技術論文

タスクオリエンテッドアプローチによる自律移動マニピュレータ の研究 | ドアの通り抜けを含む屋内の自律走行の実現 |

永谷 幸司 白油田 信一包

Research of Mobile Manipulator using Task Oriented Approach | Autonomous Navigation in Indoor Environment with Door Opening |

Keiji Nagatani É1 and Shin'ichi Yuta É2

This paper reports the implementation of an intelligent motion for autonomous mobile manipulator. We determined our research task as "Autonomous Navigation including Door Open Motion", in indoor environment. This task is one of basic skills for mobile manipulator, however the cooperation of several theories and techniques is necessary for this research task. To realize the task, we developed both hardware and software of one robot system, executed in real environment, and feedbacked the experimental results to both hardware design and motion algorithm.

In this paper, we describe a detail design of the mobile robot motion (which is divided into several stages), hardware and software to realize the research task. Also, we report experimental results, and discuss about knowledge and problems for controlling autonomous mobile manipulator.

Key Words: Mobile Manipulator, Task Oriented Approach, Motion Planning

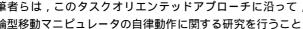
はじめに 1

ロボットの自律化,知能化を目指すことは,ロボットの研究 における一つの大きな目標であり,この目標を目指した様々な 研究が行われている.

現在,広く行われている研究は「核となる一般的な理論やア ルゴリズムを提案し、シミュレーションや実口ボットで実験を 行うことで,その理論やアルゴリズムの有効性を確かめる」と いう方針のものが多い.この場合,実口ボットにおける動作の 実現は,理論の有効性の確認が目的となる.したがって,今ま で実現されてきたロボットの動作は, 各理論やアルゴリズムに 適した,限られた条件下においてのロボットの基本的な動作の みであり,実現されたロボットシステムにおける自律化・知能 化のためには,さらに数段階の研究の必要性が指摘されている.

このような状況から、ロボットのより高度な自律動作を目指 すため,筆者らはまず具体的なタスク(作業目標)を設定し,こ の実現を目指す方針「タスクオリエンテッドアプローチ (Task Oriented Approach)」に沿って,研究を進めることにした.こ のタスクオリエンテッドアプローチが目指すところのイメージ を Fig.1に示す.

筆者らは,このタスクオリエンテッドアプローチに沿って, 車輪型移動マニピュレータの自律動作に関する研究を行うこと



原稿受付 1998年7月1日

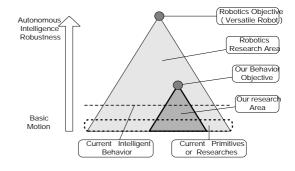


Fig. 1 Research Objective of Task Oriented Approach

Fig.1の解説:この図のピラミッドの頂点はロボット工学の大目標 である汎用ロボット (Versatile Robot) である.このピラミッドは, 目標である汎用ロボットを実現するための研究分野全体 (Robotics Research Area)を示し、ピラミッドの底辺が目標を実現するた めの要素技術である.現在,要素技術の研究は幅広く行われてい るが,これらの組み合わせだけではロボットの自律動作はなかな か向上しない(図中のCurrent Intelligent Behavior が現在まで の要素技術の組み合わせで実現可能なレベルを指す).これに対 し,タスクオリエンテッドアプローチでは,より高度な自律動作 をタスクとして設定し (Our Behavior Objective), このタスク の実現に必要な領域の技術開発を行う(Our Research Area).

^{É1}岡山大学 工学部 システム工学科

^{É2}筑波大学 電子情報工学系

É¹Okayama University

É2University of Tsukuba

にした.この車輪型移動マニピュレータは、マニピュレータを用いた複雑な作業が行えるという点と、作業範囲が広いという点を兼ね備えているため注目を集めている.しかし一方で、マニピュレータを支える土台自身が移動することによって生じるマニピュレータの先端の位置誤差の問題や、マニピュレータ制御と走行の協調動作の問題など、解決すべき点は限りなく多い.このため、個別の要素技術を独立に研究したのでは、ロボットの自律性はなかなか向上しない.このような点から、移動マニピュレータの自律動作に関する研究は、タスクオリエンテッドアプローチで行う研究テーマとして適切であると言える.

さて、これまでに行われてきた移動マニピュレータに関する研究には、マニピュレータと移動台車のダイナミクスや制御に関するものが多い.見浪らは、マニピュレータの運動が台車に及ぼす影響を台車の駆動力で補償する研究を行った[1]. 山本らは、マニピュレータと台車との干渉を考慮しつつ、手先と台車の参照点を目標起動に追従させることで、ロボットの安定化を図る研究を行った[2]. 菅野らは、移動マニピュレータのゼロモーメントポイント(ZMP)を考慮し、安定性を確保する研究[3]を行った.これらに示したように、移動マニピュレータを安定化させる様々な理論が提案されてきた.しかし、提案された理論やアルゴリズムが、現実にどのようなタスクに応用でき、その場合にどの程度有効であるかは、あまり深く議論されていない.

一方,このような制御を中心とした研究ではなく,具体的なタスクを目指した応用研究も進められてきた(例えば,スタンフォード大学のKhatibらの複数の移動マニピュレータによる物資の協調搬送[4]など).この中でも,ドア開け動作に関する研究が,タスクの必要性とその実現の難しさからいくつか行われてきた.日立製作所の岩本らは,クローラで走行する移動マニピュレータによるドア開け動作を実現した(関連研究は[5]).また,ミュンヘン工科大学のSchmidtら(関連研究は[6])や東北大学の中野ら[7],電気通信大学のL.V. Litvintseva[8]らは,それぞれ独自のアルゴリズムで,大学やオフィスなどの屋内環境を対象とした車輪型移動マニピュレータによるドア開け動作の設計及び実装を行った.

このように,移動マニピュレータの応用に関する研究については,近年ドア開けをテーマにした研究が行われるようになった.しかしこれらの研究の多くは,ロボットのために準備した環境において実現が図られてきた.

筆者らは「自律移動マニピュレータによるドアの通り抜けを含む屋内の自律走行」を研究タスクとして設定し、タスクオリエンテッドアプローチに沿って研究を行った.本稿では、このタスクを実現するための、ロボットの動作設計、ハードウエア、ソフトウエアについて紹介し、実験を通じて得られた知見や問題点について報告する.

