複雑な環境下における指示物体の把持*

永田 和之^{*1}, 宮坂 崇^{*2}, 金宮 好和^{*3}, 山野辺 夏樹^{*1}
丸山 健一^{*4}, 川端 聡^{*5}, 河井 良浩^{*5}

Grasping an Indicated Object in a Complex Environment

Kazuyuki NAGATA^{*1}, Takashi MIYASAKA, Yoshikazu KANAMIYA, Natsuki YAMANOBE,
Kenichi MARUYAMA, Satoshi KAWABATA and Yoshihiro KAWAI^{*1} Intelligent Systems Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

This paper presents a task instruction system for picking up an indicated object in a complex environment. The basic setup of the system consists of a manipulator, a stereo camera, and a monitor. The task instruction scheme comprises the following four main steps: 1) The user indicates the target object on the camera image by a mouse click, and selects the object category and grasping form from a pop-up list. In this way, the system obtains information about the 3D position coordinates of the clicked point on the target object, the primitive shape of the object, and the task model for object picking with the selected grasping form. 2) The system acquires the information about the target object and constructs an environment model around the target by stereo vision using the information obtained from the task instruction. 3) The system finds a grasp point based on a grasp evaluation using the acquired information. 4) The robot performs picking up the indicated object. The features of the scheme are that the user can easily instruct the robot how to perform the object picking task by simple clicking operation, and the robot can pick up the indicated object placed in a complex environment without any previous knowledge of the target object.

Key Words : Grasp Planning, Task Instruction, Object Picking, Daily Life Environment

1. は じ め に

少子高齢化社会を背景に、高齢者や身体に障害がある人の生活をサポートする生活支援ロボットの研究開発が盛んに行われている。生活支援ロボットに期待される作業には、日常のあらゆる作業が含まれるが、この中でも人が指示した物を取ってくる作業はニーズが高く重要である。ロボットで人が指示した物を取るためには、複数の物体の中から対象物を指定する作業指示と、複雑な環境下での物体把持が重要課題となる。物体把持の観点から日常生活環境を眺めると、1) ロボットが扱う対象物は我々の身の回りにあるあらゆるもので、同じ種類の物体でも様々な意匠・大きさの物が存在する、2) 対象物が単体で環境に置かれていることは少なく、他の物体に取り囲まれている、3) ロボットばかりでなく人も物を移動するので、対象物の置かれている状態が予め分からない、といった特徴がある。このような複雑な環境下では、作業に必要な情報を全てロボットが自律的に取得して作業を行うことは難しい。一方、全ての作業をユーザが遠隔操作で行うことは、ユーザに大きな負担をかける。この場合、ロボットが自律に行える部分についてはロボットが実行し、ロボットが自律的に取得することが困難な情報をユーザがロボットに教示する Shared Autonomy⁽¹⁾が有効である。

* 原稿受付 2012 年 8 月 13 日

^{*1} 正員, (独)産業技術総合研究所知能システム研究部門
(〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第二)^{*2} 三菱電機(株)^{*3} 正員, 東京都市大学工学部機械システム工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)^{*4} セイコーエプソン(株)^{*5} (独)産業技術総合研究所知能システム研究部門
(〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第二)

E-mail: k-nagata@aist.go.jp

これまで、日常生活環境における物体把持の関連研究として、多様な物体を単純な形状のプリミティブの組合せでモデル化し、把持計画を行う研究が行われている^{(2)~(5)}。Ekvall らは、対象物のプリミティブモデルと、人によるデモンストレーションデータを用いて、物体把持のためのアプローチ動作を計画した⁽³⁾。Berenson らは、アームのキネマティクス、Force Closure、障害物とのクリアランスを評価指標に、複雑な環境下に置かれた物体の把持計画を行った⁽⁴⁾。これらの研究は、予め対象物の形状や配置に関する情報を必要とした。一方、個々の対象物に関する事前情報を用いることなく、視覚により物体情報を獲得して把持計画を行う研究が行われている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし、これらの研究は、対象物が単品で環境に置かれている場合を扱っており、周りに他の物体が存在する場合については扱っていない。

また、マーク⁽⁷⁾や RFID⁽⁸⁾に予め物体情報を記述しておき、これらの情報を利用してロボットで物体をハンドリングする研究が行われている。マークや RFID を用いることで、複雑な環境下での物体認識の問題を緩和することができる。しかし、日常生活環境には膨大な数と種類の物があり、これら一つひとつについてマークや RFID を添付し、物体情報を記述しておくことは現実的ではない。

人の指示に基づく物体把持の研究として、人とロボットとが音声により対話を行いながら、人が指示した物を視覚により認識して取り上げる研究がある⁽⁹⁾。この研究では、物体認識のために個々の対象物に関する事前情報が必要となる。その他に、作図によりカメラ画像上にプリミティブ図形を重ね合わせ、プリミティブ図形の辺や面を指定することで把持点を教示する研究⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、環境や人・物を仮想的なボタンと見なし、レーザポインタで仮想ボタンをポインティングすることでロボットに作業指示を行う研究⁽¹²⁾が行われている。

