMOS イメージセンサを開発する必要がある。ビジョンチップの受信速度の上限を引き上げたい場合は、素子そのものを開発する必要がある。これに対して、GhostTag システムでは受信速度の高いフォトダイオードを一つ開発するだけで同様の機能を

¹入射光を全方位に一定の大きさに反射する面

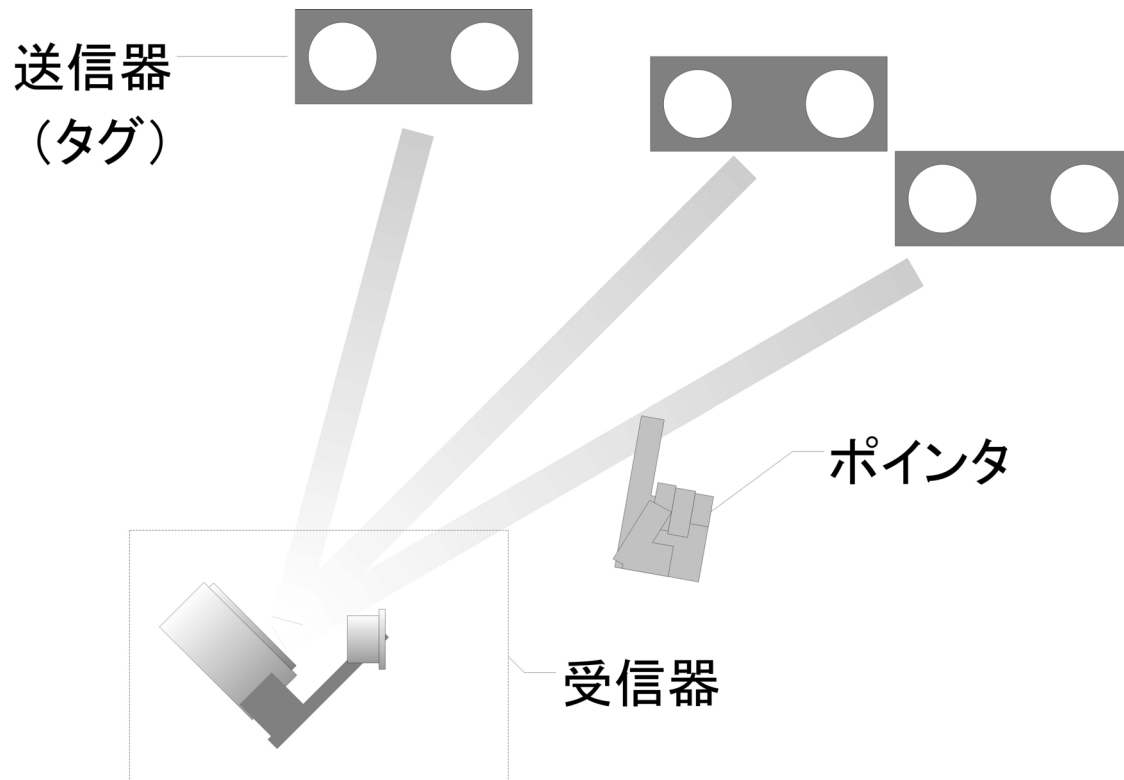


図 4.1: システムの全体像

実現することが可能である。携帯電話のようなガジェットにフォトダイオードのモジュールを取り付けるだけで動作する、VisionCommunicator と呼ばれるシステムを開発した。

また、イメージセンサとフォトダイオードの組み合わせによって、様々なアプリケーションを実現することが可能である。本研究では、イメージセンサとしてユーザの眼球を使用したシステムである、RealEyeCommunicator を開発した。

4.2 送信器 (タグ)

4.2.1 タグの基本的な構造

タグは実世界の物体に添付され、同期反転した光信号を発するための機器である。タグは、光信号を発するための発光部と、発光部を制御するための制御部、電源供給部などから構成される (図 4.2)。

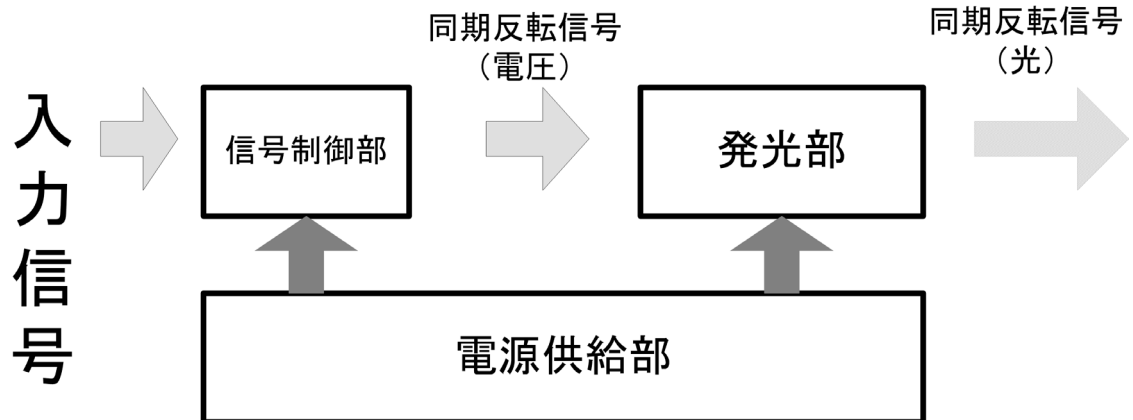


図 4.2: 送信器 (タグ) の構造

4.2.2 発光部

発光部は、同期反転信号を光信号の形で放射する機能を持つ部分である。

光信号の波長

放射する光信号は、一定の波長を持つ電磁波を変調する事によって生成されている。光信号の波長は、次の条件を満たす波長を

1. 回折特性が可視光とほぼ同じ
2. 大気による減衰が小さい

3. 人体（特に網膜）に対する安全性が高い

条件を満たす波長を選択することが必要である。

回折特性 1の条件は、光信号が遮断された際に、回折によって遮蔽物の陰から受光器に光信号が回り込むと、信号の選択が不可能になることから生じる。使用者は可視光の光景によって光信号を選択するのだから、光信号が可視光に近い特性を持っていれば、直感的に選択することが可能である。回折は光の波長に関係するので、対象となる電磁波の波長は可視光（300-700nm）に近い波長を持った電磁波を候補として挙げる事が出来る。このことから、可視光線および、可視光線に近い波長を持った紫外線および近赤外線との3つの波長を候補とする。

大気による減衰 2の条件は、少ない電力で光信号を配信するために必要である。電磁波は、大気の中を進行するにつれて減衰するが、透過率の高い波長域も存在する。この領域は大気の窓と呼ばれている。可視光に近い大気の窓の領域は、200-1200nmの領域が知られている。この波長帯は紫外線から近赤外線までの領域を覆っている。

安全性 3の条件は、タグが光空間信号を常に配信していることから、使用者や、周辺にいる人の安全を確保するために必要な条件である。最後に条件3を考慮する。本研究で用いられた光信号は、広く実空間に放射されることが前提である。この空間内には使用者を含めた多数の人間がいることが前提である。したがって、送信器の周辺の人間の眼球や皮膚に、如何なる状況で入射しても、安全性が確保される必要がある。

光の持つエネルギー $E(J)$ は、プランク定数を h 、光の振動数を ν として

$$E = h\nu \quad (4.1)$$

とされており、振動数の高い光ほど高いエネルギーを持っている。

これらの光に被曝した際に発生する障害は、光の振動数によって異なる。例えば、赤外線は熱的作用を及ぼし、疲れ目の原因などにもなる。紫外線は眼炎、白内障の原因となりうることが知られている。一般に、振動数の短い光を使用することは被曝時の危険を増すことにつながる。そこで、本研究では、可視光よりも長い波長である近赤外線（780-940nm）の光を使用することとした。この波長帯はデータ通信などに多く使用されており、発光素子の種類が多く入手も容易である利点がある。

これらの安全な周波数帯であっても、高い放射エネルギーを持つ光がユーザの皮膚や眼球に入射することは危険である。特に眼球などに入射すると、水晶体損傷や、網膜損傷といった、深刻な障害を発生する危険性がある。タグは光信号を実空間の広範囲に放射する機器であるので、光信号の放射エネルギーを人体に影響を及ぼさない範囲にとどめる必要がある。本研究では、JIS C6802 規格を準用しているが、本研究で使用されている LED 機材はこの中の Class1 に分類される。この分類は「本質的に安全」とされる分類である。

光信号の点滅速度

光信号は、光の強弱によって情報を伝える。伝送する情報の量は、強弱の切り替えの周波数（＝変調周波数）に比例して大きくなる。このため、高速に変調した光信号を使用するほうが情報転送に有利である。光を発する素子は、白熱灯や、蛍光灯など様々なものがあるが、高速に変調した光信号を発するためには、LED を使用することが一般的である。

一般に普及している光空間信号の変調周波数は数 kHz ～ 数 GHz にまで及ぶが、殆ど全ての光空間信号は、LED²と呼ばれる半導体素子によって発せられている。本研究では、特に光空間通信に多く用いられている、近赤外線 LED を選択した。表 4.1 に、そのスペックを示す。

LED は光信号を発する際に、点灯の開始から出力が最大になるまでと、出力が

²Light Emitting Diode

	DNK318U	SFH4650	単位
光出力	20	40	mW
放射強度	80	50	mW/str
ピーク発光波長	870	850	nm
半値角	22	20	°
遮断周波数	55	-	MHz
立ち上がり/下がり時間	7	12	ns

表 4.1: LED:DNK318U、SFH4650 のスペック

最大から消灯するまでには、一定の時間が掛かる。点灯時に、光出力が最大時の 10 パーセントから 90 パーセントに上昇するために掛かる時間を立ち上がり時間、同じく消灯時に 90 パーセントから 10 パーセントになる際に掛かる時間を立ち下がり時間と呼ぶ。本研究では、可能な限り高速な変調速度で同期反転信号を生成する目的から、立ち上がり/立ち下がり時間が可能な限り短い素子を選択する必要がある。本研究で用いた素子では、これらの立ち上がり時間と立ち下がり時間がそれぞれ 7 および 12ns である LED 素子を選択した。

4.2.3 信号制御部

タグの信号制御部は、発信すべきデジタル信号を外部機器から電圧信号として入力された時に、その信号を光信号として出力する機能を果たす。発信する光信号の形式は、同期反転された信号である。

そこで、信号制御部では、外部からデジタル信号を電圧信号の形で受信し、この信号から同期反転制御された電圧信号を 2 本生成し、この電圧信号を 2 群の LED の制御に使用する (図 4.3)。

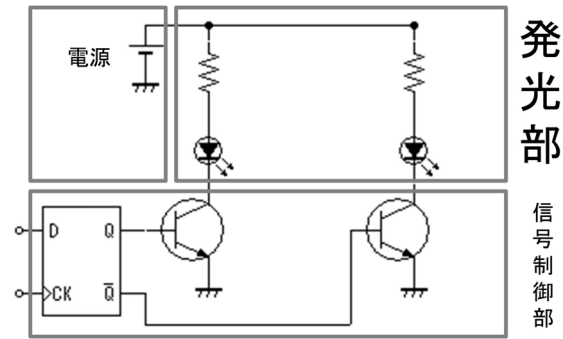


図 4.3: 送信器の制御回路と発光回路

入力部 通常の電子回路は、0-5V の間で電圧の形で信号を伝えている。一般的には 5V を HI 信号、0V が LO 信号を使用することが多い。このほかには、ノイズの強い環境で用いられる、HI と LO の電圧が逆転した表現や、高速信号や低電力の環境で用いられる、振幅が 3V の規格、1V の規格がある。本研究では、信号制御部の入力は 5V のデジタル信号（TTL 互換）とする。

入力された信号から、入力信号と、これに同期していながら反転している信号の 2 つの信号を生成する。同期反転信号の定義は、ペアの信号を足し合わせたときに、0Hz の信号になることである。反転信号を生成する一般的な回路としては、NOT 回路がある。NOT 回路は、入力された信号を反転して出力を行う回路である。

しかし、NOT 回路を使用すると、NOT 回路による信号遅延が生じ、上の要件を満たせなくなる。NOT 回路を使用して生成した信号を足し合わせたものを図 4.4 に示す。

この現象を避けるためには、2 つの信号の遷移が時間的に同期している必要がある。そこで、本研究では、D 型フリップフロップを使用することで同期反転信号を生成した。D 型フリップフロップは、入力端子 D と同期信号入力端子 CLK、出力端子 Q および \bar{Q} をもつ半導体素子で、CLK の同期信号に同期して Q および \bar{Q} の出力を切り替えることが出来る回路である (図 4.5)。この回路を使用することにより、Q および \bar{Q} を同時に切り替えることが出来るので、2 つの信号を足し合わせ

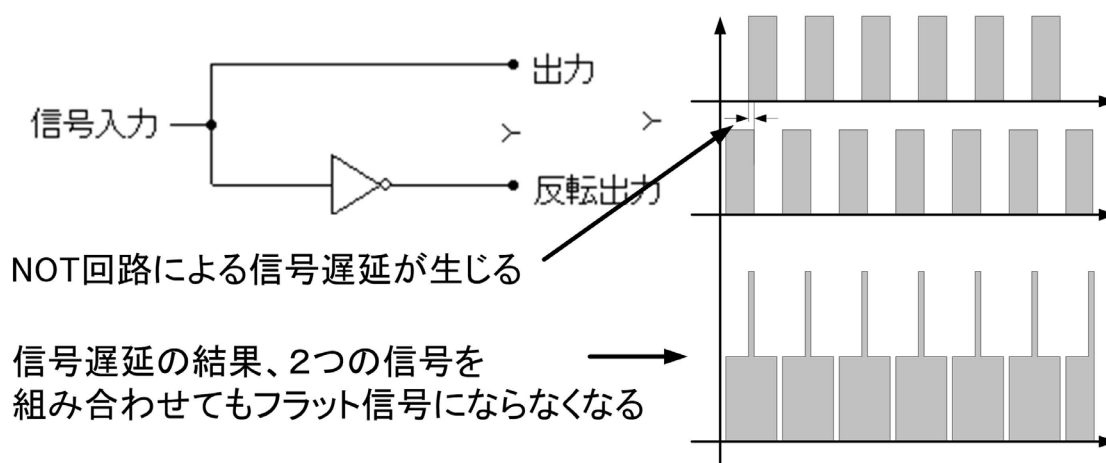


図 4.4: NOT 回路による信号生成の問題点

た際の実出力を 0Hz にすることが可能になる。

光信号制御部 このようにして生成された反転同期信号を使用して、光信号の制御を行う。光信号の制御は、LED に電流を流す・流さないの 2 つのモードで行われる。このような作業をスイッチング動作と呼ぶ。

スイッチング動作を行うための素子としては、トランジスタや FET³、酸化金属を用いた MOSFET などが使用される。この中で、高速信号を生成することが可能なトランジスタとしては、MOSFET を挙げる事が出来る。この MOSFET は、入力信号に対して十分に高速な動作が可能であることが必要となる。

4.2.4 タグの実装の一例

図 4.6、4.7、4.8 に実装したタグの例を示す。図 4.6 は赤外線 LED に DNK318U を使用している。この LED は砲弾型のパッケージを採用しており、タグ全体に厚みがある。これに対して、図 4.7、4.8 では SFH4650 を使用している。この LED は

³電界効果型トランジスタ

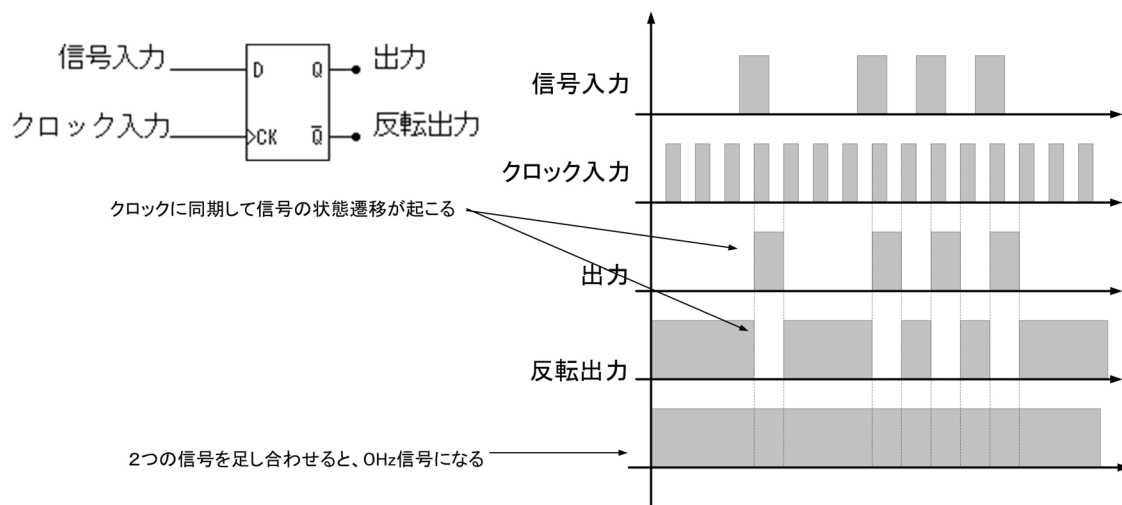


図 4.5: DFF 回路による同期反転信号の生成と利点

表面実装型の電子部品であり、砲弾型のパッケージよりも大幅に薄くなっている。

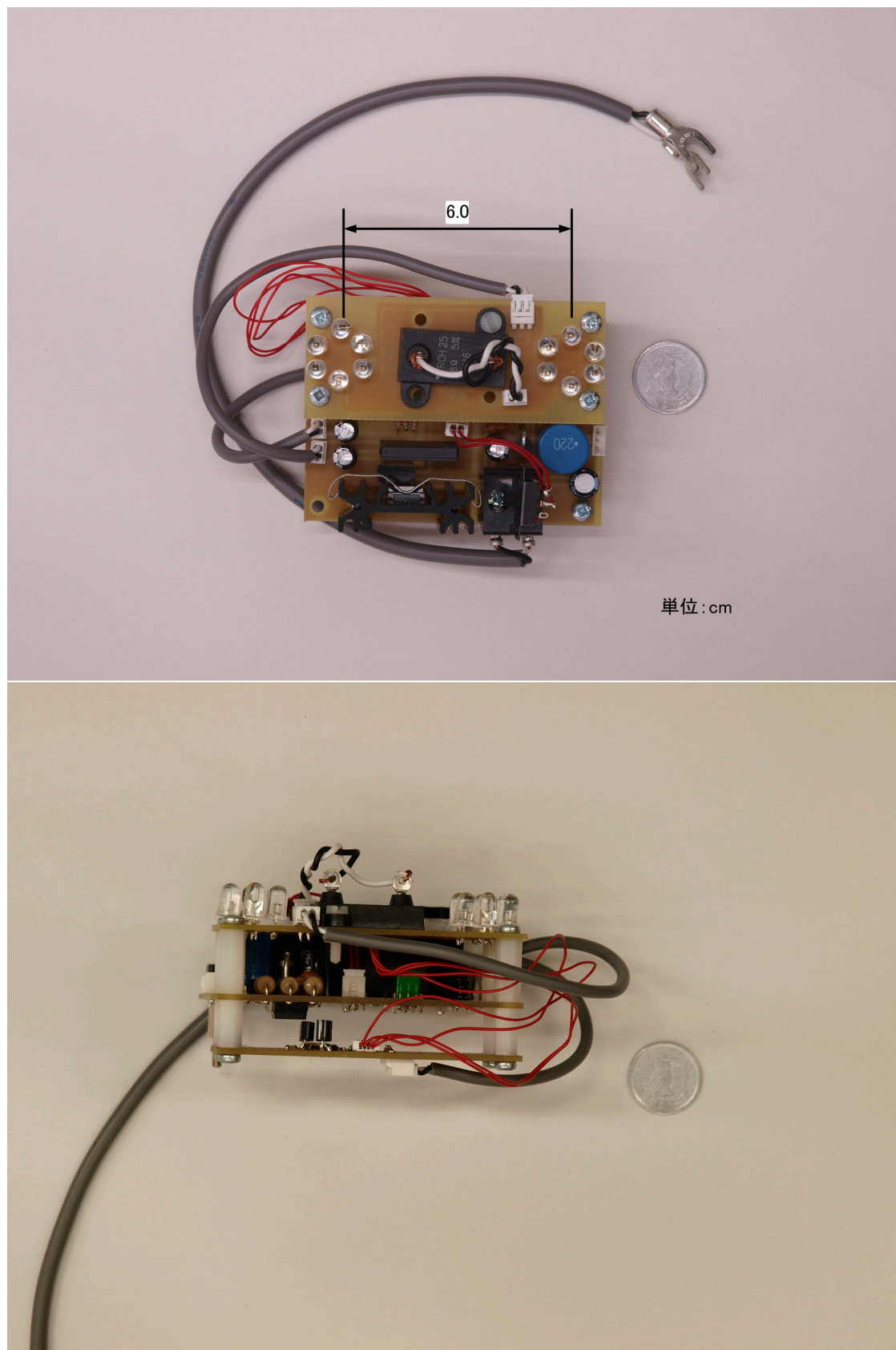


図 4.6: タグの回路と実装 (LED 群の間の長さが 6.0cm、砲弾型 LED を使用)

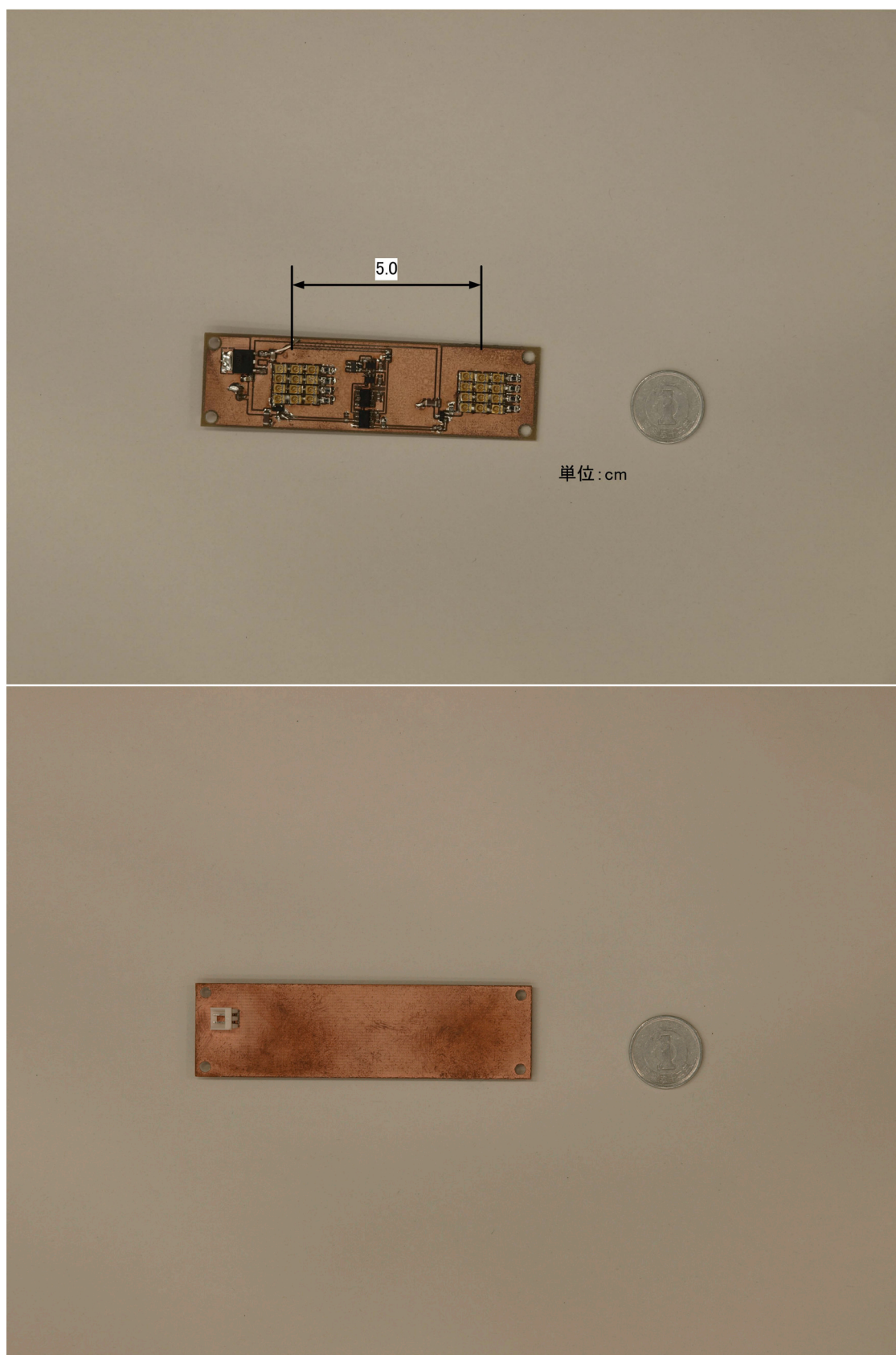


図 4.7: タグの回路と実装 (LED 群の間の長さが 5.0cm、表面実装型 LED を使用)

