

# マニピュレータを搭載した移動ロボットによるドアの通り抜け動作の実現 —第3報：手先のCCDカメラによるドアノブの認識と把持動作—

筑波大学 ○永谷 圭司

筑波大学 油田 信一

Realizing a Behavior to Find and Grasp a Door Knob by a Mobile Robot Equipped with a Manipulator

○ Keiji NAGATANI : University of Tsukuba

Shin'ichi YUTA : University of Tsukuba

## Abstract

A goal of this research is to realize a task of opening a door and passing through a doorway by an autonomous mobile robot equipped with a manipulator. In this paper, we focus a sub-task to find and grasp a door knob by the robot. When a mobile robot moves, there exists a position estimation error of the robot. It also generates a positioning error on the top of the manipulator. To grasp a door knob, the robot need to fix the knob's position. In this research, we use a vision system which is mounted on the end-effector. We propose how to realize the sub-task, and report an experimental result of it.

## 1 はじめに

本研究の大目標は、マニピュレータを搭載した自律移動ロボットが自分でドアを開閉し、屋内環境を目的地まで走行する動作を実現することである。このタスクは、ノブの把持動作やドアの押し開け動作など、いくつかのサブタスクを組み合わせることで実現できる。本稿では、マニピュレータの手先に搭載したCCDカメラによるドアノブの認識と把持動作というサブタスクの実現方法及び実験結果について報告する。

## 2 研究の位置づけと問題設定

マニピュレータを搭載した自律移動ロボットによるドアの通り抜け動作の実現というタスクは、ドアのサイズや移動ロボットの大きさ、及びマニピュレータの長さなどに大きく依存する。そこでまず、対象とする環境及びロボットを設定する。またこれらの条件下でのノブの把持動作の問題点を挙げ問題設定を行う。

### 2.1 対象とする環境

対象とする環境は我々の大学の研究室、及びその前の廊下とする。この環境の概観を図1に示す。床面はほぼ平らで、凹凸があるとしても5mm以下である。部屋と廊下は片開きドアで接続される。ドアは通常閉まっており、ノブを回して押すか引くことによって開けることができる。ドアのサイズは、縦200cm、横90cm、幅5cmである。ノブは円筒形で、高さ約100cm、ドアの端から約5cmのところを中心に中心がある。ノブの半径は約2.5cmでドア面から約6cmのところから先端がくる。

### 2.2 対象とするロボット

対象とするロボットは我々の研究室で開発している自律型移動ロボット「山彦type-TEN」とする(図2)。

このロボットは軽量の6自由度マニピュレータ[1]を搭載し、先端には力センサ及びドアノブを掴むための専用ハンドを有する。このハンドに、ノブを見つけるためのCCDカメラを搭載する。

この移動ロボットは、ナビゲーションを行うための外界センサとして、周囲12箇所に超音波距離センサを装備している。走行系には左右に駆動輪を備えたPower

Wheeled Steeringを採用し、オドメトリによりロボットの現在位置を推定する。

移動ロボットのサイズは、高さ約90cm、幅約70cm、奥行き約50cmで、ハンドまで含めたマニピュレータの全長は106cmである。また、移動ロボット本体の重量は約60kg、マニピュレータの重量は腕の部分のみで約20kgである。

### 2.3 本研究の位置づけ

設定した環境及びロボットの下で、ロボットによるドアの通り抜け動作の設計について既に報告した[2]。そこでは、ロボットの各機能コントローラ間の協調動作に注目して動作を9段階に分割し、各段階で必要なロボットの動作設計を行った。この動作の9段階を図3に示す。既に、この動作の第4段階を実現するため、走行系とマニピュレータ制御系との協調動作を設計し、実ロボット上でドアの押し開け動作を実現した[3]。残された重要なサブタスクは、第2段階と第7段階のドアノブの把持動作である。本研究では、このサブタスクの実現を目標とする。



図 1: 環境 (筑波大学 3E-105)