これまで我々は、日常環境のような複雑な環境下で、人が指定した物を取って来るロボットの実現を目指して、人が指示した物を取り上げる作業指示システムの研究を実施してきた⁽¹³⁾。本作業指示システムは Shared Autonomy の考えを取り入れ、ロボットが自律的に取得できる情報はロボットが取得し、ユーザの意図や意思に委ねられる情報や、ロボットが自律的に取得することが困難な情報を、ユーザが作業指示によりロボットに教示した。我々は、ロボットへの作業指示は、ユーザに高度な知識や複雑な操作を要求するのではなく、直感的で簡単に行えなければならないと考えている。また、日常生活環境にある多種多様な物体をハンドリングするためには、個々の対象物に関する事前情報を用いない手法が有効であると考えている。そこで我々は、個々の対象物に関する事前情報を用いることなく、数回のクリック操作とメニュー選択という簡単な操作により作業指示が行えるシステムを提案してきた。この作業指示システムでは、物体のカテゴリ毎に定義された物体モデルのライブラリが用意されており、各物体モデルには、物体が置かれた状態や使用目的に応じた様々な物体の取り方の作業モデルが記述されている。ユーザはディスプレイに表示されたカメラ画像上で、対象物をマウスクリックすることで対象物を直接指定し、対象物が属する物体カテゴリとその取り方を、システムがリストアップしたリストの中から選択することでロボットに作業指示を行った。ところで以前のシステムでは、ハンドリングに必要な把持点の位置を、ユーザがカメラ画像上でクリックすることで直接指定していた。しかし、ステレオカメラの対応点問題により把持点の位置が得られなかったり、クリック点の誤差のために適切な把持点を指定できないことがあった。

本論文は、これらの問題を解決するために、作業指示で得られた情報を用いて、ステレオビジョンにより対象物情報の獲得と対象物周辺の環境モデルの構築を行い、これらの情報を用いた把持計画により把持点を自律的に取得する手法を提案する。本手法による指示物体の把持は、図 1 に示すように 1) ユーザによる作業指示、2) 物体情報獲得と環境モデル構築、3) 把持計画、4) ロボットによる把持動作実行の四つのステップにより実行される。本論文では、まず 2 章において作業指示について述べる。次に 3 章で対象物情報の獲得と環境モデル獲得について述べ、4 章で把持計画について述べる。最後に 5 章で、本手法を検証するために行った実験結果について述べる。尚、本研究では、指の開閉のみで把持が完了する把持作業を対象とし、マニピュレーションを伴うような複雑な把持⁽¹⁴⁾は対象としない。また、把持作業の内容は、対象物にアプローチして物体を把持し、持ち上げるところまでとし、ロボットハンドは、一般的な平行二指ハンドを仮定する。

2. ユーザによる作業指示

人が指定した物をロボットで取り上げるためには、まず、ロボットに取って欲しい物を伝える必要がある。また、日用品は使用目的や用途に応じてその扱い方が異なるため、ロボットは使用目的や用途に応じた把持形態で

Fig. 1 Object fetching scheme

物を把持する必要がある。このようなユーザの意図や意思に委ねられる情報は、ユーザがシステムに直接教示する必要がある。また、日常生活環境の様に複雑な環境下では、個々の物体に関する事前情報を用いずに、ロボットが自律的に物体を識別することは難しい。そこで本作業指示システムでは、**Shared Autonomy**⁽¹⁾の考えを取り入れ、ユーザの意図や意思に委ねられる対象物の指定やその取り方の指定と、ロボットが自律的に取得することが困難な対象物の種類に関する情報を、ユーザによる作業指示によりシステムに与える。本システムでは、ユーザが直観的にロボットに作業指示が行えるよう、簡単なクリック操作とメニュー選択によりシステムに作業情報を与える。本章では、まず、数回のクリック操作とメニュー選択による作業指示を可能にするための作業モデル、物体モデル、空間モデルについて述べる。次にシステム構成とユーザによる作業指示手順について述べる。

2.1 作業モデル

作業モデルとは、作業に関する知識のことで、作業に必要なパラメータや作業手順のテンプレート、作業条件が記述されている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。作業の実装は、作業モデルの内容に基づき、ロボットのハードウェアやシステム構成に応じて行われる。本作業指示の作業モデルには、指定した把持形態で物体を取り上げるのに必要な作業パラメータ、作業手順、作業条件が記述されている。

2.2 物体モデル

日常生活環境には多種多様な物体が存在し、あらゆる物が把持対象となる。これらの物体の一つひとつについて物体モデルを持つことは現実的ではない。ところで、物体が属するカテゴリが共通ならば、物体の形状は類似しており、扱い方も共通となることが多い。そこで、形状の特徴や扱い方の観点から物体をいくつかのカテゴリに分け、カテゴリごとに物体モデルを定義する。以前のシステムでは、物体モデルは物体カテゴリに適用できる物体の取り方（作業モデル）のみを記述していた⁽¹³⁾。本システムの物体モデルは、ステレオビジョンによる対象物情報の獲得を行うため、形状に関する情報を含める。物体モデルでは、物体カテゴリを代表する形状を、単純な形状の物体プリミティブの組合せで記述する。物体プリミティブには、形状を記述するパラメータと、物体プリミティブの配置を定める座標系が定義されている。形状パラメータには、物体カテゴリが取りうる値の範囲と代表値を記述しておくことができる。また、各物体プリミティブには、その物体プリミティブに適用可能な代表

Fig. 2 Object model of a cup

Fig. 3 Task space model of a table

的な把持形態で物体を取り上げるための作業モデルが記述されている。物体プリミティブとして、テーパ付き円柱（充填，中空・底有り，中空・底無し），テーパ付き四角柱（充填，中空・底有り，中空・底無し），球の7種類を定義した⁽¹⁷⁾。図2はカップの物体モデルの例である。

2.3 タスク空間モデル (TSM)