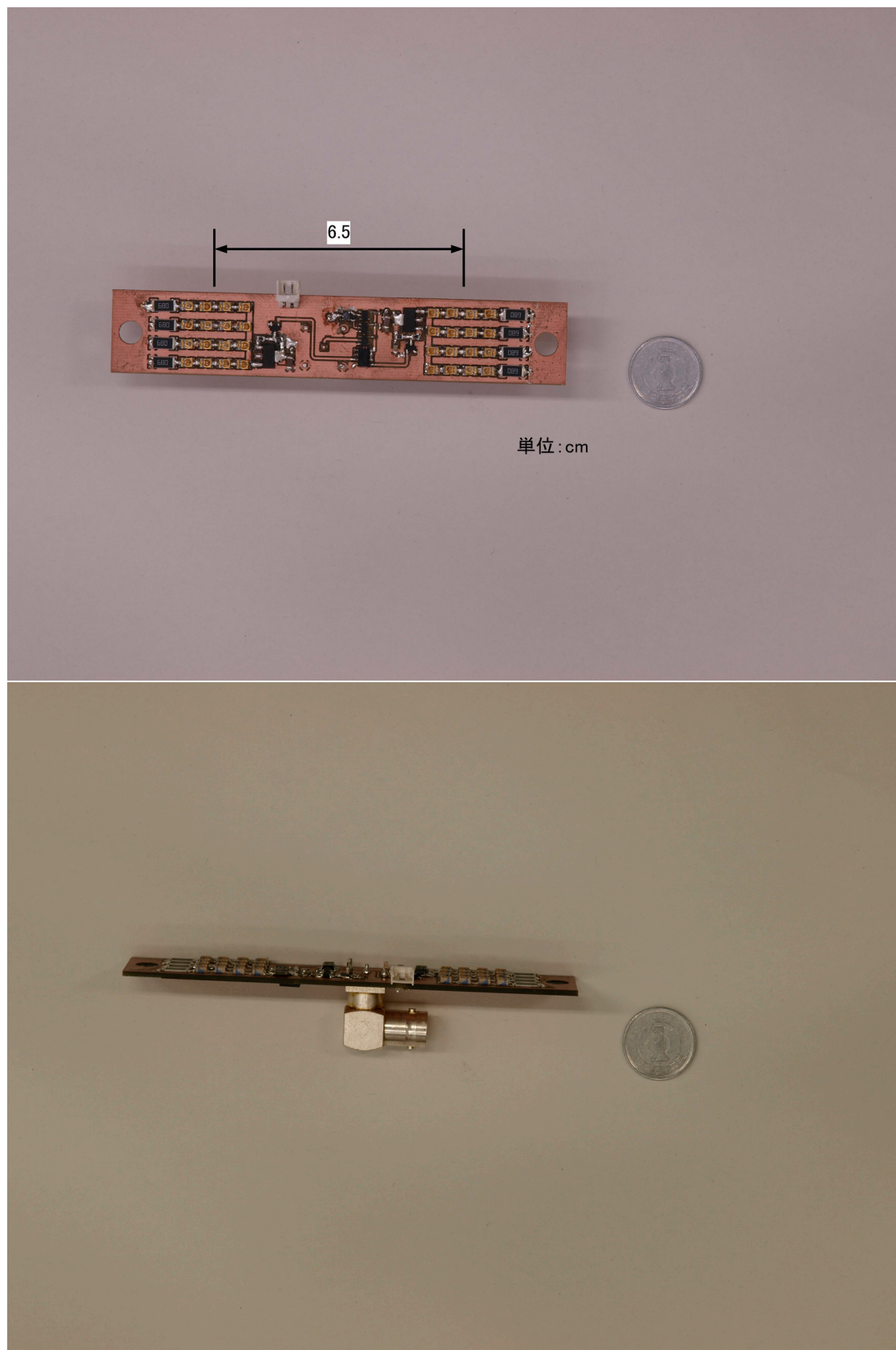


図 4.8: タグの回路と実装 (LED 群の間の長さが 6.5cm、表面実装型 LED を使用)

4.3 受信器

受信器は、光信号の受信を行う機能を持つ。受信器はポイントに使用されるイメージセンサと、光信号の受光のために使用されるフォトダイオードの 2 種類の素子から構成される。これらの素子は、フォトダイオードの受光範囲の中に、イメージセンサの焦点が位置するように配置される。即ち、フォトダイオードはイメージセンサの開口部を受光範囲に含むよう、イメージセンサの表面に向いて設置されることが特徴である（図 4.9）。

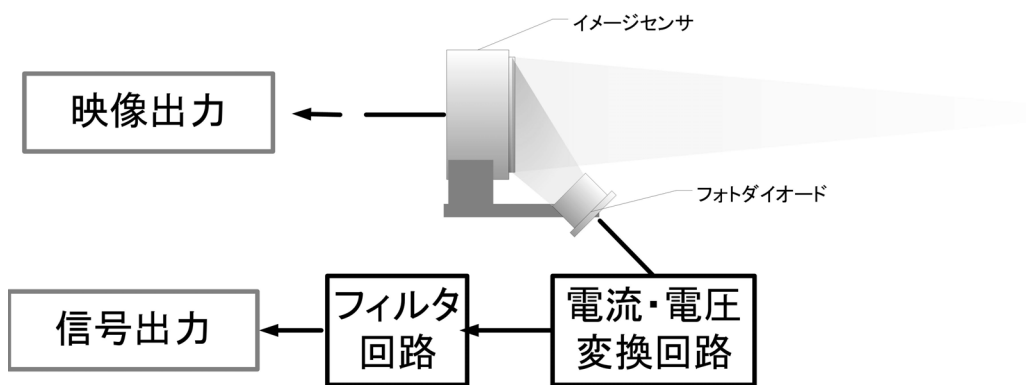


図 4.9: 受信器の構成

4.3.1 光信号の受信

光信号の受信装置は、時間変調された光信号を受光し、受光した放射束の変化を電圧信号の変化に変換し、適正なレベルの振幅を備えたデジタル信号に増幅するための回路である。その実装例を図 4.10 に示す。この受信装置は、光信号を電流信号に変換するためのフォトダイオード、電流を電圧に変換するための電流電圧変換回路、適当な周波数帯のみを増幅するためのフィルタ・増幅回路から構成される。

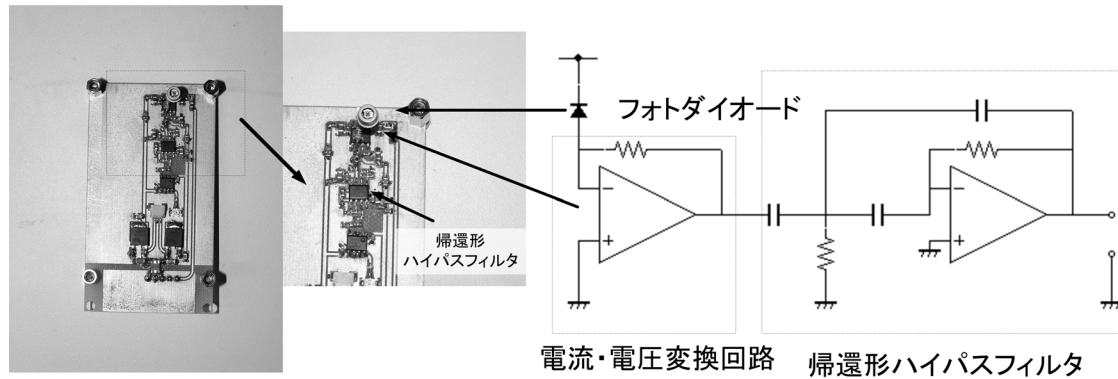


図 4.10: 受信器

フォトダイオードとアバランシェフォトダイオード

光信号の受光にはフォトダイオードと呼ばれる半導体を使用することが一般的である。フォトダイオードは入射した放射束 Φ_e に対して、受光感度 R を比例定数とした光電流 I_Φ を生じる半導体である（式 4.2）。

$$I_{\Phi_e} = R \times \Phi_e \quad (4.2)$$

フォトダイオードの感度 フォトダイオードが検知できる放射束の限界は、フォトダイオードの暗電流によって決定される。暗電流は素子内の電子の熱運動によって生じるノイズで、このノイズの大きさよりも小さい光電流を検知することは出来ない。

フォトダイオードの遮断周波数 また、フォトダイオードは一定以上の周波数で変調された光入力を増幅することが不可能である。この周波数を遮断周波数といい、 f_c であらわす。フォトダイオードの遮断周波数は、受光する光信号の変調周波数よりも高い必要がある。

アバランシェフォトダイオード 一般に光電流 I_{Φ_e} は非常に小さな電流であり、pA (ピコアンペア) オーダであることも珍しくない。本研究では、光信号をイメージセンサ表面で反射させて受信する仕組みを持っているため、通常用いられる通信機よりも受光できる放射束は少なくなる。

そこで本研究では、光電流の増幅機能を持ったアバランシェフォトダイオードを使用する。アバランシェフォトダイオードは、電子アバランシェ現象を利用した受光素子で、高圧のバイアス電流 V_b を掛けることにより、出力電流が増幅される特性を持つフォトダイオードである。出力電流の増倍率 M は V_b によって決定され⁴、 $M(V_b)$ であらわされる。

表 4.2 に、本研究で用いたアバランシェフォトダイオードである M5844⁵ のスペックを示す。

	M5844	M6612	単位
放射感度	0.42($\lambda = 850\text{nm}$)	0.36($\lambda = 850\text{nm}$)	A/W
遮断周波数	600(50 抵抗負荷)	1200(50 抵抗負荷)	MHz
暗電流	2.0	0.13	nA
増倍率	100(MIN)	100(MIN)	倍
受光面積	$\phi 0.5$	$\phi 0.2$	mm

表 4.2: アバランシェフォトダイオード:M5844、M6612 のスペック

電流電圧変換回路

フォトダイオードは入射した放射束に比例した電流を出力するので、受光した光信号は電流の形で表現されている。一般の電子回路は電圧の変化で情報を伝達する必要がある。そこで、オペアンプと呼ばれる電子部品を使用し、高速に変化する電

⁴実際には温度にも影響を受ける

⁵松定プレジジョン製

流を電圧信号に変換する回路を挿入する（図 4.11）。

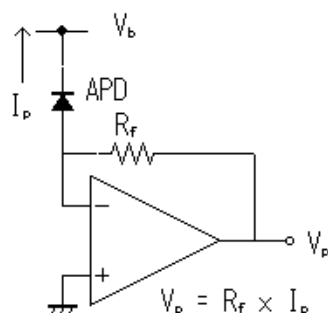


図 4.11: アバランシェフォトダイオードと電流・電圧変換回路

電流・電圧変換回路は、入力電流 I_p に対して、帰還抵抗 R_f を比例定数とし、

$$V_p = R_f \times I_p \quad (4.3)$$

によってあらわされる電圧 V_p を出力する。

この回路に、バイアス電圧 V_b を掛けたアバランシェフォトダイオードを接続した回路が図 4.11 である。アバランシェフォトダイオードに入射する放射束を Φ_e とし、アバランシェフォトダイオードの放射感度を R 、バイアス電圧 V_b に対応する増倍率を $M(V_b)$ とすると、出力電圧 V_p は、

$$V_p = R_f \times M(V_b) \times R \times \Phi_e \quad (4.4)$$

とあらわされる。この図の回路では、アバランシェフォトダイオードが生じる光電流 I_p は、電流・電圧変換回路から流出する方向に流れるので、光信号は負の電圧として生じる。

4.3.2 光信号の反射と、フォトダイオードへの入射

受信器に含まれ、光信号の受信を担当するフォトダイオードは、入射した放射束に比例した光電流を発生させる素子である。光電流の大きさはフォトダイオードに

入射した放射束から算出することができる。フォトダイオードに入射する光信号は、イメージセンサの前面で反射された放射束のうち、フォトダイオードに入射する放射束である。いま、カメラ前面のサイズが $2a \times 2b$ であるとし、この前面に放射束 Φ_{ei} が一様に入射しているとする。カメラ前面は拡散反射体であるとし、入射した放射束の全てを全方位に均等に反射しているとする（図 4.12）。

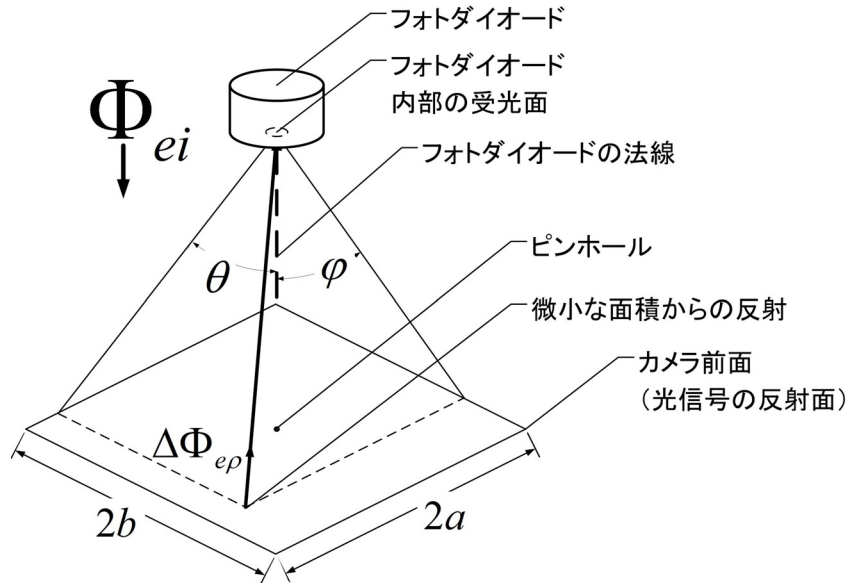


図 4.12: カメラ前面からの反射と入射

その反射率が ρ であるとする。すると、カメラ前面内の微小な面積から反射され、フォトダイオードに向かう放射束 $\Delta\Phi_{e\rho}$ は、この微細な面への入射放射束 $\Delta\Phi_{ei}$ を用いると

$$\Delta\Phi_{e\rho} = \rho\Delta\Phi_{ei} \quad (4.5)$$

と書くことが出来る。フォトダイオードの受光面積がカメラ前面の面積に対して十分に小さいとき、カメラ前面の面積 $2a \times 2b$ 内にある、フォトダイオードの法線

に対して θ, φ の位置にある微細な面積から反射してフォトダイオードに入射する放射束 $\Delta\Phi_{ep}$ は

$$\Delta\Phi_{ep} = \rho\Delta\Phi_{ei} \cos\theta \cos\varphi \quad (4.6)$$

と書くことができる。最終的にフォトダイオードに入射する放射束の総量は、この微細な放射束をカメラの前面の面積である $2a \times 2b$ の範囲について積分して得ることが出来る。この積分には時間に関する変数は含まれないため、最終的にはフォトダイオードの法線（フォトダイオードの向き）によって決定される入射放射束 Φ_{ei} に乗ぜられる定数として扱うことができる。

従って、受光面の様子は信号の変調成分に対して変化を及ぼさない。また、カメラ前面の様子が時間的に変化する場合を考慮しても、光信号の変調速度に対して受光面の様子の変化が十分に大きい場合、光信号の変調成分に対しての変化を無視する事が出来る。

フィルタ回路

電流電圧変換回路からの出力は、送信器から送られた信号成分の他に、様々なノイズ成分が足しあわされたものである。これらのノイズは、

1. 回路の電磁ノイズ
2. 外部から回路に混入した電磁ノイズ
3. 外乱光によるノイズ
4. 選択されていない信号によるノイズ
5. 他の通信器からのノイズ

に分類することが出来る。

フィルタ回路は、これらのノイズを除去し、受信しなければならない信号成分のみを通過させる機能を求められる。この目的のためには、信号の周波数（帯）をあらかじめ定めておき、それ以外の周波数成分を全て減衰させる方法をとる事が一般的である。必要な周波数（帯）の電圧信号のみを通過させ、それ以外の周波数の電圧信号を減衰させる回路をフィルタ回路と呼ぶ。

フィルタ回路には、受動素子のみから構成される RC フィルタ、RCL フィルタや、オペアンプと呼ばれる電子回路を使用する、アクティブフィルタと呼ばれるものがあり、それぞれが様々な特性を持っている。

また、ノイズが存在すると予測される波長帯は、変調周波数として使用しないことも重要である。

外乱光によるノイズ 室内の照明に使用される照明器具は、ある一定の周波数の電源を使用していることから点滅を繰り返している。電源周波数である 50/60Hz の他、様々な周波数の照明器具がある。表 4.3 に、外乱光である室内の照明の変調周波数の例を記す [16]。

ランプの種類	点灯周波数（例）
白熱灯	100/120Hz
蛍光灯	100/120Hz
蛍光灯（電子安定器）	80-200kHz
HID ランプ	50-数百 Hz
無極性ランプ	数～数十 MHz

表 4.3: 照明器具によるノイズ

この他、太陽光などの自然光を除去する必要がある。

選択されていない信号によるノイズ ユーザによってポイントされていない同期反転信号は、0Hz の信号周波数を持っている。このため、0Hz の信号を排除するハイ

パスフィルタを備えることが必要である。

通信機器によるノイズ 他の光空間通信の信号が混入することによるノイズを避けることも重要である。

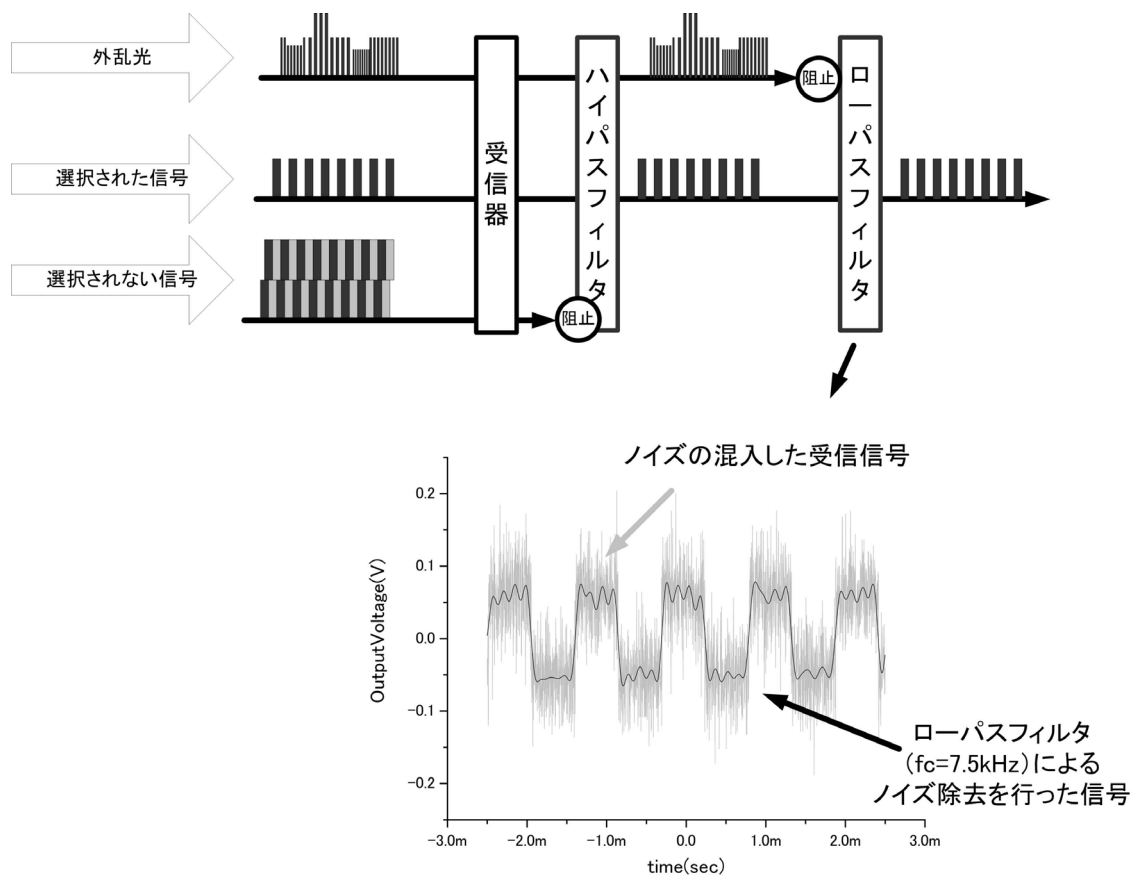


図 4.13: フィルタによるタグからの信号の抽出

増幅回路

電流・電圧変換回路からの出力 V_p は、入射放射束の変化に比例した信号振幅を持つ電圧信号である。これを、後段に接続するデジタル回路などに入力するためには、規定の大きさまで信号振幅を増幅する回路を用いる。このための回路を増幅回路と呼ぶ。増幅回路は適宜回路に組み込まれる。前節で述べたアクティブフィルタは、フィルタ機能の他に信号増幅機能を持たせることも可能である。

4.3.3 イメージセンサの組み込み

受信器へのイメージセンサの組み込みに求められる基準は、

- フォトダイオードの受光野の内部にイメージセンサの焦点が存在する様に設置すること

である。

イメージセンサの役割は 2 つあり、

1. 光信号を反射させ、フォトダイオードに送り込むこと
2. ユーザに対して、ポイントに使用するための映像を提供すること

である。

この条件を満たすことの出来るセンサは無数にあり、大別すると

1. レンズカメラ
2. ピンホールカメラ
3. 生体（眼球など）、および、モーションカメラなどの動くカメラ

等、多彩なセンサをシステム内に組み込むことが可能である。

それぞれのカメラは、カメラ表面を反射し、フォトダイオードへ入射する光の経路がやや異なる（図 4.14）。以下に、それぞれの場合について説明を行う。

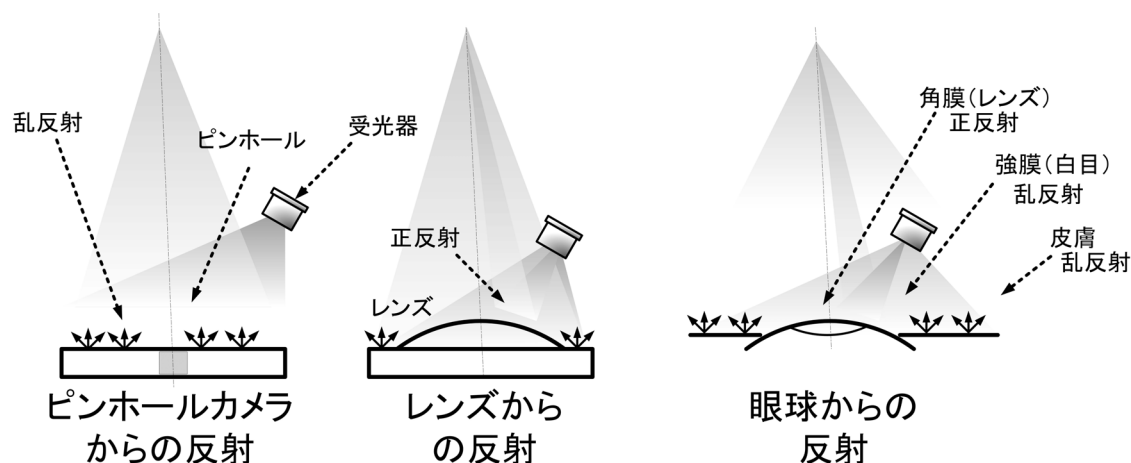


図 4.14: レンズカメラ、ピンホールカメラ、生体（眼球）からの反射光の構造

レンズカメラの場合 カメラのレンズは光を屈折させるための機材であるので、屈折率を持つ。屈折率を持つ物体に光が入射すると、一部の光は反射される。フォトダイオードの受光野がレンズそのものと同じ範囲を持つ場合、レンズ表面の一点から反射した光がフォトダイオードに入射する。従って、仮想的には、フォトダイオードをレンズの開口部内の一点に設置したのと同じ効果を得ることが出来る。

