空間への作業情報貼付によるロボットへの作業教示*

永田和之^{*1}, 脇田優仁^{*2}, 小野栄一^{*1}

Task Instruction to a Robot by Putting Task Information in a Work Space

Kazuyuki NAGATA^{*3}, Yujin WAKITA and Eiichi ONO^{*3} Intelligent Systems Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8568 Japan

This paper presents a task instruction scheme for a service robot operated in a daily life environment. In this paper, we define the Object Template Model (OTM) that is the list of task models which can be applied to the object category. We also define the Task Space Model (TSM) which describes a list of OTMs and spatial information of an object fixed in an environment related to tasks of the robot. The task instruction system is composed of a manipulator and a stereo camera. The camera image of the work space is displayed on a screen and a range image of the work space is captured by the stereo camera. Our task instruction is as follows: An operator clicks on a target object in a camera image and the system gets the position of the clicked point in the work space from the corresponding range image. The system selects a TSM which includes clicked point, and the spatial information described in the TSM is attached at the point. The operator identifies the target object and selects the OTM described in the TSM. The operator then selects the task model by considering the object situation in the work space. Then the robot executes the task using the spatial information and the task model attached at the position.

Key Words: Robot, Manipulator, Skill, Task Instruction, Task Model, Object Model

1. 緒 言

近年, 家庭やオフィスで人をサポートするサービスロボットへの期待が高まっている. サービスロボットに求められる作業の中で, 人の手が届かない所にある物を取ってくるという作業はニーズが多く重要である. 物を取るという作業は比較的単純な作業であるが, 日常生活環境では扱う対象物が多様であり, 物が重なって置かれているなど作業環境も複雑なため, ロボットが自律的に作業を行うことは難しい. 一方, 全ての作業を遠隔操作によりロボットに行わせることは可能であるが, 操作者の負担が大きい. そこで, 遠隔操作ロボットにロボットの自律機能を加え, 人とロボットとが共同で作業を行う Shared Autonomy が提案されている⁽¹⁾. Shared Autonomy とは, 遠隔作業において人とロボットとが, それぞれ得意な部分を分担して, 共同で作業を行うものである. Shared Autonomy は, 人からロボットへの作業教示においても有効である. つま

り, ロボットが自律的にいける部分についてはロボットが実行し, ロボットが苦手とする部分を人が教示するのである.

これまでサービスロボットの研究として, 人が指示した物を視覚により認識して取り上げる研究や⁽²⁾, ビデオイメージから物体情報を獲得して対象物を取り上げる研究が行われている⁽³⁾. ところで視覚により対象物を認識するためには, 照明環境が整っている必要がある. しかし, 日常生活環境は必ずしも照明環境が整っているとは限らない. また, 複数の物体が乱雑に重なりあって存在するため, オクルージョンの問題も存在する. 従って, 日常生活環境においては, ロボットが自律的に物体を認識することは難しい. Makihara⁽²⁾らは, この問題を緩和するために, システムが対象物の認識に失敗した場合には, 必要な情報をユーザーに問い合わせるようにしている. また, 物体認識の問題を緩和するために, マーク⁽⁴⁾や RFID⁽⁵⁾に予め物体情報を記述しておき, それらの情報を利用してロボットに物体ハンドリングを行わせる研究が行われている. ところで物体ハンドリングに必要な情報・操作手順は, 物体が置かれている状態によって異なる. 例えば図 1 は, 本が置かれている様々な状態を示したものである.

* 原稿受付 2007 年 8 月 14 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 つくば市梅園 1-1-1).^{*2} (独)産業技術総合研究所知能システム研究部門.
E-mail: k-nagata@aist.go.jp

Fig. 1 Various states of book arrangements

図1 (a)は本が1冊だけ机の上に置かれている状態、図1 (b)は本が重ねられて机の上に置かれている状態、図1 (c)は本がマガジンスタンドに入っている状態、図1 (d)は本が本立てに立てかけられている状態である。本をハンドリングするのに必要な情報や動作手順は、それぞれの状態に応じて異なり、本の情報が得られたからと言って物体ハンドリングが行えるわけではない。物体ハンドリングを行うためには、システムは物体がどのような状態で置かれているかを認識する必要がある。

