再利用性の高いロボット作業技能の構築法*

清水 昌幸^{*1}, 尹 祐 根^{*2}, 音田 弘^{*3}

Development of Robotic Task Skills with High Reusability

Masayuki SHIMIZU^{*4}, Woo-Keun YOON and Hiromu ONDA^{*4} Faculty of Engineering, Shizuoka University,
3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561 Japan

This paper proposes a synthesizing methodology of developing a robotic skill for task execution. Specifically, the paper addresses how to improve reusability of the skill to use it on various robotic systems. First, a skill acquisition system based on human demonstration as well as a skill acquisition method are described. Second, how to improve the reusability of the skill is discussed to obtain a robotic task skill with high reusability. Third, a reusable skill execution system is designed and implemented. Finally, a task skill is developed for a practical task by using the proposed method to experimentally validate the reusability of the skill.

Key Words: Skill, Reusability, Impedance Control, Bilateral Teleoperation, Programming by Demonstration, Task Strategy, RT-Middleware, State Machine, Manipulator, Robot

1. は じ め に

組付作業に代表される, ある種のコツを要する作業をロボットで行う場合, その作業に対する特殊な技能が必要不可欠である. 人間は知識や経験などから技能を習得することができるが, ロボットが自律的に技能を獲得することは困難である. そのため, ロボット技能の体系的な構築法が求められている.

ロボット技能の構築手法は, 解析的方法⁽¹⁾と実演ベースの方法^{(2)~(5)}に大別できる. 解析的方法では, 作業対象のモデルに基づいて解析的に技能を構築するため, 得られた技能の再利用性は高いが, 作業対象を完全にモデル化できない場合には適用が難しい. 一方, 実演ベースの方法では, 人間が行った作業実演の結果から技能を構築するため, 作業対象の完全なモデルが無い場合にも適用できる. 本論文では, 現実的にモデル化が困難な実環境作業を扱うため, 実演ベースの方法で技能を構築することを考える.

実演ベースの技能獲得に関して様々な研究が行われてきている. Asada らは, 人間の直接教示データからハイブリッド制御プログラムを自動的に作成する方法

を提案した⁽²⁾. Kosuge らは, 作業の幾何モデルを用いて, 人間の遠隔作業データをダンピング制御パラメータに変換する方法を提案した⁽³⁾. Skubic らは, 人間の技能を離散イベントとしてモデル化し, イベント駆動方式の技能獲得システムを構築した⁽⁴⁾. Newman らは, 人間の技能を仮想インピーダンスと仮想アトラクタ軌道でモデル化することにより, 作業パフォーマンスが向上することを実験的に示した⁽⁵⁾.

これまでの研究では, 技能の獲得および実現方法が議論の中心となっているが, 一度獲得した技能の再利用性に関しては議論されていない. すなわち, ある手法で獲得した技能が, 獲得時に利用したシステムとは異なるシステムでも有用かどうかについては検討がされていない. 一般に, ロボットの技能獲得には多大な労力を要するため, 一度獲得した技能を様々な環境やシステムで再利用できることが望ましい. 本研究では, 技能の再利用性に焦点を絞り, 再利用性の高いロボット技能の構築を目的とする.

技能の再利用性は, 作業環境に関するものとロボットに関するものに分けることができる. 前者は, 作業条件の不確定性に対するロバスト性や適応性を意味し, 後者は, ロボットに対する非依存性を意味する. 本論文では, 簡単のため, ロボットに関する再利用性のみを考えることにする.

* 原稿受付 2009年3月11日.

^{*1} 正員, 静岡大学工学部(☎432-8561 浜松市中区城北3-5-1).^{*2} (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).^{*3} 正員, (独)産業技術総合研究所知能システム研究部門.