この配置は、イメージセンサとフォトダイオードを並列に設置した場合よりも精度が良くなるが、イメージセンサから見た送信器の映像上には光信号が存在していない状態になる。

ピンホールカメラ ピンホールカメラはピンホールによって像を得る機材である。ピンホールカメラの表面は、ピンホールが開いているだけである。フォトダイオードをここに向けて設置すると、ピンホールの周囲の一定の範囲からの正反射/乱反射光が受信される。ここでは、ピンホール周辺が黒色梨地仕上げであると仮定する。

この場合、ピンホールは穴であるので、入射した光信号は反射しない。ピンホール周囲に入射した光信号が乱反射し、そのうちの一部がフォトダイオードに入射する。このため、イメージセンサから見て、送信器の周囲に光信号が存在している状

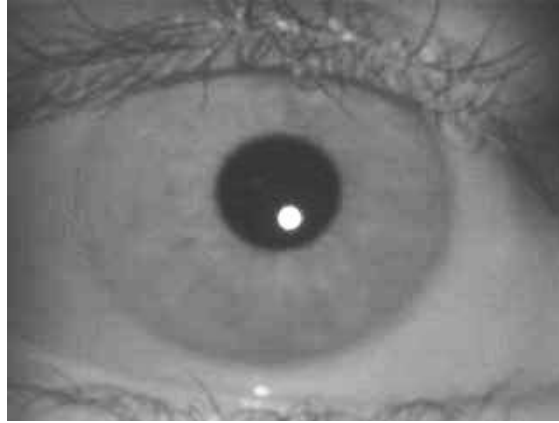


図 4.15: 眼球周囲からの近赤外線反射の状態

態となる。

生体（眼球など） 生体によるイメージセンサは、主に眼球を使用されることが多いと考えられる。眼球の構成要素は、角膜、水晶体、硝子体といったレンズのような特性を持つ部位と、虹彩、強膜、皮膚といった乱反射をする部位に分かれる。したがって、レンズカメラとピンホールカメラの 2 つの特性をあわせた反射特性を持つと考えることが出来る。図 4.15 に近赤外線光によって撮影された眼球周囲の映像を示す。

4.3.4 イメージセンサ表面からの反射による信号領域の発生

イメージセンサで送信器を観察すると、送信器の発光素子の周囲に受信器に入射している光信号が存在しているように見える。この光信号の領域は、イメージセンサとフォトダイオードの位置関係や、イメージセンサ表面の状態によって変化する。ここでは、レンズカメラ、ピンホールカメラ、生体カメラの 3 つのカメラについて、光信号の領域がどのように発生するかを議論する。

レンズカメラの場合 イメージセンサとしてレンズカメラを使用し、フォトダイオードの受光野がレンズの表面を観察している場合を考える。レンズの表面は正反射体であるとする。送信器の発光素子がカメラの正面にあった場合、イメージセンサに発光素子の映像を結像する光と、レンズ表面に反射してフォトダイオードに入射する光は異なる経路を辿る（図 4.16）。

レンズ正面に発光素子が位置していたとすると、発光素子から発した光は、レンズ中央を通過して焦点を通過し、映像面に結像する。一方で、受光素子に入射する光は、レンズ湾曲面の適当な位置から反射し、受光素子に入射する。この位置は、レンズ中央から受光素子のある位置にずれた位置で、入射角と反射角が等しくなる位置である。この反射位置は、レンズが湾曲していることから、レンズ中央になることにはありえない。このため、発光素子からこの反射位置に到達する光の経路は、イメージセンサに結像する光とはずれている。

イメージセンサからの映像を見ているユーザが、レンズからの距離 d_r の位置でこの光に干渉しようとした場合、イメージセンサで見ている発光素子の映像からやや離れた位置であり、ずれが生じる。このずれは、イメージセンサに結像する光の経路と、フォトダイオードに入射する光の経路が離れていることから発生する。

結像する光と受光素子に入射する光のレンズ表面への入射位置は、レンズの半径以上に離れることはない。イメージセンサとフォトダイオードを並列に配置した場合、機構上、2つの素子はレンズの半径以下に接近させることは出来ない。このため、反射式の受光方法は、映像と光信号の領域のずれという点から考えると、従来の構造よりも高い精度を実現できることがわかる。

実際のレンズカメラを使用した場合は、レンズ周囲のレンズ架や、レンズ筒の内部構造など、様々な構成要素から反射した光がフォトダイオードに入射すると考えられる。これらの光は、さまざまな経路を通過してレンズに入射した光であるので、レンズ全面に入射した光であると近似することが可能である。

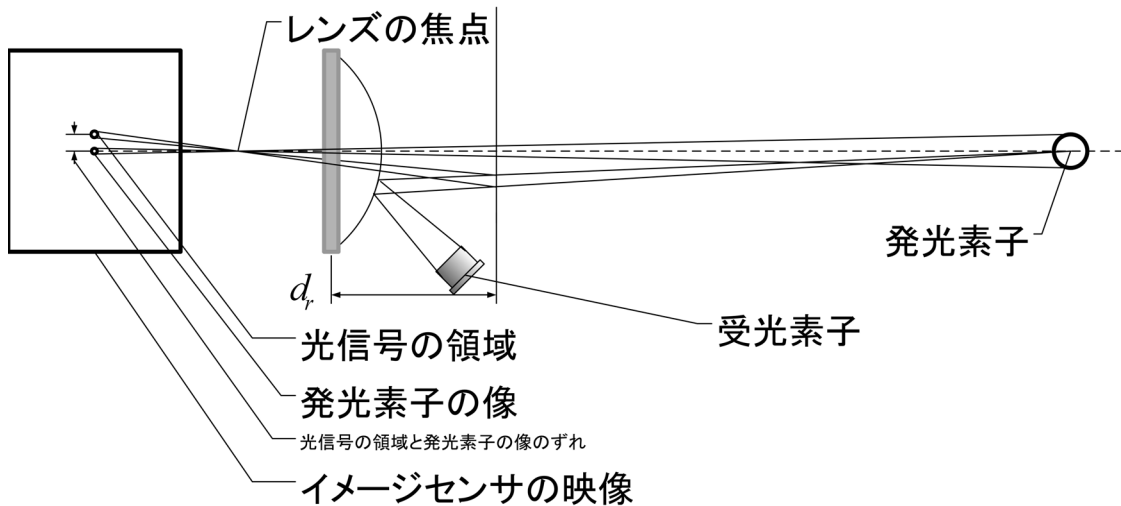


図 4.16: レンズカメラを使用した際の光信号の領域と発光素子の像のずれ

ピンホールカメラの場合 ピンホールカメラはピンホールによって映像を得るカメラで、最も原始的な構造を持つカメラでもある。

ピンホールカメラの開口部は文字通りピンホール（針の穴）であり、非常に小さい。これは穴であるので、このピンホールから反射した光を捉えることは不可能である。しかし、ピンホールの開いている部材からは光が反射する。受光素子をピンホールカメラに向けた場合、このピンホール周囲の部材からの反射光が受光素子に入射する。この部材は、光の反射を避けるために黒の梨地仕上げにされることが多い。このことから、ほぼ一様な乱反射体であると考えることが出来る。

このピンホールカメラにフォトダイオードを向けて設置すると、その受光野はレンズの周囲の一定の範囲であると考えることが出来る。いま、ピンホールカメラの寸法が $2a \times 2b$ であると考え、カメラの中心にピンホールがあるとする。すると、受光素子は、カメラの前面の全ての領域からの光反射を観察する事になる（図 4.17）。

発光体を結像する光は、ピンホール（カメラ前面の中央）に入射する。一方で、フォトダイオードに入射する光は、発光素子を頂点とし、カメラの前面を底辺とし

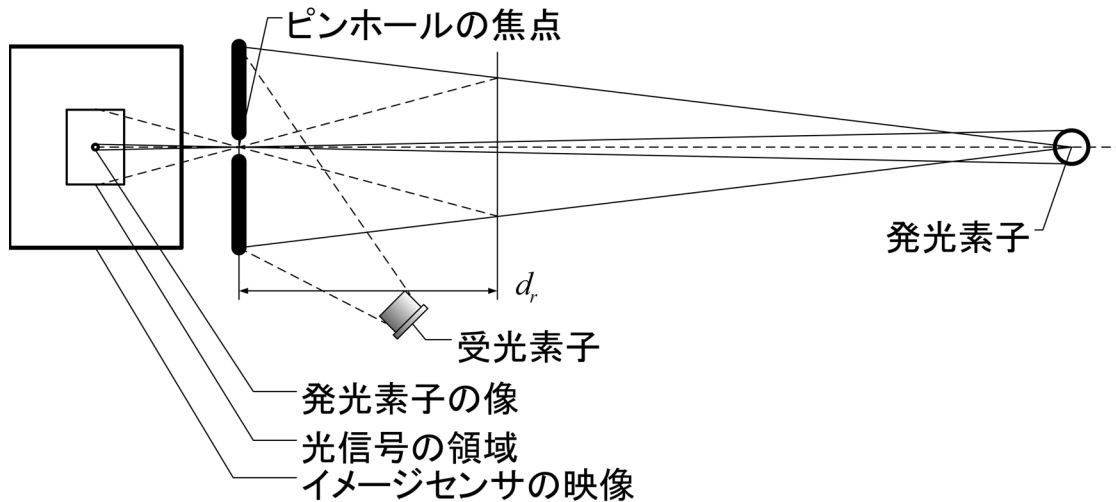


図 4.17: ピンホールカメラを使用した際の光信号の領域と発光素子の像のずれ

た四角錐内に位置している。ピンホールはカメラの前面の中心にあるのだから、結像する光は、四角錐内の中心を通る。

光信号に干渉するためには、この四角錐内に干渉物を誘導する必要がある。イメージセンサからこの四角錐を観察すると、どの d_r であっても、発光素子を中心とした四角形の領域に光信号が存在する（カメラ前面が四角形の場合）。理論的には中央に、ピンホールの大きさに依存した小さな信号の欠如領域が現れるが、ピンホールは極めて小さいため、無視することが出来る。

生体カメラの場合 生体カメラ（眼球など、生物の持つイメージセンサ）の特徴は

1. レンズなどの光学機器と、目蓋などの可動部が複雑に配置されている
2. 光学系そのものを回転させて情報を取得する

事である。当面の間本デバイスを使用するのは人間に限られると考えられるので、本節では特に人間の目を対象として議論を進める。

人間をはじめとする生体カメラの特徴は、カメラ自体が旋回するというところである。また、これらのカメラは透明な部位とそのほかの部位から構成されているが、全体的には入射した光が正反射をする部位は多くなく、殆どが皮膚など、乱反射を行う部位ばかりであることである。

人間の目の特徴 人間の目は、ほぼ球状をした器官であり、その直径は 21-25mm である。眼球の前部に角膜と呼ばれる透明な部位があり、この部分がやや膨らんでいる。角膜は眼球内に外部光を入射させる役目を持つ。角膜の反対側の眼球の内部には網膜と呼ばれる視細胞があり、人間は視細胞によって視覚情報を得ている。眼球内には、角膜、水晶体、硝子体などの屈折率を持つ透明な部位がある。これらの部位は、入射光を収束させる役目を持ち、網膜上に結像させる役目を担う。

簡易的な眼球モデルでは、眼球全体の屈折率は約 1.33、焦点距離は 24mm⁶とすることが出来る [17]。

眼球は、機能上は屈折率を持つレンズで光を収束させているので、レンズカメラであると考えることが出来る。レンズに該当する角膜上で正反射した光は第一 Purkinje 像と呼ばれ、容易に観察することが出来ることが知られている。

しかし、眼球は、全体的にはピンホールカメラのモデルを使用して取り扱うほうが適切であると考えられる。角膜の後部に虹彩とよばれる絞りを担う器官があり、この表面は乱反射体である。眼球内に入射する光は、虹彩によって縁取られた領域である瞳孔を通過したものである。瞳孔は明るい環境下では絞られるので、小さくなる。本システムが使用される環境下では、眼球内に入射する光は極めて限られていると考えることが出来る。

また、近赤外線反射率は、皮膚、強膜（白目）、虹彩（黒目）の領域でほぼ同じである（図 4.18）。従って、結局は、乱反射体の中に瞳孔（ピンホール）が存在し、その周辺にブルキンエ像というやや明るい点が存在していると考えることが出来る。

⁶非常に遠くを見た場合

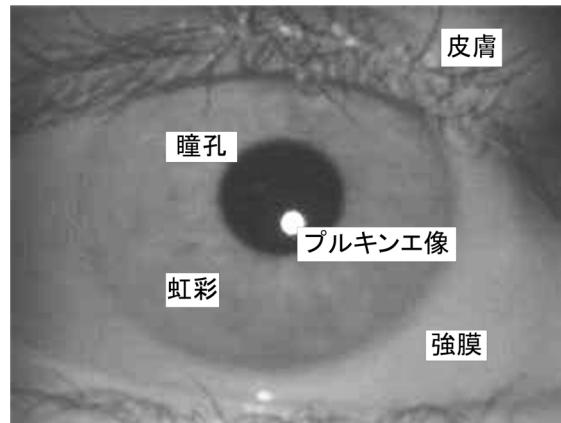


図 4.18: 眼球周囲からの近赤外線反射の状態

眼球がどのように運動しても、ブルキンエ像の大きさは大幅には変化しない。従って、乱反射体の中を黒点（瞳孔）が動いているモデルに簡略化することが可能である。このため、全体としてはレンズカメラよりもピンホールカメラとして取り扱うことが適切であると考えられる。

眼球運動による焦点の移動 眼球は球状の器官で、旋回して目標物を注視する事が出来る。眼球運動は非常に活発に行われる事が特徴である。眼球をイメージセンサとして使用する場合、眼球運動は、焦点の移動として考えることが出来る。

いま、カメラの旋回による開口部の移動可能範囲が、フォトダイオードの受光野内に収まるモデルを仮定する。

この場合、開口部を経てカメラに入射し、発光素子の映像を結蔵する光の経路と、フォトダイオードに入射する光の経路の位置関係がカメラの旋回によって変化する。視線の移動（眼球の旋回）は非常に高速であることが知られているため、この位置関係も常に変化する。

しかし、開口部が受光野内にある限り、光信号の領域は常に発光素子の映像の周囲に発生する。ユーザからは、眼球運動に応じてその領域の大きさが変化するよう

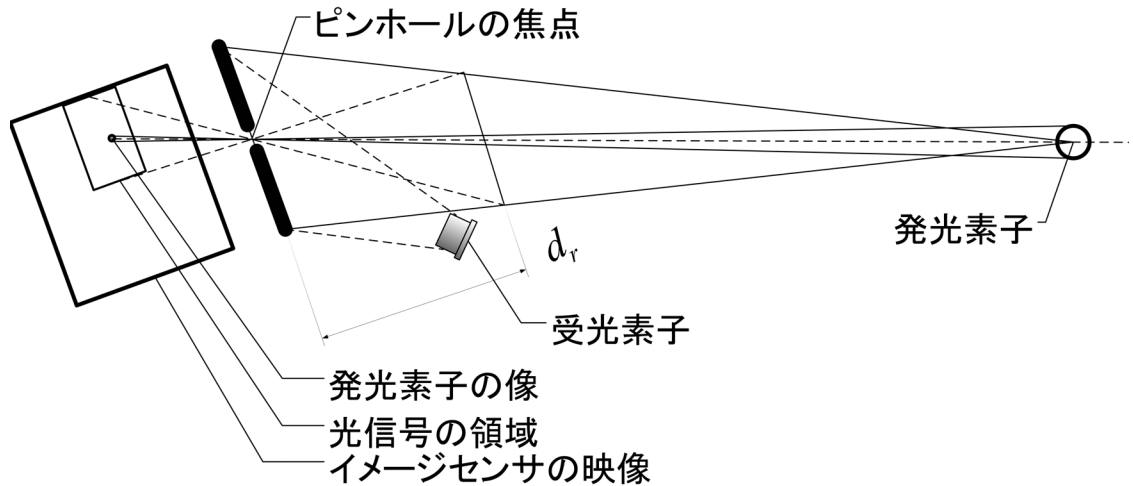


図 4.19: ピンホールカメラを回転させたときの光信号の領域と像

に感じられるが、タグの映像をポイントすれば光信号に干渉できる関係自体には変化がない(図 4.19)。

まばたきの場合 また、まばたきによる受光面の変化がある。まばたきは、眼球上を目蓋が往復する運動である。目蓋は皮膚で構成されているので、乱反射体である。一方で、眼球のレンズを構成する角膜などは正反射体である。レンズの場合は、レンズ内に入射した光はレンズを通過するが、目蓋は乱反射体であるので全てを反射する。

このため、皮膚の反射率によっては、瞬きをした時のほうが、フォトダイオードへの入射量が大きくなることも考えられる。実際には、レンズ(角膜)後面に虹彩などの部位があるため、レンズに入射した光信号の殆ど全てを受信する事が出来る。

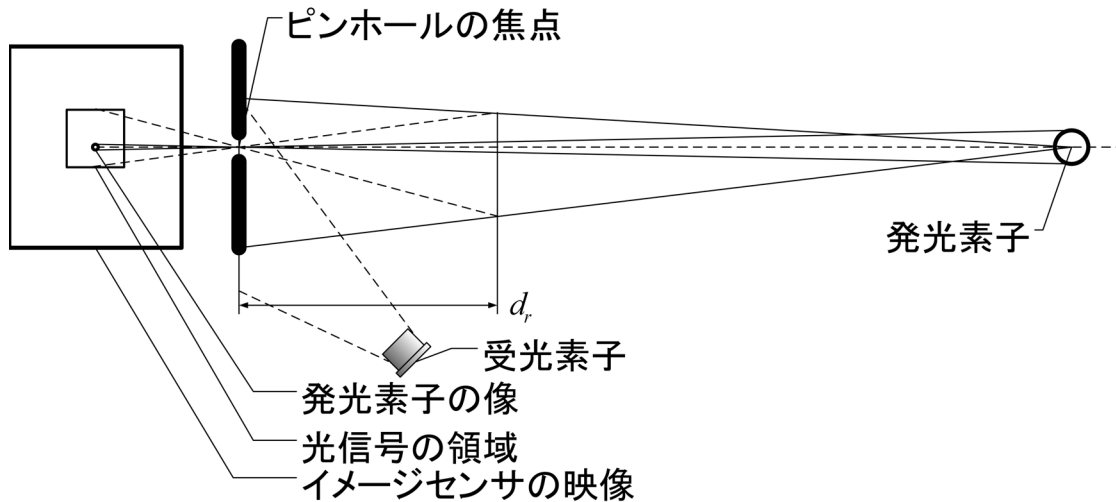


図 4.20: フォトダイオードの位置がずれたときの光信号の領域と像

4.4 受信器の構成例

4.4.1 2つの情報の流れ

GhostTag の受信器には、2つの情報の流れが存在する。

一つはイメージセンサにつなげる情報の流れで、実世界の光景を認識し、タグに対してポインタを重ねる際に使用される。もう一つはフォトダイオードにつなげる情報の流れで、ポイントされたタグから情報を読み出すために使用される。GhostTag システムが読み出したタグの情報は、ユーザの携帯する他の情報機器に送られて使用される（図 4.21）。

イメージセンサの出力はポインタの位置あわせにのみ使用され、情報の読み出しに使用されない。逆に、フォトダイオードの出力はイメージセンサと関係を持たない。イメージセンサ上でポイントされたタグからの情報が、フォトダイオード系から出力されるのは、イメージセンサとフォトダイオードの位置関係によるものである。したがって、イメージセンサ系とフォトダイオード系は、電気的には全く独立している。

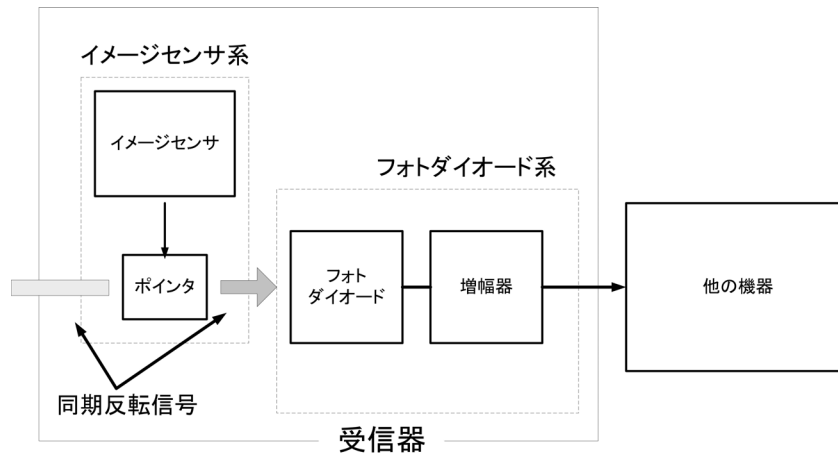


図 4.21: 情報の流れ

このことから、イメージセンサ系とフォトダイオード系を別々に実装し、用途に応じて自由に組み合わせることが可能である。このような自由度の高いシステム構成能力は、GhostTag システムの実装上の特徴である。

ビジョンチップのようなイメージセンサを用いた通信システムは、イメージセンサと光信号の受信を同じ素子が行うことから、イメージセンサの撮影機能と、フォトダイオードの受光機能を切り離すことは困難である。また、専用のイメージセンサを使用しなければならない束縛がある。

4.4.2 イメージセンサ系とフォトダイオード系の組み合わせ

GhostTag システムの受信器は、イメージセンサ系とフォトダイオード系の2つの装置から構成される。イメージセンサ系は、イメージセンサを構成する光学装置と光信号を遮断するためのポインタで構成される。また、フォトダイオード系は光信号を受信するためのフォトダイオードと、それに連なる増幅装置やフィルタからなり、この出力を他の情報機器に接続する。

GhostTag システムの受信器の内部では、2つの系は、イメージセンサとフォトダ

イオードの位置関係によって協調動作する。このとき求められる位置関係は、フォトダイオードの受光域の中にイメージセンサの焦点が位置しているということである。

このとき、フォトダイオードとイメージセンサの位置関係を、どのように定めればよいかを示す。

フォトダイオードは、イメージセンサの表面に向けて設置すれば、上の条件の条件を充足することが可能である。このとき、イメージセンサからの画像上でフォトダイオードが見えると、イメージセンサの視野が狭まる。また、このような状況下では、フォトダイオードそのものが光信号を遮断し、ポイントとして振舞う可能性もある。このため、イメージセンサの画角の外に設置することが望ましい。

フォトダイオードとイメージセンサの位置関係は、上の条件を満たしてさえいれば、それほど厳密に固定されている必要はない。フォトダイオードがずれた場合、イメージセンサ上での光信号への干渉可能領域がややずれる。しかし、フォトダイオードの受光野の内部に焦点が存在していれば、タグのイメージをポイントすることで光信号が遮断できるという特性は維持される。

フォトダイオードの受光野のなかからイメージセンサの焦点が外れてしまった場合、この干渉領域とイメージセンサ上のタグが完全に離れるので、この関係を維持することが出来なくなる。しかし、フォトダイオードとイメージセンサの距離が近い場合、受光野がイメージセンサの焦点をはずすほどずらすためには、フォトダイオード系を、受光野と同じだけ移動させるか、あるいは旋回させる必要がある。フォトダイオードの受光野をイメージセンサ前面と同じ面積に調整していた場合、誤差を生じさせるための移動量は、イメージセンサと同じ大きさとなる。フォトダイオードをイメージセンサに向ける際に、ある程度大まかに作業を行ったとしても、これだけ大きな位置的な誤差が生じることは考えにくい。