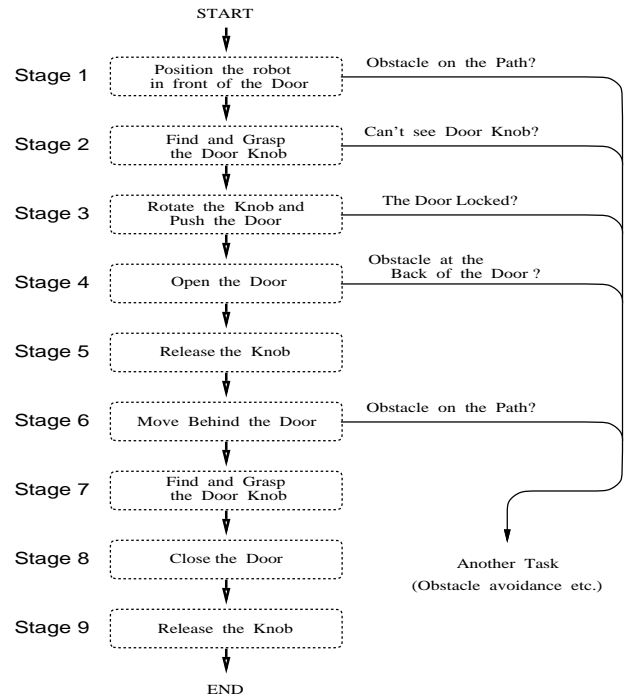


図 3: ロボットによるドアの通り抜け動作の9段階

## 2.4 本研究の問題設定

ロボットがノブを把持する際、仮にロボットが作業空間中の手先の位置、及びノブの位置を正確に把握していれば、マニピュレータの手先の位置制御のみでノブを把持することができる。しかし現実には、手先の推定位置に誤差が含まれるため、位置制御のみでノブを把持することができない。この推定位置の誤差は、以下に挙げる原因によって生ずる。

### 1. ロボット本体の推定位置の誤差

移動ロボットが走行する際、オドメトリにより推定されるロボット本体の位置には累積誤差が生ずる。この誤差は外界センサを用いてランドマークを検出し、ロボットの推定位置を修正することによってある程度押えることができるが、数センチメートル程度の誤差は避けられない。

### 2. 移動ロボットの傾き

車輪型の移動ロボットは、走行面の凹凸による振動の吸収や小さな段差を乗り越えるためのサスペンション機能を持つ。また車輪に空気タイヤなど変形するタイヤを用いることもある。このため、床面の状況やマニピュレータの姿勢によって、移動ロボット本体が前後または左右に傾き、マニピュレータ部のベースの位置や向きに変動を与える。

### 3. マニピュレータの精度

一般に移動ロボットに搭載するマニピュレータは小型軽量であることが要求される。このためマニピュレータ自体の剛性は低く、ジョイント部の精度にも限りがある。したがって、先端の位置ぎめ

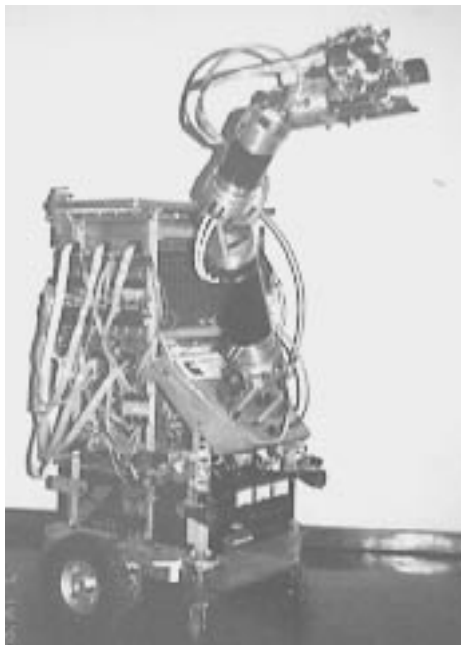


図 2: 自律型移動ロボット「山彦 type-TEN」

精度は、据え置き型のマニピュレータと比較して悪い。

強力な外界センサを使用してロボット本体のポジショニングの精度を向上させたり、マニピュレータの剛性を上げることで、ある程度手先の推定位置の誤差を減少させることはできるが、これには限界がある。

本研究では、ハンドに搭載した CCD カメラを用いてノブの位置を確認し、その情報に基づいたドアノブの把持動作を行うことにする。ここで、ロボットは、ノブの位置情報を有し、オドメトリとマニピュレータの姿勢を用いて作業空間内の手先の位置も推定できるものとする。ただし、それらの位置情報には誤差が含まれる。

### 3 ドアノブの把持動作の設計

本節では、ドアノブの把持動作の全体の設計について述べる。

カメラの視野には限界があるので、カメラを搭載したハンドはドアから離れた位置からアプローチする必要がある。そこで本研究では、以下に示す手順に従い、ハンドがノブの位置を確認しつつ徐々にアプローチすることにした。

