

中山 良一  
R. Nakayama

木村 元比古  
M. Kimura

飯倉 省一  
S. Iikura

宗像 正  
T. Munakata

辰野 恭市  
K. Tatsuno

人に優しく、人と共存するロボットの研究開発を進めてきた。人が作業できない場所で人に代っているいろいろな作業ができるロボット、人と接しながら作業できるロボットを紹介する。特殊な環境で使用されるロボットとしては、水中でレーザー光による加工作業ができるもの、直径 25 mm の配管内で目視点検ができるもの、障害物を回避しながら架線上を移動して点検ができるもの、などを開発した。また、聞く・見る・触る機能をもち、将来、介護や家庭内作業ができるロボットの実現を目ざした開発も進めている。

Toshiba has developed several types of robot for use in hazardous and dangerous environments (space, power plants, etc.). In this paper, four robot systems are described in detail; namely, the submersible maintenance robot, micro inspection robot for small piping, overhead line inspection robot, and human-friendly robot.

## 水中作業ロボット

### Submersible Maintenance Robot

#### 1 まえがき

当社は発電プラントの水タンクや原子炉内を水中で点検できる水中点検ロボット<sup>(1)</sup>を開発し、発電プラントでの利用などすでに実用化している。

ロボットが狭隘(あい)な場所まで進入して点検できるように小型化を図り、寸法は直径 150 mm、長さ 200 mm とし、さらに可搬性を向上させ、質量を 1.7 kg に軽量化した。

この点検ロボットを改良して、さらに操作性を向上させるために自動制御方法の開発と、水中での各種の保守作業のロボット化を目標にして作業ロボットの開発を行った。

ここでは、この水中作業ロボットの構成と特長および将来構想について述べる。

#### 2 水中作業ロボットの特長

水中作業ロボットは、テレビカメラと 4 基の推進機の組合せにより、水中を自由に移動できる水中点検ロボットを基本にしている。

##### 2.1 自動移動制御

自動移動の実現のためにロボットの位置制御用として、従来の深度センサに加えて角速度センサを搭載した。これらのセンサ信号とテレビカメラ映像の画像処理とを組み合わせ、深度および方向の制御を採用して、自動的な水中での三次元移動制御を実現した。

##### 2.2 遠隔補修作業

このロボットを用いて遠隔操作で補修作業を実行するため、ロボット本体の下方に作業用ハンドと、非接触で相手を加工できる装置としてレーザーの照射ヘッドを搭載した。

ロボットの寸法、質量を保ち、加工を実行するために、ロボットへの搭載物を少なくすることとし、レーザー発振器から光ファイバでレーザー光を導き、水中で切断などのレーザー加工を実現する方式とした。

