

機関番号：82626
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20700189
 研究課題名（和文） 組立作業教示のための作業特徴量の抽出と制御方策切り替え条件のモデル化
 研究課題名（英文） Condition to select appropriate control policies for complex assembly based on object structure with constraints and compliance
 研究代表者
 山野辺 夏樹（YAMANOBE NATSUKI）
 独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・研究員
 研究者番号：90455436

研究成果の概要（和文）：

対象物の一部に柔らかさ（コンプライアンス）を持つ複雑な組立作業を対象として、作業状態に応じて制御方策の切り替えを行う組立動作を生成するための方法を示す。作業状態を表現するために、部品間の拘束関係やコンプライアンスの配置関係を構造として定義し、その構造に基づいて、人の実演データから得られた複数の制御方策の対応付けや切り替え条件の設定を行う。本研究期間では乾電池装填作業を対象として方法論の一例を示した。

研究成果の概要（英文）：

This research aims to develop a method to plan robotic motions for complex assembly. To achieve complex assembly, appropriate control policies need to be selected based on task conditions. Thus, object structure represented by constraints and compliance between target objects is proposed to develop a task procedure and analyze a target task. In this research period, I have focused on dry battery insertion for presenting an example. Control policies for the task were obtained based on human demonstration and conditions for selecting policies were determined based on the object structure. Finally, it is shown that the target task was achieved with the developed assembly motion by experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：ロボティクス

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：知能ロボティクス、技能解析、スキルトランスファー、組立作業、力制御

1. 研究開始当初の背景

近年の少子高齢化や労働力不足、国際的な価格競争などを背景に、現在は人手に頼っているような複雑な組立作業の自動化に対する要求が高まってきている。組立作業は環境との接触を伴う作業であるため、対象物の位

置や接触力などから作業状態を判断し、それに応じた動作を実現する必要がある。

組立作業には、接触力に応じてロボットの挙動を修正する力制御が有効であり、この手法を用いて自動化がなされてきた。その時、ロボットの挙動は力制御のパラメータで決

定され、パラメータの値が制御方策を表現する。丸棒丸穴の挿入のように対象物の形状や作業工程が単純な作業は、作業中に制御方策を変化させる必要がなく、一定の力制御パラメータ値で作業を実現できるため、試行錯誤的なパラメータ調整等が可能である。しかしながら、複雑形状部品や柔軟物の組み付け、弾性環境に対する挿入などのように作業が複雑になるにつれて、作業状態の変化に応じて制御方策を上手く切り替えていく必要が生じる。このような作業は、状態認識やそれに伴った制御方策の設計の困難さから人手に残されたままになっているのが現状である。

組立作業の動作生成に関する従来手法としては、以下の3種類に大きく分類できる。

(1) 作業を幾何学的・力学的に解析し、作業中に生じ得る部品間の接触状態遷移に基づいて、それらの状態遷移を実現するための組立動作を計画する手法

(2) 対象作業に対して最適化や学習等により試行錯誤的に組立動作を生成する手法

(3) 人の実演データに基づいて組立動作を生成する手法

様々な研究がなされているが、ほとんどが一定の力制御パラメータで実現可能な単純な作業についてしか行われていない。(1)の解析的手法では、作業中の状態を部品間の接触状態として定義しているため、それらに応じて制御方策を切り替えていくことが理論的には可能であるが、位置や力の測定データはノイズが大きく、実際に接触状態を推定することは非常に困難である。また(3)の実演データを用いた手法では、制御方策の切り替えも考慮した動作生成もいくつかなされているが、設定する制御方策の種類や切り替え条件等は設計者の経験を頼りに試行錯誤的に設定されているのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、作業中に制御方策の切り替えが必要となる複雑な組立動作を生成する手法の構築を目指し、本研究期間では、対象作業を限定して方法論の一例を示すことを目的とする。対象作業としては、作業状態に応じて制御方策を変化させる必要があり、かつ直感的に理解しやすい作業として、乾電池の装填作業を選定した。この作業は弾性環境(バネ部分)に対する挿入作業であり、環境



図1 乾電池装填作業

に倣う動作と環境に抗して挿入を実現する動作といった複数の制御方策を必要とするものである。

3. 研究の方法

対象物の一部に柔らかさ(コンプライアンス)が存在するような組立作業を対象とする。このような作業は、プラグの挿入やワイヤーハーネスの挿入、PCの部品の組立等、製造現場においても数多く存在する重要な作業である。