#### (1) 初期設定

まずロボットは、オドメトリによって推定したロボットの位置情報に基づいてドアの正面に停止し、手先がノブの正面となるようにマニピュレータを制御する。このとき、カメラの視野にノブを入れるため、手先の目標位置はノブから 15cm 離れた位置とする。

#### (2) 画像上のノブ情報の抽出

手先に搭載した CCD カメラから獲得した画像を処理し、画像上でのドアノブの情報を得る。

ノブは円筒形なので、手先に搭載したカメラから得られる画像上でのノブは、幾つかの同心円が重なったように見える。この中で最も大きな円はノブを支える円盤で、ドアに直接設置されている。以後この円盤のことをノブの支えと呼ぶ。このノブの支えの位置情報を得ることにより、ノブの位置が認識できる。そこでまず、画像上でのノブの支えを表す円を抽出する。この円の抽出は、円の中心座標  $(X, Y)$  及び半径  $R$  を軸とするパラメータ空間に候補を投票するアルゴリズムを用いて行う。

#### (3) 手先の移動ベクトルの計算

次に画像上のノブの支えの中心座標  $(X, Y)$  及び半径  $R$  から、ノブの正面にハンドの中心を移動させるため、作業空間内での手先の移動ベクトルを算出する。

本研究では、ノブを認識するための CCD カメラはハンドの上部に設置している。よって、ハンドの中心は、カメラの中心を通りレンズ面に垂直な直線の上にはない。このため、カメラからドアまでの距離にしたがって、画像上でノブの支えの中心があるべき座標、

つまりハンドがノブの正面にある時の画像上のノブ支えの中心座標は移動する。一方カメラがノブに近いほど、画像上のノブの支えの半径は大きくなる。よってノブの支えの半径から、カメラからドアまでの距離が推定できる。以上より、画像上のノブ支えの半径に対する、ノブの支えの中心があるべき座標は一意に決まる。この座標と、実際に画像データより得られたノブの支えの中心座標より、画像上での手先を動かすべきベクトルが求まる。このベクトルから作業空間内での手先の移動ベクトルを算出する。

また、ノブの支えの中心があるべき座標と実際に見える中心座標がほぼ一致する場合、ノブを掴むためロボットは手先をノブの方向に移動する。ノブまでの距離が正確に測定できれば、その距離だけ手先を移動しノブを把持することができる。しかし、画像上のノブの支えの半径には量子化誤差などの誤差が含まれるため、このノブまでの距離の推定値には誤差が含まれる。そこで、ノブの方向への移動は小さくし、繰り返しノブの認識とハンドの移動を行うことによってノブへのアプローチを行う。

以上より、作業空間内での手先の移動ベクトルが計算できる。

#### (4) マニピュレータの制御

計算した手先の移動ベクトルにしたがって、マニピュレータの手先を移動する。この移動のための各ジョイントの移動量は、ディファレンシャルモーションによる式 [4] を用いて計算する。

#### (5) 終了条件とノブの把持

ハンドからドアまでの距離が十分に近付いたとき、グリップを閉じてノブを把持し、このドアノブの把持動作を終了する。距離が十分に近付いていなければ (2) から (4) を繰り返し、ハンドはノブへアプローチする。

## 4 インプリメントと実験

本節では、3 節で設計したドアノブの把持動作の、自律型移動ロボットへの搭載と実験結果について報告する。

### 4.1 ロボットのハードウェア

ロボットは、2.2 節で設定した「山彦 type-TEN」を用いる。このロボットに搭載するマニピュレータは多関節型で、根本に 3 自由度、肘に 1 自由度、手首に 2 自由度の計 6 自由度を有する。マニピュレータの先端にはノブを把持するために内側にカーブを持たせた平行二指ハンドを搭載する。ハンドの上部には、WATEC 社製の小型 CCD カメラを搭載する。またノブを把持するまで、カメラの視野内にノブを捉えるため、カメラをハンドの内側に 10 度傾ける (図 4)。