そこで、実用上は受信器のフォトダイオードの向きをある程度可変にし、またイメージセンサの視野への干渉を避けるために小型化したフォトダイオードを用意し、これを任意のイメージセンサに向けて設置するだけで、その光受信器を GhostTag

受信器として使用することが可能であるということが出来る。

4.4.3 ポインティングと情報の流れ

GhostTag 受信器に接続された情報機器は、GhostTag 受信器のフォトダイオード系の情報出力を観察し、情報出力があった際に「ポインティングが行われた」と推定する。このときに出力される情報が、「ポインティングが行われた」タグからの情報である。

4.5 RealEyeCommunicator

RealEyeCommunicator は、GhostTag の実装方法のうち、最も特徴的なシステムである。RealEyeCommunicator(REC) は、眼球をイメージセンサとして組み込んだ GhostTag システムである。この GhostTag システムは、眼球からの映像である、ユーザの視野を基にタグとインタラクションを行うことが可能である。GhostTag システムの特性から、ユーザの眼球に向けてフォトダイオードを設置し、反射光を捉えることでこのシステムを構築することが可能である。

このシステムでは、ユーザは、自らの視野上に移るタグの光景にポインタを重ねることで、通信を行うことが可能となる。ポインタは光信号を遮断する機能を持つ物質であればよい。人体は近赤外線を遮断するので、ポインタとして最も適切な物体はユーザの指であると考えることが出来る。タグへのポイントは、ユーザが自らの視野上で、タグの光景に対して指を重ねることで行われる。この動作は、外見的には自然な指さしとほぼ同じ行為である。

受光器は眼鏡のつるなど、装置を固定でき、なおかつ視野を妨げない位置に配置され、眼球に向けて設置される。図 4.22 は、受光器をゴーグルの下側の枠に設置した例である。このとき、受光器は視野を妨げない程度に小型化される必要がある(図 4.24、4.25)。

また、眼鏡やゴーグルは、つけ方やユーザの行動によって位置がずれることがあ

る。このずれに伴って、受光装置とイメージセンサ（眼球）の位置関係も変化するので、GhostTag のポインティング特性も変化する。この特性の変化は、光信号の反射面の状態の変化によって起こる。反射面とは、反射した光信号が入射することの出来る範囲を指す。REC では、反射面の内部に角膜、虹彩、強膜、皮膚など、眼球周辺の様々な部位を含む。しかし、図 4.20 より、反射面の中に眼球（瞳孔）が入っていれば、タグをポイントすることで確実に光信号に干渉することができる（図 4.19）ことは明らかである。同様に、眼球が回転した場合であっても瞳孔が反射面の中に位置していれば、ポインティング特性の変化はわずかである。

4.6 VisionCommunicator

VisionCommunicator(VC) は、イメージセンサとして携帯電話の CCD のようなイメージセンサを GhostTag システムに組み込む。REC の場合と同様に、受光装置をイメージセンサの表面に向けて設置する（図 4.26）。このとき、受光装置はイメージセンサの前面に配置される。受光装置がイメージセンサの画角内にあると、イメージセンサの撮影する映像に受光装置が映りこむので、不便である。そのため、受光装置は、イメージセンサの画角に入らない位置に設置すべきである。

また、VC は、組み込まれたイメージセンサの特性には影響されずに、常に同じ性能でポインティングを行うことが可能である。例えば、イメージセンサに広角レンズや望遠レンズを組み込むと、撮影される画角が変化する。しかし、VC によるポインティングは、機構上反射面の大きさと位置にのみ影響されるので、レンズの種類の違いなどの光学的条件の変化には影響されない。

あるタグを広角レンズと望遠レンズで撮影したとき、映像上でタグが小さく投影されたり、大きく投影されたりする。画像処理を行うシステムでは、タグの大きさの違いによって、タグを解読できたり出来なくなったりする場合がある。一方 VC では、組み込まれたイメージセンサの光学的な条件には影響を受けない。このため、ピンホールカメラのような安価なカメラで、あまり解像度の高くない映像しか

取れなくとも、高い精度でのポインティングを行うことが可能になる。このシステムは、携帯電話のライブビューモードなどを使用してカメラからの映像を見つつ、この映像上でポインティングを行う。このポインティングの操作は、ユーザに対してやや複雑な印象を与える。一方で、ユーザが得た情報を携帯電話のディスプレイに重畳して表示する方法を用いることが出来る（図 4.27 左）ので、REC と比較してより多彩な情報表現を行うことが可能である。

4.7 送信器の構成とポインティング

本システムでは、タグをポイントする際に特徴的な動作を行う。この動作は、タグを選択する際に、ユーザの視野上でタグに指を重ねるという動作である。この動作は、主観的には GUI 環境のポイントに良く似ている。また、外見的には自然な指差し動作と類似点が多い。このことから、この動作をテレクリックと呼ぶ。このテレクリックと送信器の関係について考察する。

4.7.1 テレクリックとポインティング

テレクリックは、タグに対して行う動作である。このため、タグはテレクリックしやすい形状である必要がある。テレクリックは、タグの映像に指を重ねる動作である。したがって、タグの外観は、テレクリックのし易さに対して重要な意味を持つ。

テレクリックの動作そのものは、ポインティングと類似している。Fitts は 1954 年にその著書 [18] で、ポインティングを、カーソルをある一定の範囲内に移動させる動作と定義した。この動作に要する時間 $MT(\text{Motion Time})$ を、カーソルの移動距離 d に比例し、ポイントすべき領域の小ささ W に反比例して決定されるものと考え、

$$T = a + b \log_2 \left(\frac{d}{W} \right) \quad (4.7)$$

とモデル化した(式 4.7)。この際のモデルは 1 次元のポインティングを対象としている。テレクリックは 3 次元的な動作であるが、カーソルの移動すべき平面を受信器からの距離 d_r で、反射面に平行な平面と定義すれば 2 次元のポインティングと同等となる。 $H \times W$ の大きさのターゲットへの 2 次元のポインティングについては、McKenzie らが Fitts の法則の拡張を試みており [19]、

$$T = a + b \log_2 \left(\frac{d}{W'} + 1 \right) \quad (4.8)$$

とあらわしている(図 4.30)。

このようなポインティングの評価から考えると、発光素子の映像の周囲に指を近づけるテレクリックは、Fitts らによって定義されたポインティングに近い動作と考えられる。3 次元でのポインティングは岩瀬らによっても研究されている [20]。

4.7.2 タグの発見

ユーザがテレクリックを行うためには、タグを発見する必要がある。GhostTag システムでは、タグの発見のためには、タグの外見からの発見と、信号光である光による発見の 2 つの方法を用いることが出来る。本研究では、主に発光素子の入手のし易さから近赤外光を使用してタグを作成している。近赤外線は、人間には見ることは出来ない。そのため、この波長を用いたタグを信号光から発見することは不可能である。このため、タグに目立つ図形などを添付するか、あるいは可視光で発光するマーカーを装着するなどして、ユーザに発見を促す必要がある。可視光のマーカーを用いる場合は、信号配信用の光と干渉しないよう、離れた波長の光を用いる必要がある。

一方で、可視光を使用して情報配信を行うことにより、信号光によってユーザに対してタグの発見を促すことが出来る。可視光によって情報配信を行う場合、一定

以上の出力で配信を行うとユーザがまぶしさを感じる可能性がある。このように、可視光を使用した情報配信には、配光を考慮する必要が生じる。

4.7.3 2つの発光素子群の配置

本研究では、視角の計測の用途のために、同期反転信号を出力する2つの素子群を並行に配置した。しかしこの配置は、ユーザに対してテレクリックを促すことの出来る配置であるとは言いがたい。発光素子群の配置は、ユーザのテレクリックを促すことが出来るよう、様々なレイアウトをとる必要がある。同期反転信号の性質上、2つの発光素子群からの光信号のどちらか一方だけを遮断できるようにすれば良いので、様々な発光素子のレイアウトを考えることが可能である。

例えば、的形などはユーザが最もテレクリックし易そうな図形と考えられる。発光素子群を同心円状に配置し、内円と外円のそれぞれを同期反転させた場合、ユーザが内円部をテレクリックすれば、信号を生じさせることが出来る(図 4.31)。

このように、遮断されうる側の信号を可能な限り高い密度で配置し、信号の配信側の発光素子を低い密度で広範囲に配置すると、ユーザが一定の大きさのポイントでポイントした場合に遮断できる発光素子の数が必ずアンバランスになるため、テレクリックによって信号を発生しやすくすることが可能である。

このタグの配置方法により、予期しない遮断による信号の発生を回避することも可能である。例えば、タグの前を人が横切るなどの場合、信号が発生する事がある。この場合、タグの前を人が横切るのだから、信号光を水平方向に遮断されるということである。2つの発光素子群の水平方向の密度が同じであれば、このような場合であっても信号が生じない(図 4.32)。



図 4.22: RealEyeCommunicator



図 4.23: RealEyeCommunicator の受光器とイメージセンサの位置関係

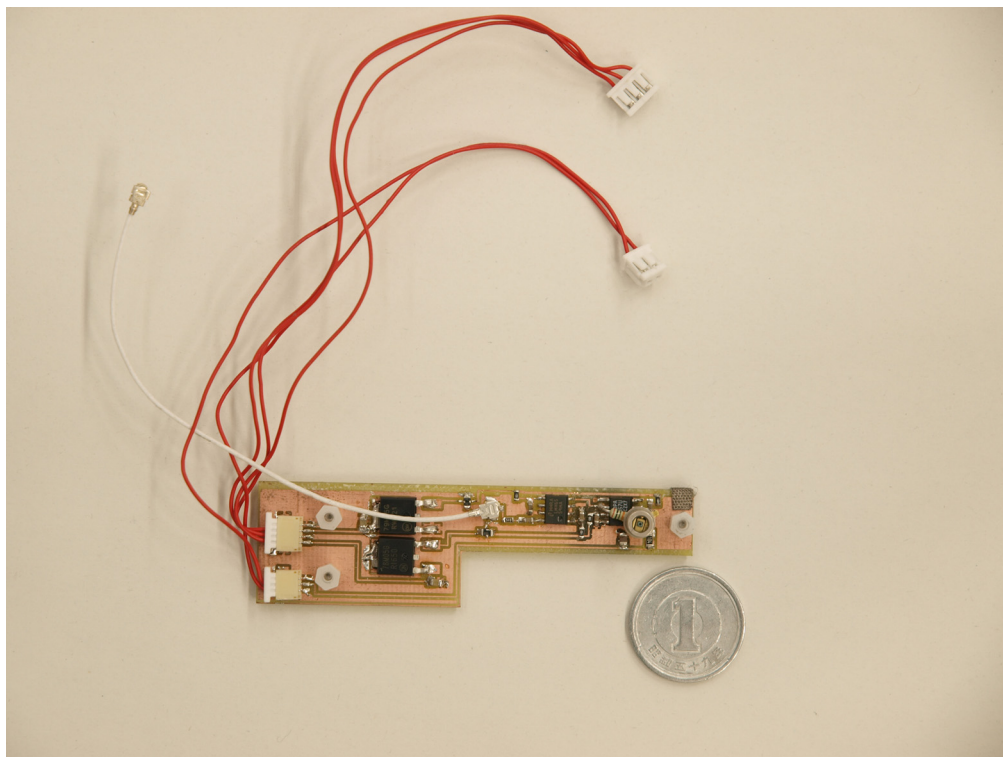


図 4.24: RealEyeCommunicator の受光器および増幅回路部



図 4.25: RealEyeCommunicator の受光器の外観（増幅回路にシールド・絶縁を施したもの）

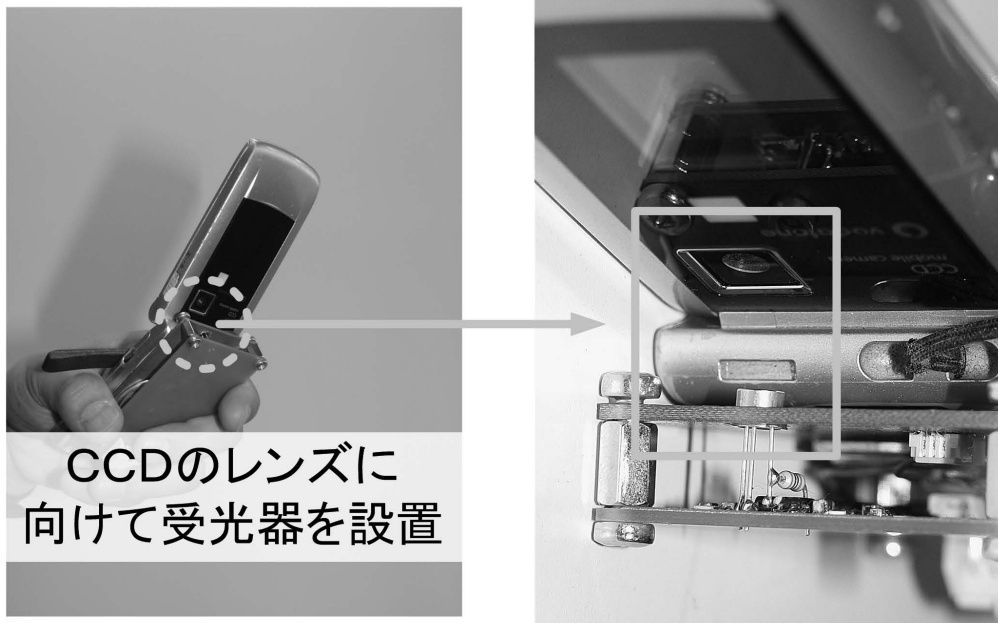


図 4.26: イメージセンサと受光器の位置関係

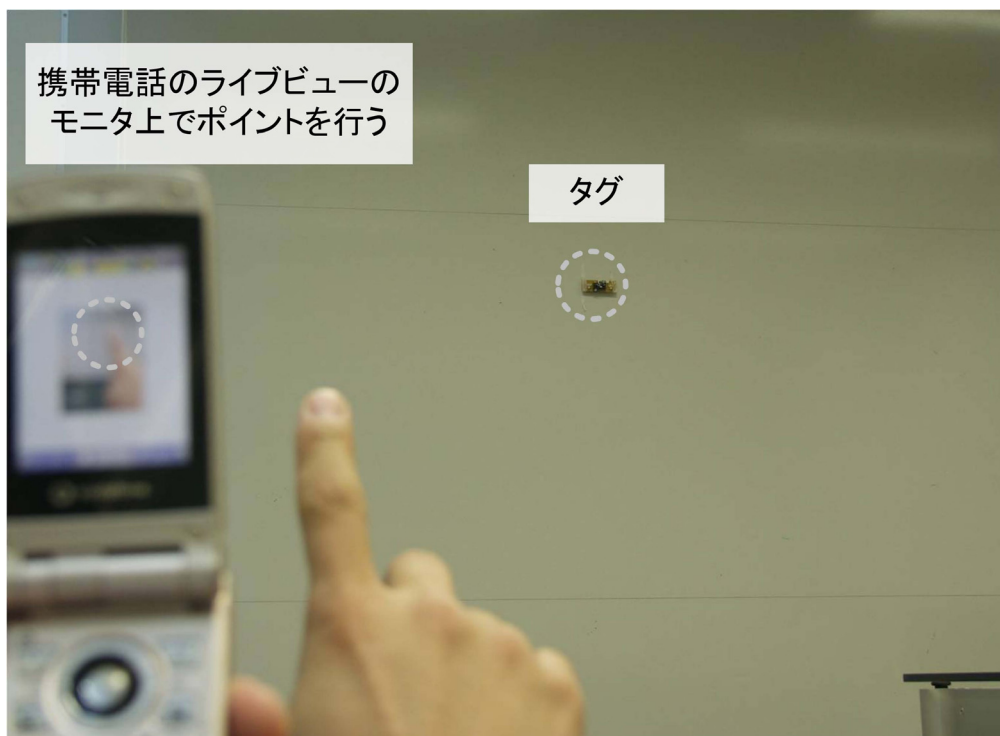


図 4.27: ライブビュー越しのポインティング

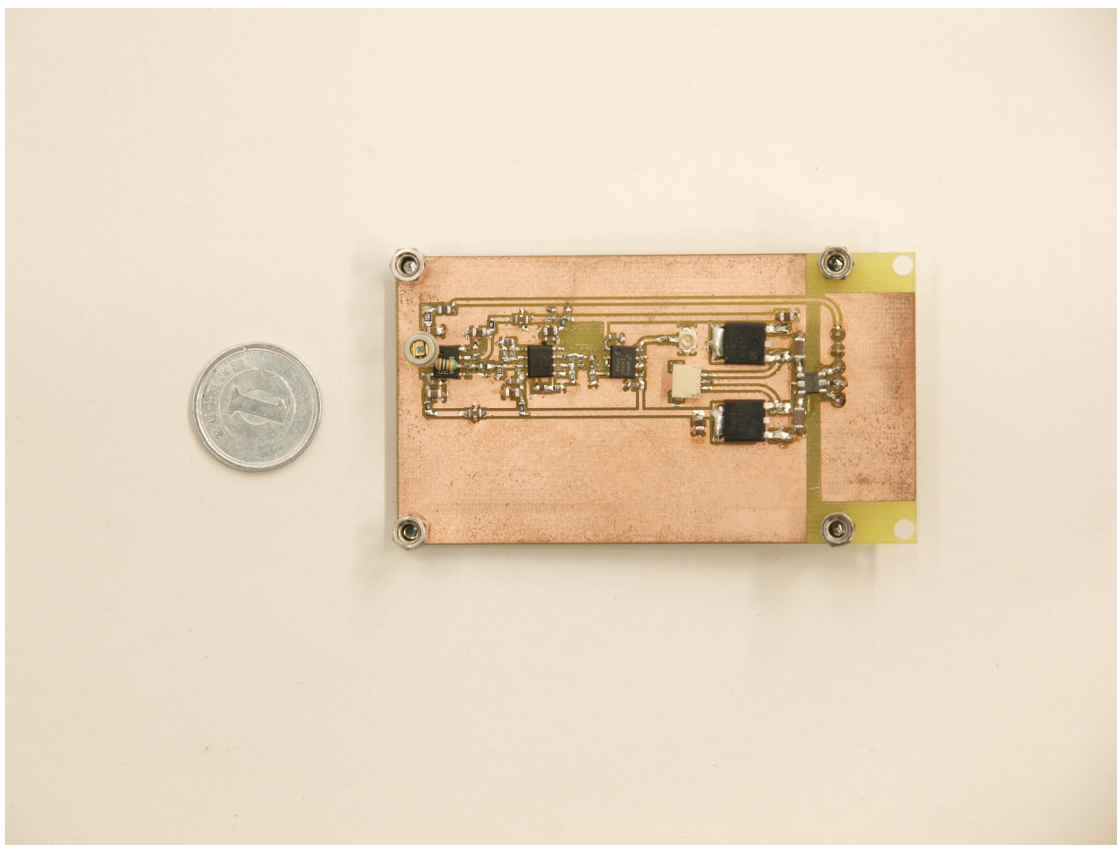


図 4.28: VisionCommunicator の受光器および増幅回路部

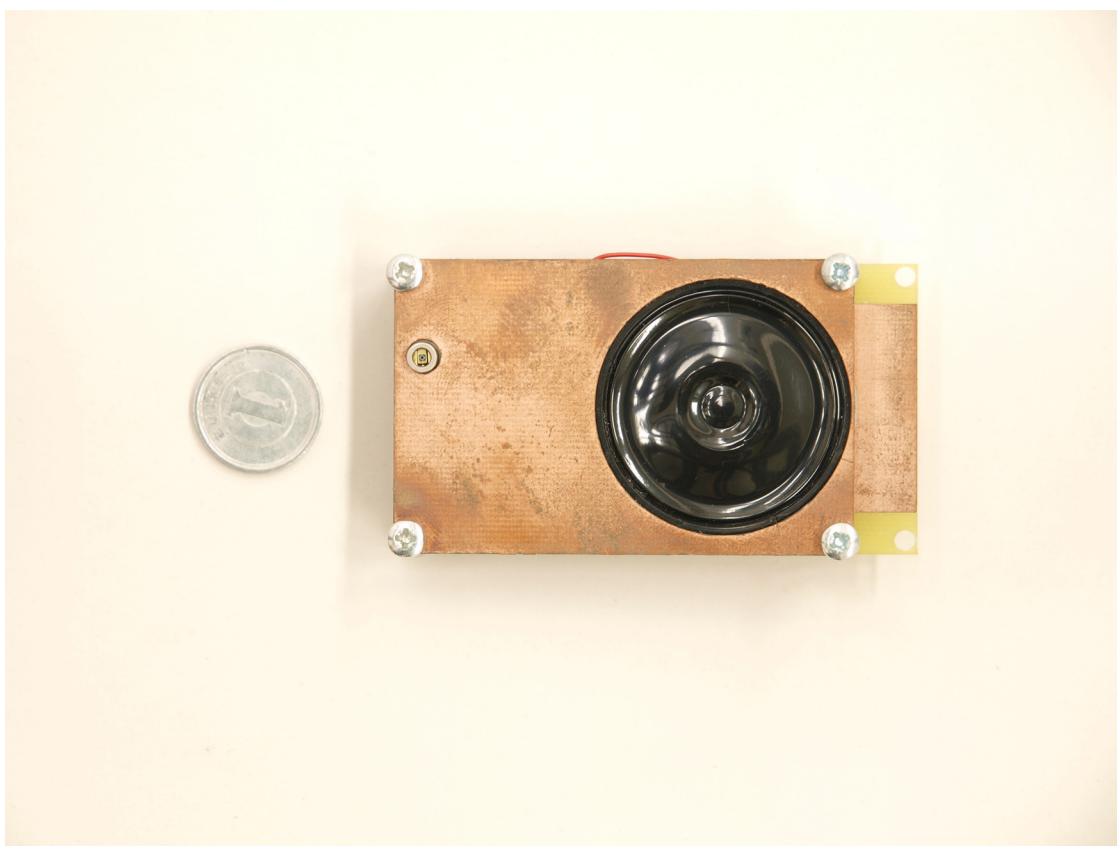


図 4.29: VisionCommunicator の受光器の外観 (PointSpeech システム)

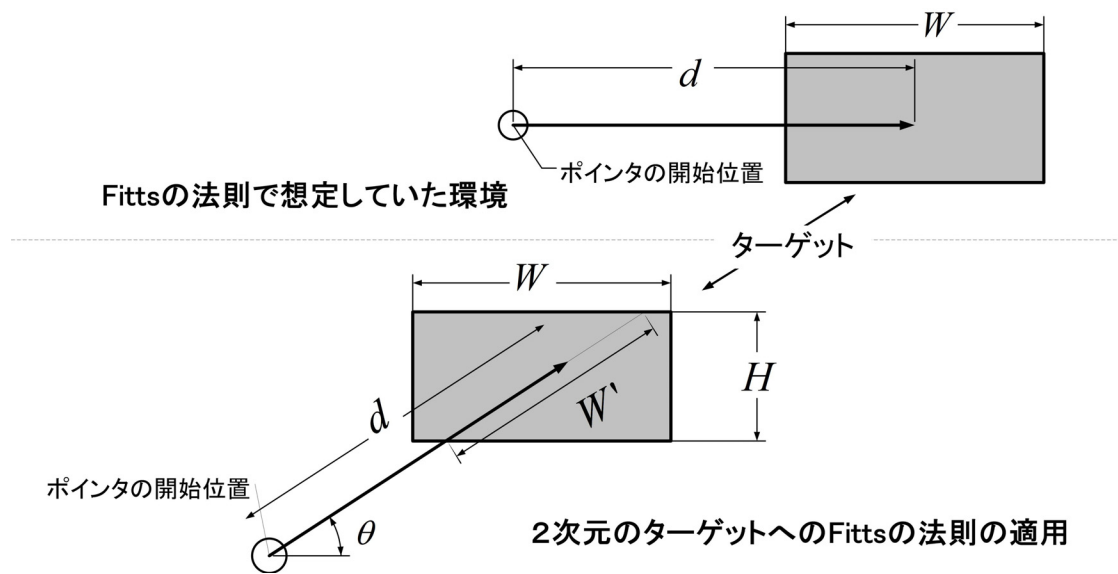


図 4.30: ポインティングのモデル (上: 一次元のポインティング、下: 二次元のポインティング)