2 タスクの設定

タスクオリエンテッドアプローチで重要なのは,タスクの設定である.例えば,実現が容易である単純なタスクならば,タ

スクオリエンテッドアプローチに沿って研究を行う必要はない、一方、実現に程遠いタスクは、タスクを実現するまで研究を持続させることが困難である。その点、移動マニピュレータによるドアの通り抜けを含むテーマは、タスクの必要性とその実現の難しさから、タスクオリエンテッドアプローチで行う研究タスクとしてふさわしいと考えられる。そこで本研究では、移動マニピュレータによるドアの通り抜けを含む信頼性の高い自律ナビゲーションの実現というタスクを設定した。

さて,決められたタスクを実現するためのロボットの動作は,対象とする環境に大きく依存する.そこで,本研究で対象とする環境は,筆者らが所属する大学の研究室,及びその部屋に接続する廊下に限定した(写真及び解説はFig.2).



Fig. 2 Target Environment

Fig.2の解説:対象とする環境は,筑波大学 第3学群 L 棟402号室及び付近の廊下である.部屋と廊下は片開きドアで接続され,ドアは通常閉まっている.このドアは,ノブを回すことで支えが外れ,その状態でノブを押す(または引く)ことによってドアを開けることが可能となる.ドアにはバネが付いており,支えがなければバネの力によってドアが閉まる機構が備わっている.ただし,ドアが90度開いた場合には,ドアを支える機構が作動し,ドアは力を加えない限りその状態が保持される.

さて、自律移動ロボットによるドアの通り抜けは、全てのドアを自動にしたり、無線通信によってロボットからドアを開ける信号を出すなど、ドアの方に工夫をすることによっても実現可能である。しかし、現存する大学やオフィスビルなどの設備をロボットのためだけに改造することは現実的ではない・そこで本研究では、ロボットのために環境の改造を行わないという方針を設けた・また、ロボット自身が人間と同じ手順でドアを開ける動作を実現すれば、このロボットが対応できる範囲は広がる・よって、本タスクでは、搭載したマニピュレータを用いて、ロボットが自らドアを開閉し通り抜ける動作を実現することにした・

ここに示した移動ロボットによるドアの通り抜け動作は,移動ロボットのナビゲーションの一機能にすぎない.しかし,それを含んだ自律ナビゲーションは,走行制御,マニピュレータの制御,センサデータの処理や融合,動作計画など,多くの研究要素を組み合わせることで,初めて実現可能となる.したがって,このタスクの実現は,ロボットの自律化に関する一つ

の研究例題として極めて有用であると考えられる.

3 タスクの分析

前節で設定した目標タスク「ドアの通り抜けを含む自律ナビゲーション動作」を実現するため,ロボットが実現すべき動作を分析した.

実環境におけるドアは,人間が開閉するように設計されているため,ロボットによるドアの通り抜け動作も,人間が行うそれと同様の手順で行うことができるはずである.そこで,人間の動作を例にとると,ロボットが行うべき一連の動作はFig.3に示すような時間の経過に沿った以下の部分動作のシーケンスで表現できる.

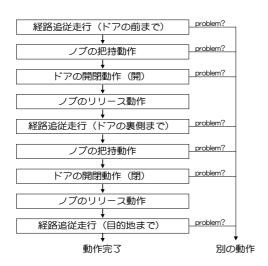


Fig. 3 Sequence of Basic Motion for Autonomous Navigation including Door Opening Behavior

(1) 経路追従走行

マニピュレータの土台となる移動ロボット(以下ベースロボットと呼ぶ)による,経路に沿った走行.

屋内環境における車輪型移動ロボットの位置推定には,オドメトリ(車輪の回転数を計数しロボットの位置を推定する方法)を用いるのが一般的である.しかし,このオドメトリを用いた位置推定には,車輪のスリップや地面の小さな凹凸により,走行距離の増加に伴って推定位置の誤差が増大するという,累積誤差の問題がある.そこで,オドメトリをベースにした走行を行う場合,外界センサを用いた推定位置の修正を同時に行う必要がある.

(2) ドアノブの把持動作

ベースロボットに搭載したマニピュレータを制御し,先端に 取り付けたハンドによってノブを把持する動作. 仮にロボットが、ハンドの位置とノブの位置を正確に把握していれば、マニピュレータの姿勢制御のみによって、ロボットはノブを把持することができる。しかし現実には、オドメトリによって生じるロボットの推定位置の誤差が原因となり、ハンドの位置にも誤差が含まれる。よって、この把持動作を確実に実現するためには、外界センサを使用した、ハンドに対するノブの相対位置の検出が不可欠である。

(3) ノブのリリース動作

ロボットが把持したノブを離した後に,走行の妨げとならないように,マニピュレータを初期姿勢に戻す動作.

(4) ドアの開閉動作

ロボットのハンドでノブを操作しつつ,ロボット本体がドアの通り抜けを行う動作.

一般にロボットに搭載するためのマニピュレータは小型で、その長さには限りがある。したがって、移動マニピュレータによってドアを開閉する際には、ベースロボットが走行しつつマニピュレータはドアを操作するという、走行とマニピュレータ制御の協調動作が必要となる。

一方,ドアの押し開け動作や引き開け動作を行う際にも,ベースロボットは走行するため,ドアの通り抜け動作中もオドメトリには誤差が生じる.しかし,ドアの片側は環境中に拘束されているため,この誤差を無視してドアを開けようとすると,ノブを把持したハンドに大きな力がかかる恐れがある.したがって,搭載するマニピュレータには,この力を吸収する機構が必要である.

4 動作設計

前節の分析に基づき,ロボットの動作設計を行った.

まず,タスクを実現するためのロボットの動作を,(1)動作計画と(2)計画した動作の実行に分割した.この計画と実行を分けた理由は,動作中のロボットの計算機の負荷を軽減するためである.

4.1 動作計画

ロボットは,実際の動作を始める前に,ロボットの動作環境, 現在位置,目的地の情報より,走行経路及び動作を計画する. 特に,実環境でロボットが動作する以上,動作中に予定外の状況が発生した場合に,ロボットはその状況を認識し対処しなければならない.動作の再計画も可能であるためには,動作計画はロボット上で行われなければならない.

