

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

光 藤 雄 —†1

本稿では、ユーザが空中の光信号に接触することで、受信する信号を選択するデータ転送システムを作成した。実世界環境でユーザがある特定のデバイスとデータ交換を行いたい場合、目標のデバイスに近づくことで対象を決定する方法がとられることがある。この方法は、ユーザが目標のデバイスをアドレスなどを指定することなしに特定することを可能にしているが、インタラクションの自由度を狭めるという制限もある。本研究では、このような制限を緩和するために、ユーザが空中の複数の光信号のうちの1つに接触することで、受信する信号が決定されるデータ転送システムを提案し、実装した。このシステムでは光信号を使用することで、遠距離にあるデバイスからの高速な光信号を選択的に受信することが可能である。

A Research on Real-space Optical Signals Generated by User Contact

YUICHI MITSUDO†1

For this paper, a data transfer system was created in which the user selects a signal to be received by touching an optical signal in space. When a user wishes to conduct data exchange with a specific device in the real-world environment, he or she often determines the object by approaching the target device. However, there is a disadvantage in that this restriction narrows the freedom of interaction. In order to relax this restriction, this research proposes and implements a data transfer system in which the signal to be received is determined by the user touching one of multiple optical signals in space. This system uses optical signals for data transfer, and thus is advantageous because transfer from a long distance is possible, and it is easier to handle large volumes of data than with a signal extraction system using images.

1. はじめに

実世界で電子機器を運用するにあたり、無線通信が重要な位置を占めている。現在普及しているほとんどの携帯型の電子機器には無線通信システムが組み込まれている。実世界空間にチップやシンボルなどの小型の発信器を設置し、無線で情報を得ようとする試みは、Ubiquitous Computing¹⁾が提唱された当時からなされていた。実世界に設置してユーザに情報サービスを提供する機器は、RFIDに代表される通信可能な微小なタグや^{2),3)}、赤外線を発信するもの^{4),5)}、光学的に情報をコーディングした図形^{6),7)}など、さまざまな形態のものが提案されている。これらの技術の一部は、昨今では交通機関や図書館の貸出し管理システム、店舗の防犯システムなどに広く利用されている。

実世界環境で利用される無線通信システムは、

- 送信器は変調された電磁波などを放射し、

- 受信器は電磁波をすべて受け入れる、

ことを想定して作られている。したがって、信号を受信する側は、ある特定の送信器からの信号のみを受信したい場合、送信器から発せられた信号の知識を事前に持っていなければならない。この代表的な例は、ラジオやテレビであり、ユーザは受信すべき信号の変調周波数を指定することで、送信器を選択している。

しかし、実世界環境では、受信側に送信器の知識がない状態で特定の送信器からの信号を受信しなければならないケースも考えられる。この場合、受信側は送信器の知識はないので、従来のような選択方法を利用することはできない。そこで受信器は、

- 最も近い送信器からの信号（最も出力が高い）を選択

することが一般的である。こうしたシステムの例を図1にあげる。図内の左上から時計回りに、1) カード挿入式の入室管理ゲート（送受信側が接触）、2) RFタグによる退室管理ゲート（送受信側が接触）、3) IrDAによるデータ交換（送受信側が接近）、4) QRコードによるデータ取得（送受信側が接近）である。

†1 公立はこだて未来大学情報アーキテクチャ学科
Department of Media Architecture, Future University-
Hakodate



図 1 接近することで情報を読み取る無線情報機器の例

Fig. 1 Information devices: Detecting user's contact or approaching.

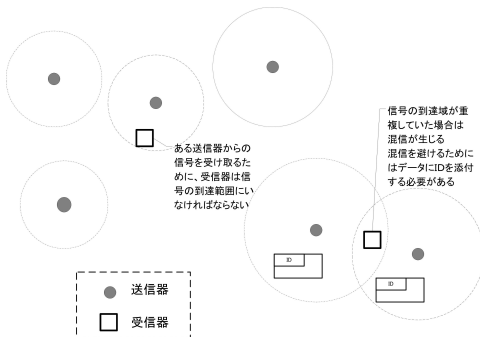


図 2 信号の到達範囲の重複

Fig. 2 Repetition of radio signal.

