

Title	光技術を用いた位置に基づく情報処理技術に関する研究
Author(s)	伊藤, 日出男
Citation	
Issue Date	2005-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/963">http://hdl.handle.net/10119/963</a>
Rights	
Description	Supervisor:東条 敏, 情報科学研究科, 博士



# 博士論文

光技術を用いた位置に基づく情報処理技術に関する研究

指導教官 東条 敏 教授

北陸先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報システム学専攻

伊藤 日出男

2005年1月9日

Copyright ©2005 by Hideo Itoh



## 要旨

本論文は、屋内における人間を支援する位置に基づく情報サービスのための、低消費電力携帯通信端末とその基地局を実装する上での、光技術の新しい応用のための研究について述べる。近未来の人間支援を目的とするユビキタス情報環境では、より連続的、精密、かつシームレスに各利用者の追尾とワイヤレス通信が行われるようになると考えられる。この情報環境は利用者が所望するサービスを所望の時間（必要があれば常時）提供できなければならない。このための測位と通信における端末の低消費電力動作化は重要な研究開発要素のひとつである。また、利用者のプライバシーとセキュリティを守るためには、目的の相手以外への情報漏洩を発生しやすいワイヤレス通信回線においてセキュアな利用者の測位と通信を行う必要がある。光を情報媒体とした測位通信は、端末の低消費電力化とワイヤレス回線での情報漏洩防止の双方を満足したシステムを構築しやすい。そこで本論文では、空間光通信による測位通信システムとその性能向上の研究について報告する。

Aimulet は、健常者だけでなく情報弱者も含めて支援するための、押しボタンや音声など簡単なユーザインタフェースでプライバシーに配慮した位置に基づく情報サービスを提供する端末である。Aimulet の最も単純な実装形態として、音声や音響を通じた情報サービスの提供に機能を集中した、小型無電源情報端末 Aimulet Ver.1（旧称 CoBIT）が西村らによって報告されている。ここで言う無電源とは、一次電池や二次電池による電源無しで動作する、ということの意味する。本論文では、この Aimulet Ver.1 のシステムのさらなる性能向上を図るため、端末の低消費電力送信技術、多重化信号の受信技術、そして、基地局の機能向上技術、の3つの課題を指摘し、その解決法について述べる。

端末の低消費電力通信技術としては、反射率変調技術を利用した通信モジュール、HV(Hyper Versatile) ターゲットの研究を行った。HV ターゲットは再帰光反射と反射率変調の2つの機能を有する空間光通信モジュールで、単純な構成から複雑な構成まで何種類かの実装方式に分類する。本論文ではその実装の分類を単純な方式からレベル0, レベル1,.. と呼ぶこととする。HV ターゲットの実装上、鍵となる素子は、光変調素子である。そこで、低電圧動作と低消費電力の観点から各種の液晶光変調素子、液晶ポリマ分散液晶、ポリマネットワーク液晶、そして強誘電性液晶のそれぞれについてその特性を比較評価し、ポリマネットワーク液晶がその低消費電力動作 (<3V) と、偏光無依存性から、次世代の Aimulet 端末に適切な液晶光変調器であることを示した。

シリコン受光素子を装備した低消費電力端末で多重化信号を通信する技術では、新しい近赤外波長多重通信技術の研究を行った。3種類のコンテンツの多重送信を実現するため、780nm, 880nm, そして940nmの3つの波長を中心周波数として発光するAlGaAs/GaAs LEDを用い、各LEDを異なるコンテンツで変調することで信号の多重化を行った。信号の多重分離は、これら3種類LEDの発光波長パターンに適合した誘電体多層膜フィルタ、780nm用短波長透過フィルタ、880nm用帯域透過フィルタ、940nm用長波長透過フィルタを設計、試作した。近赤外域用の誘電体多層膜フィルタは可視光帯域の光を透過するため、可視光を遮断するフィルタを基板の裏面に蒸着することで可視光信号からのノイズの低減とフィルタの応力緩和を行った。

基地局の高性能化技術では、変調レーザ光の偏向技術と、反射率変調光のデータの並列受信技術について研究を行った。ビームの偏向技術としては、ジンバル型の2軸MEMS(micro electro mechanical systems) 偏向鏡を開発した。この偏向鏡は偏向角を拡大するためにシリコンの代わりにポリイミドを素材とするヒンジにより鏡を支持し、駆動電圧を低減するために静電力の代わりに電磁力で駆動する。また、通信のスループットを向上させるために、インテリジェントビジョンカメラによる端末の反射率変調通信信号の並列受信技術を採用した。インテリジェントビジョンカメラを用いたのは、このカメラが各画素内にプロセッサとメモリを持ち、画素間演算などの前処理ができるため、フレームレートを1kfpsと向上させながらもネットワークに流すデータを画像データではなく端末の位置とデータだけにできるため、通信データ量を低減することができるからである。

これら研究開発された技術を用いて、新しい携帯情報端末である Aimulet と測位通信基地局 i-lidar を実装し、その追尾特性と通信特性を評価し、さらに、端末のIDと押ボタン情報を含めたインタラクティブな位置に基づく情報サービスのデモを行った。

## Abstract

In this paper, a new application of optical technology is described to implement a low-power-consuming handheld communication terminal and the base station, for human-supporting location-based information services at indoor situations. Human supporting ubiquitous information environment in near future will track and communicate with each user much more continuously, precisely and seamlessly. To keep privacy and security of the users, secured locating and communicating techniques should be required at the wireless channel to reduce information spillover. Spatial optical technology is an attractive solution to realize these requests of less computational power and less power consumption of the user's handheld information terminal. Concept of a human-supporting handheld information terminal, *Aimulet*, has been introduced. The *Aimulet* has some special features of an ultra-low-power consumption, a spatial optical communication, and a simple user interface via button(s) and/or voice I/O. The *Aimulet* Ver.1, Compact Battery-less Information Terminal (CoBIT) system had been developed. The *Aimulet* Ver.1 is one of the simplest implementations of *Aimulet*, which focused on serving voice or sound information, with no primary nor rechargeable batteries. The paper points three subjects and the possible solutions. To solve the first subject, low-power wireless communication, a new spatial optical communication module, named HV (Hyper Versatile) target was introduced. HV target has two functions of corner-reflection and reflectivity modulation. The HV target has several levels of implementation from simple to complex, and the key device of the target is liquid crystal light modulating device. Characteristics of polymer-dispersion, polymer-networked, and ferroelectric liquid crystals are evaluated. From its low operating voltage ( $<3V$ ) and insensitivity of light polarization, the polymer-networked liquid crystal light modulator was judged to be the most suitable device for our next version of *Aimulet*. To solve the second subject, low-power information multiplex/demultiplex, a new near infrared wavelength division multiplexing technique was employed. Three types of AlGaAs/GaAs LEDs with different center wavelengths of 780nm, 880nm, and 940nm were used to multiplex three contents. Three types of dielectric optical filters of short wavelength (780nm) pass, middle wavelength (880nm) band pass, and long wavelength (940nm) pass, are devel-

oped using evaporation technique on polyimide film to discriminate modulated light with each wavelength. Since these dielectric optical filters pass visible light, visible cut layers is evaporated on the backside of the optical filter. To solve the third subject, a base station with higher performances, new techniques of the beam-steering and parallel data receiving are developed. Two-axis beam steering was realized by a MEMS (micro electro mechanical systems) mirror with gimbals. The mirror has polyimide hinges instead of silicon hinges to increase its steering angle, and is driven by electro-magnetic force instead of electrostatic force to reduce operational voltage of the mirror. Intelligent vision camera is employed to improve communicating throughput from terminals to a base station. The camera realize both high video frame rate of 1kfps, and lower load average of network than a simple video camera with high frame rate, because the camera has processor and memory on each pixel and can execute various on-chip image pre-processing to get position of the terminal and data from the terminal. Using these developed techniques, a new *Aimulet* device with the HV target using a polymer-networked liquid crystal light modulator, and a locating and communicating base station, *i-lidar*, were developed. Tracking and communicating characteristics of the developed *Aimulet* system was evaluated, and some demonstration of an indoor location based information service. Content on the public screen was switched with push-button input, attribute (ID) and the user's location.



# 目次

<b>1</b>	<b>まえがき</b>	<b>1</b>
1.1	緒言	1
1.2	研究のアプローチ	4
1.3	本論文の構成	4
1.4	結言	5
<b>2</b>	<b>位置に基づく通信技術のための先行研究と課題</b>	<b>6</b>
2.1	緒言	6
2.2	位置に基づく情報サービスと位置に基づく通信	7
2.2.1	位置に基づく情報サービス	7
2.2.2	位置に基づく通信	8
2.3	低消費電力室内測位通信のための伝送媒体の検討	8
2.3.1	情報伝送媒体	8
2.3.2	情報伝送媒体の特性比較	13
2.4	光測位通信技術の先行研究	14
2.4.1	空間光通信技術	14
2.4.2	高精度屋内測位技術	15
2.4.3	並列データ受信技術	16
2.4.4	低消費電力測位通信情報端末 Aimulet	16
2.4.5	Aimulet Ver.1	18
2.5	Aimulet Ver.1 の課題と解決手法	20
2.5.1	低消費電力端末送信技術	20
2.5.2	近赤外域多重化通信技術	22
2.5.3	光測位通信基地局技術	22
2.6	結言	24

<b>3</b>	<b>空間光通信端末の低消費電力送信技術</b>	<b>25</b>
3.1	緒言	25
3.2	再帰光反射率変調通信モジュール	26
3.2.1	反射率変調通信	26
3.2.2	HV(Hyper Versatile) ターゲット	27
3.3	HV ターゲットのための液晶素子特性	29
3.3.1	光透過率変調素子	29
3.3.2	ポリマ分散液晶光変調素子	30
3.3.3	ポリマネットワーク液晶光変調素子	34
3.3.4	強誘電性液晶光変調素子	36
3.4	HV ターゲットの実装	37
3.4.1	レベル0 HV ターゲット	37
3.4.2	レベル1 HV ターゲット	40
3.4.3	レベル2 HV ターゲット	42
3.5	結言	46
<b>4</b>	<b>空間光通信端末の情報多重化技術</b>	<b>48</b>
4.1	緒言	48
4.2	コンテンツ多重化手法の検討	49
4.3	波長によるコンテンツの多重化	50
4.3.1	コンテンツ送信光源	51
4.3.2	光波長分離	51
4.3.3	可視光の遮蔽	52
4.3.4	フィルタ基板	52
4.4	試作結果	52
4.4.1	短波長透過フィルタ	53
4.4.2	中間波長帯域通過フィルタ	53
4.4.3	長波長帯透過フィルタ	54
4.4.4	可視光カットフィルタの効果	54
4.4.5	面内均一性	55

4.5	結言	57
<b>5</b>	<b>高性能基地局技術</b>	<b>58</b>
5.1	緒言	58
5.2	単一ビーム偏向送信技術	59
5.2.1	光偏向方式の分類	59
5.2.2	二軸偏向 MEMS ミラーとその特性	61
5.3	高速並列光受信技術	62
5.4	アイセーフ室内測位通信装置 i-lidar	62
5.4.1	システムの構成	62
5.4.2	システムの動作	65
5.4.3	システムの性能検証	66
5.5	結言	69
<b>6</b>	<b>実装例と今後の展開</b>	<b>70</b>
6.1	緒言	70
6.2	光技術を利用した位置に基づく情報サービス	71
6.2.1	光測位通信技術の特長	71
6.2.2	Aimulet による位置に基づく情報サービス	72
6.3	空間光通信端末の情報多重化技術	76
6.4	高性能基地局技術	77
6.4.1	ビーム偏向送信技術	77
6.4.2	高速並列光受信技術	78
6.5	結言	79
<b>7</b>	<b>結論</b>	<b>80</b>
7.1	本研究の要約	80
7.2	今後の展望	82
7.2.1	反射率変調通信技術	82
7.2.2	非対称通信方式技術	82
7.2.3	測位技術	83

7.2.4	計算機プログラムによるビーム偏向技術 . . . . .	83
7.2.5	無線機器との融合技術 . . . . .	84
	謝辞	85
	参考文献	86

# 目次

2.1	Aimulet のコンセプトイメージ	17
2.2	Aimulet の利用イメージ	18
2.3	Aimulet Ver.1 のシステム構成	19
3.1	再帰光反射率変調通信方式の原理	26
3.2	ポリマ分散液晶フィルムの透明・不透明の変化 [80]	31
3.3	ポリマ分散液晶素子の構造と動作原理	32
3.4	液晶シャッタとコーナーキューブを用いた反射光強度測定系	32
3.5	ポリマ分散液晶素子のキャリア周波数に対する反射光出力特性	33
3.6	ポリマ分散液晶素子の印加電圧に対する反射光出力特性	34
3.7	ポリマ分散液晶素子の周波数応答特性	35
3.8	ポリマネットワーク液晶光変調素子の構造と動作原理	35
3.9	ポリマネットワーク液晶素子の印加電圧に対する光透過特性	36
3.10	ポリマネットワーク液晶素子の周波数応答特性	37
3.11	強誘電性液晶の周波数応答特性と代表的な各周波数でのアイダイアグラム	38
3.12	レベル0 HV ターゲットの測定系	38
3.13	コーナーキューブの入射位置に対する反射出力特性	40
3.14	再帰光反射シートの入射位置に対する反射光出力特性	40
3.15	低電圧動作ポリマ分散液晶素子の電圧応答特性	41
3.16	低電圧動作ポリマ分散液晶素子の時間応答特性	42
3.17	DataSlim2 改の画面角度依存性の測定光学系	44
3.18	DataSlim2 改の再帰反射光強度の角度依存性	44
3.19	DataSlim2 改の周波数応答特性	45
3.20	光反射率変調通信端末の再帰光反射量の入射角度依存性	46

3.21	光反射率変調通信端末の外観 . . . . .	47
4.1	780nm 帯 LED 用短波長透過フィルタの特性 . . . . .	53
4.2	880nm 帯 LED 用バンドパスフィルタの特性 . . . . .	54
4.3	930nm 帯長波長透過フィルタの特性 . . . . .	55
4.4	可視光帯域を含めた 880nm 帯バンドパスフィルタの特性 . . . . .	56
4.5	可視光帯域を含めた可視カット層つき 880nm 帯バンドパスフィル タの特性 . . . . .	56
4.6	880nm 帯バンドパスフィルタの均一性評価 . . . . .	57
5.1	二軸偏向 MEMS ミラーとその偏向特性 . . . . .	61
5.2	アイセーフ測位通信装置 i-lidar の構成 . . . . .	63
5.3	近赤外投光 LED アレイを有するインテリジェントビジョンカメラ . . . . .	64
5.4	光偏向追尾サテライトの内部 . . . . .	65
5.5	アイセーフ i-lidar システムの外観 . . . . .	66
5.6	Aimulet の追尾性能の実験構成 . . . . .	67
5.7	Aimulet の移動速度に対する回線維持性能 . . . . .	67
5.8	双方向通信 Aimulet の送信コード . . . . .	68
5.9	受信成功率の閾値依存性 . . . . .	68
6.1	Aimulet GH . . . . .	73
6.2	Aimulet LA . . . . .	73
6.3	レベル 0 HV ターゲットを装備した Aimulet の運用例 . . . . .	74
6.4	光反射率変調通信によるインタラクティブな情報サービスの例 . . . . .	76

# 表 目 次

2.1	各種情報媒体による通信と測位技術の比較 . . . . .	9
3.1	HV ターゲットの実装段階 . . . . .	28
3.2	各種液晶光変調素子とその特長 . . . . .	30
3.3	DataSlim2 の緒元 . . . . .	43
4.1	光信号の多重化手法 . . . . .	49

# 第1章

## まえがき

### 1.1 緒言

急速に少子化高齢化を迎えていく日本において安心安全な社会を築いていくためには、福祉、医療、娯楽、防犯など様々な分野において、人に優しくきめのこまかい各種の情報支援サービスの充実が期待されている。このために、「いつでも、どこでも、だれでも」均質な情報サービスを楽しむことができるという、ユビキタス情報処理社会を目指した研究 [1] だけでなく、利用者の位置に基づいた情報サービスである、「いま、ここで、私に」情報支援をおこなう研究 [2] が内外で進められている。位置に基づいた情報支援サービスでは、利用者の属性や意図を的確に反映し、適切な支援を提供するために利用者の位置や方向の正確な把握が重要である。また、このサービスの実現には、情報処理技術やユーザインタフェース技術の進展はもちろんのこと、情報環境と利用者とのワイヤレス通信技術と、利用者の方向も含めた位置測定技術の発展が重要である。しかも、必要があれば利用者に対して常時情報サービスを提供できる環境が実現されるべきである。すなわち利用者が携帯情報端末を用いて情報サービスを受ける場合には、端末の充電や消耗品の交換など、メンテナンスの心配なくサービスを利用し続けられるべきである。

このような情報支援環境を構築するためには、利用者の意図を察して情報を提供するための強力な情報処理環境技術 [3] の研究は言うまでもなく、利用者との間の通信環境技術の研究開発が重要である。有線の通信環境としてはすでに光ファイバ通信技術が世界の通信インフラの根幹として利用され、日本においては



各家庭でも高速な光ファイバ通信の恩恵を享受できるようになってきている。ただし、健常者だけでなく高齢者や障害者も含めた利用者に対するユビキタスな情報サービスの構築という観点からは、有線通信だけではなくワイヤレスな通信環境の整備が不可欠である。ワイヤレス通信では、伝送中に情報の漏洩や盗聴の心配がなく、利用者のプライバシーやセキュリティを守りやすい通信媒体や通信方式の利用が重要になる。また、情報端末を用いて利用者を常時支援するためには、充電などのメンテナンスなしに利用者が端末を利用し続けられることが望ましい。また、情報環境のユーザインタフェースは利用者が自分ですべての情報入力を行わなくても、利用者の位置や方向をセンサなどで検知して利用者の意図をよりの確に察して対応できるようになっていることが望ましい。

さらに、利用者の意図を察して、支援を必要とする時に適切な知識のレベル・分量・タイミングで情報サービスを提供するためには、利用者の位置や方向の検知は重要な情報のひとつである。屋外における位置や方向の情報はGPS(Global Positioning System)あるいはPHS(Personal Handyphone System)または携帯電話の基地局群による位置計測が実用化されている[4][5]。しかしながら、屋内のような閉空間では、これらの信号が使えずまた、誤差が大きいため利用者個人に対する位置に基づく情報サービスには適切ではない。屋内では、RFID、無線LAN、あるいは超音波センサアレイを用いた測位システムが開発されている。この場合も方向まで含めて検知するにはそのためのセンサを必要としていた。このような実装方式では各種センサ情報の処理を行ったり、通信を行うためには端末の高機能化・高性能化が必要で、それに伴う端末の消費電力量の増大という問題を招いていた。例えば、携帯電話でも、アプリケーションの起動時には液晶のバックライト照明などもあわせれば200mA以上の電流を消費する[6]。これらの問題を改善するため、電子・通信回路の低消費電力化、燃料電池の採用などによる電源容量の増大などの改良は加えられてきているものの、例えば端末の製品寿命が尽きるまでメンテナンスなしに動作するような情報通信端末を、携帯できる寸法・重量とコストで入手することは現実にはできなかった。

ではこれらワイヤレス通信、位置や方向の高精度測位、そして端末の低消費電力という要件を満たすような位置に基づく情報処理に用いる情報通信端末は実現不可能なのであろうか。まずワイヤレス通信に電波を利用する場合を考える。屋

外のように情報環境を構成する基地局と端末の距離が大きい状況下では、端末にはセンサやプロセッサなど処理回路での電力消費だけでなくデータ通信のための電力消費が必要となる。このため、端末には大容量の電源とその機能維持機構が不可欠となり、現実的な実現は非常に困難である。一方、室内のような近距離閉空間においては、通信に必要な消費電力は近距離になるため低減できる可能性はある。ただし、近距離閉空間での情報サービスの実現には、屋外のような遠距離開放空間に比較すると、利用者の測位精度や通信速度への要求はより高く、端末の寸法や電源の関係から端末の消費電力はより小さく、より長い動作時間が求められる、やはりそれらに対応した端末でメンテナンスフリーな低消費電力通信は容易ではない。さて、ワイヤレス通信に光を利用する場合について考えよう。光による通信は、歴史的には電波が発見される以前から鏡による太陽光の反射や狼煙や灯火による通信が、中国の万里の長城の軍隊や米国先住民によって実現されてきた。また、通信速度や測位精度の高さという観点からは、信号を搬送する情報伝送媒体の基本周波数が高いこと、波長が短いことが本質的に重要であり、その意味で光は電波よりも有利である。一方、端末の消費電力の観点からは、通信速度の増大とともに消費電力も一般に増加するため、常時通信が求められる端末では光を用いた超高速通信は不利になる。ただし、光通信を行う場合、反射率を変調する通信や、再帰光反射素子など、電波を利用する通信端末とは異なった方式で、消費電力を低減する技術が利用できる。したがって、光技術を利用した空間測位通信技術を利用すれば、室内閉空間におけるメンテナンスフリーなワイヤレス測位通信の要件を満たす情報通信端末や情報支援環境の実現が期待できる。

本論文は、室内のような近距離閉空間において、常時接続して利用者がその位置に基づいた情報サービスを楽しむことができるような技術として、光測位無線通信技術に着目し、その得失を明らかにし、利用者個人の方角も含めた常時測位とワイヤレス通信を実現するための要素技術とシステム構築技術の研究を行うことで人間中心の情報サービス社会に資することを目指す。

## 1.2 研究のアプローチ

室内のような情報環境下で、情報端末の測位と通信により常時情報支援を実現するためには、端末の通信における消費電力の低減技術と利用者の測位・追尾技術の向上が重要である。本研究では、従来広く採用されてきた無線技術に代わり光技術を適用することで、より柔軟で多機能な情報サービス情報環境の構築に対する可能性を示すことを目的とする。まず、光反射率変調通信で低消費電力データ伝送を行うための主要素子である、液晶光変調素子のこれまで報告されていなかった赤外域における光変調特性を明らかにする。液晶素子としては、STN(Super Twisted Nematic)液晶、ポリマ分散液晶、ポリマネットワーク液晶、強誘電性液晶について測定を行いその有用性を比較検討する。それらの成果をもとに、反射率変調通信機能を有する携帯情報端末を試作し、その動作を確認する。

さらに、同じ場所と方向でも複数のコンテンツを弁別して利用者に提供できるよう、一次電池や二次電池を使用しない無増幅の携帯情報端末において多重化通信を実現する手法について検討と試作を行い、その特性を検証する。

次に、情報環境側の装置として、携帯情報端末の位置を検出して追尾するとともに、IDやデータを通信する基地局装置 i-lidar の研究開発を行う。これは西村らによって開発された無電源音声情報端末 [7] では基本的に固定されていた、音声情報提供ビーム光の方向を、利用者の ID や移動にあわせて個別に偏向追尾し、情報を連続して提供できるようにするものである。そこで本研究では、基地局の技術として、レーザレーダにより利用者端末の位置を取得するとともに、ID を取得して利用者を着実に追尾する技術、MEMS ミラーによる偏向ビームの照射技術を用いて利用者に情報を連続して提供する技術、低消費電力通信を実現するための反射率変調通信を行うための、各種液晶変調素子技術の研究を行い、光追尾通信システムの構築を行う。最後にこれらの測位通信システムを用いた場合のサービス応用についても考察を行う。

## 1.3 本論文の構成

本論文は 7 章で構成される。第 1 章では、序論として本論文が対象としている研究分野の背景を述べ、研究の目的とアプローチを示す。第 2 章では、位置に

基づく情報通信技術のための先行研究から課題を指摘し、解決策を提案する。第3章では、空間光情報通信端末 Aimulet において、低消費電力で情報を送信する技術について提案し、実装と評価を行なう。第4章では、空間光通信情報端末 Aimulet において、多重化された光情報を弁別して受信する方式について検討し、光波長多重化方式の試作とその特性の評価を行なう。第5章では、Aimulet を支援する測位通信環境における Aimulet 端末の基地局である、追尾通信システムの高性能化について述べる。第6章では、Aimulet システムの実装例と今後の展開について述べ、第7章でまとめる。

## 1.4 結言

本章では、安心安全な社会を築くための位置に基づく情報サービスにおいて、室内の整備された環境下で無メンテナンスで常時利用できる携帯情報端末について、光技術の適用によるその新たな可能性について概観した。室内閉空間では通信に必要な電力消費が低減できることに着目し、その要素技術およびシステム構築技術について言及した。次章以降ではこれらの課題を解決する方式とその実装について述べる。

## 第 2 章

# 位置に基づく通信技術のための先行研究と課題

### 2.1 緒言

本章では室内閉空間における位置に基づく情報サービスに関する先行研究とその課題について述べる。まず，屋内におけるワイヤレスで測位通信を行うための情報伝送媒体についてその得失を比較し，近赤外空間光通信技術に着目する。次に，低消費電力端末を用いた位置に基づく通信技術の先行研究について述べ，その課題を考察し，解決策について提案を行う [8]。

2.2 では，まず，位置に基づく情報サービス特に室内閉空間における利用者の位置や方向に依存した情報サービスについて概観する [9][10]。位置に基づく情報サービスの実現に必要な機能についてまとめる。

2.3 では，位置に基づく情報サービスを実装するための情報伝送媒体として，電波，光，超音波の情報の伝送媒体についてとりあげ，その得失を検討し，空間伝播光を利用した測位と通信技術が端末の処理能力や消費電力や能力が制限された中でセキュリティとプライバシーを保持した情報サービスの実装に有利であることに着目する [11]。

2.4 では，まず，位置に基づく情報サービスのための空間光通信技術と空間光測位技術について概観する。さらに屋内において低消費電力で動作する光通信情報端末の先行研究として，情報端末 Aimulet と Aimulet の無電池動作版である Aimulet

Ver.1 について述べる [12] .

2.5 では , Aimulet Ver.1 の低消費電力送信技術 , 多重化通信技術 , 基地局技術についての課題を整理し , 課題の解決手法について述べ , 2.6 でまとめる .

## 2.2 位置に基づく情報サービスと位置に基づく通信

### 2.2.1 位置に基づく情報サービス

位置に基づく情報サービスとは , 利用者に対する情報サービスのうち , 利用者の位置や方向を利用者の状況と属性の一要素として利用することでより高度な利便性を提供しようとするものをいう .

利用者に位置に基づく情報サービスを実現するためには , 携帯情報端末と情報環境の基地局との間で , 以下の 4 つの機能の実現が必要である .

1. 利用者の位置計測機能
2. 情報環境から利用者への情報送信機能
3. 利用者から情報環境の情報受信機能
4. 情報環境内のネットワーク通信機能

本論文ではこれらの機能のうち , 屋内において , 1. 端末の位置計測機能 , 2 . 端末への情報送信機能 , 3. 端末からの情報受信機能の 3 つの機能を実現するための技術について扱う .

屋内における位置に基づく情報サービスでは , 隣接した利用者に情報を混同して提供することのないようにしなければならない . したがって , 測位精度は 10cm 以下であれば多くの場合問題はない .