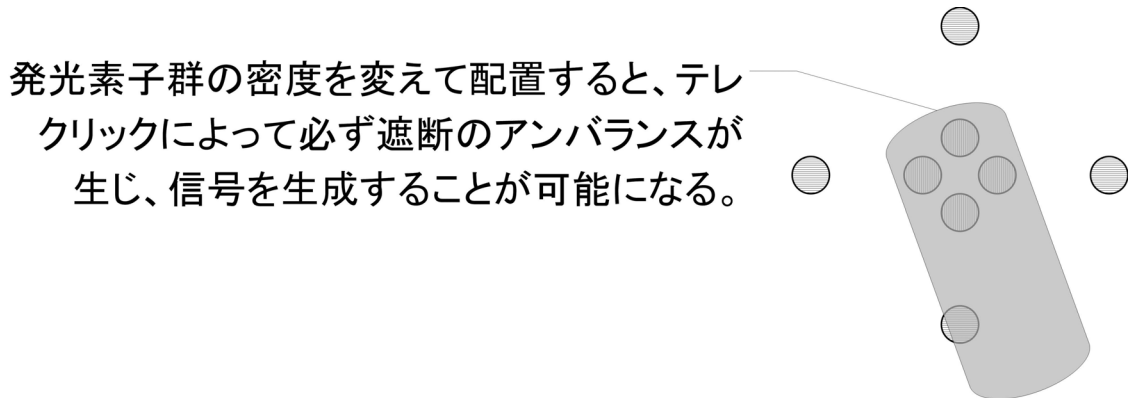


図 4.31: 発光素子群のレイアウトによる信号光の生成

ポイントを意図しない水平方向からの遮断
(人が横切る等)があっても信号は発生しない

中央の光源のグループに対して
ポイントを行うと信号が発生する

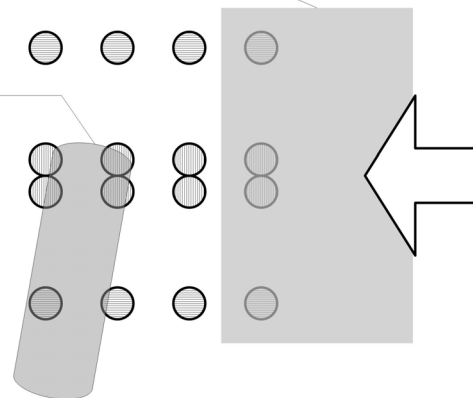


図 4.32: 水平方向からの遮断に感度を持たない配置

第 5 章

GhostTag システムによるアプリケーション

5.1 GhostTag の機能とユーザに提供できるサービス

本研究では、実世界の光景の中の小さな視角内にアノテーションを添付する手法を提案し、その一例として GhostTag システムを開発した。この手法を用いると、実世界の光景に直接データが添付され、ポイントすることでインタラクションができる環境をユーザに対して提供することができる。

本手法によれば、ポイントによってアノテーションを読み出すことが可能な範囲は、タグの周囲のある一定の視角の中に発生している。したがって、本研究ではタグを物体に添付することで、その物体の光景に対してアノテーションを添付したことになる。タグからのデータは光信号で配信されているので、ある程度の遠距離であってもポイントと読み出しを行うことが可能である。

RealEyeCommunicator、VisionCommunicator の 2 つのシステムは、ユーザの視野や、ライブビューなどに映るタグと、その周囲の一定の領域をポイントすることで光信号を選択する機能をユーザに提供する。ポイントに使用するためのポインタは、光信号に干渉できる物体ならば何でもよいので、ユーザの指を使用する事が最も簡単である。Fitts の法則 [18] から考えると、ポイントのための領域が狭いほどポイントが困難になる。従ってこの領域は、ユーザの人差し指を基準に考え、人

差し指よりも大きな範囲であるべきである。また、ユーザはアノテーションを得る際に、データを受信し終わるまでずっとタグをポイントし続けなければならない。この動作は腕を水平方向に伸ばした姿勢になるので、長時間行くと疲労の問題が生じる。このことから、アノテーションのダウンロードは可能な限り速やかに終了しなければならない。疲労によるストレスを感じることなくポイントできる時間と、アノテーションとして添付したいデータの大きさから、データの通信速度を決定することで、この問題を解決する事が出来る。

つまり、GhostTag システムによるタグ環境は、ユーザから見て指先サイズの視角内にさまざまな形式のアノテーションが添付され、ユーザがこれをポイントすることで読み出すことが可能な空間である。

次に、アノテーションとして添付することが可能なデータについて考える。従来の二次元コードなどでは、URL などのデータを含めることが一般的である。これに対して、本研究の様式では、タグから連続データを送信することも可能な点が特徴である。したがって、URL や ID などのアドレスを収めるだけでなく、アノテーション情報そのものを収めることが可能である。また、通信器の形態を取っていることから、ストリーミングデータのような連続データを送信することも可能である。GhostTag システムで取り扱うことが可能なデータは、二値化されたデータ（デジタルデータ）である。現行の情報環境では、例えば音声のようなアナログデータであっても、デジタルデータに変換することが一般的に行われている。したがって GhostTag システムでは、現行の情報環境で扱われているデータの大部分をアノテーションとして添付することができる。

この機能は、光景に大量の情報を含ませる事を可能とする。実世界では、我々は文字や図形による視覚的な情報によって実世界の情報を得ている。これらは図形によって情報を伝えてるので、ある一定以上の視角を持たないとユーザに対して情報を伝えることが出来ない。また、視力の弱いユーザには情報を伝達する事も困難になる。このことは、看板などの例を取ってみると明らかである。一方で、実世界で行動する際には、しばしば大量の情報を必要とする事があり、こうした図形などに

頼った情報収集だけでは対応しきれない場合がある。GhostTag システムでは、一定の視角内に大量の情報を、さまざまなメディアで使用可能な状態で添付する事が可能である。例えば時刻表や鉄道の路線図のような大量の情報を提示するためには、現在までは大きな看板を使用するしかなかったが、本技術を使用する事によってバス停などの小さな物体に添付し、ユーザは手許の携帯電話などの小型機器でこれを「見る」事が出来る。情報をデータの形で配信すれば、各ユーザがインタラクティブにこの情報を使用するなど、看板では不可能な情報支援を行うことが出来る。また視覚情報に限らず、音声データを添付して弱視者へのサービスを提供するなど、ユーザの事情に応じたきめ細かな対応をすることも可能である。

こうしたサービスは無数に考案する事が出来るが、大別すれば主に 2 種類のインタラクションが可能となる。ひとつは、光景からアノテーションを求める方法で、例えばある物体に音楽（音声）を添付し、ユーザがポイントすることでこれを視聴可能とする様なサービスを指す。このサービスは博物館や美術館など、大規模な建造物内での情報支援システムに使用することができる。この逆に、アノテーションから光景を求める方法もある。例えば、ユーザがある属性を指定し、ポインタで光景をスキャンする。ユーザが指定した属性が受信された瞬間にシステムが通知を行えば、指が重なっている光景がユーザの求める属性を持つ対象である。このサービスは、例えばバスターミナルなどで使用することができる。ユーザが目的地のバス停を指定し、バス停の光景をスキャンすると、その目的地に向かうバスが発着しているバス停にポインタがさしかかったところで通知される。

このように、本研究で提示する手法は実世界の光景とのインタラクションを元にしたアプリケーションを構築する機能をもつ。

5.1.1 タグの添付とポインティング

光景へのポインティング

光景へのポインティングは、実際にはタグから発せられてイメージセンサ周囲に到達する光信号にポインタが干渉できる範囲に対して行われる。ユーザがタグをポイントする際に、実際にポイントすべき範囲はこの光信号に干渉することが可能な範囲である。ポインティングの評価をする際に Fitts[18] らが取り入れた尺度が、ターゲットの大きさ W であり、2次元のポインティングでは MacKenzie らが W, H の大きさが尺度として取り入れている [19]。

GhostTag システムにおけるターゲットの大きさとは、受信器からポインタまでの距離が d_r である場合に、光信号の干渉可能な領域 W である。この領域を視角 θ_r であらわすと、

$$\theta_r = 2 \times \arctan \frac{W}{2d} \quad (5.1)$$

となる。干渉可能領域の視角は、理論的には幾何的な配置図から求めることも可能であるが、システムの運用上からは実測値を計測する方が現実的である。

タグの設置密度

この特性から同期反転信号を発するタグのポインティング特性を求めることが出来る。2つの点光源に対して、同じ大きさの視角のタグが出現するのであるから、2つの点光源の視角が大きいときには2つの干渉可能な領域が発生し、どちらかをポイントすればよい事になる。点光源の視角が狭くなるにつれて、この2つの領域は次第に重複し始める。視角が0になる(=タグまでの距離が無限大になる)と2つの領域は完全に重複する。重複した部分をポイントしても信号・反転信号の双方が一度に遮断されるため、信号を検出することは出来ない。

受信器とタグとの距離が離れるにつれ、タグの光源間の視角が狭まり、2つの光信号の領域が重なる。重なった領域の光信号はポイントしても検出できない。した

がって、一定以下の視角しか占めないタグはポイントしても信号が生成されず、検出することが出来ない。

信号が検出できるタグは、その視角によって判別することが出来る。2つの点光源の間にポインタを位置させることが可能であれば、そのタグは最大の効率でポイント可能であるということであり、これよりも小さい視角になるにつれて信号の受信が不利になることが分かる。

ユーザビリティの観点から考えると、ポインタの大きさよりも小さな目標をポイントすることはあまり直感的な行為ではない。また、あまりにも小さくみえるタグは発見することも困難である。遠くから発見されることを目的としたものは、例えば看板やポスターなどがある。これらは大きく作ることが一般的である。したがって、遠くからポイントするためのタグがある程度大きくなることは、デザイン上妥当であると考えることが出来る。

5.1.2 大容量タグデバイスとしてのサービス

ポイントすることによって光信号が受信されるということは、ポイントすることによってアドホックに通信路が設定されると考えることも出来る。この通信路はタグから受信器に向けた一方向にデータの転送を行う通信路である。このため、受信器側からタグに対して情報を送ることが必要な、フロー制御（送信要求・受信確認）をすることは出来ず、タグが一方向的に情報を配信するだけとなる。また、通信路に物理的に干渉することによって選択するというシステムの性質上、通信路の状態は常に不安定であると考えなければならない。このため、確実なデータ転送を望む場合は強力な誤り訂正符号を用いて情報転送を行う必要がある。

また、タグはユーザのポイントを検知することは出来ないなので、同じデータを繰り返し配信するか、あるいはストリーミングデータのように一回性のデータを送信し続ける方法をとる必要がある。

短いデータ（URL など）を送信する

URL データを符号化し、繰り返し送信する。GhostTag システムは高速信号を使用可能であるので、一つのデータの転送時間は数 μ sec-数 msec の間に収めることも可能である。この時間は、ユーザによるポイントの停留時間よりもはるかに早いことから、ユーザにはデータ転送によるストレスを与えない。また、ポイントがタグに「重なった」というだけでもデータ転送が完了するので、ポイントの重なりのみを検出することも可能である。こうした短いデータ配信は、後で述べる PointSearch システムなどで使用される。

音声案内を配信する（アナログ信号）

アナログ信号を PWM、 Δ 変調などの手法を用いてデジタル信号化し、送信する。音声案内であるので、同じ内容を繰り返し配信する。ユーザはポイントした時点から音声を聞き始め、音声を得る場合はポイントし続ける必要がある。したがって、それほど長い音声を配信することは適当ではない。

音声案内を配信する（デジタル信号）

MP 3 などの符号化を行ったデータを配信する。データはファイルの形で送信され、ファイルのダウンロードが終わった時点で再生が始まる。この送信方式では、データ転送速度が速ければ早いほどダウンロード時間が短くて済む。このため、高速信号を使用可能な GhostTag システムの特性を最大限に活かすことが可能である。

ある程度の大きさのデジタルデータを配信する

データファイルを送信することが可能なのであるから、その形式は MP3 などの音声規格のファイルのみに留まらず、さまざまな形式のファイルを送信することが可能である。静止画、動画などといったデータから、FLASH や HTML のような

ファイル、プログラムの実行形式そのものや、エージェントのような実行形式まで、アプリケーションごとにさまざまなデータを送信することが可能である。

5.2 PointSpeech

PointSpeech は GhostTag システムを使用したアプリケーションのひとつで、音声案内を目的としたデバイスである。送信器から変調された音声信号を配信し、ユーザはこの送信器（タグ）をポイントすることによって音声情報を得ることが出来る。

従来の音声支援は、スピーカなどから音声を出力し、ある一定の範囲内にいる人に聴こえるようにするもので、局所的な配信機能を持っていた。また、博物館などで既に使用されているシステムは、展示物に添付されている番号を入力するとその番号に対応した音声案内が流れるものや、局所的な電波によって音声案内を放送しているもの、赤外線で配信を行っているものなどがある [21]。この方法は、ある程度大きな展示物の近辺にユーザがいる場合は有効である。

5.2.1 音声と場所の関係の理解

これに対して PointSpeech は、指さしたタグから音声が届くので、実世界のオブジェクトそのものに対して音声を添付することが特徴である。さらに、ユーザはタグをポイントすることで音声を聴くことが出来るので、タグと音声の因果関係がはっきりと理解できる。

このようなシステムは、例えば動物の鳴き声などの展示の際に有効であると考えられる。従来のシステムでは、動物の写真や模型などの下にボタンがあり、このボタンを押すことで鳴き声がスピーカーから聴こえてくる仕組みであった。この仕組みは、他の人がボタンを押した際に聴こえてくる鳴き声と区別がつかない場合や、周囲の音声との区別がつかない場合があると考えられる。PointSpeech システムを使用すると、ユーザがタグをポイントした際にだけ音声が届くことから、ポイントと音声の関係を簡単に理解することが出来る。

5.2.2 音声案内

また、GhostTag システムは、比較的狭い視角内に音声などのデータを添付することが可能である。昨今、建築技術の発達により複雑な建造物が増えており、これらの建造物は吹き抜けや多層構造など、立体的な内部構造を持つ場合が多い。これに対して従来の地図は 2 次元の地図であるので、地図と実際の建造物の対応をとる事が困難である場合がある。このようなとき、ユーザが対象物を指さして音声案内を得ることが出来れば、非常に直感的に対象物を特定することが可能である。

5.3 PointSearch

PointSearch システムは、PointSpeech システムとは逆に、ユーザが探している対象がはっきりしている場合に使用されるシステムである。ユーザは、自らが発見したいタグの ID を受信器に登録しておき、指などのポインタで視野をスキャンする。すると、指は視野内のタグを一瞬ポイントして行くので、全てのタグからのデータを少しずつ拾うことが可能である。GhostTag システムはある程度の大きさのデータを高速で送信することが可能であるので、このデータ内に自らの ID を含めておくことは現実的に可能である。受信器は受信した信号をデコード・逐次検索し、目的の ID に合致するものがあった場合、サウンドを流すなどの動作を行う。

すると、ユーザは指が目的のタグに重なった瞬間に音がするので、目的のタグが何処にあるのかをある程度見当づけることが可能である。このシステムは、タグから送るデータの内容が多ければ多いほどいろいろな使用方法がある。例えば、バスターミナル内で、停留所のポールから、その路線の停留所データを全て放送しておく。ユーザがある目的の停留所を入力して PointSearch すると、目的地に向かうための停留所に指が重なった瞬間に音が鳴るので、どの停留所に向かえばよいのかすぐに理解することが出来る。

5.4 PointSpeech の実装

アプリケーション例でとりあげた PointSpeech システムの実装を行い、システムが動作することを実証した。

5.4.1 送信器

発光部 発光部は、DNK318U¹ 6 つを一つの発光群として、この発光群を 2 つ配置した送信器を設計した。DNK318U の発する光は 870nm であり、近赤外域である。また、この LED の半値幅は 20° である。

信号制御部 信号制御部は、東芝製 TC7WH74F の D フリップフロップを使用して同期反転信号を生成した。

音声の送信 音声はアナログ波である。デジタル信号を送信する PointSpeech システムで音声の情報を直接送信することはできない。そこで本システムでは、アナログ波をデジタル信号に変調する方式の一つである、パルス幅変調を用いて送信を行った。パルス幅変調 (Pulse Width Modulation) は、矩形波のデューティ比 (周期とパルスの幅の比) を変化させることにより、電圧や電流の変化を表現する方法である。パルス幅変調された音声信号をスピーカに入力すれば、そのまま音声信号が出力される。

実装したシステムでは、あらかじめパルス幅変調された音声データを出力するメロディ IC である NT-217 を使用し、この信号を入力信号としてタグの LED の発光を制御した。

¹スタンレー電気

5.4.2 受信器

VisionCommunicator VisionCommunicator のイメージセンサは、携帯電話に装着されている CCD を採用した。携帯電話は Vodafone (ソフトバンク) の V301SH を使用した。V301SH は 160×120 画素の CCD カメラを含んでいる。フォトダイオード系と携帯電話を組み合わせ保持したときに、フォトダイオードが V301SH のカメラの開口部に向かうように調節を行った (図 5.1)。本来はカメラの視野内に



図 5.1: PointSpeech システムの受光器とイメージセンサの位置関係

フォトダイオードが写らない様に配置するべきであるが、今回はデザイン上の理由からそれが困難であったため、カメラからの視野の一部にフォトダイオードが写る状態となった。

PointSpeech の実装のため、VisionCommunicator の出力を携帯型のスピーカに入力できるように基盤を増設した。増設した基盤にはスピーカとスピーカのドライブ用の IC が装着されており、PWM 信号が入力されるとスピーカから音声が出力されるようになっている。

RealEyeCommunicator RealEyeCommunicator は、特にユーザの眼球の近くにフォトダイオード系を位置させることから、フォトダイオード系の素子をコンパクトに配置し、全体のサイズが小さくなるように試みた。また棒状の形に収まるように工夫し、極力ユーザの視野との干渉が少なくなるようにした。また、眼球近辺でアバランシェフォトダイオードのバイアス電圧である高電圧（ $\sim 200\text{V}$ ）を運用するため、漏電には特に配慮し、全体を導体でシールドした後、絶縁体でシールするなどの措置をとった。

フォトダイオードは M5844²を使用した。このフォトダイオード系を、安全ゴーグルの内部に配置し、ユーザがゴーグルを被ることによって使用できるようにした。このシステムはユーザが眼鏡を掛けていてもいなくても使用することが可能である。

受信器と送信器の全体構成を図 5.2 に示す。

5.4.3 フィルタの設計の例

GhostTag システムでは、受信した光信号の中から、ノイズを除去して、ユーザがポイントした信号のみを特定する必要がある。特定には、周波数情報を利用している。PWM 信号は、デューティ比を変化させて情報を伝えているのであるから、ある範囲の周波数を使用していると考えることが出来る。フィルタ回路は、ポイントされた PWM 信号のみを通過させ、それ以外の周波数帯を減衰させなければならない。以下にその例を示す。

²松定プレジジョン製

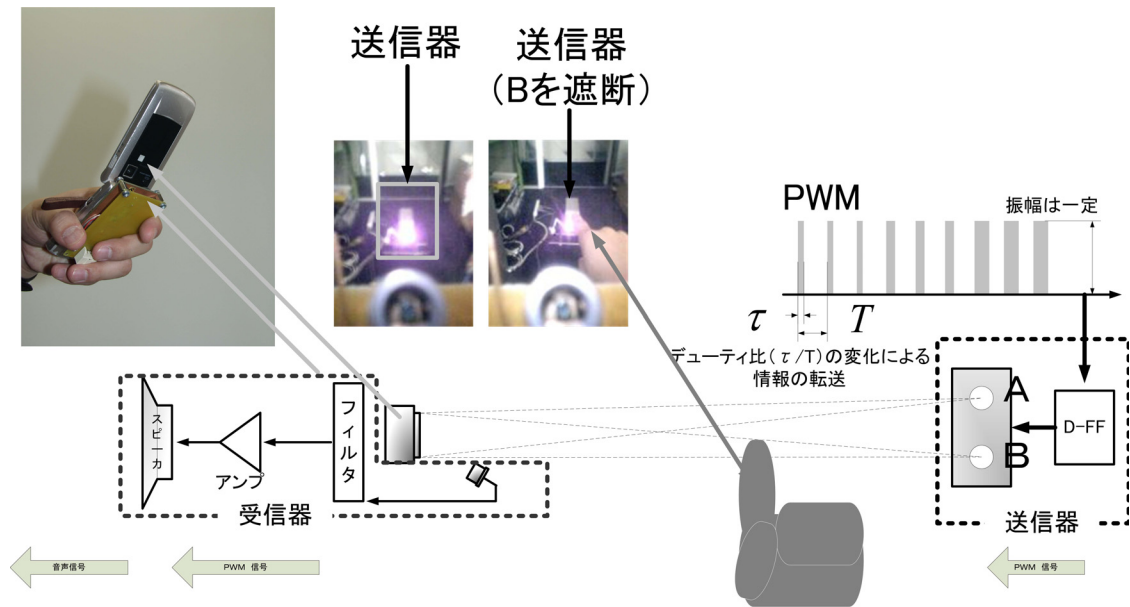


図 5.2: PointSpeech システムの構造と動作

ハイパスフィルタ ハイパスフィルタは光信号のうち、DC 成分を除去する機能を持つ。これは太陽光などの周波数を持たない成分などを除去するなど、最も基本的な機能を持つフィルタである。増幅の関係から、ハイパスフィルタは初段の電流・電圧変換回路の直後に含むことが多い。ハイパスフィルタを通った PWM 信号を図 5.3 に記す。

ローパスフィルタ ローパスフィルタは、対象の帯域よりも高周波のノイズを除去するために挿入されるフィルタである。PointSpeech は、最終出力がスピーカなので、高周波成分があったとしてもスピーカでは再生することが出来ない。したがって、ローパスフィルタを挿入する意味はそれほどない。しかし、実際に元の信号を観察するために、出力電圧をローパスフィルタに通したものを観察する（図 5.3）。

7.5kHz 以上の信号を遮断するローパスフィルタによって整形された信号を図 5.3 に載せる。除去された高周波ノイズは、インバータ蛍光灯によるノイズであると考

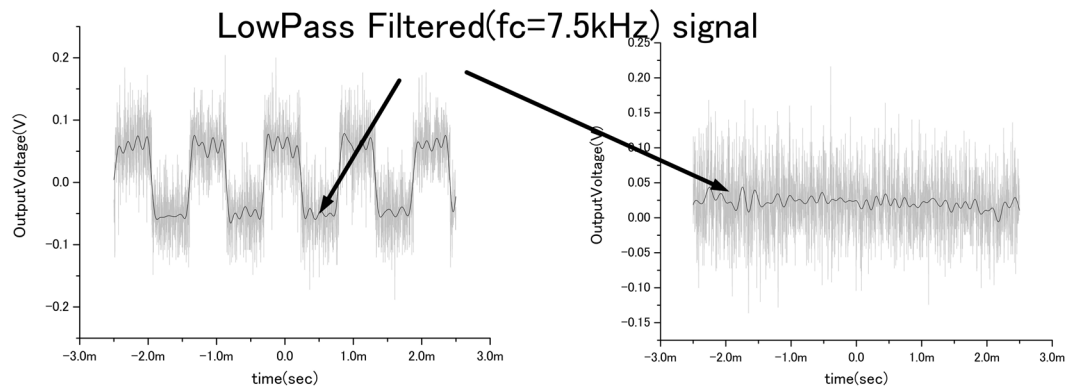


図 5.3: ローパスフィルタによる高周波領域の除去

えられる。

第 6 章

関連研究

6.1 実世界の物体への情報添付

Ubiquitous Computing 環境 [1] が提唱された後、機材の小型化や無線通信技術の発達に伴い、実世界で計算機システムを運用しようとする研究がなされてきた。実世界の物体に計算機内で扱う情報を添付しようとする考え方は、こうした研究の流れから生まれた。情報の添付の仕方にはさまざまな方法が提案されている。