RF タグや IrDA などの規格では、信号の出力が決定されており、あらかじめ限られた範囲でしかデータ転送が行えないようになってきている。また Cobit⁵⁾なども同様である。QR コードは自ら信号を発していないが、画像処理を行うためにはある程度の画角をもって撮影しなければならないため、事実上接近しなければデータの取得ができない*1。

送受信器が接近することでお互いを特定し、データ転送を開始する方法は、送受信器が接近することが自然な環境(図 1)であれば有効な方法であるが、一方で、ある程度離れた送受信器どうしがデータ転送を行いたい場合には混信の問題が生じる(図 2)。送信器の信号の到達範囲が広くなればなるほど、他の送信器の発する信号の到達範囲と重複する可能性が高くなる。信号の重複した場所にいる受信器は、送信器の知識がない場合は信号を選択することが困難である。

筆者は、これらの問題は、受信側が、到達した信号

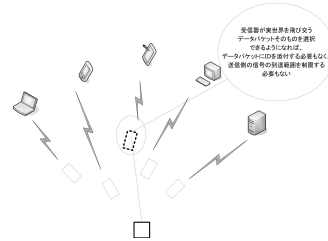


図 3 信号に直接接触することで受信する信号を選択する

Fig. 3 Signal selection by direct contact.

をすべて受信してしまう仕組みに問題があると考えた。そこで、受信側が、ある特定の送信器から発せられた信号に空間中で接触することで信号を選択して受信する手法を考えた(図 3)。

本稿で提案するシステムは、可視光に近い波長の光を利用してデータを転送する。このシステムは、送信側と受信側に工夫がなされている。送信側は一对の発光器を持ち、この発光器は一定の間隔を置いて設置されている。この発光器 A, B は、ある時刻 t において、 $S_A(t) + S_B(t) \equiv 1$ ただし $S_A = 0, 1$ であることが保障されるような光信号が発せられている。このため、受信器に到達する光信号は発せられた光信号にかかわらずつねに 1 である。いま、発光器 A, B のうちどちらか一方からの光信号が遮蔽されると、受信器に到達する信号光の強度に差が生じるので、受信器の位置で信号が出現する。このとき、送信器が他にいくつ存在していたとしても、遮蔽されていない送信器が発している信号成分は検出されない。このようにして、受信器は遮蔽が行われた送信器からの光信号のみを物理的に選択して受信することができる。

また、上のような手法で光信号を選択するにあたって、送信器から発せられた光信号 A, B のうち 1 つから発せられた光信号を受光器から遮蔽する必要がある。このためには空間中の光信号の位置を確認しなければならない。本稿では、この機能を実現するために、受像装置の表面からの反射光を受光する構造を提案する。この構造では受像装置と受光装置の見かけ上の位置がきわめて近くなるので、受像装置からの映像上で光信号の位置を正確に特定することができる。

2. 光信号の位置の把握と受信

2.1 光信号の位置の把握

本稿で提案するシステムは、送信器から発せられた 2 種類の光信号のうち、1 つを受光器から遮蔽することで信号成分が発生する仕組みを備えている。この仕組みを動作させるためには、ユーザは、送信器を発し

*1 1 辺 10 メートル四方の QR コードがマンションの宣伝として作成され、100 メートル近い距離からの撮影が可能とされた(朝日新聞、2006 年 12 月 25 日)例があるが、現実にもこのような利用方法を多用することは困難である。

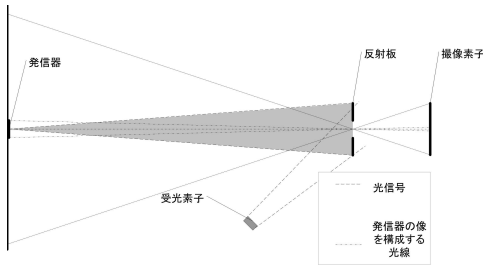


図 4 撮像素子からの反射を利用した光信号の受光方法
 Fig. 4 Receiver using optical signal reflected from imaging device.