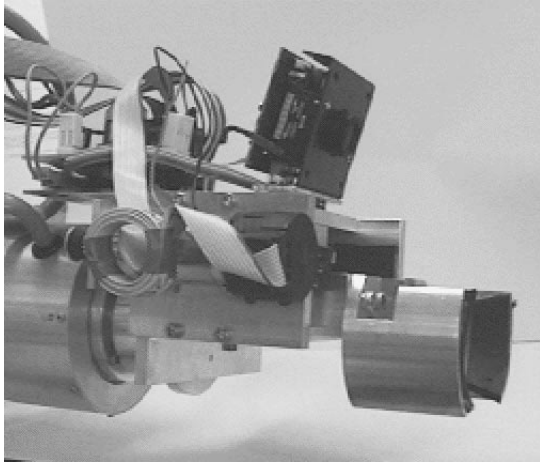


図 4: 搭載するハンド

## 4.2 ロボットコントローラのアーキテクチャ

対象とするロボット「山彦 type-TEN」は、各種センサ、走行系、マニピュレータなどの各々の物理的な機能毎に独立した機能モジュールによって構成される。各機能モジュールはCPU及びリアルタイムOSを搭載し、独立に動作することが可能である。これらのモジュールは、中央に位置するマスタモジュールと呼ばれる意志決定モジュールによって統括・制御される。このマスタモジュールと各機能モジュールはバス接続され、共有メモリを用いてモジュール間の通信を実現している。このモジュールアーキテクチャを図5に示す。

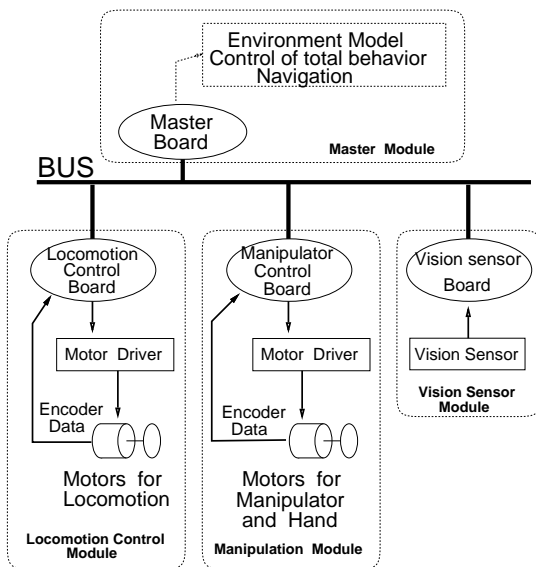


図 5: 山彦 type-TEN のモジュールアーキテクチャ

マスタモジュール及びマニピュレーションモジュールに関しては既に報告した [3]。また、走行モジュールに関しては、既に報告が出ている [5]。

視覚センサモジュールは、WATEC社製のオンボード CCD カメラ及びコントロールボードから構成される。カメラから得られる画像は  $256 \times 240$  の濃淡画像で、この情報はコントロールボードのフレームメ

モリに、1画素あたり 256 レベルの濃淡値で格納される。コントロールボードは、CPUにINMOS社製の T-805 (トランスペュータ) を搭載し、フレームメモリ以外に 256Kbyte の ROM 及び 512Kbyte の RAM を有する。このボード上に画像処理ソフトウェアが搭載される。またこのボードは共有メモリを有し、バスを通じてマスタモジュールと通信を行うことができる。

これらのモジュールの他にも、ランドマークや障害物までの距離を測定するための超音波距離センサモジュール、手先にかかる力を測定する力センサモジュール、デバッグ情報などを音声で知らせる音声合成モジュールなどがある。

## 4.3 行動プログラムのインプリメント

次に、ノブの把持動作を実現するためのソフトウェアについて述べる。プログラムは、第3節に述べた設計に基づき、C言語を用いて記述した。ソフトウェアは、画像処理、マニピュレータ制御、及び行動プログラムに分けて書かれている。画像処理ソフトウェアは視覚センサモジュール上に搭載し、カメラから得られた画像上でのノブの支えの中心座標及び半径を抽出する。また、マニピュレータ制御のソフトウェアは、マニピュレーションモジュール上に搭載し、マニピュレータ及びハンドの制御を行う。

この動作全体を統括・管理する行動プログラムはマスタモジュール上に搭載する。このプログラムは、ノブを把持できる位置に手先が到達するまで、以下に示す手順の (1) から (4) の処理を繰り返す。

