

## 〔研究〕

# 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 Indoor Laser Radar System for Wireless Communicating Targets with Low Power Consumption

伊藤 日出男 H. ITOH	山本 吉伸 Y. YAMAMOTO	山本 幸子 S. YAMAMOTO	吉田 哲男 T. YOSHIDA
阿部 洋 H. ABE	大宮 司実 M. DAIGUJI	原 武文 T. HARA	真野 邦彦 K. MANO
松田 豊稔 T. MATSUDA	西山 英治 E. NISHIYAMA	下田 道成 M. SHIMODA	中村 孝一郎 K. NAKAMURA
			伊藤 弘昌 H. ITO

A laser radar system for an information server and multiple wireless communicating targets with low power consumption has been developed for the future indoor navigating service environment. For the purpose, prototypes of an indoor laser radar and hyper versatile (HV) targets were developed. The indoor laser radar system is a three-dimensional high-precision positioning system with a Frequency Shifted-Feedback (FSF) laser, a local optical path for beat frequency measurement, beam-scanning devices (galvano-meter mirrors), and a personal computer. In our project, the characteristics of the developed indoor laser radar system were evaluated, an optimal drive method for the galvano-meter mirrors was discussed, and a method to design a device that reflects an incident beam to the laser light source was established.

### § 1 はじめに

将来の高度情報化社会においては、室内での観客の案内や自律ロボットの航法支援など、ターゲット(利用者や利用対象物)の現在位置情報を利用した近距離閉空間における様々なサービスが一般的なものとなると考えられる。そのためにはそれぞれのターゲットの高精度な位置の検知と、情報サーバとターゲット間の通信ネットワークの構築が必要である。特に、ターゲットが室内に多数存在し、不定期的に移動する、ターゲットがシールあるいはカード状というように寸法が大きく制限されている、あるいは消費電力が非常に限られており、かつ使い捨て可能なほど低価格でなければならない、という用途は数多く存在するが、従来の位置測定装置とBluetooth<sup>1)</sup>のような無線イン

ターフェースの組み合わせでは消費電力、位置検出精度、価格等の面で実現が困難と考えられる。そこで本研究開発では、これらの要求を満たすような、ターゲットの位置を精密に取得すると共に、ターゲットと光通信を行う室内レーザレーダシステムと、低消費電力光反射率変調ターゲット素子(HV(hyper versatile)ターゲット)のプロトタイプの開発を行う。Fig.1に研究開発構想の例を示す。室内レーザレーダは天井の一角に配置され、本(備品)に貼付けられたHVターゲットの位置を検出すると共に、空間光通信によりデータ通信を行う。

