

3次元位置・姿勢センサとロボットへの応用[†]

石井 優*・坂根 茂幸*・柿倉 正義*・三上 芳夫**

A 3-D Sensor System for Robotic Applications

Masaru ISHII*, Shigeyuki SAKANE*, Masayoshi KAKIKURA* and Yoshio MIKAMI**

Recently, techniques of acquiring 3-D information at high speed and with accuracy have been pursued with increasing demands for advanced and sophisticated tasks that a robot has to carry out.

A new approach to simultaneously measure 3-D position and orientation of robot environments is proposed in this paper. The 3-D sensor consists of a camera using a position sensitive device (PSD) and multiple LEDs attached to robotic devices such as a robot's hand and a teaching device.

Their 3-D position and orientation are calculated based on both 2-D coordinate values of the LEDs in an image plane of the camera and geometrical relationships among 3-D positions of the LEDs.

The 3-D sensor has advantages of simple system configuration and real-time response for reliably acquiring 3-D information of robotic devices.

Experimental results of applications using the 3-D sensor are presented. They are as follows: (1) visual detection of robot's hand position and orientation, (2) teaching of robot paths by a 3-D teaching device.

They show the feasibility of applying the 3-D sensor to these kinds of robotic tasks. Finally, future subjects and extensions of the 3-D sensor are discussed.

Key Words: 3-D sensor, robot hand pose sensing, robot teaching

1. はじめに

近年、ロボットによる作業の高度化や複雑化に伴な

い、視覚センサを用いて作業対象物やロボット自身の3次元位置と姿勢を高速かつ精度よく求める3次元情報の抽出技術の重要性が増している。従来から、ロボットセンサの研究において、特殊な光源と視覚センサを組み合わせた3次元情報の取得システムが数多く開発されている^{1)~3)}。これらは光に対する処理方法によってつぎのように分類される。

1. 反射光処理法

- a. 投射光と視覚センサによる距離計測方式。
- b. 発光ダイオードと受光素子による近接センサ。

2. 直接光処理法

- a. 受光センサをロボット装置に装着する方式。
- b. 発光素子をロボット装置に装着する方式。

1. の反射光処理法とは、ロボットから様々な光を対象物へ照射し、その反射光を受光して3次元情報を得る手法である。(1. a)は数十cmから数m間の対象物に関する距離データ収集を目的とし、スポット光⁴⁾やスリット光⁵⁾およびパターン光⁶⁾などを投射し、3角測量の原理から距離画像を得る方法である。(1. b)は対象物体から数cmの至近距離で複数の発光ダイオードから投光し、その反射光の位相変化や位置などから対象物までの距離、傾きおよび物体表面の向きなどを計測する近接センサである^{7)~10)}。受光素子としては、フォトランジスタや半導体ポジションセンサ(PSD)が用いられ、たとえば、物体表面に垂直にロボットを保持する用途などに利用される。しかし、これらの反射光処理法は、物体表面の状態によっては反射光がとれないことがあり、3次元情報が得られないという欠点がある。

一方、2. の直接光処理法は、物体からの反射光ではなく発光素子からの光を直接受光センサで受けるためシステムの信頼性が高いという利点がある。(2. a)には、ロボット装置に受光センサを備え、外部から2本のレーザ光によってロボットの位置と姿勢を計測する方式¹¹⁾や発光ダイオードによりロボットを誘導する

[†] 第23回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭59・7)

* 電子技術総合研究所 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

** 東京都立工業高等専門学校 東京都品川区東大井 1-10-40

* Electrotechnical Laboratory, Niihari-gun, Ibaraki

** Tokyo Metropolitan Technical College, Shinagawa-ku, Tokyo

(Received July 30, 1984)

(Revised December, 25)

方式がある^{12),13)}. その逆に(2. b)には、発光素子を移動するロボット装置に装着し、固定した受光センサでこれらの光を受け、ロボットの位置決めをする方法がある¹⁴⁾.

本論文で提案する3次元位置・姿勢センサシステムは(2. b)の直接光処理法に属しており、ロボット装置に取り付けた複数個の発光素子からのスポット光をPSD内蔵のカメラで受光して、ロボットの作業環境における3次元位置だけでなく、その姿勢も同時に検出できるという特長をもっている.