E-mail: tmsimiz@ipc.shizuoka.ac.jp

著者らの研究グループでは、バイラテラル遠隔操作を用いた技能の獲得手法（以下、タスクスキルトランスファー手法）を提案してきた⁽⁶⁾。本手法は、対象物の厳密な幾何モデルが与えられない実環境作業をターゲットとしており、Asadaら⁽²⁾やKosugeら⁽³⁾が提案している幾何モデルに基づく技能獲得手法とは作業対象が異なる。また、本手法では、人間が持つ巧みな技能をより忠実にモデル化するために、技能をインピーダンスモデルにマッピングしている。従来の技能獲得方法では、位置と力のハイブリッドモデル⁽²⁾、ダンピングモデル⁽³⁾、イベントドリブンモデル⁽⁴⁾などが用いられているが、人間の腕はインピーダンス特性を有していることが知られており、人間の技能のモデルとしてはインピーダンスモデルがより適していると推察できる。Newmanら⁽⁵⁾が行った実験的検証では、インピーダンスモデルを用いることにより、複雑な作業を実現できる可能性があることや作業効率が人間のそれに近づくことが示されている。

以上のように、タスクスキルトランスファー手法は、実環境作業に対する人間の技能の獲得に有用であると考えられるが、これまでの研究では、獲得した技能の再利用性に関しては十分な検討がなされていない。さらに、実環境における技能の再利用性は、技能のみでなくロボットの制御系までも含めた技能実行システム全体に依存するが、どのような技能実行システムを構成すれば技能の再利用性が保たれるかについては、今までのところ、ほとんど考慮されていない。

本論文では、タスクスキルトランスファー手法を理論的に解析し、本手法で獲得される技能が本質的に再利用可能であることを明らかにする。加えて、獲得した技能の再利用性の向上を目的として、技能の表現方法や技能実行システムについて検討を行い、技能の汎用的な表現方法や再利用性の高い技能実行システムの構成法を新たに提案する。

以下、本論文では、作業レベルの技能について議論することにする。Hasegawaらは、作業を構成する基本動作を技能 (Skill) と定義しており、これは特定の作業には依存しないものである⁽⁷⁾。一方、本論文で扱う技能は、作業単位でのマクロレベルの技能である。混乱を避けるため、以下では、特定の作業に対する技能を作業技能 (Task Skill) と呼ぶことにする。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、タスクスキルトランスファー手法による作業技能の獲得方法を説明し、その手法で得られる技能の再利用性が高いことを示す。第3章では、得られた作業技能の再利用性に関して考察を行い、再利用性向上のための作

業技能の表現方法を提案する。第4章では、作業技能の実行システムの構成に関して検討を行い、再利用性の高い作業技能実行システムの構成法を提案する。第5章では、提案した手法を実環境作業に適用し、作業技能の再利用性を実験により検証した結果を示す。

2. 作業技能の獲得

2.1 作業技能獲得システム 作業技能の獲得においては、得られる技能の再利用性を最大限考慮しなければならない。実演ベースの方法では、初めに人間が実際の作業を実演し、その実演データから技能を構築する。したがって、実演に用いたシステムに固有の特性が人間の実演データに反映されると、そのデータから得られる技能は実演システムに依存してしまい、結果的に技能の再利用性が低下する可能性がある。

技能の実演方法として、直接教示が広く用いられている。しかしながら、この方法では実演システム固有の特性が実演データに取り込まれる可能性が高く、再利用性の高い技能を獲得する方法としては適さない。

本論文では、図1に示される並列型バイラテラル遠隔操作を用いた作業実演システムを用いる。一般的に、遠隔操作を用いた実演システムでは、ユーザが設定した仮想運動特性が実現されるため、ロボット固有の運動特性が実演データに反映されにくいという特長がある。したがって、遠隔操作を用いた実演システムは、再利用性の高い技能の獲得方法として適していると考えられる。

本システムでは、マスタアームおよびスレーブアームの手先位置¹は、それぞれの位置制御器によって独立に制御される。また、各アームには力センサが取り付けられており、手先に加わる力²を計測することができる。作業対象物はスレーブアームの手先に取り付けられており、人間がマスタアームを操作することにより作業を実演する。

本システムでは、それぞれのアームは以下のダンピング特性を満たすように制御される。

$$\dot{x}_m = \dot{x}_s = A(f_m + f_s) \quad (1)$$

ここで、 $\dot{x}_m \in \mathbb{R}^6$ および $\dot{x}_s \in \mathbb{R}^6$ はそれぞれマスタおよびスレーブの手先速度、 $f_m \in \mathbb{R}^6$ および $f_s \in \mathbb{R}^6$ はそれぞれマスタおよびスレーブの手先作用力、 $A \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は正定なアドミタンス行列である。なお、各アームは制御周期 $\Delta t > 0$ で離散時間的に位置制御されるため、

¹本論文では、位置は並進位置と姿勢を合わせたものを意味する。速度および加速度に関しても同様である。

²本論文では、力は並進力とモーメントを合わせたものを意味する。

Fig. 1 Human demonstration system.