ロボットが作業を行う場合，ロボットや対象物を取り囲む作業環境の情報が必要となる。作業環境の情報は，環境モデルとしてシステムの中に記述される。ところで日常生活環境では，ロボットばかりでなく人も物を移動するため，対象物周辺にある物を全て環境モデルとして予めシステムに記述しておくことは現実的ではない。しかし，家具や建具など空間に固定されている物については，その情報を予めシステムに記述しておくことができる。そこで，家具や建具など普段人が移動させない物の情報のうち，ロボットの作業に関連する情報をタスク空間モデル [Task Space Model (TSM)] と定義する⁽¹³⁾。タスク空間モデルには，その場所に置かれる物体が占有し得る空間領域や，物体への許容アプローチ方向・許容離脱方向，扉や引き出しを開閉するための作業モデルなどが記述される。また，タスク空間モデルには，その場所に存在する可能性の高い物体カテゴリの物体モデルを登録したり，逆に特定の種類の物をその場所に置かなくなった場合には，物体モデルを抹消したりすることができる。例えば，食器棚には食器の物体モデルが，本棚には本の物体モデルが登録される。このように，タスク空間モデルに物体モデルを登録したり抹消することで，ユーザの生活空間に合わせて，環境モデルをカスタマイズすることができる。

図3は，テーブルのタスク空間モデルの例である。テーブルのタスク空間モデルには，テーブルの配置を記述するための座標系，テーブル上の物体が占有し得る空間領域 (Object containing area)，対象物への許容アプローチ方向が記述されており，ユーザがテーブルの上に普段置いている物体カテゴリの物体モデルが登録されている。対象物への許容アプローチ方向は，図3の Approach direction と Approach allowance angle により定義される。対象物へのアプローチ方向が以下の条件を満たさない場合，ロボットはテーブル上の物体にアクセスできない。

$$\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}}{\|\mathbf{v}\| \|\mathbf{r}\|} \geq \cos \theta \quad (1)$$

ここで， $\mathbf{r}$ はロボットの対象物へのアプローチ方向， $\mathbf{v}$ は Approach direction， θ は Approach allowance angle である。タスク空間モデルは，実際の家具や建具の配置に合わせて，部屋的环境モデルに記述される。

2.4 システム構成

システムは，ステレオカメラ，マニピュレータ，ディスプレイで構成される。ステレオカメラは，マニピュレータの手首に取り付けられており，マニピュレータとカメラの位置関係はキャリブレーションにより求められてい

Fig. 4 Procedure of the task instruction

る⁽¹⁸⁾。ディスプレイには、手首に取り付けられたカメラから得られる画像が表示されており、ステレオビジョンにより距離画像を得ることができる。また、部屋の環境モデルには、家具や建具のタスク空間モデルが実際の配置に合わせて記述されており、タスク空間モデルには、ユーザが普段置いている物体カテゴリの物体モデルが登録されている。

2.5 作業指示手順

図4に作業指示の流れとシステムが獲得する情報について示す。作業指示の手順は以下の通りである。

- 1) ユーザは、ディスプレイに表示されたカメラ画像上で、対象物をクリックする(図4左上)。これによりシステムは、距離画像からクリック点に対応した対象物上の一点の三次元座標を得る。この点の情報から、システムは対象物が含まれるタスク空間モデルを選定する。この様に、ユーザが直接対象物を指定するので、ロボットは対象物を探索する必要がない。システムは、選定されたタスク空間モデルに登録されている物体モデルのリストを表示する(図4左中)。
 - 2) ユーザは、リストアップされた物体モデルの中から、対象物が属する物体カテゴリを選択する。尚、リストアップされた物体モデルの中に適当な物体モデルがない場合には、物体モデルのライブラリにアクセスして適当な物体モデルを選択する。物体モデルのライブラリにも適当な物体モデルがない場合には、以降の過程を全てスキップし、遠隔操作により手動で対象物を把持する。対象物の物体モデルが選択されると、システムは、その物体モデルに記述されている把持形態のリストを表示する(図4左下)。
 - 3) ユーザは、対象物の置かれた状態や対象物の使用目的・用途から、物体を取り上げるのに適切な把持形態を選択する。これにより、選択された把持形態で物体を取り上げるための作業モデルがシステムに渡される。
- 以上の操作により、クリック点に対応した対象物上の一点の三次元座標、対象物が含まれるタスク空間モデル、対象物のプリミティブ形状、指定された把持形態で物体を取り上げるための作業モデルがシステムに渡される。

Fig. 5 Cylinder primitive

3. 対象物情報の獲得と環境モデル構築

作業指示で得られた情報を用いて、ステレオビジョンにより対象物情報の獲得と対象物周辺の環境モデルの構築を行う。

3-1 対象物情報の獲得

把持に必要な対象物情報は、物体プリミティブの形状と位置姿勢である。形状を表すパラメータの精度は、物体の取り方と作業仕様に依存する。例えば、物体プリミティブが中空・底有り型円柱の場合、図5のように、四つの代表的な把持形態が定義できる。把持形態I, II, IIIの場合、ハンドの開閉ストローク内で物体把持が行えるかどうかを判定したり、指が円柱内部に挿入できるかどうかを判定するためには、円柱の半径に関する情報が必要となる。そのため円柱の半径については精度が要求される。しかし、高さの情報については、対象物のサイズに関する把持可能性の判定に用いられないので、それほど精度は要求されない。一方、把持形態IVの場合、ハンドの開閉ストローク内で物体把持が行えるかどうかを判定するためには、高さの情報が必要となるため、高さについては精度が要求されるが、半径の精度は要求されない。