その他の研究として、カメラ画像上で3次元CADのように作図することでシステムに必要な情報を与えて作業教示を行う研究⁽⁶⁾や、カメラ画像上にプリミティブ図形を重ねて表示し、プリミティブ図形の辺や面を指定することでハンドリング教示を行う研究が行われている⁽⁷⁾。

我々は、単純な作業は簡単な指示でロボットに行わせるべきであると考えている。本稿では、人が指示した物をロボットが取り上げる picking 作業を対象に、簡単な指示でロボットに作業を行わせる教示システムを提案する。先に述べたように、物体の取り方は物体の種類や物体が置かれている状態、作業目的によって異なる。また、ロボットは日常生活環境の様に照明環境が整っていなかったり、複数の物体が乱雑に置かれている状態では、物体の識別や物体の置かれた状態を認識することは難しい。一方人は、物体の種類や物体の置かれている状態を瞬時に認識できる。そこで提案する教示システムは、Shared Autonomy の考えを取り入れ、人が得意とする物体の識別や物体の置かれている

Fig. 2 Various cups

状態の認識は人が行い、適用できる作業モデルを選択することでロボットに作業教示を行う。次章より、作業教示のためのモデル、教示手順について述べる。

2. 作業指示のためのモデル

2.1 作業モデル 作業モデルとは、ロボットのハードウェアやシステム構成に依存しない作業に関する知識である。作業モデルには、作業を実行するのに必要なパラメータや作業手順のテンプレートが記述されている⁽⁸⁾。

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。例えば、作業パラメータの取得においてロボットが自律的にパラメータ取得が行える場合には、ロボットは自律的にセンシングを行う。一方、必要なセンサが無くロボットが自律的にパラメータ取得が行えないような場合には、インタラクティブにユーザに問い合わせる必要な情報を取得する⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また、動作の実行においても、ロボットが自律的に実行可能な場合には自律的に動作し、自律的に実行することが困難な場合には、人が介入して遠隔操作により行う。

2.2 オブジェクト・テンプレート・モデル (OTM) 我々の周りには様々な物体が存在するが、同じカテゴリーに属する物体は大きさや意匠が多少異なっても、その扱いは共通していることが多い。例えば図2は様々な大きさや形状のカップであるが、ロボットハンドによるカップの持ち方は図3に示す四つの持ち方に集約される。これら四つの持ち方についてカップを取り上げる作業モデルを用意しておけば、ロボットはカップの状態や作業目的に応じてカップを取り上げることができる。そこで、日常生活環境にある様々な物体を物体操作の観点から分類し、その物体のカテゴリー

Fig. 3 Four grasping types of cup with robot hand

Fig. 4 TSM of a table

に適用できる作業モデルをリスト化したものを Object Template Model (OTM) と定義する。OTM を利用することで、同じカテゴリに属する物体は一つのモデルで統一的に表現することができる。ユーザは、OTMの中から物体の置かれた状態・作業目的に応じて適当な作業モデルを選択してロボットに作業指示を与える。

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に関する情報が必要となる。作業環境に関する情報は、環境モデルとしてシステムの中に記述される。日常生活環境では、ロボットだけではなく人も物を移動するので、予め環境モデルを構築することは難しい。しかし、床や壁、家具など空間に固定されている物体については、その情報を予め空間に記述することができる。これら空間情報の内、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。TSM には、収納されている物体が占有できる空間領域を表す情報、物体へのアプローチ方向・離脱方向といったロボットの動作拘束を表す情報、扉や引き出しを開閉するための作業情報などが含まれる。また、食器棚や本棚のように、その場所に置かれる物体が特定の種類にカスタマイズできる場合には、前述の OTM を TSM の中に登録することができる。

