

双腕移動マニピュレータの動作計画に関する研究

- 本の認識-把持-運搬-返却動作の実現 -

岡山大学 ○ 高濱 孝安, 永谷 圭司, 田中 豊

Motion Planning with Dual-arm Mobile Manipulator - Realization of a Motion of "Tidying a Room" -

Okayama Univ. ○ Takayasu Takahama, Keiji Nagatani, Yutaka Tanaka

Abstract: When a mobile robot carries out a given task in human-robot co-existence environment, it is necessary for the robot to perform robust motions and to have abilities to deal with unforeseen situations. Therefore we aim to realize intelligent and robust motion of "tidying a room" by a dual-arm mobile manipulator. Concrete task is recognition, grasp, transportation and return of a book. In this task, a path of an end-effector (to grasp a target book) should be changed according to the book's position. Therefore, it is necessary for the robot to estimate its position. Book's return motion also requires to confirm return location and to plan robot's motion.

In this paper, we introduce our motion planning algorithm for dual-arm mobile manipulator, and, an integrated motion verifies a validity of the algorithm.

Key Words: Dual-arm Mobile Manipulator, Motion Planning, Task-oriented Approach, Image Processing

1. はじめに

現在、ロボット研究が対象とする環境は、工場内などのロボットのために整備された環境から、家庭やオフィスなどの人が存在する屋内環境への拡張が行われている。このため、ロボットには、これまで以上に複雑な作業を行う能力や、予定外の状況に対応する能力が求められる。そこで本研究では、人が存在する屋内環境における「ロボットによる複雑な作業の実現」を目指し、車輪型双腕移動マニピュレータの動作に関する研究を行うこととした。

一般に、移動マニピュレータは、地面に固定されたマニピュレータと比較して作業エリアが広いという利点を持つ。しかしながら、走行台車の位置姿勢に生ずる誤差がマニピュレータの手先の位置姿勢の精度に大きく影響するという問題が生ずる。一方、双腕マニピュレータは、単腕マニピュレータと比較して複雑な作業を行うことができる。しかし、双腕マニピュレータは、片方のマニピュレータが他方のマニピュレータの障害となるといった干渉問題など、動作計画が複雑になるという問題がある。さらに、1台のマニピュレータの作業エリアと比較し、2台のマニピュレータが共同で作業できるエリアは狭くなるという問題もある。以上より、双腕移動マニピュレータによる知的動作を実現させるためには、動作計画が重要となると考えられる。

そこで筆者らは、双腕移動マニピュレータを用いた複雑な作業を実現する動作計画問題の研究を行うこととした。その際、特定のタスクを設定し、実ロボットでその実現を目指すタスクオリエンテッドアプローチを研究アプローチとして用いることとした。その第1ステップの研究として、移動マニピュレータによる整頓動作、具体的には本の認識-把持-運搬-返却という一連の動作の実現をタスクと設定した。本稿では、動作計画アルゴリズムを含むタスク実現のための要素動作について解説し、実機を用いて行った動作実験について報告する。

2. 関連研究

移動マニピュレータに関する研究は、動作計画、マニピュレータの力制御、ベースロボットの安定性問題やアプリケーション指向など多岐にわたる。ここでは、「アプリケーション指向による研究」と、「動作計画に関する研究」を中心に取り上げる。

アプリケーション指向の研究については、富沢らは本棚の本を把持し、その本を開きインターネットを用いて情報を送信する動作を実ロボットにより実現した¹⁾。また、永谷らは、移動マニピュレータによるドアの通り抜け動作を行った²⁾。しかしながら、これらの研究では、その動作の実現を主目的とするために、環境を限定している。このため、これらの研究では、様々な状況に対処するための動作計画については深く触れられていない。