次にロボットは,この動作計画にしたがって実際に動作を行う.本研究では,3節に示した分析に基づき,以下に示す通りに各部分動作を設計した.

4.2 経路追従走行動作

ここでは、基本的にはオドメトリによる推定位置情報をもとに、ベースロボットによる計画した経路の追従走行を行うことにした。また、走行に伴ってオドメトリに生じる累積位置誤差に対処するため、超音波距離センサを用いて環境中のランドマーク(主に超音波を良く反射する平らな壁)を獲得し、ロボットが有する環境モデルと比較することでベースロボットの推定位置の修正を行うことにした。また、超音波距離センサで常に前方を監視し、障害物が走行経路上に存在することが検知された場合、直ちに走行を中止し、この障害物が取り除かれるまでその場で待機することにした。

4.3 ノブの把持動作

ベースロボットの位置誤差によって生じるハンドの位置誤差に対処するため,以下の手順で視覚フィードバックによるハンドのアプローチを行うことにした.

ノブの位置とロボットのおおよその位置は既知なので,まず, ノブから少し離れたところにハンドが来るようにロボットに搭載したマニピュレータを制御する.次にハンドに搭載した視覚 センサを用いてハンドとノブの相対位置を検出し,ノブを把持する方向にハンドが移動するように,マニピュレータを制御する.このノブの位置認識とハンドのアプローチを繰り返すことにより,ノブを把持できる位置にハンドの位置制御を行う.この後ノブの把持及び回転を行うことで「,ノブの把持動作」は完了する.

4.4 ノブのリリース動作

ここでは,ノブをリリースし,マニピュレータを初期姿勢に 戻す動作を行うことにした.この動作は,ベースロボットが停 止した状態で行えるため,マニピュレータの姿勢制御のみで実 現する.

4.5 ドア開け動作・ドア閉め動作

動作分析でも示した通り,ドアの開閉には,走行とマニピュレータの協調が不可欠である.そこで,ベースロボットの目標位置をずらしながら,ドアを開ける(または閉める)までのマニピュレータの姿勢を予めオフラインで計算しておく.実行時には,実際にオドメトリから得られるベースロボットの推定位置とオフラインでの計算結果より,マニピュレータの関節角度を決定し,マニピュレータを制御することで,この協調動作を実現することにした.また,ベースロボットの推定位置誤差が原因で,把持したノブに大きな力が生じるという問題に対処するため,マニピュレータの先端に搭載した力センサによる,ハンドの先端のコンプライアンス制御を行うことにした.

5 ハードウエア

前節で設計した動作を行うロボットシステムを構築した.この実装において,本研究では筆者が所属する研究グループで研

究開発を行ってきた自律型移動ロボット「山彦」[9]のハードウエア資産をできる限り使用することにした.

5.1 メカニズム

5.1.1 ベースロボット

走行機能を実現するためには,マニピュレータの土台となる 走行機能を有するベースロボットが必要である.本研究では, 我々の研究グループで設計・製作が行われた,自律型移動ロボット「山彦てん」(Fig.4)を使用した.

ロボットのサイズは,高さ約 90cm,幅約 70cm,奥行き約 50cmであり,バッテリーを含めた重さは約 60kgである.

このロボットは、左右に備え付けられた駆動輪を用いて、段差の無い屋内環境を走行する能力を有する.また、左右の駆動輪の回転差を用いて進行方向を操舵する、パワーホイールドステアリング(Power Wheeled Steering)を有する.駆動輪の駆動モータにはロータリエンコーダが搭載されているので、これを用いたオドメトリによる自己位置推定を行うことができる.

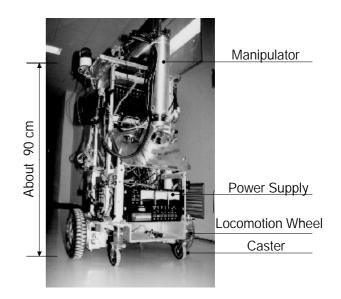


Fig. 4 Autonomous Mobile Robot \Yamabico TEN"

5.1.2 小型マニピュレータ

ドアの開閉を行うため,ベースロボットには7関節小型マニ ピュレータ(Fig.5)を開発して搭載した.

一般に市販の据置型マニピュレータは、先端の位置精度を上げるため、各関節の剛性を上げる努力がなされている。そのため、人の腕と同サイズの市販のマニピュレータは、サイズが小さいにも関わらず非常に重い。これに対し、移動ロボットに搭載するマニピュレータには、高い剛性よりも、むしろ軽量であることが望まれる。そこで本研究では、搭載するマニピュレータを自作することにした。

マニピュレータの長さは,マニピュレータの先端に搭載する 力センサの幅まで含めて,一般の人の腕より少し長い93cmと し,関節の配置も人の腕と同じ7自由度とした.また,全体をスリムに仕上げるため,人間の肘に相当する「折れ曲がり」関節にベベルギアを使用し,駆動力の向きを変えた.

また,力センサをマニピュレータの第6関節(第1関節がベースに近い関節)の先に搭載し,そのセンサの先にノブを回転するための第7関節を搭載した.



Fig. 5 Small-Size Mounted Manipulator

5.1.3 ロボットハンド

ノブを把持するためのロボットハンドは,タスクの対象であるドアノブの形状に合わせて設計及び製作を行い,マニピュレータの先に搭載した.

対象とするノブの形はシリンダー状なので,指の内側はノブの外形に合わせてカーブさせ,指のストローク幅については, ノブの把持及びノブのリリースができる幅(ノブの直径が5cm に対してハンドのストローク幅は最小4cmから最大7cm)とした(Fig.6).

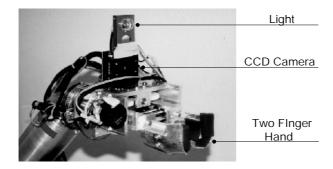


Fig. 6 Robot Hand, CCD-Camera, and Force Sensor

5.2 センサ

5.2.1 視覚センサ

ノブの位置認識を行う視覚センサとして,WATEC社の小型オンボードCCDカメラ「WAT-906」(視野角60度)をロボットハンドの上部に搭載した.カメラからの画像情報は,画像処理ボード上でA/D変換された後,フレームメモリに格納される.また,外部の明るさの変動の影響を避けるため,12V 5Wの照明用ライトをCCDカメラの上部に搭載した(Fig.6).