### § 2 研究の概要

室内レーザレーダシステムのプロトタイプの構成を

KEY WORDS : レーザレーダ, 位置測定, 光通信, 再帰反射

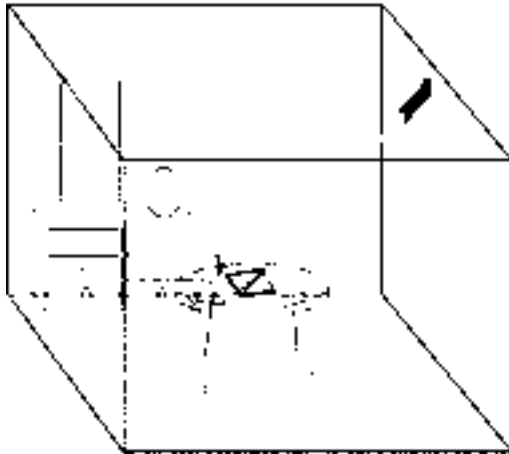


Fig.1 室内レーザーダ概念構想図

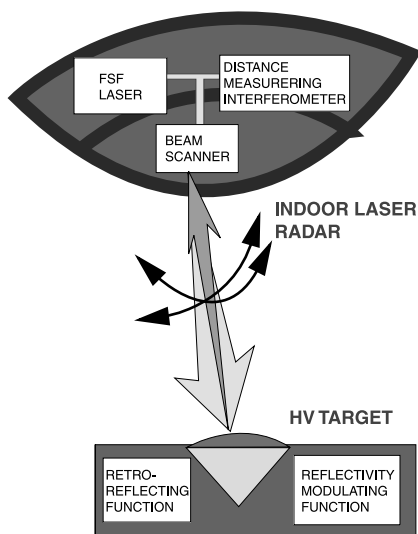


Fig.2 室内レーザーダプロトタイプ

Fig.2に示す。ターゲットの三次元的な位置の測定法としては、三角測量や光や音波信号の往復時間測定による極座標計測などによる位置計測も考えられるが、本研究では赤外周波数シフト帰還型レーザー(FSFレーザー)<sup>2,3)</sup>を用いた干渉距離計測とレーザービームの2次元偏向による「室内レーザーダ」による位置計測法を採用した。また、ビームの2次元走査は直交配置したガルバノミラーを2枚用いて実現した。

「HVターゲット」は、コーナーキューブやガラスビーズのような光源に対して再帰反射を実現する素子により、レーザーダから照射されたレーザー光をレーダに正対して反射するとともに、レーザーと再帰反射素子の間に透過率変調素子を付加する等により、等価的な反射率に変調を加え、受動的なデータ送信を実現する。HVターゲットとしては、Table 1に示すように、コー

Table.1 HVターゲットの実装レベル

レベル1	: コーナーキューブ+液晶光シャッタ
レベル2	: コーナーキューブアレイ+液晶光シャッタ
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

ナーキューブに液晶シャッタを組み合わせる単純な構成から、小体積で高速動作が可能な構成まで各種の実装レベルが考えられるが、今回の研究開発では研究期間等の制限により、レベル1およびレベル2での実装によりシステムとしての実験を行った。また、レベル3の実装における諸課題を検討するため、理論的な検討を加えた。さらに、実際のデモンストレーションシステムとして、動物園の案内掲示板システムを構築し、その性能評価を行った。

### §3 室内レーザーダシステム

#### 3.1 周波数シフト帰還型レーザー(FSFレーザー)

本室内レーザーダシステムには、光源として周波数シフト帰還型レーザー(FSFレーザー)<sup>2,3)</sup>を用いた。FSFレーザーは、利得媒質として半導体レーザー励起Nd:YVO<sub>4</sub>結晶を用い、発振波長1.064 μmでの動作を得ている。結晶は半導体レーザーで励起することにより、効率の良い動作が期待されるとともに、レーザーターゲット受光系の間での反射効率などを考慮しても、十分な受光強度を得ることができる。このレーザー結晶の発振波長1.064 μmでは、JISにおいて60 mWまでの人体へのレーザー被曝放出限界が認められているものの、人体に対する安全性を考慮すると1.5 μm以上のより長波長の、いわゆるアイセーフレーザーの採用が望ましく、プロジェクトではデモシステムとして1.064 μm発振のレーザーを使用したものの、並行して1.55 μm動作のレーザーの開発も実施した。

FSFレーザーの共振器内での光周波数シフトは、音響光学素子の1次回折光をフィードバックすることにより実現できる。Fig.3に製作したFSFレーザーおよび距離測定干渉光学系の写真を示す。共振器の全長は80 mmである。