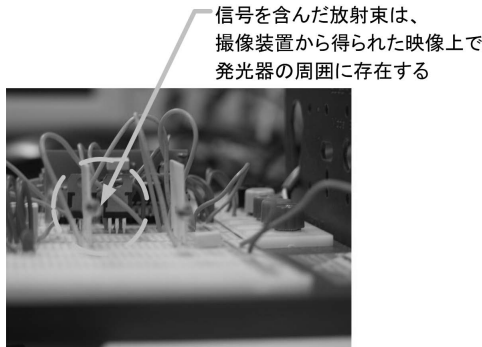


図 5 光信号の位置の検出
 Fig. 5 Location of optical signal.

て受光器に達する光信号の位置を正確に知り、遮蔽しなければならない。本稿では、この操作を簡単に行うために、CCD などに代表される撮像素子と、ホトダイオードに代表される受光素子の 2 つを組み合わせる構造を提案する。

送信器の発光器から発せられ、受光素子に入射する光信号は、発光器を頂点とし、受光器を底辺とする錐体内に存在する。いま、錐体の底辺に撮像素子を配置し、錐体の底辺に向けて受光素子を配置する。この場合、受光素子が受光する光は、錐体内の光信号が撮像素子の表面に反射したものである。一方で、撮像装置の映像上では、光信号は、発光器の映像の周囲に存在する(図 4 および図 5)。

したがって、ユーザはある光信号を遮蔽したい場合は、撮像素子から得られた発光器の映像に重なるように遮蔽物の位置を調整すればよい。遮蔽物は指などで十分であるが、信号選択の際、ユーザはあたかも光信号に「接触」することで信号を選択しているような操作感を得る。

2.2 撮像素子からの映像と光信号の位置の関係

上のように、撮像素子からの反射光を受光する構造をとると、光信号は、撮像素子からの映像上の発光器

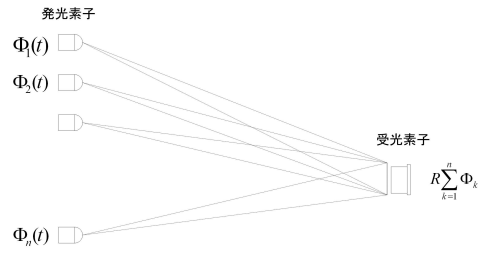


図 6 複数の発光器からの入射光による光信号出力
 Fig. 6 Photo-current (Multiple input).

の周囲にある一定の半径をもって存在する。この半径は、主に撮像素子の表面で光信号を反射する面積と、撮像素子と遮蔽の位置によって決定される(図 4)。受光素子は、撮像素子に向けて設置されなければならない。このため、受光素子は撮像素子の前面に位置しなければならないが、撮像素子の映像上に受光素子が映り込むことは望ましくない。したがって、撮像素子の視野角の外に設置することが望ましい。

3. 信号の選択的な受信

前章であげた反射を利用した光学系では、撮像素子からの映像により、光信号の位置が分かるようになった。そこで、2 つの信号を組み合わせ、このうちの 1 つの信号が遮蔽されたときのみに信号が生ずる光信号の構成を説明する。

3.1 光信号による信号の送受信

光信号による信号の送受信では、変調された放射束を発するための発光素子と、放射束を電流に変換するための受光素子がペアになって情報を伝送する。受光素子には、時刻 t に入射した放射束 $\Phi(t)$ (W) に放射感度 R に比例した光電流 $I(t)$ (A) を発するホトダイオードと呼ばれる素子が利用されることが一般的である。

そのため、時刻 t にホトダイオードに複数の放射束 $\Phi_1, \Phi_2 \dots \Phi_n$ が入射した場合、

$$I(t) = R \sum_{k=1}^n \Phi_k(t) \text{ (A)} \tag{1}$$

の光電流が出力される。これは、受光素子に入射した光信号の和が出力されることに相当する(図 6)。したがって、この中からある特定の信号のみを検出しなければならない。

3.2 信号の選択

3.2.1 2 種類の光信号の利用

本研究では、送信器に備えられた 2 つの発光器から、放射束の和がつねに一定になるような光信号を発信し、

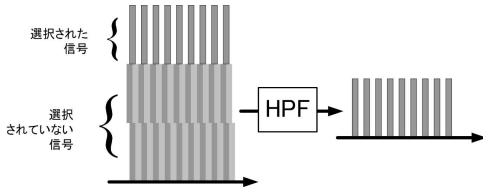


図 7 選択された信号と、選択されていない信号
Fig. 7 Selected signal and non-selected signals.