移動マニピュレータの動作計画に関する研究については、一般的に手先の操作性を考慮する場合が多い。Bayらは、ノンホロノミックな台車と n 関節のロボットアームからなる移動マニピュレータの可操作度³⁾の標準化、及び車輪型移動マニピュレータの運動学制御の問題をシミュレーションを用いて検討を行った⁴⁾⁵⁾。Desaiらは複数台のノンホロノミックな移動マニピュレータを用いて、1つの対象物を把持し、運搬する動作計画の研究を行った⁶⁾。Khatibらは、Elastic Stripsを用いた移動マニピュレータのオンライン動作計画を実現した⁷⁾。永谷らは、操作性を考慮して、壁に直線を描くための移動マニピュレータの動作計画を行った⁸⁾。一方、双腕移動マニピュレータの動作計画に関する研究について、Chengは、オンライン経路計画の欠点である2台のマニピュレータがお互いに障害物となることをタスクレベルの計画で解決する研究を行った⁹⁾。山本らは、作業空間楕円を用いて、2台のマニピュレータを持つ車輪型移動ロボットで1つの対象物を把持する研究を行った¹⁰⁾。しかしながら、これらの移動マニピュレータの動作計画に関する研究については、シミュレーション内で完結しているものが多く、実ロボット

を動作させ、有効性を検証している例は少ない。

本研究は、アプリケーション指向の研究に利用されるタスクオリエンテッドアプローチにより、双腕移動マニピュレータの動作計画を扱う点が特徴である。また、計画した動作を実機に搭載することで、動作計画手法の有用性の検証を実環境内で行う。

3. タスクオリエンテッドアプローチ

3.1 タスクの設定

本研究では、双腕移動マニピュレータによる整頓動作の実現を目標としている。この整頓動作を実現するための第1ステップとして、作業場所を机上、対象物を本に限定し、実現タスクを「机上の本を把持し、本棚に返却する動作」と設定した。ここで、本棚の位置は既知であり、机から比較的離れたところにあるものとする。さらに本の返却位置についても、既知であり、指定した本の左側に返却するものとした。また、机上の本の大きさも既知であるが、対象とする本の位置については不確かなものとする。

3.2 タスクの分割

前節で設定した移動マニピュレータによる本の整頓動作は一般に以下の手順で実現することができる。

1. 本が存在する机付近までベースロボットが移動
2. 視覚センサによる本の位置認識
3. 本を把持できる位置にベースロボットが移動
4. マニピュレータによる本の把持動作
5. ベースロボットが返却場所付近へ移動
6. 視覚センサによる返却位置の認識
7. マニピュレータによる本の返却動作

以下にこの一連の動作に必要な要素動作についての動作設計を述べる。

3.3 タスクの分析と動作設計

前節で示した動作4「机の上が存在する本を把持する動作」と動作7「把持した本を本棚に返却する動作」では、対象物である本の位置が不確定なため、移動マニピュレータの動作計画が必要である。また、動作1, 3, 5では、ベースロボットのナビゲーション、動作2, 6では本の認識が必要である。これらの要素動作の分析と設計について、以下に述べる。

3.3.1 机の上が存在する本の把持動作

机上の本を把持する際、本を机の端に寄せない限り、単腕でその本を把持することは困難である。また、この場合、本を落とす危険性もある。そこで、本研究では、この動作に関して、双腕を用いる

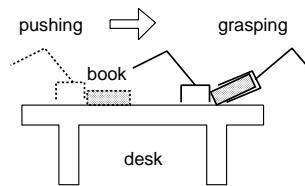


Fig.1 Grasping motion

こととし、その際、片方のマニピュレータを他方のマニピュレータの補助的な形で用いることとした。さらに、本の把持動作を行う際には、片方のマニピュレータで本を押し、もう片方のマニピュレータで本を把持することとした (Fig.1)。

この動作は、対象物である本が双腕マニピュレータの作業エリア内に存在していなければ、動作を遂行することができない。そこで、机上に存在する本の位置を認識した後、本がマニピュレータの作業エリア内に

存在しない場合は、マニピュレータが把持できる位置までベースロボットを移動させることとした。また、本を把持する際、把持側のマニピュレータの手先の位置を固定し、押す側の手先の位置は、直線的に移動することとした。ただし、本を押す際、マニピュレータの手先のハンドの側面で本を押すこととした。

3.3.2 本棚への返却動作

把持した本を本棚に返却する動作は、通常の返却であれば、単腕で可能である。そこで、単腕マニピュレータを用いた本の返却動作を行うこととした (Fig.2)。

机上の本を把持する動作と同様に、本の返却位置がマニピュレータの作業エリア内に存在しなければ、返却動作を遂行することができない。そこで、視覚センサを用いて返却位置を認識し、本が返却できないと判断した場合には、返却可能な位置までベースロボットを移動させることとした。