これを応用してロボットの手首部に発光素子を装着し、ハンドの3次元位置と姿勢を関節角計算によらずに視覚センサによって直接求める方法を開発した. この手法は柔構造の腕(フレキシブルアーム)の位置決めなどに適用できる. また、ロボットの手首部分を模擬した教示装置を作成し、オペレータがこれを手にもって作業を教示する方式を開発した. この教示装置により指示した点の3次元位置が計測でき、さらにその個所でロボットがどのような姿勢を取れるかをチェックできるという特長がある.

本論文では、最初に、3次元位置・姿勢センサシステムの構成、カメラパラメータの計算法および3次元情報の導出アルゴリズムについて述べる. つぎに、本システムの応用例として、ロボットハンドの3次元位置と姿勢の検出法および教示装置によるロボットの作業教示法に関して、その構成と基礎的実験について述べる.

2. 3次元位置・姿勢センサシステム

2.1 システムの構成

3次元位置・姿勢センサシステムの構成を、Fig. 1に示す. ホストコンピュータからの命令により、マイクロプロセッサを通して、ロボット装置に取り付けた平面板の四隅にある4個の発光素子(LED)を指定された順序に一個ずつ発光させる. これは、LEDの番号付けと共に、PSDカメラが一度に一点しか計測で

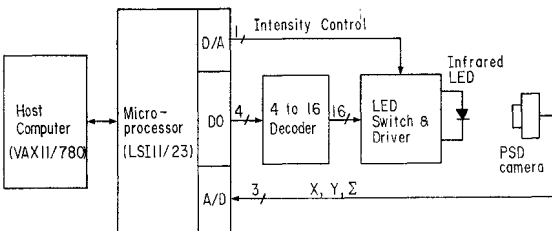


Fig. 1 Block diagram of a 3-D sensor system

きないためである. これらのスポット光を受光するPSDカメラからは、その画面上の輝点の重心に対応する2次元座標と輝度値が得られる. ここで、PSDカメラの精度に影響する輝度値を最適にするために、LEDの明るさを可変にして調節する. 得られたLED各点の2次元座標値とその幾何学的な位置関係から、4個のLEDの3次元位置が求められる. これらの中の3点の3次元位置よりLEDを装着した平面の向きより姿勢が求まる. これよりLEDに対して相対位置が指定された点の3次元位置も得られ、これらの3次元情報はホストコンピュータに転送され、ロボットの様々な応用に用いられる.

2.2 カメラパラメータの計算

本システムにおいて、3次元位置と姿勢を求めるためには、まずPSDカメラの未知パラメータを前もって計算しておく必要がある. 推定すべきカメラパラメータは、(1)ロボット座標系におけるPSDカメラの3次元位置 $O_c(X_{c0}, Y_{c0}, Z_{c0})$, (2)PSDカメラ座標系における画像面の回転角度(オイラー角)ティルト α , パン β , およびスウィング γ および(3)使用レンズの焦点距離を含むスケール変換係数 F の計7個である.

Fig. 2に示すように、ロボット座標系を (X_r, Y_r, Z_r) とし、 O_r をロボット座標系の原点とする. また、PSDカメラ座標系を (X_s, Y_s, Z_s) とし、 Z_s 軸はレンズの光軸と一致させている. これらの二つの座標系の関係は、つぎのベクトル・マトリックス方程式で与えられる.

$$\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} X_r - X_{c0} \\ Y_r - Y_{c0} \\ Z_r - Z_{c0} \end{pmatrix} \quad (1)$$

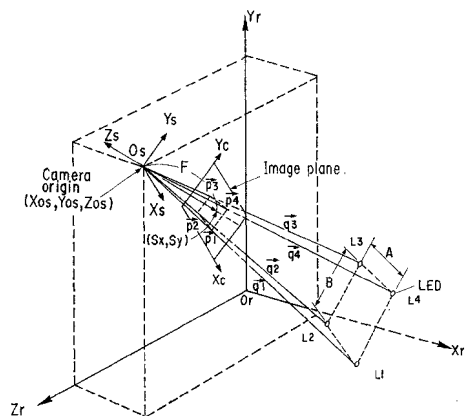


Fig. 2 Relationships for the coordinate systems

ここで、 R は、回転マトリクスであり、つぎの式で示される。

$$R = \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \\ \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}$$