屋外における位置に基づく情報サービスは , GPS や携帯電話 , PHS の基地局からの位置計測や磁界センサによる方向の検知によりカーナビゲーション , 利用者周囲の店舗情報提供 , 目的地までの道程案内 , 迷子や盗難物品の探索支援などのサービスが提供されている [13][14][15] . 一方 , 我々の生活の多くの部分を占めているのは屋内であるので , 屋内の位置に基づく情報サービスは重要である . 屋内

での位置に基づく情報サービスは，博物館，展示会，駅，病院などのような空間の広さも収容されている人員も大規模なもの [16] から，家庭内のように小空間で少人数を対象とするものまで各種のサービスが考えられる [17] ．

## 2.2.2 位置に基づく通信

位置に基づく情報サービスを実装する上で留意すべきことは，利用者端末の維持管理も含めたコストの低減と，利用者のプライバシーやセキュリティを守る手法の確立である．利用者の位置情報や移動履歴はその利用者にとって重要なプライバシーのひとつである．利用者のプライバシーを考慮して空間的な位置をアドレスとして通信する技術として，「位置に基づく通信」技術が提案されている [18] ．これは，空間的な位置をアドレスとして通信する技術で，高精度の位置情報を用いて状況依存情報支援を実現するとともに，IP アドレスや MAC アドレス等の固定的な ID の代わりに位置をアドレスとして用いることによって通信における匿名性を保証することを目標としている．本論文では屋内において位置に基づく通信を実現できる実装方式について述べる．次節では，これら屋内においてプライバシーを配慮しつつ低消費電力で測位通信を実現するための伝送媒体の検討を行う．

## 2.3 低消費電力室内測位通信のための伝送媒体の検討

屋内外において位置に基づく情報サービスを実装するには，カメラやレーザレンジファインダのような光学機器，GPS，携帯電話，PHS，無線 LAN，RFID などのような電波機器，そして超音波やマイクロホンアレイのような音響機器などによる利用者の測位や通信が必要となる．そこで，これら大別すると電波，光，超音波の 3 種の情報媒体の性質について概観し，室内における情報サービスの実装の観点から比較を行う．

### 2.3.1 情報伝送媒体

情報伝送の媒体として，電磁波の波長の長い順に配列した電磁波と超音波について，測位と通信の観点からまとめた性質比較を表 2.1 に示す．なお表で記載した

電波とは電波法の扱う 300 万メガヘルツ以下の波長範囲をいう。本論文では、可視光は波長 400nm から 770nm、近赤外光は 770nm から 1300nm、中赤外光は 1300nm から 2500nm、それ以上の波長を赤外光と称する。電波と光の境界の波長であるテラヘルツ波、赤外光、そして可視光よりも短い波長の電磁波については、本論文で取り扱う「位置に基づく情報サービス」のための測位や通信には現時点では適切な波長域ではないので考察の対象外とする。

表 2.1: 各種情報媒体による通信と測位技術の比較

媒体	電波	マイクロ波	中赤外光	近赤外光	可視光	超音波
指向性	低	中	高	高	高	中
通信速度	数 Mbps	数 10Mbps	< 数 Gbps	< Tbps	< 数 Gbps	数 kbps
通信距離	見通し外 可 < 数 10km	見通し外 可 < 数 km	見通し外 不可 < 数 km	見通し外 不可 < 数 km	見通し外 不可 < 数 km	見通し外 不可 < 数 100m
測距誤差	数 m	数 10cm	< mm	< mm	< mm	数 cm
特長	低コスト	低コスト	高速通信 低消費電力 人体安全	低コスト 高速通信 低消費電力	低コスト 高速通信 低消費電力	電磁波と の共存可
課題	情報漏洩 電波法	情報漏洩 相互干渉 電波法	高コスト 物性把握	人体安全性	人体安全性	多重反射

## 電波

電波は光速で伝播する電磁波で、波長が長いほど壁等の障害物を透過・回折し、遠隔の相手まで伝播しやすくなる性質を持っている。このため見通しが悪いマルチポイントの通信にも適しており、携帯電話や放送を中心に、屋内、屋外等の通信媒体として広範囲に利用されている [19][20]。その反面、ISMバンド (Industrial, Scientific and Medical Band) のような電波法の規制が少ない周波数帯に無線



LAN[21], Bluetooth[22], ZigBee[23], など各種の無線システムが林立しているため, 相互干渉による障害が発生したり, セキュリティの確保, 相互接続やインタオペラビリティの維持が困難等の課題がある. 端末の位置を情報環境側から測位するという観点からは, 一般には電磁波の波長程度あるいは電界強度比の検出精度が限界となる. したがって波長以上離れた検知点から端末の位置を測定する場合には波長程度の距離精度となる. 一方, 微弱な電波を発信する端末のアンテナへの近接を検知する場合には, 位置取得の精度はアンテナの間隔で決定されるので数 cm まで小さくすることはできる. しかし屋内の利用者の位置を常に把握し情報サービスを提供するためには, 屋内にアンテナアレイを敷き詰める必要があり, システムのスケーラビリティの観点から有効ではない. また, 方向の検知は高い指向性を持つアンテナを小型化することが容易ではなく, 指向性の高いアンテナを用いる場合には多数のアンテナの配備が必要になるためこの方式も現実的ではない. また, 情報サービスを行うためには電波の送受信を伴うため, その発生と変調のための電子回路と電力の消費が必要となる. 常時情報の送受を行う必要がある携帯情報端末ではこの電源供給は大きな問題となる.

## 光

電波による通信と比較すると, 空間光通信は一般に以下のような性質を持つ.

- ・ 広帯域性 周波数の高い波は多くの情報を取り扱うことができる. たとえば 5GHz のマイクロ波よりも光は 5 桁周波数が高くその分大容量の情報を伝送できる. また, 波長は 5 桁小さいため, 単位断面積あたりで比較すれば 10 桁分多くの情報を伝送する可能性を有している. したがってより高速な通信を実現できる可能性を有している.
- ・ 短波長性 光は波長が 1 ミクロン前後と短いことから, レンズや鏡等の小さな光学素子により放射するビームの形状の制御が容易であり, 特定の場所への情報の収束伝送や光偏向素子による光路の切り替えが可能である. また, 再帰光反射素子, ホログラム, 液晶光変調器などのような特徴ある光制御素子が利用できる. 波長が短いことは, 位置測定など計測に光を利用する場合には精度が本質的に上げられることを意味する.

- ・ 変調方式の多様性 光は，振幅・波長位相・偏光など各種の変調方式を用いた自由度の高い情報伝達が空間伝播により実現できる．
- ・ セキュリティ性 空間光通信は，見通し外とは通信できず，散乱や吸収により遠距離の伝送もできない課題も有してはいるが，これは逆に，ビーム光を用いれば所望の相手だけとの秘匿通信が実現でき，壁の外などへの情報の漏洩を防止した通信ができる．

光を情報媒体として利用する場合には，変調ビームの放射指向性を高くすることができ，測位精度も他の方式に比較して高くすることができるため，利用者の位置や方向に敏感な情報サービスを容易に実装することが可能である．通信距離については室内においてはいずれの方式も十分な距離が確保できるが，光の方式の場合電波法の制約を受けず，また見通し外との通信が困難であるため，情報の漏洩の問題も解決しやすい．その裏返しとして，隠蔽が問題となる場合はその対策が必要になる．この性質は逆にサービス領域の外部への情報漏洩ができるため，セキュリティの向上に有用である．

光は電波法の規制を受けないものの，過大な光出力は人体特に人体では特に網膜の損傷を招く．このため，人体に安全な波長と強度を選択する必要がある．レーザー光およびLED放射光の安全基準及び光出力測定方法は「JIS C 6802」と「JIS C 6802（追補1）」で規定されている．中赤外光における出力限界値は，光が網膜で焦点を結ばないことから人体に対する安全性が高いため，可視光および近赤外光における限界値よりも高い．例えば波長1400nm～4000nmのClass 1の被曝放出限界(AEL: Accessible Emission Limit)は10mWである[24][25][26]．

人体に安全な状態をより遠距離まで安全でよりシステムの安定性中赤外光を利用すればることが望ましい．が，現時点では近赤外光帯域よりもシステム構築のコストが高いこと，空間光通信のための反射率あるいは透過率を変調する素子技術はそれほど進んでいないことが課題である．

特に光の反射率を変調する通信は，通信端末が自らエネルギーを放射することなしに情報を送信することが可能であり，端末の低消費電力動作に魅力的な性質と言える．ただし，反射光が十分な強度と消光比で光検知器に入射する必要がある．十分な反射光強度を得るには，入射光を光源に正対して強く反射する再帰光

反射素子が利用できる．そこで，本論文では，反射率を低電圧かつ低消費電力で変調するためにこの再帰光反射素子と液晶光変調素子の組み合わせを考案した．詳細については，第3章で述べる．

また，近年の光ファイバ通信に利用されている波長帯域を利用すれば，システム構築のコストも抑えやすい．したがって，空間光通信は高速で測位精度が高くセキュリティの高い近距離のワイヤレス通信を実現するのに適した通信方式であるといえる．

## 超音波

超音波は 20kHz から数 MHz の変調音波である．その伝播速度は音速（空気中で 340m/s）で，10m 以内程度の距離測定を低コストに実現できる．測位精度数 cm の測位システムとして利用が行われている超音波センサ単体 [27]，あるいは光や電波と超音波の組み合わせで位置と ID を検知する方式 [28] が報告されている．超音波は波長が短く直進性の高い音波であり，空気中では急速に減衰するため誤検出を防ぎやすいが，放射強度，壁面の素材，室内の物体とその配置によっては，多重反射による誤検出の問題や通信の輻輳や速度の制限が発生する．また，位置に基づく情報サービスを実現するには，他の方式と組み合わせて実装しなければならない．

情報伝送媒体としての超音波は，近接した利用者を区別できるという位置精度を満足しているものの，スケーラビリティに問題がある．このため建物内全体にサービス領域とするような実装ではなく，特定の室内や領域での限られた利用者に対する位置に基づく情報サービスには適している．また，壁や窓を透過して伝播しないので，信号の漏洩問題も発生しにくい．また，超音波を媒体として行う通信は，基本的に無指向性通信であること，送受信伝送速度が音速で遅いこと，キャリア周波数が数 10～数 100kHz と低いこと，マルチパスや輻輳が発生しやすいこと，最大でも複数の利用者を対象として位置計測も行わねばならないことから，データ通信は電波か光の別の情報媒体による通信を併用する必要がある．このため，端末から超音波信号を発射するにしても端末で受信するにしても，位置の計測や通信には電子回路とその駆動電力が必要になり，位置を短い時間周期で計測するためには消費電力は位置を取得する周期の逆数に比例して大きくなることになる．

### 2.3.2 情報伝送媒体の特性比較

位置に基づく情報サービス用の携帯情報端末において、充電など電源的なメンテナンスを極力不要にするならば、端末の消費電力や処理能力は大きく限定される。その場合、端末に位置や方位のセンサを装備し、その計測結果を通信で情報環境に送るのではなく、端末の測位を情報環境側から行う必要があり、情報伝送媒体自体が測位や通信に関して十分な能力を持っていることが望ましい。

**指向性** は高くできる方が利用者の方向性の検知が容易になるので、波長の短い光は電波や超音波よりも適している。

**通信速度** は早い方が望ましいものの、大画面の動画像表示を端末で行わず音声情報提供程度に制限するならば、数 10kbps もあれば音質の良い音声情報を得ることができる。光の最大通信速度は高いが、低消費電力な光変調素子の変調速度はたとえば液晶では数 kbps 程度と遅い。超音波は伝播速度が音速で遅いことと、キャリア周波数が低いことから、測位と通信を同時には実現できない。

**通信距離** は、通信回線の安定性の観点からは室内であっても利用者の方向や障害物による隠蔽の影響を受けないほうが良いが、情報の漏洩防止の観点からは見通し外との通信ができないことは逆に利点となる。プライバシーやセキュリティを重視する場合、見通し距離内の通信となる光や超音波は後者の面で有利である。

**測距誤差** は、特殊な変調信号を利用しない限りは波長程度の誤差が発生するため電磁波でも波長の短い光のほうが測距誤差を一般には小さくしやすい。屋内の位置に基づく通信を実現するために必要な測距誤差は 10cm 程度でよいので、遠隔から検出を行う場合には光や超音波が適している。

以上の検討から、室内における位置に基づく情報サービスのための媒体として、本論文では以下、光を用いて測距と通信を実現することを考える。

## 2.4 光測位通信技術の先行研究

### 2.4.1 空間光通信技術

空間光通信は基本的に基地局と利用者の間には障害物が存在しない有視界通信で、基地局の送信機と利用者の端末有視界距離において、基地局の通信機器と利用者の端末を1対多あるいは多対多で接続する空間光通信システム [29][30] や、可視光の発光素子を、照明や表示のために利用するだけでなく通信に併用することで、高速でユビキタスな可視光通信システムの研究開発も進められている [31] . これらの複数間の空間光通信は、従来の無線 LAN 等のネットワーク技術を利用して論理的には1対1で接続でき、データの暗号化を実装すれば本論文で対象とするセキュリティとプライバシーに配慮した双方向通信も実現することができる [32] .

しかしながら、その実装のためには十分な通信帯域と利用者の携帯情報端末での暗号の復号化処理が必要であり、端末での情報処理量と消費電力の増大により電池の充電や交換など電源のメンテナンスが必要となってしまう .

これに対し、有視界距離をビーム光を用いて1対1で結ぶ空間光通信は本質的にセキュリティやプライバシーを保持したワイヤレス通信回線を構築できる . これは光の広帯域性と短波長性を利用した実装として屋外のビル間を結ぶ高速通信回線 [33][34][35] や、光無線 LAN [36] への応用がなされてきた . また、1本の通信回線を占有できることで、比較的通信速度が遅い回線でも安定した通信と情報サービスの提供を実現することができる .

1対1の光通信回線を特に歩行者など移動体と基地局の間で構築するには、光ビームの偏向制御が必要となる . 光偏向制御にはガルバノメータミラーやポリゴンミラー [37] など可動鏡による光偏向器を利用する手法がある . ガルバノメータミラーは、ミラーに回転軸をつけ、電気信号に応じてミラーの回転角を変えられるようにした光偏向器である . また、ポリゴンミラーは、側面が鏡になった多角柱の軸を中心に回転する回転鏡である . ガルバノメータミラーは非共振型の偏向器で、ランダムに角度制御が可能であるため、一人の利用者を追尾するような目的には適切な光偏向器であるが、ポリゴンミラーは回転鏡のため、ラストスキャンはできるものの、ランダムな光偏向はできない . ガルバノメータミラーは精密な角度偏向が可能であるが、動作電力や寸法が大きく、高価という課題がある . これ

はサービス領域内の複数の利用者に対してそれぞれ専用の光ビームを光偏向器で偏向して照射することを考えると基地局装置の大型化と高コスト化を招くこととなる。より小型で低コストな空間光偏向器を実現する手法として、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 技術を利用した偏向鏡が開発されている [38]。MEMS 鏡の駆動方式は大別すると静電駆動方式と電磁駆動方式がある。静電駆動方式は平板電極で製造が比較的簡単であるものの、大きな角度変位を得るためには電極間のギャップを広げるしかなく駆動電圧が著しく増大せざるをえなかった。これを解決するため、くし型電極を用いたミラーが開発されている [39]。また、電磁力により駆動する MEMS ミラーも開発され [40]、耐ショック性に優れより偏向角が大きいスキャナとして、ポリイミドをヒンジとする MEMS ミラーも開発されている [41]。

## 2.4.2 高精度屋内測位技術

屋内における高精度測位には、光学式以外には、マイクロ波 [19][21] や超音波 [27] を用いた ID やデータの検出が報告されている。RFID のように検知ゾーンに入った端末を検知器の位置とする場合、位置の精度は一般に ID センサの配置の密度で決まる。したがって二次元では測位精度の自乗で、三次元では測位精度の三乗でセンサの数が必要となるため、スケラビリティに問題が生じ、移動者の移動履歴を詳細に取得する用途には適切ではない。利用者の位置や方向を光学的に検知するには、三眼カメラ [42] など撮像装置による測位、光 ID センサ [43] などが報告されている。カメラを用いた場合ではカメラの解像度と各カメラの画角およびカメラのフレームレートで測位精度と速度が決まる。端末の位置の取得は、端末から位置情報を環境に発信する方法と、環境が端末の位置を取得する方法の二種に分けられる。前者は端末が自身の位置を検知しなければならないので、端末の消費電力が大きくなるという問題がある。後者の場合は、端末の ID を検知しないと端末間の区別がつけられなくなる。ID の送受信は、端末が複数あっても一般には同一の周波数を共有して行われる。この信号の発信間隔は短い方が細かく移動軌跡を取得でき、かつ端末位置を見失う機会が減少することにもなる。しかし逆に、複数の ID 信号の衝突が発生して ID を正しく取得する率が低下してしまう

ためである．解決法には，センサ信号の空間的な分離や，周波数領域での分離の手法が考えられる．

### 2.4.3 並列データ受信技術

利用者の Aimulet からの ID 等の光データは基地局に装備された受光素子で受信する．受光素子には，LED 発光信号の受光ユニット [44] やビデオカメラの利用 [45] が考えられる．受光ユニットを複数配置し，ID を検出した領域を利用者がいる領域とする方式は，RFID や Bluetooth などによく利用されるが，空間光通信を実施する基地局以外に位置と ID を検出する受光ユニットを多数配置する必要があるので，実装上スケーラビリティに課題がある．基地局の位置からそれぞれの Aimulet の信号を並列に受信することができればスケーラビリティの改善に有用である．そこで，受光ユニットの代わりにビデオカメラ等の撮像素子により観察区域を画素オーダまで細分化することができる．撮像した画面毎に画像処理を行い，点滅状況の変化を検知すれば二次元並列的に点滅する発光点からの ID やデータを取得することができる．赤外線 LED を用いる Baloon Tag [46] や，LED の点滅を  $192 \times 124$  画素の CMOS 画像センサを用い，12kHz でサンプリングしてビーコンとして用いる IDCam [47] などが報告されている．これら赤外 LED を利用する場合，光信号を放射するために端末のデータ送信時の消費電力が大きくなるという課題があった．また，光無線 LAN 用のビジョンチップの研究が進められている [48]．このチップは，通信ノード探索とデータ読み出しの 2 つのモード動作を行い， $64 \times 64$  画素のビジョンチップにより，1Gbps 以上の通信速度を目指した研究が進められている．

### 2.4.4 低消費電力測位通信情報端末 *Aimulet*

空間光通信技術を利用した位置に基づく情報サービスを行うための低消費電力情報通信端末を著者らは Aimulet と呼んで研究開発を進めている．なお，これは従来マイボタン [49] と称していたものを商標登録の関係から呼称を変更したものである．Aimulet はお守りや護符を意味する Amulet に情報，双方向性，赤外線 of the 英語の頭文字の i を加えた造語で，必要な時に適切に利用者を支援してくれる，いわば電子印籠ともいふべきものである．Aimulet のコンセプトを示すイメージを図

2.1 に示す．この図における Aimulet は，利用者の支援を依頼するための要求を伝達するトリガを利用者周囲の情報環境に通知する入力素子としての押しボタン，支援内容の確認や認証を行うための音声入出力素子，そして端末の測位と光通信を実現するための光通信モジュールから構成されている．端末の位置同定と通信用には著者が提唱した光通信モジュール（Hyper Versatile :HV）ターゲットを装備する [50]．HV ターゲットについては，3.2 で述べる．Aimulet 端末では，限られた計算処理能力と消費電力をより有効に活用するため，端末ではその位置測定や音声認識などの処理を極力行わず情報環境側で処理を行う．利用者は情報支援の要求が発生したときに Aimulet のトリガボタンを押すと，情報環境は利用者との音声入出力，利用者の移動履歴や各利用者のスケジュール等から利用者の意図を察し，必要な情報の提供を行う．利用者に端末を通して提供される情報は音声など音響情報を基本とし，動画像などの大きな帯域を要求するコンテンツは図 2.2 に示すような公共のディスプレイの一部を共用して利用することを想定している．端末の位置を計測・追尾し，端末に情報提供を行う．Aimulet はボタンを押すことで利用者に対して適度なプライバシーを保ったまま助けてくれる「電子印箋」ともいうべき超低消費電力携帯端末である．Aimulet は情報弱者や身体障害者でもストレスなく使用可能で，平常時には情報環境が整備されている場所では便利に使用でき，災害・緊急時には安否情報をアドホックに送受するなど，さらに有効に機能することを目指している．また，情報環境で発見された位置と時刻を ID として使用することで，所有者の適度な匿名性を実現する．さらに，セキュリティとプライバシーの保持に有用な空間光通信を実施する．

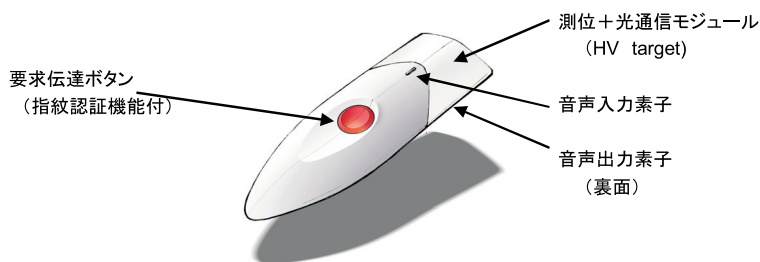


図 2.1: Aimulet のコンセプトイメージ



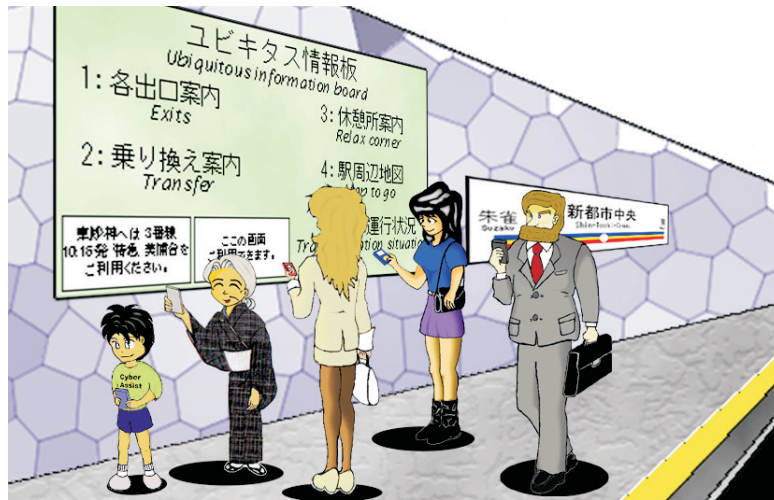


図 2.2: Aimulet の利用イメージ

## 2.4.5 Aimulet Ver.1

Aimulet には、単純に音声情報を提供する単機能な端末から ID や押しボタン情報を提供する高機能な端末まで各種の実装形態が考えられる。このなかで、西村らは利用者が端末から直接受信する情報を音声など音響信号とし、簡単なインタラクションに限定する一方、単純な構成で光のエネルギーにより動作する小型無電源光音声情報端末が Aimulet Ver.1 (Compact Battery-less Information Terminal: 通称 CoBIT) を開発した [7]。なお、ここで言う「無電源」動作とは、電子機器が一次電池または二次電池ではなく太陽電池により動作する電力を得るが、電子回路を駆動して信号の増幅などの演算や情報処理を行わぬ動作を称している。この端末は、前節に述べた Aimulet の実装の中で、位置に基づく情報サービスを行う上で最も単純な構成で携帯情報端末の実装を目指したものと言える。図 2.3 に Aimulet Ver.1 のシステム構成を示す。

Aimulet Ver.1 のシステムは、Aimulet 基地局と、Aimulet 端末から構成される。Aimulet 基地局は、音声など音響信号で変調された近赤外光を LED から放射する変調光放射部と端末からの再帰光反射を検知してデータの受信を行う変調光受信部からなる。サービスを提供するための音響信号は増幅器により強度変調光に変換され、近赤外 LED 光源から放射される。Aimulet 端末は受光素子である太陽電池にイヤホンが直結された電気回路と再帰光反射素子から構成されている。変調

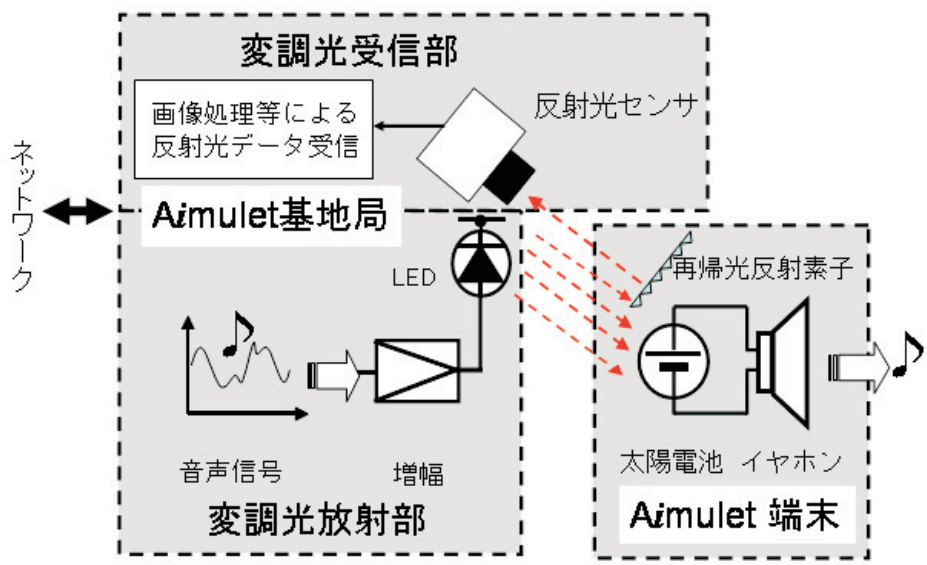


図 2.3: Aimulet Ver.1 のシステム構成

光が端末のシリコン太陽電池に入射すると、太陽電池には脈流電圧が発生する。脈流電圧の交流成分は音響信号の電圧変動に等しく、その交流電圧でイヤホンスピーカなど発音素子の振動板を駆動することで音響信号を利用者に提供する。LEDから放射される変調信号光は近赤外光である。太陽電池はLEDの近赤外光に高い感度を示す必要があるため、アモルファスではなく、単結晶または多結晶シリコン太陽電池を利用する。太陽電池は、LED放射光源の方向に太陽電池パネルが正対したときにもっとも大きく発電し、角度がずれるほど発電量が減少するので、利用者が光源の方向に正対したときにその説明が聞こえてくるようになる。このため、博物館や美術館などで展示物の方向を向いた時にはじめてその説明が聞こえてくるような、利用者の位置と方向に依存した情報サービスを提供できる。

赤外変調光を用いた利用者の位置と方向に敏感な放送型の音声伝送、という点では、トーキングサイン<sup>®</sup>のような、光FM変調光を用いたワイヤレスラジオが開発されている[51]。このいわゆるワイヤレスラジオに対して、Aimulet Ver.1は、音声情報の受信という点では、いわば光を利用した鉱石ラジオと行うことができる。Aimulet Ver.1が単なる光をキャリア周波数とするラジオと異なるのは、情報通信端末として双方向の情報伝送を実現するために、本体に再帰光反射素子を装備していることである。これにより、LED放射光源からの光の一部が光源側に反射することになり、赤外カメラなどの反射光センサによって、端末の位置、端末の接近、あるいは端末の装着者のジェスチャーなどの情報を基地局側で捉える事ができる。したがって利用者と情報環境の間で、簡単ではあるものの、双方向の通信を無電池で実現できることになる[52]。

## 2.5 Aimulet Ver.1の課題と解決手法

### 2.5.1 低消費電力端末送信技術

端末から環境側に情報を送信する場合、再帰光反射シートの移動を検知するだけで利用者の意図をすべて察することは、情報環境側の計算処理の負荷も大きくなり、また、端末から送信できる情報量にも限界がある。そこで、より多くの情報を端末から送信する手法の開発が必要である。これまで中村らによって、ID生

成のための電子回路と光情報送信のための LED を装備し、端末の ID や押しボタンの情報を間歇的に発光変調信号として送出する Aimulet 端末が開発された [43] . この端末は情報送信用 LED の消費電力が大きいため、音声提供のために装備された太陽電池のみで必要な消費電力を賄うことができず、リチウムボタン電池の電力で動作していた。これは太陽電池のみで駆動するためには大面積の太陽電池が必要となり、現実的な実装にならなかったためである。このため、連続動作時のボタン電池の電池交換の周期も 1 週間程度と頻繁なメンテナンスが必要であった。

低消費電力で情報を送信する手法として、光反射率を変調して送信する、という方式がある。光反射率変調方式の歴史は、電話の発明者でもある A. G. Bell の 1880 年の光電話の発明に遡る [53] . この発明では、音声によって振動する鏡によって太陽光が受信者に反射されるようになっており、音声による鏡の振動で太陽光の反射率が変動することを利用して音声信号を伝達しようというものである。これは機械的に光反射率を変調しているため、通信速度や通信品質に課題があった。したがってよりひずみの少ない変調、あるいは高速なデジタル変調を行う場合には、電子的あるいは光電子的な変調による通信が必要となる。また、平面反射鏡を用いる場合には鏡の角度の変位に非常に敏感である。低消費電力で透過率を変調することができる光電子素子、例えば液晶光変調素子と光反射鏡を組み合わせれば、この反射率変調機能を実現することができる。ただし、液晶光変調素子は本来、ディスプレイとしての用途に主に利用されてきたため、可視光域での光変調機能についての特性把握は行われていたものの、本研究が目的とする近赤外あるいは中赤外域での電気光学特性はほとんど明らかになっていなかった [75] ため、その赤外域における電気光学特性を把握し、その性能向上についての検討が必要である。

そこで本論文では、Aimulet 端末が低消費電力で位置に基づく通信を行うために、再帰光反射機能と反射率変調機能を組み合わせた、再帰光反射変調モジュール技術を提案する。反射率の変調には低消費電力で動作できる、液晶光変調素子を採用する。ただし、これまで液晶光変調器は赤外領域における素子特性が明らかになっていなかったため、各種の液晶光変調器について赤外変調特性を評価し、位置に基づく通信を実現するシステムの実装に適した液晶変調モジュールについて研究する。