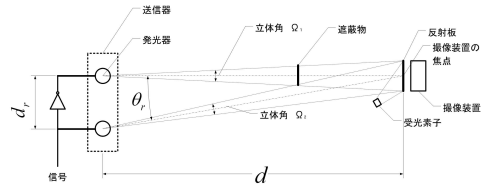


図 8 選択に必要な視野角
Fig. 8 Resolution for selection.

ユーザが片方の光信号を遮蔽したときに光信号を発生させる仕組みを採用する．ある発信機 k に 2 つの発光器 A, B を装着し、それらの発光器から $\Phi_{kA}(t)$ および $\Phi_{kB}(t)$ の信号を発信する．ここで、

$$\Phi_{kA}(t) + \Phi_{kB}(t) = \Phi_k(t) \equiv \alpha_k \quad (2)$$

であるとすると、こうした送信器が n 個存在したとすると、受光器が発する光電流は

$$I(t) = R \times \sum_{k=1}^n \Phi_k(t) = R \times \sum_{k=1}^n \alpha_k \quad (3)$$

であり、信号（変調）成分は検出されない。

この n 個の送信器のうち、 m ($m < n$) 番目の送信器の発光器 B からの光信号が遮蔽されたとする．前節で述べたとおり、発光器 m_B から発せられた放射束 $\Phi_{mB}(t)$ は、撮像素子から撮影された発光器 m_B の映像の周囲に存在する．したがって、ユーザは映像上で、指などを発光器 m_B に重ねることで遮蔽できる．

このときに受光器が発する光電流は、

$$I(t) = R \left(\sum_{k=1}^{m-1} \alpha_k(t) + \Phi_{kA}(t) + \sum_{k=m+1}^n \alpha_k(t) \right) \quad (4)$$

であり、DC 成分に、ユーザによって選択された光信号 $R \times \Phi_{mA}(t)$ を足したものとなる（図 7）。

したがって、変調成分を容易に取り出すことが可能である．

3.2.2 発光器の配置と遮蔽による選択

受光器に到達する放射束は、 d が大きい場合、各発光器から反射板に張られる立体角 Ω_1, Ω_2 にほぼ比例する．ユーザがある送信器を選択する際に、最も効率良く変調成分を取り出すためには、片方の発光器から発せられた放射束をすべて遮蔽することが求められる．このため、遮蔽する位置では、2 つの放射束が重なっていないことが望ましい（図 8）．このような条件を満たすために、角度 θ_r を確保できるように発光器の間隔 d_r を定めなければならない．つまり、遠距離での選択を考慮するほど、発光器の間隔 d_r を大きくとる必要がある．角度 θ_r は撮像素子の視野角とほぼ

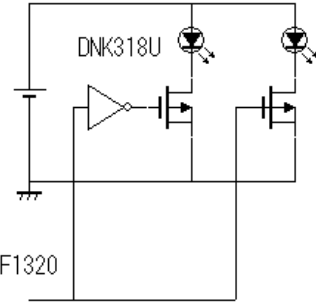


図 9 送信器の等価回路
Fig. 9 Circuit of transmitter.

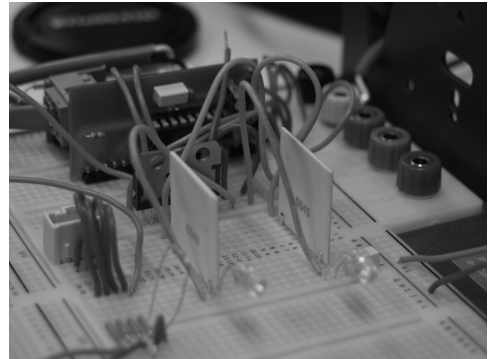


図 10 送信器の写真
Fig. 10 Photograph of transmitter.