ここで、PSD カメラの画像面上の2次元座標系を (X_c, Y_c) とし、その光軸中心位置を S_x, S_y とすると、つぎの2式が得られる。

$$X_c = -F \cdot X_i / Z_i + S_x \quad (2)$$

$$Y_c = -F \cdot Y_i / Z_i + S_y \quad (3)$$

ただし、 F はスケール変換係数である。

以上(1)~(3)の式により、既知のLEDの3次元位置とこれに対応するPSDカメラの出力値についての4組以上のデータに基づいて、ニュートン法を用いた繰り返しアルゴリズムによって未知カメラパラメータの推定値が求められる¹⁵⁾。[付録1]

2.3 3次元位置・姿勢の導出アルゴリズム

ここでは、ロボットの作業環境における3次元位置と姿勢を算出するアルゴリズムについて述べる。一般に、3次元空間において同一平面上にある4点の幾何学的な位置関係が既知の場合、PSDカメラ上でこれら4点の対応点が得られると、投影の逆変換から4点の3次元位置が一意に決定される¹⁶⁾。原理上、4点は平行四辺形を構成していても求まるが、本システムでは、LEDを長方形の4頂点に配置する。

Fig. 2に示すように、PSDカメラの原点 O_c から4個のLED各点までのベクトルを $\mathbf{q}_i (i=1, \dots, 4)$ 、PSDカメラの画像面上の対応点までのベクトルを $\mathbf{p}_i (i=1, \dots, 4)$ とすると、透視変換により、

$$\mathbf{q}_i = k_i \cdot \mathbf{p}_i, \quad k_i > 0 \quad (i=1, \dots, 4) \quad (4)$$

となる。ここで、 $\mathbf{q}_i = (X_{si}, Y_{si}, Z_{si})^T$ 、 $\mathbf{p}_i = (X_c, Y_c, -F)^T$ 、 $(i=1, \dots, 4)$ である。(Tは、転置を示す。)

4個のLEDは、平面上の長方形の頂点にあるので、

$$\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_3 = \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_4 \quad (5)$$

$$|\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2| = A \quad (6)$$

$$|\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_3| = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (7)$$

$$|\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_4| = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (8)$$

$$|\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_3| = B \quad (9)$$

の5式が得られる。ここで、 $|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j|$ は、ベクトル \mathbf{q}_i と \mathbf{q}_j 間の距離である。(5)式は、4点が同一平面上にあって、その対角線の中点が一致していることを、(6)~(9)式は、二辺の長さが、 A 、 B であり、

互いに直交していることを示している。

(4)および(5)式からベクトル演算により、 k_1 と k_2, k_3, k_4 との関係は、

$$k_j = c_{j1} / k_1, \quad (j=2, 3, 4) \quad (10)$$

となる。たとえば c_{21} は、次式であらわされる。

$$c_{21} = \mathbf{p}_3 \cdot (\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_4) / \mathbf{p}_3 \cdot (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{p}_4)$$

また、(6)式から、

$$k_1 = A / \sqrt{\mathbf{p}_1^2 - 2c_{21}(\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2) + c_{21}^2 \mathbf{p}_2^2} \quad (11)$$

となる。同様に、(7)、(8)、(9)式からも k_1 が得られ、これらを平均した値をあらためて k_1 とする。これを(10)式に代入すると、 k_2, k_3, k_4 が得られる。ここで、パラメータ $k_i (i=1, \dots, 4)$ を算出するとき、(6)~(9)式は冗長なため本来は最小自乗法で求めるべきであるが、式が複雑化するので実用的観点から単純平均値を採用している。

よって、(4)式から $\mathbf{q}_i = (X_{si}, Y_{si}, Z_{si})^T (i=1, \dots, 4)$ が計算され、4個のLEDの3次元位置 $(X_r, Y_r, Z_r) (i=1, \dots, 4)$ は、(1)式を用いて求められる。