6.1.1 RFID

RF タグと呼ばれる微弱な電波で通信を行うためのタグを使用して実世界の物体に添付する手法である。Brygg Ullmer らは、iButton とよばれるコンピュータチップを木製ブロックに添付し、このブロックの物理的な動きを介して計算機ネットワークを操作する研究をおこなった [22]。また、Roy Want らは、1999 年に小型のタグを実世界の物体に添付し、実世界環境と計算機内の環境の橋渡しを行うことを提案している [2]。

6.1.2 Augmented Reality 環境と 2 次元コード

実世界の物体に対して情報を添付する方法は、電波を用いたタグを添付する以外にも様々な手法が提案されている。カメラを使用して実世界を認識する技術がそれである。実世界の光景に情報などを重畳して表示する Augmented Reality (強化現実) は、1990 年代から研究が盛んになった。Feinger らは、ヘッドトラッカーとシースルーディスプレイを併用し、実世界の光景に注釈情報や、オブジェクトの 3 次元透視映像を重畳する手法を提案している [23, 24]。また、暦本らもカメラを通して見た光景に情報を重畳する手法を提案している [25]。この研究では、実世界の様子をカラーコードを通して認識していた。

情報の重畳のためにはヘルメットマウントディスプレイやシースルーディスプレイが使用されることもあったが、CCD とディスプレイだけで構成されるシステムも普及している [25]。実世界に情報を重畳するためには、実世界に図形や色彩から成る識別用コードを貼り付け、これを画像処理している。NaviCam では [25] カラーコードが使用されていた。また、CCD によって画像コードの読み出しを行う手法も試みられている [26]。このような画像コードは、誤り訂正などの複雑な機能を持つ 2 次元の図形コードに発展した [3, 27]。CyberCode は商品化されており、また QRCode と呼ばれる機材¹も普及している。

これらの 2 次元コードは図形によって情報を伝達する仕組みになっている。QR-Code や CyberCode、Vidget [28] などでは図形的なシンボルを使用しているが、他にも Hue 値などを使用する手法も見られる [29]。画像処理を用いていることから、情報の読み出しだけではなく、ビジュアルタグに対するカメラの姿勢を推定することも出来 [30]、効果的に情報を重畳表示させることが出来る。このように画像認識を用いたシステムは、座標認識を用いたアプリケーションを作成できることも特徴である。

これらの手法を用いた研究は、小型の CCD が普及し、携帯機器に画像処理が行

¹DENSO

えるようなプロセッサを搭載することが出来るようになってからさらに拡大した。特に携帯電話に搭載されたCCDを利用するケースが多くみられる。このとき、手持ちデバイスに装着されたCCDを利用したコードの読み出しには手ぶれの影響が生じるので、画像処理によって手ぶれの影響を抑止する手法が提案されている [31]。また、画像コードと携帯電話 (Cell-Phone) を組み合わせた多数のインタラクション手法が研究されている。ポインティングはその手法の一つであり [32]、Toye らは携帯電話を使用した2次元タグのポインティングについての研究をおこなっている [33]。さらに、CyberCode へのポインティングを検知する手法も研究されている [5]。

6.1.3 動的に変化する2次元タグ

2次元タグは印刷物にも添付できるなど、使い勝手の良いものであったが、固定長のデータしか添付できない問題があった。このため、2次元タグの形状を時間的に変化させて読み出すタグの研究が行われた。岸野らはディスプレイやLEDを使用してこのようなタグを作成した [4, 34]。連続的に変化するタグは、光空間通信を行っていると考えられることも出来る。CCDの時間解像度を更に早くすることで、イメージセンサを利用して高速な光通信を行うことが可能である。松下らは、実世界の光景と、その中に存在する光送信器からの光信号を同時に受信することが可能なID Camを用いたシステムを提案している [35]。また、中川らは、イメージセンサを使用したシステムについてイメージセンサ通信として提唱している [16]。

6.1.4 アドホック通信とインタラクション

実世界に添付されたタグから情報を読み出すということは、タグと読み出し機の間アドホックに通信路を設定しているということに他ならない。実世界環境では、接触や撮影といった手段で通信相手を選び、通信路を設定していた事になる。Misker らは、多数の機器を組み合わせる作業の際に、機器を選択するにはどの

ような方法が適しているかを調査した [36]。

通信相手を特定する作業はさまざまな手法が用いられている。Holmquist らは、2 つのデバイスを同時に振ることで通信路を設定する手法を開発した [37]。Yatani らは直感的に通信を行う手段として、情報を「トス」したような使用感をユーザに与えるデバイスを開発した [38]。Ballagas らは、携帯電話と大型ディスプレイの組み合わせ、携帯電話によるポイントやスワイプといった動作でインタラクションが取れるようなシステムを開発した [32]。

Swindell らは IrDA 通信器を組み込んだ gesturePen を使用し、ペンの指差したデバイスとの通信を行っている [39, 40]。Pering らはジェスチャによってモバイルデバイスと、離れた場所にあるデバイスを接続するシステムを実装した [41]。Lee らは、ポイントによって複数のデバイス間で情報を共有する手法を提案している [42]。また、携帯電話 (SmartPhone) において同様の機能を実装する試みも行われている [43]。

さらに、ローカルな機器間の通信を組み合わせる手法は、Ailisto らによっても提案されている [44]。

6.1.5 光空間通信

実世界内での情報配信の手法として、光空間通信は、簡便に設置が可能で、なおかつ高速なデータ転送を行う能力があることから、しばしば取り上げられる手法の一つである。特に照明光の LED 化に伴い、高速変調が可能になることから、照明光をそのまま情報配信のデバイスとして使用することを目指した研究がなされている [45, 46, 47]。また、情報配信デバイスからの光信号を太陽電池で受けることにより、無電源でも動作するシステムが中村によって開発されている [48]。

6.2 実世界でのポインティング

人間は実世界のさまざまな場面でポインティングを行う。もっとも一般的なポインティングは指差しである。こうした仕草は、日常生活の中で半ば無意識に行われ、また無意識に解釈されているが、定量的にはどのような所作で、どのように対象物を特定しているのだろうか。いくつかの研究が人間のポインティング動作に注目し、動作の構造の解釈を試みている。

6.2.1 ポインティング動作に関する研究

人間の指差し動作についてはさまざまな研究者が研究をおこなっている。

Henriques らと Khan らの報告によれば、指差し動作は指先と目の共同作業であると考えられているが、この際に使用されている目は目標に近いほうの目、あるいは利き目 (Dominant Eye) であると考えられている [49, 50]。使用眼は頭部の旋回によっても変化することが報告されている [49]。

今井らは、対面環境下で被験者に指差し行為を観察させ、指差し行為によるポインティング地点を割り出させる実験を行った [51]。これによると、被験者は指差し時の人差し指のベクトル方向であると認識する傾向にあるが、実際に行為者が指しているのは目と指先を結んだ点であることが報告されている。Carbini らは指と目の関係からポインティングのベクトルを算出する手法を提案した [52]。また、Tomfelde らはポインティングの停留時間に着目し、インタラクションシステムの設計に資すること試みた [53]。Oakley らは、手持ち、手の甲、手首にセンサパックをつけた際のポインティングについて評価を行っている [54]。

6.2.2 ポインティングが有効なケース

Valkkynen らは、ポインティングとタッチングについてのユーザによる評価を報告している [55]。この研究では、特にユーザがポインティングとタッチングを使い分ける目標までの距離を報告しており、座っている際で 1.0m、立っている場合で

1.2m であると報告されている。Rukzio らは、ポインティング、タッチング、スワイピングの 3 つの動作について、ユーザがどのようなケースでどの動作を選択するかを調査した [56]。Fitts の法則は、年齢による変化を受ける。Bakev らは、老齢の被験者によるポインティング特性を評価した [57]。Haikio らによって、老齢者には接触型のインターフェースのほうが有用であることを指摘している [58]。

6.2.3 レーザポインタ

実世界ポインティングにおいて最も普及している方法は、レーザポインティングであると考えられる。我々がレーザポインティングを行う機会といえば、そのほぼ全てがプレゼンテーションの際であると言える。

プロジェクタに投影したレーザの光点を画像処理する手法は 1990 年代後半には現れており [10]、光点によるインタラクション手法の提案もなされている [59]。また、GUI 環境を動かすような本格的な操作手法もなされており [11]、ユーザによるレーザの操作特性などの計測や [60]、他のポインティング手法との本格的な比較も行われた [61]。レーザポインタは主に壁などの大画面でのインタラクション用のデバイスとして研究され、他の無線手段と組み合わせてマウスに近い操作環境を構築する試みや [12]、レーザを工夫することによって操作環境を構築する [62, 63] 研究、レーザの動きを解析することで GUI 環境に近い機能を実装する方法 [64] 等が研究されている。また、多数のレーザポインタ（およびユーザ）による協調動作の提案もあった [65]。また、大画面インターフェースにおいて不可欠な、レーザスポットの検出手法に関する研究 [66] や、新しい操作手法の提案も行われた。志筑らは画面端を利用したインタラクションを提案した [67]。また、プレゼンテーション時に有効なポインティングデバイスの評定として、他のポインティング手段との比較なども行われている [68]。

レーザポインタによる大画面へのインタラクションを用いたアプリケーション例として、Staad による、レーザポインタがあたった場所の解像度を上げて表示す

るシステムを挙げる事ができる [69]。これは、プロジェクタによる大画面投影時の特徴を生かしたシステムであると考えられる。また、Zhang らは、レーザポインタによって複数の大型画面間でドラッグアンドドロップを行うシステムを開発している [70]。

さらにレーザの光線の 3 次元ベクトルを算出する研究が行われ [71]、ロボットや障害者支援などの目的で使用されている [72, 73]。

6.2.4 画像認識

人間の指差し行為をそのままポインティングに使用する事は、自然な発想である。画像処理で指差し行為を解析する事でポインティングベクトルを求めることが出来れば、ユーザに測定機器などを装着せずに動作するシステムを構築することが出来る。

沼崎らは、手の 3 次元映像を撮影するシステムを作成し、ジェスチャの認識を試みた [74]。岡本らは単一のカメラから 4 点 (3 点 + 1 点) の特徴点を検出し、運動視差を算出することから定性的にベクトルを割り出している [75]。これに対して林らは、複数のカメラからの画像上でユーザの 3 点の特徴点を検出することによりポインティングのベクトルを定量的に割り出す手法を提案している [76]。

また、人差し指を画像処理することでベクトルを抽出する手法も開発されている [77]。Kolesnik らは頭上から撮影することでベクトルの検出を行った [78]。また、人差し指に限らず指全てを使用する手法も提案されている [79]。Nickel らは、指と顔面の向きから HMM²を使用してポインティングベクトルの向きを検出する手法を研究した [80]。阪本らは、単眼カメラからの検出方法を研究している [81]。Buchmann らは、指先に 2 次元コードを添付することで指先の検出を行っている [82]。

²Hidden Markov Model

6.2.5 その他の手法によるポインティング

XWand は加速度計と磁気センサで自らの 3 次元ベクトルを算出する指示デバイスである [83, 6]。また、3 次元的に指の動きを計測することで動作するシステム [9] も研究されている。VisionWand は Wand と呼ばれる棒状の機器を画像処理することによって 3 次元ベクトルを算出している [84]。こうした手法は壁面や [85, 86]、テーブル面に投影された映像上で使用されることが多い [87, 88, 89] が、特殊なデバイスを使用する例もある [90]。特に大画面（大面積）に投影されている場合、マウスカーソルのようなデバイスには生じなかった、オブジェクトに手が届かないなどの問題が生じることもある。暦本らは、例えば大画面ディスプレイと PDA のディスプレイのような、多数のディスプレイが存在する環境で、各ディスプレイ間で情報の受け渡しを出来るようなデバイスを開発した [91]。また、壁面に投影した情報とのインタラクションは、様々な研究者が行っている。Guimberetire らは壁面における滑らかなインターフェイスを提案した [92]。このインターフェイスは、市販のホワイトボードペンを使用してインタラクションを行う。Baudish らは大画面や複数のディスプレイ間で、ペンタブレットを使用してアイコンを移動させる Drag-and-Pop および Drag-and-Pick という手法を開発している [93]。また、Collomb らは Drag-and-Drop の改良を試みている [94]。複数本の指を検出して行う操作手法も開発されている [95]。

第 7 章

評価と検討

7.1 GhostTag システムの評価

GhostTag デバイスは、ポインティングデバイスとしての特性と、通信器としての特性の 2 つを持つデバイスである。従って、このシステムを評価するためにはこれらの 2 つの側面から評価を行う必要がある。

7.1.1 光信号への干渉可能領域と通信の品質

GhostTag システムでは、電子回路のように実体を持つデバイスの部分は光空間通信器と同じ構造を持っている。ポインティング機能は専ら送信器・受信器（フォトダイオード系）・受信器（イメージセンサ系）の幾何的な配置に基づいて実現している。したがって、このシステムの入力はポインティングの際のポインタの幾何的な配置であり、出力は電子回路からの光信号の出力となる。

ポインティングとは、Fitts らの定義の通り [18, 19]、ある一定の範囲内にポインタを誘導する操作の事を言う。GhostTag システムにおける範囲とは、受信器から見て、ポインタが光信号に干渉できる範囲である。この範囲は視角であらわされる。光信号に干渉しているということは、電子回路からの出力に変調成分が含まれることによって判別することができる。また、ポインティングシステム全体として

考えた場合、変調成分をエラーの許容量内で復号できる範囲であると考えられる。前者はフォトダイオード系の受信系を評価するのに適し、後者はインタラクション特性を評価するのに適する。

光信号に干渉可能な領域を調べるためには、送信器と受信器の間にポインタを設置し、このポインタをスライドさせる手法を採る。このとき受信器の出力を観察し、出力が生じている範囲が干渉可能な領域である。

7.1.2 空間分解能

一般に、複数のタグを空間に貼り付ける場合、タグ同士が接近することにより信号が混信する事がある。混信することなくタグ同士を近づけられる最小の角度をシステムの空間分解能と呼ぶ。この空間分解能は光信号への干渉領域と密接な関係を持つ。

GhostTag システムは、2つのLEDからの光信号を干渉させる構造を持つが、干渉は混信の一種である。光信号への干渉可能領域とは、2つの光源からの光の干渉が発生している領域のことであり、「混信が発生している領域」そのものであると考えることが出来、この外側が「混信が発生しない領域」である。空間分解能とは、「混信が発生しない最小限の視角」であるので、空間分解能は光信号の干渉可能領域の縁までの視角そのものである。

このことは、受信器から見ると直感的に解釈することが出来る。干渉可能領域とは、イメージセンサ（受信器）から見ると、タグの周囲の情報が存在している範囲であり、Fittsらの実験で使用されているポインタのターゲットそのものである。空間分解能が干渉可能領域の縁であるということは、ポインタのターゲット同士が重なっていないという事である。これは、GUI環境においてアイコンが重複している環境になぞらえることが可能であり、この際には受信信号が混信することになる。

なお、アイコンには上、下の概念があり、重複したアイコンをクリックした場合、

一番上にあるアイコンが選択される。GhostTag システムでは上、下の概念は無いが、仮に送信器からの出力が同一であった場合、受信器からの距離が最も近いタグからの信号が最も大きく受信される事になる。このような信号を優先的に受信する機構を装着することによって、干渉可能領域の重複に対応するシステムを作成することも可能である。

7.1.3 GhostTag システムの評価

従って、GhostTag システムは、干渉可能領域が、ユーザの視点から見てどの程度の範囲に広がっているかを計測することで評価することが可能である。システム内に組み込まれたイメージセンサには、様々な画角を持つものがある。このため、イメージセンサからの出力を観察し、ピクセル数を数えて干渉可能領域を表す手法では、イメージセンサを交換した場合に統一性が保てない。従って、干渉可能領域の大きさは視角によって表すことが適当である。

7.2 光信号の干渉可能領域の実測

本研究では、タグからの光信号に干渉する事がポインティングであり、情報読み出しに必要となる仕草である。したがって、ユーザの観点から見れば、光信号に干渉する事が出来る範囲がポインティングにおけるターゲットの大きさとなる。この範囲を実測によって割り出す。

7.2.1 VisionCommunicator の干渉可能領域の実測

VisionCommunicator の送信器と受信器を利用して PointSpeech の運用を行い、信号の干渉可能領域を実測した。この干渉可能領域は、ポイントすると音声が見聴できる領域であり、GUI 環境で言うところのアイコンの大きさに相当する領域である。

実験は、ユーザがタグを選択する際に、接触ではなくポインティングを選択することが自然であると考えた距離で行った。Välkkynen らの実験によれば [55]、ユーザはポイントの対象までの距離に応じて接触（タッチング）とポインティングを使い分ける傾向がある。この実験によれば、接触とポインティングを使い分ける距離は、ユーザが立っている場合は 1.2m、座っている場合は 1.0m であったことが報告されている。そこで本研究では、タグとユーザの距離 d を 150, 200, 250cm と設定して干渉可能領域の計測を行った。この実験で使用したタグは、LED 群の間隔を 6.0cm としたタグ（図 4.6）である。

ユーザは、携帯電話と VisionCommunicator のフォトダイオード系の受信器を組み合わせて保持し、 $d = 150, 200, 250\text{cm}$ 先にあるタグを左から右にスキャンを行い、音声の出現した瞬間と、消失した瞬間を、携帯電話の撮影機能を利用して撮影した（ただし、VisionCommunicator の場合のみ 175cm の実験も加えた）。この撮影データを図 7.1 に載せる。

この撮影データにおける人差し指の間隔が、光信号の干渉可能領域である。この領域の視角を、撮影された画像からピクセル数を計測して算出する。タグの送信器の発光素子の間隔を基準にして干渉領域の視角を求めることが適当であるが、LED を点灯すると大きな輝きとして画面に映り、特に 150cm の計測の際にはひとつの大きな光点になり、この輝きがタグ本体も覆ってしまっている。したがって、LED 幅を元に視角を算出する事は困難である。そこで、ユーザの人差し指の幅を元に干渉可能領域を算定した。その算出表が表 7.1 である。

なお、左右の発光素子群からは、同期反転された信号が出力されているのだから、右の発光素子群をポイントしたときと左の素子群をポイントしたときでは、得られる音声シグナルは反転している。しかし、PWM 信号を反転させたとしても、スピーカからの出力は同様であるので、ユーザはどちらのタグを隠しているのかを区別することなくポイントを行うことが可能である。

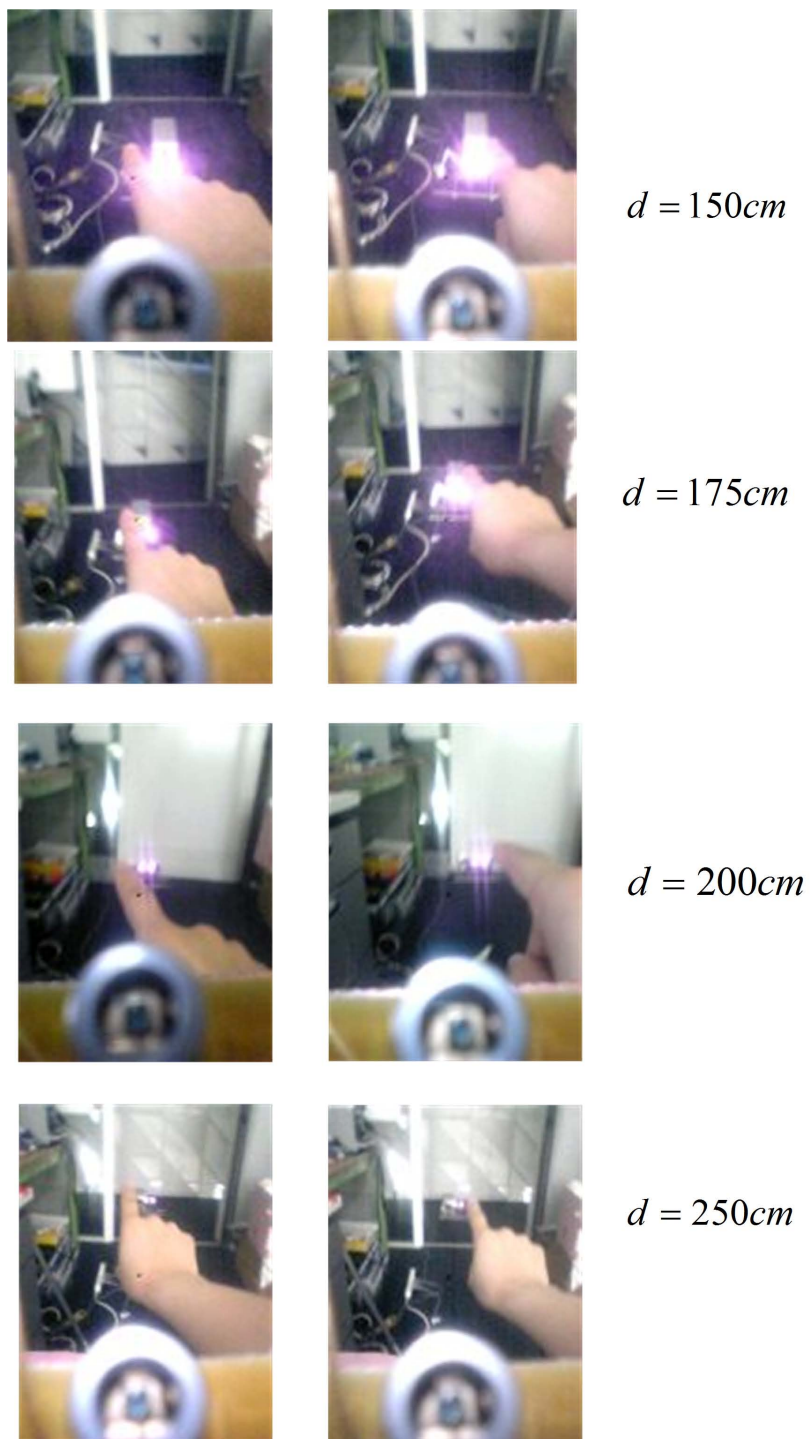


図 7.1: VC システムにおける光信号の干渉領域

距離 cm	人差し指の幅 pixel	変調領域の幅 pixel	視角 °
150	6	18	3 °
175	6	19	3.1 °
200	6	18	3 °
250	6	15	2.5 °

表 7.1: 干渉可能領域の視角

7.2.2 RealEyeCommunicator の干渉可能領域の実測

次に、RealEyeCommunicator 受信器を使用して光信号の干渉可能領域の測定を行った。RealEyeCommunicator の受信器は眼球をイメージセンサとしていることから、VisionCommunicator の使用時のように映像を利用して視角を測定することは不可能である。そこで、送信器の後方に定規を配置し、指の位置にあたる目盛りを読むことで、視角を測定した (図 7.2)。実験は、著者の左目を使用して行われ、ポインティングも左手で行われた。

この際に、受信した光信号の波形も記録した。そのデータを図 7.3、7.4 に記す。

図 7.2 の左方向 (奥、W8) からポインタ (人差し指) をスキャンしてくるにつれて音声信号が出現し、最終的に消失する様子が現れていることがわかる。この場合、W8 (左側 8cm) の通過直後から音声聞こえ始め、E4 (右側 4cm) 通過直後に音声途絶えた。図 7.3、7.4 でこの区間を見たところ、W7 から E5 の区間に PWM 信号が観測されていることが分かる。可聴のしきい値は 0.01V 近辺であると考えられる。この領域から人差し指の視角を引くことにより、信号の存在する領域 θ_r は

$$\theta_r = \arctan \frac{7}{150} + \arctan \frac{5}{150} - 2 \times \arctan \frac{0.5}{40} \quad (7.1)$$