(1) 対象物の構造に基づく組立作業の表現

従来、組立作業は、人が理解しているような一固まりの作業単位、もしくは作業中の接触状態遷移としてのみ表現されてきた。そこで、制御方策と対応づけて作業状態を表現できるよう、本研究で対象とする組立作業を表現するために、対象物の拘束関係や可動方向、コンプライアンスの配置関係に着目する。これらを「対象物の構造」として定義し、図2に示す4種類の構造の組み合わせとして組立作業を表現することとする。各構造は、軸方向等のように、特徴を表すいくつかのパラメータを用いて表現する。また、対象物に対しての配置関係を定義することで実際の対象物と対応付ける。各構造に対してはそれを実現するための作業戦略を対応づけることができ、構造表現とそれに基づく大まかな作業戦略は、実際の組立動作を理解するための指針ともなる。

(2) 人の実演データに基づく組立動作の解析と制御方策の獲得

作業中に制御方策の切り替えが必要な複雑な組立動作を理解するためには、人の実演データを利用する方法が有用である。本研究でも人の手先の動作と力制御の類似性に注目し、人の実演データを用いる。

① 遠隔操作による実演データの獲得

実演データから獲得した制御方策をロボットに適用することを考慮し、人の身体構造の特性を含まない実演データを獲得する。そのために、図3に示す遠隔操作システムを用いることとする。このシステムでは、小型6自由度ハプティックインタフェース(東北大内山研で開発)を人が動かすことでマニピュレータ(三菱重工製、PA-10)を操作することができ、作業中のマニピュレータ手先の位

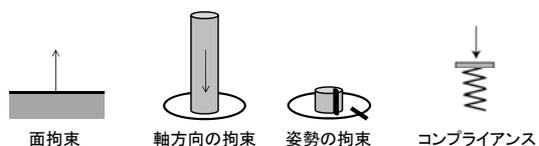


図2 組立作業を表現する対象物の基本構造

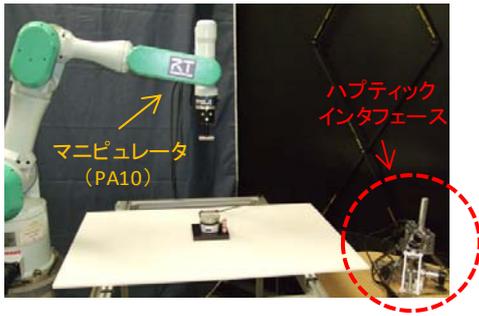


図3 遠隔操作システム

置および環境から対象物に作用する力を測定することができる。なお、並列型バイラテラル制御を用いており、操作者は作業中の力を感知しながらマニピュレータを操作し、組立作業を行うことが可能である。

② 力制御パラメータの推定

人の実演作業時の手先のダイナミクスの変化を力制御パラメータの時系列変化として推定する。力制御則としては、以下に示す単純であるが有効な手法として広く利用されているダンピング制御則を仮定する。

$$\boldsymbol{v}_{\text{ref}} = \boldsymbol{v}_0 + \boldsymbol{A}f_{\text{out}} \quad (1)$$

指令速度 $\boldsymbol{v}_{\text{ref}} \in \mathcal{R}^6$ を作業中に実現されている手先の速度と見なし、 $f_{\text{out}} \in \mathcal{R}^6$ は環境から対象物に作用する反力として測定された値を用い、初期速度 $\boldsymbol{v}_0 \in \mathcal{R}^6$ およびアドミタンス行列 $\boldsymbol{A} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ を手先の挙動を決定するパラメータとして推定する。

③ 隠れマルコフモデル (HMM) を用いた制御方策の獲得

人の実演データから推定された力制御パラメータの時系列データを、HMM を用いて複数の制御方策に分割する。HMM は時空間的ばらつきのある時系列データを確率過程としてモデル化する際に有効な手法である。教師データが与えられると、それを良く表現するための状態遷移や各状態における出力を確率モデルとして表現することができる。