### (1) 手先の位置の確認

マニピュレーションモジュールの共有メモリを通して、画像を取り込む瞬間のマニピュレータの各軸の関節角度を獲得する。

### (2) 画像取り込みと処理

視覚センサモジュールの共有メモリを通して、視覚センサモジュールに画像処理コマンドを与える。このコマンドの引数は、画像処理を行う上で使用するパラメータ空間の範囲とする。これは、処理する画像及び投票空間の範囲を制限し、処理スピードを向上するためである。この範囲は、前回の処理で求めたノブの支えの中心及びノブの支えの半径付近とする。画像処理ソフトウェアのインプリメントに関しては4.4節で述べる。処理が終了した後、共有メモリを通して画像上のノブの支えの中心座標  $(X, Y)$  及びその半径  $R$  を得る。

### (3) 移動ベクトルの計算

画像上のノブの支えの中心座標  $(X, Y)$  とその半径  $R$  より、ノブの正面に手先を移動するための移動ベクトル  $(mx, my, mz)$  を計算する。ただしこのベクトルは手先に固定される座標軸上に定義する。この座標系は、ハンドの先端を原点とし、ノブにアプローチする方向を  $z$  軸、ハンドが閉まる方向を  $y$  軸、 $y$  軸と  $z$  軸に垂直な軸を  $x$  軸とする [4]。

画像上の、ノブ支えの半径に対するノブの支えの中心が見えるべき座標は一意に決まる。そこで、予めハンドがノブの正面となる時の画像上のノブ支えの半径と、それに対応するノブの支えの中心座標を測定し、その関係をテーブルにして保持しておく。このテーブルと画像処理により得られたノブの支えの半径  $R$  から、画像上でのノブの中心の見えるべき座標が求まる。この座標と画像処理により得られたノブの支えの中心座標から、画像上での手先を動かすべきベクトル  $(MX, MY)$  が求まる。

ここで求めたベクトルより、作業空間内で手先を移動させるベクトルを (1) 式を用いて求める。このときの手先の移動方向は手先の座標系の  $x - y$  平面上に限定される。

$$(mx, my)_{[mm]} = \frac{Knob\_R_{[mm]}}{R_{[pixel]}} (MX, MY)_{[pixel]} \quad (1)$$

ここで、 $Knob\_R$  は実際のノブの半径、 $R$  は画像上でのノブの半径である。

また、ノブを掴むためロボットは手先をノブの方向に微小距離  $mz$  だけ移動する。この  $mz$  は、ハンドがノブに近づくにしたがって小さくする。ただし安全のため、この動作はノブの支えが見えるべき中心座標と実際に見える中心座標がほぼ一致する場合のみ行う。

#### (4) 手先の移動

(1) で得た現在の各関節角度よりマニピュレータのヤコビアン行列及びその逆行列を計算する。手先の座標系において、手先を移動させるベクトルは  $(mx, my, mz)$  なので、手先を移動させるための各関節の微小変移を次式で計算する。

$$\begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \\ d\theta_3 \\ d\theta_4 \\ d\theta_5 \\ d\theta_6 \end{bmatrix} = [\text{Jacobian}]^{-1} \begin{bmatrix} mx \\ my \\ mz \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで  $[\text{Jacobian}]$  は  $6 \times 6$  のヤコビアン行列である。この微小変移を現在の目標関節角度に加えることにより、新たな目標関節角度が設定される。この目標関節角度を共有メモリを通してマニピュレーションモジュールに送り、この関節角度をリファレンスとしたマニピュレータの制御を行う。

#### (5) ノブの把持動作

画像上のノブの支えの半径は、カメラがドアに近いほど大きくなる。そこでノブから手先までの距離を画像上のノブの支えの半径から推定する。この距離が一定値を越えた場合、手先がノブを把持できる位置に到達したと判断し、ノブへのアプローチを終了して把持動作を行う。手先が、ノブを把持できる位置に到達していなければ、(1) から (4) を繰り返す。

## 4.4 画像処理ソフトウェア

画像上でのノブ支えの位置を認識するための画像処理ソフトウェアは、視覚センサモジュール上にインプリメントする。

### 外部仕様

このソフトウェアは、マスタモジュールからの画像処理要求コマンドによって起動する。このコマンドの引数は、パラメータ空間のサイズ及び使用する画像データの範囲とする。また、出力は、画像上の円の中心座標と半径  $(X, Y, R)$  である。

### インプリメント

マスタモジュールからの画像処理要求コマンドが共有メモリを通じて視覚センサモジュールに渡されると、このモジュールは  $256 \times 240$  の濃淡画像をフレームメモリに取り込む。この画像例を図6に示す。