等しいため、ユーザが効率良く選択できる送信器は、ユーザから見てある一定の視野角以上に見えている送信器であるということが出来る．

4. 実装されたシステム

本研究では、以上のシステムを実装して実験を行うこととした．実験装置は下記のとおりである．

4.1 送信器

送信器はマイクロチップ PIC18F1320 によって制御された LED, DNK318U 2 基によって構成される．LED には各 1 A の電流が流れ、この電流によって発生する単位立体角あたりの放射強度は約 1 W/sr となる．等価回路を図 9 に、試作器の写真を図 10 に示す．

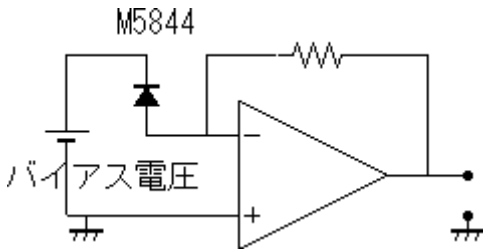


図 11 受信機の等価回路
Fig. 11 Circuit of receiver.

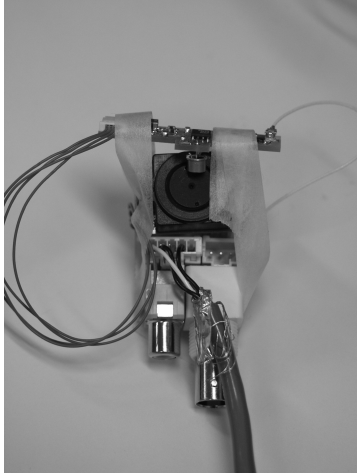


図 12 受信器の写真
Fig. 12 Photograph of receiver.

4.2 受信器

受光器はアバランシェ効果によって光電流を増幅する機能を持つアバランシェフォトダイオード M5844^{*1}を利用した。この素子の放射感度 R は 0.42 (A/W) であり、バイアス電圧によって 1 ~ 150 倍の増倍率を得ることができる。等価回路を図 11 に、試作器の写真を図 12 に示す。

5. 実験

5.1 動作の確認

まず、受信器の動作を確認する。ある送信器からの信号を、1) 選択していないとき、2) 選択したときの光信号と映像の変化を確認する。実験機材と構成は表 1 および以下のとおりである。

送信器から反射板（撮像装置表面）までの距離は 120 cm であり、送信器のペアの発光器は、互いに 6 cm の距離で設置されている（図 13）。したがって、撮像装置から見たペアの占める画角は、 $\tan^{-1} \left(\frac{3}{120} \right) \times 2 \cong$

*1 松定プレジジョン株式会社

表 1 実験装置の構成
Table 1 Structure of experiment system.

CCD	F01-3820-IR
画素数	25 万画素
画角	71 度
焦点距離	f3.8 mm
LED	DNK318U
ピーク波長	870 nm
フォトダイオード	M5844
放射感度 R	0.42 A/W
ピーク感度波長	790 nm
増倍率	50 ~ 100 倍（印加電圧による）

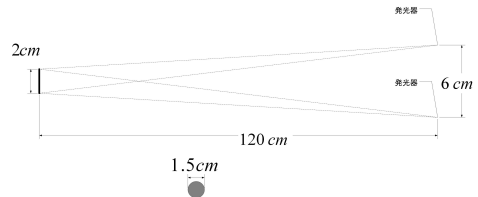


図 13 実験装置の物理的な構成
Fig. 13 Experiment system.

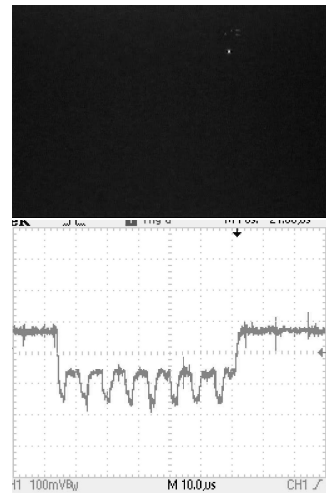


図 14 対象の映像と、受信信号（選択時）
Fig. 14 Infrared image of transmitter and received selected signal.