本研究では、HMM の各状態は、対象作業を実現するために必要な各制御方策を適用すべき作業状態、HMM の各状態における出力はその作業状態で実現している制御方策（力制御パラメータの値）と考えることができる。ここで、HMM の状態数は設計パラメータであり、良いモデル化のためには非常に重要であるが、その設定の仕方は確立されていない。そこで、最終的に制御方策をロボットの適用することを考慮して、各状態で安定した出力値が生成されるようなモデルを構築することを目的とする。つまり異なる状態数の HMM を複数個作成し、それらを比較することで状態数を決定する。

HMM の出力データとしては、人の実演の結果として得られる作業中の乾電池の位置・姿勢、環境からの反力、実演データから推定されたダンピング制御パラメータ ($\boldsymbol{v}_0, \boldsymbol{A}$) の時系列データとし、各状態での出力は多次元正規分布に従うとしてモデルの推定を行う。この時、状態数は安定した出力値が生成されるようなモデルを構築するという観点から、各状態における出力確率分布の標準偏差に着目して決定する。

(3) 対象作業の構造表現と実演データから得られた制御方策に基づく組立動作の生成

人の実演データから得られた HMM の各状態は各制御方策を適用すべき作業状態を表し、HMM の各状態における出力は制御方策を表す。そこで、HMM の各状態における出力確率分布の期待値を各作業状態で設定すべき力制御パラメータの値とし、さらに状態が切り替わる条件、つまり制御方策を切り替える条件を定めることで、対象作業を実現する組立動作を生成する。ここで、作業を実現するための大まかな作業戦略は対象作業の構造表現から得られる。人の実演データから得られた HMM の各状態と作業戦略を対応付けることにより、各状態で考慮すべきパラメータを選定することができ、各状態における出力値や状態間の出力値の差、各状態で考慮すべき構造の特徴を表すパラメータ値等から、切り替え条件を定めることができる。例えば、ある状態で軸拘束に関する作業戦略がとられていれば、軸方向の位置や力がその状態において着目すべき特徴パラメータとなる。

このように、人の実演データからの力制御パラメータの推定と HMM によるモデル化を行うことで複数の制御方策を獲得し、さらに対象物の構造表現を指針として制御方策の切り替え条件を選定することで、複雑組立動作を生成することができる。

4. 研究成果

前節で示した方法を用いて、乾電池装填作業を実現する組立動作を生成し、実験により検証した。

乾電池装填作業は、姿勢の拘束、面拘束、バネ部分として表現される軸方向のコンプライアンスという3種類の基本構造を用いて表現される。また構造の配置関係から、コンプライアンスへの対応、姿勢拘束の実現、面拘束の実現という順で作業を実現していく必要があることが分かる。

まず図3に示した遠隔操作システムを用いて実演作業を行い、実演データを基に HMM によりモデル化を行った。教示データとしては40回の作業データを用い、HMM の状態数は、複数モデル間で出力確率分布の標準偏差値

を比較し、8と定めた。

図4に得られたHMMにおける可能な状態遷移を、図5に各状態における出力確率分布の期待値を示す。状態遷移は非循環型のleft-rightモデルとなり、各作業工程において異なる制御方策を実行し、順に切り替えて作業を達成していることが分かる。大まかな作業戦略と図5に示した各状態の出力値から、得られた各制御方策を考察すると、初期状態(S1)では、反力、反モーメント及び各軸の力制御パラメータ値は微小であり、バネ部分の探り動作が行われていると考えられる。S1を基準として、以後の各状態の出力値(特に力制御パラメータの値)を見ると、S2ではバネ方向の位置 y と反力 f_y が減少しており、バネとの接触後に次の動作に向けて再度位置合わせが行われており、S3では、 f_y が増加し、バネ方向のアドミタンス a_y は小さいため、バネ方向に対して手先を堅くした押し付け動作が行われていることが分かる。S4もS3と同様の傾向を持つが、バネ方向への初期速度 v_{0y} が大きくなっており、より強くバネを押しつけている。S5では、バネ方向に関してはS4と同様の傾向を持つが、回転方向に関する初期速度 ω_{0x} が減少を始めており、バネを押しつけながら、乾電池の姿勢を修正していることが分かる。S6では、回転方向に関してはS5と同様の傾向を示しており、バネ方向に関しては v_{0y} の期待値が再び増加を始め、 a_y も大きな値を示していることから、バネ方向には手先を柔らかくして位置を調整しながら姿勢の修正を行っている。また、鉛直方向の反力 f_z が変化しており、鉛直方向に乾電池の一部を押しつけることで位置を固定しつつ、上手く姿勢の修正を行っていることが分かる。S7は、図4の状態遷移からも分かるように、S6からS8へ遷移する途中の過渡的な状態である。回転方向の反モーメント m_x が大きくなっており、姿勢の補正の際に乾電池が引っ掛かり、姿勢の調整に手間取っている状況である。回転方向のアドミタンス a_{rx} は大きく、反モーメントに応じて調整が行われていることが分かる。S8は最終状態である。