FSFレーザーにおいて、励起用半導体レーザー集光レン

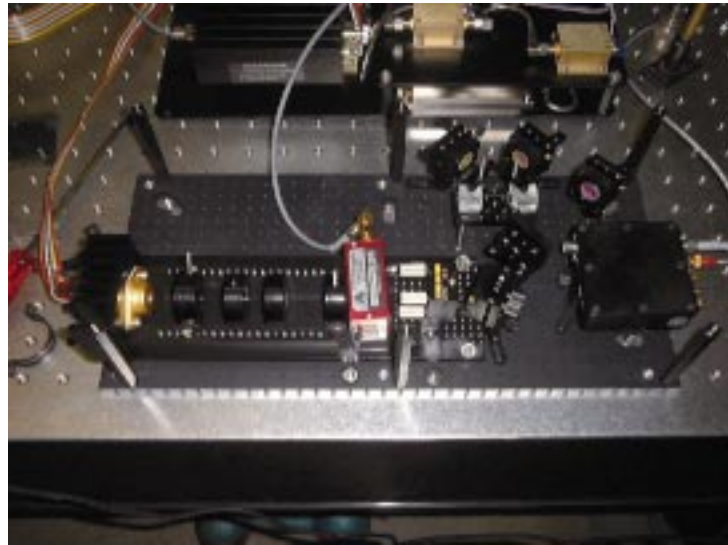


Fig.3 FSFレーザおよび距離測定干渉光学系

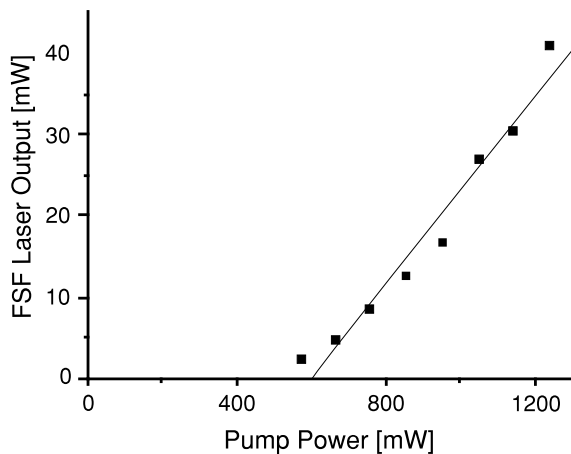


Fig.4 FSFレーザの励起光強度 - 発振光強度特性

ズ、レーザ結晶、音響光学素子、および出力ミラーの光軸調整を行い、レーザの発振を実現した。Fig.4に半導体レーザの励起光強度に対するFSFレーザの発振出力の関係を示す。600 mWでFSFレーザが発振を開始し、励起光強度1250 mWで発振出力40 mWを得ることができた。

### 3.2 位置計測<sup>4)</sup>

本研究では距離測定装置としてFSFレーザシステムと、光を偏向し、同時に照射方向を検出する2次元走査装置を組み合わせた室内レーザレーダシステムを提案している。レーザ光を任意方向に偏向するためには、いくつかの方法があるが、本研究では2枚のミラー

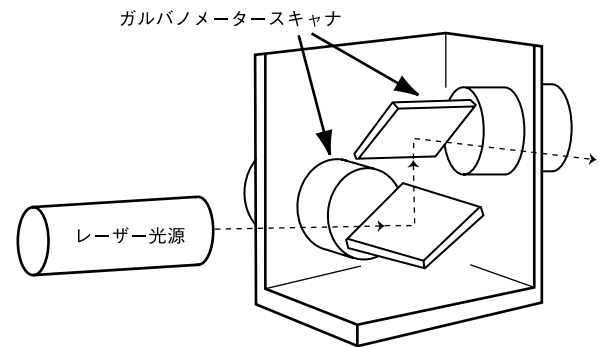


Fig.5 2次元走査装置

をガルバノメータスキャナで回転させることにより偏向させる方法を採用した。機械的な動作でミラーを回転させるため、速度や角度範囲の面で限界があるが、現在、比較的入手が容易であり、コストパフォーマンスの面でもバランスがとれている点を考慮して、ガルバノメータスキャナを選定した。

Fig.5のように2台のガルバノメータスキャナを、一方を縦方向、他方を横方向の回転になるよう回転軸を直交させて配置すれば、2枚のミラーの向きの組み合わせにより、可動範囲内で任意の方向にレーザー光を偏向できる。また、ミラーの回転角度は、スキャナに内蔵されたセンサにより随時検出することができる。この装置は縦横という2次元の方向にレーザー光を偏向させることから、以下2次元走査装置と称する。