図 1 にレーザー加工装置を搭載した水中作業ロボットの外観を、図 2 に水中作業ロボットのシステム構成を示す。

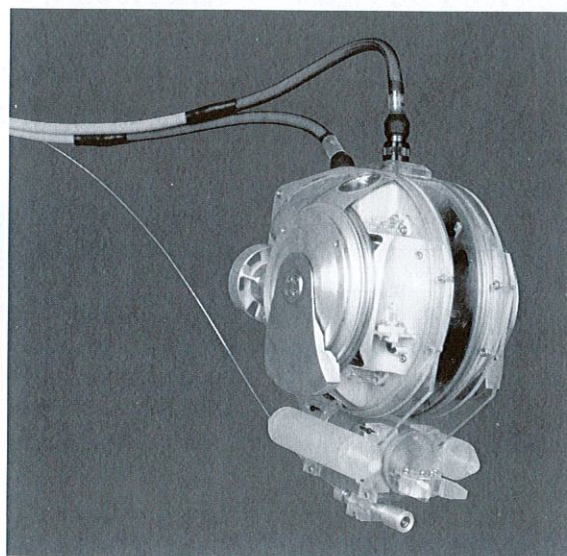


図 1. 水中作業ロボット 水中点検ロボットの下部に作業用装置を搭載している。

Submersible maintenance robot

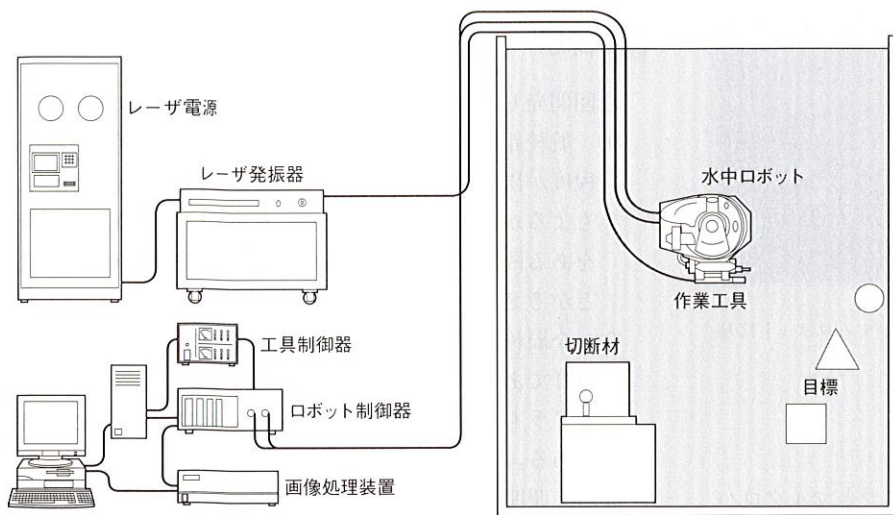


図2. 水中作業ロボットのシステム構成 4基の推進機をもつ水中ロボット、ハンド、レーザー加工装置を搭載した作業ロボットと制御装置などから構成している。

Configuration of submersible maintenance robot control system

### 3 成果

今回開発した水中作業ロボットの成果は以下のとおりである。

- (1) 水中での自動移動制御に関しては、ロボットのカメラで、水槽内に取付けた複数の色と形の異なるマークを水深および方向の制御により発見し、その映像を画像処理し、マークの形と色を識別しながら自動的に追尾してマークへ接近することができた。
- (2) 遠隔補修作業の機能については、ロボットのハンドによる作業対象物の取扱いとレーザーによる切断実験を行った。レーザー加工に関しては、水中で光ファイバを介してYAGレーザーによりハンドで把持した厚さ0.5mmの合金板を切断することができた。また、幅10mmの板を、5秒程度で切断することができた。このときのレーザー出力は約30Wである。

### 4 課題と今後の予定

実用的な水中作業ロボットの原型機としてのシステムは完成したが、今後以下に以下の課題がある。

移動制御に関しては、複雑形状目標物に対する画像処理やケーブルの影響を考慮し、ロボットの動作を妨げないくふう（例えば、自動ケーブル処理装置の導入）をする。

レーザー加工に関しては、ロボットの位置決め・固定方法、レーザーのパワーアップなどを図り、実際の工事に適用できるよう改良を図る必要がある。

### 5 あとがき

このロボットで、発電プラントなどにある水タンクの定期的あるいは必要に応じた点検・検査・補修作業を実現で

きるシステムの概念を提示することができた。

今後は、前述の課題を克服しながら、いろいろな用途に応じたシステムを開発したいと考えている。（中山/木村）

## 小口径配管作業ロボット

### Micro Inspection Robot for Small Piping

#### 1 まえがき

発電プラントや工場などにある配管は定期的あるいは必要に応じて検査する必要があるが、その工期短縮のため、配管内を自走して内面を分解せずに検査する装置への要求が増している。従来からこの種の装置の開発が行われているが、非常に小さい物は移動機能だけであり、カメラだけを搭載した物は比較的口径の大きな配管に限られていた。

そこで、当社がこれまでにマイクロメカニズムの研究として開発してきた超小型モータや超小型不思議遊星歯車減速機<sup>(2)</sup>あるいは空圧のフレキシブルマイクロアクチュエータ(FMA)<sup>(3)</sup>などの要素を組み合わせた、1インチ配管用の目視検査と異物の回収が可能な小口径配管作業ロボットを開発した。

