

自律移動マニピュレータによるエレベータを用いたフロア間移動の実現 アクションプリミティブによる動作設計と実装

Autonomous Indoor Navigation for Mobile Manipulator using Elevator

Motion Design And Implementation using Action Primitive

○ 吉田 昌弘 (岡山大学) 正 永谷 圭司 (岡山大学) 正 田中 豊 (岡山大学)

Masahiro YOSHIDA, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-naka, Okayama
Keiji NAGATANI, Okayama University Yutaka TANAKA, Okayama University

This research aims to realize a robust navigation among floors for an autonomous mobile manipulator using elevator. In the last year, our research group had realized a motion (using elevator) for a mobile manipulator. However the motion had low robustness and had some problems. Therefore we adopt a programming style named "action primitive" for robot's motion design. This article describes action primitives for a motion and report an experimental results in real environment.

Key Words: Mobile manipulator, Action primitive, Motion planning

1 はじめに

近年、警備ロボット、清掃ロボット等が開発されており、近い将来、多くのロボットがオフィスや病院等の建物内に導入されることが予想される。そのような建物内においてロボットが幅広く作業を行うには、ロボットが自律的にエレベータに乗り込み、フロア間を自由に行き来し、作業を行うといったフロア間移動能力が有効となる。

このような背景から、本研究では昨年度より「自律移動マニピュレータによるエレベータ昇降動作の実現」に関する研究が進められてきた⁽¹⁾。しかしながらこれまでの実装では、以下の問題点があることが判った。

1. 動作環境内に人が存在しないという前提でのみ動作可能
2. 予定外の状況への対処能力が低い
3. エレベータ昇降動作の成功率が低い
4. 限定された2つのフロア間でのみ移動可能

これらの問題を解決し、人が存在する環境で、ロバストかつ高精度なロボットのフロア間移動を実現するためには、ロボット自身が状況に応じて、柔軟に動作を計画/再計画できる能力が重要である。そこで本研究では、これらの問題に対し「アクションプリミティブを用いた動作設計」⁽²⁾⁽³⁾をこのフロア間移動動作に適用することとした。これにより、自律移動マニピュレータによる高精度かつロバストなフロア間移動を、人が存在する環境で実現することができると期待できる。

本稿では、まず本研究のタスクの設定と分析を行い、次にアクションプリミティブに関する説明を述べる。最後に本手法の有効性を確かめるために行った動作検証について紹介する。

2 タスクの設定・分析

2.1 タスクの設定と前提条件

本研究におけるロボットのタスクを「人が存在する環境で、指示された任意のフロアの任意の位置まで、エレベータを使って移動すること」と設定した。タスクの前提条件を以下に示す。

- エレベータおよびロボットが走行する環境に手を加えない
- 動作環境内に人が存在する可能性がある
- エレベータには車椅子用のボタンが設置されている
- エレベータおよびロボットが走行する環境情報は既知である

2.2 対象とするロボット

本研究で利用する移動マニピュレータ (Fig.1) に搭載したマニピュレータは、5自由度を有し、手先に CCD カメラ、PSD 距離センサを搭載している。ベース部は、メカナムホイールを有し、姿勢を維持したまま真横に移動する全方向移動が可能である。搭載する画像処理ボード (IP5000) はテンプレートマッチング、二値化等の画像処理を行うことが可能である。またマニピュレータの手先に取り付けた触覚センサは、手先がエレベータのボタンに接触したことの認識を行う。また、距離センサとして PB9-12 を搭載している。このセンサは、LED 光線により約 1.8 度間隔で合計 91 ステップ (162 度) スキャンし、対象物の位置を特定することが可能である。