図 6: CCD カメラから取り込んだノブの画像

ノブの位置を知るために必要な情報は、画像上のノブの支えを表す円の中心座標及び半径  $(X, Y, R)$  である。そこでまず、これらのパラメータを軸とするパラメータ空間を設定し、この空間に候補を投票することによってノブの支えの中心座標及び半径を求める。

まず、取り込んだ画像を縦方向及び横方向に微分した微分画像を作成する。次に各微分画像から、原画像中の各点における縦及び横方向の微分値の二乗和を求め、この値がある閾値を越えた点に注目する。この点における濃度勾配 [6] は、作成した各微分画像より求まる。注目した点が円周上に存在する場合、円の中心は濃度勾配と同じ方向もしくは逆方向にあると考えられるので、投票すべき点はパラメータ空間内の2つの半直線上の点となる。ここで投票する値は、その点の微分値の二乗和とする。

この作業を、微分値の二乗和がある閾値を越える全ての点について行い、パラメータ空間において最も多く投票された点が求める円の中心及び半径である。

例に挙げた図6を処理した結果、パラメータ空間上で、 $x = 69, y = 94, r = 17$ の点が、最大の投票を得た(単位はピクセル)。ここで得られた結果を図6に当てはめたものを図7に示す。

最後に、求めた円の中心座標と半径( $X, Y, R$ )を共有メモリに書き込み、マスタモジュールに転送する。以上で1サイクルの処理が終了し、次の画像処理要求コマンドが出されるまで待機状態となる。

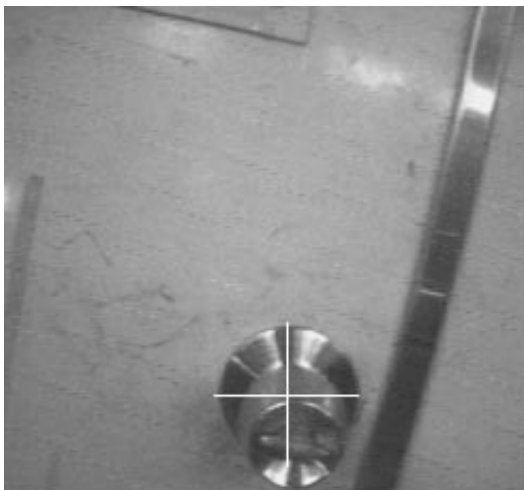


図 7: ノブの支えの位置の結果

#### 4.5 マニピュレータ制御

マニピュレータを制御するソフトウェアは、マニピュレーションモジュール上にインプリメントする。このモジュールでは、マニピュレータの各軸の関節角度及びハンドの開き幅を入力として、マニピュレータ及びハンドの制御を行う。サーボループは10[msec]で、PID制御を用いて制御を行う。またエンコーダからの情報より、現在の各軸の関節角度を得ることができる。

#### 4.6 動作実験

上に述べたプログラムを「山彦type-TEN」に搭載し、ハンドのノブへのアプローチ及びノブの把持実験を行った。移動ロボットの初期位置のポジショニングは、手先の初期位置にある程度の誤差が含まれるよう、人の手によって適当に配置した。

実験の結果、ハンドはノブに徐々にアプローチしてゆき、最後にノブを把持することができた。ノブを把持するまでの所要時間は約1分、画像処理からマニピュレータのリファレンス角度の更新までの1ステップにかかる時間は平均約5秒であった。

実験結果及び処理画像の例を図8に示す。図中の視覚画像情報中の四角形のボックスは、次の段階で処理する範囲を求めている。

## 5 問題点と今後の課題

### 5.1 問題点

ノブが円筒形のため、得られた画像中には、複数の円が存在する。この動作に必要な情報はノブの支えを示す最も大きい円であるが、照明等の状況によってはノブの前面を表す小さい円の方を選び、期待しない情報が得られることがある。また、ドアノブは金属性のため、スペキュラーな反射によって、放射状に輝度変化の大きい紋様を示すことがあり、それが原因でドアノブが正確に検出できないことがある。現在は、これらの問題に対処するため、ノブの支えの部分に緑のテープをはって、ノブの支えが抽出される条件を強くしており、今後更にロバストなドアノブの位置の検出方法を検討する必要がある。

### 5.2 今後の課題

今後、マニピュレータの制御に、フィードフォワード制御を加えてスムーズで高速なマニピュレータの動きを実現し、ドアノブの把持動作を高速化したい。次いで、「ノブへのアプローチ及び把持動作」及び「ドアの押し開け動作」とを組合わせて、移動ロボットによる研究室からドアを開けて外に出る一連の動作の実現を目指す予定である。