ここでは、このロボットの構成と特長および将来構想について述べる。

#### 2 ロボットの構成と特長

図3に示すように、ロボットは前後の車輪で自走し、先

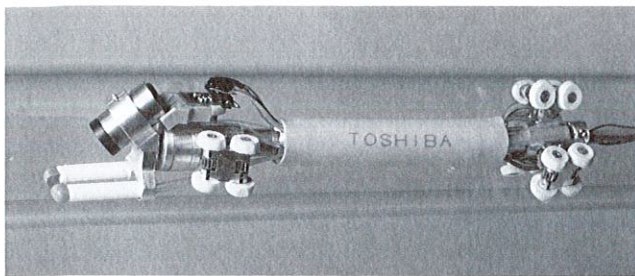


図3. 小口径配管作業ロボット 遊星車輪で自走するロボットに超小型カメラとマイクロハンドを搭載している。

Micro inspection robot for small piping

端に搭載した高分解能マイクロテレビカメラとマイクロハンドで点検作業を行うようになっている。大きさは、直径が23 mm、全長が110 mmで、質量は16 gである。

### 2.1 移動機構

移動機構は、直径5 mmの小型同期モータを動力源とし、直径が5 mmで減速比が1:162の超小型不思議遊星歯車減速機と、その出力軸に直結したウォームギアで遊星車輪を回転する構成にしている。遊星車輪機構は、公転することによって多少の管径変化に対応するとともに、負荷に応じて車輪を管壁に押しつける力が変化する特長があり、すべりを生じにくい。移動速度は6 mm/sであり、1 N以上の牽(けん)引力がある。

### 2.2 フレキシブルリンク

一般に配管系には曲り管があり、これを通過するために本体中央部をゴム製のフレキシブルリンクで構成し、管に沿って本体が受動的に変形するようにしている。

### 2.3 ハンド機構

異物を把持する機構は、FMAを採用した直径3 mm、長さ15 mmの指を2本搭載したハンドで構成している。

FMAは空気圧で駆動するゴム製のものであるため、把持力は0.03 Nであるが、1インチ配管内にあるものを対象としているので十分な大きさである。指はそれぞれが左右上下に湾曲できるので、複雑な動作が可能である。

### 2.4 テレビカメラ

配管内面の傷や付着物の目視検査に要求される高画質を得るため、41万画素のCCD(電荷結合素子)カメラを搭載している。カメラの大きさは直径が7 mm、長さが12 mmである。

### 2.5 作業部回転機構

微妙な位置合わせのためには、テレビカメラとハンドを一体にして回転する必要があるが、そのアクチュエータをできるだけ小さくすることから、空圧ワブルモータ<sup>(4)</sup>を新たに開発した。これは構造が簡単であるので小型にでき、今回採用したものは直径が9.4 mm、長さが6 mmで、トルクは7 mN・mである。

## 3 課題

今回開発したロボットには以下のような課題がある。

- (1) 航続距離 牽引力とケーブルの重量から現状は5 m程度が限界である。配管系の複雑さと管内面の状況にもよるが、航続距離を延ばす方法として、移動機構部をある間隔で配置して協調的にケーブルを牽引することが考えられる。
- (2) 全周検査 このロボットは現状では180度程度の視野であるが、管内面を全周にわたって検査するにはカメラもしくは光学系あるいは本体の回転機構が必要である。

なお、照明については、このロボットは有線を前提としており、また、大きさから既存の照明が使えるので技術的な問題はない。

## 4 あとがき

このロボットで、マイクロメカニズムを応用したマイクロロボットの実用的なイメージを提示することができた。今後は、いろいろな要求にこたえるため、実用化に向けて前述のような課題を克服したいと考えている。(飯倉)

## 架線点検ロボット

Mobile Inspection Robot for Overhead Lines

### 1 まえがき

電力や通信用の架線は、現代社会の生命線の一つとして、健全性維持が強く求められている。そのため、架線の損傷や、樹木の接近など周辺の状態を対象にした点検作業が作業員による地上からの観察やヘリコプタによる巡視などさまざまな方法によって実施されている。