対象物情報の獲得は、まずステレオカメラにより取得した距離画像を、ジャンプエッジを利用してセグメンテーションし、その中からクリック操作で得られた対象物上の点が含まれる領域を抽出する。次に、抽出された領域内の三次元点群情報を用いて、プリミティブ形状をフィッティングすることで作業に必要な対象物情報を得る。高い精度が要求される形状パラメータの取得においては、必要に応じてマニピュレータの運動により視点を変更してデータを収集する。一方、精度が要求されない形状パラメータについては、物体モデルに記述された代表値を用いたり、他の形状パラメータの取得過程で得られた三次元点群情報を用いて取得する。

具体例として、カップの器を中空・底有り型円柱プリミティブで表し、図5の把持形態II, IIIを想定した対象物情報獲得について示す。把持形態II, IIIでカップを把持するためには、円柱開口部の縁円に関する情報が必要となる。また、円柱の高さの情報も必要であるが、高い精度は要求されない。縁円情報の取得は、まずステレオカメラにより取得した距離画像から、対象物上の点が含まれる領域を抽出する(図6(a))。次に、抽出された領域のガウス曲率と平均曲率から、その領域が円柱のどの部位(円柱外側面、円柱内側面、円柱外側底面、円柱内側底面)に属するのかを判定し、点群の法線情報を利用して円柱の中心軸を算出する(図6(b))。次に、円柱の中心軸とカメラ光軸のなす角度から、縁円情報を取得するのに適切な視点かどうかを判定し、場合によっては、マニピュレータの運動により縁円を覗き込む位置にステレオカメラを移動して画像を取得する。縁円が表示された画像から、セグメントベースドステレオ法⁽²¹⁾により円弧のセグメントを抽出し(図6(c))、最小二乗法により縁円の半径と位置姿勢を求める(図6(d))。円柱の高さは、図6(a)で抽出した領域の点群を円柱中心軸に投影し、投影された点と縁円中心点との最大距離の値に設定する。

Fig. 6 Extraction of the circle of the brim

3.2 環境モデル構築

環境情報として、作業指示によりタスク空間モデルが得られている。しかし、その内部の対象物周辺の情報は得られていない。対象物周辺の物体は、物体把持において障害物となるため、タスク空間モデルの空間領域内部の情報が必要となる。そこで、ステレオビジョンにより対象物周辺の三次元情報を取得し、3D occupancy grid により対象物周辺の環境モデルを構築する⁽¹⁹⁾。3D occupancy grid は、三次元空間を均等なサイズの voxel に分割し、各 voxel には、対象物が存在する領域（対象物領域）、対象物以外の物体が存在する領域（物体領域）、物体が存在しない領域（空領域）、物体の存在が未知である領域（未知領域）、を表す四つの値が入る。対象物周辺の環境モデル構築手順は以下の通りである（図 7）。

- 1) タスク空間モデルの空間領域を voxel に分割し、全ての voxel を未知領域の値とする（図 7 (a)）。
- 2) ステレオカメラで三次元情報を得る。
- 3) 三次元点が含まれる voxel を物体領域の値にし、その voxel とカメラを結ぶライン上の voxel を空領域の値にする（図 7 (b), (c)）。
- 4) 未知領域の voxel が、空領域に完全に被われている場合には、その voxel を空領域の値にする。
- 5) 視点を変えて 2) ～ 4) を適当な回数繰り返す。
- 6) 対象物が含まれる voxel を対象物領域の値にする（図 7 (d)）。

環境モデルの構築は、対象物情報の獲得と同時に行われる。

4. 把 持 計 画

作業指示で得られた情報と、ステレオビジョンにより獲得した対象物情報・環境モデルを用いて把持計画を行い、最適な把持点を選定する。把持点とは、把持実行時におけるハンド座標系の参照位置・姿勢である。把持点は、作業モデルに記述されている全ての動作が実行できるように選定しなければならない。物体を取り上げる作業は、アプローチ、把持、離脱の三つの動作により構成される。以下、それぞれの動作について説明する。

アプローチ

アプローチとは、ハンドを開いた状態で、開放空間にある対象物近傍点（アプローチ開始点）から把持点まで移動する動作である。アプローチは、以下の条件を満たさなければならない。

- アプローチ軌道は、マニピュレータの可動範囲内にある。
- アプローチ軌道上で、ロボットは環境と干渉しない。

Fig. 7 3D occupancy grid model of the environment

把持

把持とは、把持点において指を閉じることにより物体を捕獲する動作である。把持は、以下の条件を満たさなければならない。

- 把持点は、マニピュレータの可動範囲内にある。
- 把持点において、ハンドは環境と干渉しない。
- 指を閉じる前、ハンドは対象物と干渉しない。
- 指を閉じたとき、両指の内側面と対象物が接触する。
- 指を閉じたとき、Force-Closure が成立する。

離脱

離脱とは、物体を把持して把持点から開放空間に移動する動作である。離脱は、以下の条件を満たさなければならない。

- 離脱軌道は、マニピュレータの可動範囲内にある。
- 離脱軌道上で、ロボットおよび把持物体は環境と干渉しない。

4.1 把持評価

作業モデルに記述された三つの動作の実行条件は、1) ハンドと対象物との幾何学的条件、2) 力学的外乱に対するロバスト性、3) マニピュレータのキネマティクス、4) 障害物回避、に関するものである。そこで、これらの条件を満たす把持点を選定するために、以下の把持評価を導入する。