実際の制御則は次のように表される.

$$x_m(t + \Delta t) = x_m(t) + A \{f_m(t) + f_s(t)\} \Delta t \quad (2)$$

$$x_s(t + \Delta t) = x_s(t) + A \{f_m(t) + f_s(t)\} \Delta t \quad (3)$$

ここで, $x_m \in \mathbb{R}^6$ および $x_s \in \mathbb{R}^6$ はそれぞれマスタおよびスレーブの手先位置である.

2.2 作業技能のモデル化 先に述べたように, 本論文では, 人間の作業技能をインピーダンスモデルで表現することを考える. いま, 人間の腕の手先運動特性として以下の線形インピーダンス特性を仮定する.

$$f_m = M\Delta\ddot{x}_m + D\Delta\dot{x}_m + K\Delta x_m \quad (4)$$

ここで, $M \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $D \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ および $K \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は, それぞれ, 慣性, ダンピングおよび剛性の特性を表す正定行列である. また, $x_m^d \in \mathbb{R}^6$ を手先位置の平衡点とすると, $\Delta x_m = x_m^d - x_m$ である.

このモデルに基づいて任意の手先運動特性を実現するためには, インピーダンスパラメータと手先の平衡点軌道を適切に調節する必要がある. したがって, 式(4)のインピーダンスモデルでは, 人間の技能はインピーダンスパラメータとインピーダンス平衡点軌道としてモデル化される.

2.3 作業技能の獲得手法 以上のように, 本論文では, インピーダンスパラメータとインピーダンス平衡点軌道を人間の実演結果から求めることを考える. しかしながら, 式(4)から明らかなように, 実演データとして測定可能な物理量はインピーダンスパラメータと手先位置偏差を掛け合わせたものであるため, インピーダンスパラメータと平衡点軌道の両方を一意に同定するのは不可能である. そこで, インピーダンスパラメータを別の方法で同定し, それを用いて平衡点軌道を求めることを考える. 実際の接触作業中に人間の腕が実現しているインピーダンスパラメータを同定することは困難であるため, 本論文では, Tsuji ら⁽⁸⁾により報告されている, 姿勢維持中の手先インピーダンスパラメータの推定値を用いることにする.

インピーダンスパラメータが与えられれば, 平衡点軌道は以下の方法で求めることができる. 人間の手先

運動特性を表す式(4)を実演システムの制御式(1)に代入すると, 次の関係が得られる.

$$\dot{x}_m = \dot{x}_s = A(M\Delta\ddot{x}_m + D\Delta\dot{x}_m + K\Delta x_m + f_s) \quad (5)$$

実演作業中のマスタとスレーブの手先位置が完全に同期が取れていると仮定すると, インピーダンス平衡点軌道とスレーブ手先の力および運動の関係は,

$$M\ddot{x}_s^d + D\dot{x}_s^d + Kx_s^d = M\ddot{x}_s + D\dot{x}_s + Kx_s + A^{-1}\dot{x}_s - f_s \quad (6)$$

となる. スレーブの手先位置と作用力はセンサから取得できるため, この式を用いてインピーダンス平衡点軌道を求めることができる. ところが, 式(6)は平衡点位置に関する二階の微分方程式となっているため, 平衡点軌道の厳密解を求めることは難しい. そのため, ここでは, 近似解を求めることにする.

実演作業が準静的に行われると仮定すると, 加速度および速度の偏差は無視できるほど小さいと考えられる. すなわち, $\ddot{x}_s^d - \ddot{x}_s \simeq 0$ および $\dot{x}_s^d - \dot{x}_s \simeq 0$ が成り立つと仮定する. この場合, 式(6)より, 平衡点軌道は,

$$x_s^d = x_s + K^{-1}A^{-1}\dot{x}_s - K^{-1}f_s \quad (7)$$

と求められる.