また、点検作業の自動化、効率化のためにロボット、自動機も数多く開発されているが、長距離の架線を連続的に点検できるものはない。

架線移動ロボットの技術課題は、まず第一に、碍子(がいし)や引下げ線など架線の付帯設備や電柱、鉄塔などの支持構造物を通過する機能を小型・軽量、かつ省エネルギーで実現することである。また、ロボットとオペレータ間の情報のやりとりが次の技術課題であり、特に点検データの収集や、ロボット状態のモニタリングを可能とする情報伝送

機能が求められている。

当社が開発した架線点検ロボットは、これらの技術課題を解決して、広域にわたる架線の自動点検に道を開くものである<sup>(5),(6)</sup>。

## 2 架線点検ロボットの特長

開発した架線点検ロボットのシステム構成を図4に示す。地上制御装置は、当社の産業用パソコン(FA3100E)を制御用コンピュータとして用い、各種モニタ、サーボコントローラ、通信装置などで構成されている。一方、ロボット本体には、各動作軸のモータ(M)を制御するサーボドライバ、テレビカメラ、電池などを搭載している。

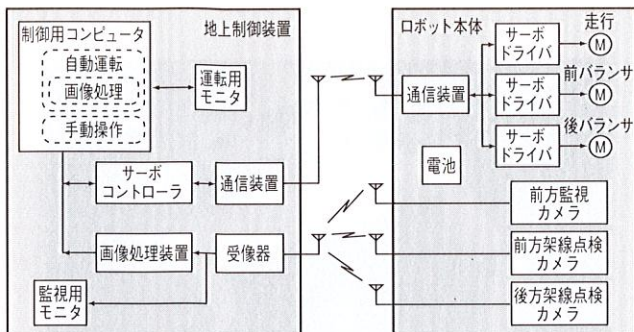


図4. 架線点検ロボット制御システムの構成 地上制御装置とロボット本体の間は無線通信により接続されている。

Configuration of overhead line inspection robot control system

このシステムの特長は、サーボコントローラとサーボドライバの間、およびカメラと受像機間の信号伝送を無線通信で行っている点である。これにより、ロボットの質量や寸法、消費するエネルギーに影響を与えることなく、さまざまな高度な制御機能を組み込むことが可能となった。

この架線点検ロボットは、前方監視カメラの画像を地上制御装置で画像処理して、ロボット本体の架線周りの振動の周期とタイミングを割り出し、バランス軸を動作させて振動を抑制する機能を備えている。

ロボット本体の構成を図5に示す。

ロボットは前輪、中輪、後輪の三つの車輪で、架線を挟み付けて走行する。点検用には架線の周辺を撮影する前方監視用のテレビカメラと、架線を真横から撮影するテレビカメラを2台搭載し、全長500mm、質量約7kgと非常に小型・軽量のロボットにすることができた。

この機構の最大の特長は、電池などを収納した前後のバランス軸を動かして重心を移動し、ロボット本体が架線の周りに回転できることである。この単純な動作により、前輪、中輪、後輪をつなぐロボット本体は、架線に沿って螺(ら)

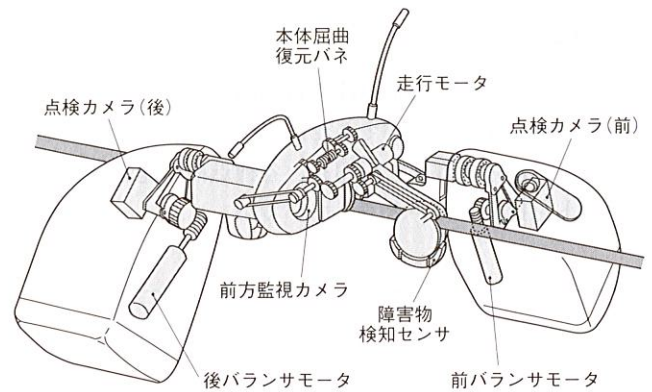


図5. 架線点検ロボットの構成 前後のバランス軸を回らせる動作軸と3個の車輪を回らせる走行軸を備えている。

Configuration of overhead line inspection robot

旋状に移動し、障害物を回避することができる。さらに、この方式によれば、反対側に空間が確保されていれば、障害物がどの方向から架線に接続されていても、回避が可能である(図6)。