このようにしてロボット座標系における4点の3次元位置が求まると、Fig. 3に示すように、これらと相対的な位置が既知である座標系の原点 P とその基底ベクトル $(\mathbf{x}_p, \mathbf{y}_p, \mathbf{z}_p)$ ($\mathbf{x}_p, \mathbf{y}_p, \mathbf{z}_p$ は単位ベクトル)は、次式から得られる。

$$\mathbf{P} = l_1 - a \cdot \mathbf{x}_p - A/2 \cdot \mathbf{y}_p - b \cdot \mathbf{z}_p \quad (12)$$

$$\mathbf{x}_p = \mathbf{y}_p \times \mathbf{z}_p \quad (13)$$

$$\mathbf{y}_p = (\mathbf{l}_1 - \mathbf{l}_2) / A \quad (14)$$

$$\mathbf{z}_p = (\mathbf{l}_3 - \mathbf{l}_2) / B \quad (15)$$

ここで、 $\mathbf{l}_i (i=1, \dots, 4)$ は、原点 O_r から点 $L_i (i=1, \dots, 4)$ までのベクトルである。

以上から、3次元空間における指定した点の3次元位置およびLEDを装着した平面の向きから姿勢が計算される^{17), 18), 19)}。

2.4 計測誤差および測定速度の解析

ここでは、上述した計算式を用いて3次元情報を求める実験を行い、本システムの計測誤差と測定速度に

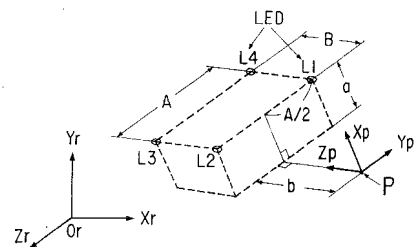


Fig. 3 Relation between a specified point P and LEDs

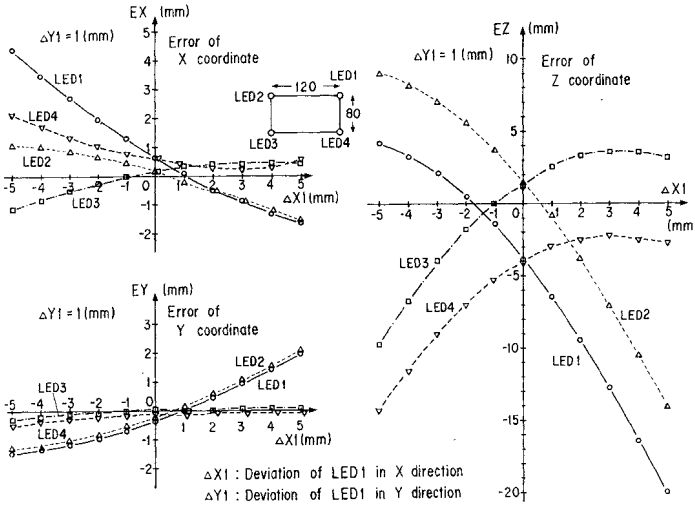


Fig. 4 Errors of 3-D coordinate values with respect to position errors of a LED

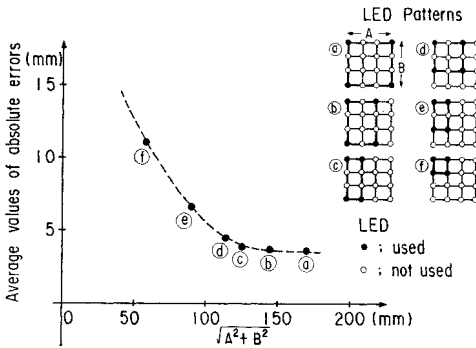


Fig. 5 Measurement errors for different sizes of LED's rectangles

関する検討をする。PSD カメラから約 500 mm のところに、LED を 40 mm 間隔に縦 4 個と横 4 個の合計 16 個取り付けられた平面板を置く。これを 30 mm 間隔で前後に動かし、おのおの LED の 3 次元位置とこれに対応する PSD カメラの (X_s, Y_s) 座標データを収集し、2.2 の方法で PSD カメラの 7 個のパラメータを計算する。得られた値は、つぎのとおりである。

$$\begin{aligned}
 X_{o.s} &= 434.6 \text{ (mm)}, & Y_{o.s} &= 432.4 \text{ (mm)}, \\
 Z_{o.s} &= 715.7 \text{ (mm)}, \\
 \alpha &= 0.0043 \text{ (rad.)}, & \beta &= 0.0009 \text{ (rad.)} \\
 \gamma &= 0.0314 \text{ (rad.)}, & F &= 5501.8.
 \end{aligned}$$

最初に、LED の取り付け誤差および PSD カメラの測定誤差に起因する 2 次元位置の計測誤差によって 3 次元座標値計算の受ける影響について調べた。横 120 mm と縦 80 mm の長方形の 4 頂点に取り付けられた