(a) ハンドと対象物との幾何学的条件

ハンドと対象物との幾何学的条件には、サイズに関するものと位置に関するものがある。サイズに関する条件には、指の開閉ストローク内で把持できる対象物のサイズなどの条件が含まれ、位置に関する条件には、把持前にハンドと対象物が干渉しない把持点の範囲とか、指を閉じたときに指の間に対象物が存在する把持点の範囲などの条件が含まれる。幾何学的条件は、それぞれ

$$\mathbf{C}_s(\mathbf{O}_g, \mathbf{H}, G_f) \geq 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_p(\mathbf{O}_g, \mathbf{H}, G_f, \mathbf{P}) \geq 0 \quad (3)$$

と表せる．ここで $\mathbf{C}_s$ は、サイズに関する幾何学的条件を列挙し、それをまとめてベクトル表記したもの、 $\mathbf{C}_p$ は、位置に関する幾何学的条件を列挙し、それをまとめてベクトル表記したものである．また、 $\mathbf{O}_g$ は対象物の形状パラメータ、 $\mathbf{H}$ はハンドの形状・機構パラメータ、 G_f は把持形態、 $\mathbf{P}$ は把持点である．ここで、式 (2) および式 (3) を満たす $\mathbf{P}$ が存在しないとき、ロボットは指定された把持形態で対象物を把持することができない．このときシステムは、指定された把持形態が実現できないことをユーザーに通知する必要がある．把持点 $\mathbf{P}$ がとりうる範囲は式 (3) から求められ、その範囲を離散化して把持点候補のリストが作成される．ここで、ハンドと対象物との幾何学的条件を評価するために、以下の評価を導入する．

$$e_h = \min |c_{pi}(\mathbf{O}_g, \mathbf{H}, G_f, \mathbf{P})| \quad (i = 1 \sim n) \quad (4)$$

$$E_h = e_h / e_{h_max} \quad (5)$$

ここで、 $c_{pi}(\mathbf{O}_g, \mathbf{H}, G_f, \mathbf{P})$ は $\mathbf{C}_p$ の i 番目の要素を表し、 n は要素数を表す．また、 e_{h_max} は、全ての把持点候補における e_h の最大値である．把持点 $\mathbf{P}$ が式 (3) を満たすとき、式 (5) の評価値が高いほど式 (3) の境界から離れることになり、把持位置の誤差に対するロバスト性が確保される．

(b) Force Closure

ロバストな把持の指標として Force Closure が良く用いられている⁽²⁾⁽⁴⁾．Force Closure による評価は、まず指と対象物との接触を複数の摩擦有り点接触の組合せで記述し、摩擦円錐を多面錐で近似した上で握力の上限を定め、wrench 集合を計算する．摩擦係数に関しては安全率を見込んで小さめの値に設定し、多くの日用品に対して同一の摩擦係数を用いて評価が行えるようにする．次に、wrench 集合が貼る凸多面体の面と原点との距離を求め、その距離の最小値を Force Closure の評価値とする⁽²⁰⁾．本研究では、全ての把持点候補について Force Closure の評価値を求め、その最大値で除することで評価値が 0～1 となるように正規化したもの (E_f と表記) を評価に用いる．尚、Force Closure の条件が満たされない場合は、評価値をゼロとする．

(c) マニピュレータのキネマティクス

マニピュレータで物体を把持するためには、把持点はマニピュレータの可動範囲内になければならない．そこでまず、把持点がマニピュレータの可動範囲内にあるかどうかをチェックする．把持点がマニピュレータの可動範囲内になければ、その把持点を把持点候補のリストから除く．次に、マニピュレータが把持点に到達しやすいかどうかを評価する．マニピュレータのキネマティクスを評価するため、次の評価式を導入する．

$$e_p = 1 - (\Delta p - \Delta p_{min}) / (\Delta p_{max} - \Delta p_{min}) \quad (6)$$

$$e_r = 1 - \Delta \theta / \pi \quad (7)$$

$$E_k = \alpha_1 e_p + \alpha_2 e_r \quad (8)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (9)$$

ここで、 Δp はマニピュレータの基準位置と把持位置の距離、 $\Delta \theta$ は基準姿勢と把持姿勢との間の姿勢変化量を表す． Δp_{max} 、 Δp_{min} は、 Δp の最大値と最小値である．また、 α_1 、 α_2 は評価値の重み係数である． Δp または $\Delta \theta$ が 0 となるときは α_1 または α_2 を 0 とする．この評価値が高ければ、マニピュレータは少ない移動量で把持点に到達できる．

Fig. 8 Model of the end-effector with three boxes

(d) 障害物回避

3D Occupancy grid で表された環境モデルの物体領域と未知領域の voxel は、障害物となりうる領域（障害物領域）である。ロボットは把持点において、これら障害物領域の voxel との干渉を回避しなければならない。そこで図 8 に示すように、マニピュレータの先端部を、エンドエフェクタおよびステレオカメラを内包する直方体で近似し、この直方体と障害物領域の voxel との最小距離を評価する。把持点において、障害物領域の voxel がマニピュレータ先端の直方体内部にあるとき、障害物とエンドエフェクタは干渉する可能性があるため、その把持点を把持点候補のリストから削除する。ここで、エンドエフェクタと物体との距離がある程度以上離れている場合には、その物体は把持作業において障害とはならない。そこで、評価で用いる距離に上限を設け、物体がこの上限より遠方にある場合には、障害物が存在しないものとして扱う。ここで、障害物回避のため、以下の評価を導入する。

$$E_e = \begin{cases} 1.0 & (l(\mathbf{P}) > l_{sup}) \\ l(\mathbf{P})/l_{sup} & (l(\mathbf{P}) \leq l_{sup}) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 $l(\mathbf{P})$ はマニピュレータ先端部の直方体と障害物領域の voxel との最小距離、 l_{sup} は評価で用いる距離の上限である。