2.4 作業技能の再利用性 式(7)より, タスクスキルトランスファー手法で得られたインピーダンス平衡点軌道は, 人間の腕のインピーダンス特性と遠隔操作システムのアドミタンス行列にのみ依存し, 実演用ロボットの実運動特性には依存しないことがわかる. したがって, 本手法で得られたインピーダンス平衡点軌道は理論的にロボット非依存であり, 異なるロボットでの再利用性が保証されることが示される.

比較のために, 直接教示方式でインピーダンス軌道を獲得した場合を考えてみよう. ロボットの手先に関する運動方程式は一般に次式で表すことができる.

$$f = M_r\ddot{x} + C_r\dot{x} + g \quad (8)$$

ここで, $f \in \mathbb{R}^6$ は手先作用力, $M_r \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $C_r \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ および $g \in \mathbb{R}^6$ はそれぞれ, 慣性行列, 遠心力やコリオリ力に関する行列および重力や摩擦に関する成分である. 式(8)および式(4)より, インピーダンス平衡点軌道は,

$$x_s^d = x_s + K^{-1}M_r\ddot{x}_s + K^{-1}C_r\dot{x}_s + K^{-1}g \quad (9)$$

となる. このように, 直接教示方式では, インピーダンス平衡点軌道がロボットの実運動特性 (M_r , C_r および g) に依存することがわかる. そのため, 直接教示方式で得られたインピーダンス平衡点軌道はロボット依存となり, 再利用性は一般には保証されない.

3. 作業技能の再利用性の向上

前章では、人間の技能をインピーダンスパラメータとインピーダンス平衡点軌道として獲得する方法を述べ、その手法で得られるインピーダンス平衡点軌道は理論的にロボット非依存であることを明らかにした。しかしながら、実環境において作業技能を再現する場合、様々な不確定要素の影響を受けるため、作業が確実に成功するとは限らない。本章では、不確定要素に対するロバスト性を向上させるために、得られたインピーダンス平衡点軌道を作業戦略に基づいて再構築することを考える。さらに、再構築された作業技能の表現方法について考え、再利用性の高い作業技能の表現方法を提案する。

3.1 作業戦略の獲得 現実世界の作業においては、様々な不確定要素のために人間の実演結果が毎回同じ平衡点軌道になるとは限らない。ところが、人間は平衡点軌道を場当りの生成しているのではなく、不確定要素に対してロバストな作業戦略に基づいて平衡点軌道を生成していると考えられる。そのため、人間の作業戦略を獲得し、それに基づいて平衡点軌道を再構築することにより、作業技能のロバスト性が向上すると期待できる。

実演ベースの作業技能獲得法では、人間の作業戦略が実演データに完全に反映されるわけではないため、実演データのみから作業戦略を獲得することは困難なことが多い。また、作業戦略は、より抽象度の高いシンボルレベルで扱われるものであるが、実演データをどのようにシンボル化すべきかについての一般的な手法は今のところ確立されていない。

紙面の都合上、ここでは作業戦略の獲得方法については議論しないが、何らかの方法で作業戦略が得られるとして話を進める。現在のところ、タスクスキルトランスファー手法では、作業を行ったオペレータが手作業で作業戦略を作成している。また、接触状態が同定できる組付作業では、接触状態遷移を作業戦略として獲得する研究も行われている⁽⁹⁾。

3.2 作業技能の表現方法 人間の作業戦略に基づいて作業技能を構築する場合、それをどのように表現すべきかを慎重に考える必要がある。一般に、人間の作業戦略は抽象度が高く、定性的に表現されることが多いが、定性的に表現された作業戦略には曖昧さがあつたり、具現化が容易ではないといった問題がある。

前章で示したインピーダンスベースの作業技能は、インピーダンスパラメータとインピーダンス平衡点軌道として定量的に表されるため、曖昧さはなく、具現化も容易である。しかしながら、人間の作業戦略を

Fig. 2 Task strategy represented by finite states and transitions.

Fig. 3 UML 2 state machine diagram.