3.0° である。

この実験装置で、送信器から 25 μsec の矩形波を 1 バイト分発信し、LED の冷却のため途中で 120 μsec 休止した。信号の効率的な受信と、ノイズの影響を受けない信号そのものの波形を観察するため、実験は暗室内で行った。また、受信器は、電子回路の構成から、反転出力となっている。その結果を図 14 に示す。

図 15 で送信器のペアの発光器が撮像装置の視野内にあることが分かる。このとき受信信号は図 15 の下側のように一塊になり、25 μsec の信号成分は検出さ

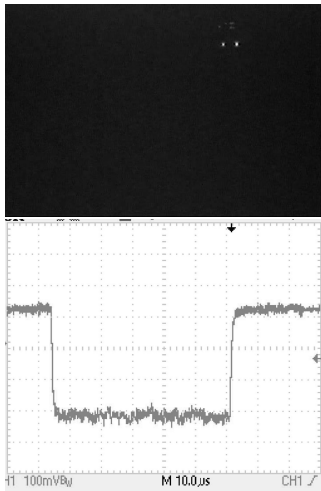


図 15 対象の映像と、受信信号（非選択時）

Fig. 15 Infrared image of transmitter and received unselected signal.

れないことが分かる．この信号は，信号成分を含まないため，多数の送信器から入射しても信号成分が検出されることはない．

それに対し，光信号を選択している図 14 では，片側の発光器からの放射束が遮られることで， $25\mu\text{sec}$ の信号成分が生じていることが観察される（図 14）．

5.2 信号の物理的な構造

さらに，映像上で対象物を選択した状態を維持したまま，次第に遮蔽物を反射板から遠ざけるように動かした際の受信状況を調べた．遮蔽物の直径は 1.5cm であり，反射板との距離は 30cm および 50cm で測定したところ，図 16 の信号の変化が見られた．

遮蔽物が反射板に近い場合の方が信号成分の出力が低い，これは両方の発光器からの放射束を遮蔽するため，結果的に検出信号が小さくなったものと考えられる．一方，反射板から離して設置した場合には，片方の放射束のみに干渉し，2つの放射束の差が大きくなるために検出される信号成分は大きくなったもの（図 17）考えられる．

6. 評価と検討

本稿では，実世界中に設置された送信器から光信号を送信し，ユーザがこれに接触することで信号を受光する仕組みを実装した．ユーザは撮像素子を介して送信器を観察し，送信器に備えられた1組の発光器のうち，1つに指などを重ねて光信号に「接触」することにより，この送信器から発せられた信号を受信することができる．

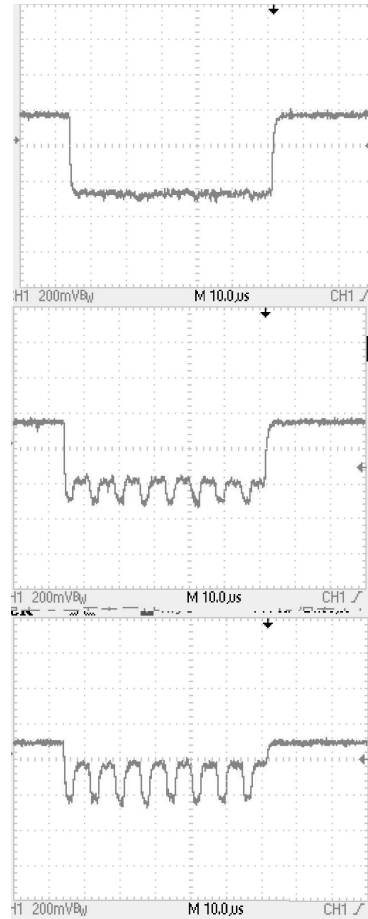


図 16 上から平常時，選択 1（反射板との距離 30cm ），選択 2（同じく 50cm ）

Fig. 16 Top: Not Clicked, Middle: Clicked ($d = 30\text{cm}$), Bottom: Clicked ($d = 50\text{cm}$).