LED 中の 1 個 (LED 1) が、横方向と縦方向に微小変位 (ΔX_1 と ΔY_1) した場合、4 個の LED について 3 次元座標値の誤差を求めた。Fig. 4 に、 ΔY_1 が一定 (1 mm) で、 ΔX_1 が $-5 \text{ mm} \sim 5 \text{ mm}$ の範囲を変位した場合の例を示す。単位は、LED の取り付け面上での mm 換算値である。 ΔX_1 が $\pm 1 \text{ mm}$ 以内では、X, Y 座標値は $\pm 1 \text{ mm}$ 以下、Z 座標は $\pm 5 \text{ mm}$ 以下の誤差を示している (※座標は奥行きを示す)。

つぎに、各 LED 間の長さ A, B を変えた場合の 3 次元座標値の誤差解析を行った。Fig. 5 に示すように、4 個の LED を頂点とする長方形の対角線の長さに対する、3 次元座標に対する絶対誤差の平均値を、6 種類のパターンについて計算しプロットした。これから各 LED の間隔が大きい程精度が良くなることわかる。

また、PSD カメラと LED を取り付けられた平面板との間の距離が 480 cm から 550 cm までの範囲で 3 次元座標について絶対誤差の平均値は、0.3 mm (X, Y 座標)、3.2 mm (Z 座標) であり、相対誤差は 0.25% (X, Y 座標) 0.65% (Z 座標) である。誤差の要因としては、PSD カメラパラメータの計算誤差、LED の大きさ (直径 3 mm) による影響がある。また PSD カメラ自身の測定誤差は中心領域で 1.0% 以下、周辺領域で 2.5% 以下あり、この影響も考えられる。

また、姿勢の精度に関しては、LED の指向性に依存し、現在のシステムでは、光軸に対して ± 20 度以内が測定可能である。

つぎに、測定速度について述べる。3 次元情報を求めるためには、4 個の LED スポットを PSD カメラで受光しその AD 出力値を得る計測データの収集部と 3 次元情報を計算するデータ処理部が必要である。データ収集には、LED の明るさをプログラムで制御し最適な輝度値で受光するため 30 msec を要している。データ処理は、現在のシステムでは、デバック等の便宜上ホストコンピュータで行っている。したがって、全体の計算に要する時間は、ホストとマイクロプロセッサ間の転送時間の 80 msec およびホストにおける計算時間の 3 msec を加えて、総計 113 msec 程度である。しかし、マイクロプロセッサですべての計算を行えば転送時間は不要となり、全体の計算時間も大幅に減

少できる。

3. ロボットへの応用

3.1 ロボットハンドの位置と姿勢の検出

3次元位置・姿勢センサをロボットハンドの位置と姿勢を直接的に計測するシステムに応用した。ロボットの作業は、そのハンドの位置と姿勢に基づいて行われ、多関節腕の場合には、各関節の角度などを用いた複雑な計算が必要となるが、この際ロボット自身のたわみのため検出精度が悪くなるなどの難点がある。また、関節角表現のできない柔構造の腕を制御するためにも、直接的な方法で位置と姿勢を検出することが要求されるからである。

Photo. 1 に示すように、ロボットの動きを視野内に収める PSD カメラと、ロボット手首部の平面板上に取り付けた複数個の LED によって3次元位置・姿勢センサシステムが構成される。ロボットハンドの位置・姿勢の決定には、前節で述べたように、4個の LED で十分であるが、ロボットの姿勢によっては、PSD カメラからの死角が生じるため、全体で16個の