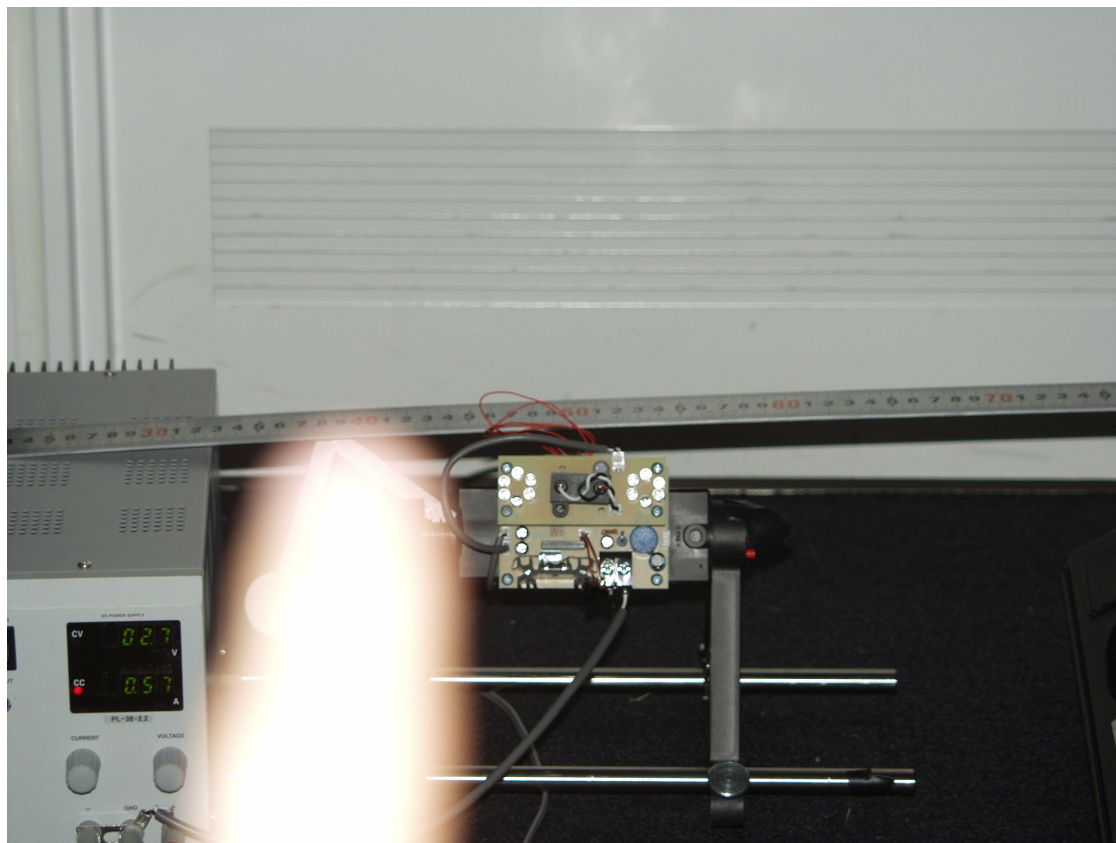


図 7.2: REC システムにおける光信号の干渉領域

と求められる。VisionCommunicator と RealEyeCommunicator のそれぞれの視野角を求めたものを図 7.5 に載せる。

このグラフに、送信器の 2 つの光源がなす視野角と、光信号に干渉可能な領域の視野角の計算値をそれぞれ書き込む。受信器から距離 d の位置にあり、 $2w$ だけ離して設置された 2 つの光源がイメージセンサに対してなす視角 θ_w は

$$\theta_w = 2 \times \arctan \frac{w}{d} \quad (7.2)$$

とあらわすことができる。

また、受信器の受光面の辺の長さが $2a$ であるとする（図 3.1）、光信号に干渉

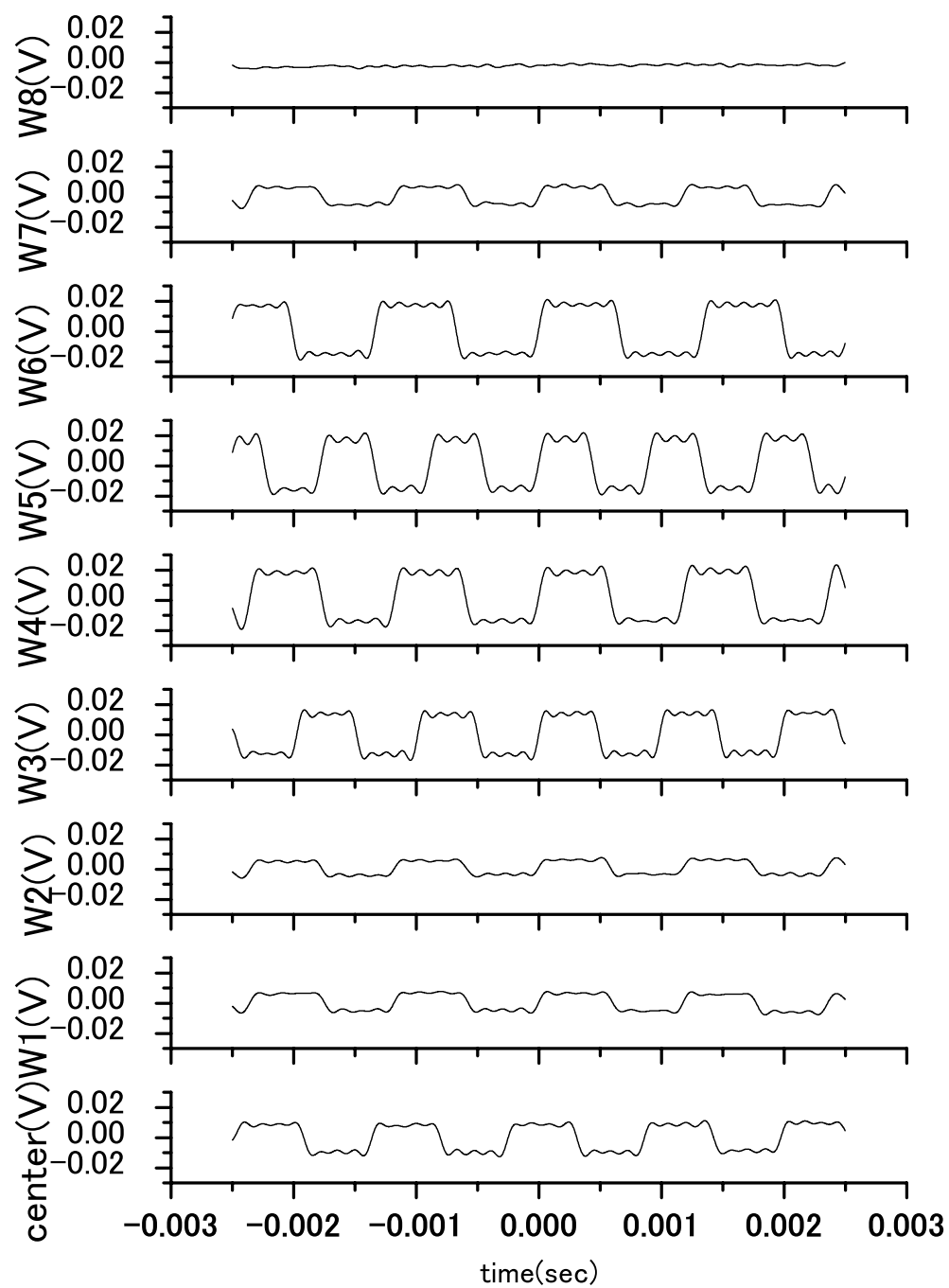


図 7.3: ポイント位置が W8-Center までの各位置にある場合の出力信号 ($d = 150\text{cm}$)

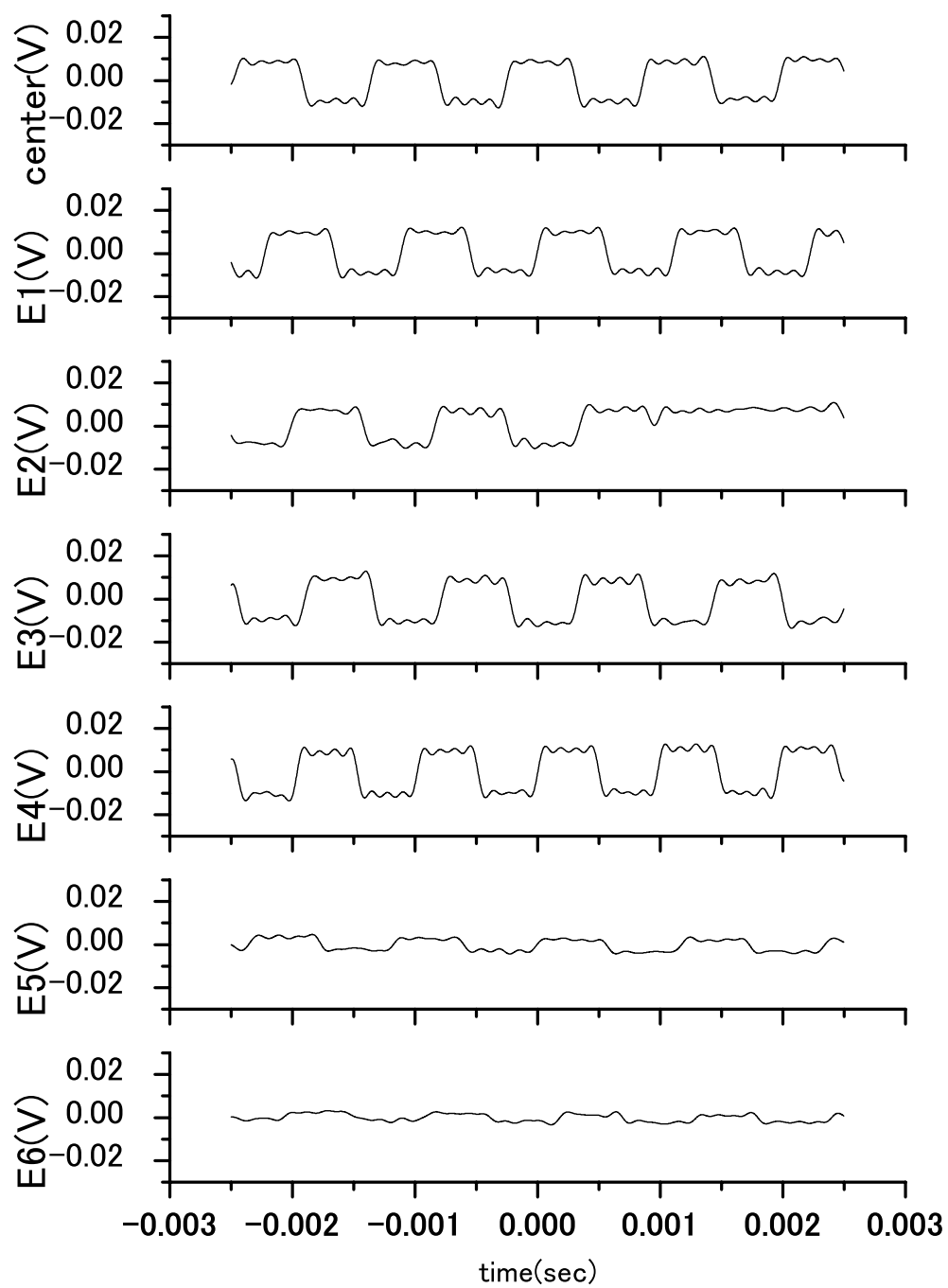


図 7.4: ポイント位置が Center-E6 までの各位置にある場合の出力信号 ($d = 150\text{cm}$)

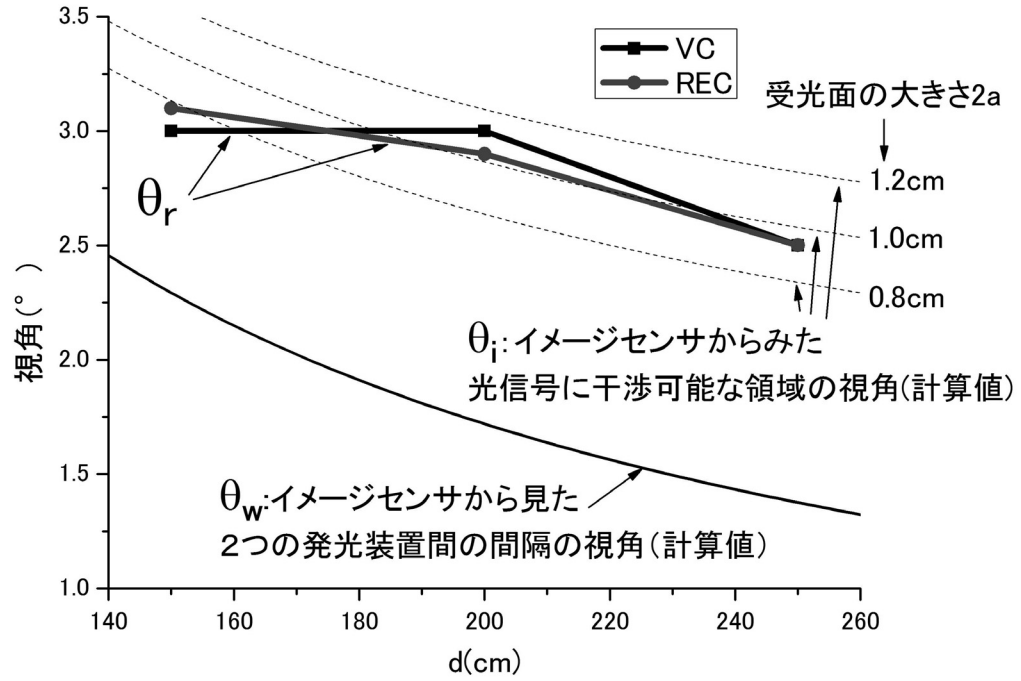


図 7.5: PointSpeech システムの光信号に干渉可能な領域

可能な領域の視野角 θ_i は、

$$\theta_i = 2 \times \arctan \frac{\left(\frac{(w - a) \times d_r}{d} \right) + a}{d_r} \quad (7.3)$$

とあらわされる。 θ_i は d, d_r に加えて受光面の辺の長さ a にも依存することから、受光面の辺の長さ $2a$ が 0.8, 1.0, 1.2cm と仮定した際のグラフを図 7.5 にそれぞれ載せる。REC、VC の両システムとも、受光面の長さ $2a$ が 0.8 – 1.0cm であると考えることができる。

7.3 視野角とタグの視角の関係

実験により、ユーザがタグの周囲約 3° の視角をポイントすることで、光信号の信号成分が現出する事が観測された。即ち、ユーザがポイントする事により、この範囲内の光信号に干渉し、変調成分が出現している事が確認された。このことは、実世界の視野内に、視角約 3° のタグを添付し、添付したタグをポイントすることで音声などの高速に変調されたデータを受信することが可能であることを示す。

この機能の利点は2点ある。一つは、狭い視角内に情報を添付する機能、もう一つは、高速信号を添付する機能である。

前者は、遠距離にあるタグの選択、もしくは、高い密度でのタグ配置を可能とする。この機能は、広い視野の中から、一つのタグをすぐに選択できるという事に伴い、ユーザが周囲の状況を確認しながらポインティングを行ったり、あるいは、タグを配置する際にも干渉などに神経質にならずにタグを設置することが可能であるということである。また、狭い視角内に情報添付が可能であるということは、建造物内の出入り口や、設備などにそれぞれタグを添付し、それらを俯瞰で観察しながら情報支援を受けることが可能であるという点である。

また、この視角はポインティング時の人差し指の視角の2 - 3倍である。干渉領域が人差し指よりもあまりにも小さい場合、ユーザがポイントすることが困難になるので、ポインティングデバイスとしての意味が無くなる。この点で、人差し指の視角とほぼ大きさに見えるタグをポイントする事が出来、信号の干渉領域が人差し指の視角の2 - 3倍程度の大きさであるということは、やや余裕をもってポインティングを行うことが可能であると考えることができる。この機能は、実世界の光景に直接情報を添付することが可能であるという特徴と組み合わせ、効果的な実世界情報支援デバイスとして使用可能であると考えられる。

後者については、この小さな視角内に大量のデータの添付が可能になったという点で、従来にはない利点であると考えられる。

7.4 実装の容易さ

GhostTag システムの特性の一つとして、イメージセンサからの反射光によって光信号を受信するという手法を採用したことである。この特長により、ポインティングを担当するイメージセンサ系と、情報通信を担当するフォトダイオード系の 2 系統を独立して運用することが可能な機能をもたらした。

イメージセンサ系とフォトダイオード系は、物理的な位置関係のみによって組み合わせられる。その条件は、光信号の受信を担当するフォトダイオード系の受光野内に、イメージセンサの焦点が含まれるという条件だけである。このことは、フォトダイオード系の設置場所や、設置精度に大きな自由度を与えてた。この特性を用いることで、RealEyeCommunicator のように、ユーザの眼球をイメージセンサとしてシステム内に組み込むことが可能となった。RealEyeCommunicator の、人間の視野そのものとインタラクションが可能なポインティングデバイスは、本システムで実現した特徴的な機能の一つであると言える。

CCD や CMOS カメラの時間分解能を高くすることで、イメージセンサによる通信を行うことを企図した研究がなされているが [35, 96, 97, 98, 99]、特殊なイメージセンサの開発が必要になっている。本研究では、高速なフォトダイオードおよび、増幅系をイメージセンサの表面に向けて設置するだけで機能することから、従来普及しているセンサに手軽に増設することが可能な利点を持つ。

7.5 タグからの情報転送

タグからの情報転送手法として、同期反転信号と呼ばれる特徴的な変調手法を提案した。この手法の特徴は、同期反転した 2 つの信号を配信することである。同期反転信号の定義は、2 つの信号が同時に受信された際に 0Hz の信号になるということである。このため、この機能をもつタグを実世界に大量に配置しても、理論的にはタグ間での信号の干渉は起こりえない。変調信号が存在する場所は、ユーザの

持つポイントから、受信器までの間の空間のみである。このため、GhostTag システムの用いる帯域は非常に「静かな」帯域となる。

また、情報転送の際に光信号を使用するため、データ転送の高速化を容易に図ることが出来ることが特徴である。高速なデータ転送の手法は他の光空間通信デバイスでも確立されており、本研究の内容を適用するためには反転信号を発するタグを設置するだけであるから、柔軟に従来技術を取り入れることが可能である。

このことは、タグに含有される情報量を容易に増大させることが可能であるという利点にもつながる。本研究では、音声データの配信および選択的な受信といった、特徴的なデモンストレーションを可能としている。

7.6 今後の研究

フォトダイオードによる空間的な情報選択・取得を可能としたことは本研究の大きな特徴であった。しかし、フォトダイオードでの受信は、外部の状況を把握できないことには変わり無く、例えばタグの手前を人が横切った場合などに誤作動を起こす可能性がある。こうした誤作動を回避するためには、タグ側の情報配信の仕方を工夫するなどで対処する必要がある。

また、ストリーミングデータの送信が可能であるにも関わらず、情報の流れがタグから受信器への一方通行である。このため、情報転送に際して強力な誤り訂正を行わなければならない、またタグは同じ情報を繰り返し配信する必要がある。こうした制約に対する対処方法は、今後の研究で開発される予定である。

第 8 章

まとめ

本研究では、実世界環境における、遠距離にあるタグからの選択的な情報読み出しを可能とする手法について研究を行った。この目的を達成するためには、情報読み出しに必要な無線通信技術と、タグを特定するためのポインティング技術の 2 つの技術を、ユーザがポイントすると情報読み出しができるように組み合わせることが必要となった。

ところが、従来の技術では、無線通信はポインティングが可能なほどの空間的な精度を持たず、ポインティングデバイスは情報転送が可能であるほどの通信量を実現することが困難であった。そこで本研究では、可視光による光空間通信に着目した。この技術は、人間の視覚を構成する光の波長と同じか、近い波長を用いた光通信技術であることから、ポインティングが可能な精度の空間分解能を実現することが可能であるとともに、データの転送に十分な速度で変調をすることもできる。そこで本研究では、ポインティング動作によって空間内への信号へ直接干渉することで、特定のタグからの光空間信号のみを検出する手法を新たに提示した。

この手法は、可視光の伝達特性を利用してポインティングを検出している。ポインティングに用いられる物体（ポインタ）は、特性上それほど大きな物体ではないため、長い波長をもった信号媒体では干渉させることが困難である。本研究では可視光に近い波長の信号を使用することで、ポインティングによって無線信号に空間

内で干渉をすることが可能になった。また、空間内で信号に干渉するということは、信号が減衰または遮断されるということである。これはタグからの信号が受信器に到達しなくなるということである。本研究では、ポイントしたときのみ信号を検出したいので、1つのタグに複数の光源を組み合わせて設置し、一部のタグからの信号が途絶えると他の光源からの光信号が受光される手法を用いた。この手法を用いることにより、光信号の一部が遮断されることにより変調成分が発生する仕組みが実現された。即ち、ユーザがポイントしたタグからの信号のみが受信器に到達する手法を提示することができた。

この手法により、タグの選択という空間的な作業は全て光空間通信の通信路内で行われることになり、受信器側では画像処理や、位置検出といった煩雑な手続きを行う必要がなくなった。このため、情報の読み取り側に必要な電子回路が大幅に簡潔化され、ただの光受信器とほぼ同じ構造で十分である事になった。このことは、高速信号を処理する回路を用いることが可能とするもので、タグに収めることの可能な情報の大容量化に繋がる。本研究では、市販の電子回路部品数点を用いることで、タグからの高速信号の読み出しが可能なシステムを実装することができた。

このことは、従来システムよりも大幅に大容量なデータをアノテーションとして物体に添付できるということである。本研究では、タグ内部にアノテーションのデータを直接収め、読み出すことに成功した。また、アノテーションのデータとして音声などの大容量なデータを使用することも確認をした。このように、タグシステム単体の機能として考えた場合でも、アノテーションの大容量化を実現することができた。また、ポインティングシステムの観点から見ても、新しい機能を実現することができた。本研究の手法はポインティングデバイスとして使用可能な精度を持つことが実証されたが、それに加えて、構造上イメージセンサとして CCD や CMOS イメージセンサといった電子回路だけでなく、人間の眼球なども使用することが可能である。このことから、ユーザが自らの視野を用いて情報のポイント・読み出しを行う事が可能なシステムを構築することができた。

従来行われてきた研究では、タグシステムやポインティングシステムはそれぞれ

単体で研究されていた。両者を組み合わせる試みもなされているが、双方の機能を融合させるために新たな通信機構を構築する試みはなされていなかった。本研究で述べた、ポイントによって光信号に干渉する方式は、これらの研究の中でユニークな試みであると考えることができる。

以上の点を踏まえたうえでタグ・ポインティングシステムを実装し、評価実験を行った。この実験では、市販のフォトダイオードおよび電圧増幅装置を数点用いてシステムを構成し、携帯電話の CCD および眼球を用いてシステムを実装し、ポイントの際のターゲットの大きさに該当する「光信号の干渉可能領域の実測」、「干渉可能領域とタグの関係」、タグに収められる情報量に該当する「タグからの情報転送」、また、システム自体の特徴である「実装の容易さ」などを計測した。

その結果、CCD および眼球で構成されたシステムについて、ほぼ同じ精度でポインティングを行うことができることが確認された。本研究では 2 つの光源を 6.0cm 放して設置したタグを使用し、このタグと受信器の距離をそれぞれ 150, 200, 250cm に設定して音声データを送信し、ユーザの指によるタグへのポイントを試みた。眼球をイメージセンサとして組み込んだ RealEyeCommunicator の場合は、それぞれタグの周囲の 3.1° 、 2.9° 、 2.6° の視角に信号への干渉可能領域が生成され、この領域にポイントを行うことで音声転送されていることが実測された。CCD をイメージセンサとした VisionCommunicator の場合は、干渉可能領域が 3.0° 、 3.0° 、 2.5° に生成された。このとき、タグの光源の間隔は、 2.3° 、 1.7° 、 1.4° の視角を占めていた。このとき、ポインタである人差し指の視角は約 1.1° であった。このことから、本研究の手法を用いることによって腕をいっぱい伸ばしてポイントした際の人差し指の視角の約 2 - 3 倍の視角内に連続データを添付し、ポイントする事によって読み出すことが可能であることが示された。

このように、提案した手法は、実世界の物体の指示を十分な空間分解能で選択できるポインティング特性と、光空間通信技術を応用した高速なデータ転送機能を両立させることに成功した。また、併せて、本技法の特徴として、ユーザが自らの視野を利用してポイントを行うなどの自然なインターフェースが実現されたと

ともに、タグのデータを光信号によって受け取るため、大量のデータをダウンロードすることが可能という、新規的な機能を実現することも出来た。これらの機能により、ユーザが主観的に見ている光景に大容量のデータを添付することが可能という、従来にはなかった機能が実現された。

参考文献

- [1] Mark Weiser. The computer for the 21st century. *Scientific American (International Edition)*, Vol. 265, No. 3, pp. 66–75, 1991.
- [2] Roy Want, Kenneth P. Fishkin, Anuj Gujar, and Beverly L. Harrison. Bridging physical and virtual worlds with electronic tags. In *CHI '99: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 370–377, 1999.
- [3] Jun Rekimoto. Matrix: A realtime object identification and registration method for augmented reality. In *APCHI '98: Proceedings of the Third Asian Pacific Computer and Human Interaction*, p. 63, 1998.
- [4] 岸野泰恵. コンピュータディスプレイを用いたビジュアルマーカの実現. 情報処理学会シンポジウムシリーズ (マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム), Vol. 2001, No. 7, pp. 259–264, 2001.
- [5] Yuji Ayatsuka and Jun Rekimoto. Active cybercode: a directly controllable 2d code. In *CHI '06: CHI '06 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 490–495, 2006.