2次元走査装置とFSFレーザ装置を組み合わせて、Fig.6のようなレーザレーダシステムを設計した。光源

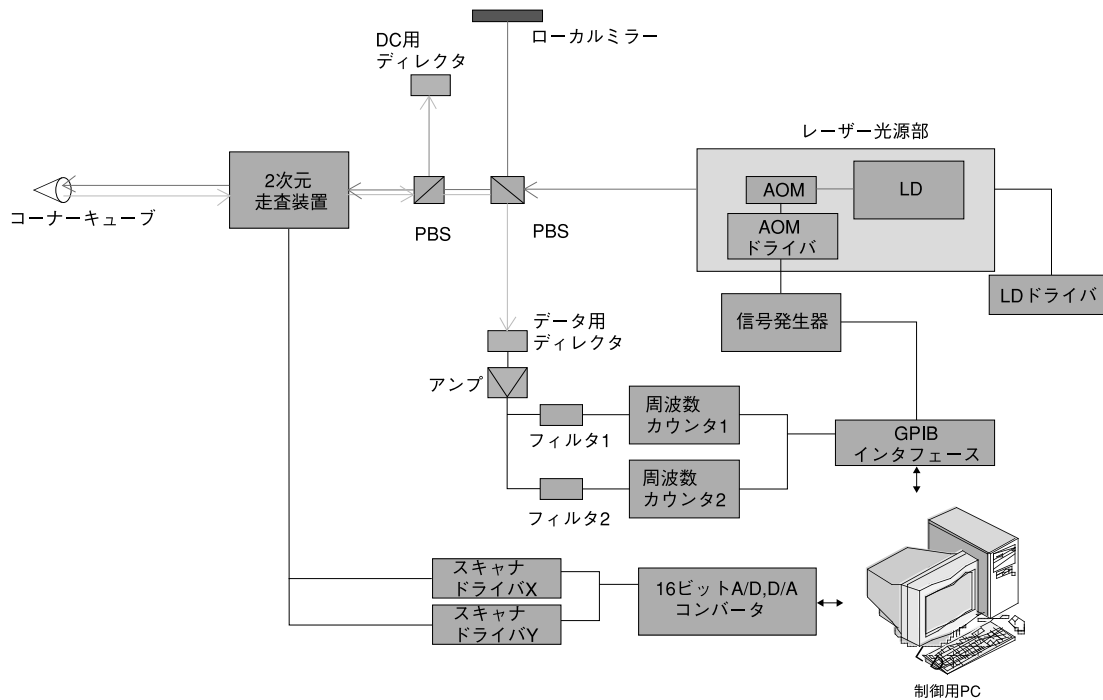


Fig.6 レーザレーダシステムブロック図

からの光信号はスキャナにより走査される。対象物体からの反射光は、出射光とほぼ反対の経路をたどり、フォトディテクタに入射される。得られたデータは制御用パーソナルコンピュータで処理され、対象物体の位置情報が算出される。

図中では、対象物体としてコーナーキューブプリズムを使用している。この装置は入射してきた光信号を再帰反射して、常に光源側に返送する機能を持っている。

室内で対象物の位置情報を短時間で、かつ効率よく検出するために、システムの動作を2段階に分けて行う。第1段階はプレスキャン動作で、対象となる空間すべてに対しレーザー光を連続的に走査させる。その間に対象物に取り付けた反射器(ターゲット)から反射光があれば、そのときのレーザー光照射方向を記録しておく。第2段階は距離測定動作で、プレスキャン動作により得た、対象物の存在する方向に向けて再度レーザー光を照射して距離測定を行う。対象が複数個存在する場合は個数分繰り返し距離測定を行う。

現状では、第1段階のプレスキャン動作が3~4秒、第2段階の距離測定動作がターゲット1個あたり0.1秒程度の時間を要するため、さらに高速動作のための制御方法の研究も並行して進めている。

#### § 4 反射型空間光変調素子を使用したHVターゲットの検討

有効な距離測定およびデータ通信範囲を増大するには、入射する電磁波の入射方向と周波数に対して高い反射率を持つ反射デバイスの開発が必要である。しかも、反射デバイスはその表面がレーザーダに常に正対して配置されるわけではなく、斜め方向からのレーザー光の入射に対しても再帰的に反射をする必要がある。コーナーキューブはその条件を満たす反射素子であるが、その体積も質量も大きいという欠点を持っている。ここで、誘電体繰返し多層膜の入射光側に屈折率変調型の回折格子をコーティングした構造の素子を使用し、回折格子に光が入射すると伝搬方向が異なるいくつかの回折光が生じるので、リトロマウント<sup>4)</sup>つまり回折光の一つが入射光の到来方向に伝搬するような光学配置にすれば、このデバイスは反射板として機能する。そこでこの素子による、コーナーキューブ機能の実現について理論的な検証を行った。