TSM の一例として図 4 にテーブルの TSM の例を示す。テーブルの TSM には、ワールド座標系に対するテーブルの位置姿勢を表すための座標系 (TSM frame)、テーブルの上に置かれた物体が占有できる空間領域 (Object containing area)、ロボットがテーブル上の物体にアプローチできる許容アプローチ方向、ユーザが普段テーブルの上に置いている物体の OTM が記述されている。ロボットの許容アプローチ方向は、図 4 の Approach direction と Approach allowance angle で定義される。ロボットの物体へのアプローチ方向が以下の条件を満たすならば、TSM の条件からロボットはテーブル上の物体にアプローチ可能である。

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

ここで、 $\mathbf{r}$ はロボットのアプローチ方向、 $\mathbf{v}$ は Approach direction、 θ は Approach allowance angle を表す。

TSM は、実際の物の配置に合わせて、環境モデルの中に配置される。

3. 作業指示

3.1 基本システム構成 ハードウェアの基本構成はロボットとステレオカメラから構成される。モニタ画面には、作業空間のカメラ画像が表示され、ステレオビジョンによりカメラ画像の距離画像が得られている。また、ロボットが扱う物体のカテゴリと作業内容は予めシステムに登録しており、その作業モデルと OTM は定義してあるものとする。更に、机や本棚のように物を載せたり収納したりする家具の TSM には、ユーザの生活習慣に応じて、特定の OTM が登録してあるものとする。

3.2 作業指示手順 作業指示は以下の手順で行われる。

1. ユーザはモニタ画面に表示されたカメラ画像の中で対象物を見つけ、対象物上の一点をクリックする (図 5)。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。
2. 距離画像からクリックされた点の作業環境中での三次元位置が得られる。システムは環境モデルの

Fig. 5 User clicks a target object in a camera image

Fig. 6 An example of an icon list of OTM

Fig. 7 An example of an icon list of task models

中からクリック点が含まれる TSM を選択し、その TSM の情報を対象物上のクリック点に貼付する。またシステムは、その TSM に登録されている OTM のアイコンリストをディスプレイに表示する (図 6)。

3. ユーザは対象物を識別し、対象物が属するカテゴリの OTM アイコンをクリックして OTM を選択する。OTM のリストの中に適当な OTM が無い場合には、OTM のライブラリにアクセスし、対象物が属する適当な OTM を選択する。
4. OTM が選択されると、システムは OTM に含まれている作業モデルのアイコンリストをディスプレイに表示する (図 7)。
5. ユーザは物体の置かれた状態・作業目的から適当な作業モデルを選択し、その作業モデルのアイコンをクリックする。OTM の中に目的の作業モデル

Fig. 8 An experimental setup

が無い場合には、作業モデルのライブラリにアクセスし、適当な作業モデルを選択する。以上の操作により、ユーザがクリックした対象物上の点に、作業に必要な環境情報と作業モデルが貼付される。

6. ロボットは対象物上の点に貼付された環境情報と作業モデルを利用して物体操作を行う。

なお、作業モデルのライブラリに適当な作業モデルが無い場合には、全ての操作を手動操作により行う。

4. 実 験

本手法の有効性を確認するために、人の指示によりテーブルの上に置かれた食器をロボットで取り上げる作業指示の実験を行った。実験は、サイズ・デザインの異なる複数の食器 (碗、カップ、皿) をテーブルの上に置いて行った。

実験システムは図 8 に示すロボットアーム (三菱重工 Pa10)、グripper (高野ベアリング ミューグリップ)、ステレオカメラ (point grey 社 Digiclops) から構成されている。ワールド座標系はアームのベース座標系と一致させ、ハンド座標系は図 8 の様に設定した。環境モデルはワールド座標系で記述されている。

ステレオカメラはアームの根元に配置した。ロボットは、このステレオカメラに映された対象物を取り上げるので、アームと対象物の間に障害物のある可能性は低い。

食器を取り上げる Picking 作業は、1. move-to-approach, 2. pre-grasp, 3. approach, 4. grasp, 5. lift-up, 6. departure の六つの基本動作から構成した。また、各基本動作を記述する動作モジュールは、1. 前処理, 2. 主動作, 3. 終端処理の三つの処理系で構成した。それ