業技能に取り込む場合、もし作業戦略に曖昧さがあれば、結果として得られる作業技能にも曖昧さが含まれてしまい、作業技能の正確な再現が困難になる。

また、作業技能は、プログラムという形で具現化されることが多いが、その作業技能プログラムを他のロボットシステムで再利用する際、OSやプログラム言語の違いなどのために、プログラムそのままの形では再利用できないことがある。したがって、様々なロボットシステムで作業技能を再利用するためには、OSやプログラム言語に依存しない汎用的な形で作業技能が表現されている必要がある。以下では、再利用性の観点から作業技能の表現方法について考察し、曖昧さが無い厳密な表現が可能で、かつ、どのようなロボットシステムでも再利用可能な作業技能の表現方法を示す。

人間の作業戦略は、一般に、何らかのイベントをトリガーとする状態遷移とみなすことができる。例えば、組付作業では、接触状態の変化をトリガーとして対象物へ加える力を適切に調節することにより作業を遂行しているとみなすことができる⁽⁹⁾。したがって、本論文では、人間の作業戦略は、図2に示すように、状態と遷移を用いた有限状態マシンで表現できると考える。

有限状態マシンの表記法の一つに、UML2.0で定義されているステートマシン図（以下、UML2ステートマシン図と呼ぶ）がある⁽¹⁰⁾。UML2ステートマシン図は、状態マシンの抽象レベルの設計から具象レベルの実装までを統一的に扱えるように設計された汎用的なモデル化手法である。UML2ステートマシン図ではシステムの詳細な振る舞いを厳密に記述でき、また、その表現は特定のプログラム言語に依存しないものである。そのため、UML2ステートマシン図で作業技能をモデル化することにより、作業技能を正確かつ汎用的に表現できるため、作業技能の再利用性がより向上すると考えられる。

UML2ステートマシン図は、図3に示すように、主

として状態と遷移から構成される。各状態には, entry, do および exit の三つのアクションを定義でき, それぞれ, 状態入場時, 状態中および状態退場時に実行される処理を表す。また, 各遷移には, イベント, ガード条件および遷移アクションを定義でき, それぞれ, 遷移のトリガー, 遷移のブロック条件および遷移時の処理を表す。

作業技能を UML2 ステートマシン図でモデル化することを考える。本論文では, 作業技能は作業戦略とインピーダンス平衡点軌道から構成されると仮定している。作業戦略は, 作業の一連の流れを有限数のシンボリックな離散過程に分割し, それらの過程の間の遷移関係を表したものであるため, UML2 ステートマシンでは状態と遷移で表される。一方, インピーダンス平衡点軌道は, その軌道に沿ってインピーダンス平衡点を動かすことにより作業が進行するのであるから, ステートマシンを駆動するアクションに相当する。よって, ステートマシンの各状態における do アクションは, インピーダンス平衡点軌道を追従する制御となる。

作業技能ステートマシンの各状態は以上のようにモデル化されるが, 作業の進行を表す状態間の遷移もモデル化する必要がある。人間が作業を行う場合は, 力や位置などのセンシング情報を基に作業の進行状況を判断しながら作業を進めていると推察される。本論文のシステムでは, センサ等により取得可能な物理量は手先位置, 手先力, インピーダンス平衡点位置, および時間であるので, 状態遷移のイベントやガード条件はこれらの値の条件として表される。

3.3 再利用性を考慮に入れた作業技能の構築

これまでの議論をまとめると, 人間の実演データから作業技能を構築する手順は次のようになる。

1. 式 (7) を用いて実演データからインピーダンス平衡点軌道を計算する。
2. 実演結果や幾何情報などを基にして作業戦略を作成し, それを UML2 ステートマシン図で表す。
3. 手順 1 で得られたインピーダンス平衡点軌道を手順 2 で定めた状態ごとに分割する。
4. 手順 2 で得られた状態遷移を引き起こすための条件 (力/位置/時間等) を実演データから同定する。
5. 手順 3 で得られたインピーダンス平衡点軌道を追従する制御をその状態の do アクション, 手順 4 で得られた条件を状態遷移イベントとして作業技能ステートマシンに統合する。

上記の手順の概略を図 4 に示す。この図からわかるように, 実演データやインピーダンス平衡点軌道そのものは人間にとって理解しづらいものであるが, それ

Fig. 4 Task skill development process.

