

## Rainbow Range Finder による距離計測実験

岩川正人

田島讓二

本山純四郎

日本電気株式会社

物体の距離画像をTV1フレームの画像入力で取得できる Rainbow Range Finder (RRF) の新しい実現法を提案し、その実験結果につき述べる。従来の実現法(各光線位置を校正する方法)には測距範囲に制限があったが、今回提案する新しい実現法(放射点位置を校正する方法)によれば、その制限が解消される。新しい実現法により距離計測精度を実験で求め、精度目標をほぼ達成していることが確認された。更に、手軽な装置によるシステム構築の一例を示すため、パソコンベースのシステムを開発し、これを用いて種々の物体の形状計測を行った。その結果、物体の形状計測機能も確認され、実用化の見通しを得た。

## Experiment for Range Data Acquisition Using Rainbow Range Finder

Masato IWAKAWA

Johji TAJIMA

Junshiro MOTOYAMA

NEC Corporation

4-1-1, Miyazaki, Miyamae, Kawasaki, Kanagawa 213, Japan

We propose a new range measurement method using RRF, which can acquire range data using only one frame TV imaging, and describe the results of its experiments.

The previously proposed measurement method had a limit on the measurement area. However, using a new one, which is proposed in this paper, a wider measurement area can be obtained. Experiments were carried out, using the new measurement method to estimate the range measurement accuracy. Moreover, an evaluation system was developed, which is based on a personal computer, to show an example of a simple configuration. Object surface measurements were also carried out, using the system.

As the result, its feasibility was confirmed.

## 1. まえがき

近年、アパレル業における人体計測や、CAD、CGなどの分野において、計測の自動化、形状データ入力作業の効率化などのため立体計測装置への期待が大きく、人体計測システム・自動彫刻製作システムなどが製品化されてきている<sup>1)2)3)4)</sup>。立体計測装置のキーコンポーネントである距離計測装置の方式は、これまでに種々発表されており、大きく次の2つに分類される<sup>5)</sup>。

### (I) 波動光学的方法

### (II) 幾何学的方法

波動光学的方法は光の干渉を利用するため、おもに光波長オーダーの微小変位の計測に用いられる。

幾何学的方法は、三角測量の原理を用いたものが多い。三角測量法とは一方の角度から光学的パターンを物体に対して投光し、これを別の角度に存在するTVカメラによって撮像して、その像から距離を求めるもので、投光するパターンにより種々の方式が報告されている<sup>6)7)8)9)10)11)</sup>。しかし、

①各画素毎に距離が求まらない<sup>6)7)10)11)</sup>

②時間がかかる

などの問題がある。

筆者の一人は、上記問題を原理的に回避できるRainbow Range Finder (RRF) と呼ばれる新しい距離計測の原理と実現法を提案した<sup>12)13)</sup>。RRFは、2次元のスペクトルパターンを物体に投光し、そのシーンをカメラで撮像することにより、物体の距離画像をTV 1フレームで取得でき、前述の問題を原理的に解決する方式である。

筆者らは、今回更にRRFの新しい実現法を開発し、まず実用可能性検討のため、実験光学系と汎用画像処理システムで距離計測精度を実験で求めた。その目標値は $\pm 0.5\text{mm}$ とした。更に手軽な装置によるシステム構築の一例を示すため、パソコンベースのシステムを開発し、これを用いて種々の物体の形状計測実験も行った。本稿ではこれらの結果につき報告する。

## 2. RRFによる測距

### 2. 1 原理式を用いる方法<sup>12)</sup>

図1にRRFの原理を示す。図より、Zは三角測量の原理により式(1)で求まる。

$$Z = \frac{X_a - Z_a \tan \alpha}{\tan \beta - \tan \alpha} \quad (1)$$

式(1)において $X_a, Z_a$ 及び $\beta$ は装置構成及びカメラの幾何学的関係によりそれぞれ定まる。 $\alpha$ は次式で定義する撮像出力の比と、あらかじめ求めたRと $\lambda$ の関係を示すテーブル、及び回折の式から求める。

$$R(x, y) = \frac{V_1(x, y)}{V_1(x, y) + V_2(x, y)} \quad (2)$$

ただし、

- $V_1(x, y)$ : 分光感度 $\sigma_1(\lambda)$ の撮像素子出力
- $V_2(x, y)$ : 分光感度 $\sigma_2(\lambda)$ の撮像素子出力
- $\sigma_1(\lambda), \sigma_2(\lambda)$ はRが $\lambda$ の一価関数となるように定める。