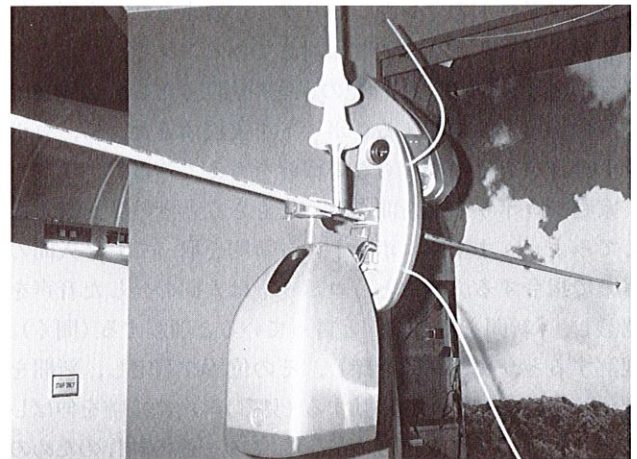


図6. 障害物回避 バランスを動かし架線周りに回転して碍子を回避する。

Mobile robot moving around obstacle

## 3 課題と今後の展開

今回開発した架線点検ロボットは、無線通信を用いた地上制御装置とロボット本体との機能分担や、単純な機構による障害物回避など、自律的に架線点検を行うロボットの原形をなすものと考えている。今後は、高性能電池の搭載による連続走行距離の拡大、画像処理機能による障害物検出などの機能向上を進めるとともに、対象とする架線や碍子、障害物に応じた設計により、さまざまな架線の点検作業への適用を図っていききたい。

## 4 あとがき

このロボットで、架線点検を自動的に行うシステムのイメージを提示することができた。

今後は、前述の課題を克服し、各種点検機能を充実したロボットを提供したいと考えている。(宗像)

## ヒューマンフレンドリロボット

### Human-Friendly Robot

### 1 まえがき

1980年代から自動車の製造ラインを中心にロボットが導入され、溶接・塗装などの作業を行っている。しかし、その後大量生産ライン以外への普及は遅々として進まない。今後、ロボットのフレキシビリティが要求される多種少量生産ラインやオーダーメイドに対応できるフレキシブルな製造ライン、あるいは21世紀の家庭や病院などの公共施設で人間の生活空間で使えるロボットを実現するために、ロボット自身もたねばならない機能を考えてみる<sup>(7)</sup>。

家庭でロボットに新聞を取ってもらうときの状況を想像してみよう。まず、ロボットに「新聞を取って」と人間の言葉で指令する。すると、ロボットは人間の発した音声を認識し、「新聞を取って」と言っていると理解する(聞く)。理解すると、次は新聞を探し、その位置を測定し、新聞を掴(つか)む相対位置へ移動する(見る)。次に、腕を伸ばして、手で新聞を掴む(触る)。この一連の動作のためのプログラムを自動生成する。以上のように、ロボットには聞く・見る・触る機能が必要不可欠であることがわかる。これらの機能は家庭用ロボットだけでなく、多種少量生産ラインでCADデータから作業プログラムを自動生成し、対象物との位置合わせを行い、自動的に作業を実行するロボットにも必要となることは理解していただけるだろう。以上がこのヒューマンフレンドリロボットを開発した動機である。