Fig. 9 Motion modules for picking

ぞれの基本動作の内訳は以下の通りである。

- move-to-approach: アプローチ開始点にハンドを移動する動作。move-to-approachに必要なパラメータはアプローチ開始点におけるハンドの位置姿勢 (Approach starting frame) (図9) である。Approach starting frame は把持点におけるハンドの位置姿勢、アプローチ方向、アプローチ距離から算出される。本実験では、アプローチ方向およびアプローチ距離は固定値として実装した。
 - pre-grasp: 物体を把持するためにハンドを開く動作。
 - approach: 物体把持点にハンドを低速移動する動作。approachに必要なパラメータは、把持点におけるハンドの位置姿勢 (Grasping frame) (図9) である。
 - grasp: 対象物を把持するためにハンドを閉じる動作。
 - lift-up: 物体を把持しながら直上にハンドを移動する動作。lift-upに必要なパラメータはlift upの移動距離 (Lift up length) である。本実験では、移動距離は固定値として実装した。
 - departure: ハンドを安全な領域に退避する動作。departureに必要なパラメータは退避点におけるハンドの位置姿勢 (Departure frame) である。本実験では、退避点はアプローチ開始点と一致させた。
- 尚、本実験では各ステップで動作修正が行えるよう、基本動作モジュールの終端処理にアームの手動操作関数を挿入した。アームの手動操作関数は、キーボード

Table 1 Picking task models

Icon	Description
<p>pick1</p>	<p>Approach direction: Vertical downward.</p> <p>Grasping orientation: The y-axis of the hand coordinate system is parallel to the projected vector of the reversed position vector of the grasping point in the arm-base coordinate system on a horizontal plane, and the z-axis coincide with the approach direction.</p>
<p>pick2</p>	<p>Approach direction: Vertical downward.</p> <p>Grasping orientation: The x-axis of the hand coordinate system is parallel to the projected vector of the reversed position vector of the grasping point in the arm-base coordinate system on a horizontal plane, and the z-axis coincide with the approach direction.</p>
<p>pick3</p>	<p>Approach direction: The direction is parallel to the central axis of the vessel from the open side to the inside.</p> <p>Grasping orientation: The x-axis of the hand coordinate system is directed vertical downward, and the z-axis coincide with the approach direction.</p>

のキーにアームの各軸動作を割り当て、キーを押すとアームを特定方向に微小移動させるものである。

本実験では、食器 (碗, カップ, 皿) を取り上げるために、表1に示す五つの取り方の作業モデルを用意した。碗のOTMには表1のPick1, Pick2が、カップのOTMにはPick1, Pick2, Pick3, Pick4が、皿のOTMにはPick5が記述されている。

本実験システムでは、物体の位置姿勢および把持点の情報を自律的に獲得できないことから、これらの情報を得るために図10に示すウィンドウを表示し、ユーザに追加情報の入力を指示するようにした。図10(a)はPick1を選択したときに表示されるウィンドウであ

Table 1 (Continued) Picking task models

Icon	Description
<p>pick4</p>	<p>Approach direction: The direction is parallel to the central axis of the vessel from the open side to the inside.</p> <p>Grasping orientation: The y-axis of the hand coordinate system is directed vertical downward, and the z-axis coincide with the approach direction.</p>
<p>pick5</p>	<p>Approach direction: The direction is parallel to the projected vector of the position vector of the grasping point in the arm-base coordinate system on the horizontal plane.</p> <p>Grasping orientation: The y-axis of the hand coordinate system is directed vertical downward, and the z-axis coincide with the approach direction.</p>

る。システムは把持点情報を得るために、ユーザに一点クリックを指示する。また、図 10(b) は pick3 を選択したときに表示されるウィンドウである。システムはユーザに二点クリックを指示し、click1 から click2 に向かうベクトルをアプローチ方向、二点の中点を把持点として用いている。