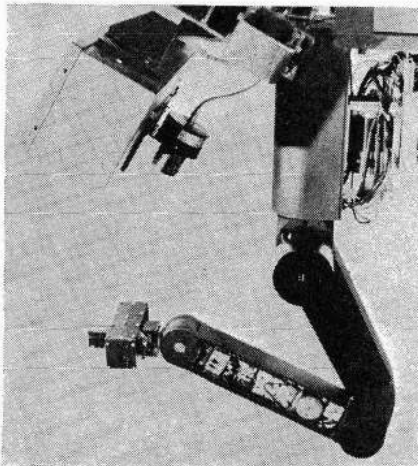


Photo. 1 Overview of a hand pose sensor

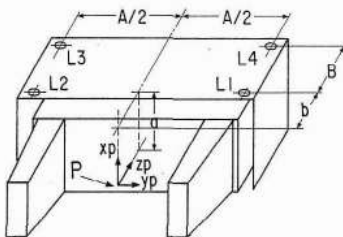


Fig. 6 Robot hand with four LEDs

LED が、ロボット手首部に装着されている。そのうち8個が上部に、残りが両サイドに4個ずつ装着され、ロボットの姿勢によって最適な4個の組み合わせを選択する。

最初に、2.2 で述べたカメラパラメータの計算を行う。ロボットの手首部に取り付けられた8個の LED を用い、ロボットの位置を3回変えて、合計24組の LED の3次元位置とこれらに対応した PSD カメラの座標値についてのデータを求める。これから PSD カメラの3次元位置、その姿勢や変換係数が求まる。

Fig. 6 に、ロボットハンドの手首部平面の4隅に装着した LED とハンドの位置と姿勢の関係の一例を示す。この図は、Fig. 3 の記号と対応しており、(12)～(15)式によりロボットハンドの3次元位置と姿勢が決定される。

3.2 ロボットへの作業教示

3次元位置・姿勢センサを、オペレータが教示装置を手にもって作業教示を行うシステムに応用した。

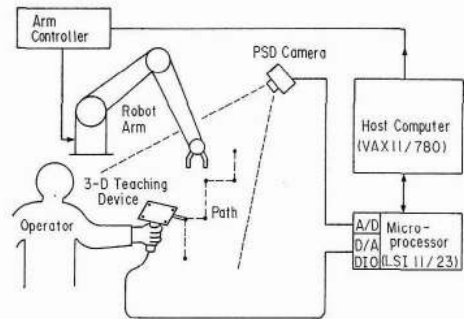


Fig. 7 A robot teaching system

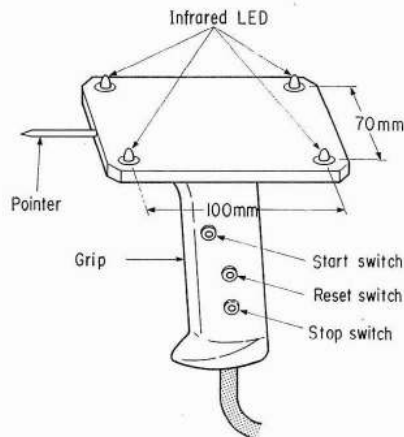


Fig. 8 A teaching device

従来のティーチング・ボックスによる教示法はロボットの誤動作や人間の教示にミスによって異常事態が発生することがあり、また教示すべきロボットの台数が増加すると、これに要する時間と労力が大きくなる。

本装置を用いれば、ロボット本体の電源を切断し、安全を確保しながらロボットの作業を教示でき、教示時間の短縮も可能となる。さらに、得られた位置・姿勢データをロボットアームの制御方程式に代入し、解の存在を検討することにより、ロボットがその位置へその姿勢で実際に移動できるかをオフラインで確認できる利点がある。

ロボットの作業教示システムの構成を **Fig. 7** に、また作業教示装置自体を **Fig. 8** に示す。図のように、教示装置はオペレータが握るグリップ部とその上面に4個のLEDを装着した平面板および作業教示点を指示するための針から構成されている。オペレータは、グリップに付けたスイッチを押すことによりマイク

プロセッサに計測開始をしらせる。得られた3次元情報はロボットのパスを生成するためのデータベースに保存され、ロボットの作業モード時には、このデータベースからの情報に従ってロボットハンドは動作する。