## 2.5.2 近赤外域多重化通信技術

Aimulet Ver.1 はシリコン太陽電池パネルなど受光素子に入射した変調光のエネルギーで発音素子を駆動する。したがって、ひとつの受光素子に異なる情報で変調された光が入射すれば、情報が混信して受信されてしまうことになる。この混信を避けるため一般には、利用者を展示パネルなどで誘導して異なる位置に立たせる、あるいは、異なる方向を向かせて異なる変調光を利用者の受光素子に入射させる、という手法を行う。しかしながら、利用者に対してステレオの右側音声と左側音声、日本語と英語、あるいは大人向けと子供向けのように、異なった種類の情報を同一場所で受信する状況は少なからず存在する。このため、無電池での動作を基本としつつも、送信信号の多重化と受信信号の逆多重化の技術を確立することが必要である。

そこで本論文では、近赤外域の光波長帯において、提供情報の多重化送信・多重化分離受信技術について研究する。特に通信端末は、受信時には無電源動作で逆多重化を行なう必要があるため、異なる発光波長ピークを持つ複数種類の近赤外域の高輝度LEDを用いて情報の多重化を行なう。また、LEDの発光波長スペクトルに対応した透過特性を有する光学フィルタを開発し、太陽電池素子に装着することで信号の逆多重化を行なう。

## 2.5.3 光測位通信基地局技術

Aimulet Ver.1 では、LED光放射器はある領域を照射するように固定されており、その照射領域に入って光源の方向を向いた利用者だけに情報を提供する形になっていた。この場合、同じ照射領域に入った利用者は同じ情報を同時に得ることになる。利用者に提供する情報はこのような同じコンテンツの同報通信だけではない。特定の相手方とのプライベートな通信など他者への情報の漏洩を防止しなければならない通信も存在する。情報の漏洩の危険性が最も高いのはワイヤレスな通信回線の部分であるので、この回線の対策が必要である。伝送する情報の暗号化により情報の秘匿を行うことが一般的であるが、通信の有効通信速度の低下と、端末での暗号の解読のための演算処理が必要になる。Aimulet 端末では、このような高速通信や暗号化復号化処理を常時行うことは消費電力量が極端に制限されて

いるために困難である。

特定の利用者にだけ個別に測位通信用の光ビームを照射することで1対1の空間光通信回線を構成する手法は、他者からの空間通信の傍受が困難になるだけでなく、利用者の位置や方位を動的なIDとすることで、通信回線にIDをデータとして常に伝送させる必要がなくなるので、通信のオーバーヘッドを低減することで実効的な通信速度を増加させることができる。このためには個別の利用者それぞれに空間光通信回線を確立し、利用者の端末が移動しても追尾して通信回線を維持する技術の確立が必要である。

単一ビーム偏向技術 1対1の通信回線を構築するには、ビーム光の偏向投射を行う空間光通信装置が必要となる。このため著者は、従来エアロゾル等の屋外環境観測に行われていたレーザレーダを、室内の測位通信用途に用いる、室内レーザレーダ測位通信システムをi-lidarと名づけ、研究を進めてきた[50][54][55][56][57][58]。初期試作のi-lidarはFSF(Frequency Shifted Feedback)レーザ[59]を利用して1本のレーザビームで反射物までの距離を測定できるレーザ測距装置のビームを2軸のガルバノメータミラーで偏向し、室内の光反射機能を持つAimuletの位置を精密に計測することで位置に基づく情報サービスを提供しようとする装置である。

試作したi-lidarの位置精度はレーザビームのビーム径と偏向角の精度で決定され、1cm以内の位置精度が実現されている。ただし、この装置は1本のレーザビームで端末の発見、追尾、通信をすべて行なっていた。このため、端末の位置検出の精度を上げるにはビームの径が小さくなり、サービス領域全体の走査回数が増えるため、端末発見までの時間も長くなるという課題があり、その効率化が問題になっていた。また、ビームの偏向に用いたガルバノメータミラーは、偏向角度の精度は高いものの、装置の寸法も重量も大きく、消費電力が大きいという課題があった。実用的なi-lidarの実現のためには、小寸法で低消費電力のビーム偏向手段の開発が必要である。

そこで本論文では、基地局であるi-lidarとAimulet端末間において1対1の空間光ビーム通信を実現するために、変調ビーム光を偏向して端末に放射するためのよりコンパクトな光偏向素子として、ジンバル型MEMSミラーによる偏向鏡を採用する。

並列信号受信技術 プライバシとセキュリティを保持するために他者に傍受されないように1対1の光ビームの通信回線で通信を行なう場合、ビームの偏向速度も通信速度も遅い場合には、同時に通信する利用者の数と同数だけ利用者の数だけ光信号受信回路が必要になる。利用者数が多くなると、システムのコストの上昇要因となるため、多数の利用者からの信号を並列に受信できる機器があればよい。そこで本論文では、赤外カメラにより再帰光反射像を撮像し、フレーム毎の画像処理により各 Aimulet 端末の送信データを解釈すると共に、端末の方角を検知する技術を研究する。ただし、通信速度の上限は画像のフレームレートで制限され、また、単にフレームレートが高いだけでは転送すべきデータ量が膨大となるので、ネットワークの負荷上も得策ではない。そこで、撮像素子自体にプロセッサとメモリを備え画像処理能力を有する撮像素子を採用する。

## 2.6 結言

本章ではまず、屋内においてプライバシやセキュリティに配慮した位置に基づく情報サービスを実現するための、位置をアドレスとして利用する通信技術のための情報伝送媒体について検討した。測距誤差、情報漏洩の防止、そして端末の低消費電力通信の点で光を媒体とする測位通信技術は電波に対して優位に立つことがわかった。セキュリティとプライバシに配慮した人体に安全なワイヤレス通信を無電源あるいは低消費電力で実現するためには、光ビームを利用する赤外光ビーム光の利用が望ましいことがわかった。また、光測位通信技術の先行研究を通して、これまで報告されてきた低消費電力携帯情報端末およびその情報環境装置の課題を明らかにし、その解決方法について検討を加えた。次章以降でそれぞれの解決法について検討と検証を行なう。

## 第3章

# 空間光通信端末の低消費電力送信技術

### 3.1 緒言

本章では、第2章で指摘した Aimulet Ver.1 の課題のなかで、利用者の意図を端末から情報環境に低消費電力で送信するための超低消費電力空間光送信方式について提案を行いその検証を行う。端末の低消費電力送信を実現する方式として再帰光反射率変調方式に着目する。本論文では、再帰光反射率変調を行う空間光伝送モジュールを HV(Hyper Versatile) ターゲット [50] と名づけ、このモジュールを構成する素子の評価とターゲットの実装を行う [60]。

3.2 では、端末の動作電力を低減するための再帰光反射通信方式と、光反射率変調方式を組合わせた再帰光反射率変調モジュール、HV ターゲットについて述べ、その各種実装形態について述べる。HV ターゲットの実装形態は単純なものから複雑なものまで数種類に分類でき、本論文ではそれぞれを単純な方からレベル0、レベル1、… と呼ぶ。低電圧で動作するポリマ分散液晶の特性 [61][62]、ポリマネットワーク液晶の特性 [63] や、強誘電性液晶の特性 [64][65]、そして空間光変調器による実装 [66] について述べる。

3.3 では、HV ターゲットのレベル1 とレベル2 の実装に使用できる各種の液晶光変調素子とその特性について述べる。これまで液晶光変調素子はディスプレイなど可視光の制御に対する応用が主であったため、赤外波長領域に対する動作特性は明らかではなかった。そこで、赤外領域における素子特性を測定しその評価を行う [67][68]。



3.4では、各種のレベルのHVターゲットの実装を行い、その特性を評価し[69][70]、3.5でまとめる。

## 3.2 再帰光反射率変調通信モジュール

携帯情報端末で移動する利用者の情報支援を常時行うためには、端末が連続動作していても端末の電源が枯渇してしまわぬよう、ワイヤレスで電力を供給し続けることが必要である。太陽電池による電力供給は解決策のひとつとなりうるが、屋内環境で照明等による光強度は通常のオフィス環境で  $0.05\text{mW}/\text{cm}^2$  程度、Aimulet への赤外 LED の照射光でも  $1\text{mW}/\text{cm}^2$  程度と、屋外の直射日光下での約  $100\text{mW}/\text{cm}^2$  に比較して  $1/100$  以下と小さい。したがって、屋内環境で端末の連続動作を可能にするには、端末の低消費電力動作化が不可欠である。情報通信端末の消費電力の低減には、Aimulet Ver.1 で情報の受信動作を一次電池や二次電池を利用せずに実現したように、送信動作においても低消費電力で実現する技術の研究開発が必要である。本節ではこの低消費電力データ送信を実現するために光反射率変調通信技術に着目し、その原理と実装について述べる。

### 3.2.1 反射率変調通信

再帰光反射率変調通信方式の原理を図 3.1 に示す。通信端末は、情報を基地局に送信するための再帰光反射素子と透過率変調素子、基地局からの情報を受信するための受光素子を装備している。

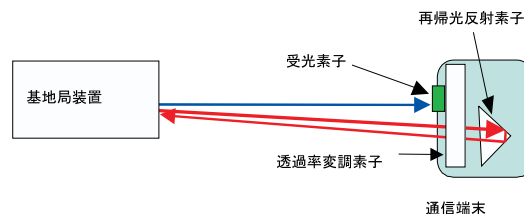


図 3.1: 再帰光反射率変調通信方式の原理

一般の光通信方式では、基地局も端末も送受信装置を持ち、互いに変調した光信号を送受信しあうことで通信を実現する。これに対し、光反射率変調通信では、通信端末では自ら変調光を発光せず、外部から照射された光の反射を制御して通信を行う。端末から基地局への送信に必要な電力は主に、透過率変調素子の駆動電力で決定されるので、変調素子の駆動電力が自ら変調光を放射する場合の駆動電力よりも低ければ、端末はより低消費電力での情報送信が実現できる。低消費電力で動作する透過率変調素子には例えば液晶光変調素子が挙げられる。なお、基地局から端末への通信は従来方式と同じであるので、これに要する回路と消費電力は従来方式と同等に必要である。

端末では光源に正対した方向へより強い反射光を得るために再帰光反射素子を装備する。再帰光反射素子は素子に入射した光がを全反射を2~3回繰り返すことで光源に正対して反射するように作られている光学素子であり、立方体の角のように互いが直角を成すようにガラスを研磨したり、母型からの射出成型で作成されたコーナーキューブ（コーナーキューブプリズム、コーナーリフレクタとも言う）、あるいは球形のガラスビーズを高分子膜にちょうど半径分だけ埋め込んだ光学素子などにより実現できる。端末に再帰光反射素子を装備すると、基地局からの光照射の強度が低くてもより高い強度の反射光が基地局に戻るため、端末位置の認識や通信がより容易になる。

### 3.2.2 HV(Hyper Versatile) ターゲット

本論文では、低消費電力情報送信のための再帰光反射通信モジュールを、HV(Hyper Versatile) ターゲット [50] と呼び、その実装と特性について述べる。再帰光反射通信モジュールであるHV ターゲットは、2つの機能を有している。ひとつは基地局からターゲットに照射された赤外光を基地局に正対して反射する再帰光反射機能、そしてもうひとつは、光反射率を変調する機能である。この2角機能によりHV ターゲットは基地局からの照射光を変調し、ターゲット側の持つ情報を基地局に送信することができる。

HV ターゲットは再帰光反射機能を持つコーナーキューブのような光学素子と透過率変調素子の組み合わせで構成することができる。HV ターゲットには、表3.1に

示すように、再帰光反射素子のみの単純な構成から、反射型半導体空間光変調器まで各種の実装の段階が考えられる。再帰光反射素子としてコーナーキューブを、透過率変調素子として液晶光変調素子を用いる場合をレベル1とし、より微細で高性能になるものの、実現にはより高度な技術が必要となる実装の段階をより大きい数字のレベルで表すこととする。

表 3.1: HV ターゲットの実装段階

レベル0	再帰光反射素子
レベル1	再帰光反射素子 + 液晶光透過率変調素子
レベル2	微細再帰光反射素子アレイ + 液晶光透過率変調素子
レベル3	反射型液晶空間光変調器
レベル4	反射型半導体空間光変調器

レベル0のHVターゲットの実装は、は光変調機能を持たず再帰光反射機能のみをコーナーキューブ等で実現したものである。レベル0実装の場合、ターゲット自体は時間的な変調機能は持たないものの、十分な位置分解能を有するセンサを用いることで複数の再帰光反射体からの反射信号を一次元～三次元バーコードとして端末の固定IDや端末の方向を読み取り、それに基づいて位置に基づく情報サービスを提供することができる。

レベル1の実装では再帰光反射素子に液晶光変調器を組み合わせた構成で、端末のデータを基地局側に送信できるようになる。動作時の消費電力は液晶光シャッタの駆動電力で決定されるため自ら変調信号光を発するよりは小さいが、再帰光反射素子にコーナーキューブを用いているため、ターゲットの体積と重量が大きくなる問題がある。

レベル2の実装では、シート状に成型された微細化されたコーナーキューブを再帰光反射素子として用いるため、大面積でも薄く軽量のターゲットを実現できる。

レベル3の実装では、HVターゲットに要求される2種類の機能を空間光変調器で同時に実現する。応答速度は液晶の動作速度程度であるが、計算機プログラムを表示により特定の基地局の方向にだけ信号を再帰的に反射することが可能になるので、より秘匿性の高い通信が実現できる [66]。ただし、現状の空間光変調素

子は例えば浜松ホトニクス社製 X8267[71] では、 $80 \times 93 \times 226.3\text{mm}^3$  と寸法が大きいため、携帯情報通信端末に実装することはまだできない。

レベル4の反射型半導体空間光変調器は、反射型半導体光変調器 [72] を二次元アレイとして配置する変調素子である。レベル3HV ターゲットの特長を生かしたまま、より小体積で高速動作が期待できるが、この素子も実用化はされていない。

次節ではレベル1、レベル2のHV ターゲットに用いることができる各種の液晶光変調器について述べる。

### 3.3 HV ターゲットのための液晶素子特性

#### 3.3.1 光透過率変調素子

光の透過率を変調する原理には、機械式開閉効果 [73]、非線形光学効果 [74]、電気光学効果 [75]、磁気光学効果 [76]、等が考えられる。本論文では、低消費電力と低駆動電圧で光制御が可能な点に着目し、液晶光変調素子による透過率変調について述べる。液晶光変調素子には TN(Twisted Nematic) 液晶、STN(Super Twisted Nematic) 液晶、TSTN(Triple Super Twisted Nematic) 液晶、FSTN(Film Super Twisted Nematic) 液晶など TN 系の液晶 [77] やポリマ分散液晶、ポリマネットワーク液晶など DSM(Dynamic Scattering Mode) 系 [78] など、各種の液晶素子が開発されている。表 3.2 に代表的な液晶の特徴を比較して示す。TN 系液晶や強誘電性液晶は、DSM 系液晶に比較して、駆動に交流印加が不要で、消光比が大きく取れるという利点を有している。特に、強誘電性液晶は 1kbps を越える高速応答が可能である。一方で、これら前三者の液晶は動作に偏光板を必要とし、偏光したレーザー光を光源として利用する場合には、端末の方向や角度により消光比が変動するため、移動する端末に対しては安定な品質の通信回線を維持しにくいという課題がある。ポリマ分散液晶とポリマネットワーク液晶は電界の印加により入射した光の散乱量を制御する素子であり、偏光光による信号不安定性の問題を回避できるが、消光比が大きく取れず、また応答速度が遅いという課題がある。また、これら液晶変調素子はディスプレイなど、可視光の変調を主な適用分野としているため、可視域での各種特性向上のために改良が加えられてきたが、近赤外・中赤外域での各

種電気光学特性については明らかではなく，また最適化が進んでいなかった．そこで，次節では各種の液晶変調素子について，その電気光学特性を測定し，その評価を行う．

表 3.2: 各種液晶光変調素子とその特長

液晶の種類	TN (Twisted Nematic)	STN (Super Twisted Nematic)	強誘電性	ポリマ分散	ポリマネットワーク
原理	偏光制御	偏光制御	偏光制御	散乱制御	散乱制御
偏光依存性	有	有	有	無	無
変調帯域幅	< 数 100Hz	< 数 100Hz	> 数 kHz	<100Hz	<100Hz
消光比	数 10	数 10	>1000	約 10	約 10
動作電圧	数 V	数 V	< 数 10V	数 10V	数 V

### 3.3.2 ポリマ分散液晶光変調素子

ポリマ分散型液晶の代表例として UMU<sup>®</sup> film[79] について述べる．UMU は NCAP(Nematic Curvilinear Aligned Phase) フィルムの日本板硝子の登録商標である．UMU Film は電圧を印加することにより不透視（散乱）状態から透視状態に変化する特殊なフィルムで，2枚のフィルムの上に液晶を充填した多孔質のポリマがコーティングされている．電界により液晶分子の配列が変化することで透視，不透視が切り変わる．図 3.2 に電圧印加時 (a) と非印加時 (b) のポリマ分散液晶の状態を示す．液晶の電極間に電圧を印加すると透明に，電圧が印加されない場合には光を散乱して不透明になる．液晶をポリカーボネート板で挟んだ素子は軽くて可とう性があり割れにくい性質があるので，曲面の表面を持った端末や，カード型の薄い端末に実装するには適している液晶光変調素子と言える．ただし，本研究で行う，赤外波長域での光変調特性が明らかではなかったので，その特性を評価した．



(a)電圧非印加時



(b)電圧印加時

図 3.2: ポリマ分散液晶フィルムの透明・不透明の変化 [80]

### 動作原理

素子の構造と動作原理を図 3.3 に示す．電圧が印加されていない状態 (図 3.3(a)) では，カプセルと呼ばれる空孔に充填された液晶分子はカプセルの内壁に沿って並ぶ．この状態で，液晶素子に入射した光は，ポリマーと液晶の屈折率の違いおよび液晶の複屈折性によって，カプセルの表面や内部で屈折する．その結果，光は直進できず散乱し，不透明に見える．電圧が印加されると (図 3.3(b))，液晶分子が電圧を印加した方向と平行に並ぼうとするため，電極に対して垂直に配列する．このように並んだ状態で，屈折率がポリマーのそれと一致する液晶であれば，光はカプセルとポリマーの界面で散乱されず直進する．その結果，この液晶光変調素子は透明に見えることになる．

### 動作速度

定格動作電圧が 24V のポリマ分散液晶である UMU フィルムでは，定格動作時において，不透視状態から透視状態への応答速度は 0.44msec，透視状態から不透視状態への応答速度は 20msec と測定された．不透明から透明への変化は，電圧を高くすることにより速くすることが可能であるが，透明から不透明はほぼ一定であった [61]．応答速度や動作電圧は液晶材料やカプセル径などの NCAP 層を構成する要素の変更により制御が可能である．

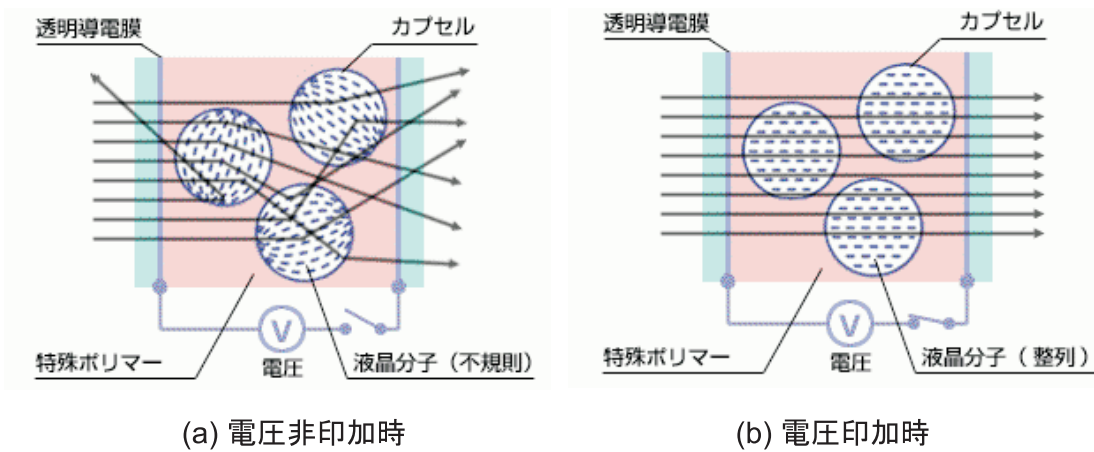


図 3.3: ポリマ分散液晶素子の構造と動作原理

### 動作電圧

携帯情報端末で動作させるためには、動作電圧の低減が重要である。

ポリマ分散液晶である UMU フィルムの定格動作電圧は 100V と 24V であるため、定格電圧が低い 24V のポリマ分散光素子の特性を評価した。特性の測定系を図 3.4 に示す。レーザには、アドバンスデザインレーザ社の発振波長 1060nm、出力 50mW の YAG レーザを用いた。再帰光反射素子として使用するコーナーキューブはガラス製で直径は 50mm である。ガラス表面には反射率を高めるためのコーティングはしていない。液晶の駆動には、WaveTek 社の 20MHz Sweep/Modulation/Generator Model193 を用いた。また、反射光強度の計測にはアドバンテスト社の光パワーメータ (TQ8215+TQ82015) を用いた。

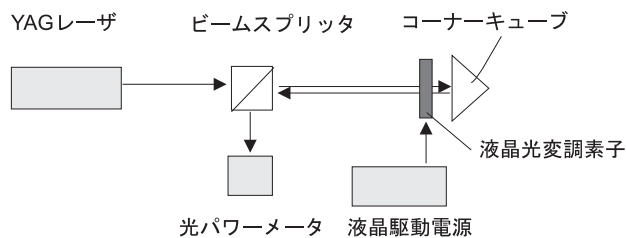


図 3.4: 液晶シャッターとコーナーキューブを用いた反射光強度測定系

まず液晶光変調素子に印加する電圧を 24V に固定し，印加する周波数を変えて透過光出力特性を調べた．レーザから 930mm 離れた位置に HV ターゲットを置き，レーザが液晶シャッタを通してコーナーキューブの中心に当たるようにセットする．印加する周波数を 5Hz から順次上げていき，そのときの反射光出力を測定する．その反射光出力特性を図 3.5 に示す．

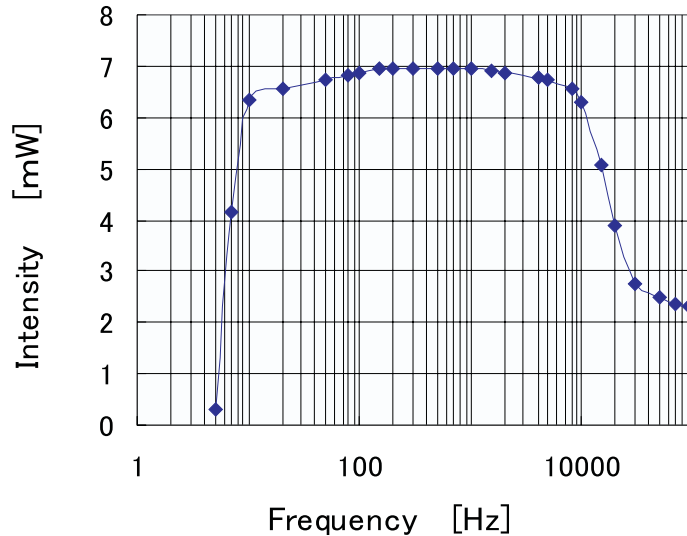


図 3.5: ポリマ分散液晶素子のキャリア周波数に対する反射光出力特性

反射光出力は 480Hz で最大となり，10kHz 以降は反射光出力値が急激に落ちていることがわかる．急激に反射光出力が低下しているのは，高周波領域では液晶分子が印加した交流の変動に追従できなくなったためと考えられる．この周波数は振幅変調のキャリア周波数に相当するので，性能を損なわない範囲で高いほうが望ましい．そこで透明度が最大となる印加周波数 480Hz に固定した場合の，光反射光強度の印加電圧依存性を図 3.6 に示す．反射光出力は印加電圧の増大と共に増大している．これは電圧が増大するにつれ，液晶分子が一方向に揃い，光散乱量が減少したことを反映しているため，一定値に向かうと考えられる．しかしながら，消光比が 5 を実現する動作電圧が 30V 以上と高いため，この素子による HV ターゲットの実装するには，動作電圧の低減が重要であることがわかった．液晶



素子の状態変化は液晶に印加される電界強度の大きさに依存するため、動作電圧を低減するには液晶層の厚さを低減させればよい。しかし単に液晶層の厚さを薄くしただけでは電圧非印加時の光散乱量が低下するために消光比が低下してしまう。そこで、動作電圧を低減しつつ消光比を悪化させないために、液晶カプセルの寸法と複屈折率を調整したポリマ分散液晶素子を開発した [81]。特性の詳細については 3.4.2 で示す。DSM 系の液晶光変調素子では、ポリマネットワーク液晶がより動作電圧を低減できる可能性がある。そこで次節ではポリマネットワーク液晶光変調素子の特性評価を行った。

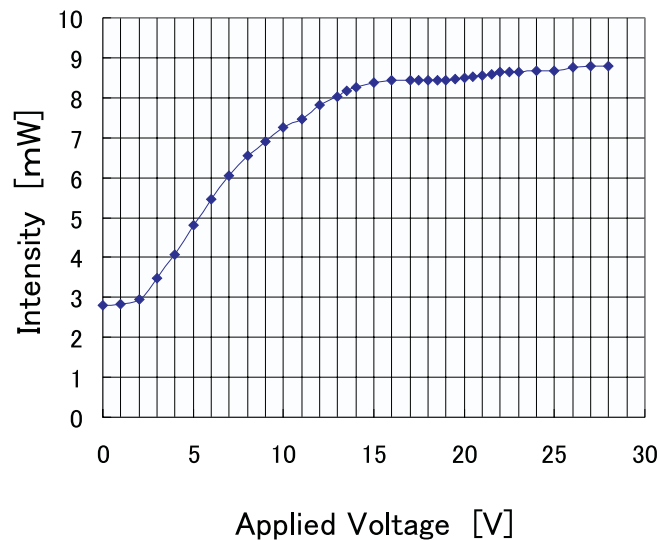


図 3.6: ポリマ分散液晶素子の印加電圧に対する反射光出力特性

### 3.3.3 ポリマネットワーク液晶光変調素子

ポリマネットワーク液晶を用いた光変調素子は、ポリマ分散液晶の素子と同様、光の透過状態と散乱状態を切り替えることにより光変調を行う光変調素子である。図 3.8 にポリマネットワーク液晶素子の動作原理を示す。ポリマネットワーク液晶は、電圧が印加されない状態では液晶分子が網の目状に結合しているため、入射光が散乱されて不透明状態となり、電圧が印加されると液晶分子の方向が揃うため

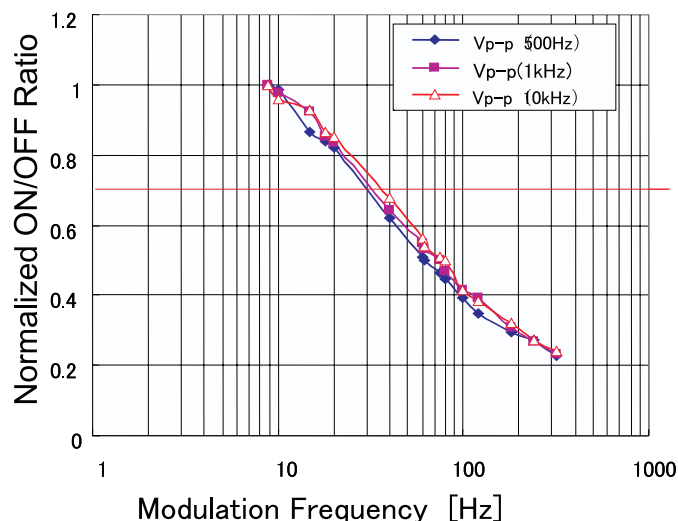


図 3.7: ポリマ分散液晶素子の周波数応答特性

に透明状態となる．前節のポリマ分散液晶素子と同様な傾向の特性を示すが，液晶層の厚さを通常の液晶素子と同じく液晶内に分散させるスペーサの厚みで決定することができる．このため，素子に可とう性はないものの，動作電圧の低減が可能，という特長を有している．ただし，この素子も本研究で扱う，赤外波長域での素子特性が明らかではなかったため，その特性を測定し評価を行った．