##### 4.1 反射デバイス

Fig.7に示すように、反射デバイスはXY平面と平行

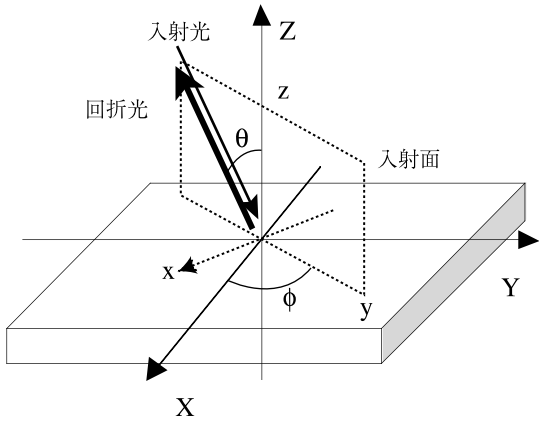


Fig.7 入射光と反射板

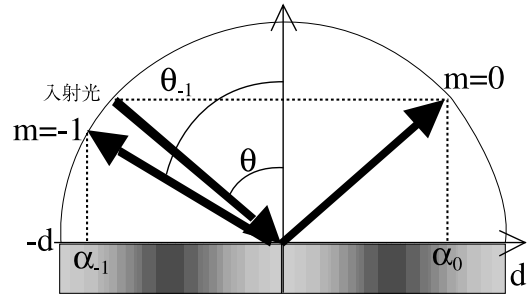


Fig.9 入射光と回折光 (-1次の回折波がリトロマウントに近いとき)

面と垂直)の平面電磁波が  $\theta$  の角度で入射したときの回折光を求める。s偏光とp偏光入射の問題では、それぞれ回折波の電界と磁界のz成分を求めればよく、これを  $s, p$  で表す。

この回折波  $s, p$  は、平面波の重ね合わせで次のように表現される<sup>4)</sup>：

$$\Psi^{s,p}(P) = \sum_{m=-N}^N A_m^{s,p}(N) \varphi_m(P) \quad (1)$$

ここに  $\varphi_m(P)$  はm次の回折波を表し、波数を  $k = 2\pi / d$  とするとき

$$\varphi_m(P) = \exp(i\alpha_m y + i\beta_m z) \quad (2)$$

$$\alpha_m = k \sin \theta + 2m\pi / d \quad (3)$$

$$\beta_m^2 = k^2 - \alpha_m^2 \quad \text{Re}(\beta_m) \geq 0, \text{Im}(\beta_m) \geq 0$$

で与えられる。

#### 4.2 リトロマウント

m次の回折波が  $\text{Re}(\alpha_m > 0)$  を満たすとき、この回折波は式(3)の  $\alpha_m$  の方向に伝搬する。リトロマウントは、Fig.9に示すようにm次の回折波が入射波の到来方向に伝搬するような光学配置である。m次の回折光がリトロマウント( $\alpha_m = -\alpha_0$ )になるのは、式(3)から

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} \quad (n = |m|) \quad (4)$$

が成立するときである。従って、式(4)を満たす格子の周期dを選んでやれば、m次の回折波は入射波の到来方向に伝搬し、Fig.8のデバイスは反射板として動作する。ただし、実際にこのデバイスを反射板として利用するときには、周期dを変化させる範囲が問題となる。