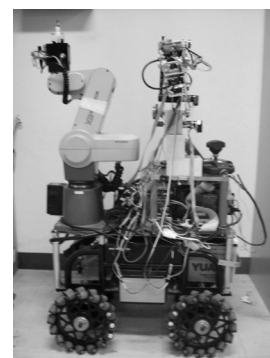


Fig. 1 Target robot

2.3 タスクの分析

本研究のタスク「人が存在する環境で、指示された任意のフロアの任意の位置まで、エレベータを使って移動すること」を実現するための、ロボットが行う一連の動作は、以下の動作に分割される。まず (1) エレベータ前まで走行し、(2) エレベータを呼ぶボタンを押し、(3) エレベータが到着したら乗り込み、(4) 目的のフロアのボタンを押し、(5) フロアに到着したらエレベータから降り、(6) 目的地まで走行する。これら一連の動作をロボットが行うには、以下に示す要素動作が必要となる。

- フロアにおける走行
- エレベータ前でのロボットの推定位置、姿勢の誤差の修正
- エレベータボタンの位置を認識し、これを押す動作
- ボタン押しの確認およびエレベータ到着の認識
- エレベータに乗り込む動作

本研究では、アクションプリミティブを用いて、これらの各要素動作の設計・実装を行うこととした。

Tab. 1 Procedure of motion

	Action Primitive	Parameter	(OK)	(Fail)
0	Start		1	1
1	フロア走行 1	フロア名	2	19
2	エレベータ前で修正 1	モデル, 目標位置	3	2
3	ボタン認識と押し動作 1	ボタンの種類, 高さ	4	2
4	ボタン押しと到着認識 1	ランプサイズ, 距離情報	5	3
5	エレベータ乗りこみ 1	停止位置	6	2
6	ボタン認識と押し動作 2	ボタンの種類, 高さ	7	5
7	ボタン押しと到着認識 2	ランプサイズ, 距離情報	8	6
8	エレベータ降り 1	停止位置	9	19
9	フロア走行 2	フロア名	10	19
10	エレベータ前で修正 2	モデル, 目標位置	11	10
11	ボタン認識と押し動作 3	ボタンの種類, 高さ	12	10
12	ボタン押しと到着認識 3	ランプサイズ, 距離情報	13	12
13	エレベータ乗りこみ 2	停止位置	14	10
14	ボタン認識と押し動作 4	ボタンの種類, 高さ	15	13
15	ボタン押しと到着認識 4	ランプサイズ, 距離情報	16	14
16	エレベータ降り 2	停止位置	17	19
17	フロア走行 3	フロア名	18	19
18	Goal			
19	Give up			

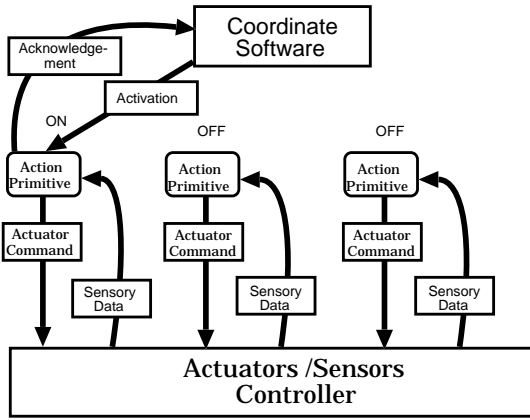


Fig. 2 Action primitive execution

3 アクションプリミティブ

3.1 アクションプリミティブの概要

アクションプリミティブとは、ロボットの各要素動作を実現するプログラム単位である。ここで、各要素動作とは、2.3節に示したように、ロボットの目標動作を時間の経過に沿って動作のまとまり毎に分割したものである。アクションプリミティブは、上位の意志決定プログラムから動作パラメータと環境モデルを受け取り、動作を開始する。また、各アクションプリミティブは、センサフィードバックを内包し、センサ情報から、各動作の終了条件が満たされたと判断したとき、または動作の継続が不可能であると判断したとき、意志決定プログラムにアクトレッジ (OK または Fail) を返し、動作を終了する。さらに、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で表現することができるため、ロボットの動作中に予定外の状況が生じ、アクトレッジとして Fail が返ってきた場合は、これらアクションプリミティブの動作列を新たに組み直すことで、動作を再計画することができる。またロボットに新しい動作を付け加える場合も、新たにアクションプリミティブを追加するだけでよく、プログラムの他の部分をあまり変更せずに、容易にロボットの動作を拡張できるという利点がある。