図6に、各状態における制御方策とその状態に関係する対象物の構造を対応づけてまとめて示す。これに基づく、各制御方策の遷移条件は、S1→S2, S3→S4, S4→S5ではバネ方向の位置と反力で定義でき、S2→S3については、S2で再度位置合わせを行っているため目標位置で、S5→S6は鉛直方向の反力で、S6→S7は回転方向のモーメント及び目標姿勢、S6→S7およびS7→S8は目標姿勢および鉛直方向の反力で定義することができる。最終的に、実際の切り替え条件の基準値は実演データを参考に設定し、各状態のダンピング制御パラメータ値は出力確率分布の期待値を実装することで、ロボット実機で乾電池装

填作業を実現した。

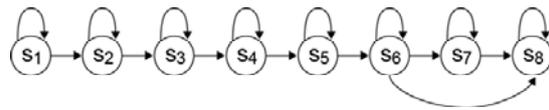


図4 乾電池装填作業における状態遷移

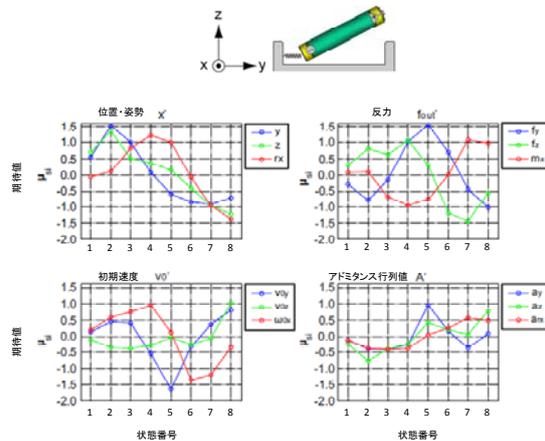


図5 各状態における出力確率分布の期待値

構造	コンプライアンス				姿勢拘束	面拘束	姿勢拘束	—
動作	探り	押し付け	押し付け	押し付け	押し付け/回転	回転	(接触)	固定
状態	1	2	3	4	5	6	7	8
y方向	—	—	堅い	—	—	柔らかい	—	—
z方向	—	—	—	—	—	鉛直下向き押し付け	—	—
x軸周り	—	—	堅い	—	—	—	柔らかい	—

図6 得られた制御方策と構造との対応付け

本研究期間では、作業中に制御方策の切り替えを必要とする複雑な組立動作を生成するための方法論の一例を、乾電池装填作業を対象として示した。対象物の構造表現を提案し、これまで指針のなかった、人の実演データから得られた複数の制御方策の対応付けや切り替え条件の設定を行うための例についても示している。

現状では、作業と構造とを対応づける部分等のように人手に頼るところも多い。今後は対象とする事例を増やし検証を進め、実際の対象物の形状モデルから構造表現や大まかな作業戦略を自動的に生成する方法やエラーリカバリのための戦略構築等の課題に取り組む予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Natsuki Yamanobe, Hiromitsu Fujii, Tamio Arai, “Analysis of Assembly Skill

s for Dry Battery Insertion based on Force Control Parameters”, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 査読有, 2009, pp. 191-197

② Natsuki Yamanobe, Hiromitsu Fujii, Tamio Arai, Ryuichi Ueda, “Motion Generation for Clutch Assembly by Integration of Multiple Existing Policies”, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008, 査読有, pp. 3218-3223

〔学会発表〕(計1件)

① 山野辺 夏樹, 音田 弘, 尹 祐根, 神徳 徹雄, “対象物の形状と構造に基づく組立作業分類方法の提案”, 精密工学会春季大会, 2009/03/11, 東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山野辺 夏樹 (YAMANOBE NATSUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・研究員

研究者番号：90455436