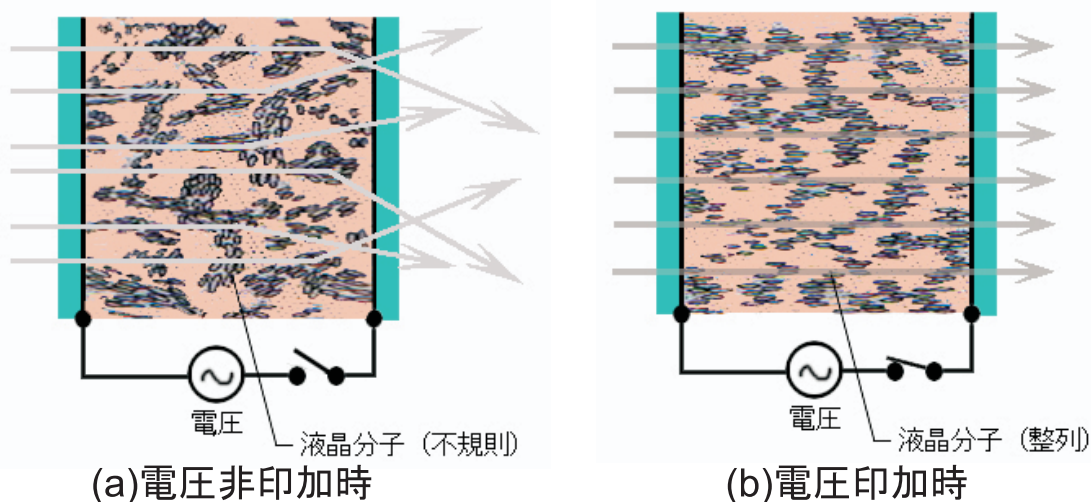


図 3.8: ポリマネットワーク液晶光変調素子の構造と動作原理

図 3.9 に液晶層の厚さをパラメータとした印加電圧に対する透過光強度の変化

を示す．ポリマネットワーク液晶が定格 24V で 20V 程度で透明化するのに対し，この素子は 3-6V で透明化していることがわかる．この素子は動作電圧が低くプロセッサやデジタル I/O バスで直接制御できる特長を有している．図 3.10 は液晶層の厚さをパラメータとした周波数応答特性を示す．

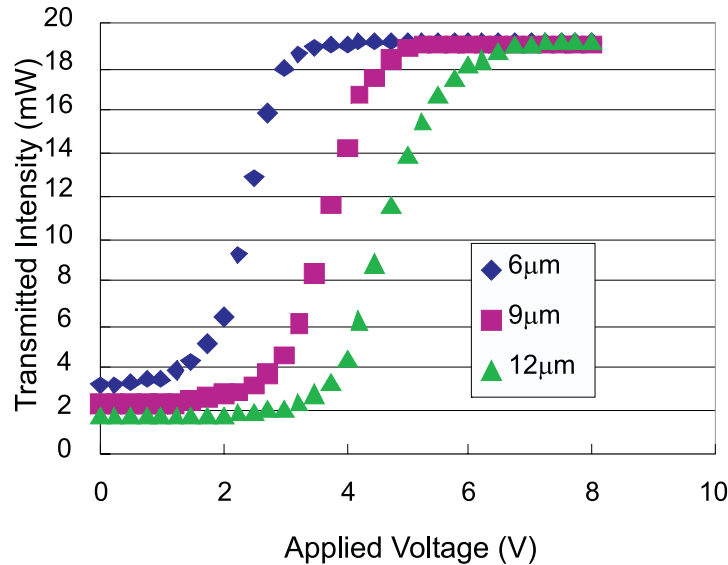


図 3.9: ポリマネットワーク液晶素子の印加電圧に対する光透過特性

素子の変調帯域は液晶層厚が大きいほどわずかに周波数帯域が広いとはいえ、-3dB 周波数帯域はいずれも約 20Hz であった．この値はポリマ分散液晶の応答速度 30Hz より遅いものの、CCD カメラのフレームレートに近く、フレーム毎の画像処理で ID や送信データを認識するには十分な性能である．また、ポリマネットワーク液晶はポリマ分散液晶に比較して動作電圧が 5 分の 1 と低く、消光比も 9 と高いことから、反射率変調通信機能を持った Aimulet 端末の実装にはポリマネットワーク液晶素子の方が適していることがわかった．

### 3.3.4 強誘電性液晶光変調素子

強誘電性液晶は変調速度が数 kbps という、液晶の中では高速応答が期待できる光学変調素子である．図 3.11 に周波数応答特性を示す．-3dB 帯域幅は 4.2kHz と、ポリマ分散液晶やポリマネットワーク液晶に比較して 200 倍以上の帯域幅を

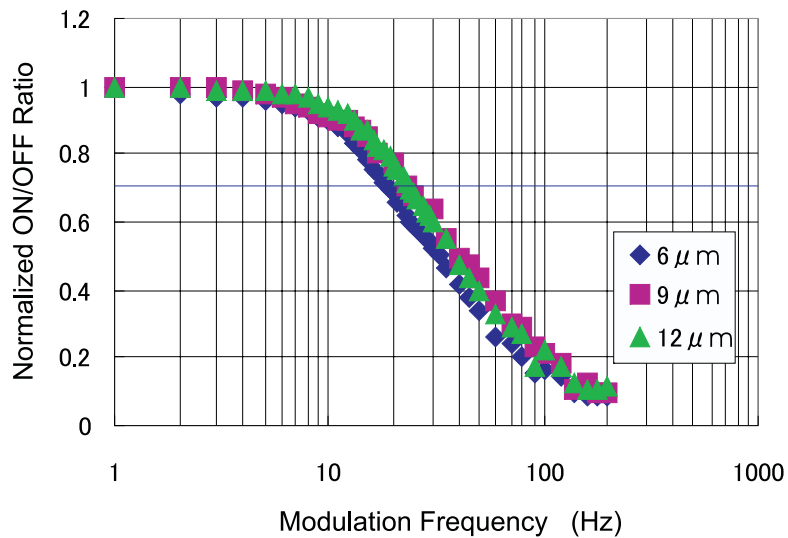


図 3.10: ポリマネットワーク液晶素子の周波数応答特性

有していることがわかる．この帯域幅があれば音声信号を圧縮しないでデータ転送が可能になる．これは低消費電力で端末から情報環境の基地局へ音声情報のアップロードができる事を意味しており，*Aimulet* で想定している，低消費電力での音声入出力に可能性を開くものとして期待できる [64]．ただし，強誘電性液晶は光強度の変調に偏光板を必要とするため，*Aimulet* に照射される光がレーザー光のように偏光している場合には，端末の方向や角度により消光比など変調特性が大きく変化してしまうことを意味する．移動する利用者が端末を保持しつつ位置に基づく情報サービスを受ける場合，空間光通信の回線品質の不安定性が増大することになるため，その対策が必要である．

## 3.4 HV ターゲットの実装

### 3.4.1 レベル0 HV ターゲット

表 3.2 において最も単純な HV ターゲットの実装は，光反射率が時間的に変動しない単数または複数の再帰光反射素子で構成されるものである．これをレベル0 HV ターゲットと呼ぶ．再帰光反射素子には何が適しているかを調べるために3種の再帰光反射素子について評価を行った．実験装置の構成を図 3.12 に示す．

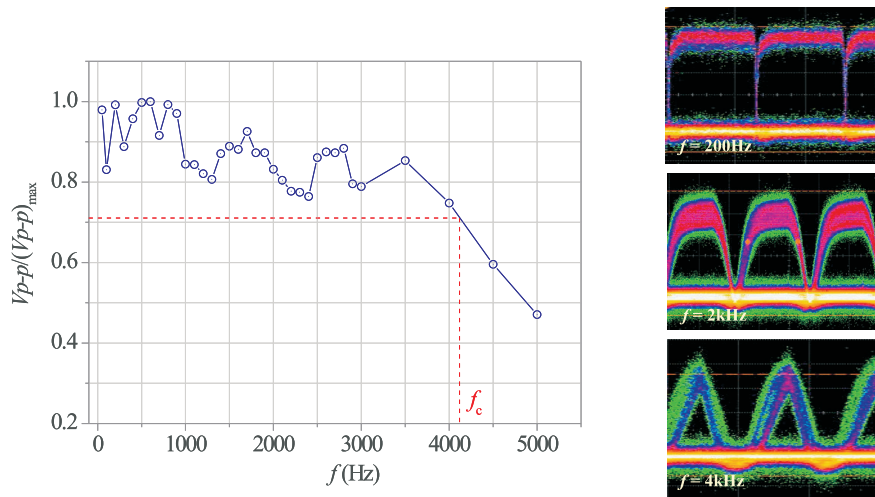


図 3.11: 強誘電性液晶の周波数応答特性と代表的な各周波数でのアイダイアグラム

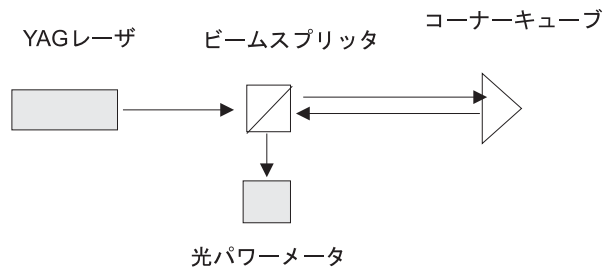


図 3.12: レベル0 HV ターゲットの測定系

照射するレーザーはアモコレーザー社の半導体レーザー励起の Nd:YAG レーザ (ALC1320-25P 発振波長 1.32  $\mu\text{m}$ , 出力 13.9mW) を用いた。コーナーキューブおよびフォトディテクタは図 3.4 と同じものを使用した。

端末の正確な追尾動作を行うためには、光反射体の絶対位置を高速かつ精密に計測するか、追尾している方向に対する光反射体の位置の誤差信号が得られれば良い。前者の信号を得るには、照射する光ビームと光反射体の直径が小さい必要がある。また、後者の信号を得る場合には、光反射体の反射強度が高くかつ単峰性の反射特性を示すことが望ましい。

そこで、レーザービームの位置ずれに対する反射光強度の変化を計測した。実験は直径 50mm のコーナーキューブをレーザーから 1470 mm 離れた XY 自動制御移動ステージ上に取りつけて二次元に移動し、平面全体の反射光出力変動を測定した。結果を図 3.13 に示す。コーナーキューブの中心で反射光出力値が最大になり、縁に近づくに従い同心円状になだらかに反射光出力値が低くなっていることがわかる。これと比較するため、同じ条件で再帰光反射シートの反射光出力特性を調べた。図 3.14 は反射シートの反射光出力特性を 3 次元で示したグラフである。反射シートは住友スリーエム社製スコッチライト<sup>TM</sup> ハイグロス反射トリム モデル 6160 を用いた。反射シートは微細なコーナーキューブの集合体がシート状になっているため、シート構造を支持するためのリブの部分は反射強度が落ちるが、ほぼ均一な再帰反射特性を示す。反射シートの反射光出力はコーナーキューブの 1/100 ほどであった。

再帰光反射体の精密追尾を行うには、光反射体への光照射位置の中心からの誤差信号を得る必要がある。誤差信号を得るには、信号強度の変化が単峰性でかつ反射率が高いことが望ましい。その点でコーナーキューブの光反射性能は格段に優れている。しかしながら素子の体積、重量、コストが共に大きく携帯端末に搭載するには適していない。一方、再帰光反射シートはシート内で平坦な反射特性を有するため、レーザービーム光がシートよりも小さい場合には、位置ずれの誤差信号をシートから外れるまで得ることができない。ただし、レーザービームの強度分布は一般にガウス型形状の単峰性であるので、ビームの直径がシートの直径よりも大きければ同様な単峰性の誤差信号を得ることができる。そこで、携帯情報端末には反射信号強度が十分に取れるのであれば再帰光反射シートを採用しても問

題はないことがわかった .

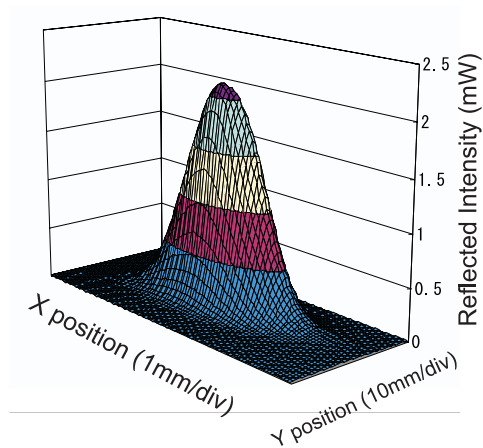


図 3.13: コーナーキューブの入射位置に対する反射出力特性

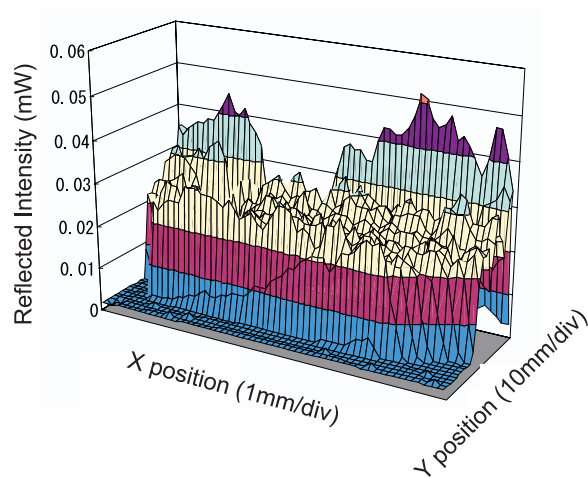


図 3.14: 再帰光反射シートの入射位置に対する反射光出力特性

### 3.4.2 レベル1 HV ターゲット

3.3.2 で定格電圧 24V の UMU フィルムを用いても、携帯情報端末の光変調素子に利用するには動作電圧が高いために適していないことを示した。そこで、低電圧

動作型のUMUフィルムを試作して光反射率変調空間光変調器（レベル1 HV ターゲット）を構成し、その特性を評価した。

図 3.15 に低電圧動作ポリマ分散液晶光変調素子の透過光強度の電圧依存性を示す。測定系は図 3.4 と同じである。照射光は発振波長 1060nm の半導体レーザー励起の YAG レーザを用い、50Hz の交流正弦波を印加した。新開発したポリマ分散液晶光変調素子と従来の定格動作電圧 24V の製品に比較すると、電圧不印加時の透過光強度はほぼ等しい値を示しかつたものの、透明化する電圧はそれぞれ 16V から 12V へ改善され、消光比も 2.7 から 2.8 へ改善された。

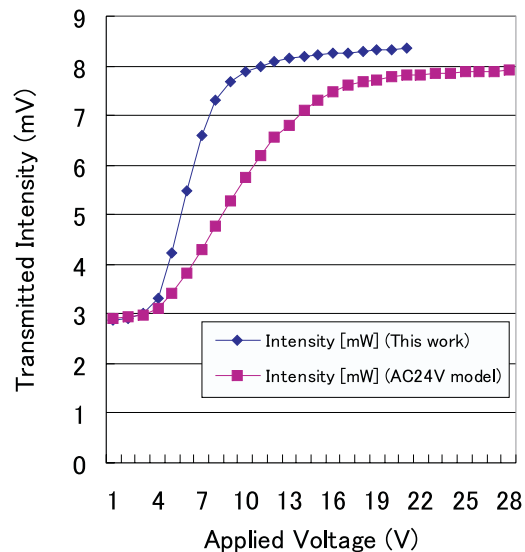


図 3.15: 低電圧動作ポリマ分散液晶素子の電圧応答特性

図 3.16 に低電圧動作ポリマ分散液晶光変調素子の透過光強度の変調周波数依存性を示す。液晶に印加した信号はキャリア周波数 1kHz を信号周波数で変調をかけて透過光強度を測定した。-3dB 周波数帯域幅は従来素子とほぼ同じ約 30Hz のままで変わらないことがわかった。以上の結果から、試作したポリマ分散液晶では動作帯域幅を劣化させずに動作電圧を半減させることができたものの、動作電圧はまだ高いため、デジタル集積回路の出力を直結することはできないことがわかった。



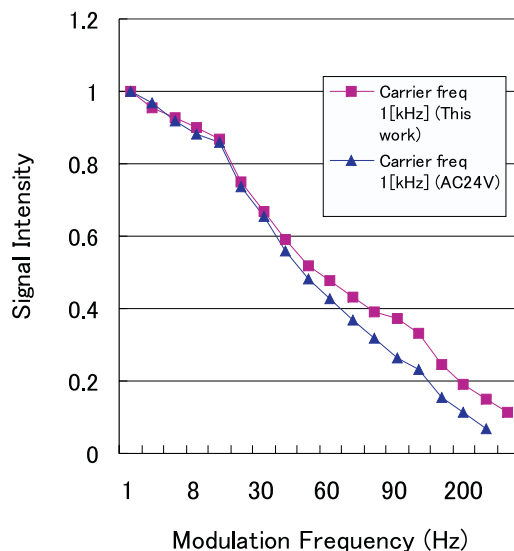


図 3.16: 低電圧動作ポリマ分散液晶素子の時間応答特性

### 3.4.3 レベル2 HV ターゲット

レベル0 HV ターゲットの実験結果を受け、再帰光反射シートに液晶光変調器を組み合わせた光反射率変調モジュールを実装し、その特性を評価した。実装は、市販の小型 PDA DataSlim2 の改造品による単一方向の反射率変調送信の確認と、試作端末による反射率変調送信と従来の空間光通信による受信の双方向通信により評価を行った。

**DataSlim2 への実装** DataSlim2 はシチズン時計社製の PCMCIA カードサイズの PDA である [82]。ボタン電池 2 個で動作し、開発キットによりアドインソフトとして制御プログラムの開発が可能である。DataSlim2 は TN 液晶の反射型モノクロディスプレイを有しており、LCD 裏面の光散乱板を再帰光反射シートへ交換することで、レベル2の HV ターゲットを構成できる。これにより端末から基地局への反射率変調データ送信が実現できる。この再帰光反射シートを装備した DataSlim2 をここでは「DataSlim2 改」と称する。アドインソフトにより文字コードに従った画面の明滅表示をするプログラムを開発し、DataSlim2 改のデータ送信特性を評価

した。

端末の概要 DataSlim2 の緒元を表 3.3 に示す。

表 3.3: DataSlim2 の緒元

表示	モノクロ 2 階調 LCD (240x120 dots)
入力	タッチパネルと 5 k e y
電源	C R 2 0 1 6 x 2 個
電池寿命	使用頻度により 2 週間 ~ 2 ヶ月
C P U	Z - 8 0 4MHz
メモリ	ユーザーエリア 1 M byte
アドインソフト	8 個まで

データ通信特性 「DataSlim2 改」の再帰光画面の反射光強度の角度依存性を測定した。測定光学系の構成図を図 3.17 に示す。DataSlim2 は回転ステージの上に配置し、発振波長 1060nm の半導体レーザー励起の YAG レーザで照射し、再帰光反射光を光パワーメータ (TQ8215+TQ82015) で検出した。図 3.18 に画面が黒の状態と白の状態における光反射率の角度依存性を示す。比較のためにコーナーキューブの反射特性を併記してある。DataSlim2 の光反射量は正面でコーナーキューブの約 40% を実現するものの、正面での消光比は画面表面での反射があるために 1.05 程度と低い。画面の法線方向から 10 ° から 40 ° 程度では比較的高い消光比が得られたが、最大でも 4 程度であった。消光比の値が低く、また反射光強度が大きな角度依存性を持っているため、データを正確に取得するための閾値設定は問題になる。このように消光比が低いのは、液晶パネルが 1060nm のレーザー光の変調に対応していないこと、偏光液晶パネルと再帰光反射シートの間隔が最適化されていないことなどが考えられる。この閾値設定を機械学習により最適化する研究を行った [83][84]。

図 3.19 に DataSlim2 改の変調周波数応答特性を示す。測定系は、図 3.17 において、レーザーと DataSlim2 改の角度を 10 度に固定してプログラムによりデータ送出速度を変更して測定した。図 3.19 の測定結果から、-3dB 周波数帯域は 1.7Hz と測

定された。この通信帯域幅を制限しているのは、液晶素子そのものの動作速度ではなく、DataSlim2改のクロックと画面表示の速度に起因するものと考えられる。また、この端末を利用して、端末の押しボタン入力信号に基づいて異なるコンテンツが再生されるという位置に基づく情報サービスのデモンストレーションが行われた [85] が、ロバストな空間光通信を行うことは容易ではなかった。

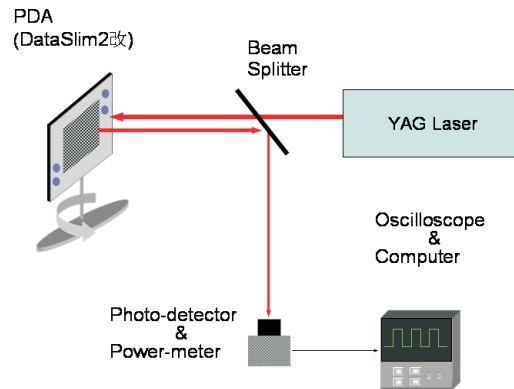


図 3.17: DataSlim2 改の画面角度依存性の測定光学系

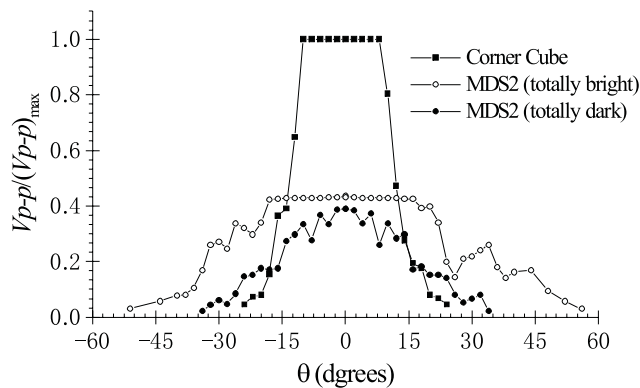


図 3.18: DataSlim2 改の再帰反射光強度の角度依存性

### ポリマネットワーク液晶を用いた送受信端末

前節で述べた市販の PDA を改造した反射率変調通信端末 DataSlim2 改では、端末から ID やデータを光反射率変調信号として送信できるものの、通信帯域は 1.7Hz

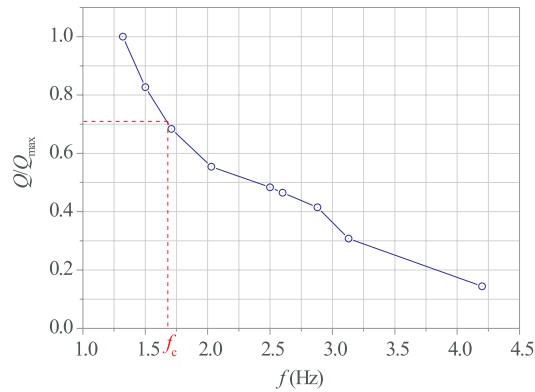


図 3.19: DataSlim2 改の周波数応答特性

程度と遅く，デジタルデータの受信も端末自体ではできなかった．このため，情報の送信を DataSlim2 改で行い，受信は音声情報を従来の CoBIT 等で受信という実装を行うにしても応用は限られる．そこで基地局との間でデジタルデータの送受信機能を有する Aimulet を試作した．

端末の概要 3.3 での検討から，本端末の HV ターゲットのための透過率変調素子としてはポリマネットワーク液晶を，3.4.1 での検討から，HV ターゲットの反射材としては，再帰光反射シートを採用した．端末のためのレベル 2 HV ターゲットの再帰光反射強度の角度依存性を図 3.20 に示す．照射光の波長は 1060nm である．消光比は測定を行った  $\pm 60^\circ$  の範囲で 7 から 10 の値を示し，固定した閾値でも  $\pm 55^\circ$  以上の広い角度範囲に渡ってデータの二値化の判別が可能であることがわかった．

この HV ターゲットを搭載した端末の外観写真を図 3.21 に示す．手前においてあるのは大きさの比較のための DataSlim2 改である．端末はポリマネットワーク液晶と再帰光反射シートで構成される HV ターゲット，3 つの入力用押しボタン，液晶表示画面，そしてレーザ光入射表示用の LED を装備している．図 3.21 において，右側の端末の手前側面に見えるのが光反射率変調用の液晶光変調素子である．変調部の寸法は 10mm  $\times$  10mm である．基地局から近赤外 LED アレイから照射された光をポリマネットワーク液晶の透明/不透明変調による再帰光反射率変調によりアップリンクを行う．図 3.10 から，-3dB 周波数帯域幅が 20Hz であったことが

ら，反射率変調の速度は 20bps に固定した．基地局から端末へのダウンリンクは，基地局の 1480nm の半導体レーザ光を液晶素子の窓の中央に配置した InGaAsP 受光素子により行う．端末は自己の ID と押しボタン情報を 8 ビットのコードで基地局に送信し，基地局は回線状況およびデータをアップリンクにより伝送する．演算処理用のプロセッサとして H8 を搭載している．この端末を用いて，室内レーザレーダ測位通信装置 i-lidar との間で，距離 1.5m において 2 台の端末の ID 認識とデータ交換に成功した．Aimulet 端末は i-lidar に対して正対し，静止した状態で行った．移動時の通信の諸特性については第 5 章で述べる．

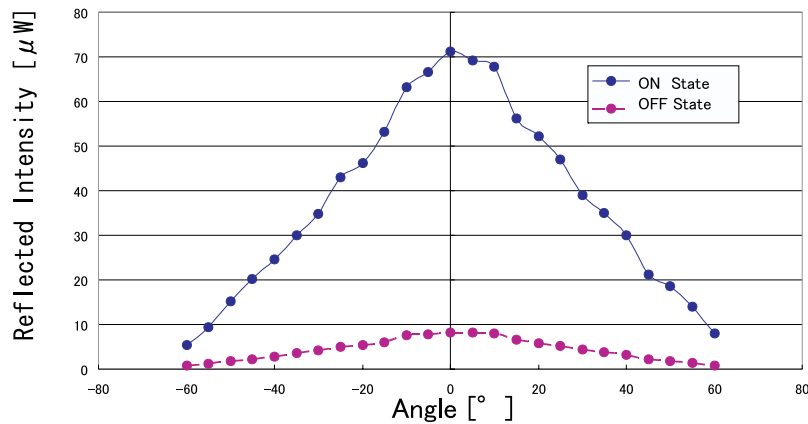


図 3.20: 光反射率変調通信端末の再帰光反射量の入射角度依存性

### 3.5 結言

本章では，低消費電力データ送信のために，各種液晶光変調素子の特性を検証した．低電圧・低消費電力動作および偏光無依存という観点からは，ポリマネットワーク液晶が最も適切であることが判明し，再帰光反射素子としては，コーナーキューブが高性能ではあるものの，実装の容易性から再帰光反射シートを採用することとした．これらを採用した空間光通信モジュール（レベル 2 HV ターゲット）を装備した Aimulet を試作し，その特性通信を評価した．液晶素子と再帰光反射シートを装備した通信端末を試作し，再帰光反射通信を用いた双方向通信に成功した．



図 3.21: 光反射率変調通信端末の外観

## 第4章

# 空間光通信端末の情報多重化技術

### 4.1 緒言

2.4.5 で述べたように，無電源光通信情報端末 Aimulet Ver.1 は，利用者が赤外線情報光が照射されている領域に進入した利用者が，光源の方向を向いた時に音声情報の提供を受けるシステムである．利用者が受信する情報はその利用者の属性にあわせて，すなわち例えば英語や日本語など利用者の使用言語，所属，嗜好，あるいは知識レベルなどに応じて適切なコンテンツを選択して受信できるようになっていることが望ましい．そのためにはコンテンツの多重化しかしながら Aimulet Ver.1 では，同一の場所で同一の方向を指向している利用者に複数の異なる情報光を照射しても信号が混信してしまう，という課題があった．そこで，本章では，同一場所で同一方向を向いた利用者に対してもその属性に Aimulet Ver.1 で複数のコンテンツを分離して受信を可能にするための，送信側でのデータの多重化と端末での多重分離（逆多重化とも言う）の手法について述べる [86]．

同じ領域にいる利用者に個別のコンテンツを提供することは，無線 LAN など何らかのワイヤレス送受信モジュールを装備した無線通信端末で実現することが一般的である．しかし送受信通信モジュールの消費電力が大きい，利用者のおよその位置はわかるものの方向検知のためには検知のためのセンサと信号処理が必要である，という課題がある．特に，Aimulet Ver.1 のような無電源駆動端末においては，これら送受信モジュールを常時駆動するための電力の生成は現実的に非常に困難である．そこで本章では，電子回路なしに信号の多重化と多重分離を行うた

めに、誘電体多層膜フィルタを装備した太陽電池と、異なる波長で発光する LED の組み合わせにより情報の多重化通信の実装を行なう。

4.2では、複数のコンテンツを同一の領域と方向から放射して互いに分離するための手法について検討する。空間光通信の場合、電波通信の場合に比較すると数多くの信号多重化手法がある。無電池無増幅動作での数種類のコンテンツの多重化を考える場合、波長多重方式がもっとも適していることを述べる。

4.3では、波長によるコンテンツの多重化手法について、LEDの発光波長の選択による3波長の多重化と光フィルタによる多重分離を行う Aimulet Ver.1での実装手法について検討する。

4.4では、光学フィルタの試作とその特性評価を行い、4.5でまとめる。

## 4.2 コンテンツ多重化手法の検討

携帯情報端末において複数のコンテンツを同時に提供するためには、基地局においてコンテンツを多重化して送出し、端末で信号をコンテンツ毎に分離する必要がある。光信号を多重化して伝送する手法を表4.1に分類する。

表 4.1: 光信号の多重化手法

多重化・分離方式	無電源動作	多重化数	課題
空間・方向多重	可	1	同一空間・方向は混信
偏波面多重	可	2	要偏光フィルタ
波長多重	可	複数	要波長フィルタ
時間多重	困難	複数	要電子回路
位相多重	困難	複数	要電子回路
コード多重	困難	複数	要電子回路

Aimulet は利用者にプライバシーやセキュリティに配慮した位置に基づく情報サービスを提供するにあたり、提供するサービスの質は極力維持しつつ、端末での演算処理量を犠牲にしても端末本体や端末のメンテナンスのコストを下げることに重点を置く光通信端末である。多重化されたコンテンツを分離して受信する際に



もその原則は守らねばならない．また，例えば博物館や展示会での応用を考えると，1つの展示対象に対するコンテンツの数は，複数の言語や知識レベルに対応させることを考えると，最低2種類，実際は多ければ多いほど良い．また，従来の Aimulet Ver.1 との整合をとる必要がある．そのため，本論文では以下の条件を満たすべきであると考える．

- (1) 端末が無電源あるいは超低消費電力で動作可能であること
- (2) 近赤外 LED からの変調放射光で音声情報を提供すること
- (3) 端末の受光素子としてシリコン太陽電池を利用すること
- (4) 同時に放送するコンテンツ数は2種類以上であること
- (5) 安価に実装ができること

電子回路での処理による情報の多重化と分離は，コンテンツの多重度を数十以上に容易にあげることができる特徴を有している．ただし，電子回路を駆動するためには電力が必要で，この電力を大面積の太陽電池による発電により実現することはできるが，屋内において端末として現実的な寸法の太陽電池で実現することは事実上困難であるため，本方式は採用できない．また，偏光フィルタを利用する方式では，フィルタの装着角度を90度回転させることで2種のコンテンツの切り替えが可能になる，しかし，利用者が移動する場合には端末の方向や傾きによりコンテンツ間の漏話が発生する．また，光源にも赤外域の偏光フィルタを装備しなければならないために発光光量が半減し光源のコストがかさむ，という課題がある．そこで，本研究では電子回路なしの無電源動作で，複数のコンテンツを多重化できる特長から波長多重方式を採用した．波長多重による多重数は，半導体レーザの発振光を用いれば光源にフィルタも不要で10以上の多重が可能であるが，シリコン太陽電池を受光素子として使う場合，半導体レーザは近赤外光なので許容される出力は約1mW以下になってしまい，現実的ではなくなってしまう．

### 4.3 波長によるコンテンツの多重化

誘電体多層膜フィルタを用いた波長分離技術は光ファイバ通信では一般的に用いられる技術であり，1470nm から 1610nm を 128 波長に分離する DWDM(Dense Wavelength Division Multiplex)用の 100GHz 間隔のバンドパスフィルタ (BPF) や，

8 波長をに分離する CWDM(Coarse Wavelength Division Multiplex) 用の 20nm 間隔の BPF などが開発されている [87] . 本論文で取り扱う空間光波長多重通信では , 近赤外光波長域を使用するが , 同様の鋭いスペクトル幅を有する光源やフィルタを用いれば同じ特性を実現することができるが , システムコストの上昇 , 光の利用効率の低下 , 人体への安全性の確保の問題が生じる . そこで , 本論文では以下の方式による実装を行う .