3.2 意志決定プログラム

ロボットは、各アクションプリミティブを順次実行することにより、目標タスクを実行することができるが、このアクションプリミティブ列の生成を行うのが意志決定プログラムである。まず、アクションプリミティブの遷移先を示したアクションプリミティブ遷移表を作成する。この例を Table.1 に示す。意志決定プログラムは、このアクションプリミティブ遷移表上でサーチを行い、そのシーケンスに従ってアクションプリミティブを順次実行することで目標タスクを実行する。また、アクションプリミティブからアクトレッジ (Fail) が返ってきた場合、意志決定プログラムは、その状態を開始状態として、新たなアクションプリミティブのシーケンスを作成する。これにより、ロボットが予定外の状況に遭遇した場合の動作の再計画も、容易に行うことが可能となる。

Fig.2 はアクションプリミティブと意志決定プログラムの関係を図に示したものである。アクションプリミティブは、意志決定プログラムからパラメータを受け取るまで待機状態であり、受け取った後に動作を開始する。またアクションプリミティブは、動作開始後、動作パラメータに基づいて各アクチュエータを駆動する。動作が終了した場合、および継続不可能となった場合は意志決定プログラムにアクトレッジ (OK または Fail) を返し、そのアクションプリミティブの動作を完了する。

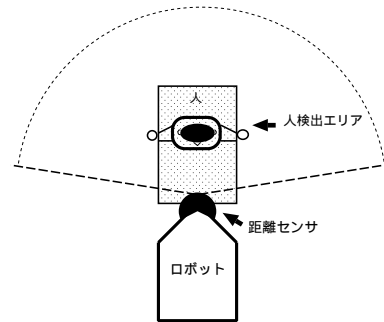


Fig. 3 Detecting those who are ahead of a robot

4 アクションプリミティブを用いた動作設計

本章では、本研究のタスク「ロボットが人が存在する環境で、指示された任意のフロアの任意の位置まで、エレベータを使って移動すること」を実現するための、各アクションプリミティブの動作設計について説明を行う。

4.1 アクションプリミティブ「フロアにおける走行」

アクションプリミティブ「フロアにおける走行」は、エレベータ前までの走行 (フロア走行 1)、エレベータから目標地点まで行き、エレベータ前まで戻って来る走行 (フロア走行 2)、エレベータからゴール地点までの走行 (フロア走行 3) を担当する。

このアクションプリミティブにおける、動作パラメータは、追従走行を行う走行経路である。また、本研究で対象とするロボットは、オドメトリにより自己位置・姿勢を推定しているため、自己位置に誤差が生じる。そこで、本アクションプリミティブでは、複数の地点において距離センサを用いて既知の壁までの距離を測定することで、ロボットの自己位置・姿勢の誤差を修正する。

一方、ロボットの走行中に、人がロボットの走行経路内に侵入し、ロボットと衝突するといった事態は回避する必要がある。そこで、本アクションプリミティブでは、走行中に、距離センサを用いて、ロボットの進行方向の前方をスキャンし、もし人が走行経路内に侵入してきたら緊急停止を行い、人がロボットの前からいなくなれば走行を再開するという動作を行うこととした (Fig.3)。本アクションプリミティブにおけるアクトレッジ (OK) は、オドメトリにより、目的地に到達したことが確認されたときである。一方、走行中に検出した障害物が時間が経過してもロボットの前から移動せず、ロボットの走行が再開出来なくなった場合に、アクトレッジ (Fail) を返す。