実験では、カメラ画像中の手前の碗をロボットに取り上げさせた (図 5)。オペレータがカメラ画像の中から碗を指定してクリックすると、テーブルの TSM が選択され、その TSM に登録されている OTM のリストが表示された (図 6)。オペレータは OTM リストの中から碗の OTM を選択すると、碗の OTM に登録されているタスクモデルのリストが表示された (図 7)。オペレータがタスクモデルのリストの中から Pick1 を選択すると、把持点の入力を指示する図 10(a) のウィンドウが表示された。オペレータがウィンドウの指示に従い、カメラ画像中の碗上縁中心近傍をクリックすると、ロボットは作業モデル Pick1 に記述された手順に従い動作を実行した。ロボットの動作シーンを図 11 に示す。図 11(a) はロボットがアプローチ動作を開始したところ、(b) は把持点に到達したところ、(c) は物

Fig. 10 Examples of instruction windows for inputting additional information

体を把持したところ、(d) は直上に物体を持ち上げたところである。

5. 結 言

本論文では、Picking 作業を対象に、簡単なクリック操作により日常生活環境下でロボットに作業指示を行う手法を提案した。

本論文では、まず同じカテゴリーに属する物体は大きさや意匠が多少異なっても扱い方は共通であることに注目し、物体のカテゴリーに適用できる作業モデルのリストをオブジェクト・テンプレート・モデル (OTM) と定義した。また、家具など空間に固定された物体の情報のうち、ロボットの作業に関連した情報をタスク空間モデル (TSM) と定義した。

提案する作業指示システムは、ロボットとステレオカメラから構成されており、ステレオビジョンによりカメラ画像の距離画像が得られている。

作業指示は、ユーザがカメラ画像中の対象物上の一点をクリックすると距離画像からクリック点の三次元位置が得られ、その点に TSM の情報が貼付される。次にユーザは物体の種類および物体の置かれた状態に応じて OTM および OTM に記述されている作業モデルを選択することで、クリック点に作業モデルの情報が貼付される。ロボットはクリック点に貼付された情報を利用して作業を行う。

本作業指示手法の特徴は、1) 物体モデルを物体のカテゴリーに適用できる作業モデルのリストで構成したこと、2) TSM に OTM を登録することでユーザの生活習慣に応じて環境をカスタマイズできること、3) ロボットが苦手とする物体の識別や物体の置かれている状態の認識を人間が行い、適用できる作業モデルを選択することでロボットに作業指示を行うことである。

(a)

(b)

(c)

(d)

Fig. 11 Experimental scene

文 献

- (1) Hirai, S., Sato, T. and Matsui, T., Intelligent and Cooperative Control of Telerobot Tasks, *IEEE Control Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 51–56, 1992.
- (2) 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, pp. 124–132, 2002.
- (3) Yamazaki, K., Tomono, M., Tsubouchi, T. and Yuta, S., A Grasp Planning for Picking up an Unknown Object for a Mobile Manipulator, *Proc. of the 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2143–2149, 2006.
- (4) Katsuki, R., Ota, J., Tamura, Y., Mizuta, T., Kito, T., Arai, T., Ueyama, T. and Nishiyama, T., Handling of Multiple Heterogeneous Object with Marks by a Robot, *Trans of the Japan Society of Mechanical Engineers, C*, Vol. 70, No. 691, pp. 766–773, 2004.
- (5) Chong, N. Y., Tanie, K., Object Directive Manipulation through RFID, *Proc. of on Control, Automation, and Systems*, pp. 22–25, 2003.
- (6) Saito, F., Suehiro, T., Toward Telemanipulation via 2-D Interface - Concept and First Result of "Titi" -, *Proc. of IECON 02*, Vol.3, pp. 2243–2248, 2002.
- (7) Neubert, J., Ravindran, P. and Ferrier, N. J., An Assistive Robot Interface for an Interactive Visually Guided Grasping System, *Proc. of the ICORP 2003*, pp. 290–293, 2003.
- (8) Ikeuchi, K., Suehiro, T., Towards an assembly plan from observation: Part 1: Assembly task recognition using face-contact relations (polyhedral objects), *Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2171–2177, 1992.
- (9) Miura, J., Yano, Y., Iwase, K. and Shirai, Y., Task Model-Based Interactive Teaching, *Proc. of IROS 2004 Workshop on Issues and Approaches to Task Level Control*, 2004.
- (10) Nagata, K., Wakita, Y. and Ono, E., Task Instruction by Putting Task Information in Work Space, *Proc. of the 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 305–310, 2007.