を作業戦略に基づいて体系化することにより, 人間が理解しやすい作業技能の表現になる。これは, 作業技能の物理的な要素に論理的な意味付けをすることにより, 作業技能の抽象度が高められているためと考えられる。一般に, 作業技能の抽象度を高めることにより曖昧さが含まれやすくなる傾向があるが, UML2 ステートマシン図で作業技能を表現することにより, 作業技能の振る舞いに厳密性を持たせることができる。また, UML2 ステートマシン図で表現された作業技能は OS やプログラム言語などのプラットフォームに依存しないため, どのロボットシステムでも再利用可能であり, 非常に汎用性が高いものとなる。したがって, 抽象度の高い作業戦略に基づいて構築された作業技能を表現する手法として, ステートマシン図による表現は極めて有用であると考えられる。

4. 作業技能の実現

前章までは, 作業技能の獲得方法および再利用性を向上させる方策を述べたが, 構築した作業技能をどのように実現するかも実用性の観点からは重要な問題である。一般に, 作業技能の実際の再利用性はロボットシステム全体に依存するが, 再利用性の観点に基づいてロボットシステムを構成することにより, 作業技能実行システムの再利用性を高めることができる。本章では, 再利用性の高い作業技能実行システムの設計とその実装例を示す。

4.1 作業技能実行システムの設計

既存のロボットシステムには様々なタイプのものがあるが, 本論文では, 作業を行うための基本的な機能を有するロボットシステムを用いて作業技能実行システムを構成することを考える。具体的には, 作業技能を実行するロボットシステムは以下の仕様を満たすアームを持つと仮定する。

- 手先 6 自由度を陽に制御可能。
- 手先の並進位置および姿勢を計測可能。
- 手先の並進力およびモーメントを計測可能。
- サーボドライバへの制御指令値は関節変位。

第2章で述べたように、本論文における作業技能はインピーダンスモデルで表されるため、ロボットの制御系は次式に示すインピーダンス制御系となる。

$$f = M(\ddot{x}^d - \ddot{x}) + D(\dot{x}^d - \dot{x}) + K(x^d - x) \quad (10)$$

ここで、 $f \in \mathbb{R}^6$ は手先作用力、 $x \in \mathbb{R}^6$ および $x^d \in \mathbb{R}^6$ はそれぞれ、手先位置およびインピーダンス平衡点位置である、また、インピーダンスパラメータ M 、 D および K は人間の腕のインピーダンス特性から決定する。

式(10)の制御則で作業を達成するためには、実演結果より得られた作業技能に基づいてインピーダンス平衡点の軌道 $x^d(t)$ を制御する必要がある。式(7)で示したように、インピーダンス平衡点軌道はロボット非依存であるため、平衡点の制御そのものはロボットやインピーダンス制御の実現方法には依存せず、独立に行うことができる。したがって、インピーダンス制御と平衡点の制御を分けて実装することにより、作業技能の再利用性が高くなると考えられる。

本論文では、作業実行ロボットへの制御指令は関節位置で与えると仮定しているため、インピーダンス制御の実現方式は位置ベースのインピーダンス制御となる。よって、インピーダンス制御を行うためには、式(10)を満たすような手先位置指令値 x の計算とそれを関節変位に変換する逆運動学計算が必要である。逆運動学計算はロボットの機構に依存するが、手先位置指令値の計算はロボットに依存しない。したがって、これら二つの計算を行う部分を分離して実装することにより、インピーダンス制御部の再利用性が高くなることが期待される。

以上の考察を基に、本論文では作業技能実行システムを以下の三つのモジュールに分割して実装する。

- 作業技能モジュール
- 位置ベースインピーダンス制御モジュール
- 位置サーボドライバモジュール

これらのモジュールを用いた作業技能実行システムの構成を図5に示す。この図では、各モジュールは再利用性を指標として階層的に配置されており、上にいくほど再利用性が高くなるようになっている。最上位の作業技能モジュールは、ロボットや制御システムに全く依存しないため、再利用性は極めて高い。中位の位置ベースインピーダンス制御モジュールは、ロボットへの依存性は少ないが制御システムへの依存性は高いため、再利用性に制限がある。最下位の位置サーボドライバモジュールは、ロボットおよび制御システムへの依存性が高いため、再利用性は低い。

この作業技能実行システムを他のロボットシステムに移植する場合はシステム間で異なる部分のみを変更

Fig. 5 Architecture of task skill execution system.