4.2 アクションプリミティブ「エレベータ前における自己位置・姿勢の修正」

オドメトリを利用する移動ロボットは、走行により推定自己位置・姿勢に誤差が生ずる。この誤差により、ロボットがエレベータを呼ぶボタンを押す際に、その位置・姿勢誤差のため正確にボタンの前に位置することができず、ボタンを押すことができないという問題が生じる。

そこで本研究では、エレベータを呼ぶボタンを押す前にロボットの位置・姿勢の誤差を修正するアクションプリミティブ「エレベータ前における自己位置・姿勢の修正」を入れることとした。以下にこのアクションプリミティブの流れを示す。

1. 距離センサを用いてエレベータ周辺の距離データを取得
2. 得られた距離データに対してハフ変換/投票を行い、エレベータ入口周辺の壁を表す直線を導出
3. 導出された直線のデータより、ロボットの位置・姿勢を推定し、目標の位置・姿勢との誤差を計算
4. 得られた誤差から、ロボットの位置、姿勢を修正

このため、このアクションプリミティブは、意志決定プログラムからエレベータ周辺の壁の傾きに関する情報、目標位置に関する情報を受け取り、動作を開始する。本アクションプリミティブは、エレベータのモデルに対して明らかに大きな修正量が計算されたときにアクノレッジ (Fail) を返し、それ以外の場合はアクノレッジ (OK) を返す。

4.3 アクションプリミティブ「エレベータボタンの位置の認識と押し動作」

エレベータボタンを押すという動作を行うため、本研究では、マニピュレータの手先に搭載した CCD カメラから得られた画像に対してテンプレートマッチングを行い、ボタンを発見し、その位置を認識してボタンを押すアクションプリミティブ「エレベータボタンの位置の認識と押し動作」を設計・実装することとした。

本アクションプリミティブは、意志決定プログラムより、押すボタンの種類および、ボタンの位置する高さ情報を受け取った後に動作を開始する。目標のボタンのマッチングが成功した場合、マニピュレータの手先からボタンの相対位置を計算し、マニピュレータ手先がボタンの中心を向くように修正し、ボタンを押す動作を行う。なお、ボタンと手先の接触は、触覚センサにより認識する。一方マッチングに失敗した場合、マニピュレータを少しづつ回転させ、近辺の画像を取り込み、マッチングを行う。それでもマッチングしなかった場合は、アクノレッジ (Fail) を返す。また、マッチングに成功してもボタンまでの距離がマニピュレータの可動範囲をこえていれば、アクノレッジ (Fail) を返す。マッチングに成功し、ボタン押し動作に入り、触覚センサから手先の接触が検出されれば、アクノレッジ (OK) を返す。

Fig.4 に示すテンプレート画像を用いて、複数のボタンが含まれる画像の中から 3 階のボタンにマッチングした様子を Fig.5 示す。

4.4 アクションプリミティブ「ボタン押しの認識およびエレベータ到着の認識」

アクションプリミティブ「ボタン押しの認識およびエレベータ到着の認識」は、ロボットがエレベータのボタンを確実に押せたかどうかの判断および、エレベータが到着したことの認識を行うものである。

ここでは、ボタン押しの認識に、エレベータの標準的な仕様である「ボタンを押した後、ボタンに付いているランプが点灯



Fig. 4 Template image



Fig. 5 Matching the third floor button



Fig. 6 Before pushing the button and after

する」という特徴を使用する。まず、マッチングに成功したときの画像に対して二値化、ノイズ除去を行い、ある一定の明るさ以上の濃度値を持つ領域の面積を求める。次に、ボタンを押した後に、同じ領域の画像を獲得し、再び一定の明るさ以上の、面積を求める。その後、これらの面積の引き算を行い、その値が閾値以上であれば押せたと認識することとした。また、閾値以下であれば、アクノレッジ (Fail) を返す。この画像処理の様子を (Fig.6) に示す。左側の画像がボタンを押す前の二値化画像、右側がボタンを押した後の二値化画像である。