しかし、この原理式をそのまま用いて計測するためには、回折格子の設置角度、位置、回折格子へのスリット光の入射角、カメラの位置、撮像素子の感度特性を正確に知らなければならず実用的でない。

### 2. 2 各光線位置を校正する方法

前報告<sup>12)</sup>では、上記欠点を解決する次のような実現法を提案した。

図2において、あらかじめ2箇所の既知の距離 $Z_a$ 及び $Z_b$ で、RとX座標との校正テーブル $X_a(R), X_b(R)$  (撮像面上では $x_a(R), x_b(R)$ ) を求めておき、これらを用いて、求められたRについて $P_a(X_a, Z_a)$ と $P_b(X_b, Z_b)$ を通る光線上の点として点Pの位置を求める。従って、測距範囲は、 $X_a(R), X_b(R)$ が共に存在する図の斜線部だけに制限されてしまう。そこで次の新しい実現法を提案する。

### 2. 3 放射点位置を校正する方法

#### (1) 放射点の算出

上記の実現法では放射点 $P_0$ から放射される比 $R_1 \sim R_4$ の光線のうち、比 $R_2 \sim R_3$ の光線のみを用いていた。新しい実現法では、比 $R_1 \sim R_4$ の光線を全て利用する。すなわち、図2のようにすべての波長の光線は回折格子の1点 $P_0(X_a, Z_a)$ から放射されていると考え、この点を放射点と呼ぶ。そして、やはり距離 $Z_a$ と $Z_b$ でRとの関係が校正されていると考える。



### 3. 実験システム

#### 3.1 装置構成

##### (1) 配置の決定

実験に先立ち、所望の計測範囲を得るための回折格子の位置を定めた。

図3に示した $W \times D$ の矩形領域を計測範囲と定める。 $Z_1$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ は、カメラレンズの撮影可能至近距離、画像メモリ画素数、回折格子諸定数、レインボーの有効波長範囲により定まる。このとき、幾何学的関係により回折格子の位置 $P_g(X_0, Z_0)$ は次式で求められる。

$$X_0 = -\frac{W}{2} - \left( Z_1 + D - \frac{Z_1 \tan \alpha_2 - (Z_1 + D) \tan \alpha_1 - W}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1} \right) \tan \alpha_1 \quad (13)$$

$$Z_0 = \frac{Z_1 \tan \alpha_2 - (Z_1 + D) \tan \alpha_1 - W}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1} \quad (14)$$

本実験では $W=150\text{mm}$ 、 $D=100\text{mm}$ 、 $Z_1=375\text{mm}$ 、 $\alpha_1=36.5(\text{deg.})$ 、 $\alpha_2=53.9(\text{deg.})$ とした。これらを式(13)、(14)に代入し、 $X_0=-411.6\text{mm}$ 、 $Z_0=20.5\text{mm}$ を得た。実際には、上記位置に回折格子を正確に配置するのは困難なので、 $1\text{cm}$ 程度の粗さで配置し、計測処理に用いる位置は2.3項で述べた方法で求め、 $X_0=-415\text{mm}$ 、 $Z_0=27\text{mm}$ となった。

##### (2) 動作

図4に実験装置を示す。実験装置は画像を入力する光学系と、得られた画像から3次元座標を算出する処理系からなる。カメラは、カラーカメラの代わりにモノクロCCDカメラと2種類の色ガラスフィルタを用いた。図において、キセノンランプからの光は赤外透過フィルタにより熱線がカットされた後、コリメートレンズへ入射され平行光となる。平行光はスリットを通り、回折格子へ入射する。回折格子からは $X-Z$ 平面に垂直な方向に同一波長を有するスペクトルパタン、すなわちレインボーパタンが生じる。これをシリンダリカルレンズによって $Y$ 方向に広げ、物体に投光する。その様子を色ガラスフィルタを通してモノクロCCDカメラで撮影し、ビデオ信号を処理系へ送る。色ガラスフィルタは分光特性の異なるものを2種類使い、2つの画像 $V_1(x, y)$ 、 $V_2(x, y)$ を得た。用いた色ガラスフィルタの分光特性は図5の通りである。図より