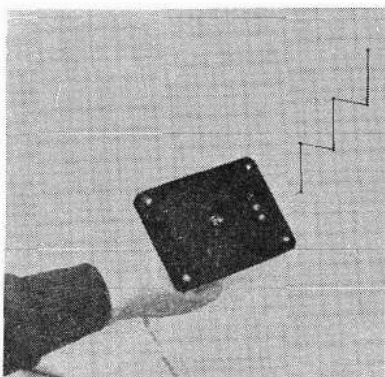
ここでは基礎実験として、つぎのような2種類の教示を行った。

(a) ロボットの作業パス教示

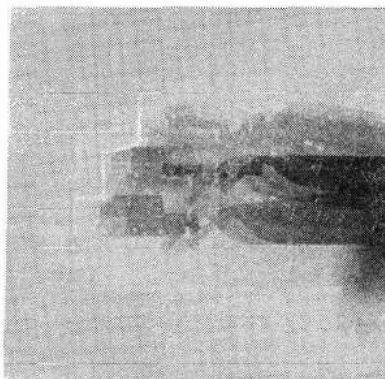
Photo. 2(a)に示すような階段状作業パスの4個の変化点に教示装置の指示部先端を位置させて、3次元位置入力を行った。教示された3次元位置情報に従って、ロボットを動かした場合の軌跡を**Photo. 2(b)**に示す。この写真では、ロボットの移動軌跡をみるために、グリップの側面中央部に可視光LEDを取り付けている。

(b) 3次元位置と姿勢の教示

傾斜している対象物をつかむ作業の教示に対して、教示装置の平面板を傾斜方向と直交するように保持し、つかみ位置とその姿勢を入力させた(**Photo. 3**



(a) teaching mode

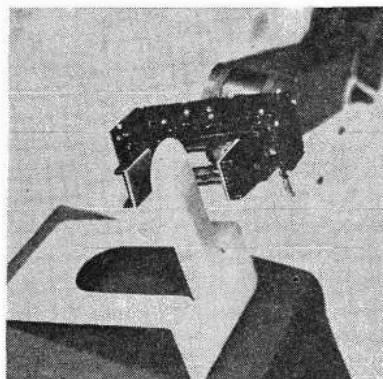


(b) operating mode

Photo. 2 Teaching robot path



(a) teaching mode



(b) operating mode

Photo. 3 Teaching of 3-D position and orientation

(a)). 得られた3次元位置と姿勢に従ってロボットを動かした結果が Photo. 3(b) である. 教示された位置と姿勢が再現されている.

本実験で使用した PSD カメラや LED などの装置類については, 《付録 2》に示す.

6. まとめ

本センサシステムは, 半導体ポジションセンサである PSD カメラとロボット装置に装着した複数の LED からなる簡単な構成で, 信頼性よくリアルタイムに3次元情報を得ることができ, ロボットの様々な分野への幅広い応用可能性に富んでいる.

本論文は, このシステムをロボットハンドの位置・姿勢検出およびロボット作業教示に応用し, その有効性を確認した. また, 作業教示装置を用いてロボットの環境教示システムの3次元入力装置として使用することも可能である.

本システムにおける残された課題は,

- (1) LED の高輝度化とレンズの広角化による作業空間の拡大.
- (2) PSD カメラの複数使用によるステレオビジョン法の併用による高信頼性化および高精度化.
- (3) 本教示システムとロボット言語との結合によるシステムの高度化などがある.

最後に, 御指導をいただく当所の若松清司制御部長およびロボット研究グループの方々, 特にマイクロプロセッサとロボットアームについて種々御教示下さった情報制御研究室佐藤知正主任研究官およびシステム制御研究室末広尚士技官に感謝の意を表します.