## 参考文献

- [1] 高野政晴「自律型知能移動作業ロボットの研究」昭和59年度科学研究費補助金研究成果報告書 pp5-53, 1985
- [2] 永谷圭司・油田信一「移動ロボットによるドアの通り抜けのための走行系とマニピュレータの協調行動の設計」第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集 pp1079-1082, 1993
- [3] 永谷圭司・油田信一「マニピュレータを搭載した移動ロボットによるドアの押し開け動作の実現」第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集 pp1201-1202, 1994
- [4] Richard P.Paul「ROBOT MANIPULATORS」The MIT Press, 1981
- [5] 飯田重喜・油田信一「車輪型移動ロボットのための走行制御コマンド系と軌跡制御方式」日本ロボット学会第1回ロボットシンポジウム予稿集 pp85-90,1991
- [6] 坪内孝司・金山裕・油田信一「濃度勾配の方向による領域生成と最小二乗あてはめを用いた線分抽出」日本ロボット学会誌 Vol.4, No.3, pp220-230, 1986

Side View

Vision Data

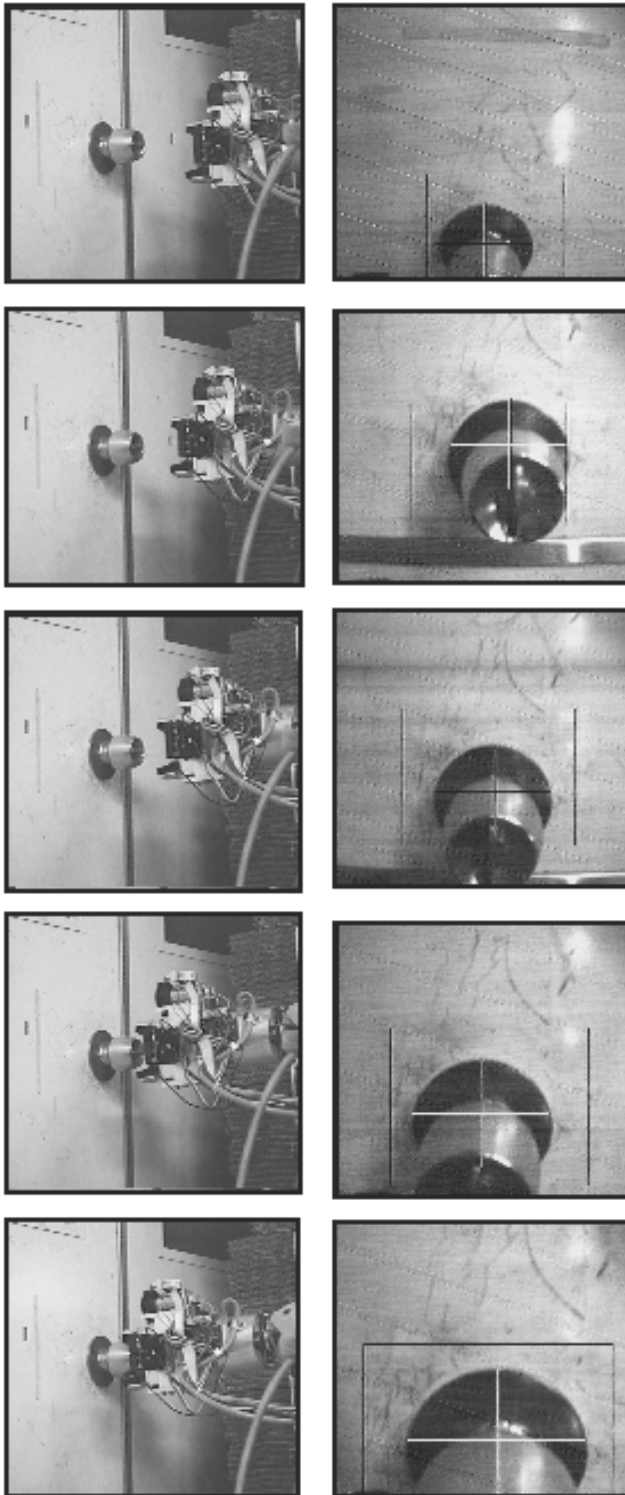


图 8: 实验结果