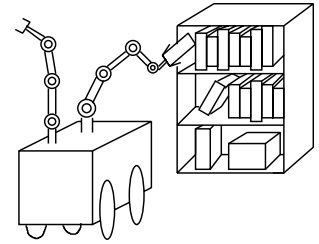


Fig.2 Returning motion

なお、本を本棚に挿入する動作では、手先を直線的に移動させることとした。

3.3.3 ナビゲーション

対象物を搬送するためには、ベースロボットが、与えられた経路を走行する必要がある。そこで本研究では、線分を組み合わせた経路を設定し、ベースロボットをこの線分に追従走行させることとした。

3.3.4 本及び返却位置の認識

机上の本の把持動作を行う際、本の位置が不確定のまま本を把持することはできない。また、本の返却動作を行う際、返却位置が不確定のまま本を返却することができない。そこで、本研究では、視覚センサを用いて、机上の本の位置及び本の返却位置を認識することとした。

3.4 対象とするロボット

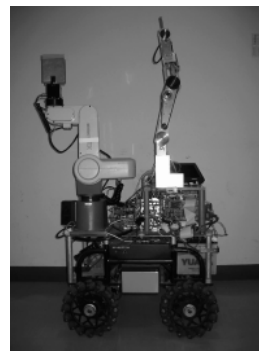


Fig.3 Target robot

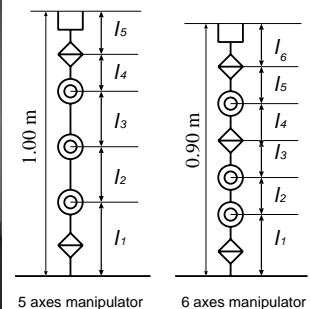


Fig.4 Dual manipulators

本研究では、Fig.3に示した双腕移動マニピュレータを対象に研究を進めることとした。このロボットは、5軸と6軸の2台の性質が異なるマニピュレータを搭載している。また、2台のマニピュレータの手先には、それぞれ視覚センサを、5軸のマニピュレータの手先には、赤外線距離センサを搭載している。また、ベース

ロボットには、全方向移動台車を用いており、全方向への移動が可能である。

Fig.4 に 2 台のマニピュレータのリンクと各関節配置を示す。なお、マニピュレータの搭載位置間距離は 0.35m である。この移動マニピュレータを対象に、整頓動作の実現を目指すこととした。

4. 動作計画

3-1 節で設定したタスクを実現するための重要な要素の一つは、動作計画である。特に、「ベースロボットが把持動作及び返却動作を行う位置」の計画が重要となる。そこで、本研究では、対象物となる本の認識後、または本の返却位置の認識後に、マニピュレータの手先の作業可能なエリアを計算し、本が作業可能なエリアに存在しない場合、ベースロボットの位置修正を行うこととした。なお、このエリアの確定には、手先の操作性を考慮するため、可操作度³⁾を用いることとした。さらに、2 台のマニピュレータを用いる際、これらのマニピュレータが衝突する可能性がある。そこで、作業エリア構築の段階で、マニピュレータ同志が衝突するエリアを取り除くこととした。

以下に可操作度、およびマニピュレータの衝突検知について説明し、具体的な動作計画手法を説明する。

4.1 可操作度

マニピュレータの手先の操作性の指標である可操作度 $\omega(q)$ は、マニピュレータのヤコビ行列 $J(q)$ を用いて以下の式 (1) で表される。

$$\omega(q) = \sqrt{\det(J(q)J^T(q))} \quad (1)$$

ただし、 q はマニピュレータの各関節角度である。

これにより、マニピュレータがある姿勢をとる場合の手先の操作性が、スカラー値として定義できる。本研究では、この値が一定値以上となるマニピュレータの姿勢の集合を用いて作業エリアを決定する。

4.2 2 台のマニピュレータの衝突検知

2 台のマニピュレータが衝突することを回避するために、2 台のマニピュレータに対し、各々のリンク間距離が最短となる距離 d を求める。このリンク間距離が一定値以下になる場合に、マニピュレータが衝突していると見なし、この時のマニピュレータの位置と姿勢より構築される作業エリアを削除する。