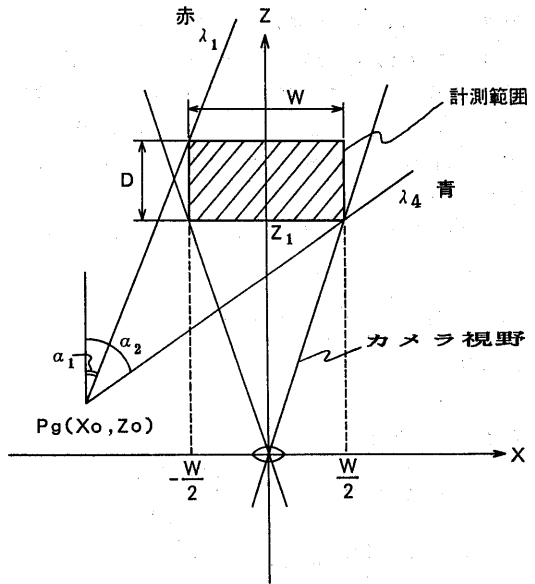


図3 計測範囲

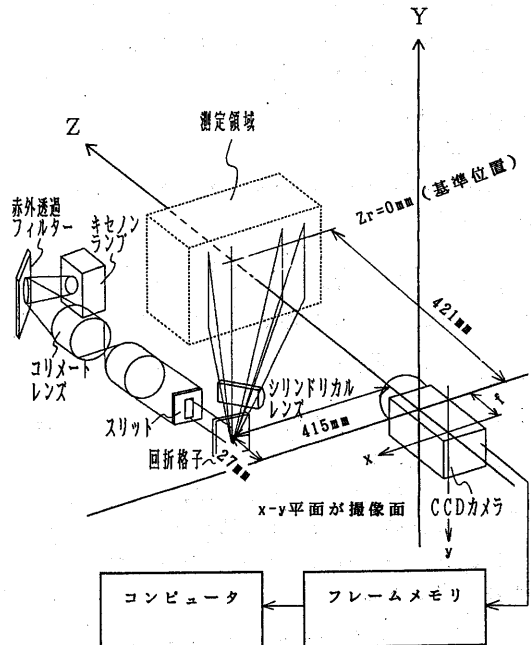


図4 実験装置

400~600nmを有効波長域とした。CCDカメラの有効画素数は $512^H \times 492^V$ 画素、レンズ焦点距離 $f$ は16mmである。ピントは、カメラから約421mmの位置に合わせ固定した。絞りは、A/D出力の飽和直前まで開いた(約F2.8)。1画素分の実寸は約0.3mmである。

さて、CCDカメラによって撮像された画像は汎用画像処理システムのフレームメモリに取り込まれる。このとき、カメラのノイズを軽減するため10回積分を行った。この積分効果によりS/Nは約3倍改善された。この画像データに対し汎用画像処理システムにより処理を行った。

### 3.2 処理

図6に3次元座標を得るまでの処理のフローを示す。図に従い処理内容の概要を述べる。

#### R画像算出

得られた2つの画像データ $V_1(x,y)$ 、 $V_2(x,y)$ を用い、下式で比画像 $R(x,y)$ を算出する。

$$R(x,y) = \frac{V_1(x,y) - C(x,y)}{V_1(x,y) - C(x,y) + V_2(x,y) - C(x,y)} \quad (15)$$

$C(x,y)$ : カメラへの入射光を遮蔽した時の出力(暗出力)

#### Z画像算出

式(15)で求めた $R$ と、あらかじめ求めた $P_0(x_a, z_a)$ と、校正テーブル $x_a(R)$ 、 $x_b(R)$ を用いて画素位置 $x$ における距離 $Z$ が前述の式(11)、(12)で求まる。ただし、任意の $R$ に対し $x_a(R)$ 、 $x_b(R)$ 両方が存在するときは両式の平均値を $Z$ とした。

#### Z画像平滑

このようにして求めた $Z$ に対し、次式に従い平滑処理を施す。

$$Z_s(x,y) = \frac{1}{5^2} \sum_{l=-2}^2 \sum_{k=-2}^2 Z(x-k, y-l) \quad (16)$$

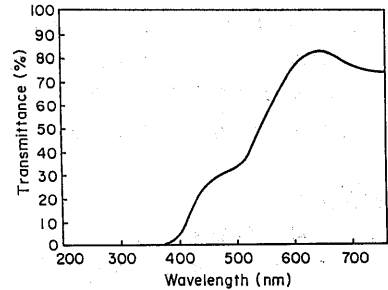
平滑マスクの大きさ(5×5)は、要求分解能(約1~2mm)を考慮して定めた。

#### X, Y画像算出

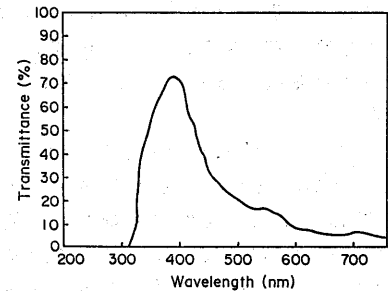
式(16)で求めた距離 $Z_s$ を用いて下式により(X, Y)座標値を求める。