### 4.3.1 コンテンツ送信光源

通常の波長多重化光源には所望の発振波長の半導体レーザを用いる . しかしながら空間光通信において , 近赤外の半導体レーザを用いることは人体 ( 特に網膜 ) への危険性を考えると利用が困難であり , Aimulet Ver. の光源として利用する近赤外 LED を利用することとする . 受光素子はそのコストから単結晶または多結晶のシリコン太陽電池であるので , シリコン太陽電池の受光波長範囲に中心発光波長を持つ大出力 LED を用いる . 近赤外 LED の発光波長の半値幅は 40nm から 50nm と広く , また , 大出力の近赤外 LED の発光波長は限られている . 本論文では , 中心波長 780nm 880nm 940nm の 3 種類の LED を利用して , 3 コンテンツの多重化を想定することとした .

### 4.3.2 光波長分離

Aimulet Ver.1 では単結晶 ( または多結晶 ) のシリコン太陽電池を変調光の受光素子として利用する . シリコン太陽電池は可視光波長帯域から約 1  $\mu$  m までにほぼ平坦な受光感度を持っているので , これに光学フィルタを付加して波長選択性を持たせる . 波長分離を光学的なフィルタで行う場合には , 誘電体多層膜フィルタや色素フィルタなどの利用が考えられる . 同時に 2 種類のコンテンツを分離する場合には短波長透過特性と長波長透過特性を有するフィルタで分離利用すればよいが , 3 種類以上の多重化ではバンドパス特性を持つフィルタが必要である . そこで , 本論文では , 短波長透過 , バンドパス , 長波長透過の 3 種類のフィルタを誘電体多層膜により実現することとした . LED 光源の発光の利用効率を高めるた

め、フィルタはLEDの発光波長分布に合致し、かつ、隣接チャンネルとの十分な選択性を確保することに留意した。

### 4.3.3 可視光の遮蔽

誘電体多層膜により近赤外域におけるバンドパス特性を実現する場合、多層膜構造による光透過特性の周期性のため、可視光領域で再び光が透過するようになる。シリコン太陽電池は可視光から1  $\mu\text{m}$ 程度の波長まで感度があるので、可視光による雑音を防止するためにもフィルタには可視光の遮蔽特性を持たせる必要がある。そこで、可視光の遮断特性を有する多層膜フィルタを蒸着することとした。

### 4.3.4 フィルタ基板

フィルタの基板は通常厚さ1mm-3mmのガラス板を利用することが多いが、*Aimulet*の太陽電池の面積が大面積（例えば40mm  $\times$  20mm程度）であること、端末の軽量化のため、フィルタも軽量であること、フィルタ基板が万一割れてもその破片で利用者が負傷しないこと、等を考慮する必要がある。そこで本論文では、基板に厚さ30  $\mu\text{m}$ と薄く、また、耐熱性の高いポリイミドフィルムを使用してフィルタの製膜を行うこととした。

誘電体多層膜として $\text{SiO}_2$ と $\text{Ta}_2\text{O}_5$ の材料を用いると、膜に圧縮応力がかかるため、膜面側が凸状に歪む。蒸着後のフィルタは基板が薄いためにこの応力によりカールしてしまうため、素子の実装に困難が生じる。そこで可視光カットの多層膜はバンドパスフィルタを蒸着する面の裏側に蒸着することで応力を互いに打ち消してこの歪を緩和し、実装をより容易にすることとした。

## 4.4 試作結果

前節で述べた設計指針に基づき、780nm帯用短波長透過フィルタ、880nm帯用バンドパスフィルタ、940nm帯用長波長透過フィルタの3種を試作し、その特性を計測した。

#### 4.4.1 短波長透過フィルタ

試作した 780nm 帯短波長透過フィルタの透過光吸収特性を図 4.1 に示す．フィルタは基板であるポリイミドフィルムの減衰を加えて表示してある．図には中心発光波長 780, 880, 940nm の LED の発光スペクトル分布の実測値をあわせて示してある．図内の 90mm は，蒸着器中心側からの資料の距離を示している．試作したフィルタは最悪の特性の場合でも隣接チャンネルである 880nm の LED に対して,830nm 以上の波長において 9.5dB 以上の損失を与えていることがわかる．これにより隣接チャンネルの信号は聞こえるものの，気にならない程度の音量比に抑えることができた．

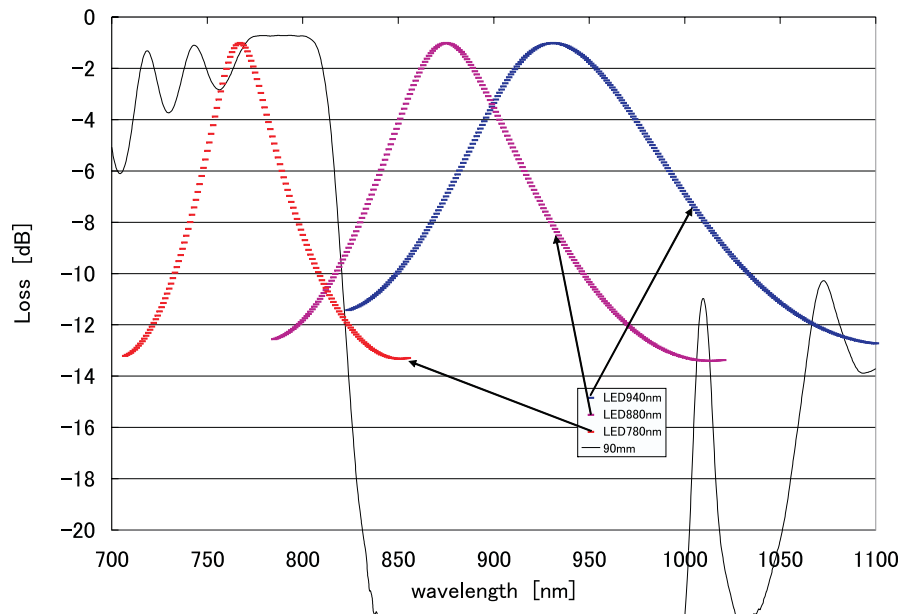


図 4.1: 780nm 帯 LED 用短波長透過フィルタの特性

#### 4.4.2 中間波長帯域通過フィルタ

試作した 880nm 帯バンドパスフィルタの光吸収特性を，図 4.2 に示す．820nm 以下の波長において 11dB 以上の損失が得られており，発光波長 780nm の LED に対しては十分な分離特性が得られていることがわかる．一方，900nm 以上においては 2dB 程度の損失であり信号の混信が発生し，音量の差は感じられるものの明

らかな混信が聴取できた．3 波長並列動作で多重信号の分離を行う場合には，フィルタの透過帯域を 20～40nm 程度短波長側に移動すれば等しい分離比を得ることができるようになるが，940nm の LED の発光スペクトル幅が広いため，光源側のスペクトル分布を制御しない限り混信からは逃れることはできない．

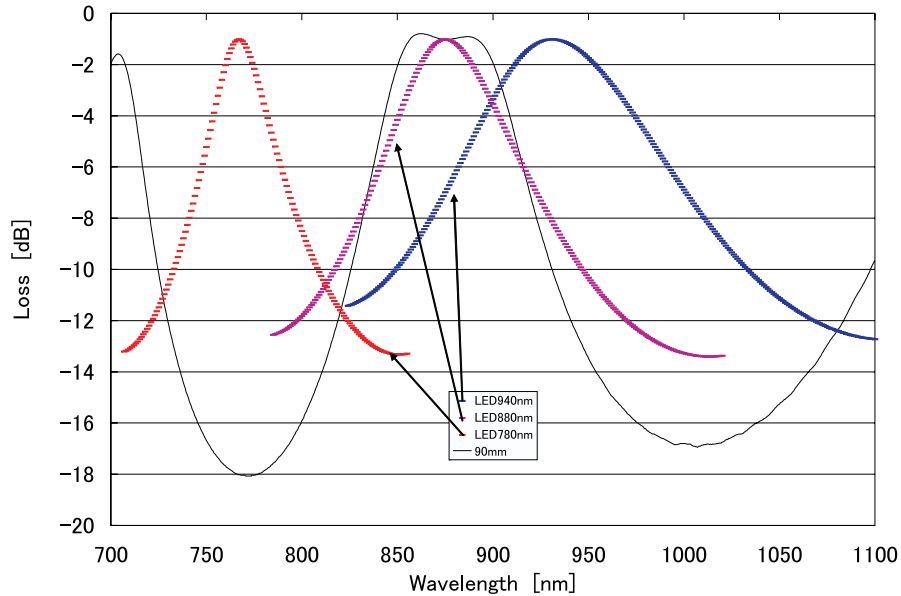


図 4.2: 880nm 帯 LED 用バンドパスフィルタの特性

#### 4.4.3 長波長帯透過フィルタ

試作した 930nm 帯バンドパスフィルタの特性を図 4.3 に示す．890nm 以下の波長において，隣接チャンネルの LED の発光スペクトルに対して 3dB 以上の損失が得られていることがわかる．隣接チャンネルとの信号分離が悪いのは，隣接チャンネルの LED の発光波長が近接していることと，930nm 帯 LED の発光スペクトルの半値幅が広いためである．

#### 4.4.4 可視光カットフィルタの効果

880nm 帯バンドパスフィルタの可視光帯域も含めた光透過特性を図 4.4 に示す．隣接した LED の発光波長帯域では透過率が抑圧されているものの，誘電体多層膜

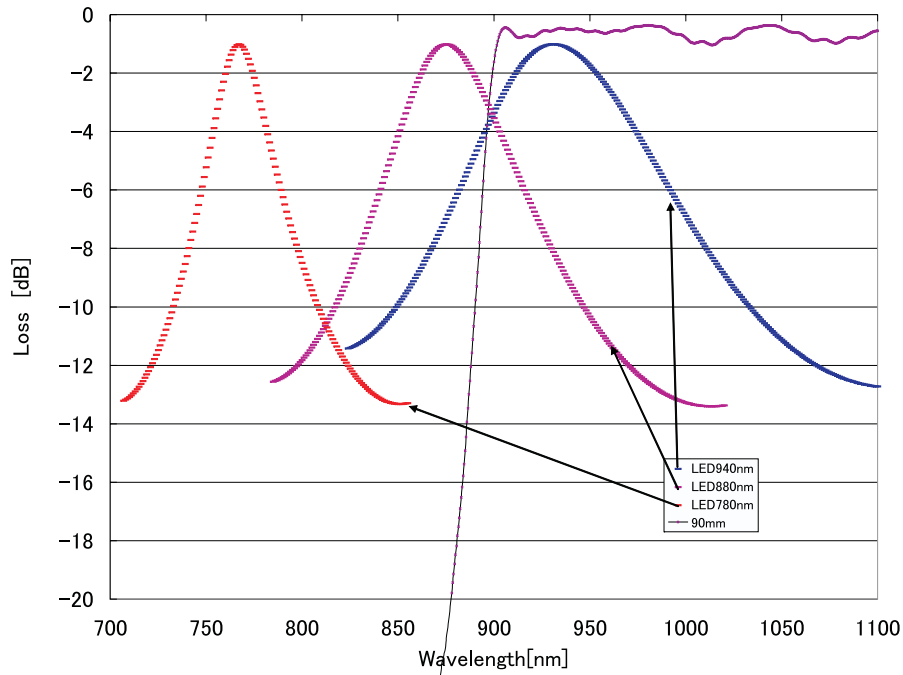


図 4.3: 930nm 帯長波長透過フィルタの特性

フィルタの性質上，可視光領域では再び光が透過するようになることがわかる．そこで，可視光領域の雑音の影響を低減するため，可視光カットフィルタを基板裏面に蒸着した．試作したフィルタの特性を図 4.5 に示す．信号光の透過率はほとんど変化なしに可視光帯域の透過率が抑圧されていることがわかる．また，基板の両面に蒸着することで基板にかかる応力は緩和されたものの，成膜総数などが異なるため，基板の反りは緩和されたものの歪は残存したため，完全な平面にはならなかった．

#### 4.4.5 面内均一性

図 4.6 に試作したフィルタのピーク波長および透過率についての面内均一性を示す．透過ピーク波長は  $871\text{nm} \pm 20\text{nm}$  以内に，透過率は  $-0.76\text{dB}$  から  $-0.8\text{dB}$  ( $84\% \pm 1\%$ ) にそれぞれ収まっていることがわかる．光源である LED の発光波長が広いため，これらの特性のばらつきは実用上大きな問題にはならないと考えられる．

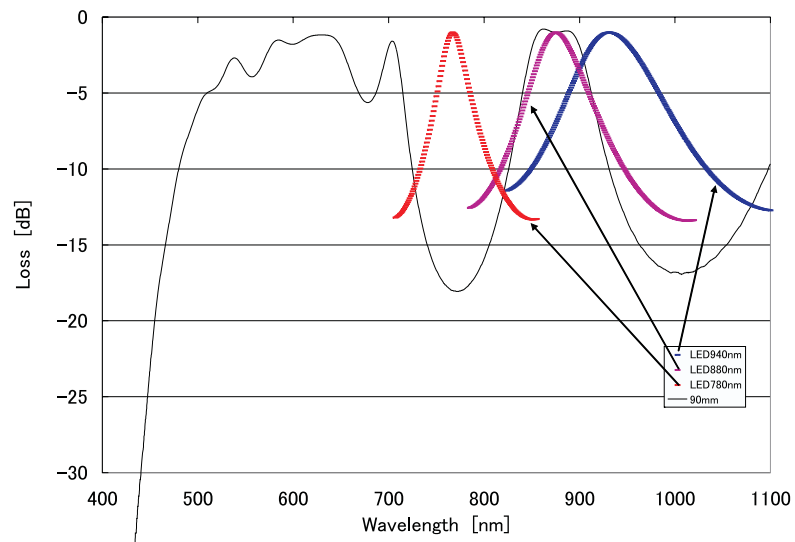


図 4.4: 可視光帯域を含めた 880nm 帯バンドパスフィルタの特性

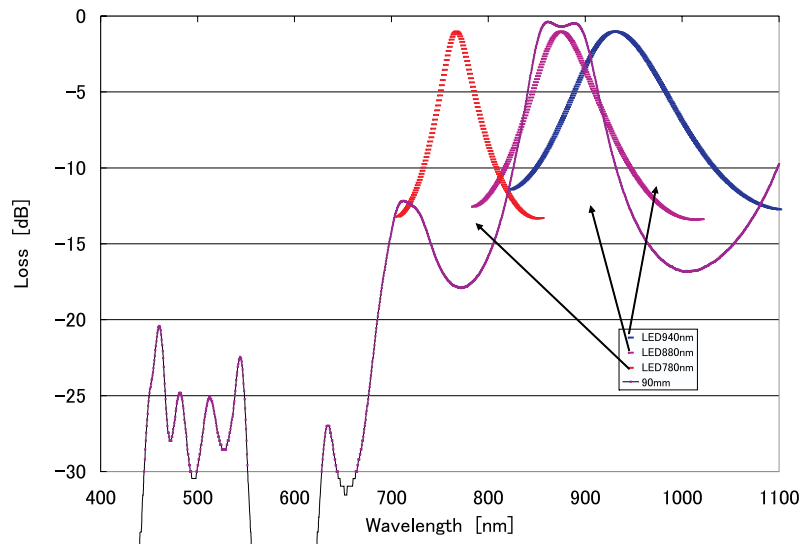


図 4.5: 可視光帯域を含めた可視カット層つき 880nm 帯バンドパスフィルタの特性

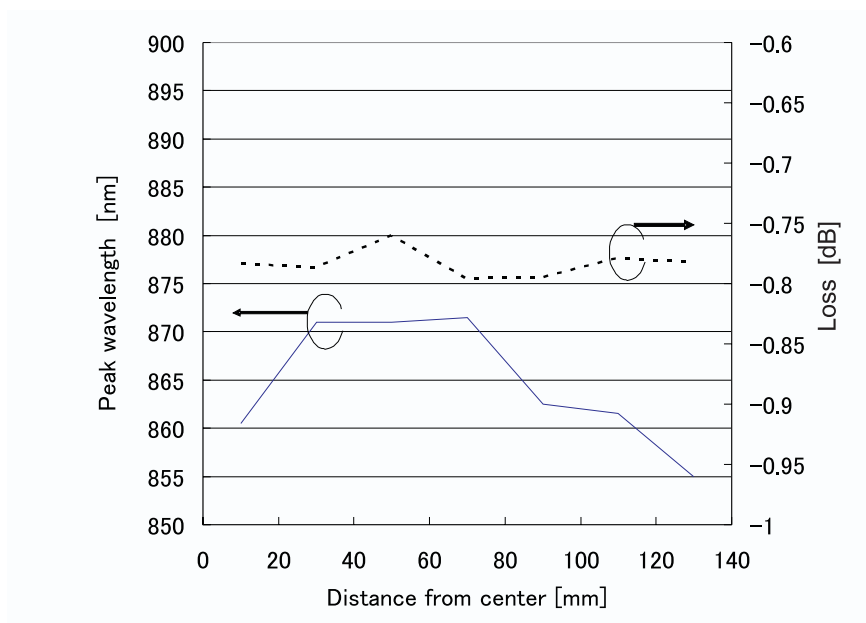


図 4.6: 880nm 帯バンドパスフィルタの均一性評価

## 4.5 結言

無電源で近赤外光を用いて情報提供を行う情報通信端末 Aimulet において、同一の場所で同一の方向を指向するユーザに対しても複数のコンテンツを分離して提供するため、波長多重空間光通信を実現するための光学フィルタの試作を行いその特性を評価した。フィルタは光源である近赤外 LED の発光波長スペクトル分布に適合させた。780nm と 880nm の隣接チャネル抑圧比は 8dB 以上が実現でき、波長多重分離の目的は達することができた。ただし、880nm と 940nm の抑圧比は 780nm と 880nm の間隔に比較してそれぞれの LED の中心波長が近いことと、940nm の LED の発光半値幅が広いことから隣接チャネルの抑圧は 2dB と小さく、コンテンツの混信が発生することがわかった。したがって、完全に照射領域が重なる配置には適さないことがわかった。このため、照射領域の位置や方向による分離を併用する必要があることがわかった。



## 第 5 章

# 高性能基地局技術

### 5.1 緒言

i-lidar は著者らによって研究開発された，室内において Aimulet を光学的に測位するとともに空間光通信を行って情報サービスを提供する基地局装置である [54][88][89]．初期の i-lidar は，ガルバノメータミラーにより偏向された発振波長 1060nm の FSF(Frequency-Shifted Feedback) レーザビームを照射し，方位と距離測定を行うことで再帰光反射体の三次元位置の決定を行っていた．この方式は 1 本のレーザビーム光で利用者の通信端末の三次元位置を 1cm 未満の精度で測定できる．ただし，1 本のレーザビームで端末を探索と通信を兼用していたため，サービス領域の全走査に 5 秒以上を要し，その後通信を行う端末にビームを照射し，端末までの精密な方位と距離を測定していたため，端末の高速な移動には対応できず，複数の利用者の同時追尾と通信を実現することは事実上不可能であった．また，発光波長が近赤外のため，Class1 のアイセーフ動作をすることができなかった．

そこで本論文では，複数の利用者の並列の探索・追尾および通信を実現するため，基地局である i-lidar の処理の高速化とアイセーフ動作化の研究を行った [90]．Aimulet を位置に基づく情報サービスのシステムとして実装し評価するために，3.4.3 で試作したレベル 2 HV ターゲットを装備した Aimulet を用いて空間光通信システムを構築し，室内レーザレーダ測位通信装置からこの端末の追尾と通信の性能評価を行う [91]．

5.2 では，位置に基づく通信のための各種の光偏向技術についてまとめ，単一ビー

ム偏向技術として，ポリイミドヒンジ MEMS ミラーとその特性について述べる [92][93] .

5.3 では，受信性能の向上を図るために，インテリジェントビジョンカメラによる並列受信技術について述べる .

5.4 は、デモンストレーションシステムの基地局 i-lidar の構成を述べ [57][58][94] , システムの追尾性能と通信性能について評価を行ない，5.5 でまとめる .

## 5.2 単一ビーム偏向送信技術

### 5.2.1 光偏向方式の分類

基地局と情報端末の間で 1 : 1 の空間光通信を実現するための光ビームを偏向する技術としては，単色でコヒーレントな光を発する光源を対象とすると，

- (1) ビーム光を回転する鏡に照射し，鏡の角度を制御する [37][95][96]
- (2) ビーム光を発生する光源の角度を制御する [97]
- (3) 回折格子の回転角を制御する [98]
- (4) 回折格子の周期を電気・機械的に制御する [99][100]
- (5) 回折格子に照射する光源の波長を制御する [98]
- (6) 計算機プログラムにより回折光の方向を制御する [101][102]

など，各種の手法が考えられる .