4.3 本の把持動作計画

4.3.1 作業エリアの構築

双腕マニピュレータによる本の把持動作は、以下の動作により実現可能である。

- 2 本のマニピュレータのうち、一方が本を押し、もう一方が本を把持
- 本を把持する側に対し、本を押し側のマニピュレータの手先の位置が直線的に移動

ただし、本は机上に設置されていると仮定しているため、作業エリアは机上に限定される。この動作を行うことが可能な机上の作業エリアの計算手法を以下に示す。

- 1 本を把持する側のマニピュレータを α 、本を押し側のマニピュレータを β とおく。机上の平面 (π_α) の任意の点 i に対し、 α の手先の位置ベクトル p_i は、一意に決まる。また、手先の方向ベクトル a_i を、 a_i が机上となす角 ϕ_α 、ベースロボット本体

となす角 θ_α を一定値に定めると、手先の姿勢が決定するため、 α の各関節角 $q_{\alpha i}$ は逆運動学により一意に決まる (Fig.5,6)。ここで、

$$\omega(q_{\alpha i}) \geq \omega_\alpha \quad (\omega_\alpha \text{ は定数})$$

のとき、ステップ 2 に進む。

- 2 a_i ベクトルの水平成分 a_{xi} を手先の位置 p_i より π_α 上において延長する (Fig.5)。この延長した直線上 l で、本を押し側のハンドの側面が a_{xi} ベクトルに垂直となるとき β の姿勢を逆運動学により計算する。この直線 l 上で、

$$\omega(q_{\beta i}) \geq \omega_\beta \quad (\omega_\beta \text{ は定数})$$

のとき、ステップ 3 に進む。なお、この条件を満たす集合 (線分) を ρ_i とおくと、この線分が、本を押し側の手先の軌跡候補となる。

- 3 2 台のマニピュレータの姿勢 $q_{\alpha i}$ 、 $q_{\beta i}$ に対し、マニピュレータの衝突検知を行う。求めた線分 ρ_i 上にマニピュレータの衝突する位置が存在すれば、その線分を取り除く。さらに、本を把持することを考え、 ρ_i の長さが本の幅以下となる線分 ρ_i を取り除く。以上により、双腕マニピュレータが作業を行うのに必要な作業エリアが定義される。

以上の処理手順を机上の全範囲 π_α に適用する。これにより得られた線分の集合を作業エリア γ とする。この作業エリア内の線分一本一本が、本を把持する際の動作候補となる。

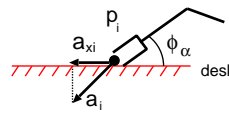


Fig.5 Vector a and p

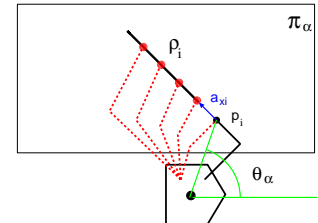


Fig.6 Grasping segment

4.3.2 動作の決定

構築した作業エリアの中から双腕マニピュレータの動作を決定するため、本の位置認識を行う。もし、4-3.1 節で構築した作業エリア内に本が存在すれば、本の重心を通る線分を選択する。この線分が選択された動作であり、この線分上をマニピュレータ β が移動することで把持動作が実現される。もし、作業エリア内に本が存在しなければ、ベースロボットを作業エリアに入る位置に移動させ、もう一度本の位置認識を行う。

4.3.3 本の把持動作計画例

4-3.1 節で示す手順に沿って利用し、「机上の本を把持する動作」の計画を行った。ただし、前提条件として、高さ 0.70m の机の上に A5 サイズの本が置いてあるものとした。さらに、6 軸マニピュレータのハンドで本を押し、5 軸マニピュレータのハンドで本を把持することとした。ここで、把持側のマニピュレータ α の自由度が 5 であるため、 p_i が決まると、 θ_α は一意に決まる。また、マニピュレータ α の手先の角度 ϕ_α については、水平方向より下斜め 60 度に固定することで、逆運動学を解くことができる。さらに、マニピュレータ β の手先の姿勢については、下向きから ± 30 度の範囲で可変することとした。

