

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 山野辺 夏樹

本論文は「状態行動地図を用いた複数行動則の統合による組立動作生成」と題し、全 6 章からなる。本論文では、複雑組立作業の動作設計を効率的に行うことを目指し、作業達成に有効な複数の行動則ならびに作業知識を統合することにより動作を生成する手法を提案している。

組立作業は環境との接触を伴う作業であるため、接触力に応じてロボットの挙動を修正する力制御により自動化が行われる。力制御を用いて適切に作業を達成するためには、接触力と挙動との関係を定める力制御パラメータを適切に設計する必要があるが、設計すべきパラメータは作業内容や作業環境に大きく依存するため、一般的なささまざまな作業に対してパラメータを系統的に設計する手法は確立されておらず、試行錯誤的な調整が行われているのが現状である。また、複雑形状部品の組立や弾性環境に対する組み付けなどの複雑な組立作業では、作業中に手先の動特性を上手く切り替える、つまり力制御パラメータ値を切り替える必要があるため、切り替え条件をも含めてパラメータを設計する必要があるため、試行錯誤的な調整では膨大な労力が必要となる。組立作業の動作設計を効率的に行う手法の構築が強く望まれている。

第 1 章では、研究の背景と目的を述べた。複雑な組立作業も、挿入動作などの簡単な基本動作を組み合わせることで実現可能であると考えられる。また動作設計を行う際には、類似作業の動作プログラムや作業に対する know-how など有効な行動則や作業知識がさまざま存在する。本論文では、このような行動則および作業知識を統合することにより、組立動作を効率的に生成する手法の構築を目的とした。

第 2 章では、複数行動則の統合手法を提案した。行動則や作業知識は設計者が選定するため、その適用条件が不明確であったり、誤りを含む場合がある。また、作業知識は言葉ベースの know-how など、多様な形式で存在し得る。まず、多様な形式の行動則および作業知識を統一的に取り扱うことができるように、状態行動地図という簡便な表現形式を用いてロボットの動作を表現することとした。状態行動地図は離散化された状態において選択すべき行動を記述したルックアップテーブルであり、行動則は状態に応じた行動として地図上に書き込む。効率的に動作生成を行うため、ロボットの選択できる行動を適用した行動則に則した行動にのみ限定して、対象作業全体の行動方策の探索を行い、同時に適用した行動則に従うだけでは作業に失敗する状態（失敗状態）の選定を行う。行動方策の探索の際、選択した行動に要した時間に応じた負の即時報酬を与えることとし、失敗状態の選定は、失敗状態における状態価値関数の減少を利用して行うこととする。失敗状態における行動則を部分的に修正することで、作業全体として整合性の取れた動作を生成する。

第 3 章では、提案した複数行動則の統合手法を組立作業に適用するため、組立動作を表現する状態・行動空間を定義し、行動則および作業知識の地図上での表現方法について説明した。

組立動作を表現する状態変数としては、ロボットの手先位置・姿勢、反力、手先の動特性といった可観測の情報のみを考慮することを示した。また、行動空間を設定するため、力制御則について概観し、実用性の観点からダンピング制御則を組立作業に有効な力制御則として本論文では取り扱うことを示した。

第 4 章では、有効な行動則を獲得する手法について提案した。時不変の力制御パラメータで実現可能な基本動作については、パラメータの最適化手法を用いることにより適切な行動則を獲得できることを示した。作業効率を考慮したシミュレーションベースの最適化手法を提案し、提案手法を用いて挿入動作および探索動作の行動則を獲得した。それぞれ、作業効率を向上させる有効な行動則を獲得した。また、作業中に力制御パラメータの切り替えが必要な動作については、人の実演データから行動則を抽出する方法を示した。実演データから力制御パラメータの時系列データを推定し、隠れマルコフモデルを用いて組立動作を解析することにより、対象動作を一定の力制御パラメータで達成可能な基本動作に分割する。乾電池装填作業を対象として、上記の手法を用いて複雑な組立動作を複数の基本動作に分割可能であることを示した。

第 5 章では、複数行動則統合手法の有効性を検証するため、クラッチ嵌合作業を対象としてシミュレーション実験を行った。クラッチ嵌合作業は、探索を行いながら一段ずつ歯を嵌め合わせていく作業であり、挿入動作と探索動作から成る。提案手法を用いて、第 4 章で獲得した挿入動作および探索動作を統合した。単純にこれらの行動則を合わせると、クラッチの歯が噛み合っていない状態で挿入が行われ、過大な接触力により作業が失敗に終わる場合が多い。一方、提案手法を用いて生成した動作では、作業状況に応じた適切な行動則が選択され、クラッチプレートの初期配置などの不確定性にも対処しながら滑らかな嵌合が行われることを確認した。提案手法によって、行動則を適用した際に生じる予期せぬ失敗状態を修正し、有効な動作を生成できることを示した。

以上のように、本論文においては、動作生成の際に有効ではあるが、多様な形式で存在する上、誤りや競合が存在し得る複数の行動則および作業知識を統合する手法の提案が行われ、組立作業に対する有効性が示された。これはロボットマニピュレーションの分野において価値ある成果であると言え、工学全般の発展に大きく寄与するものである。

よって本論文は博士（工学）学位請求論文として合格と認められる。