- [6] Andrew Wilson and Hubert Pham. Pointing in intelligent environments with the worldcursor. In *INTERACT'03:IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 495–502. IOS Press, 2003.
- [7] Daniel Vogel and Ravin Balakrishnan. Distant freehand pointing and clicking on very large, high resolution displays. In *UIST '05: Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 33–42, 2005.
- [8] Mehmet Gokturk and John L. Sibert. An analysis of the index finger as a pointing device. In *CHI '99: CHI '99 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 286–287, 1999.
- [9] Yunde Jia, Shanqing Li, and Yang Liu. Tracking pointing gesture in 3d space for wearable visual interfaces. In *HCM '07: Proceedings of the international workshop on Human-centered multimedia*, pp. 23–30, 2007.
- [10] Carsten Kirstein and Heinrich Mueller. Interaction with a projection screen using a camera-tracked laser pointer. In *MMM '98: Proceedings of the 1998 Conference on MultiMedia Modeling*, p. 191, 1998.
- [11] Dan R. Olsen Jr. and Travis Nielsen. Laser pointer interaction. In *CHI '01: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 17–22, 2001.
- [12] Duncan Cavens, Florian Vogt, Sidney Fels, and Michael Meitner. Interacting with the big screen: pointers to ponder. In *CHI '02: CHI '02 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 678–679, 2002.
- [13] Yuichi Mitsudo and Ken Mogi. Real eye communicator: An eye-mediated real world pointing device. In *Proceedings of the First International Conference on*

- Pervasive Computing (Short paper)*, pp. 112–118, August 2002. In an informal companion volume of short papers.
- [14] 光藤雄一. 眼球を利用した光軸を選択可能な光空間通信システムのモデル. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 153–160, 2006.
- [15] 光藤雄一. ユーザが接触することで生成される実空間光信号の研究 (ユーザインタフェースとインタラクティブシステム, <特集> 情報洪水時代のネットワークサービス). 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 2, pp. 859–866, 2008.
- [16] 中川正雄. 可視光通信の世界. 工業調査会, 2006.
- [17] ハンス-ユルゲンヘンシェル. 光と照明. 株式会社 日本理工出版会, 1995.
- [18] Paul. M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. 1954. *J Exp Psychol Gen*, Vol. 121, No. 3, pp. 262–269, September 1992.
- [19] I. Scott MacKenzie and William Buxton. Extending fitts' law to two-dimensional tasks. In *CHI '92: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 219–226, 1992.
- [20] 岩瀬弘和, 村田厚生. 3次元空間での移動を要するポインティング作業への fitts の法則の拡張モデル. 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界, Vol. 85, No. 11, pp. 1336–1346, 2002.
- [21] Takuichi Nishimura, Hideo Itoh, Yoshiyuki Nakamura, Yoshinobu Yamamoto, and Hideyuki Nakashima. A compact battery-less information terminal for real world interaction. In *Pervasive*, pp. 124–139, 2004.
- [22] Brygg Ullmer, Hiroshi Ishii, and Dylan Glas. mediablocks: physical containers, transports, and controls for online media. In *SIGGRAPH '98: Proceedings of*

- the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 379–386, 1998.
- [23] Steven Feiner, Blair MacIntyre, Marcus Haupt, and Eliot Solomon. Windows on the world: 2d windows for 3d augmented reality. In *UIST '93: Proceedings of the 6th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 145–155, 1993.
- [24] Steven Feiner, Blair Macintyre, and Dorée Seligmann. Knowledge-based augmented reality. *Commun. ACM*, Vol. 36, No. 7, pp. 53–62, 1993.
- [25] Jun Rekimoto and Katashi Nagao. The world through the computer: computer augmented interaction with real world environments. In *UIST '95: Proceedings of the 8th annual ACM symposium on User interface and software technology*, pp. 29–36, 1995.
- [26] Naohiko Kohtake, Jun Rekimoto, and Yuichiro Anzai. Infopoint: A device that provides a uniform user interface to allow appliances to work together over a network. *Personal Ubiquitous Comput.*, Vol. 5, No. 4, pp. 264–274, 2001.
- [27] Jun Rekimoto and Yuji Ayatsuka. Cybercode: designing augmented reality environments with visual tags. In *DARE '00: Proceedings of DARE 2000 on Designing augmented reality environments*, pp. 1–10, 2000.
- [28] Eiji Tokunaga, Hiroaki Kimura, Nobuyuki Kobayashi, and Tatsuo Nakajima. Virtual tangible widgets: seamless universal interaction with personal sensing devices. In *ICMI '05: Proceedings of the 7th international conference on Multimodal interfaces*, pp. 325–332, 2005.

- [29] Kento Miyaoku, Suguru Higashino, and Yoshinobu Tonomura. C-blink: a hue-difference-based light signal marker for large screen interaction via any mobile terminal. In *UIST '04: Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 147–156, 2004.
- [30] Fakhr eddine Ababsa and Malik Mallem. Robust camera pose estimation using 2d fiducials tracking for real-time augmented reality systems. In *VRCAI '04: Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry*, pp. 431–435, 2004.
- [31] Chung-Hua Chu, De-Nian Yang, and Ming-Syan Chen. Image stablization for 2d barcode in handheld devices. In *MULTIMEDIA '07: Proceedings of the 15th international conference on Multimedia*, pp. 697–706, 2007.
- [32] Rafael Ballagas, Michael Rohs, and Jennifer G. Sheridan. Sweep and point and shoot: phonecam-based interactions for large public displays. In *CHI '05: CHI '05 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 1200–1203, 2005.
- [33] Eleanor Toye, Richard Sharp, Anil Madhavapeddy, David Scott, Eben Upton, and Alan Blackwell. Interacting with mobile services: an evaluation of camera-phones and visual tags. *Personal Ubiquitous Comput.*, Vol. 11, No. 2, pp. 97–106, 2007.
- [34] 岸野泰恵, 塚本昌彦, 坂根裕, 西尾章治郎. ウェアラブル環境のための led を用いたビジュアルマーカ (モバイルコンピューティング). 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 9, pp. 2334–2343, 2003.

- [35] 松下伸行, 日原大輔, 後輝行, 吉村真一, 暦本純一. Id cam : シーンとidを同時に取得可能なスマートカメラ (<特集>インタラクショナル技術の革新と実用化). 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 12, pp. 3664–3674, 2002.
- [36] Jan M. V. Misker, Jasper Lindenberg, and Mark A. Neerincx. Users want simple control over device selection. In *sOc-EUSAI '05: Proceedings of the 2005 joint conference on Smart objects and ambient intelligence*, pp. 129–134, 2005.
- [37] Lars Erik Holmquist, Friedemann Mattern, Bernt Schiele, Petteri Alahuhta, Michael Beigl, and Hans-Werner Gellersen. Smart-its friends: A technique for users to easily establish connections between smart artefacts. In *UbiComp '01: Proceedings of the 3rd international conference on Ubiquitous Computing*, pp. 116–122, 2001.
- [38] Koji Yatani, Koiti Tamura, Keiichi Hiroki, Masanori Sugimoto, and Hiromichi Hashizume. Toss-it: intuitive information transfer techniques for mobile devices. In *CHI '05: CHI '05 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 1881–1884, 2005.
- [39] Colin Swindells and Kori M. Inkpen. What is that?: gesturing to determine device identity. In *CHI '02: CHI '02 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 588–589, 2002.
- [40] Colin Swindells, Kori M. Inkpen, John C. Dill, and Melanie Tory. That one there! pointing to establish device identity. In *UIST '02: Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 151–160, 2002.

- [41] Trevor Pering, Yaw Anokwa, and Roy Want. Gesture connect: facilitating tangible interaction with a flick of the wrist. In *TEI '07: Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*, pp. 259–262, 2007.
- [42] Hyunglae Lee, Heeseok Jeong, JoongHo Lee, Ki-Won Yeom, Hyun-Jin Shin, and Ji-Hyung Park. Select-and-point: a novel interface for multi-device connection and control based on simple hand gestures. In *CHI '08: CHI '08 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 3357–3362, 2008.
- [43] Chunyi Peng, Guobin Shen, Yongguang Zhang, and Songwu Lu. Point & connect: intention-based device pairing for mobile phone users. In *Mobisys '09: Proceedings of the 7th international conference on Mobile systems, applications, and services*, pp. 137–150, 2009.
- [44] Heikki Ailisto, Lauri Pohjanheimo, Pasi Välikkynen, Esko Strömmer, Timo Tuomisto, and Ilkka Korhonen. Bridging the physical and virtual worlds by local connectivity-based physical selection. *Personal Ubiquitous Comput.*, Vol. 10, No. 6, pp. 333–344, 2006.
- [45] 中川正雄. 可視光通信. 映像情報メディア学会誌 : 映像情報メディア, Vol. 60, No. 12, pp. 1908–1913, 2006.
- [46] 中川正雄. ユビキタス可視光通信技術. 計測と制御, Vol. 46, No. 2, pp. 104–110, 2007.
- [47] 中川正雄, 春山真一郎. 可視光無線通信技術. 電子情報通信学会誌, Vol. 90, No. 12, pp. 1056–1061, 2007.

- [48] 中村高志, 西村拓一, 伊藤日出男, 中島秀之. 無電源でユーザ属性と位置を発信する chobit 端末の設計と実装 (ウェアラブル/ユビキタス・コンピューティング)(<特集> 「インタラクション:理論, 技術, 応用, 評価」). 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 11, pp. 2670–2680, 2003.
- [49] D. Y P Henriques and J.D Crawford. Role of eye, head, and shoulder geometry in the planning of accurate arm movements. *J Neurophysiol.*, Vol. 87, pp. 1677–1685, 2002.
- [50] A. Z. Khan and J. D. Crawford. Coordinating one hand with two eyes : optimizing for field of view in a pointing task. *Vision Research*, Vol. 43, pp. 409–417, 2003.
- [51] 今井朝子, 関口大陸, 川上直樹, 舘すすむ, Tomoko Imai, Dairoku Sekiguchi, Naoki Kawakami, Susumu Tachi. 人間のノンバーバル情報受信精度の計測 : 指さし情報受信精度の計測. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 1, pp. 89–95, 2004-03.
- [52] Sebastien Carbinian and Jean Emmanuel Viallet and Olivier Bernier. Pointing gesture visual recognition by body feature detection and tracking. In *Proceedings of ICCVG2004, Inter National Conference of Computer Vision and Graphics*, pp. 203–208. Springer-Verlag, 2004.
- [53] Christian Müller-Tomfelde. Dwell-based pointing in applications of human computer interaction. In *Human-Computer Interaction - INTERACT 2007, Part I*, Vol. 4662/2009, pp. 560–573, 2007.
- [54] Ian Oakley, John Sunwoo, and Il-Yeon Cho. Pointing with fingers, hands and arms for wearable computing. In *CHI '08: CHI '08 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 3255–3260, 2008.

- [55] Pasi Välikkynen, Marketta Niemelä, and Timo Tuomisto. Evaluating touching and pointing with a mobile terminal for physical browsing. In *NordiCHI '06: Proceedings of the 4th Nordic conference on Human-computer interaction*, pp. 28–37, 2006.
- [56] Enrico Rukzio, Karin Leichtenstern, Vic Callaghan, Paul Holleis, Albrecht Schmidt, and Jeannette Chin. An experimental comparison of physical mobile interaction techniques: Touching, pointing and scanning. pp. 87–104. 2006.
- [57] Maxim Bakaev. Fitts' law for older adults: considering a factor of age. In *IHC '08: Proceedings of the VIII Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, pp. 260–263, 2008.
- [58] Juha Häikiö, Arto Wallin, Minna Isomursu, Heikki Ailisto, Tapio Matinmikko, and Tua Huomo. Touch-based user interface for elderly users. In *MobileHCI '07: Proceedings of the 9th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*, pp. 289–296, 2007.
- [59] Terry Winograd and François Guimbretière. Visual instruments for an interactive mural. In *CHI '99: CHI '99 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 234–235, 1999.
- [60] Choon Hong Peck. Useful parameters for the design of laser pointer interaction techniques. In *CHI '01: CHI '01 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 461–462, 2001.
- [61] Brad A. Myers, Rishi Bhatnagar, Jeffrey Nichols, Choon Hong Peck, Dave Kong, Robert Miller, and A. Chris Long. Interacting at a distance: measuring the performance of laser pointers and other devices. In *CHI '02: Proceedings*

- of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 33–40, 2002.
- [62] Sergey V. Matveyev and Martin Göbel. Direct interaction based on a two-point laser pointer technique. In *SIGGRAPH '03: ACM SIGGRAPH 2003 Sketches & Applications*, pp. 1–1, 2003.
- [63] Sergey V. Matveyev and Martin Göbel. The optical tweezers: multiple-point interaction technique. In *VRST '03: Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 184–187, 2003.
- [64] Kelvin Cheng and Kevin Pulo. Direct interaction with large-scale display systems using infrared laser tracking devices. In *APVis '03: Proceedings of the Asia-Pacific symposium on Information visualisation*, pp. 67–74, 2003.
- [65] Xiaojun Bi, Yuanchun Shi, Xiaojie Chen, and PeiFeng Xiang. upen: laser-based, personalized, multi-user interaction on large displays. In *MULTIMEDIA '05: Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Multimedia*, pp. 1049–1050, 2005.
- [66] Benjamin A. Ahlborn, David Thompson, Oliver Kreylos, Bernd Hamann, and Oliver G. Staadt. A practical system for laser pointer interaction on large displays. In *VRST '05: Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 106–109, 2005.
- [67] Buntarou Shizuki, Takaomi Hisamatsu, Shin Takahashi, and Jiro Tanaka. Laser pointer interaction techniques using peripheral areas of screens. In *AVI '06: Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, pp. 95–98, 2006.

- [68] Xiang Cao, Eyal Ofek, and David Vronay. Evaluation of alternative presentation control techniques. In *CHI '05: CHI '05 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 1248–1251, 2005.
- [69] Oliver G. Staadt, Benjamin A. Ahlborn, Oliver Kreylos, and Bernd Hamann. A foveal inset for large display environments. In *VRCA '06: Proceedings of the 2006 ACM international conference on Virtual reality continuum and its applications*, pp. 281–288, 2006.
- [70] Liang Zhang, Yuanchun Shi, and Jichun Chen. Drag and drop by laser pointer: Seamless interaction with multiple large displays. In *UIC2006: Third International Conference of Ubiquitous Intelligence and Computing*, pp. 12–20. Springer Berlin / Heidelberg, 2006.
- [71] Sergey Matveyev Konstantin Matveyev. Tracking of a laser pointer space orientation by using single camera. 2004.
- [72] Charles C. Kemp, Cressel D. Anderson, Hai Nguyen, Alexander J. Trevor, and Zhe Xu. A point-and-click interface for the real world: laser designation of objects for mobile manipulation. In *HRI '08: Proceedings of the 3rd ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*, pp. 241–248, 2008.
- [73] Francisco de la O Chávez, Francisco Fernández de Vega, Gustavo Olague, and Joaquín Llano Montero. An independent and non-intrusive laser pointer environment control device system. In *ICPS '08: Proceedings of the 5th international conference on Pervasive services*, pp. 37–46, 2008.
- [74] Shunichi Numazaki, Akira Morshita, Naoko Umeki, Minoru Ishikawa, and Miwako Doi. A kinetic and 3d image input device. In *CHI '98: CHI 98*

- conference summary on Human factors in computing systems*, pp. 237–238, 1998.
- [75] 岡本恭一, ロベルトチポラ, 風間久, 久野義徳. 定性的運動認識を用いたヒューマンインタフェースシステム. 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理, Vol. 76, No. 8, pp. 1813–1821, 1993.
- [76] 林健太郎, 久野義徳, 白井良明. ユーザの位置の拘束のないジェスチャによるヒューマンインタフェース (特集 ヒューマンインタフェースとインタラクション). 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 2, pp. 556–566, 1999.
- [77] Sylvia M. Dominguez, Trish Keaton, and Ali H. Sayed. Robust finger tracking for wearable computer interfacing. In *PUI '01: Proceedings of the 2001 workshop on Perceptive user interfaces*, pp. 1–5, 2001.
- [78] Marina Kolesnik and Thomas Kulesa. Detecting, tracking, and interpretation of a pointing gesture by an overhead view camera. In *Proceedings of the 23rd DAGM-Symposium on Pattern Recognition*, pp. 429–436, 2001.
- [79] Julien Letessier and François Bérard. Visual tracking of bare fingers for interactive surfaces. In *UIST '04: Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 119–122, 2004.
- [80] Kai Nickel and Rainer Stiefelhagen. Pointing gesture recognition based on 3d-tracking of face, hands and head orientation. In *ICMI '03: Proceedings of the 5th international conference on Multimodal interfaces*, pp. 140–146, 2003.
- [81] 阪本邦夫, 木村理恵子. 単眼カメラ画像を用いた指差しポイントの構成. 映像情報メディア学会誌 : 映像情報メディア, Vol. 58, No. 5, pp. 721–723, 2004.

- [82] Volkert Buchmann, Stephen Violich, Mark Billinghurst, and Andy Cockburn. Fingartips: gesture based direct manipulation in augmented reality. In *GRAPHITE '04: Proceedings of the 2nd international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*, pp. 212–221, 2004.
- [83] Andrew Wilson and Steven Shafer. Xwand: Ui for intelligent spaces. In *CHI '03: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 545–552, 2003.
- [84] Xiang Cao and Ravin Balakrishnan. Visionwand: interaction techniques for large displays using a passive wand tracked in 3d. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 23, No. 3, pp. 729–729, 2004.
- [85] Shahzad Malik, Abhishek Ranjan, and Ravin Balakrishnan. Interacting with large displays from a distance with vision-tracked multi-finger gestural input. In *UIST '05: Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 43–52, 2005.
- [86] Shahzad Malik, Abhishek Ranjan, and Ravin Balakrishnan. Interacting with large displays from a distance with vision-tracked multi-finger gestural input. In *SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Sketches*, p. 5, 2006.
- [87] Le Song and Masahiro Takatsuka. Real-time 3d finger pointing for an augmented desk. In *AUIC '05: Proceedings of the Sixth Australasian conference on User interface*, pp. 99–108, 2005.
- [88] Tomer Moscovich and John F. Hughes. Multi-finger cursor techniques. In *GI '06: Proceedings of the 2006 conference on Graphics interface*, pp. 1–7, 2006.

- [89] Ji-Eun Kim, John Sunwoo, Yong-Ki Son, Dong-Woo Lee, and Il-Yeon Cho. A gestural input through finger writing on a textured pad. In *CHI '07: CHI '07 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 2495–2500, 2007.
- [90] Tovi Grossman, Daniel Wigdor, and Ravin Balakrishnan. Multi-finger gestural interaction with 3d volumetric displays. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 24, No. 3, pp. 931–931, 2005.
- [91] Jun Rekimoto. Pick-and-drop: a direct manipulation technique for multiple computer environments. In *UIST '97: Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 31–39, 1997.
- [92] François Guimbretière, Maureen Stone, and Terry Winograd. Fluid interaction with high-resolution wall-size displays. In *UIST '01: Proceedings of the 14th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 21–30, 2001.
- [93] Patrick Baudisch, Edward Cutrell, Dan Robbins, Mary Czerwinski, Peter T, Benjamin Bederson, and Alex Zierlinger. Drag-and-pop and drag-and-pick: Techniques for accessing remote screen content on touch- and pen-operated systems. In *INTERACT'03: IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 57–64. IOS Press, 2003.
- [94] Maxime Collomb, Mountaz Hascoët, Patrick Baudisch, and Brian Lee. Improving drag-and-drop on wall-size displays. In *GI '05: Proceedings of Graphics Interface 2005*, pp. 25–32, 2005.

- [95] Tovi Grossman, Daniel Wigdor, and Ravin Balakrishnan. Multi-finger gestural interaction with 3d volumetric displays. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 24, No. 3, pp. 931–931, 2005.
- [96] Shinichi. Yoshimura. A 48kframes/s cmos image sensor for real-time 3-d sensing and motion detection. *ISSCC Digest of Technical Papers 2001*, pp. 94–95, 2001.
- [97] 香川景一郎, 西村智博, 平井隆夫, 太田淳, 布下正宏, 山崎康司, 山田雅史, 杉下正蔵, 渡辺國寛. 光無線用高速ビジョンチップの開発. 電子情報通信学会技術研究報告. OCS, 光通信システム, Vol. 101, No. 283, pp. 31–36, 2001.
- [98] 香川景一郎, 川上智明, 浅津博昭, 池内隆志, 藤内亜紀子, 太田淳, 布下正宏, 渡辺國寛. 空間光伝送に向けたイメージセンサ機能をもつ受光デバイスとその応用システムの開発 (光無線システム (rof, fwa 等), 光映像伝送 (catv 含む, 光アクセスシステム), 一般). 電子情報通信学会技術研究報告. OCS, 光通信システム, Vol. 103, No. 349, pp. 17–20, 2003.
- [99] 香川景一郎, 太田淳. ビジョンチップを用いた屋内光無線 lan. 光学, Vol. 33, No. 10, pp. 595–600, 2004.

著者論文リスト

1. 光藤 雄一, ユーザが接触することで生成される実空間光信号の研究, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.2, pp859–866, 社団法人情報処理学会, 2008
2. 光藤 雄一, 眼球を利用した光軸を選択可能な光空間通信システムのモデル, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.1, p153–160, 日本バーチャルリアリティ学会, 2006
3. Yuichi Mitsudo, A Real-World Pointing Device Based on an Optical Communication System, HCII2009, Proceedings of Human Computer Interaction International 2009, Vol.13, pp70–79, San Diego, USA, 2009
4. Yuichi Mitsudo, Pointing and Retrieving: A Data Translation Model for Real World Computing, FMUIT2006, Proceedings of International Workshop on Future Mobile and Ubiquitous Information Technologies, pp.89-93, Nara, Japan, 2006
5. MITSUDO Yuichi, Interactive Sight : A New Interaction Method for Real World Environment, HCII2003, Proceedings of Human Computer Interaction International 2003, Vol2, pp746–750, Crete, Greece, 2003
6. Yuichi Mitsudo, Ken Mogi, Real Eye Communicator: An Eye-mediated Real World Pointing Device, Pervasive2002, Proceedings of the First International Conference on Pervasive Computing (Short paper), pp112–118, Zurich, Switzerland, 2002

謝辞

本論文の執筆にあたり、貴重なご指導・ご助言を頂いた指導教員の田中二郎教授に深く感謝いたします。また、執筆を進める上で何度も討論に応じていただき、貴重なご意見、コメントを頂きました副指導教員の高橋伸講師に深く感謝いたします。本研究の審査にあたっては、福井幸男教授、葛岡英明教授、三末和男准教授に貴重なご助言、ご意見を頂きました。深く感謝いたします。

本研究は、多数の方々のご援助によってはじめることができ、進行いたしました。研究を開始するにあたって貴重なご援助を頂いた、株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所の茂木健一郎氏に深く感謝いたします。また、研究を進行する上で貴重なご援助を頂いた未踏ソフトウェア創造事業のプロジェクトマネージャー、現公立はこだて未来大学学長の中島秀之先生に深く感謝いたします。

また、研究を進める上で様々なご助言、ご援助を頂いた、公立はこだて未来大学の大澤英一教授、川嶋稔夫教授に深く感謝いたします。

最後に、私を今まで育ててくれた父と母、祖父と祖母に、あらためて深く感謝いたします。