4.2 把持点選定

把持点の選定は、以下の手順で行う。

- 1) TSM の許容アプローチ方向の条件を満たす把持点（把持姿勢が関係する）において、式 (3) から把持点がりうる範囲を求め、その範囲を離散化して把持点候補のリストを作成する。
- 2) 各把持点候補に対して、以下の式に基づく把持評価を行う。

$$E = w_1 E_h^2 + w_2 E_f^2 + w_3 E_k^2 + w_4 E_e^2 \quad (11)$$

ここで $w_1 \sim w_4$ は重み係数である。

Fig. 9 Arrangement of the objects

尚、把持点候補がマニピュレータの可動範囲外であったり、障害物と干渉する場合には、その把持点候補を把持点候補のリストから削除する。

- 3) 式 (11) の評価値が最高となる把持点候補を選出する。
- 4) 選出された把持点候補に対して、アプローチ動作と離脱動作が実行可能かチェックする。アプローチ動作と離脱動作のチェックは、両動作の軌道を離散化した点に対して、マニピュレータの可動範囲チェックと、障害物との干渉チェックを行う。
- 5) アプローチ動作、離脱動作が可能ならば、その把持点候補を把持点とする。
- 6) アプローチ動作または離脱動作が実行できない場合は、次に評価値の高い把持点候補を選出し、4)～6) を把持点が見つかるまで行う。

5. 実 験

本手法の有効性を確認するために、人が指示した物をロボットで取り上げる実験を行った。実験は、三菱重工(株)製のロボットアーム Pa10 に、高野ベアリング(株)(現シュンク・ジャパン(株))製のミューグリッパと、3眼のステレオカメラを取り付けて行った。ハンド座標系は、指先端部より 20mm 内側の指間の中心位置に、図 8 に示すように設定した。ステレオカメラの基線長は 130mm であり、使用したカメラは POINT GREY RESEARCH 社の IEEE1394a カメラ Flea VGA, B/W, 8bit で、焦点距離 6mm 相当のレンズを用いている。

実験では、ユーザの指示に従ってテーブルの上にあるコップを取り上げる作業と、棚の中にあるコップを取り上げる作業を行った。

実験 1: テーブル上の物体把持

まず、テーブルの上に図 9 (a), (b) の状態で置かれたコップをユーザの指示に従って取り上げる実験を行った。図 9 (a) では、対象物の近くに障害物は存在しないが、図 9 (b) には障害物が存在する。システムには、予めテーブルのタスク空間モデルが実際の配置に合わせて記述されており、テーブルのタスク空間モデルには、缶ジュース、コップ、マグカップの三種類の物体モデルが登録されている。しかし、システムには、ユーザがどの物体を把持対象とするのか、また、対象物のサイズや位置姿勢、対象物の周辺にある物体などの情報は一切与えられていない。

図 10 は、ユーザが作業指示を行っているときのディスプレイ画面である。ディスプレイには、マニピュレータの手首に取り付けたステレオカメラの中の一つの画像が表示されている(図 10(a))。ユーザは、このカメラ画像上で対象物(コップ)を指定してクリックした。すると、ステレオビジョンによりクリック点に対応した対象物上の点の三次元座標が得られ、その点が含まれているテーブルのタスク空間モデルが選定される。システムは、このテーブルのタスク空間モデルに登録されている物体モデルのアイコンリストを表示する(図 10(b))。ユーザは、この物体モデルのアイコンリストの中から対象物の種類を指定してクリックする。実験ではコップを指定してクリックした。すると、システムはコップの物体モデルに登録されている把持形態のリストを表示する(図 10(c))。ユーザは、表示された把持形態のリストの中から、対象物の置かれた状態や使用目的・用途に応じて適切な把持形

(a)

(b)

(c)

Fig. 10 Screenshot of the task instruction

(a)

(b)

Fig. 11 Experimental scene of the grasping a cup on the table

態を選択する．実験では，コップの後片付けを想定し，コップの縁を把持する把持形態（図 5 把持形態 II）を選択した．コップの縁を把持して取り上げる作業の実装では，アプローチ動作の軌道は直線で，アプローチ方向は

Fig. 12 Setup of the second experiment

円柱中心軸に沿って開口部から底に向かう方向とした。また、離脱動作の軌道は直線で、離脱方向は鉛直上方向としている。次に、作業指示で得られた情報を用いて、高機能三次元視覚システム VVV⁽²²⁾のステレオビジョンにより、対象物情報の獲得と対象物周辺の環境モデル構築を行い、獲得した対象物情報と環境モデルを用いて把持計画を行い把持点を選定した。把持計画において、コップの縁を把持する把持形態の場合、式(2)には、指の開閉ストローク内で把持できるコップのサイズに関する条件に加えて、片方の指がコップの内側に挿入できるサイズの条件が記述されている。また、式(3)には、ハンドとコップが干渉しない把持深さに関する条件が記述されている。テーブルの TSM に記述されている許容アプローチ方向の条件と式(2)(3)により、ユーザが指定した把持形態で物体把持が可能かチェックを行い、把持が不可と判定された場合には、エラーメッセージを表示して作業指示の最初に戻る。次に、式(3)から把持点候補のリストを作成し、把持評価により把持点を選定した。図 11(a), (b) は、図 9(a), (b) の状態で置かれた対象物の把持点を把持計画により選定し、物体把持を行っている実験シーンである。図 11 (a) では、マニピュレータのキネマティクスの評価を反映して、マニピュレータの移動量が少ない把持点が選定された。また、図 11 (b) では、障害物回避の評価を反映し、障害物のある側と反対側の把持点が選定された。尚、今回の実験では、式(8)の重み係数は $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ とし、式(11)の重み係数は $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 0.25$ とし、把持点を求めた。