なお、本研究では、可操作度の閾値についてはヒューリスティックに、 ω_α を 3.1×10^{-8} 、 ω_β を 3.2×10^{-18}

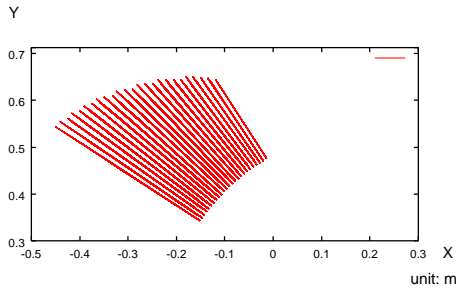


Fig.7 Work area γ

と設定した. このような条件下で作業エリア γ の構築を行った結果を Fig.7 に示す.

把持動作を実現するため, 次に本の認識を行う. 対象とする本がこのエリア内に存在すれば, そのベースロボットの位置における把持動作が可能であるため, 本の重心を通る線分がマンピュレータ β の動作軌跡に相当する. もし, このエリア内に本が存在しなければ, 作業エリア γ に本が入るようにベースロボットを移動させ, 再び認識を行う必要がある.

4.4 本の返却動作計画

4.4.1 作業エリアの構築

単腕による本の返却動作は, 本を返却する側のマンピュレータの手先の位置が本棚に向かって垂直で直線的に移動する動作により実現可能である. ただし, 返却する本棚の高さは既知とした. この動作を行うことが可能な作業エリアの計算手法を以下に示す.

- 1 本を返却する場合に用いるマンピュレータを δ とおく. 高さ一定の平面 (π_δ) 内における任意の点 k に対し, δ の手先の位置ベクトル p_k は一意に決まる. また, 手先の方向ベクトル a_k を, a_k が π_δ となす角 ϕ_δ , ベースロボット本体とのなす角を θ_δ を定めると, δ の各関節角 $q_{\delta k}$ は逆運動学により一意に決まる. ここで,

$$\omega(q_{\delta k}) \geq \omega_\delta \quad (\omega_\delta \text{は定数})$$

のとき, ステップ 2 に進む.

- 2 a_k ベクトルの水平成分 a_{xk} を手先の位置 p_k より π_δ 内で延長する. この延長した直線上 m で,

$$\omega(q_{\delta k}) \geq \omega_\delta$$

となる集合を求める. この線分を p_k とおくと, この線分が, 本を返却する際の手先の軌跡候補となる.

以上の処理手順を机上の全範囲 π_δ に適用する. これにより得られた線分の集合を作業エリア ε とする. この作業エリア内の線分一本一本が, 本を返却する際の動作候補となる.

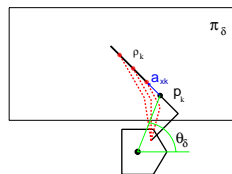


Fig.8 Returning segment

4.4.2 動作の決定

構築した作業エリアより動作を決定するために, 本の返却位置の認識を行う. 作業エリア内に返却位置が存在すれば, その点を通る線分が選択された動作であり, この線分上をマンピュレータが移動することで返却動作が実現される. もし, 作業エリア内に返却位置が存在しなければ, ベースロボットを作業エリアに入る位置に移動し, 再び本の返却位置の認識を行う必要がある.

4.4.3 本の返却動作計画例

4.4.1 節で示す手順に沿って, 「把持した本を本棚に返却する動作」の計画を行った. ただし, 前提条件として, 返却する本棚の高さが 0.60m と設定し, 本棚に本を挿入する際の手先の高さを 0.75m と設定した. なお, 本研究では, マンピュレータ δ の可操作度の閾値 ω_δ を 1.5×10^{-8} に設定し, 生成する作業エリア ε を対象とする移動マンピュレータの座標系の $+x$ 方向に対して ± 30 度と限定した. これらの条件下で, 作業エリアの構築を行った結果を Fig.9 に示す.