ここでは、ヒューマンフレンドリロボットの全体構成と、見る・聞く・触る機能を支える技術を簡単に紹介する。

### 2 ロボットシステムの全体構成

図7にロボットの機構部を、図8にビーチボールをしているロボットの外観を示す。ロボットを移動させる機構(God

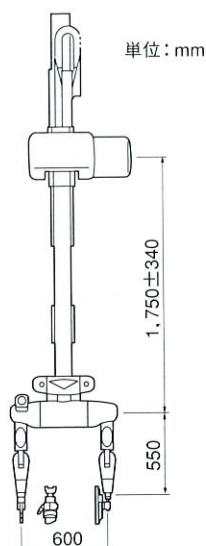


図7. ヒューマンフレンドリロボットの機構  
ロボットの本体は人と同じサイズに設計し、ロボットを動かす機構はボールを追える速度を出すために振り子型にした。

Configuration of human-friendly robot

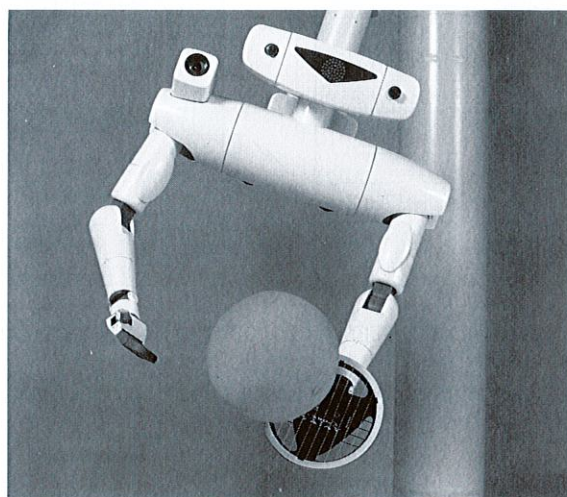


図8. ヒューマンフレンドリロボット ビーチボールを打っているロボット。

Human-friendly robot

アーム)はビーチボールを追える速度2.5 m/sを出せるように、振り子型にした。また、ビーチボールを打つ左アーム(左 Angel アーム)の最大速度は4.2 m/sである。

また、図9にこのロボットを動かすためのコントローラの構成を示す。各アームや雲台はVME (Versa Module Eurocard) ボードを用い、全体管理や顔、動き、音声などの認識にはワークステーションを用いている。

### 3 各機能を支える技術

#### 3.1 見る機能

見る機能として、ビーチボールの位置計測<sup>(8)</sup>と位置合わせ(ビジュアルフィードバック)、人の顔の認識<sup>(9)</sup>、動きの認識機能がある。

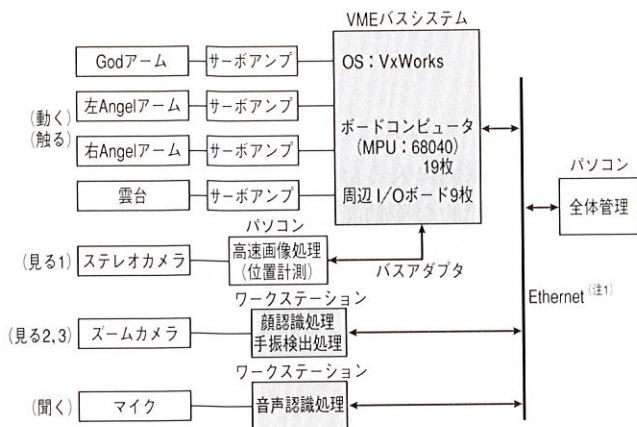


図9. ヒューマンフレンドリロボットのコントローラ アームの制御にはVMEシステムを、画像の処理はパソコン、顔認識、音声認識はワークステーションを用いている。

Configuration of human-friendly robot controller

**3.1.1 ビーチボールの位置計測** 画像による位置計測の処理の流れを図10に示す。目にあたる左右2台のCCDカメラから画像データがラベリングボードにそれぞれ入力される。この2枚のラベリングボードは色の抽出と、抽出された領域に番号付け(ラベリング)を行い、CPUボードにデータを転送する。

CPUボードでは、各領域の断面二次モーメントと円弧度(面積と周長の自乗の比)を計算し、円形の領域、すなわち、ボールの部分を識別し、その重心を求める。左右のカメラの映像について、同一のボールの領域であることを確認し、

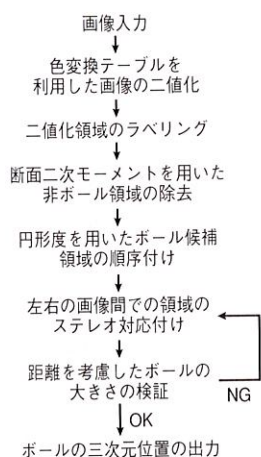


図10. 位置計測の処理 ビーチボールの位置計測は、色を抽出し、円形に近い部分をボールとして取り出した後、左右のボールの重心から三角測量の原理で三次元位置を計算する。