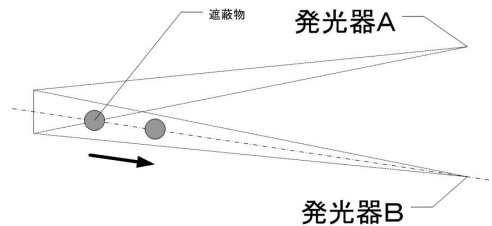


図 17 光信号と遮蔽物の関係

Fig. 17 Optical signal and interruptor.

6.1 ユーザの接触による光信号の検出

本研究で用いられた，実世界上の映像上の送信器に指を重ねるという選択方法は，従来の GUI 環境におけるカーソルでのポインティングを実世界に拡張した動作であると考えられることができる．このため，GUI 環境を使い慣れたユーザであれば直感的に理解可能であると考えられる．

同様の機能を実装したインタラクションシステムとして、たとえばレーザなどを利用したものや^(8),9)、棒状のデバイスを利用したものもある^(10),11)が、これらは遠隔したディスプレイの操作を行うなど、制限された環境の中で使用することが想定されていたものであった。

また、実世界環境の2次元映像に指を重ねることでインタラクションを行う方法も提案されている⁽¹²⁾。これらの方法では、主に映像データのみを利用し、画像解析を利用することで対象物を識別してシステムを構築していた。

これに対して本研究では映像と光信号を組み合わせることで、画像解析のプロセスを踏むことなく、高速な変調周波数を利用してデータを取得することができる。

6.2 データ転送速度

本研究では、約 $25 \mu\text{sec}$ の矩形波の送受信および選択に成功した。この矩形波は、200k ボーの変調速度を持つことになる。本研究では、この信号を空間的に選択することができ、その解像度は約 3° であった。

6.3 受光器の配置方法による視差の低減

本システムの特徴の1つは、受光素子を撮像素子に向けて配置する構造をとったことである。撮像素子では高速信号を撮影することが困難であり、受光素子では空間情報を取得することが不可能である。そこで両者を組み合わせて、光信号を空間的に選択するシステムを構築した。

この構造をとることで、受光素子と撮像素子の見かけ上の視差が減少し、撮像素子で観察した発光器の位置の近傍を遮蔽すれば、必ず光信号に接触できることが保障された。一方で、構造上の問題として、直接光信号を受光しないため、受光素子の受光量が減少するという欠点がある。

6.4 送信器の大きさ

本研究では、遠距離から信号を選択する際には発光器の間隔を大きくとらなければならないという制限がある。この間隔 d_r は、撮像素子から見て視野角 θ_r 以上であるべきである。データを取得する際に対象物がある一定以上の視野角で撮影しなければならないという制限はQRコードと類似しているが、

- 発光器自体は大きくする必要がなく、間隔を置いて設置すればよいだけである、
- 遠距離から視認し、選択させるためにはデザイン上ある程度の大きさがあることは必要である、ことから、遠距離でデータ転送を行う際の大きな欠点とはならないと考えられる。本研究で想定している送

信器の構造では、約 3° ほど（遮蔽物と反射板の距離 50 cm）の画角が必要とされている。しかし、これは人差し指をいっばいに伸ばして指差した場合、人差し指がちょうど3本入る角度に等しい。ユーザが遮蔽物を操作する際には、直感的にこの程度の余裕が必要であると考えられる。

6.5 撮像装置の融通性

本研究では、撮像装置からの反射光を受光すればよいため、たとえば撮像装置が人間の眼球などであったとしても動作可能である。これらの点は論文^{(13), (14)}に指摘されている。

7. 今後の課題

7.1 信号の符号化

本稿では、実際に光信号を遮蔽することで希望する信号を生成および、消滅させることが可能であるかどうかを実験し、 $25 \mu\text{sec}$ の矩形波を生成することに成功した。今後の研究で、データの符号化方法によるビットレートとエラーレートの関係について議論する。