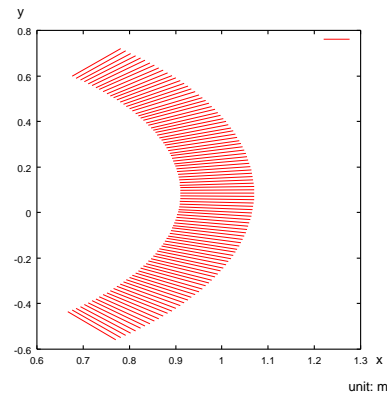


Fig.9 Work area ε

返却動作を実現するために, 次に返却位置の認識を行う. 返却位置がこのエリア内に存在すれば, そのベースロボットの位置において返却動作が可能であるため, 返却位置を通る線分を選択する. もし, この範囲内に返却位置が存在しなければ, 作業エリア ε に返却位置が入るようにベースロボットを移動させ, 再び認識を行う必要がある.

5. ナビゲーション手法

本を把持した後, ベースロボットは, 本を返却する位置まで移動する. 本研究では, 線分の組み合わせによりベースロボットの経路を表現し, オドメトリを用いた自己位置推定を利用して, 経路の追従走行を行うこととした. 一般にロボットが, オドメトリのみを用いて走行する場合, 推定した自己位置には誤差が累積するため, 走行が困難になるという欠点がある. このため, ランドマークを用いた位置修正を行う必要がある. しかしながら, 現在のところ, 走行に要する距離がそれほど長くないため, 現段階では, この修正を行わず, オドメトリによる自己位置推定のみを用いて走行することとした.

6. 画像情報を利用した対象物の位置認識

机上の本の把持動作を実現するためには, 対象とする本と移動マンピュレータとの相対位置を認識する必要がある. また, 本棚への本の返却動作を実現するためには, 本の返却位置を認識する必要がある. そこで, 本研究では, 視覚センサからの画像情報を用いて, これらの位置情報の獲得を行うこととした. 本章では, これらの位置認識手法について述べる.

6.1 机上の本の位置認識

一般に, 視覚センサより獲得した画像情報から, 特定の本の位置を認識することは, 非常に困難である. そこで本研究では, 既知である机上に本が横たわって

いるものと仮定し、さらに本の縦横の長さも既知であるとした。

まず事前に、以下の手順で、カメラのキャリブレーションを行う。

1. 机上にキャリブレーションパターンを配置
2. マニピュレータを机上を見渡せる姿勢に制御
3. マニピュレータに搭載したカメラから画像情報を獲得
4. Tsai のカメラキャリブレーション手法¹¹⁾により画像座標と机上の座標をマッピング

タスク実行時には、このマニピュレータの姿勢およびカメラのキャリブレーション結果を利用し、以下に示す手順により、机上の本の位置・姿勢を獲得する。

1. 本が設置された機の付近にベースロボットを停止
2. マニピュレータをキャリブレーション時の姿勢と同姿勢に制御
3. 本を含む机上の画像を獲得
4. 獲得画像に対するエッジ抽出および、2 値化の操作を実行
5. Tsai のキャリブレーションにより、2 値化画像のピクセル情報を机上の平面座標に変換
6. ハフ変換を利用し、机上の平面座標上にて線分抽出
7. 抽出された線分の中で、平行な 2 本の線分の長さが本の 1 辺と同一となるものを本と判断

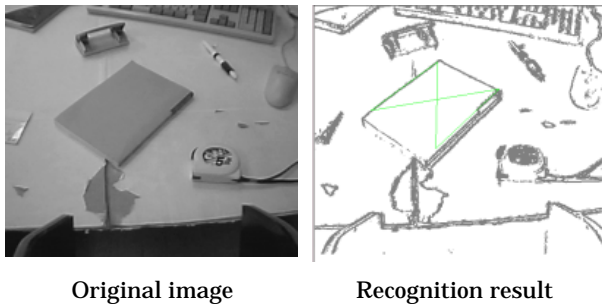


Fig.10 Book's recognition

この手法を利用して本の位置を抽出した結果の例を Fig.10 に示す。Fig.10 の右図では、二値化後の画像上において本の位置が認識され、本の対角線が抽出されている様子が見て取れる。この手法により、比較的乱雑な環境でも、机上の 2 次元位置を認識することが可能となった。ただし、同一の長さである 2 本の平行な線分が、画像内に存在した場合、これを「目的の本の位置・姿勢である」という誤判断をしてしまう恐れがある。本研究では、この問題については、現在のところ対処していない。

6.2 本の返却位置認識

本の返却動作については、本の返却場所を認識する必要があるが、本研究では、返却位置の左隣に背表紙の画像が既知である本が、予め設置されているものとした。この場合、本の返却位置は、返却位置の左隣にある背表紙の位置認識を行うことで実現可能である。