一方、エレベータの到着の認識には、エレベータの標準的な仕様である「エレベータが到着したら、ボタンのランプが消灯し、ドアが開く」という特徴を利用する。まず、エレベータに乗り込む際の到着の認識であるが、これにはドアの開閉と、ランプの消灯の両方を使用する。

まず距離センサによりドアの開閉の確認を行い、仮にドアが開いていれば、このアクションプリミティブはアクノレッジ (OK) を返す。ドアが開いていなかった場合は、前述したボタン押しの確認を行ったあと、先ほどと同様に面積を常に求め続け、面積が極端に減少すればランプが消灯したものと判断し、アクノレッジ (OK) を返す。このような動作を行う理由は、エレベータがロボットと同じ階に止まっていた場合、ボタンを押した直後にランプが消灯しドアが開く、という特徴があり、ランプの確認動作が追いつかないということが原因である。なお、エレベータ内で、フロア到着の認識を行う場合は、ランプの消灯のみにより到着を判断することとした。

なお、本アクションプリミティブは、意志決定プログラムからボタンのランプの大きさに関する情報、ドアが閉じている場合にセンサから得られる距離情報を受け取る。

4.5 アクションプリミティブ「エレベータへの乗りこみ」

アクションプリミティブ「エレベータへの乗りこみ」は意志決定プログラムから、エレベータ内の停止位置の情報を受け取り、エレベータへの乗りこみを行うものである。エレベータ内の状態を検知するため、エレベータに乗り込む直前に、距離センサによりエレベータ内をスキャンし、人がロボットの走行の妨害となる位置にいるかどうかを判断する。もし、人が存在する場合は、あらかじめ録音しておいた音声ファイルを実行し、その場から移動するように指示を出す。数秒たっても人が移動しない場合は、乗り込み不可能と判断し、乗り込み動作を中止し、アクノレッジ (Fail) を返す。人が存在しない場合および、指示した後に人が移動した場合は、エレベータに乗り込み、ボタンの前へ移動しアクノレッジ (OK) を返す。

Fig.7 はエレベータ右奥に人がいる場合と人がいない場合に、実際に距離センサから得られた距離情報を座標上にプロットし

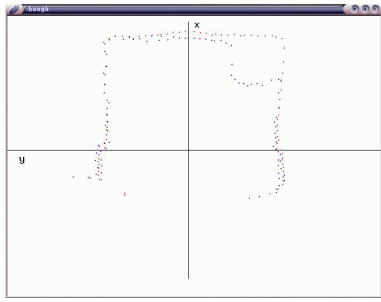


Fig. 7 A people exists in the elevator

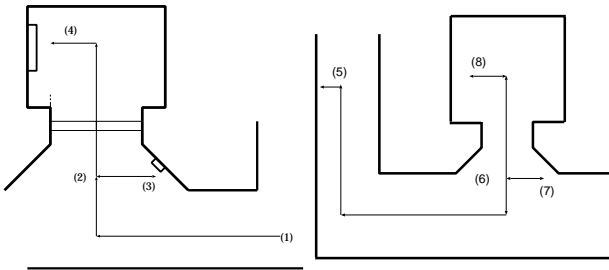


Fig. 8 The seventh floor

Fig. 9 The third floor

たものである．右上のへこみが，人がいる部分である．

4.6 アクションプリミティブ「エレベータ降り」

アクションプリミティブ「エレベータ降り」は，意志決定プログラムからエレベータの外での停止位置の情報を受け取り，エレベータから降りる動作を行うものである．本アクションプリミティブは，オドメトリにより目標停止位置に到達したと確認されれば，アクノレッジ (OK) を返し，到達出来ないと判断すればアクノレッジ (Fail) を返す．