5.2.2 カセンサ

マニピュレータのコンプライアンス制御を行うためのカセンサには,ニッタ製の6軸力覚センサ「UFS-3012-25」を使用した.このカセンサシステムは,カセンサ本体と専用のA/Dコンバータユニット及び,力情報を処理するコントローラによって構成される.得られた力情報は,A/Dコンバータユニットによってシリアルデータに変換された後,コントローラに送られ,処理される.

5.2.3 超音波距離センサ

ベースロボットの位置推定や走行経路上の障害物を検知するための外界センサとして,筆者らの研究グループで研究開発が行われた超音波距離センサ「Hi Sonic」[10]をベースロボットの周囲8箇所に設置した(前方3箇所,左右それぞれ2箇所,後方1箇所).

5.2.4 エンコーダ

ベースロボットの位置推定のためのオドメトリには,走行用の駆動モータに取り付けられたロータリエンコーダの情報を使用した.またマニピュレータの姿勢情報も同様に,マニピュレータの各関節の駆動モータに設置したロータリエンコーダから得られる.

5.3 **コントローラ**

ロボットのコントローラには,ロボットの各機能を分散開発できるように,筆者の研究グループが有する山彦ロボットの機能分散コントローラ[11]を使用した.この機能分散コントローラでは,各機能が CPU,RAM,ROMによって構成された独立のコンピュータシステムを有し,この上で動作する専用のソフトウエアによって,それぞれのセンサまたはアクチュエータを制御する.この機能の単位は機能モジュールと呼ばれる.目標タスクを達成するため,新たにマニピュレータ制御モジュール及び,力センサモジュールの設計・製作を行った.実現された機能分散コントローラの構成をFig.7に示す.

これらの機能モジュールは,ロボット全体の意思決定を行うマスタモジュールによって統括管理される.このマスタモジュールと各機能モジュールとの間の通信には,専用BUSを使用する.ただし,通信量の多い,力センサモジュールとマニピュレータ制御モジュール間及び,走行制御モジュールと位置

推定モジュール間は、CPU間の高速シリアル通信(トランスピュータリンク)を用いて直接通信することにした。

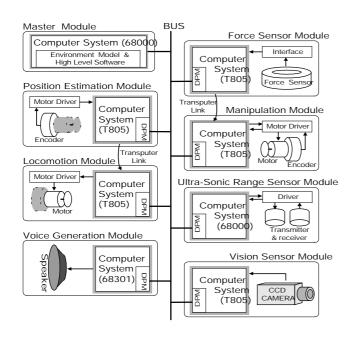


Fig. 7 Function Distributed Controller

6 ソフトウエア

ロボットを制御するソフトウエアは,前節で紹介した機能分散コントローラの概念に対応して,機能モジュール上の各機能を制御するソフトウエアと,マスタモジュール上のロボットの動作を決定するソフトウエアの2階層で構成した.

各機能モジュールのソフトウエアは常に動作し, それぞれの 機能を担当する.ここでも,筆者の所属する研究グループが開 発した自律移動ロボット「山彦」のソフトウエア資産を積極的 に利用した.したがって,本研究で実際にコーディングした機 能モジュールのソフトウエアは、マニピュレータ制御ソフトウ エア、視覚センサソフトウエア及び力センサソフトウエアの3 つである.また,既存の機能モジュールのソフトウエアとして, 走行制御ソフトウエア,位置推定ソフトウエア,測距ソフトウ エア(超音波センサ用),音声合成ソフトウエア,を使用した. 一方,マスタモジュールのソフトウエアは,各機能を統括し, ロボット全体の動作を決定するものである.ここでは,このマ スタモジュールのソフトウエアを更に2階層に分割し, Fig.3に 示した各部分動作を実現するための\アクションプリミティブ" というソフトウエア群と、この部分動作を統括する統括制御ソ フトウエアで実現した. ロボットの走行経路及び動作計画につ いては,この統括制御ソフトウエア上で実行される[12][13].

以上のソフトウエア構成を Fig.8に示し, 各ソフトウエアの詳細について以下に述べる.

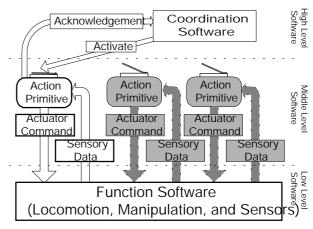


Fig. 8 Software Structure

6.1 機能モジュールのソフトウエア

6.1.1 マニピュレータ制御ソフトウエア

マニピュレータ制御モジュールが担当する機能は,(1)マニピュレータの姿勢制御機能,(2)マニピュレータのコンプライアンス制御機能及び,(3)ハンドの指の開閉機能である.これらの機能は,マニピュレータ及びハンドのアクチュエータである8つのDCモータを制御することで実現される.

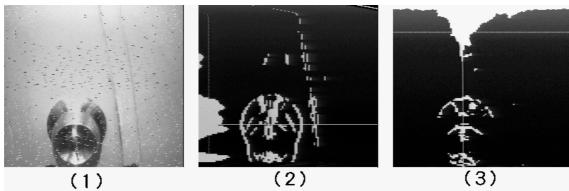
(1) マニピュレータの姿勢制御及び(3) ハンドの指の開閉機能については,マニピュレータの関節角度や指の開閉幅が,マスタモジュール上のソフトウエアから送られる目標値となるように,PID制御を用いて各DCモータを制御することにより実現した.

一方(2)コンプライアンス制御については,力センサソフトウエアから受けたマニピュレータの先端にかかる力情報を受け取り,その力のかかる方向に,マニピュレータの先端の目標位置を,力に比例した大きさだけ移動させることで実現した.

6.1.2 ノブ位置認識ソフトウエア

視覚センサモジュールが担当する機能は,ノブの位置認識である.この認識のための画像処理を行うことが,ノブ位置認識ソフトウエアの主要な役割である.

ノブの把持動作を行う前に,マニピュレータを制御することで,ハンドはノブの付近に位置制御される.したがって,ハンドに搭載されたカメラからは,Fig.9-(1)に示すような,ノブの一部または全部を含む画像が得られる.この画像を3×3のSobelオペレータを用いて縦方向及び横方向に微分し,適当なスレッショルドを用いて二値化する.次に各方向に輝度値のヒストグラムをとり,これらの重心計算を行うことで,ほぼノブの中心位置が得られる.この方法を用いて画像処理した結果例をFig.9-(2)(3)に示す.