$$X(x,y) = \frac{x(R) - x_0}{f} Z_s(x,y) \quad (17)$$

$$Y(x,y) = \frac{y(R) - y_0}{f} Z_s(x,y) \quad (18)$$



(a) フィルター 1



(b) フィルター 2

図5 フィルタ分光特性

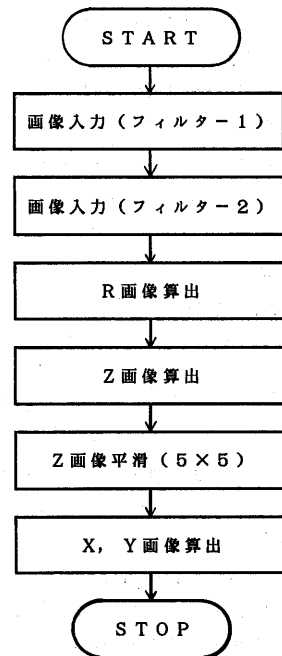


図6 フローチャート

以降、ZはZsを指すものとする。また、5章に示す形状計測結果においては、照明光量が規定値以下、または飽和しているときは、その画素の計測値は無効とみなし除外した。

#### 4. 計測実験

##### 4.1 距離計測精度

RRFの実用可能性につき検討するために、前述の実験システムを用いて計測実験を行った。白色平板をカメラ光軸に垂直に提示して得た距離画像Z内の11×11(画素)の局所領域で得た計測値のばらつきの標準偏差を誤差と定義した。

図4に示した装置を用い、Zが421mmを基準位置( $Z_r = 0$ mm)と定め、白色板をその前後±50mmの範囲内で25mm間隔で移動して、各位置で白色板表面(140mm×60mm、各位置での計測点約75000~130000点)までの距離計測を行い光軸に垂直な面上の誤差分布を求めた。

各位置での誤差分布から誤差の最大値、最小値、平均値を求め図7に結果を示す。図より平均値では±0.2~±0.3mmの範囲にあり目標値±0.5mmを達成している。最大値では一部達成できない計測点もあるが86.7%~100%が±0.5mm以下の誤差で計測されている。

更に、曲面の計測精度を調べるため、白色の円柱を計測し、その断面において真値と計測値の比較を行った。結果を図8に示す。真値と計測値の差の標準偏差は0.5mmであり、計測面が曲面の場合においても比較的精度よく計測されている。

##### 4.2 誤差の原因

式(11)、(12)から主に次の2点が誤差の原因として考えられる。

(a)カメラから入力されるビデオ信号に重畳したノイズにより生じるRのばらつき $\Delta R$ 。

(b)フィルタ分光透過特性で決まる校正テーブル $x_a(R)$ (または $x_b(R)$ )の勾配 $dR/dx_a$ (または $dR/dx_b$ )の大きさ。

(a)の確認のため、別の実験にて、投光の強さを変化させてビデオ信号のS/Nを変えることにより、種々の $\Delta R$ につき誤差を求めた。図9にその測定結果を示す。