Fig. 6 Task skill execution system implemented by RT-Components.

すればよい。例えば、ロボットの機構のみが異なる場合、最下位の位置サーボドライバモジュールのみを変更すればよく、それより上位のモジュールはそのまま再利用できる。このように、作業技能実行システムをモジュール単位で実装することにより、作業技能実行システムの再利用性を向上させることができる。

4.2 作業技能実行システムの実装例 以上で設計した作業技能実行システムを実現するために、ここでは、RTミドルウェア⁽¹¹⁾（以下、RTMと呼ぶ）を用いた実装例を示す。RTMはロボットアプリケーション開発のためのソフトウェアプラットフォームである。RTMを用いることにより、モジュールベースのプログラム開発や開発したモジュールのシステム間の移行が容易になる。

RTMでは、ソフトウェアモジュールをRTコンポーネント（以下、RTCと呼ぶ）という形で扱う。各RTCは独立したオブジェクトであるが、ポートを介して他のRTCと通信ができるようになっている。RTMの実装の一つであるOpenRTM-aist⁽¹²⁾では、データ通信ポートとしてデータポート、オペレーション用ポートとしてサービスポートが定義されている。

RTCを用いた作業技能実行システムの構成を図6に示す。図5で示される各モジュールが一つのRTCとして表されており、RTC間のデータ通信はデータポートの接続で表されている。OpenRTM-aistでは、データポートのデータ型さえ一致すればデータ通信ができるようになっているため、データ型が同じであるRTC同士は可換である。したがって、本作業技能実行システムを他のロボットシステムに移植する場合は、システム間で異なるRTCを置き換えるだけでよい。通常、図6に示される最下位のサーボドライバRTCのみがロボットシステムに依存するため、その部分だけをシステムごとで作成しておけば、様々なロボットシステムで容易に作業技能を再利用できる。

Fig. 7 Nut attachment task.

5. 適用例

5.1 ナット組付作業 図7に示すように、ロボットが把持するナットを地面に固定されたボルトに取り付ける作業を考える。ナットの位置を記述するため、図7に示すナット座標系 Σ_n を定める。また、基準座標系としてボルトに固定された座標系 Σ_b を定める。

ナットの初期状態における位置決め誤差条件として以下を仮定する。

- 二つの座標系 Σ_b と Σ_n の間 x および y 軸方向の並進位置誤差がボルトの半径以内である。
- 基準座標系 Σ_b から見たナット座標系 Σ_n のロールおよびピッチ軸まわりの姿勢誤差が $0.25[\text{rad}]$ 以内である。

この作業を達成するためにはナットとボルトの軸を合わせる必要がある。もし軸がずれていれば、ナットとボルトのねじ山が噛み合わないため、ナットを締め付けることができない。そのため、この作業の核となる技能は、ナットとボルトの軸合わせである。

5.2 作業技能の構築 前章までに示した方法を用いてナット組付作業に対する作業技能を構築した。初めに、第2章で示した方法を用いて人間による実演データを取得し、それからインピーダンス平衡点軌道を求めた。実演システムのスレーブアームには、産業用ロボットである三菱重工製 PA-10 を使い、式(1)で示される実演システムのアドミタンス行列 A は次のように設定した。

$$A = \text{diag} \{ 0.5, 0.5, 0.5, 50, 50, 50 \} \quad (11)$$

また、文献⁽⁸⁾を参考に、式(10)のインピーダンスパラメータを次のように設定した。

$$M = \text{diag} \{ 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5 \} \quad (12)$$

$$D = \text{diag} \{ 200, 200, 200, 10, 10, 10 \} \quad (13)$$

$$K = \text{diag} \{ 500, 500, 500, 5, 5, 5 \} \quad (14)$$

次に、実演を行った人間が手作業で作業戦略を作成し、それを基に作業技能ステートマシンを作成した。

Fig. 8 Nut attachment state machine diagram.