実験 2：棚の中の物体把持

次に、図 12 に示す棚の中にあるコップをユーザの指示に従って取り上げる実験を行った。棚のタスク空間モデルに登録してある物体モデル、および作業指示の手順については実験 1 と同様である。実験では、ユーザはシステムが表示した把持形態のリストの中から、コップの側面を把持する把持形態（図 5 把持形態 I）を選択した。コップの側面を把持して取り上げる作業の実装では、アプローチ動作の軌道は直線で、アプローチ方向は把持点におけるハンド姿勢の z 軸方向（図 8）とした。また、離脱動作の軌道は直線で、離脱方向は鉛直上方向としている。次に、システムはステレオビジョンにより対象物情報と対象物周辺の環境モデルの構築を行った。図 13 は、対象物モデル獲得の様子を示したものである。図 13(a) はステレオビジョンにより得られた点群データであり、図 13(b) はクリック操作で得られた対象物領域（緑色）とセグメントベースドステレオ法により得られたコップ飲み口の円弧を表示したもの、図 13(c) は獲得された対象物モデルである。次に、獲得した対象物情報と対象物周辺の環境モデルを利用して把持計画を行い把持点を求めた。今回の実験では、把持位置は獲得した円柱プリミティブの中心とし、把持点におけるハンド姿勢の y 軸が円柱中心軸と直交する条件のもとで把持姿勢を求めた。把持計画において、コップの側面を把持する把持形態の場合、式(2)には、指の開閉ストローク内で把持できるコップのサイズに関する条件に加えて、把持位置を円柱中心に設定することができる条件（指長さ - 円柱半径 > 0 ）が記述されている。また、式(3)には、ハンドとコップが干渉しない把持姿勢に関する条件が記述されている。棚の TSM に記述されている許容アプローチ方向の条件（棚の上面、側面、背面、底面からのアプローチは禁止されている）と式(2)(3)により、ユーザが指定した把持形態で物体把持が可能かチェックを行い、把持が不可と判定された場合には、エラーメッセージを表示して作業指示の最初に戻る。今回の実験では、ユーザがコップの側面把持以外を選択した場合には、エラーメッセージを表示して作業指示の最初に戻ることになる。図 14 は把持計画により把持姿勢を選定している様子である。図 14(a) は把持姿勢（把持点におけるハンド座標系 z 軸を表示）の全候補であり、図 14(b) は式(2)(3)によるチェック後の把持姿勢候補、図 14(c) は把持計画により選定された把持姿勢である。今

Fig. 13 Acquisition of the object model

Fig. 14 Grasp planning for the side grasp

Fig. 15 Experimental scene of the grasping a cup in the shelf

回の把持計画では、把持位置は一定であり ForceClosure の評価値もほぼ一定となることから、その重み係数を 0 とし、式 (8) の重み係数は $\alpha_1 = 0.0$, $\alpha_2 = 1.0$, 式 (11) の重み係数は $w_1 = 0.1$, $w_2 = 0.0$, $w_3 = 0.2$, $w_4 = 0.7$ として把持姿勢を求めた。把持計画における重み係数の設定は、物体が置かれた様々な状況に対して実験を重ね、バランスの良い重み係数を見つける必要がある。

図 15 は実験の様子を示したものである。今回での実験では、物をどけて対象物を把持するといったマニピュレーションを伴う物体把持については未対応であるため、奥にある物体の把持は行っていないが、棚の中の手前にあるコップについては、大きさやテクスチャが異なってもユーザの指示により取り上げることに成功した。

6. 結 言

本論文は、対象物の周辺に隣接物体が存在するような複雑な環境下で、人が指示した物を取り上げる作業指示システムを提案した。本作業指示システムにおける指示物体の把持は、次の四つのステップにより実行される。

- 1) ユーザはクリック操作とメニュー選択により、対象物と、その取り方を指定し、ロボットに作業指示を行う。
- 2) 作業指示で得られた情報を用い、ステレオビジョンにより対象物情報の獲得と、対象物周辺の環境モデルを

構築する。

- 3) 獲得した対象物情報と環境モデルを用いて把持計画を行い、最適な把持点を選定する。
- 4) ロボットは選定された把持点で対象物を把持して取り上げる。

本作業指示システムの特徴は、物体モデルは個々の物体についてではなく、物体のカテゴリ毎に定義していること、また、家具や建具のタスク空間モデルに登録する物体モデルも、個々の物体についてではなく、普段ユーザが置いている物体カテゴリに登録していることである。これにより、多種多様な日用品を少ない数の物体モデルで記述でき、生活支援ロボットの適用範囲を広げることができる。また、物体モデルと、その物体モデルに適用可能な作業モデルをデータベースとして蓄えておき、ユーザが数回のクリック操作とメニュー選択によりロボットに作業指示を与えることで、予めシステムに個々の物体に関する情報を与えなくても、対象物および対象物周辺の情報をその場で獲得して対象物を取り上げることができる。