図より $\Delta R$ の増加にともない誤差も増加傾向を示している。これより $\Delta R$ が誤差の一原因であ

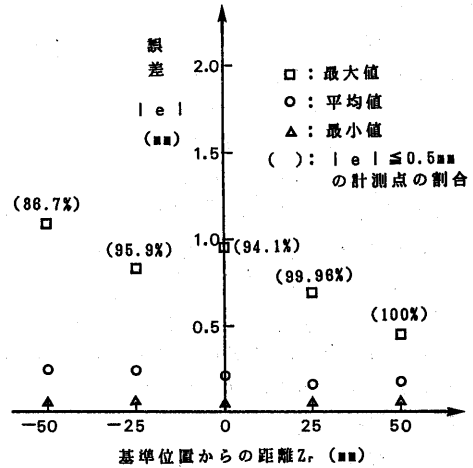


図7 距離計測精度

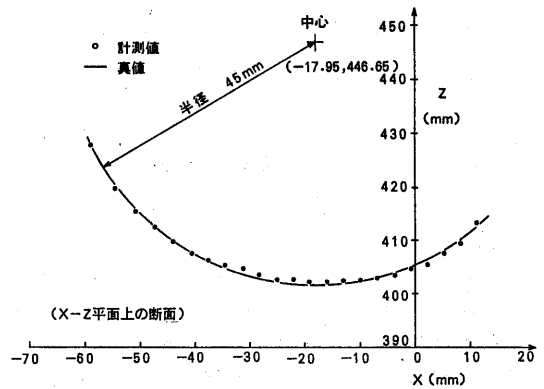


図8 円柱断面形状計測結果

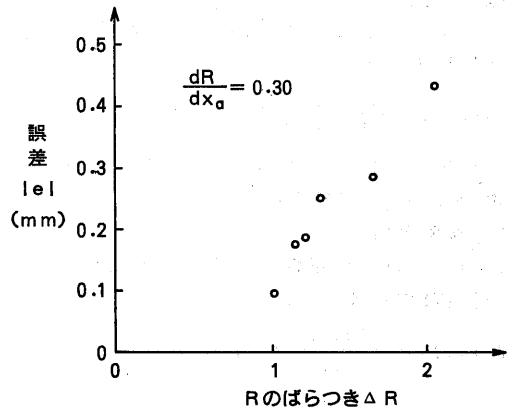


図9  $\Delta R$ と $|e|$ の関係

ることが確認できる。

一方、本実験で得た誤差分布と校正テーブル  $x_a(R)$  から  $dR/dx_a$  と誤差の関係を求め図10に示す。図より  $dR/dx_a$  の増加にともない誤差は減少、すなわち高精度になる。これより(b)が確認できる。以上から、

- (a)カメラ S/N の改善
  - (b)フィルタ分光透過特性の最適設計
- によって更に精度向上が図れることがわかる。

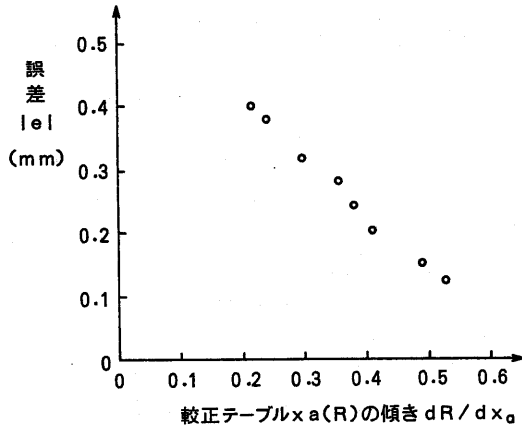


図10  $dR/dx_a$  と  $|e|$  の関係

### 5. 評価システムによる形状計測例

RRFの実用化においては、手軽な装置でシステム構築できることが望まれる。その一例を示すためパソコンベースのシステムを開発した。図11にその外観を示す。本システムでは、フィルタ切り替えをプログラムで行なうので、 $640^H \times 485^V$ 画素の画像入力を約2sで行える。また、液晶シャッターメガネによる立体視機能を有しているので形状計測結果を

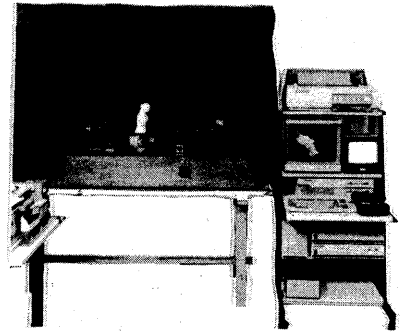
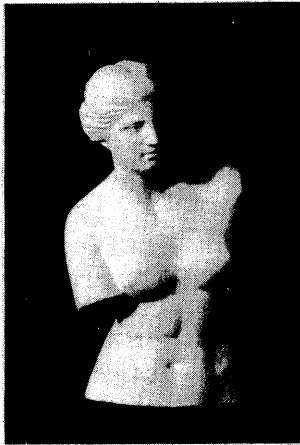
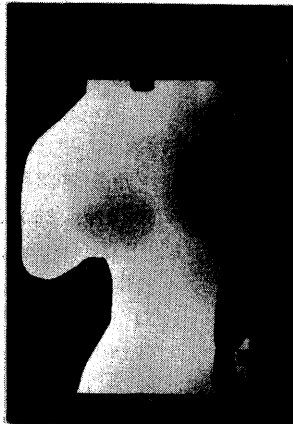