この位置認識については、背表紙画像のテンプレートマッチングを利用し、以下の手順で行うこととした。

1. 予め背表紙の画像情報(テンプレート画像)を保持
2. マニピュレータの手先の姿勢を本棚に垂直とし、本棚から一定距離の位置に保持
3. 本の背表紙を含む画像を獲得

4. 獲得した画像とテンプレート画像の相関演算を行う
5. テンプレート画像を微小回転
6. 4,5 を繰り返し、最も相関値の高い点を抽出

この手法により、返却位置の左隣にある本の背表紙位置を認識することが可能となる。なお、ベースロボットの位置認識に誤差が生ずる場合、本棚から手先のカメラまでの距離に誤差が生じ、このため、テンプレート画像の大きさを変化させる必要が出てくる。この問題を回避するため、本研究では、手先に PSD センサ(距離センサ)を搭載し、本棚までの距離の誤差が著しく大きい場合には、ベースロボットを移動させることで、獲得画像中の背表紙の大きさが一定となるようにした。

7. 動作の統合

7.1 実機による動作検証

各章で説明した動作計画、ナビゲーション、ならびに対象物の認識を統合し、実機による動作検証を行った。

移動マニピュレータ

の走行経路については、Fig.11 に示す通りに設定した。この環境において、実現した動作の様子を Fig.12 に示す連続写真で示し、以下にこの動作について詳しく説明する。ただし、説明中の大文字で表した地点は、Fig.11

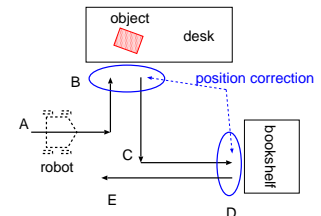


Fig.11 Given path

内の位置に相当し、小文字で表したものは、Fig.12 内の図に相当する。

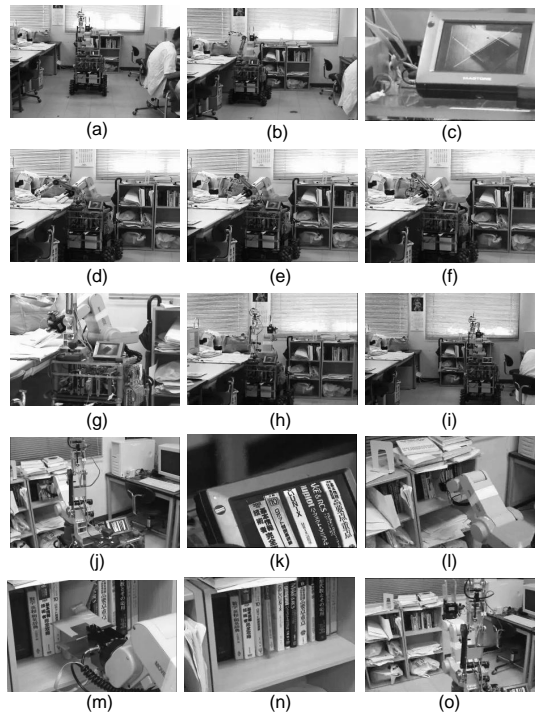


Fig.12 Motion of tidying a book

A 地点を出発したロボットが B 地点まで移動し (a) - (b)、その地点で視覚センサを用いた本の位置認識を行い (c)、その後把持動作計画を行う (d) - (h)。もし、作

業エリアに本が存在しなければ、本が作業エリアに入るようにベースロボットを移動させ、もう一度本の位置認識を行う。本が作業エリア内に入った時点で、双腕マニピュレータによる本の把持動作を行い、本の把持を完了する。次にC地点まで移動し(i)、C地点から距離センサを用いて、本を把持している側のマニピュレータの手先と本棚との距離が0.30mになるD地点まで移動する(j)。次に、返却位置の認識を行い(k)、本の返却動作計画を行う。もし、作業エリアに本の返却位置が存在しなければ、返却位置が作業エリアに入るようにベースロボットを移動させ、もう一度本の返却位置の認識を行う。本が作業エリア内に入った時点で、マニピュレータによる本の返却動作を行い(l) - (m)、本の返却を完了する(n)。最後に、E地点まで移動する(o)。