5 フロア間移動動作の実装と動作検証

設計した各アクションプリミティブを実機に実装し，実際にエレベータを用いたフロア間移動を行わせることにより，これらの有効性を検証した．

5.1 対象とする環境

本システムの動作検証を行った環境は Fig.8, Fig.9 に示した岡山大学自然科学研究科棟，7 階と 3 階である．

5.2 動作設計

まずロボットは，スタート地点 (1) から出発し，エレベータ前 (2) まで移動し，修正動作を行う．その後 (3) でボタンを押して，エレベータ到着を待ち，エレベータに乗り込み，また (4) で，3 階のボタンを押す．その後，3 階に到着した後，エレベータから降り，部屋 (5) に向かい，再びエレベータ前に戻る (6)．修正動作をおこなった後，(7) でボタンを押して，エレベータに乗り込み，(8) でボタンを押して，7 階に戻る．7 階に到着後，スタート地点 (1) に戻るという動作をアクションプリミティブの列として設計した．

5.3 動作結果

本実験の，往復動作のタスクの成功率は，およそ 35 パーセント程度であった．失敗する際は，3 階での走行中に，ロボットの位置ならびに姿勢がずれ，エレベータ前できちんとセンシングできる場所に到達できないということが多かった．また，ボタンのマッチングをする際に，ボタンと異なる場所にマッチングをしてしまい，失敗するということがあった．

一方，走行中における人の認識はほとんどの場合，うまく機能している．また，エレベータ内の人認識もある程度うまく動作している．しかし，音声発話機能についてはまだ未実装のため，エレベータ乗り込みの際は，筆者が人に対してよけるように指示した．また，ロボットの姿勢の誤差により，エレベータ内に人が存在しないにもかかわらず，壁を検出し，人が存在すると誤認識することがあった．

また，本研究では，現在，意志決定プログラムが未実装のため，あらかじめアクションプリミティブのシーケンスをプログラム上に記述した．

5.4 考察

さらに成功率を上昇させるためには，エレベータ前における修正動作のみならず，走行中における修正動作の精度を上げる必要がある．また，画像処理において，ボタンと異なる位置に，マッチングしてしまうという問題が存在するため，ボタンをマッチングする方法もさらに改良を加える必要がある．一方で，まだ実験回数が少ないため，人が存在する環境で動作する場合に，十分に機能するかどうかの判断を下すことは出来ない．

走行中の人認識や，エレベータ内の人認識については，ほとんどの場合成功しているため，人への衝突の回避は，ある程度のレベルでは達成している．しかしながら，ロボットの位置・姿勢の誤差により，人が存在しないにもかかわらず，壁を人と認識してしまう等，まだ問題点も存在する．

5.5 まとめと今後の課題

本稿では，自律移動ロボットによるエレベータを用いたフロア間移動動作のロバスト性を向上させるために，動作設計にアクションプリミティブを用いる方法について提案した．また，各アクションプリミティブを実ロボットに実装して，これらの動作を実験し，ある程度の有効性を確認した．

今後の課題としては，意志決定プログラムを実装し，アクションプリミティブがアクノレッジ (Fail) を返した場合に動作を再計画する機能をもたせ，ロバストな動作を実現することである．また各アクションプリミティブの問題点の改良を行い，さらに新たな動作を追加する予定である．

【参考文献】

- (1) 永谷圭司，松浦伸悟，田中豊，“自律移動ロボットによるエレベータ昇降動作の実現”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 '03 予稿集，2A1-1F-B6 (2003-05)
- (2) 永谷圭司，油田信一，“タスクオリエンテッドアプローチによる自律移動ロボットの研究—ドアの通り抜けを含む屋内の自律走行の実現—”，日本ロボット学会誌，Vol.17 No.6，pp111-121 (1999-09)
- (3) 永谷圭司，田中豊，“アクションプリミティブを用いた移動ロボットの知的動作の実現—一本の検索・把持・運搬の動作設計—”，第5回ロボティクスシンポジウム予稿集，pp. 345-350 (2000-03)