最後に本手法を検証するために、二つの異なった環境に置かれた物体に対してユーザの作業指示により物体を取り上げる実験を行い、本手法の有効性を確認した。

本作業指示システムでは、家具や建具などのタスク空間モデルに物体モデルに登録する必要がある。タスク空間モデルへの物体モデルの登録・解除はユーザが行う必要があり、クリック&ドラッグなどの簡単な操作で物体モデルの登録・解除が行えるようなユーザインタフェースの開発が必要であると考えている。また、現在のシステムでは、ユーザによる作業指示でクリックミスが生じた場合や、物体モデルが登録されていない物をユーザが指定した場合には、手動操作モードに切り替えて遠隔操作により対象物を把持している。今後の課題として、作業指示でミスが発生した場合のエラーリカバリーや、物体モデルが登録されていない物を指定した場合の対処について検討して行く予定である。更に、より複雑な環境下での物体把持を可能にするため、家具の扉や引き出しを開けて物を取り出したり、奥にある物を取るために手前の物をどけたり、対象物を滑らせて取るといったマニピュレーションを伴う把持についても検討していく予定である。

文 献

- (1) 平井成興, “Shared Autonomy の理論”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 6 (1993), pp. 788-793.
- (2) Miller, A.T., Knoop, S., Christensen, H.I., and Allen, P.K., “Automatic Grasp Planning Using Shape Primitives”, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2003), pp. 1824-1829.
- (3) Ekvall, S., and Kragic, D., “Learning and Evaluation of the Approach Vector for Automatic Grasp Generation and Planning”, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2007), pp. 4715-4720.
- (4) Berenson, D., Diankov, R., Nishiwaki, K., Kagami, S., and Kuffner, J., “Grasp Planning in Complex Scenes”, *Proceedings of IEEE International Conference on Humanoid Robots* (2008), pp. 42-48.
- (5) Huebner, K., and Kragic, D., “Selection of Robot Pre-Grasping using Box-Based Shape Approximation”, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2008), pp. 1765-1770.
- (6) Yamazaki, K., Tomono, M., Tsubouchi, T., and Yuta, S., “A Grasp Planning for Picking up an Unknown Object for a Mobile Manipulator”, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2006), pp. 2143-2149.
- (7) 香月理絵, 太田順, 田村雄介, 水田貴久, 鬼頭朋見, 新井民夫, 植山剛, 西山強志, “マークを用いたロボットの多種類物体ハンドリング”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 70, No. 691 (2004), pp. 766-773.
- (8) Chong, N.Y., Hongu, H., Ohba, K., Hirai, S., and Tanie, K., “A Distributed Knowledge Network for Real World Robot Applications”, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2004), pp. 187-192.
- (9) Makihara, Y., Takizawa, M., Ninokata, K., Shirai, Y., Miura, J., and Shimada, N., “A Service Robot Acting by occasional Dialog - Object Recognition Using Dialog with User and Sensor-Based Manipulation -”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 14, No. 2 (2002), pp. 124-132.
- (10) Saito, F., and Suehiro, T., “Toward Telemanipulation via 2-D Interface - Concept and First Result of “Titi” -”, *Proceedings of the 2002 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vol. 3 (2002) pp. 2243-2248.

- (11) Neubert, J., Ravindran, P., and Ferrier, N.J., “An Assistive Robot Interface for an Interactive Visually Guided Grasping System”, *Proceedings of the 8th International Conference on Rehabilitation Robotics* (2003), pp. 290–293.
 - (12) Nguyen, H., Jain, A., Anderson, C., and Kemp, C.C., “A Clickable World: Behavior Selection Through Pointing and Context for Mobile Manipulation”, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2008), pp. 787–793.
 - (13) 永田和之, 脇田優仁, 小野栄一, “空間への作業情報貼付によるロボットへの作業教示”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 738 (2008), pp. 346–352.
 - (14) Nagata, K., and Yamanobe, N., “Picking up a Towel by Cooperation of Functional Finger Actions”, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2010), pp. 1785–1790.
 - (15) Ikeuchi, K., and Suehiro, T., “Towards an assembly plan from observation: Part 1: Assembly task recognition using face-contact relations (polyhedral objects)”, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1992), pp. 2171–2177.
 - (16) Miura, J., Yano, Y., Iwase, K., and Shirai, Y., “Task Model-Based Interactive Teaching”, *Proceedings of IROS 2004 Workshop on Issues and Approaches to Task Level Control* (2004), pp. 4–11.
 - (17) Yamanobe, N., and Nagata, K., “Grasp Planning for Everyday Objects Based on Primitive Shape Representation for Parallel Jaw Grippers”, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* (2010), pp. 1565–1570.
 - (18) 川端聡, 永田和之, 河井良浩, “環境に固定されたマーカを用いたハンドアイキャリブレーション”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2009) 論文集 (2009), pp. 825–832.
 - (19) Elfes, A., “Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation”, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 3 (1987), pp. 249–265.
 - (20) Ferrari, C., and Canny, J., “Planning Optimal Grasps”, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1992), pp. 2290–2295.
 - (21) Sumi, Y., Kawai, Y., Yoshimi, T., and Tomita, F., “3D Object Recognition in Cluttered Environments by Segment-Based Stereo Vision”, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 46, No. 1 (2002), pp. 5–23.
 - (22) 富田文明, “高機能 3 次元視覚システム VVV”, 情報処理, Vol. 42, No. 4 (2001), pp. 370–375.
-