Fig. 9 Axis alignment submachine diagram.

Fig. 10 Axis probe submachine diagram.

Fig. 11 Error recovery submachine diagram.

得られたステートマシンを図8に示す。このステートマシンは、サブマシン状態を含む入れ子構造となっており、そのサブマシンを図9～11に示す。図8における、Axis Alignment 状態マシンがナットとボルトの軸合わせを行う過程に相当する。

5.3 検証実験 以上で得られた作業技能の有効性と再利用性を検証するため、図12に示すヒューマノイドロボット HRP-2 のアームを用いて実験を行った。実験においては、作業技能自体には一切変更を加えず、PA-10 で作成したものをそのまま HRP-2 で使用した。

Fig. 12 Task execution with humanoid robot.

Fig. 13 Experimental results. Each segmented region corresponds to the state; A: Approach, B: Press, C: Axis alignment, D: Nut fastening.

実験結果の一部を図13に示す。HRP-2とPA-10では慣性や剛性などの運動特性は大きく異なるが、PA-10の場合と同様の作業結果となる⁽⁶⁾ことが確認された。

6. お わ り に

本論文では、再利用性の高い作業技能およびその実行システムの構築手法を提案した。初めに、タスクスキルトランスファー手法で得られる作業技能がロボットに依存しないことを理論的に示した。次に、どのロボットシステムでも再利用が可能な作業技能の汎用的な表現方法を提案した。さらに、作業技能の実現方法についても考え、様々なロボットシステムで再利用可能な作業技能実行システムの構成法を提案した。最後に、提案した手法を用いてナット組付作業技能を構築した。また、得られた作業技能の再利用性を実験により検証し、本手法の有効性を確認した。

謝 辞

本研究を行うに当たり、産業技術総合研究所 安藤慶昭氏、神徳徹雄氏、末廣尚士氏より多くの有益な助言を頂いた。謝意をここに表す。

文 献

- (1) Whitney, D., Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts, *ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol.104, No.1 (1982), pp.65-77.
- (2) Asada, H. and Izumi, H., Automatic Program Generation from Teaching Data for the Hybrid Control of Robots, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.5, No.2 (1989), pp.166-173.
- (3) Kosuge, K. and Asada, H., Transferring Human Skills to Telerobotic Manipulators, *ASME Robotics Research 1990*, DSC-vol.26 (1991), pp.241-246.
- (4) Skubic, M. and Volz, R., Acquiring Robust, Force-Based Assembly Skills from Human Demonstration, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.16, No.6 (2000), pp.772-781.
- (5) Newman, W., Birkhimer, C. and Hebbar, R., Towards Automatic Transfer of Human Skills for Robotic Assembly, *Proc. 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, (2003), pp.2528-2533.
- (6) Yoon, W. K., Suehiro, T., Onda, H. and Kitagaki, K., Task Skill Transfer Method Using a Bilateral Teleoperation, *Proc. 2006 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, (2006), pp.3250-3256.
- (7) Hasegawa, T., Suehiro, T. and Takase, K., A Model-Based Manipulation System with Skill-Based Execution, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.8, No.5 (1992), pp.535-544.
- (8) Tsuji, T., Goto, K., Ito, K. and Nagamachi, M., Estimation of Human Hand Impedance During Maintenance of Posture, *Trans. Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.30, No.3 (1994), pp.319-328.
- (9) Chen, J., Constructing Task-Level Assembly Strategies in Robot Programming by Demonstration, *Int. J. Robotics Research*, Vol.24, No.12 (2005), pp.1073-1085.
- (10) Technologic Arts Inc., *Teach Yourself UML Third Ed.* (in Japanese), (2008), pp.137-154, SHOEISHA Co., Ltd.
- (11) Ando, N., Suehiro, T., Kitagaki, K., Kotoku, T. and Yoon, W. K., RT-Middleware: Distributed Component Middleware for RT (Robot Technology), *Proc. 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, (2005), pp.3555-3560.
- (12) Ando, N., "OpenRTM-aist Official Web Site". (online), available at <<http://www.is.aist.go.jp/rt/OpenRTM-aist>>, (accessed 2009-2-20).