(1) の光偏向方式で利用者を連続的に追尾する場合，ガルバノメータミラーや回転する多面体鏡を用いて実装することが一般的であった . ガルバノメータミラーは反射鏡の寸法を大きくすることや光を連続偏向して追尾することが可能であるが，大寸法，大消費電力，低速応答，単軸駆動，といった課題があった . また，回転多面体鏡は端末を連続して追尾をすることが不可能であった . この光偏向にマイクロマシニング技術を活用して MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 技術を応用して微小な偏向鏡を作成し，この鏡の回転によりビームの偏向を実現する手法がある [103] . ただし，シリコンをヒンジとする従来の MEMS ミラーでは非共振状態での偏向角が小さく，また，静電力を利用した駆動では数 10V の動作電圧が必要であった . そこで，非共振駆動でも回転角が大きくでき，低電圧駆動

が可能な方式を採用する必要がある。

(2)の方式ではレーザ送受信機全体を自動雲台に搭載して方向制御するような方式の実装となるが、回転部の寸法や重要が大きくなる課題がある。

(3)の方式で回折格子を回転させる場合(2)よりも回転部の質量は小さくなるものの、回折格子が汚損されやすく、また、2軸の偏向には2枚の回折格子が必要となるため、適していない。

(4)の方式ではたとえば音響光学素子、GLV(Grating Light Valve)[100]、あるいはPAL-SLM[66]のように電氣的に制御可能な回折格子素子があれば実現できる。GLVの場合にはMEMS技術を利用して静電的に回折格子の有無を制御する素子の場合、回折方向が固定されているので、本論文で目指す利用者の連続追尾には適していない。

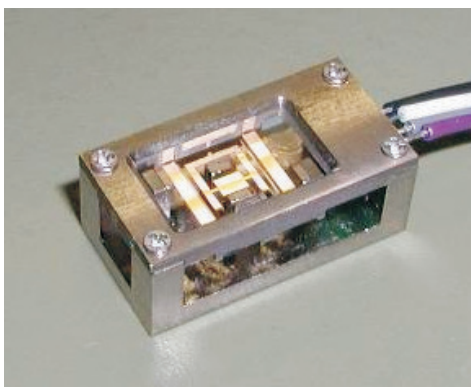
(5)の方式では回折格子を動かす必要はなく、波長可変できるコヒーレント光源があれば光の偏向が可能で、光源のスペクトル分布によりビームの広がり角も制御できる、という特長を有しておりいる。この方式は技術的には可能であるが、波長可変レーザ光源が高価で現実的な実装には適さない。

(6)の空間光変調器(Spatial Light Modulator:SLM)にホログラムを表示させ、これにレーザ光を照射することによる光偏向手法は、1個の光変調素子で二次元の光偏向を実現できるので技術的には有望であるが、実用上は偏向角やコストの問題がある。

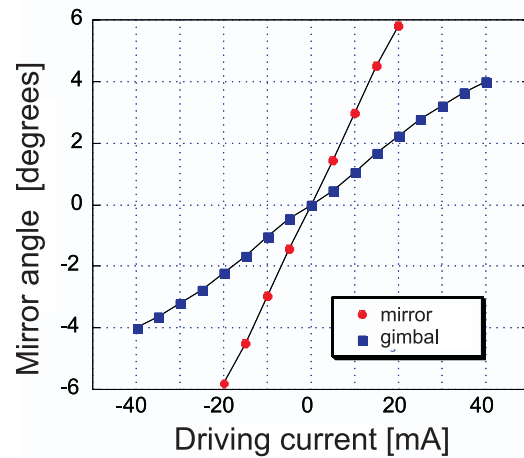
以上を考慮すると、本論文が目指す、利用者の位置を連続的に追尾して利用者にビーム光を照射し続けてその位置や方向に基づく情報サービスを提供するために、基地局と利用者間で1本の光ビームにより1対1の光通信チャネルを実現する場合には、ビームの偏向速度や複数のビームを同時偏向するシステムを構成した場合の装置の寸法やコストの観点から(1)の方式が優れていると考えられる。そこで、次節では非共振駆動でも回転角が大きくでき、低電圧駆動が可能なMEMS偏向鏡とその特性について述べる。

## 5.2.2 二軸偏向 MEMS ミラーとその特性

5.2.1 での検討の結果，鏡を支持するヒンジとしてよく用いられるシリコン素材の代わりにポリイミドを使用し，静電駆動の代わりに電磁的に駆動する 2 軸ジンバル偏向型 MEMS ミラーを使用してビームの偏向を行うこととした [105]．MEMS ミラーはオリンパス(株)が試作した [41][106]．図 5.1 に試作した 2 軸偏向 MEMS ミラーの外形写真とその偏向特性を示す．中心の鏡がある部分をミラー部，その外側の可動枠の部分をジンバル部とすると，ミラー部とジンバル部の寸法はそれぞれ  $1.5\text{mm} \times 2\text{mm}$  と  $5 \times 4\text{mm}$  である．本実験で用いたミラーでは偏向コイルの抵抗値がそれぞれ  $6.1 \ \Omega$  と  $6.0 \ \Omega$  であった．また，ミラー部が  $20\text{mA}$  の電流注入で  $6^\circ$ ，ジンバル部が  $40\text{mA}$  の電流注入で  $4^\circ$  の偏向が得られた．この型式の 2 軸偏向ミラーは片側  $22.5^\circ$  の偏向が可能な素子であるので，光学偏向角は両側で  $90^\circ$  の偏向が可能になる．部屋の天井の一隅から室内全体に照射する場合，死角をなくすため光学偏向角は  $90^\circ$  以上あることが望ましいが，この素子はこの角度をカバーできることを意味している [107]．



(a) 2D-MEMS mirror



(b) Deflecting characteristics

図 5.1: 二軸偏向 MEMS ミラーとその偏向特性

## 5.3 高速並列光受信技術

通常のビデオカメラの画面更新レートは30ms程度と低速であり，上限でも30bps程度の通信にしか使えない．[108]また，高精細で画面更新レートが高いカメラを単に利用するだけでは，大量の動画像情報が画像伝送を行うネットワークに流れることになる．位置に基づく情報サービスを実現するにあたり，実際に必要となるデータは，すべての動画像データではなく，*Aimulet* の位置やその通信データで十分であるので，それ以外の画像データまでネットワークに伝送する必要は必ずしもない．

高速なフレームレートを有しながらもローカルにプリプロセスを行うことでネットワークの負荷を下げるができるインテリジェントビジョンチップが開発されている[109]．これは， $128 \times 128$ 画素（または $256 \times 256$ 画素）のCMOSセンサの各画素にプロセッサとメモリを有し，プリプロセスを行うことができるフレームレート1kfps（または250fps）のビジョンチップである．このカメラはフォトダイオードアレイの出力1ラインごとにアンプとA/Dコンバータを用意しているため、画像の高速出力が可能である．このカメラを用いれば，光信号の1ビットの認識に3フレームを使用することにしても、1kfpsの場合300bps程度まで対応できることになる．

## 5.4 アイセーフ室内測位通信装置 *i-lidar*

### 5.4.1 システムの構成

試作したアイセーフ室内測位通信装置 *i-lidar* の構成を図5.2に示す．今回試作した*i-lidar*は、「近赤外照明LEDを有するインテリジェントビジョンカメラ」とその「カメラ制御サーバ」，偏向変調レーザビーム発信機である「サテライト」とその「制御サーバ」，から構成される．反射率変調機能を持つ*Aimulet* 端末の*i-lidar*による搜索と通信速度の高速化のために，利用者端末の探索機能と高精度追尾機能を別の機能モジュールで行うこととした．すなわち，利用者端末の方向探索には，5.3に示すインテリジェントビジョンカメラを利用することとした．このカメラでは輝点座標の取得により端末の方向探索を行うだけでなく，フレーム毎の輝点

の輝度変化を比較することで、端末の反射率変調による発信データを取得する。ただし、このカメラで再帰光反射変調を行う HV ターゲットの信号に対応するために、直流点灯する近赤外投光 LED アレイを照明としてカメラの直近に装備した。

また、高精度追尾機能を実現するために 5.2 に示す MEMS 偏向鏡によるビーム方向制御を行った。基地局から Aimulet 端末へのデジタルデータ転送は、発振波長 1480nm の半導体レーザ変調光を MEMS 鏡で偏向して端末に照射することで実現する。照射するビームの直径は、距離 2m で約 2cm であった。

以下、各機能モジュールごとに解説する。

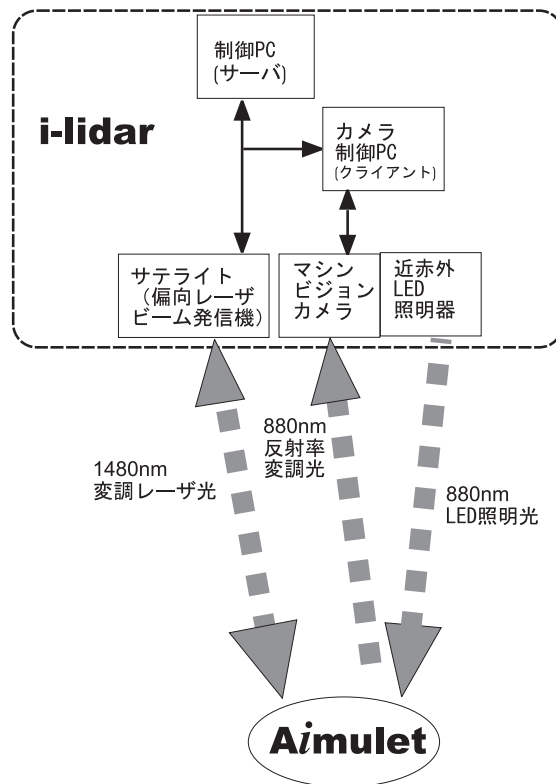


図 5.2: アイセーフ測位通信装置 i-lidar の構成

インテリジェントビジョンカメラ インテリジェントビジョンカメラとしては、5.3 で述べた浜松ホトニクス社製 C8201 を用いた。また、撮像レンズの周囲に円環状に近赤外 LED 光源を配置し、端末の低消費電力動作のための、光反射率変調方式の Aimulet の信号を受光できるようにした。LED の発光中心波長は 880nm である。近赤外 LED は直流点灯を行った。試作した高速撮像カメラ部を図 5.3 に示す。



図 5.3: 近赤外投光 LED アレイを有するインテリジェントビジョンカメラ

サテライト レーザ光を偏向照射し，*Aimulet* を追尾して 1 : 1 の空間光通信を行う機能モジュールを本論文ではサテライトと称する．レーザ光を偏向するための MEMS ミラーの寸法が 1.5mm x 2mm と小さく偏向角も大きいため，使用する光源は LED ではなく，光密度が高くかつ小さく収束できるレーザ光を用いる必要がある．ただし，通常の間人が滞在する室内にレーザ光を投射する場合，Class1 のアイセーフである必要がある．このため光源として発振波長 1480nm の半導体レーザを利用し，出力が Class1 に収まるよう調整した．サテライトは，光源として，古河電工社製発振波長 1480nm の半導体レーザ FOL1402P を用いた．放射出力は装置の出射端で 10mW である．変調素子としては，住友大阪セメント社製の  $\text{LiNbO}_3$  導波路型光変調器 (T-MZ 1.5-2.5-S-FK) を用いた．そして，ビーム偏向器には，5.2.2 の MEMS 偏向鏡を用いた．再帰反射光はビームスプリッタにより 4 分割受光器に導入し，受光素子間の受光量の差に応じて端末を追尾するよう，光軸の微調整を自動的に行う．図 5.4 に試作したサテライトの内部を示す．レーザと光変調器は光ファイバで接続され，レンズによりコリメートされ，ビームスプリッタで反射して MEMS 偏向鏡に入射する．*Aimulet* からの反射光は，同軸の光路を通り，ビームスプリッタを直進して 4 分割受光器に入射する．

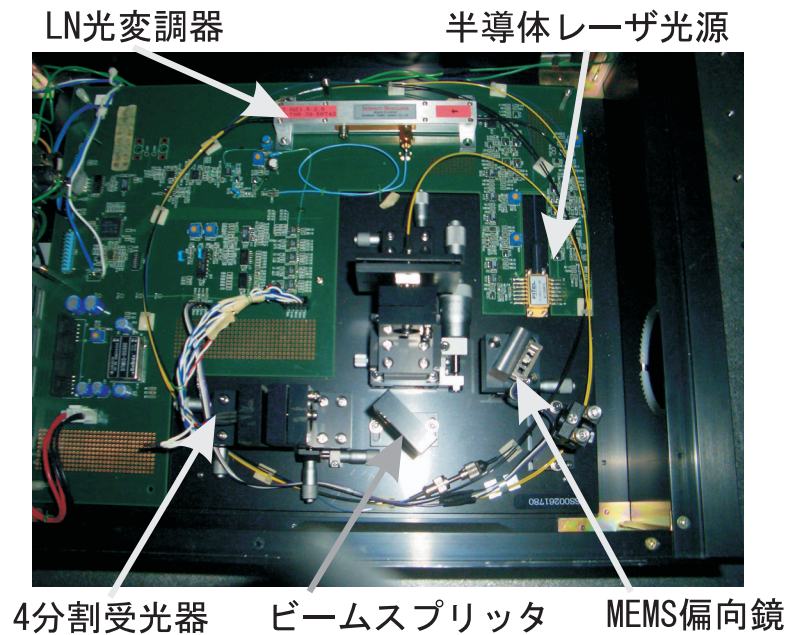


図 5.4: 光偏向追尾サテライトの内部

## 5.4.2 システムの動作

システムの動作は以下ようになる．近赤外 LED 照明は発光波長 880nm の近赤外光でサービスする領域全体を常時照明している．その領域へ Aimulet 端末が進入すると，インテリジェントビジョンカメラは端末の再帰光反射信号を捕らえ反射率変調信号からその ID を確認する．カメラ制御サーバはサーバ PC に Aimulet の方位と ID を伝え，それを受けてサーバ PC はサテライトを制御してアイセーフレーザ光を Aimulet に照射し，通信回線を確認する．回線確立後はレーザへの再帰光反射光のモニタによるフィードバック制御による高精度追尾と，インテリジェントビジョンカメラによる粗追尾の併用により Aimulet を追尾して回線を維持し，必要な双方向通信を行う．

試作した室内通信測位通信装置の外観を図 5.5 に示す．i-lidar は写真右上部の白い筐体が LED 照射装置を有するインテリジェントビジョンカメラで，その下の黒い筐体が「サテライト」である．MEMS 偏向器から放射された波長 1480nm の変調レーザ光がポリマネットワーク液晶光変調器の奥の光受光器に入射してデータを送る．



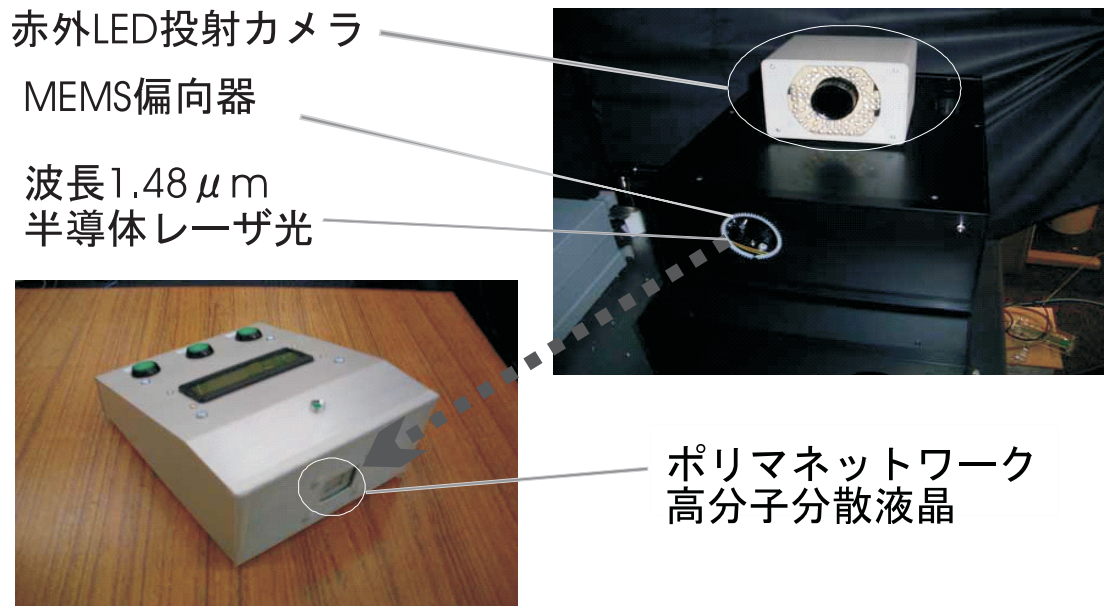


図 5.5: アイセーフ i-lidar システムの外観

### 5.4.3 システムの性能検証

試作したシステムについて、*Aimulet* の追尾性能と通信性能の2点から評価を加えた。

#### 追尾性能

図手前の *Aimulet* 端末は、反射率変調機能の確認のための試作端末で、入力装置として3個の押しボタンを、出力装置として液晶表示画面とLEDを備え、ポリマネットワーク液晶による再帰反射空間光通信を *i-lidar* との間で行う。図 5.7 に室内レーザーダにおける追尾速度測定の結果を示す。端末のHVターゲットは *i-lidar* の正面を向いている。ここでいう通信エラー回数とは、受信端末が室内レーザーダから距離1mの地点において通信回線が確立している状態から、端末が振幅12.5cmの等速運動で周期的に5往復移動する時、受信端末の精密追尾に失敗した回数である。端末の精密追尾に成功している場合には、レーザービームが端末に照射され続けて1対1の通信回線が維持できていることを意味する。精密追尾に失敗した場合でも画像による粗追尾から精密追尾へ移行し、通信回線が回復す

る場合もあるので、ロストの回数は1回ではなく、複数回検出されることになる。実験は、端末の移動速度が  $3.75\text{cm/s}$  (角速度  $2.15\text{rad/s}$ ) 以上からエラー回数が増え  $4.4\text{cm/s}$  (角速度  $2.52\text{rad/s}$ ) 以上では追尾しつつの通信が不可能となることがわかった。

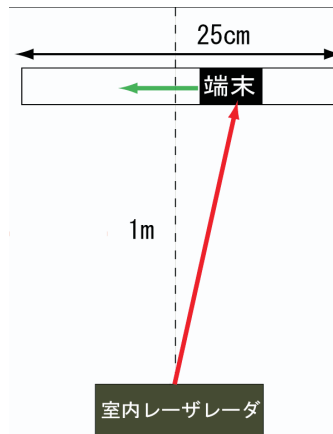


図 5.6: Aimulet の追尾性能の実験構成

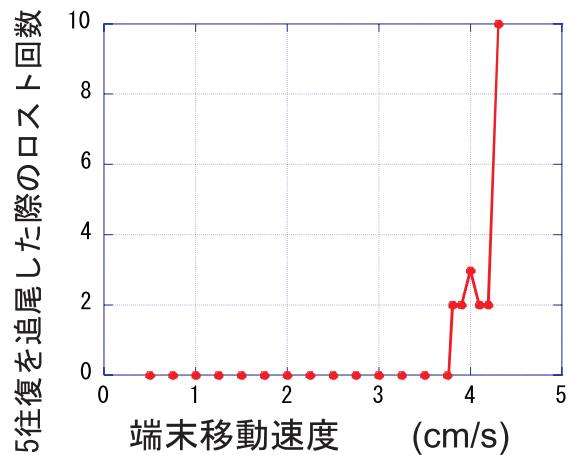


図 5.7: Aimulet の移動速度に対する回線維持性能

### 反射率変調通信性能

i-lidar において、Aimulet との回線を維持しているということは、 $880\text{nm}$  の近赤外光反射率変調通信だけでなく、 $1480\text{nm}$  の赤外ビーム通信の両方の通信がエ

ラなく行われていることを意味する．本節では，近赤外光を用いた反射率変調通信の特性を把握するために，Aimulet の各ボタンに対して送信される異なった 8 ビットコード信号の認識率を評価した．送信する信号は図 5.8 に示すように，00110100,01010100,00010100 の 3 種とした．再帰光反射強度は設定した閾値により二値化処理を行いデータを解析する．閾値の設定に対する信号受信特性評価の結果を図 5.9 に示す．この場合，閾値が 70 % から 85 % の間であれば誤りなくデータを読み取ることができることがわかる．

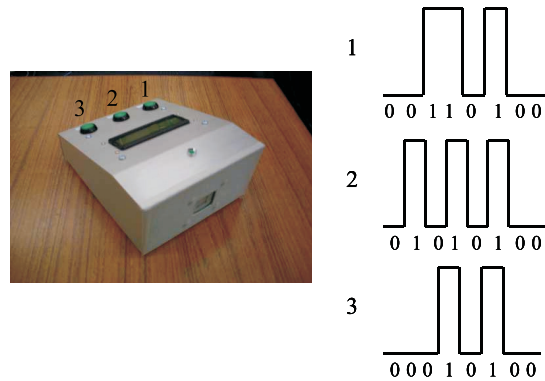


図 5.8: 双方向通信 Aimulet の送信コード

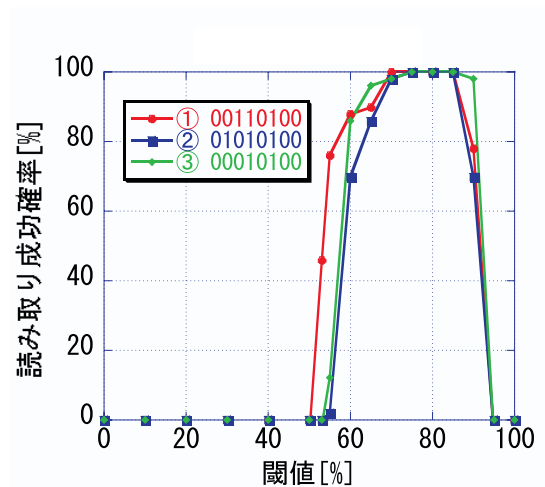


図 5.9: 受信成功率の閾値依存性

## 5.5 結言

光反射率変調通信モジュールである，レベル2のHVターゲットを備えた双方向通信端末 Aimulet と双方向の空間光通信を行うため，高速度インテリジェントビジョンカメラとMEMSミラーによるビーム偏向データ送信モジュールを持つ室内レーザレーダシステム i-lidar を試作し，その端末の追尾特性と通信特性について評価を行った．

本システムの最大追尾速度は受信端末の移動速度がレーザレーダとの距離が1mの時に3.75cm/s（角速度2.15rad/s）であった．この追尾速度は距離が例えば5mの場合には秒速15cm程度と，立ち止まっているか，ゆっくり歩く程度の速度には対応している．ただし，利用者がそのようにゆっくり移動している場合だけではないので，より高速かつ確実な追尾が可能となるようにハードおよびソフトの調整が今後必要である．

試作した Aimulet では，3個の押しボタンから8ビットの信号が送信される．パリティビットを1ビット取れば，5ビットがIDとして利用でき，1つの室内での応用を考える場合，同時に32台が存在することができる．これは一般の室内で利用者の検知された位置と時間をIDとして管理するには十分な量であると考えられる．

この閾値の最適な値は，Aimulet と i-lidar の距離や角度により変化するが，現在はその値を自動調整していない．より安定な通信回線の維持のためには，例えばデータの通信前などにトレーニングコードを送受し，閾値の大きさとサンプリングの位相を適切に自動調整することが必要になる．

## 第 6 章

# 実装例と今後の展開

### 6.1 緒言

本研究は屋内のような近距離閉空間において位置に基づく情報サービスを実現する上で、光の特長を活かしたワイヤレスな通信技術および位置計測技術を活用しようとしたものである。特に本研究は小型軽量無電源動作を目指す Aimulet 端末の実装形態のひとつである、Aimulet Ver.1 の機能の向上と、端末の支援環境である基地局性能の向上を行った。本章では、Aimulet による位置に基づく情報サービスの例と、今後の展開について述べる。

6.2 では、単純な構成から複雑な構成まで各種の実装段階 Aimulet を利用した位置に基づく情報サービスについて、その特長と応用について述べる [56]。

6.3 では、誘電体多層膜を用いた光学フィルタによるコンテンツ多重化技術について考察を加える。

6.4 では、Aimulelt の測位と通信を行なうための基地局の高性能化について考察を加える。

6.5 では、以上をまとめて結言とする。

## 6.2 光技術を利用した位置に基づく情報サービス

### 6.2.1 光測位通信技術の特長

室内のような近距離閉空間における位置に基づく情報サービスを実現する上で、光技術、特にビーム光の利用による特長について考察する。端末との通信や測位に光を媒体として利用する手法は、光が電波に比較して波長が短いことから、電波に比較して信号の直進性が高く、また、放射角が自由に制御できる放射ビームを作りやすいことが特長である。このため、環境側から鋭いビーム光による高精度な端末の方位測定が可能になることと、コーナーキューブのように光源の方向に再帰的に光を反射する素子が利用できることから、端末自身が電力を消費することなしに端末の位置や方向に敏感な情報サービスシステムを構築しやすい特長を有している。

また、信号光は壁などの遮蔽物により容易に遮蔽されることから、情報漏洩の防止に配慮した通信環境が、信号伝送速度に悪影響を与えるデータの暗号化などに頼らず実現することができる。さらに、光通信は周波数が高いことを利用して、数 10Gbps を越えるような超高速無線データ通信から、液晶光変調素子のように極めて小さい電力で信号変調できる素子を利用した、反射率変調通信のような低速ではあるが消費電力のきわめて少ない無線データ通信まで、目的とコストにあわせて各種の通信方式を利用することができるという特長も有している。

Aimulet Ver.1 では、利用者に提供する情報を音声だけのように厳選することで、空間光通信技術を利用した端末を小型・軽量・安価に実装している。この小型軽量で安価な端末の実装が可能、ということは、従来の携帯電話や無線 LAN 機器など携帯端末に空間光通信機能を低コストで付加することも比較的容易に行えることを意味する。屋外など従来の環境下では従来の通信インフラを利用し、空間光通信の設備がある環境下では電波による無線通信を行わないために通信端末の電池の電力消費を抑えて情報環境を利用できるようになる、というシームレスな運用が可能になる。

空間光通信が容易に遮蔽できるという利点の裏返しとして、隠蔽や移動により、端末の位置や通信データを消失するなどの通信回線の不安定性や、ユーザが存在する空間に光を放射することから、安全な光波長や光強度の採用しなければなら

ない，といった課題には配慮して実装しなければならない．その場合には光だけでなく RFID など電波を用いた方式と組み合わせて利用する方式が考えられる．この場合，端末から送信される RFID と光 ID のデータを一部共通化することで，送信データの放射方向に強い方向性を持たせた距離数  $m$  を越える通信が可能になる．

## 6.2.2 Aimulet による位置に基づく情報サービス

小型軽量で安価な端末で利用者の位置や方向に対応した情報サービスを実現できる空間光通信システムは，博物館や水族館，芸術鑑賞施設，アミューズメント施設，商業施設，医療・福祉施設において，利用者の位置や方向に対応した音声案内システムに応用できる．また，ビデオカメラやアクティブ RFID との組み合わせにより，利用者がどちらを向いているかの情報が数  $m$  の距離からわかるので，認証された人物かどうかにより遠距離から判断してゲートやエレベータの施錠などを制御できる．このため，より人に優しくかつセキュリティの高い防犯・セキュリティシステムの構築を行うことができる．ただし，光によるデータ送信は，隠蔽などの問題により通信回線が不安定になる状況が考えられ，通信の確実性が必要となる場合は，電波等との併用が必要である．本節では各種の Aimulet を用いた応用について考察する．

### 愛知万博用 Aimulet Ver.1

再帰光反射率変調によって端末から基地局に情報の送信を行わない Aimulet Ver.1 でも，利用者の位置や方向に敏感な情報サービスをすることができる．光ビームによる情報提供技術が，2005 年 3 月 25 日から開催される，愛・地球博（愛知万博）[110]において公開されることになっている．公開場所は，長久手地区にあるグローバルハウスと，日本庭園で開催される，ニューヨーク在住の芸術家ローリー・アンダーソンの芸術作品の展示である．図 6.1 にグローバルハウス用の Aimulet GH の外観を，図 6.2 にローリー・アンダーソン用の Aimulet LA の外観を示す．いずれもクレジットカード程度の寸法のカード型の端末であり，Aimulet GH は 6 万個，Aimulet LA は 13 万個が製造される．



図 6.1: Aimulet GH

Aimulet GHは図6.1の左下の窪みを右手で保持し、右下の突起部を右耳にあてて、上部の黒い光受光部を対象に向けて情報を聴取する。受光には太陽電池は40mm × 20mmの単セルのシリコン単結晶太陽電池を用い、インピーダンス16Ωの直径28mmのダイナミックスピーカを駆動する。受光部には光学フィルタが装備されており、同一のサービス領域において例えば英語と日本語のような複数の言語でのサービスが可能になっている。また、アクティブRFID回路が内蔵されており、利用者の動線情報を匿名の状態を取得し、よりスムーズな利用者への案内を可能にしている。光源は760nmと880nmに発光波長の中心を持つLEDアレイを用いる。ビームの方向は固定である。



図 6.2: Aimulet LA



Aimulet LA では、微小球状太陽電池 Sphelar<sup>®</sup>[111][112] を利用して、受光部をコンパクトに実現すると共に、筐体を竹素材で作成し、直射日光下での動作を可能にした端末である。スフェラが直並列接続が自由にできることから、12個のスフェラを2直列6並列に接続し、セラミックスピーカを駆動している。利用者は図の端末右上の円形部を耳に当て、左下の太陽電池を下に向けて音声情報を聞く。

### Level0 HV ターゲットを装備した Aimulet

Level0 の HV ターゲットを装備する Aimulet では、再帰光反射素子自体は時間的に変調された信号を出すことはできないが、一次元あるいは二次元バーコードのような空間的なパターンで、あるいは Aimulet を振るなどの動作により情報を環境に送信して利用者と情報環境のインタラクションをすることができる。Level0 の HV ターゲットを装備して Aimulet の動物園の案内板における利用シーンの例を図 6.3 に示す。

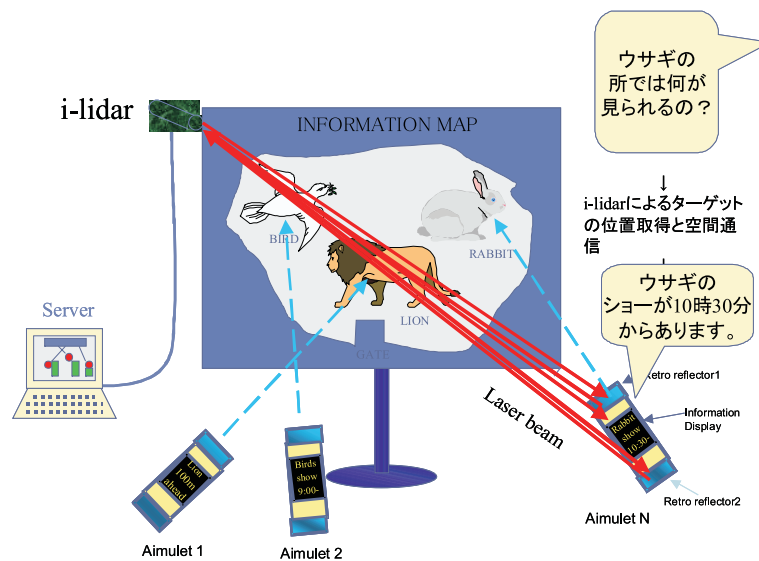


図 6.3: レベル0 HV ターゲットを装備した Aimulet の運用例

この応用例における Aimulet には再帰光反射体が端末の上下に1個ずつ装備されている。測位通信装置 i-lidar は端末に装備された再帰光反射体の三次元位置を取得することができるため、2点の位置が計測でき、空間にこの2点を通過する

直線を1本設定することができる。したがって、2点を結ぶ直線が案内板の平面と交わる地点の情報（例えば Aimulet 1 ならばライオンの情報を、Aimulet N ならばウサギの情報を）を端末に向かって送信すれば、端末の ID が必ずしもわからなくても位置と方向に基づいた情報提供が可能になる。2点の間隔を ID として、解説の詳しさや言語を切り替えて情報提供することもできる。また、反射素子を3点以上にすれば、ID あるいは端末の面の方向も含めて把握することができる。