(1) Original Image. (2) Binary image of diaerential image (horizontal direction). Superimposed white area in left side is a horizontal histogram of brightness points. (3) Binary image of diaerential image (vertical direction). Superimposed white area in upper side is a vertical histogram of brightness points. Finally, Knob's location was found by above image processing.

Fig. 9 Image Processing Example and Result

6.1.3 カセンサソフトウエア

カセンサモジュールが担当する機能は、把持点にかかる力情報の取得である。カセンサがハンドの根元に設置されているため、カセンサで受けたセンサデータを、把持点の力として計算することが、カセンサソフトウエアの主要な役割である。ここで得られた把持点の力情報は、CPU間の高速シリアル通信(トランスピュータリンク)を通じて、逐次マニピュレータ制御モジュールに送信することにした。

6.1.4 走行制御ソフトウエア \Spur"

走行制御モジュール上のソフトウエアの担当は,ベースロボットの走行である.

このモジュールに搭載された移動ロボットの走行制御ソフトウエア\Spur"は,オドメトリ情報を基に,与えられた軌跡にロボットが追従するように,駆動輪のモータ制御を行うものである.この走行制御方式及び走行制御コマンドは,飯田らによって,自律移動ロボット「山彦」に搭載するために研究開発が行われた[14].

6.1.5 位置推定ソフトウエア \ \ POEM"

位置推定モジュール(POsition Estimation Module|POEM)上のソフトウエアの担当は、ベースロボットの位置推定である.ここに搭載された位置推定ソフトウエア\POEM"は、オドメトリをベースに、走行制御ソフトウエアとは独立にロボットの位置誤差及び分散を推定する.また、外界センサによって得られたロボットの位置情報を用いて、最尤推定法による推定位置の更新機能を有する.この位置推定ソフトウエア及び位置推定モジュールの開発は、渡辺、上田らによって、自律移動ロボット「山彦」に搭載するために研究開発が行われた[15][16].

6.1.6 測距ソフトウエア

超音波距離センサモジュール上の測距ソフトウエアは,超音波が反射して戻ってくるまでの時間を用いて,反射物体までの距離逐次を測定するものである.この測距システム及び測距ソフトウエアは,宋,大野らによって,自律移動ロボット「山彦」に搭載するために研究開発が行われた[17][10].

6.1.7 音声合成ソフトウエア

音声合成モジュールの担当は,他のソフトウエアのデバッグのために,音声を用いてロボットの内部状態を人間に伝えることである.このシステム及びソフトウエアは,前山らによって,自律移動ロボット「山彦」に搭載するために研究開発が行われた[18].

6.2 マスタモジュールのソフトウエア その1 | アクションプリミティブ

「アクションプリミティブ」は,ロボットの部分動作を実現するためのソフトウエアである.さて,目標タスクを実現するためのロボットの動作は,動作のまとまりごとに「経路追従走行」「ノブの把持動作」「ノブのリリース動作」「ドアの開閉動作」の4つの部分動作に分類できる(Fig.3).本研究では,これらの各部分動作を実行するための,4つのアクションプリミティブを,マスタモジュール上に実装した.

6.2.1 アクションプリミティブ「経路追従走行」

アクションプリミティブ「経路追従走行」は,ベースロボットを目標経路に追従走行させるためのソフトウエアである.

本アクションプリミティブでは、線分列で表現した目標経路を走行制御モジュールに順次送ることにより、ベースロボットの経路追従走行を実現する.ここでの線分の乗り換えは、位置推定モジュールから得られる推定位置を監視することで行う.また、経路情報に位置修正を行うためのランドマークである壁

情報が付加されている場合,この壁までの距離と,超音波距離センサモジュールから得られた実際の壁までの距離を比較することで,ベースロボットの位置誤差を計算する.また,この位置誤差の情報を位置推定モジュールに送ることにより,ベースロボットの位置修正を行う.以上の動作を,終了するまで繰り返すことで,目標経路に沿った走行を行う.

6.2.2 アクションプリミティブ「ノブの把持動作」

アクションプリミティブ「ノブの把持動作」は,マニピュレータを制御することで,ハンドをノブの方向に移動させ,このノブを把持する動作を行うソフトウエアである.

ノブの把持動作の開始時には、ベースロボットはドアの前のほぼ規定の位置に停止している。そこでまず、ハンドがノブの付近に来るようなマニピュレータの姿勢パラメータを、予めオフラインで計算しておき、これをマニピュレータ制御モジュールに送る。次に、(1)視覚センサモジュール上のノブ位置認識ソフトウエアから、画像中のノブの中心位置を獲得し、ハンドとノブの相対位置誤差を計算する。その後、(2)この位置誤差が減少し、ノブに近づく方向にハンドが移動するようなマニピュレータの姿勢を計算し、(3)この姿勢パラメータをマニピュレータ制御モジュールに送る。この、画像処理とアプローチ動作(1)-(3)を、ハンドがドアに接触(カセンサからの力情報で検知)するまで繰り返すことで、ハンドのノブへのアプローチを行う。その後、マニピュレータ制御モジュールにハンドを閉じるコマンドを送ることで、ノブの把持動作を行う。

また, ノブの回転については, 手首の回転パラメータをマニピュレータ制御モジュールに送ることで実現する.

6.2.3 アクションプリミティブ「ノブのリリース」

アクションプリミティブ「ノブのリリース」は,ノブをリリースして,マニピュレータを初期姿勢に戻すためのソフトウエアである.この動作は,ハンドを開くコマンドをマニピュレータ制御モジュールに送った後,予めオフラインで計画したマニピュレータのリリース動作時の関節角のシーケンスを,順次マニピュレータ制御モジュールに送ることで実現する.

6.2.4 アクションプリミティブ「ドアの開閉動作」

アクションプリミティブ「ドアの開閉動作」は、マニピュレータの姿勢とベースロボットの走行を同時に制御することによって、ハンドで把持したドアの開閉動作を行い、ドアを通り抜ける動作を実現するためのソフトウエアである.

ここでは,ドアの開閉動作計画はオフラインで行い,その計画にしたがって,各アクチュエータの制御ソフトウエアにコマンドを送ることで,マニピュレータと走行の協調動作を実現することにした.