参考文献

- 1) R. A. Jarvis: A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **PAMI-50-2**, 122/139 (1983)
- 2) 白井: コンピュータビジョン, 昭晃堂 (1980)
- 3) 柿倉, 坂根: シーンの特徴抽出と環境の理解, 日本ロボット学会誌, 1-4, 6/14 (1983)
- 4) 石井, 長田: レーザトラッカーによる3次元物体の特徴抽出, 計測自動制御学会論文集, **10-5**, 79/85 (1974)
- 5) Y. Shirai, and M. Suwa: Recognition of Polyhedron with a Range Finder, 2nd International Joint Conference on Artificial Intelligence, 80/87 (1971)
- 6) 玉邑, 大和: 画像処理による3次元形状の計測, 精密機械, **47-6**, 102/107 (1981)
- 7) Okada, T: A Short-Range Finding Sensor for Manipulator, Bulletin of ETL, **42-6**, 492/504 (1978)
- 8) 増田, 長谷川: 位相情報の注目した光学式近接センサ, 計測自動制御学会論文集, **17-9**, 73/78 (1981)
- 9) T. Kanade and T. Sommer: An Optical Proximity Sensor for Measuring Surface Position and Orientation for Robot Manipulators, 1st International Symposium on Robotics Research (1983)
- 10) Y. Nakamura, and H. Hanafusa: A New Optical Proximity Sensor for Three Dimensional Autonomous Trajectory Control of Robot Manipulators, 1st International Conference on Advanced Robotics, 179/186 (1983)
- 11) 新井, 岡田: フォトアレイを利用した物体の位置・姿勢の測定, 昭和57年度精機学会春季大会学術論文集, 579/186 (1983)
- 12) 三平, 古田: レーザーを用いた機械系の軌道制御, 計測自動制御学会論文集, **20-4**, 64/69 (1984)
- 13) 上田, 平山, 和田, 伊藤: ロボット用光誘導センサの開発, 日本自動制御協会第27回システムと制御研究発表講演会, 119/120 (1983)
- 14) 笠井, 旭, 吉森, 辻: ポジションセンサを用いた3次元運動計測システム, 計測自動制御学会論文集, **19-12**, 61/67 (1983)
- 15) D. G. Lowe: Solving for the Parameters of Object Models from Image Descriptions, Proc. Image Understanding Workshop, 121/127 (1980)
- 16) 島崎: 投影変換の逆変換に関する2,3の考察, 電子通信学会画像工学研究会資料 IE, 79-15 (1979)
- 17) 石井, 坂根, 三上: ロボットハンドの位置姿勢センサの研究, 第22回 SICE 学術講演会予稿集, 3313 (1983)
- 18) 石井, 坂根, 柿倉, 三上: 3次元位置・姿勢センサとロボットへの応用, 電気学会・システム制御研究会, **CS-84-9** (1984)
- 19) 石井, 坂根, 柿倉, 三上: 3次元位置・姿勢センサによるロボット作業と環境の教示, 第23回 SICE 学術講演会予稿集, 1515 (1984)

《付録 1》

$(X_i, Y_i, Z_i)^T = \mathbf{R} \cdot (X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i})^T$ とおくと, (2),

(3) 式の未知パラメータは, $\{X_i, Y_i, Z_i, \alpha, \beta, \gamma, F\}$ の7個である. 画面上の座標 (X_c, Y_c) をこれらのパラメータで偏微分すると次式のようになる.

$$\begin{aligned} \Delta X_i (\partial X_c / \partial X_i) + \Delta Y_i (\partial X_c / \partial Y_i) \\ + \Delta Z_i (\partial X_c / \partial Z_i) + \Delta \alpha (\partial X_c / \partial \alpha) \\ + \Delta \beta (\partial X_c / \partial \beta) + \Delta \gamma (\partial X_c / \partial \gamma) \\ + \Delta F (\partial X_c / \partial F) = E_x \end{aligned} \quad (\text{A-1})$$

$$\begin{aligned} \Delta X_i (\partial Y_c / \partial X_i) + Y_i (\partial Y_c / \partial Y_i) \\ + \Delta Z_i (\partial Y_c / \partial Z_i) + \Delta \alpha (\partial Y_c / \partial \alpha) \\ + \Delta \beta (\partial Y_c / \partial \beta) + \Delta \gamma (\partial Y_c / \partial \gamma) \\ + \Delta F (\partial Y_c / \partial F) = E_y \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

ここで, $(\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma, \Delta F)$ は各パラメータの誤差であり, E_x および E_y は画面上の実測点と計算して求めた予測点との間の位置ずれの誤差値である. 未知パラメータに初期値を与え, 二つの式に基づいた連立方程式をたてる. 実際には観測点数が多く, 未知数より方程式の数が多くなるので, 最小2乗法を適用する. 求めた $(\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma, \Delta F)$ で, E_x と E_y の値が減少するように, ニュートン法を用いて繰り返し計算を実行し各パラメータを修

正する。

実験では、7~8回程度の反復で十分収束したパラメータ値が得られた。

《付録 2》

- ① PSD カメラは、C1454-05 (浜松ホトニクス(株)製)を使用した、サンプリング速度は300 Hz, 計測誤差は1~2.5%以下である。
- ② LED は、ピーク波長900 nm, 光出力15 mW

(標準)の赤外線発光ダイオードNJL 1120-L (新日本無線(株)製)である。

- ③ ロボットは、5自由度のアーム SMART 200 (住友重機(株)製), 繰り返し精度は ± 0.2 mmである。
- ④ 使用したホストコンピュータは VAX 11/780, マイクロプロセッサは LSI 11/23 である。