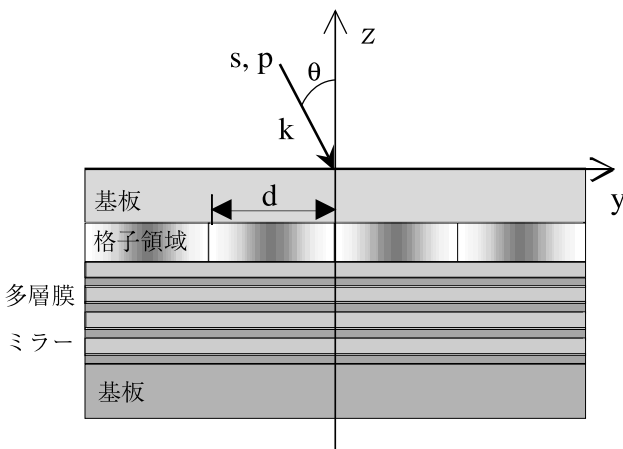


Fig.8 反射板の断面構造

で、入射光は方位角が  $\theta$  で天頂角が  $\phi$  の方向から入射するものとする。ここでは、方位角  $\theta$  が既知であるとして、入射光の到来方向に回折光の一つを伝搬させるデバイスの構造について考察する。

反射デバイスは、Fig.8に示すような上下のガラス基板の内側に屈折率分布が周期的である格子領域と誘電体多層膜ミラーを挟んだ構造である。格子領域は回折光を発生させるためのものであり、ここでは入射面(波数ベクトルkとZ軸が作る平面)内に回折光が生じるように、屈折率分布  $n(y, z)$  は、入射面と平行な方向(y軸方向)に周期的で、入射面と垂直な方向(x軸方向)には一様であるとする。誘電体多層膜ミラーは、入射光が格子領域を透過して反射率が低下するのを防止するためのもので、光学膜厚が  $\lambda/4$  の高屈折率と低屈折率の繰返し誘電体多層膜である。

この反射デバイスに、波長が  $\lambda$  のs偏光(入射波の電界が入射面に垂直)またはp偏光(入射波の磁界が入射

Fig.10は、波長を $1.3\ \mu\text{m}$ として $m$ 次( $n=|m|$ )の回折光がリトロマウントとなる周期 $d$ を入射角の関数として求めたものである。この図から、例えば格子の周期を $d > 10\ \mu\text{m}$ の範囲で変化させ $n=3$ 次までの回折光を利用するとすれば、入射角が $12^\circ$ 程度まではこれらの回折光によりリトロマウントを実現できる。

このデバイスの反射率は、式(1)の回折波から計算される。本研究では、この回折波を算出するのに、RCWA法<sup>6)</sup>を適用している。RCWA法は、周期構造からの回折問題の有力な数値解法の一つであり、特に屈折率変調型の回折格子の問題には有効であるとされている。

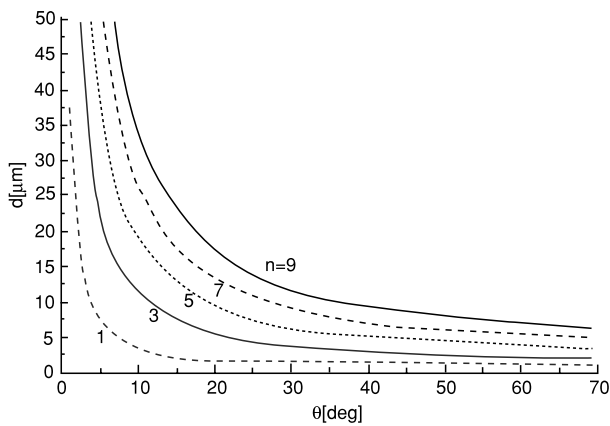


Fig.10 周期 $d$ と入射角の関係

## §5 デモンストレーションシステム<sup>7,8)</sup>

HV ターゲットとFSF レーザレーダを用いた室内レーザレーダネットワークシステムの実施例として、Fig.11に示すような動物園の案内板システムのデモンストレーションを行った。

このシステムは案内板に向かったユーザに案内板に表示された動物についての詳細情報をHV ターゲットを通して提供するもので、見出しに相当する大まかな情報が描かれた案内板とその上部に配置されたFSF レーザレーダおよび複数のユーザが保持する液晶情報ディスプレイが装備されたHV ターゲットにより構成される。