7.2 送信器への改良

LEDは、狭い角度に光出力を集中させるように設計されている場合が多い^{*1}が、本研究では、広い画角に均等に光信号を放射しなければならない。2つのLEDの半値幅が狭い場合、角度によって片方のLEDの光信号が到達しないことがあるため、意図しない信号が生成される可能性がある。そのため、発光器は均等に光を放射するような機能を持つことが望ましい。そこで、LEDの正面に拡散板を配置するなどして、放射強度を均等にしようするべきである。

参考文献

- 1) Weiser, M.: The computing for the 21st century, *Scientific American*, pp.94–104 (1991).
- 2) Want, R., Fishkin, K.P., Gujar, A. and Harrison, B.L.: Bridging physical and virtual worlds with electronic tags, *CHI '99: Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.370–377, ACM Press, New York, NY, USA (1999).
- 3) Want, R.: The magic of rfid, *Queue*, Vol.2, No.7, pp.40–48 (2004).
- 4) Want, R., Hopper, A., Falcão, V. and Gibbons, J.: The active badge location system, *ACM Trans. Inf. Syst.*, Vol.10, No.1, pp.91–102 (1992).
- 5) Nishimura, T., Nakamura, Y., Itoh, H. and Nakashima, H.: System design of event space

*1 光出力が半分になる角度を半値幅という。

- information support utilizing cobits, *icdcs*, Vol.3, pp.384–387 (2004).
- 6) Scott, D., Sharp, R., Madhavapeddy, A. and Upton, E.: Using visual tags to bypass bluetooth device discovery, *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, Vol.9, No.1, pp.41–53 (2005).
 - 7) Rekimoto, J. and Ayatsuka, Y.: Cybercode: Designing augmented reality environments with visual tags, *Designing Augmented Reality Environments*, pp.1–10 (2000).
 - 8) Olsen, Jr, D.R. and Nielsen, T.: Laser pointer interaction, *CHI '01: Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.17–22, ACM Press, New York, NY, USA (2001).
 - 9) Myers, B.A., Bhatnagar, R., Nichols, J., Peck, C.H., Kong, D., Miller, R. and Long, A.C.: Interacting at a distance: Measuring the performance of laser pointers and other devices, *CHI '02: Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.33–40, ACM Press, New York, NY, USA (2002).
 - 10) Wilson, A. and Shafer, S.: Xwand: Ui for intelligent spaces, *CHI '03: Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.545–552, ACM Press, New York, NY, USA (2003).
 - 11) Cao, X. and Balakrishnan, R.: Visionwand: Interaction techniques for large displays using a passive wand tracked in 3D, *UIST '03: Proc. 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.173–182, ACM Press, New York, NY, USA (2003).
 - 12) Pierce, J.S., Forsberg, A.S., Conway, M.J., Hong, S., Zeleznik, R.C. and Mine, M.R.: Image plane interaction techniques in 3D immersive environments, *SI3D '97: Proc. 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp.39–ff., ACM Press, New York, NY, USA (1997).
 - 13) Mitsudo, Y. and Mogi, K.: Real eye communicator: An eye-mediated real world pointing device, *Proc. 1st International Conference on Pervasive Computing (Short paper)*, Zurich, pp.112–118, (Aug. 2002). In an informal companion volume of short papers.
 - 14) Mitsudo, Y.: A model of axis-selectable optical data translation system using user's eye as a medium, *Trans. Virtual Reality Society of Japan*, pp.153–160 (2006).
 - 15) Mitsudo, Y.: Pointing and retrieving: A data translation model for real world computing, *MDM*, p.103 (2006).

(平成 19 年 5 月 18 日受付)

(平成 19 年 11 月 6 日採録)



光藤 雄一 (正会員)

2005年電気通信大学情報システム学研究科単位取得退学，同年公立はこだて未来大学情報アーキテクチャ学科助手就任，現在，同学科助教．
 ユビキタスコンピューティングシステム，光空間通信システムの研究に従事．バーチャルリアリティ学会，ヒューマンインターフェース学会各会員．