図11 RRF評価システム

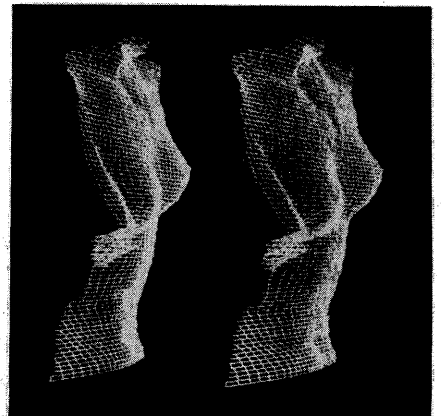


(a)計測対象



近い 遠い  
カメラからの距離

(b)計測結果(距離画像)



(左目用) (右目用)  
(c)計測結果(ステレオ画像)

図12 形状計測結果

立体的に知覚できる。本システムを用いて種々の物体の形状計測を行った。

図12にミロのビーナスの形状計測例を示す。図において、(b)はカメラからの距離を濃淡で表した距離画像であり、各画素毎に距離が求まっているのがわかる。なお右端はレインボーの死角のため計測されていない。(c)は(a)の計測対象を左側から見た様子をステレオ表示している。ビーナスの形状がリアルに計測されており、また、立体視により立体感のある画像が得られる。

#### 6. あとがき

RRFの新しい実現法を提案し、その実験結果につき報告した。その結果、距離計測精度は平均 $\pm 0.2 \sim \pm 0.3 \text{mm}$ となり目標値 $\pm 0.5 \text{mm}$ を達成した。最大でも86.7~100%の計測値が目標値を達成している。更に、

(a)カメラS/Nの改善

(b)フィルタ分光透過特性の最適設計

により、更に精度向上が図れる可能性があることもわかった。また手軽な装置によるシステム構築の例を示すため評価システムを開発し、種々の物体の形状計測を行い動作を確認した。

以上によりRRF実用化の見通しが得られた。今後RRFの実用化に向け、当面(b)に加え、

(c)処理の高速化

(d)光学系の一体化

などを図り、試作機の開発を進めていく予定である。

#### 謝辞

本研究の機会を与えてくださり、有益な討議をいただいた、日本電気ホームエレクトロニクス(株)浅井事業部長代理(前日本電気(株)C&C情報研究所部長)、日本電気(株)C&C情報研究所天満部長に感謝致します。また、立体視装置のソフト開発に際し御助言いただいた同研究所川上主任に感謝致します。

#### 参考文献

- 1)中野、"人体の3次元計測"、計測と制御、vol.22、NO.9、S63
- 2)佐藤、"座標データの入力作業を効率化する3次元形状入力装置"、日経コンピュータグラフィックス、1987.6
- 3)田中、"CADデータ入力に変革を起こすか 簡易型3次元形状入力装置"、日経コンピュータグラフィックス、1988.9
- 4)須賀、"非接触形状測定の現状と開発例"、日本システム工学会研究会資料MCB8261、'89.1
- 5)三好、"光を利用した非接触形状測定法"、M & E、1987.3
- 6)白井、"コンピュータビジョン"、昭晃堂、1980
- 7)小関、中野、山本、"光切断法を用いた実時間距離検出装置"、信学論、vol.v68D、NO.5、PP.1141-1148、1985
- 8)K.Sato and S.Inokuchi,"Three Dimensional Surface Measurement by Space Encoding Range Imaging",Journal of Robotic Systems,Vol.2,No.1,pp.27-39,1985
- 9)山本、佐藤、木田、井口、"二値画像累積による距離画像入力法"、信学会昭和61年度総合全国大会、S15-12、1986
- 10)馮、杉原、杉江、"多数の円錐光束を利用した三次元情報抽出法"、信学論Vol.J-68-D,No.9,pp.1697-1704、1985
- 11)大谷、"リングパターン法を用いるロボット用物体認識センサ"、信学論Vol.J69-D、No.3,pp.269-278、1986
- 12)田島、"Rainbow Range Finder による距離画像取得"、情処研報CV44-3、1986
- 13)J.Tajima,"RAINBOW RANGE FINDER PRINCIPLE FOR RANGE DATA ACQUISITION",Proc.IEEE Intl Workshop on Industrial Appl. of Machine Intelligence,SEIKEN Symposium,pp381-386,Feb.2-5,1987