7.2 実験に対する考察

本の把持動作における動作の成功率は約50%、本の返却動作の成功率は約60%であった。このため、両者を統合した動作の成功率は現在のところ非常に低い。本の把持動作での失敗の原因としては、以下のものが挙げられる。

1. 視覚センサより得られた画像において、エッジの誤対応により本の位置が正確に認識できない。この場合、押す側のマニピュレータを正確な位置に移動させることができないため、把持動作に失敗する。
2. 双腕による作業エリアが狭く、机の手前の0.30mしか作業を行うことができない。このため、把持動作を行うことができない場合がある。
3. 走行系の誤差のため、最初の段階で視覚センサに対象となる本が写らないことがある。この場合、正確な位置に移動させることができないため、把持動作に失敗する。
4. 本の向きにより本が把持できない。

さらに、押す側のマニピュレータは、自作のために精度が悪く、正確な位置に手先が到達できないという問題も生じた。しかしながら、この問題については、動作計画時において、手先の軌跡にある程度の余裕を持たせることで、マニピュレータの関節角に多少の誤差が生じたとしても、把持動作を行うことが可能であった。一方、本の返却動作での失敗の原因としては、以下のものが挙げられる。

1. 距離センサの誤差により、移動マニピュレータと本棚との距離が正確でない。この場合、視覚センサより得られた画像から本の位置が正確に認識できないため、違う位置に本を返却してしまうことがある。
2. 返却した本の背表紙が上下逆さまや前後逆になる。

今後は、上記の問題を解決するため、本の認識及び返却位置の認識精度の向上について検討する必要がある。また、本の向きを変える動作や把持した本の持ちかえ動作を行う必要がある。さらに、走行系の誤差を修正する手法も必要である。

8. まとめと今後の課題

本研究では、双腕移動マニピュレータによる知的動作の1つである「移動マニピュレータによる整頓動作の実現」を目標に「机上に存在する本を把持し本棚に返却する」というタスクを設定し、この動作の実現に向けて、研究を進めてきた。本稿では、この動作を実

現するための、本の把持動作、ならびに本の返却動作に関する動作計画手法を中心に解説した。また、実ロボットにこの動作計画アルゴリズムを搭載し、実環境において動作を実現した。

今後は、7.2節に示した問題点について検討し、一連の動作の達成精度の向上を目指す予定である。

参考文献

- 1) T.Tomizawa, A.Ohya and S.Yuta, "Book Browsing System using an Autonomous Mobile Robot Teleoperated via the Internet," in *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1284-1289, 2002.
- 2) K.Nagatani and S.Yuta, "Designing strategy and implementation of mobile manipulator control system for opening door," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2828-2834, 1996.
- 3) T.Yoshikawa, "Manipulability of robotic mechanisms," in *International Journal of Robotics Research*, Vol.4, pp.3-9, 1985.
- 4) B.Bayle, J.Y.Fourquet and M.Renaud, "Manipulability Analysis for Mobile Manipulators," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1251-1256, 2001.
- 5) B.Bayle, J-Y.Fourquet, F.Lamiroux and M.Renaud, "Kinematic Control of Wheeled Mobile Manipulators," in *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1572-1577, 2002.
- 6) J.P.Desai and V.Kumar, "Nonholonomic motion planning for multiple mobile manipulators," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque,NM,1997.
- 7) O.Brock and O.Khatib, "Real-Time Replanning in High-Dimensional Configuration Space Using Sets of Homotopic Paths," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.550-555, 2000.
- 8) K.Nagatani, T.Hirayama, A.Gofuku and Y.Tanaka, "Motion Planning for Mobile Manipulator with Keeping Manipulability," in *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1663-1668, 2002.
- 9) X.Cheng, "Executing Elementary Assembly Operations by a Two-Arm Robot," in *Proc. of ICAM/JSME International Conference on Advanced Mechatronics*, pp. 396-401, 1993.
- 10) Y.Yamamoto and X.Yun, "Unified Analysis On Mobility and Manipulability of Mobile Manipulators," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1200-1206, 1999.
- 11) R.Y.Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," in *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.RA-3, No.4, pp.323-344, 1987.