まず動作計画では、まずロボットがドアを通り抜ける際のドアの開き角度に対するベースロボットの位置をヒューリスティックに決定した.これにより、ベースロボットの各位置におけるマニピュレータの姿勢は、各ノブの位置とベースロボットの位

置から一意に決まり、冗長自由度の問題が回避できる.次に、マニピュレータと環境中の物体との衝突チェックを、シミュレーションを用いて行った.この結果を基に、ヒューリスティックに決定したロボットの位置のパラメータを、試行錯誤的に変更し、シミュレーションを繰り返し行うことで、協調動作の計画を行った.この試行錯誤には多くの時間と経験を必要とするが、一度動作計画を行えば、常にその結果を使用できるという利点がある.

アクションプリミティブ「ドアの開閉動作」は、このオフラインで行った動作計画の結果を有し、これにしたがって走行制御とマニピュレータ制御の協調動作を行う。まず走行制御モジュールには走行コマンドを送り、ベースロボットを計画した経路に沿って低速で走行させる。この間、位置推定モジュールからは、ロボットの位置情報を受け取り、この情報とオフラインで行った動作計画からマニピュレータの各関節角を決定する。この関節角の情報をマニピュレータ制御モジュールに送ることで、マニピュレータの姿勢が更新される。このように、ベースロボットの位置に伴って、マニピュレータを制御することで、協調動作を実現する。

目標とするロボットの動作は,アクションプリミティブのシーケンスを順次実行することで実現できる.そこで,このアクションプリミティブのシーケンスを計画し,これを順次実行することが,統括制御ソフトウエア[12][13]の役割である.

ここでは、対象とする環境でロボットがとり得る動作全体を、ロボットの状態をノード、アクションプリミティブをアークとした状態遷移型の有向グラフ(アクションネットワーク)で表現した.各アークには、動作コストが付加される.統括制御ソフトウエアは、このグラフ上において、目的地までの最適経路計画を行うことでアクションプリミティブのシーケンスを計画し、これを順次実行する.したがって、実質的なロボットの動作は、各アクションプリミティブが行う.

さてそこで、アクションプリミティブからのアクノレッジが 異常終了の場合には、ロボットは動作を継続できない.これは 実際の環境が、ロボットが有するモデルと異なるということを 示す.そこで、アクションネットワークを修正した後、再びグラ フサーチを行うことにより、新たにアクションプリミティブの シーケンスを計画し、これを順次実行する.これにより、予定 外の状況にも対応したロバストなロボットの動作が実現される.

7 実験

構築した移動マニピュレータシステム「山彦てん」を使用し, 実環境においてドアの通り抜けを含むナビゲーション実験を 行った.本実験は,1.2節で設定した通り,筑波大学第3学群 L 棟402号室及びその廊下で行った.環境及びロボットが走行し 得る経路を Fig. 10に示す.

7.1 実験1:ドアの通り抜けを含むナビゲーション実験

最初の実験では、まず部屋の中から動作を開始し、一方のドアを通り抜けた後に廊下を走行し、再び、他方のドアから部屋に侵入する動作をロボットに行わせた。この経路は、Fig.10 中において、Node:4 3 2 5 6 7となる。この動作の様子を、連続写真を用いてFig.11に示す。

7.2 実験2:動作の分岐が存在するナビゲーション実験

次の実験では,ロボットの動作開始位置を Fig.10 中の Node No.1,最終目的地を Node No.8 とした.その結果,統括制御ソフトウエアは,Node No.1 に近い方のドアを通り抜ける動作を行うアクションプリミティブのシーケンス (Table 1)を計画した.

ロボットは,この計画したアクションプリミティブのシーケンスにしたがって動作を行い,最終目的地である Node No.8 の位置に到達した.

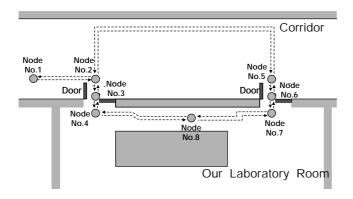


Fig. 10 Experimental Environment and Possible Path

Node 1	経路追従走行	
Node 2	ノブの把持	ドアの開閉(開)
	ノブのリリース	経路追従走行
Node 3	ノブの把持	ドアの開閉(閉)
	ノブのリリース	
Node 4	経路追従走行	
Node 8		

Table 1 Planning Result

さて、予めロボットは「ドアに鍵がかかっていない」と想定しているため、Node No.1に近い方のドアに鍵がかかっている場合でも、Table 1のシーケンスを計画する。しかしこの場合、ドアの開閉動作(引き開け)の段階で動作継続が不可能となる。そこでロボットは、動作を中止した後、Node No.2-5-6-7-8を通るアクションプリミティブのシーケンスの再計画を行った。これにより、ロボットはもう一方のドアを通り抜けて、目的地である Node No.8 の位置に到達することができた。

7.3 実験の結果と検討

本研究では、以上に示した実験を繰り返し行いつつ、パラメータやアルゴリズムのチューニングを行った、その結果、構築したロボットによるタスクの成功率は、最終的には8割程度となった。

このナビゲーション動作は,超音波センサから得られる壁の位置情報をフィードバックすることにより,ベースロボットの数センチメートル程度の初期位置の誤差や,マニピュレータの初期姿勢の誤差が存在する状況においても成功した.また,ハンドにライトを搭載しているので,環境の明るさの変動によらず,ノブを把持することができた.また,ロボットの走行中は,超音波距離センサを用いて常にロボットの前方を監視することで,予定外の障害物との衝突を回避することができた.

しかし一方,2割程度の割合において,目標位置に到達できなかった.以下に,これらの失敗例の状況を具体的に示す.

(1) 壁際に人や予定外の物体などがあった時に,ロボットは壁までの距離情報を用いた位置修正に失敗し,目標経路から外れた.(2) 走行時に累積した誤差のため,ノブを把持する際にノブが視覚センサの視野外となり,ハンドがノブを把持することができなかった.(3) ノブを回転する際にハンドの内側が滑り,鍵がかかっていると誤った判断をして,ロボットは動作を終了した.(4) ドアの引き開け動作中,ハンドがノブから離れたためドアが閉まった.(5) コンプライアンス動作によってマニピュレータの姿勢が変化し,マニピュレータやハンドが,環境中の別の物体に衝突した.(6) ドア開け動作が終了した際,ベースロボットの推定位置の誤差のためにドアの開き角度が90度に満たなくなり,ノブをリリースした直後に,開けたドアがバネの力によって再び閉まった.