## Level2 HV ターゲットを装備した Aimulet

Level0 以外の HV ターゲットでは、Aimulet は光反射率変調通信により i-lidar など基地局に端末の ID や押しボタン情報を送信することで、情報環境とインタラクションができるようになる。ここでは、再帰光反射シートとポリマネットワーク液晶光変調素子による Level2 HV ターゲットを装備した Aimulet による情報サービスについて述べる。

情報サービスの実装例として、美術館における芸術作品についての解説を Aimulet の3つの押しボタンの押下により表示画面を切り替えるデモプログラムを作成した。実行例を図 6.4 に示す。

Aimulet はボタンの押下により3種類の8ビット信号を送信する。それにより、選択肢の移動、選択、取り消しを行い、利用者に対して送出・表示されるコンテンツを切り替えることができる。図では、ピカソの代表的な作品について選択するとその絵画と説明が得られるようになっている。

偏光方向に依存しない反射率変調を行なう場合、この例のポリマネットワーク液晶のような、光の透過と散乱を制御するような液晶光変調器を利用する必要があるが、この変調速度は数 10bps 程度と遅い。毎回のデータ送信時に利用者の ID と押しボタン情報を全て送信すると通信時間がかかり応答性が悪くなることが考えられる。そこで、認証は最初や必要な場合に行い、端末の位置を ID として情報環境側が把握して、通信は生データのみを送信することが考えられる。

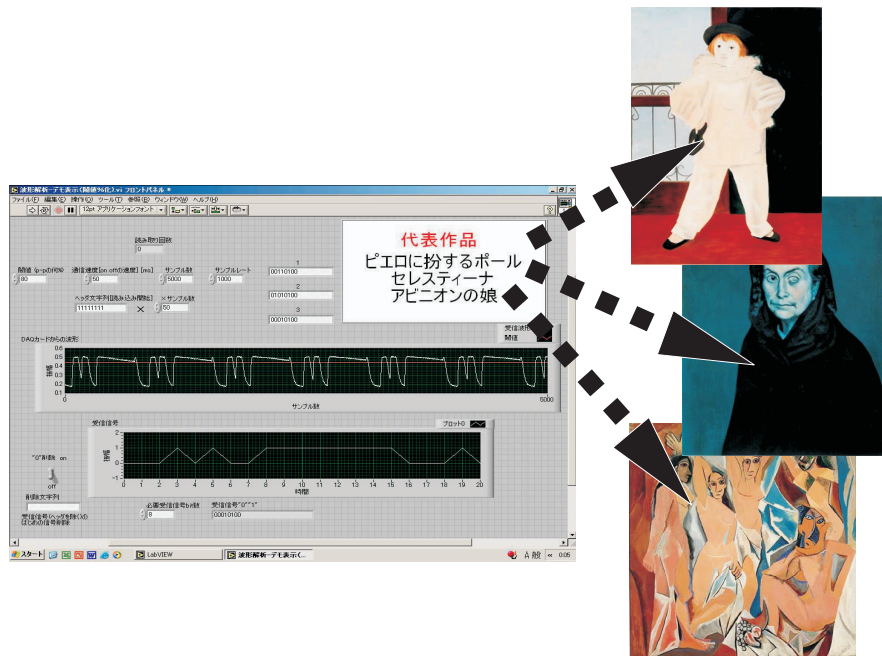


図 6.4: 光反射率変調通信によるインタラクティブな情報サービスの例

### 6.3 空間光通信端末の情報多重化技術

情報端末 Aimulet において、同一領域の同方向に照射される複数の多重化されたコンテンツを無電源で分離受信を行うことを考える場合、光源が近赤外の LED であること、LED の発光波長分布が半値幅で 40nm ~ 50nm あること、受光素子の材料がシリコンであること、大面積（例えば 40mm × 20mm 程度）のフィルタを安価に実現する必要があること、利用者への安全上基板が物理的にも安全であること、などに配慮して実装する必要がある。そこで本論文では異なる中心周波数を持つ LED 光源と LED 光源の発光スペクトルにあわせた誘電体多層膜フィルタの組み合わせによる波長多重伝送方式を採用した。

隣接したチャネルの信号の抑圧比を向上し、選択比をあげるためには光源に急峻な遮断特性を有する光学フィルタを装着することで発光帯域幅を狭めることが考えられるが、発光光量の利用効率が低下する。ため、総発光受光強度が低下することになるため、端末の無電源動作には不利になり、システムの総コストも増大する。また、光学フィルタの製造コストは低くないため、その製造コスト低減手法の開発も重要である。

Aimulet Ver.1 への応用を考える場合、波長分離フィルタが太陽電池全体を覆う必要があるため、大面積のフィルタをいかに安いコストで製造するか、が問題となる。また、並行して太陽電池の面積の低減の手法を探る必要がある。この場合、スフェラのような微小球状太陽電池の採用が魅力的である [112]。スフェラは、直列・並列接続が配線により可能であるため、高電圧小電流を DC/DC コンバータなしに発生するには適している。これを改善するために、発音体はダイナミックタイプではなくセラミックタイプのイヤホンやスピーカを利用する必要がある。アイセーフのレーザに対応するには、シリコン半導体受光素子ではなく、Ge や InGaAsP など長波長に対応した半導体を利用する必要があるが、今回はコストの関係から採用を見送った。

誘電体多層膜フィルタを用いた波長分離技術は光ファイバを用いた幹線の光通信では一般的に用いられる技術である。ただし、Aimulet Ver.1 への応用を考える場合、フィルタは太陽電池全体を覆う必要があるため、太陽電池の面積がフィルタのコストにも影響する。すなわちコスト低減には小さな太陽電池で動作する必要がある。ため、Aimulet LA に採用したような微小球状太陽電池は魅力的である。太陽電池で発生する直流電力は、一般には太陽電池の面積に比例するため、電圧発生には有利であるが、電力の発生には不利になる。このため、電圧駆動型の発音体、具体的にはダイナミックタイプではなく、セラミックタイプのイヤホンやスピーカを採用した。多言語対応の光学フィルタについては、太陽電池表面を全面覆う必要があるため、破損時の安全性を考えて膜厚 30  $\mu\text{m}$  のポリイミドシートを基板とする光学フィルタをはじめて開発した。誘電体多層膜フィルタは製膜により応力が発生するため、ポリイミドの一面にバンドパスフィルタ、別の面に可視光遮断フィルタ薄膜を蒸着することで、フィルムの歪の緩和を行なった。

## 6.4 高性能基地局技術

### 6.4.1 ビーム偏向送信技術

位置に基づく通信において、利用者の三次元位置の取得は重要な要素のひとつである。利用者の方角計測の地点と、変調ビーム光の放射地点が近接していれば、

利用者の三次元位置が不明でもその方位だけで利用者との1対1の空間光通信回線は構築できる．このため本実装では，インテリジェントビジョンカメラで利用者の粗方位を取得し，その方向にレーザ光を照射し，再帰反射光による帰還制御で空間光通信回線の確立と維持をおこなっていた．

光偏向方式としては，本論文で採用したポリイミドヒンジを有するMEMS偏向鏡を利用する方式は，従来技術の中では大偏向角での連続追尾を行うには最適の方式と考えられる．ただし，MEMS偏向鏡を用いても偏向の実現には機械的に鏡を回転させているため応答がミリ秒のオーダーになる．この速度は，利用者一人を常時追尾するには十分な応答速度であるが，1本のビームを複数の利用者に時分割で照射して高速な変調信号を送出することで時分割空間多重通信を実現するには応答速度が不足している．複数の光源をフェーズドアレイ動作をさせることで，電子的にビームを高速に偏向できる可能性がある [113]．著者は同期動作する2本の平行した活性層を持つ半導体レーザでのフェーズドアレイは報告している [114] が，半値幅の狭いビームを任意の方向に偏向するためには，位相差を制御した大規模な発光点のアレイが必要であるため，その実現のためには素子技術の革新が必要である．空間光変調素子にホログラムを表示し，波面制御による光偏向も考えられる [102]．この場合，任意の強度分布を有するパターンが構成可能であるが，最大偏向角は照射するレーザ光の波長と空間光変調素子の画素の寸法によって決定される．また，1480nm 対応の PAL-SLM を利用する場合，応答速度は約 1 秒と遅いので，電子的ではあるものの高速な光偏向は素子特性の問題から実現できていない．

#### 6.4.2 高速並列光受信技術

本論文で採用したインテリジェントビジョンカメラは，1kfps のフレームレートを実現しているが，データ通信という観点からは更なる高速化が望まれる．3.3.4 で明らかになったように，強誘電性液晶光変調素子の変調帯域幅は 4kbps を越える．これは，音声信号を端末からコード化やデータの圧縮無しにそのまま送信できることを意味する．その音声変調信号をインテリジェントビジョンカメラで撮像できるようになれば，音声認識を情報環境側で行い，処理結果に基づく情報サー

ビスを利用者に提供できるようになる。

## 6.5 結言

Aimulet は、空間光測位通信技術の特長を活かすことにより、極めて単純な構成の端末でありながらむしろ利用者に優しい情報支援サービスシステムを構築できるという特長を有している。これは、従来の情報通信端末が端末側で行ってきた演算処理も含めてほとんどを情報環境側に押し出して処理するようにしたためである。その結果、情報環境側は、利用者の意図をよりの確に把握するために、より強力な情報処理環境と高速なネットワークが必要となる。Aimulet 技術は Ver.1 など単純な実装から実用化が進んでおり、今後の要素技術の進展と共に進歩と普及が進むことが期待できる。

# 第7章

## 結論

### 7.1 本研究の要約

本研究は、屋内における人間を支援するための位置に基づく情報サービスを実装する上で、低消費電力携帯情報通信端末とその基地局を実現する基礎となる、光技術の新しい応用に関する研究について述べた。近未来の人間支援を目的とするユビキタス情報環境では、より連続的、精密、かつシームレスに情報サービスの提供が行われるようになると考えられる。この情報サービスの実現には、各利用者の位置の取得とワイヤレスな通信が必要であり、光を情報媒体とした測位通信技術は、端末の低消費電力化とワイヤレス回線での情報漏洩防止の双方を満足したシステムを構築することができる。そこで本論文では、従来は光の広帯域性に着目した高速空間光通信ではなく、短波長性に着目した低消費電力空間光通信を実現するため、その要素技術の研究開発から、システム構築までとその検証を行った。位置に基づく情報サービスを行う低消費電力情報通信端末として Aimulet の概念が中島らによって提唱され、その最も単純な実装形態として、西村が小型無電源情報端末 Aimulet Ver.1（旧称 CoBIT）を報告した。本論文では、この Aimulet Ver.1 のシステムのさらなる性能向上を図るため、Aimulet Ver.1 端末の低消費電力データ送信技術、信号多重化通信技術、そして、測位通信基地局の性能向上技術、の3つの課題を指摘し、その解決法について述べた。

端末の低消費電力通信技術としては、反射率変調技術を利用した通信モジュール、HV(Hyper Versatile) ターゲットを提案した。HV ターゲットは再帰光反射と反

射率変調の2つの機能を有する空間光通信モジュールで、単純な構成から複雑な構成まで各種の実装形態に分類できる。HV ターゲットの実装上、鍵となるのは、低消費電力で光の制御を行う、液晶光変調素子である。そこで、ポリマ分散液晶、ポリマネットワーク液晶、そして強誘電性液晶の液晶光変調素子について、空間光通信の観点から特性を比較評価し、ポリマネットワーク液晶がその低消費電力動作 (<3V) と、偏光無依存性から、次世代の Aimulet 端末に適切な液晶光変調器であることを示した。

低消費電力端末で多重化信号を通信する技術では、近赤外波長多重通信技術の研究を行った。3種類のコンテンツの並列送信を実現するため、780nm, 880nm, そして940nmの3つの波長を中心波長として発光する AlGaAs/GaAs LED を用い、各 LED を異なるコンテンツで変調することで信号の多重化を行った。信号の多重分離は、これら3種類の LED の発光波長パターンに適合した誘電体多層膜フィルタ、すなわち、780nm 用短波長透過フィルタ、880nm 用帯域透過フィルタ、940nm 用長波長透過フィルタを設計、試作した。近赤外域用の誘電体多層膜フィルタはそのままでは可視光帯域の光を透過するため、可視光を遮断するフィルタをフィルタ基板の裏面に蒸着することで可視光信号からの雑音の低減とフィルタの応力による歪の緩和を行った。

基地局の高性能化技術では、変調レーザ光の偏向技術と、反射率変調光のデータの並列受信技術について研究を行った。ビームの偏向技術としては、光偏向素子の小型化のために、ジンバル型の2軸 MEMS(micro electro mechanical systems) 偏向鏡を試作し、その特性を明らかにした。MEMS 偏向鏡は偏向角を拡大するためにシリコンの代わりにポリイミドを素材とするヒンジにより鏡を支持し、駆動電圧を低減するために静電力の代わりに電磁力で駆動した。また、データの並列受信による通信のスループットの向上のため、インテリジェントビジョンカメラによる端末の反射率変調通信信号の並列受信を行った。

これら研究開発された技術を用いて、新しい携帯情報端末である Aimulet と測位通信基地局 i-lidar を実装し、その追尾特性と通信特性を評価し、さらに、端末の ID と押ボタン情報を含めたインタラクティブな位置に基づく情報サービスのデモを行った。



## 7.2 今後の展望

プライバシーの流出やセキュリティの問題など、人間生活における安心、安全な生活環境の整備はこれからますます重要になってくると考えられる。計算機技術とネットワーク技術の飛躍的な発展により、人を支えるユビキタスな情報環境を実現するための要素研究は着実に進展してきている。日本政府も e-Japan 計画から u-Japan 計画へと、IT 社会の発展からユビキタス情報化社会に向け研究を後押しする方針である。本研究も安心安全な社会の発展を担う一助としてさらに研究を進展させていきたい。そのためにも、著者は以下の技術に関する研究が重要であるとする。

### 7.2.1 反射率変調通信技術

本研究の反射率変調通信方式の場合、低電圧動作や低消費電力通信を重視しているため、応答速度が遅い液晶光変調素子を採用している。そこで、動的に変化する二次元データの利用技術について、低速な通信速度でもより高速で安定した通信ができるようになるような研究を進める予定である。

本研究では、変調特性がレーザの偏光方向に依存せず低消費電力で動作する、という利点を生かして、ポリマネットワーク液晶光変調素子を採用したが、-3dB 通信帯域幅が 20bps と狭いことがわかった。今後のシステムとしては、強誘電性液晶光変調素子を用いて数 kbps の通信を実現し、音声信号を圧縮なしにネットワークに送出し、音声認識、情報処理、合成を行い、その結果を利用者に情報提供するシステムを実現したい。その場合、二次元画像による並列受信性能の向上を図るため、より高速なインテリジェントビジョンチップの開発が必要になる。

### 7.2.2 非対称通信方式技術

情報環境から端末側の通信速度は Gbps のオーダの超高速通信が実現できる一方、端末から情報環境への通信速度は低消費電力の反射率変調通信を利用する場合には数 kbps 程度と極端に差がある。このような非対称速度通信環境に例えばそのまま TCP/IP プロトコルを実装するのは効率が悪い。システムを効率的に動作さ

せるためには、このような非対称速度環境で有効に動作する通信方式技術の研究が必要である。

### 7.2.3 測位技術

本研究における i-lidar は、近赤外 LED アレイからの光放射の再帰光反射を高いフレームレートのインテリジェントビジョンカメラで撮像して反射率変調信号の受光と解読を実現している。ただし、カメラ単体だけでは利用者の距離情報を取得することができないため、利用者の三次元位置の決定のための距離情報の取得には、複眼のカメラや複数位置の配置したカメラによる立体視など、三次元位置同定の手法の採用が必要になる。近年、LED を数 10MHz で変調し、反射光の位相差から光反射物体までの距離を測定する距離画像カメラが開発されている [115][116]。現状のカメラは 15fps と遅いが、カメラ単体で三次元測位通信基地局が実現できることはシステム構築のコスト低減の可能性があり、魅力的である。より高速なフレームレートのカメラの開発を期待するが、現状の性能でも提供する情報サービスの内容によっては有用である。

### 7.2.4 計算機ホログラムによるビーム偏向技術

基地局と Aimulet の間の通信は、他者が傍受できないように 1 対 1 で接続する光ビーム通信だけでなく、基地局と任意の位置にある複数の Aimulet の間の 1 対多の同報通信が必要になることがある。等方的に放射される光による同報通信では、必要な Aimulet 端末 以外の端末に情報が漏洩してしまう可能性がある。

そこで、任意の方向の光放射強度の極大値を持つように光波面の制御を行う技術として、空間光変調器を利用したホログラムによる光波面制御技術の利用が考えられる [117]。液晶空間光変調器および半導体空間光変調器で実装すれば、それぞれ、レベル 2 やレベル 3 の HV ターゲットを実現することができるようになる。現状では、レベル 2HV ターゲットに利用できる空間光変調器は画素の細かさや応答速度に課題が残っている。

## 7.2.5 無線機器との融合技術

光信号を利用するシステムは、位置や方向に敏感な情報サービスシステムを構築しやすいものの、反面基地局からの人体や他の物体による隠蔽により端末を見失うことが発生しやすい。アクティブあるいはパッシブのRFIDなど低消費電力の電波を利用する機器による近接あるいは数mの距離の等方的な通信と方向性を検知できる光通信の融合によりこの欠点を補完するシステムが考えられる。Aimuletは太陽電池に発生する脈流の交流成分を情報伝送に利用するが、直流成分を指向性の高い光データ送信だけでなくパッシブあるいはアクティブRFIDの駆動に利用して、等方的で隠蔽の心配が少ない通信手段として併用することが情報サービスの確実性と有用性を向上させることが期待できる。将来のHVターゲットは、小型軽量で薄膜状のモジュールとなることが期待でき、従来の無線機器の外装の一部として採用され、シームレスな位置に基づく情報サービス機器としての普及を期待している。

# 謝辞

本研究を遂行し、論文としてまとめるにあたり、数多くの方々のご指導、ご協力をいただきました。まず、研究について親身にご指導くださり拙い文章に何度も目を通してくださった本学情報科学研究科 東条敏教授に心から感謝いたします。また、本学の博士後期課程に入学し研究を遂行するきっかけともなり、また、本研究の推進だけでなく公私共に大変お世話になった公立はこだて未来大学学長

中島秀之学長に心から感謝いたします。また、本博士論文をまとめるにあたり、副テーマの研究をご指導くださいました、本学知識科学研究課 國藤進教授に感謝いたします。本研究をまとめるにあたりご討論をいただきました、本学情報科学研究科長島津明教授、鳥澤健太郎助教授、野田五十樹助教授に感謝いたします。

測定結果の討論などでご議論いただいた、東北大学電気通信研究所長 伊藤弘昌教授、明治大学 根本俊雄教授、湘南工科大学 日高建彦教授、成蹊大学 滝沢國治教授、オリンパス光学 岩崎暢喜博士、NTT フォトニクス研究所 中村孝一郎博士に感謝いたします。実験データの取得や討論でお手伝いいただいた、北陸先端科学技術大学院大学 中田豊久博士、産総研情報技術研究部門ユビキタスインタフェースグループの西村拓一博士、林新博士、中村嘉志博士、グループメンバーの諸氏には実験や討論に大いにご支援をいただきました。感謝いたします。最後に、愛する家族、芳江、彰秀、明日佳、嘉秀に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] James C.Sophrer, “Information in Places,” *IBM Systems Journal*, vol.38, no.4, pp.602-628(1999).
- [2] H. Nakashima, and K. Hashida, “Location-based Communication Infrastructure for Situated Human Support,” *Proc. of SCI2001*, Vol. , pp.47-51,(2001).
- [3] 2003 年度ビジネスグリッドコンピューティング第1回推進委員会資料6, “海外主要グリッドプロジェクト,” (<http://www.ipa.go.jp/software/bgrid/pdf/1Document6.pdf>), July 2003.
- [4] 平澤満, “2.1 位置情報アプリケーションサービス,” 高精度位置情報の取得技術に関する調査研究 (I), (社)日本機械工業連合会, pp.3-8 (Mar.,2002).
- [5] 平澤満, “2.2 位置情報サービス,” 高精度位置情報の取得技術に関する調査研究 (II), (社)日本機械工業連合会, pp.16-30 (Mar.,2003).
- [6] 浅川直輝, “燃料電池採用にKDDI動くまずは充電器として実用化,” 日経エレクトロニクス 2004.8.2, pp.22-23, (2004).
- [7] T.Nishimura, et al., “A Compact Battery-less Information Terminal(CoBIT) for location based support, ” *Proc.of SPIE*, Vol.2, No.1,pp.334-338 (2002).  
<http://www.carc.aist.go.jp/>
- [8] H. Itoh, “Advanced Device Technology for Opto-interconnection,” AIST The 2nd Meeting on electronic SI Technologies , Tokyo (Apr.1,2001).
- [9] H. Itoh and H. Nakashima , “Location-based Communication Infrastructure for the Cyber Assist Information Service Environment” International Conference on

Advances in Infrastructure for Electronic Business, Science and Education on the Internet , ” SSGRR2001 L’quila, Italy (Aug.12, 2001).

- [10] 伊藤日出男, 西村拓一, 森彰, “通信システムの概観 , ” 情報処理, Vol. 43, No. 8, pp. 884- 887(Aug. 2002).
- [11] 伊藤 日出男, “i-lidar:位置計測と通信の同時実現による情報サービスシステム , ” 情処研報 Vol.2001, No.83pp.181-187 頁 (Sep.,2001).
- [12] 伊藤日出男, “サイバーアシストプロジェクト -光デバイスを中心に-, ” オプトロニクス Vol.243, pp.189-193(Mar.,2002).
- [13] NTTDocomo, “ソリューション事例 (4) いまどこサービス;PHS;位置検索システム,” Solution@IBARAKI 導入事例パンフレット,(Mar.2002).
- [14] アステル東京, “位置情報サービス (愛称:Pナビ),” <http://www.yozan.co.jp/asteltokyo/location/p-navi/monitor/> (Jan., 2005).
- [15] NEC, “総合位置情報システム,” (Jan.,2005).  
<http://www.sw.nec.co.jp/igovcom/isale/manloc/index.html>
- [16] Takuichi Nishimura, Yoshiyuki Nakamura, Hideo Itoh, and Hideyuki Nakashima, “System Design of Event Space Information Support Utilizing Co-BITs , ” Proc. of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops(ICDCS2004). pp.384- 387, (Mar., 2004).
- [17] セイコーエプソンプレスリリース, “セイコーエプソン、世界最高水準の高性能 GPS 技術を開発,” <http://www.epson.co.jp/osirase/2002/020612.htm>
- [18] 中島秀之, 伊藤日出男, 山本吉伸, “位置に基づく通信の提案,” 情報処理学会研究報告「モバイルコンピューティングとユビキタス通信」, No.16, pp. 19-25, (2000).
- [19] Klaus Finkenzeller, RFID ハンドブック, ソフト工学研究所 ( 訳 ) , 日刊工業新聞社 (Feb., 2001).

- [20] タイムドメイン社ホームページ, <http://www.timedomain.com> (2004).
- [21] B. Schilit, A. LaMarca, G. Borriello, W. Griswold, D. McDonald, E. Lazowska, A. Balachandran, J. Hong and V. Iverson, "Challenge: Ubiquitous Location-Aware Computing and the Place Lab Initiative," In Proceedings of The First ACM International Workshop on Wireless Mobile Applications and Services on WLAN (WMASH 2003), San Diego, CA. (Sep.,2003). <http://www.placelab.org/publications/pubs/wmash-placelab.pdf>
- [22] Bluetooth 公式サイト, <http://www.bluetooth.com/>
- [23] IEEE Std. 802 Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 2003.
- [24] (財)光協会編, レーザ安全ガイドブック(第3版), ISBN4-915851-22-2, 新技術コミュニケーション(Apr.,2003).
- [25] 野村元宏, "LEDの安全対策," O plus E, Vol.23 No.7, pp. 838-842 (2001).
- [26] 猿渡正俊, "光ワイヤレス通信における眼に対する安全基準," OITDA 「オプトニュース」 No.1 Vol.139, pp. (2004).
- [27] 西田佳史, 相澤洋志, 北村光司, 堀俊夫, 柿倉正義, "超音波式3次元タグを用いた対象物の機能モデルに基づく人の日常活動の頑健な認識," (社)計測自動制御学会第3回システムインテグレーション部門学術講演会(SI2002),(神戸) pp. 183-184, (Dec., 2003).
- [28] Andy Ward, Alan Jones, Andy Hopper, "A New Location Technique for the Active Office," IEEE Personal Communications, Vol. 4, No. 5, pp. 42-47(Oct., 1997).
- [29] Kiyomiya, "ビクター、100Mbps 対応の屋内用光無線LANシステム," PC Watch 6月13日, (June, 2001). <http://www.watch.impress.co.jp/pc/docs/article/20010613/victor.htm>

- [30] Orimoto, “ビクター、家庭向け初の光無線ハイビジョン伝送システム 転送レート 1.25Gbps、HD 映像の非圧縮伝送が可能,” インプレス社, AV Watch, 9月24日 (2002). <http://www.watch.impress.co.jp/av/docs/20020924/victor.htm>
- [31] 可視光通信コンソーシアムホームページ <http://www.vlcc.net/index.html> (Nov. 2004).
- [32] Wi-Fi Protected Access2 (WPA2) security Web page, (Jan.,2005).  
[http://www.weca.net/OpenSection/protected\\_access.asp](http://www.weca.net/OpenSection/protected_access.asp)
- [33] “ビル間光無線通信,” 光無線通信システム推進協議会ホームページ, (Nov.2004). [http://www.icsa.gr.jp/system/index\\_03.htm](http://www.icsa.gr.jp/system/index_03.htm)
- [34] 浜松ホトニクス社, “デジタル光無線システム,” <http://www.hpk.co.jp/Jpn/products/photoliner.htm> (2004).
- [35] キヤノン社, “光無線LAN,”(Dec.,2004). <http://cweb.canon.jp/indtech/canobeam/>
- [36] 日本ビクター光無線ハイビジョン伝送技術 [http://www.jvc-victor.co.jp/company/technology/hikari\\_musen/](http://www.jvc-victor.co.jp/company/technology/hikari_musen/) (Nov.2004).
- [37] 関本清英, 鎌上則夫, 久光豊, 小野一也, 永田宏一郎, “三次元レーザーレダの開発,” 石川島播磨技報, Vol.43, No.4, pp.114-117 (JULy 2003).
- [38] T. D. Kudrle, C. C. Wang, M. G. Bancu, J. C. Hisao, A. Pareek, M. Waelti, G. A. Kirkos, T. Shone, C. D. Fung, and C. H. Mastangelo, “Electrostatic Micromirror Arrays Fabricated with Bulk and Surface Micromachining Techniques,” Proc. IEEE The Sixteenth Annual Int’l Conf. an Micro Electro Mechanical Systems MEMS-03, Kyoto pp.267-270 (Jan., 2003).
- [39] 佐脇一平, “3次元型光スイッチ用二軸櫛歯駆動型 MEMS ミラーアレイ,” 電子情報通信学会連合講演会, C-3-25, (Sep.,2003).
- [40] J.Bernstein, W.P.Taylor, J.Brazzle, G.Kirkos, J.Odhner, A.Pareek, and M.Zai “Two Axis-of-Rotation Mirror Array Using Electromagnetic MEMS, ” Proc.



IEEE The Sixteenth Annual Int'l Conf. on Micro Electro Mechanical Systems MEMS-03, Kyoto, pp.275-278 (Jan., 2003).

- [41] H.Miyajima, N.Asaoka, M.Arima, Y.Minamoto, K.Murakami, K.Tokuda, and K.Matsumoto, "A Durable, Shock-Resistant Electromagnetic Optical Scanner With Polyimide-Based Hinges," J. Microelectromech. Sys., Vol.10, No.3, pp.418-424 (Sep., 2001).
- [42] I.Yoda, D.Hosotani, and K.Sakaue, "Ubiquitous Stereo Vision for Controlling Safety on Platforms in Railroad Stations," Proc.of the Sixth Asian Conf. on Computer Vision (ACCV 2004) Vol.2, pp.770-775 (Jan., 2004).
- [43] Y. Nakamura, T. Nishimura, H. Itoh, and H. Nakashima, "ID-CoBIT: A Battery-less Information Terminal with Data Upload Capability," Proc. of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON03) (Nov., 2003).
- [44] 小杉一貴, 伊藤日出男, 滝沢國治, 中島秀之, "個別な情報サービスのための赤外偏向ビーム装置," 第51回応用物理学関係連合講演会, 東京工科大学 (Mar.,2004,).
- [45] X. Lin and H. Itoh , "Video-based spatial optical communications system for wearable computing environment , " Proc. of 10th Microoptics Conference 2004 to be published. Jena, Germany, (Sep.1-3, 2004).
- [46] 青木恒, "カメラで読み取る赤外線タグとその応用," インタラクティブシステムとソフトウェア VIII, 日本ソフトウェア科学会 WISS2000, pp.131-136, 近代科学社 (2000).
- [47] 松下伸行, 日原大輔, 後輝行, 暦本純一, 吉村真一, "ID Cam : シーンとIDを同時に取得可能なイメージセンサ," 情報処理学会シンポジウムシリーズ (インタラクシオン 2002) , Vol.2002, No.7, pp.6-13 (2002).
- [48] K. Kagawa, T. Nishimura, Y. Yamasaki, H. Asazu, T. Kawakami, J. Ohta, M. Nunoshita, and K. Watanabe, "Proposal and preliminary experiments of indoor optical wireless LAN based on a CMOS image sensor with a high-speed

readout function enabling a low-power compact module with large uplink capacity,” IEICE Trans. Comm. E86-B, pp. 1498-1507 (2003).