Flow of ball position calculation

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス㈱の商標。

その左右の映像の重心から三角測量の原理に基づいて三次元位置を計算する。

ビーチボールの位置を高速に計測するために、ラベリングボードを新たに製作し、フィールドデータを利用して1秒間に60枚のデータを処理できるようにした。通常の処理速度は毎秒30枚である。

**3.1.2 ビジュアルフィードバック** カメラから見たボールの相対位置  $x$  がわかると、ボールを拾うための位置(ボールとの相対位置)を目標値として与え、 $x$  がこの目標値になるように移動機構の関節  $\theta$  を制御する。 $x$  と  $\theta$  の関係は次式で表される。

$$x = J\theta \tag{1}$$

ここで、 $J$  は  $\theta$  から  $x$  への変換を示すヤコビアンで、移動機構の設計値から求まる。 $x$  を画像データから測定すると、

$$\theta = (JJ)x \tag{2}$$

により、関節角を求め、 $x$  が目標値  $x$  になるように  $\theta$  を制御する。設計値の  $J$  が実際の  $J$  と少々異なっても、漸近的に目標値  $x$  になる  $\theta$  に収束する。

### 3.2 顔認識

肩に搭載したズームカメラを用いて、ロボットの前方に立っている人が誰であるかを識別する。処理の流れを図11に示す。まず、肌色領域を求め、顔領域を抽出する。次に顔が画像の中心に適切な大きさになるようにズームする(フレーミング)。次に、顔内の瞳(ひとみ)、鼻孔を抽出し、これらの位置を基準に矩(く)形の領域を顔として切り出す。矩形の顔領域を  $16 \times 16$  に分割して正規化濃淡パターン

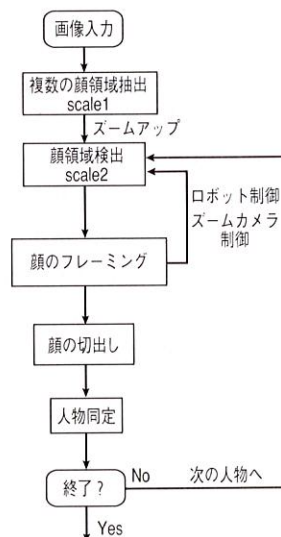


図11. 顔認識の処理 肌色で顔を識別し、鼻孔と目の位置を基準に顔のエリアを切り出し、このエリアの規格化された画像信号のパターンより顔を識別する。

Flow of face recognition

ンを求め、あらかじめ登録したパターンと照合し、人を同定する。

### 3.3 手振り認識

ロボットの肩の部分に装着したズームカメラから入力された画像を DSP (Digital Signal Processor) ボードに取り込み、画像中の各点の速度をこう配法を用いて計算する。例えば、画面中の一人の人が手を振り、別の人が飛び跳ねている場合を考える。このとき、DSP ボードでは各点に対して、図 12 に示したような速度の向きと大きさが計算され、この速度の平均と分散を求め、2 回程度往復する手振りのモデルと類似した部分を特定する。高速に画像中の速度を求めるために、DSP を搭載した PCI (Programmable Communication Interface) バス用のボードを 200 MHz のペンティアムプロマシに搭載して利用した。

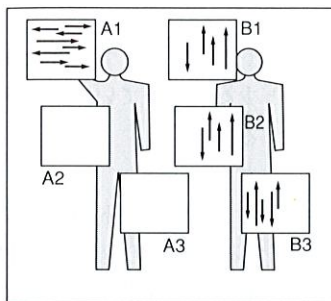


図 12. 手振り認識 画像の中の各点の移動速度を求め、その結果により誰が手を振っているかを認識している。

Flow of hand movement recognition

### 3.4 聞く機能

音声認識部は、母音/子音などの言葉の基本単位である音素と音声とを照合する、いうなれば“音声聞きとる”ための音素モデルと、“聞きとった音声から単語、文章を認識する”ため、文法を記述したオートマトンを用いて入力音声の認識を行う。