以上の通り、ベースロボットの推定位置の累積誤差、及び、確実なノブの把持が行われていないことが、失敗する場合の主な原因であった・特に(2)(5)(6)については、いずれもロボットの推定位置のずれが修正できなかった時に発生した問題であるしかし、ベースロボットは、特に推定位置の修正のためのランドマーク認識に失敗しない限り、通常、その位置の誤差が推定で3センチメートル以内、角度誤差が1度以内に収まっており、この程度の誤差の範囲内であれば、ほぼ間違いなく動作を遂行することができた。

8 考察とまとめ

前節に示した実験結果の通り,目標タスク「ドアの通り抜けを含む自律ナビゲーション」はほぼ達成された.本章では,タスクオリエンテッドアプローチで行った本研究を,もう少し広い立場から見ることで,移動マニピュレータやロボットの自律動作に関する問題点と得られた知見を示す.

8.1 移動マニピュレータの自律動作に関する問題

1) ベースロボットの推定位置に含まれる誤差 移動マニピュレータという土台を物理的に固定しないロボッ



Fig. 11 Autonomous Navigation with Door Opening Behavior

トで物体を扱う場合,オドメトリで推定した位置に含まれる誤差が大きな問題となる.

この問題に対処するため、本研究では、超音波距離センサを用いてランドマークである壁の情報を獲得し、ロボットが有する壁の位置情報と比較することにより、オドメトリで推定した位置誤差を減少させることにした、また、ドアノブを把持する際には、ハンドに取り付けた視覚センサを用いてノブの位置を認識し、ハンドのアプローチ動作を修正することにした.

しかし、本研究を通じて明らかとなった移動マニピュレータの最大の問題は、ベースロボットの位置誤差であり、よりロバストな移動マニピュレータの制御を目指すためには、他のセンサ情報も使用し、より正確な位置推定を行うことが不可欠であることが明らかとなった。

2) 把持点に生じる力

移動マニピュレータで拘束された対象物を操作する際,ベースロボットの推定位置誤差のため,把持点に生じる力が問題となる.

本研究では、拘束されたノブを操作する際、力センサを用いたアクティブなコンプライアンス制御を行うことで、この問題の解決を図った・しかし、反射レベルのロボットの動作が、動作計画レベルに影響する問題(具体的にはコンプライアンス動作によって、マニピュレータが環境中の物体に接触したという問題)については解決が難しく、本研究では考慮することができなかった・今後、ロボットが狭い環境で動作する場合、反射動作も考慮したロボットの動作計画法を考案する必要があると考えられる・

3) センサフィードバックと確実な各部分動作の必要性

ロボットハンドを用いて,ドアのノブを把持して回転させる際,本研究では指の内側に滑りにくいゴムを使用するなどの工夫をしたが,ノブをしっかり把持できずにドア開けに失敗する場合があった.この失敗や,ドアの開閉動作中にドアノブから手が離れるなどの動作の失敗とそれによる弊害を避けるためには,ロボットが確実に自分の状況を把握していなければならない.一方,状況の把握を確実とするためにも,動作そのものをよりロバストにする必要があり,各々の単位動作に更により多くのセンサフィードバックを組み込み,確実化してゆく必要がある.

8.2 ハードウエアの構成に関して得られた知見

本研究で開発した小型マニピュレータは,視覚センサ,及び力センサを搭載することで,画像処理機能,コンプライアンス機能を実現した.これらの機能は,移動マニピュレータの知的動作には必要不可欠であり,今後移動マニピュレータの研究を行うために,このような小型マニピュレータを,研究のプラットフォームとして開発することは,非常に意義のあることと考えられる.

また,本研究で使用する移動マニピュレータのコントローラには,我々の研究グループで研究開発が行われてきた機能分散コントローラを採用した.これにより,既に研究グループ内に現存する移動ロボットの走行システムやセンサシステムなどの

各機能をそのまま利用することができ、システム全体の開発時間を大幅に短縮することができた.また、新たに設計及び製作を行ったマニピュレータ制御モジュールや力センサモジュールについても、他の機能とは独立に動作チェック及びデバッグを行うことができた.これらの点からも、筆者らの機能分散コントローラ[11]の有用性が確認された.

8.3 ロボットの動作設計に関する知見

1) 時間の経過に沿った動作分割

ロボットの複雑な動作を, 各機能が担当する動作に分割して 整理することは一般的である.しかし,マニピュレータとベー スロボットが協調して動作を行うようなシステムの場合,各機 能間の依存度が高く、それぞれの機能ごとに動作を分割するこ とは不可能である. そこで本研究では, 目標動作を時間の経過 に沿った部分動作に分割し,これをアクションプリミティブと 名付けて動作ソフトウエアの単位とした.更に,信頼性の高い 部分動作を実現するため,各アクションプリミティブ内にセン サフィードバック機構を組み込んだ.これにより,各アクショ ンプリミティブ内の構成は多少複雑となるが, ロボットの動作 全体はアクションプリミティブのシーケンスという単純な構造 で表現でき,動作のプランニングやリプランニングが容易に実 現できる.また,新しいアクションプリミティブの設計及び実 装を行うことで,現在のロボットの動作に新たな動作を加える こともできる.このように本研究では,時間の経過に沿った複 雑な動作の分割が,動作計画を行うために極めて有効に働くこ とが確認された.

ただし,ロボットが取り得る状態が増加すると,アクションネットワークが発散してしまうという問題が起こり得る.このアクションプリミティブに関する詳細,及び,問題点については,別報で詳しく報告したい.