案内板上部に配備されたFSFレーザレーダはまず案内板の前を走査し、案内板前方に集合したHV ターゲットに装備されたコーナーキューブの位置を搜索する。HV ターゲットには2個のコーナーキューブが間隔を空けて配置されており、この2個のコーナーキューブの位置を3次元的に測定することでそのHV ターゲットの3次元姿勢を計測し、ターゲットが案内板のどこを指しているかを計算し、詳細情報をターゲットに向かってダウンロードする。ダウンロードは光通信で実現する予定であるが、研究期間の制約から無線LAN等を利用して模擬的に実現することも考慮されている。

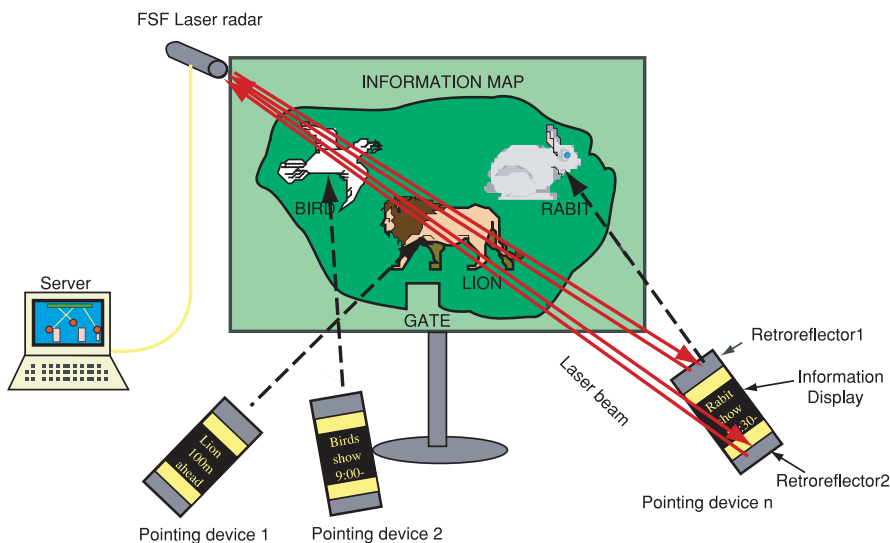


Fig.11 動物園案内板デモンストレーションシステム

## § 6 まとめ

本プロジェクトの遂行により室内レーザレーダの開発と性能評価を実施し、ガルバノミラーの最適な駆動方式を検討し、さらにコーナーキューブ特性を示す平面型反射デバイスの設計手法が確立された。

本研究はNEDO即効型提案公募事業「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の開発」の一環として行われた。

## 参 考 文 献

- 1) "Bluetooth ケータイ・PC を席捲", 日経エレクトロニクス 1999.12.13 No. 759 pp.139-163 (日経BP社, 1999).
- 2) Kumio Kasahara, Koichiro nakamura, Manabu Sato, and Hiromasa Ito, "Dynamic properties of an all solid-state frequency-shifted feedback laser", *Quantum Electron.*, 34 (1). 192-203 (1998).
- 3) Koichiro Nakamura, Takefumi Hara, Masato Yoshida, Toshiharu Miyahara, and Hiromasa Ito, "Optical Frequency Domain Ranging by a Frequency-Shifted Feedback Laser", *J.Quantum Electron.*,36(1),305-316(2000).
- 4) 大宮司 実ら: "FSFレーザーとガルバノメータスキャナを用いた位置測定システム", 第47回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 29P-V-15 (2000).
- 5) R.Petit et al.:*Electromagnetic Theory of Gratings* (Springer-Verlag,1980).
- 6) M.G.Moharam et al.: *J.Opt.Soc.Am* 72, 1385 (1982).
- 7) 伊藤日出男ら: "HV ターゲットとの位置同定および通信のための室内レーザレーダシステム", *Proceedings of Optics Japan'99 Osaka*, 25aB6, pp.377-378 (1999).
- 8) Hideo Itoh, et al. : "Guest guiding System Based on the Indoor Laser Radar System Using HV Targets and a Frequency Shifted Feedback Laser", *Proceedings of Int'l Topical Workshop on Contemporary Photonic Technologies, Tokyo*, Tc-23, pp.117-118 (2000).

特許等;

- 1) 特願平成 11 - 331251「3次元測距方位測定装置」

(2000.3.1 受付)