- [49] 中島秀之, “マイボタンによる状況依存支援,” 人工知能学会誌, 特集「モバイル・ウェアラブルインテリジェンス」, Vol.16, No. 6, pp.792-796 (2001).
- [50] H. Itoh, S. Yamamoto, M. Itwata, and Y. Yamamoto, “Guest guiding system based on the indoor laser radar system using HV targets and a frequency shifted feedback laser ”, ” Proc. of Int ’l Topical Meeting on Contemporary Photonics Technologies (CPT2000), Tc23, pp.117-118 (Jan.,2000).
- [51] 三菱プレシジョン社 トーキングサイン, (Dec. 2004).  
<http://www.mpcnet.co.jp/ts/index.html>
- [52] H. Itoh, T. Akiyama, Y. Nakamura, T. Nishimura, Y. Yamamoto, T. Hidaka, and H. Nakashima:“Spatial Optical Interconnection Technique with Low Power Consumption for a Location-Based Information Service Environment ”, ” Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)., Vol.11, No.3, pp.155-158 (2002).
- [53] A. G. Bell and S. Tainter, “Photophone Transmitter,” US patent 235,496, granted 1880/12/14, (Dec.,1880).  
<http://history.acusd.edu/gen/recording/images/PDRM0430a.jpg>
- [54] 伊藤日出男, 山本吉伸, 山本幸子, 吉田哲男, 阿部洋, 大宮司実, 原武文, 真野邦彦, 松田豊稔, 西山英治, 下田道成, 中村孝一郎, 伊藤弘昌, “室内低消費電力無線通信ターゲット用レーザーレーダシステム,” 電子技術総合研究所彙報, Vol.64, No.3, pp.79-85 (2000).
- [55] H. Itoh, “i-lidar : an indoor laser radar communication system for the location-based information service environment ”, ” Proceedings of World Multiconference on Systemics,Cybernetics and Informatics Vol. IV pp. 36 - 40 (July 18, 2001).
- [56] 伊藤日出男, 中村嘉志, 林新, 山本吉伸, 西村拓一, 中島秀之, “位置に基づく情報サービスのためのマルチビーム室内レーザーレーダ通信システム,” SICE シ

ステムインテグレーション部門講演会 (SI2002), 2P21-04 (Dec.,2002).

- [57] 伊藤日出男, “アイセーフ空間測位光通信による屋内情報ネットワーク,” 2002年度第11回 OEIC・光インターコネクション技術懇談会 東京 (Jan.,2003).
- [58] 伊藤日出男 “位置に基づく情報サービスのための近距離測位通信技術,” 光学, vol.33 No.10, pp.604-606 (Oct.,2004).
- [59] K. Kasahara, K. Nakamura, M. Sato, and H. Ito, “Dynamic properties of an all solid-state frequency-shifted feedback laser,” Quantum Electron., Vol.34, No.1, pp.192-203 (Jan., 1998).
- [60] 伊藤日出男, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 中島秀之, “非対称通信速度の省電力情報端末のための並列データ通信方式,” 情報処理学会 東京 (June 03, 2002)
- [61] 伊藤 日出男, 山本 淳一, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 滝沢國治, 中島秀之, “高分子分散型液晶の光制御特性,” 第63回応用物理学会学術講演会, 25a-L-10, 新潟大学, (Sep. 25, 2002).
- [62] H. Itoh, T. Akiyama, Y. Yano, Y. Nakamura, T. Nishimura, Y. Yamamoto, T. Hidaka and H. Nakashima, “Lower Voltage Operating Polymer Dispersed Liquid Crystal Light Modulator for the Location-based Information Service Environment ,” Contemporary Photonics Technology 2003(CPT2003), D-16, pp.69-70, Tokyo, (Jan.15,2003).
- [63] 伊藤日出男, 山本淳一, 中村嘉志, 西村拓一, 滝沢國治, 中島秀之, “ポリマネットワーク液晶を用いた空間測位光通信,” 電子情報通信学会技術研究報告, OPE2003-, (May 2003).
- [64] H. Itoh, “Ferroelectric liquid crystal spatial light modulator for location-based communication with higher data transfer rate ,” IQEC/LAT2002, Moscow Russia (June 26,2002).
- [65] 伊藤日出男, “位置に基づく通信の為に強誘電性液晶光シャッタの基本特性,” 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.102, No.188, pp.1-6 (2002).

- [66] 伊藤日出男, 西山英治, 松田豊稔, “室内レーザレーダ通信システム ( i-lidar )  
用 1.06  $\mu$  m PAL-SLM,” 日本光学会年次学術講演会講演予稿集, Optics  
Japan 2000 in Kitami, pp.221-222 (Oct., 2000).
- [67] 伊藤日出男, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 中島秀之, “施設内情報支援  
のための再帰光反射変調素子による空間光通信システム,” モバイルコン  
ピューティングとワイヤレス通信研究会, はこだて未来大学,(Nov. 29, 2002).
- [68] 伊藤日出男, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 中島秀之, “施設内情報支援のため  
の再帰光反射変調素子による空間光通信システム,” 情処研報 Vol.2002,  
No.115, pp.203-210, (Nov. 2002).
- [69] H. Itoh, X. Lin, T. Nakada, Y. Nakamura, T. Nishimura, Y. Yamamoto,  
H. Nakashima, and S. Klunifuji, “Reflectivity Modulating Free Space Communi-  
cation Terminal for Location-Based Information Service Environment ,” Proc.  
of International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, pp.93-95  
(Sep. ,2003).
- [70] 伊藤日出男, 林新, 中田豊久, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 國藤進, 中島秀之,  
“近距離モバイル情報サービスのための小型 PDA を用いた反射率変調空間光  
通信,” IPSJ-UBI 第 2 回研究会, pp.105-110, (Nov., 2003).
- [71] 浜松ホトニクス社 PPM (Programmable Phase Modu-  
lator) プログラマブル位相変調ユニット ( Jan.,2005).  
<http://www.hpk.co.jp/Jpn/products/etd/ppmj/ppmj.htm>
- [72] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, T. H. Wood, C. A. Burrus Jr. ,  
A. C. Gossard, and W. Wiegmann, “The quantum well self-electro-optic effect de-  
vice: Optoelectronic bistability and oscillation and self-linearized modulation,”  
IEEE J.Quantum Electron. Vol.QE-21, pp.1462-1476 (Sep. ,1985).
- [73] 年吉洋, 藤田博之, 河合高志, 植田敏嗣, “水晶のマイクロマシニングによる  
光シャッタ,” 電気学会 産業計測制御研究会 資料 IIC-92-16, pp.31 - 36.(Oct.19,  
1992).

- [74] 成瀬誠, 古木真, “面型光スイッチを用いた超高速信号のタイミング制御—分子フォトンクスと超高速フォトニックネットワーク,” CRL 第 105 回研究発表会 (Nov., 2003).  
<http://www2.nict.go.jp/kk/e414/105kenpatsu/ronbun/naruse.pdf>
- [75] 岡田雄介・後藤尊巨・中津原克己・中神隆清, “液晶偏光制御素子を用いた, 1.3  $\mu$  m 帯 4  $\times$  4 チャンネル平面型光スイッチ,” C-3-7, 電子情報通信学会 (2002) . <http://www.ieice.or.jp/jpn/event/pro/ge-con-pro/2002/pro-c.txt>
- [76] J. H. Park, J. K. Cho, K. Nishimura, and M. Inoue, “New drive line shape for reflective magneto optic spatial light modulator,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol.41, pp.2548-2251 (2002).
- [77] シャープ Web サイト, “液晶ディスプレイの原理と技術—液晶のタイプの進化,”(Dec.,2004).  
[http://www.sharp.co.jp/products/lcd/tech/s2\\_4\\_4.html](http://www.sharp.co.jp/products/lcd/tech/s2_4_4.html)
- [78] R. Williams, “Optical Rotatory Effect in the Nematic Liquid Phase of p-Azoxyanisole,” Phys. Rev. Lett. Vol.21, pp.342-344 (Aug. ,1968)
- [79] ウムフィルムホームページ (Jan., 2005).  
<http://www.nsg.co.jp/umu/product/film/>
- [80] 技術開発のあゆみ, 日本板硝子 (Jan.,2005).  
[http://www.nsg.co.jp/umu/product/film/f\\_ayumi.html](http://www.nsg.co.jp/umu/product/film/f_ayumi.html)
- [81] H. Itoh, T. Akiyama, Y. Ymamamoto, T. Hidaka and H. Nakashima, “ Modulation characteristics of liquid crystal light modulator for spatial optical communication , ” Technical Digest of Contemporary Photonics Technology (CPT2002)(Jan.,2002).
- [82] DataSlim2 ホームページ (2003). <http://www.citizen.co.jp/dataslim/>
- [83] H. Itoh, T. Nakada, S. Hiratsuka, Y. Nakamura, T. Nishimura, S. Kunifuji, H. Nakashima, and N. Iwasaki, “Indoor location and communication system for

- the Last-Ten-Meter information services , ” Proc. of IEEE Pacific Rim Conf. on Communications, Computers, and Signal Processing (PACRIM'03), Vol. 1, F38. 2, pp. 482-485, Canada, (Aug., 2003).
- [84] T. Nakada, H. Itoh, S. Kunifuji, H. Nakashima, “Robust Free Space Optical Communication for Indoor Information Environment,” Proc. of SPIE Vol.5264, Optomechatronic Systems IV, pp.214-225 (Oct.,2003).
- [85] X. Lin and H. Itoh, “ Wireless Personal Information Terminal for Indoor Spatial Optical Communication System Using a Modified DataSlim2,” *Optical Review*, Vol.10, No.3, pp.155-160, (May-Jun 2003).
- [86] 伊藤日出男, 中村嘉志, 林新, 西村拓一, “多言語対応無電源空間光通信端末のための波長多重光学フィルタ,” 信学技報, OPE2004-176, pp.13-16 (Dec.,2004).
- [87] 杉原紘一, 和田賢憲, “光通信用光学薄膜,” 光通信技術の最新資料集 7, オプトロニクス社, pp.227-231 (Apr.,2002).
- [88] 伊藤 日出男, “レーザービームのスキャンを用いた新技術,” 光応用技術研究会第5回研究会 つくば研究支援センター (Apr.,2001).
- [89] 伊藤 日出男, 緒方顕, 秋山猛, 日高建彦, 中島秀之, “2軸自動回転ステージとレーザ測距儀による室内レーザーダ,” 第48回応用物理学会講演予稿集 I, p.185 (Mar., 2001).
- [90] 伊藤日出男, 秋山猛, 内山明男, 山本淳一, 林新, 中村嘉志, 山本吉伸, 西村拓一, 中島秀之, “室内レーザーダによるアイセーフ空間光通信,” 日本光学会 Optics Japan, 東京農工大学, (Nov. 04, 2002).
- [91] H. Itoh, Y. Nakamura, X. Lin, and T. Nishimura, “Battery-less spatial optical communication terminals for location-based indoor information services , ”(invited) To be presented at Int'l Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2005), Yalta (Sep., 2005).

- [92] 伊藤日出男, 内山明男, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 根本俊雄, 中島秀之, “ポリイミドヒンジMEMSミラーによるレーザービームの追尾特性,” 第63回応用物理学学会学術講演会, 新潟大学,(Sep.25, 2002).
- [93] 伊藤日出男, “ユビキタスとMEMSへの期待,” オリンパス光学工業MEMSセミナー, 機械振興会館,(Mar. 4, 2003).
- [94] 伊藤日出男, 中村嘉志, 林新, 西村拓一, 山本吉伸, 中島秀之, “近距離位置情報サービスのための空間光測位通信システム,” 第22回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, O-6-01, pp.145-146 (Jun.,2003).
- [95] L. Y. Lin, E. L. Goldstein, K. J. M. Simkmons and R. W. Tkach, *Photon. Tech. Lett.* vol.10 p.1425 (1998).
- [96] H. Toshiyoshi, W. Piyawattanametha, C.T.Chan and M. C. Wu, *Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, Supplemental Digest of Late News Poster Session*, p.7, (2000).
- [97] H. Itoh, K. Kosugi, X. Lin, Y. Nakamura, T. Nishimura, K. Takizawa and H. Nakashima, “Spatial optical point-to-point communication system for indoor location-based information services ”, ICO '04 Tokyo pp.185-186 (July, 2004).
- [98] 堀場製作所 Web サイト, “分光器の原理 グレーティングの回折,” (Dec.2004).  
[http://www.jyhoriba.jp/product\\_j/monochro/principle/index.htm](http://www.jyhoriba.jp/product_j/monochro/principle/index.htm)
- [99] 藤井武, 角克人, 品田英俊, 高田倫久, “インターナルドラム方式レコーダにおけるマルチビーム露光技術の開発,” FUJIFILM RESEARCH & DEVELOPMENT, No.47, pp.34-39 (2002).
- [100] J. H. Trisnadi, C.B.Carlisle and R. Monteverde, “Overview and applications of Grating Light Valve (TM) based optical write engines for high-speed digital imaging,” *Photonics West2004 –Micromachining and Microfabrication Symposium*, pp.1-13 (Jan., 2004).
- [101] 井上光輝, J. K. Cho, “磁気光学空間光変調器,” 日本応用磁気学会 127 回研究会資料, pp.47-54 (Jan.,2993).

- [102] 大澤俊一，伊藤日出男，中村嘉志，西村拓一，林新，“位置に基づく情報サービスのための PAL-SLM を用いた CGH ビーム偏向システム,” 信学技報，OPE2004-176, pp.37-43 (Dec.,2004).
- [103] H. Miyajima, “Development of a MEMS electromagnetic optical scanner for a commercial laser scanning microscope,” J. of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems, Vol.3, Issue 2, pp. 348-357 (Apr.,2004).
- [104] H. Itoh ,Y. Yamamoto and H. Nakashima, “ Modulation characteristics of a liquid crystal light modulator for the locaion based information service environment , ” Technical digest of CLEO/Pacific Rim 2001 Vol. II pp. 266 -267 (July,2001).
- [105] H. Itoh, A. Uchiyama,Y. Nakamura, Y. Yamamoto,T. Nishimura, T. Nemoto, H. Nakashima and N. Iwasaki, “CHARACTERISTICS OF A POLYIMIDE-HINGED MEMS BEAM SCANNER FOR LOCATION-BASED INFORMATION SERVICES , ” Proc. of CLEO/Pacific Rim 2003, TU3H-(9)-3, p.39, Taipei, Taiwan, (Dec., 2003).
- [106] H. Miyajima, N. Asaoka, M. Arima, Y. Minamoto, K. Murakami, K. Tokuda, and K. Matsumoto, “A Study on Torsional Characteristics of Polyimide Hinges,” Tech.Digest, Transducers’99, pp.372-375 (1999).
- [107] 内山明男，伊藤日出男，中村嘉志，西村拓一，山本吉伸，根本俊雄，中島秀之，“ポリイミドヒンジ MEMS ミラーの駆動特性,” 2002 秋季応用物理学会 25a-L-11(Sep.,2002).
- [108] 林新，伊藤日出男，“LED 付きカメラを用いたウェアラブル空間光通信環境のための小型移動端末の位置と情報認識方式,” Optics Japan2004 講演予稿集, 4pH2, pp.136-137 (Nov.,2004).
- [109] 浜松ホトニクス社インテリジェントビジョンシステム (Jan., 2005).  
<http://www.hpj.co.jp/Jpn/research/vision/visionfuture.htm>
- [110] 愛・地球博公式ウェブサイト <http://www.expo2005.or.jp/> (Nov.,2004).



- [111] 京セミホームページ (Dec.,2004). <http://www.kyosemi.co.jp/>
- [112] J.Nakata, "Spherical Solar Cells Solve Issue of 3-D Sunlight Reception," Technol. Focus, AEI, pp.45-48 (Feb., 2003).  
<http://www.kyosemi.co.jp/pdf/kyosemi>
- [113] R. J. Mailloux, "Phased Array Theory and Technology," Proc. of IEEE, Vol. 70, No. 3, pp.246-291 (Mar.,1982).
- [114] H. Itoh, F. Sauer, S. Mukai, and H. Yajima, "FRINGE SHIFTING LASER DIODES AND THEIR APPLICATION TO BINARY LOGIC OPERATIONS," Third Optoelectronics Conference (OEC'90) Technical Digest, Makuhari, (Jul. ,1990).
- [115] 松下電工プレスリリース, "リアルタイムで「形状 + 奥行」が同時に計測できる「距離画像カメラ」実用化・本格普及に目処," (Feb., 2004).  
<http://www.mew.co.jp/press/0402/0402-18.htm>
- [116] 新藤智則, "レーザを使わない測距法 撮像素子とLEDで実現," 日経エレクトロニクス 3-29, p.33, (Mar.,2004).
- [117] 大澤俊一, 伊藤日出男, 徳田正満, "赤外光反射画像による端末の位置認識とPAL-SLMによる赤外ビーム偏向照射システム," Optics Japan2004 講演予稿集, 4pH5, pp.142-143 (Nov.,2004).

# 本研究に関する発表論文

## 論文

1. 伊藤日出男, 山本吉伸, 山本幸子, 吉田哲男, 阿部洋, 大宮司実, 原武文, 真野邦彦, 松田豊稔, 西山英治, 下田道成, 中村孝一郎, 伊藤弘昌: “室内低消費電力無線通信ターゲット用レーザレーダシステム,” 電子技術総合研究所彙報, Vol.64, No.3, pp.79-85 (2000).
2. H. Itoh, T. Akiyama, Y. Nakamura, T. Nishimura, Y. Yamamoto, T. Hidaka, H. Nakashima : “Ferroelectric liquid crystal spatial light modulator for location-based communication with higher data transfer rate ,” Proc. of SPIE Vol.5135, Optical Information, Data Processing and Storage, and Laser Communication Technol., pp.78-83 (Jun.,2002).

## 国際会議

1. H. Itoh, S. Yamamoto, M. Iwata, and Y. Yamamoto : “Guest guiding system based on the indoor laser radar system using HV targets and a frequency shifted feedback laser ,” Proc. of Int 'l Topical Meeting on Contemporary Photonics Technologies (CPT2000)., Tc23.pp.117-118 (Jan.,2000).
2. H. Itoh ,Y. Yamamoto and H. Nakashima : “ Modulation characteristics of a liquid crystal light modulation film for location-based spatial optical communication ,” CLEO/Pacific Rim 2001 Makuhari, Japan (July,2001).
3. H. Itoh ,Y. Yamamoto and H. Nakashima : “ Modulation characteristics of a liquid crystal light modulator for the locaion based information service environment ,” Technical digest of CLEO/Pacific Rim 2001 Vol. II pp. 266 -267 (July,2001).
4. H. Itoh : “i-ladar : an indoor laser radar communication system for the location-based information service environment ,” Proceedings of World Multiconference on Systemics,Cybernetics and Informatics Vol. IV pp. 36 - 40 (July, 2001).

5. H. Itoh and H. Nakashima : “Location-based Communication Infrastructure for the Cyber Assist Information Service Environment” International Conference on Advances in Infrastructure for Electronic Business, Science and Education on the Internet , ” SSGRR2001 L’quila, Italy (Aug., 2001).
6. H. Itoh, T. Akiyama, Y. Yamamoto, T. Hidaka and H. Nakashima : “ Modulation characteristics of liquid crystal light modulator for spatial optical communication , ” Technical Digest of Contemporary Photonics Technology (Jan.,2002).
7. H. Itoh : “Ferroelectric liquid crystal spatial light modulator for location-based communication with higher data transfer rate , ” IQC/LAT2002, Moscow Russia (June,2002).
8. H. Itoh, T. Akiyama, Y. Yano, Y. Nakamura, T. Nishimura, Y. Yamamoto, T. Hidaka and H. Nakashima : “Lower Voltage Operating Polymer Dispersed Liquid Crystal Light Modulator for the Location-based Information Service Environment , ” Contemporary Photonics Technology 2003(CPT2003), D-16, pp.69-70, Tokyo, (Jan., 2003).
9. H. Itoh, T. Nakada, S. Hiratsuka, Y. Nakamura, T. Nishimura, S. Kunifuji, H. Nakashima, and N. Iwasaki : “Indoor location and communication system for the Last-Ten-Meter information services , ” Proc. of IEEE Pacific Rim Conf. on Communications, Computers, and Signal Processing (PACRIM’03), Vol. 1, F38. 2, pp. 482-485, Canada, (Aug., 2003).
10. H. Itoh, X. Lin, T. Nakada, Y. Nakamura, T. Nishimura, Y. Yamamoto, H. Nakashima, and S. Kunifuji : “Reflectivity Modulating Free Space Communication Terminal for Location-Based Information Service Environment , ” Proc. of International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, pp.93-95 (Sep. , 2003).
11. H. Itoh, A. Uchiyama, Y. Nakamura, Y. Yamamoto, T. Nishimura, T. Nemoto, H. Nakashima and N. Iwasaki : “CHARACTERISTICS OF A POLYIMIDE-HINGED MEMS BEAM SCANNER FOR LOCATION-BASED INFORMA-

TION SERVICES ,” Proc. of CLEO/Pacific Rim 2003, TU3H-(9)-3, p.39, Taipei, Taiwan, (Dec. , 2003).

12. H. Itoh, K. Kosugi, X. Lin, Y. Nakamura, T. Nishimura, K. Takizawa, and H. Nakashima : “Spatial Optical point-to-point communication system for indoor location-based information services ,” Proc. of 2004 ICO International conference Optics and Photonics in Technology Frontier, 13D2-28, pp.185-186 (July, 2004).
13. H. Itoh, Y. Nakamura, X. Lin, and T. Nishimura : “Battery-less spatial optical communication terminals for location-based indoor information services ,”(invited) To be presented at Int’l Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2005), Yalta (Sep. , 2005).

## 研究会等

1. 伊藤日出男, 西山英治, 松田豊稔: “室内レーザレーダ通信システム ( i-lidar ) 用 1.06  $\mu$  m PAL-SLM,” 日本光学会年次学術講演会講演予稿集, Optics Japan 2000 in Kitami, pp.221-222 (Oct. , 2000).
2. 伊藤日出男, 緒方顕, 秋山猛, 日高建彦, 中島秀之: “2軸自動回転ステージとレーザ測距儀による室内レーザレーダ,” 第48回応用物理学会講演予稿集 I, p.185 (Mar., 2001).
3. 伊藤日出男: “レーザービームのスキャンを用いた新技術,” 光応用技術研究会第5回研究会 つくば研究支援センター (Apr.,2001).
4. 伊藤日出男: “i-lidar:位置計測と通信の同時実現による情報サービスシステム,” 情処研報 Vol.2001, No.83, pp.181-187 (Sep.,2001).
5. 伊藤日出男: “サイバーアシスト:位置に基づく通信技術を実現する装置実装,” 平成13年度NEDO研究養成事業 先端技術講座, 産総研臨海副都心センター (Dec. , 2001).
6. 伊藤日出男: “サイバーアシストプロジェクト -光デバイスを中心に-,” オプトロニクス Vol.243, pp.189-193(Mar., 2002).

7. 伊藤日出男, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 中島秀之: “非対称通信速度の省電力情報端末のための並列データ通信方式,” 情報処理学会 東京 (June, 2002)
8. 伊藤日出男: “マイボタンと i-lidar: 近距離の位置に基づく通信情報サービスのためのレーザレーダ通信システム,” 日本オプトメカトロニクス協会 東京, (June, 2002).
9. 伊藤日出男: “位置に基づく通信の為の強誘電性液晶光シャッタの基本特性,” 信学技報 Vol.102, No.188, pp.1-6 (July, 2002).
10. 伊藤日出男, 秋山猛, 日高建彦, 中島秀之, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸: “位置に基づく室内情報サービス環境のための液晶フィルムの変調特性 III,” 第 63 回応用物理学会学術講演会, 新潟大学, (Sep. , 2002).
11. 伊藤日出男, 山本淳一, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 滝沢國治, 中島秀之: “高分子分散型液晶の光制御特性,” 第 63 回応用物理学会学術講演会, 新潟大学, (Sep. , 2002).
12. 伊藤日出男, 内山明男, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 根本俊雄, 中島秀之: “ポリイミドヒンジ MEMS ミラーによるレーザビームの追尾特性,” 第 63 回応用物理学会学術講演会, 新潟大学, (Sep. , 2002).
13. 伊藤日出男, 西村拓一, 森彰: “通信システムの概観,” 情報処理, Vol. 43, No. 8, pp. 884- 887 (Aug. , 2002).
14. 伊藤日出男, 秋山猛, 内山明男, 山本淳一, 林新, 中村嘉志, 山本吉伸, 西村拓一, 中島秀之: “室内レーザレーダによるアイセーフ空間光通信,” 日本光学会 Optics Japan, 東京農工大学, (Nov. , 2002).
15. 伊藤日出男: “マイボタンと i-lidar: 近距離の位置に基づく通信情報サービスのためのレーザレーダ通信システム,” 光技術コンタクト, Vol.40, No.8, pp.52-53, (Aug. , 2002).

16. 伊藤日出男, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 中島秀之: “施設内情報支援のための再帰光反射変調素子による空間光通信システム,” 情処研報 Vol.2002, No.115, pp.203-210, (Nov. , 2002).
17. 伊藤日出男, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 中島秀之: “施設内情報支援のための再帰光反射変調素子による空間光通信システム,” モバイルコンピューティングとワイヤレス通信研究会, はこだて未来大学,(Nov. , 2002).
18. 伊藤日出男, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 中島秀之: “施設内情報支援のための再帰光反射変調素子による空間光通信システム,” 情処研報 Vol.2002, No.115, pp.203-210, (Nov. , 2002).
19. 伊藤日出男: “アイセーフ空間測位光通信による屋内情報ネットワーク,” 2002年度第11回 OEIC・光インターコネクション技術懇談会 東京 (Jan. , 2003).
20. 伊藤日出男: “小型無電源情報端末 CoBIT,” 光技術に関する産官学マッチングシンポジウム, 早稲田大学国際会議場, (Feb. , 2003).
21. 伊藤日出男: “ユビキタスと MEMS への期待,” オリジナル光学工業 MEMS セミナー, 機械振興会館,(Mar. , 2003).
22. 伊藤日出男, 山本淳一, 中村嘉志, 西村拓一, 滝沢國治, 中島秀之: “ポリマネットワーク液晶を用いた空間測位光通信,” 信学技報, OPE2003-21, (May, 2003).
23. 伊藤日出男, 中村嘉志, 林新, 西村拓一, 山本吉伸, 中島秀之: “近距離位置情報サービスのための空間光測位通信システム,” 第22回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, O-6-01, pp.145-146 (June, 2003).
24. 伊藤日出男, 林新, 中田豊久, 中村嘉志, 西村拓一, 山本吉伸, 國藤進, 中島秀之: “近距離モバイル情報サービスのための小型 PDA を用いた反射率変調空間光通信,” IPSJ-UBI 第2回研究会, pp.105-110, (Nov., 2003).
25. 伊藤日出男, 中村嘉志, 林新, 山本吉伸, 西村拓一, 中島秀之: “位置に基づく情報サービスのためのマルチビーム室内レーザーレーダ通信システム,” SICE システムインテグレーション部門講演会 (SI2002), 2P21-04 (Dec.,2002).

26. 伊藤日出男, “アイセーフ空間測位光通信による屋内情報ネットワーク,” 2002年度第11回 OEIC・光インターコネクション技術懇談会 東京 (Jan., 2003).
27. 伊藤日出男: “位置に基づく情報サービスのための近距離測位通信技術,” 光学, vol.33 No.10, pp.604-606 (Oct., 2004).
28. 伊藤日出男, 中村嘉志, 林新, 西村拓一: “多言語対応無電源空間光通信端末のための波長多重光学フィルタ,” 信学技報, OPE2004-176, pp.13-16 (Dec., 2004).