2) モデルベースで行う動作計画

反射を用いたリアクティブな動作などと比較すると、本研究で採用した「モデルベースで動作計画を行い、これを実行する」という手法は、動作設計を行う際に非常に手間がかかるものである。しかし、実環境においてロボットが状況を把握しつつ逐次動作を行うには、現在のセンサの性能及びコンピューティングパワーは絶対的に不足している。したがって、実環境で複雑な動作を実現するためには、現在のところ、やはりモデルベースで動作計画を行って実行するという手法を取らざるを得ず、できるだけ丁寧な環境の記述がここでは重要である。ただし、動作のロバスト性を向上させるためにコンプライアンス制御などのローカルな部分におけるリアクティブ性は、ロボットの動作には不可欠といえる。

3) ロバスト性の向上

目標タスクを実現する上で最も苦労したのは,実環境において各基本動作を正確に,またロバストに動作させることであった.一方,ドアの開閉時のマニピュレータとベースロボットの協調動作の計画については,計画を行うにあたり試行錯誤を必要としたが,一度オフラインで動作計画を行った後は,常にその計画を使用することができた.すなわち,本研究で扱ったよ

1012 永谷 圭司 油田 信一

うな複雑な動作を実現する場合,経路や動作の計画問題より,各部分動作をいかにロバストに,また正確に実現できるかどうかが,成功の鍵であるということができる.

9 結び

タスクを明確に設定して研究を行った結果,「ドアの通り抜けを含む自律ナビゲーション」という自律的な動作を比較的簡単に実現することができた.またこの研究を通じて,移動マニピュレータによる自律動作を実現する上での問題点の発見や,考案したアルゴリズムの有用性の検証,今後このような自律動作を実現するための課題の提案などを行うことができた.

本研究で設定したような複雑なタスクは,プリミティブな動作を少しずつ積み上げていき,そこから自然と実現されていくものではない.むしろ目標タスクを設定し,これを実現する動作を分割して,個々の部分動作を丁寧に実現することによって初めて複雑な動作が可能となる.このような点からも,タスクオリエンテッドアプローチで研究を進める有用性が明らかとなったと考えている.

参考文献

- [1] 見浪護, 藤原直史, and 拓植広志: \自律移動ロボット搭載型マニ ピュレータの位置・姿勢制御", 日本ロボット学会誌, 11(1):156{164, 1993.
- [2] Y.Yamamoto and X.Yun: \Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator," Proc. of the 31st IEEE Conference on Decision and Control, pages 1(6, 1992.
- [3] Qiang HUANG, Shigeki Sugano, and Ichiro Kato: \Stability control for a mobile manipulator using a potential method," Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, pages 839{846, 1994.
- [4] Oussama Khatib: \Robot planning and control," Proc. of International Workshop on Some Critical Issues in Robotics, pages 65{80, 1995.
- [5] 岩本太郎, 山本広志, and 榊原義宏: \複合センシングによる屋内通路の環境把握と形状可変クローラの自律移動制御実験", 日本ロボット学会誌, 6(5):405{, 1988.
- [6] Kianoush Azarm and Gunther Schmidt: \Integrated mobile robot motion planning and execution in changing indoor environments," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 298{303, 1994.
- [7] 佐々木裕之, 高橋隆行, and 中野栄二: \前方向移動ロボットに搭載されたマニピュレータによるドア開け動作の研究", 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pages 711{712, 1995.
- [8] L.V.Litvintseva, T.Tanaka, T.Hirabayashi, Y.Watanabe, K.Ogino, M.Hamuro, K.Saeki, K.Yasukawa, and S.V.Ulyanov: Intelligent mobile robot for service use in oéce buildings developed through university-industry cooperation (uic)," 第3回ロボットティクスシンポジア予稿集, pages 197{202, 1998.
- [9] Shin'ichi Yuta, Shoji Suzuki, and Shigeki Iida: \Implementation of a small size experimental self-contained autonomous robot { sensors, vehicle control, and description of sensor based behavior {," Preprints of The Second International Symposium of Experimental Robotics (ISER), pages 349{368, 1991.
- [10] Takayuki Ohno, Akihisa Ohya, and Shin'ichi Yuta: \An improved sensory circuit of an ultrasonic range ånder for mobile robot's obstacle detection," Proc. of the 1995 National Conference of the Australian Robot Association, pages 178{185, 1995.

- [11] Sho'ji Suzuki, Jun'ichi Iijima, and Shin'ichi Yuta: \Design and implementation of an architecture of autonomous mobile robots for experimental researches," Proc. of 6th International Conf. on Advanced Robotics, pages 423{428, 1993.
- [12] Keiji Nagatani and Shin'ichi Yuta: \Designing strategy and implementation of mobile manipulator control system for opening door," Proc. of IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pages 2828{2834, 1996.
- [13] 油田信一 and 永谷圭司: \アクションブリミティブを単位とした自 律ロボットの動作設計と制御 | 不整備環境に対処するためのプログ ラミング",第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集,1997.
- [14] Shigeki Iida and Shini'chi Yuta: \Vehicle command system and trajectory control for autonomous mobile robots," Proceedings of International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pages 212{217, 1991.
- [15] Yutaka Watanabe and Shin'ichi Yuta: \Position estimation of mobile robots with internal and external sensors using uncertainty evolution technique," Proc. of IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pages 2011{2016, 1990.
- [16] 上田暁彦 and 油田信一: \内外界センサのデータ融合に基づく車輪型移動 ロボットのポジショニング", 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pages 85{88, 1992.
- [17] Minho Song and Shin'ichi Yuta: \Autonomous mobile robot yamabico and its ultrasonic range ånding module," In Proc. of Korean Automatic Control Conference (KACC'89), pages 711{714, 1989.
- [18] 前山祥一 and 油田信一: \自律移動ロボットの行動プログラム開発 支援の ための音声モニタシステム", 第7回知能移動ロボットシンポ ジウム予稿集, pages 154{155, 1994.

永谷圭司 (Keiji Nagatani) 1968年9月21日生 . 1997年

1968年9月21日生.1997年筑波大学大学院博士課程修了.カーネギーメロン大学機械工学科(ポストドクトラルフェロー)を経て現在岡山大学工学部システム工学科講師.移動ロボットの研究に従事.工学博士.IEEE等の会員.

(日本ロボット学会正会員)

油田信一(Shin'ichi Yuta)

1948年3月23日生.1975年慶応義塾大学大学院(電気工学)修了.東京農工大電子工学科を経て現在筑波大学電子情報工学系教授.知能移動ロボット,ロボットセンサ,ロボット用コントローラ等の研究に従事.自動制御や信号処理の理論と応用にも興味を持つ.工学博士.IEEE,計測自動制御学

会等の会員. (日本ロボット学会正会員)