入力された音声を時間周波数パターン(声紋)に変換し、音素モデルと照合し、発声された音声の音素を識別する。識別した音素列と認識語彙(い)との類似度を順次求める。例えば、“赤い”という単語の場合、単語を構成する音素 A, K, A, I の音韻それぞれの類似度の和となる。音声認識部が音声終了を検出した時点で、その時刻を文末とする仮説中でもっとも類似度の高い仮説を認識結果として出力する。

### 3.5 触る機能

手首部に組込まれた 6 軸力覚センサの信号を基に、ロボットの手に加わる力を検出し、相手と柔らかく接触することを可能にした。ここではインピーダンス制御と呼ばれる制御則を適用することで、手先があたかも仮想的な質量、粘性、剛性をもつかのように運動するように制御し、このような柔らかな接触が実現できた。これによって、人間との握手などのように、相手との接触や、相手からの拘束を

受けるような作業を安定にかつ滑らかに実現できた。

## 4 あとがき

ロボットが家庭に入るためには、人とのコミュニケーション能力、自律的な移動能力や作業能力の向上、安全性の確保などまだまだ解決すべき課題が残されている。

今後も、これらの要素技術の高度化に向け、さらに技術開発を進めていく。

(辰野)

## 文 献

- (1) 木村元比古, 他: 原子炉用水中点検装置の開発, 日本原子力学会誌, 38, 10, pp.826-833 (1996)
- (2) 堀 光平: 超小型減速機付サーボアクチュエータ, 精密工学会誌, 61, 9, pp.1235-1238 (1995)
- (3) 鈴森康一, 他: フレキシブルマイクロアクチュエータ, 日本機械学会誌, 94, 872, pp.600-602 (1991)
- (4) 鈴森康一, 他: 空圧マイクロワブルモータの開発, 日本機械学会第 74 期通常総会講演会論文集 (IV), pp.128-129 (1997)
- (5) 澤田 純, 他: 送電線用光ファイバ複合架空地線点検ロボット, 東芝レビュー, 46, 7, pp.538-541 (1991)
- (6) 磯部 文夫, 他: 鉄道電線点検ロボットの開発, 日本ロボット学会第 12 回学術講演会予稿集, 1, pp.383-384 (1994)
- (7) H. Sato, et al: Development of a Model-Based Remote Maintenance Robot System (1), Proceedings of IROS'93, Vol.2, pp.1225-1230 (1993)
- (8) 日本機械学会編: 計測法シリーズ 5 「画像処理とパターン計測」朝倉書店
- (9) 福井和広, 渡辺 睦: “ヒューマンインタフェースにおける顔のセンシング”, センサ技術研究会資料, pp39-47, 電気学会 (1994)



中山 良一 Ryoichi Nakayama

原子力事業部原子力技術研究所部長。  
原子力用ロボットなどの開発に従事。日本機械学会, 日本原子力学会, 日本ロボット学会会員。  
Nuclear Engineering Lab.



木村 元比古 Motohiko Kimura

原子力事業部原子力技術研究所主査。  
原子力用ロボットなどの開発に従事。日本機械学会, 日本原子力学会会員。  
Nuclear Engineering Lab.



飯倉 省一 Shoichi Iikura

研究開発センター 機械・エネルギー研究所研究主幹。  
ロボットやマイクロマシンなどのメカトロ機器の開発に従事。日本機械学会, 日本ロボット学会会員。  
Energy & Mechanical Research Labs.



宗像 正 Tadashi Munakata

重電技術研究所産業輸送機器技術開発部部長。  
産業機器の開発, 保守保全ロボットの開発に従事。日本機械学会, 日本原子力学会, 日本ロボット学会会員。  
Heavy Apparatus Engineering Lab.



辰野 恭市 Kyoichi Tatsuno

研究開発センター 機械・エネルギー研究所研究主幹。  
各種ロボットなどのメカトロ機器の開発に従事。日本機械学会, 日本ロボット学会会員。  
Energy & Mechanical Research Labs.