

学位論文題名

次世代生産ロボットのための線状柔軟物の認識・把持技術
に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、日本国内における少子高齢化に伴う労働力の減少、近隣アジア諸国の人的資源を背景とした国際競争に打ち勝っていくためにはロボットシステムによる生産自動化を進める動きがある。加工・組立・搬送などの産業分野において従来の自動化ラインにおける手法を産業用ロボットに移植し、自動化が進められてきた。ロボットによる柔軟物操作は徐々に明らかにされてきており、例えば紙をめくる作業は人間と同じように2つのハンドを紙の両端に近づけて曲げ変形をさせて隙間を作り、その隙間にハンドを差し込むことによってめくる作業を遂行することができるようになる。このようにロボットによる自動化のためには、本来人間作業者のために構成されていた作業環境の明示化・モデル化が必要となっている。特に作業対象物のモデル化について考えるとき、形状変化が把握し易い、例えばCAD/CAMシステム内において扱うことの容易である剛体部品が主な対象となっており、ケーブルやワイヤーハーネス部品あるいは付属するコネクタ部品などは対象外であった。したがって、生産工程におけるケーブルの扱い(回避、把持、移動、コネクタ挿入)をロボットにより自律的に行うことを支援するために、どのような特徴を取り上げるのか、どの程度詳述すればよいのか、どのくらいの精度で記述するのかなどのいわゆる記述仕様について、記述の効率性も含めて考える必要がある。こうした背景に基づき、線状柔軟物であるケーブルをロボットで扱うための形状認識技術において関連する従来の技術について述べる。

関連技術としては、まず3次元形状認識手法について述べ、次に柔軟物について述べる。3次元物体認識の手法としては、代表的なものとしてモデルベースの手法も多く、例えば対象物体のモデルと入力画像との照合においてノイズに強いエッジ部分をモデルにあてはめるモデルベースの手法がある。線状物体の形状について考察する手法も提案されており、従来のCGの分野では、mass-springモデルなどを用いて柔軟物体の形状変化をモデル化することが行われてきた。例えば布のモデル化では、布の伸び、曲げ、せん断などの特性を、正方格子や三角形格子の構造を持つ2次元のmass-springモデルを用いて表現し、そのシミュレーションする手法が提案されている。しかし、これらのモデルのパラメータは手作業による入力が多かったため、パラメータの自動設定する手法も提案されている。コードやケーブルなどの線状物体のモデル化手法として、特徴的な形状である結び、絡みなどの自己接触を伴う変形を表現した手法が提案されている。ロボットシステムでケーブルを扱うためにモーションステレオ法による3次元認識を使い、曲線補間を行ってケーブルを記述する手法も提案されている。線状物体の変形形状を有限要素法を使ってケーブルの変形を記述し、ケーブルの結び変形をシミュレーションした手法も提案されている。また、ロボットシステムによる剛体の対象物体のマニピュレーションについて、特にロボットのピッキング技術であるピンピッキングについて考える時、CADモデルを利用したピンピッキング手法や情報量の増大を招いている3次元認識を行わず、まず最も高くなっている位置を1回の光切断法による探索し、その位置近傍における2次元認識を

行う手法が提案されている。CAD モデルを使用し、物体の変形のマッチングを行って物体の状態に基づく説明木を作成することで、ばら積み状態の物体の一番高い物体を認識する手法も提案されている。同様に CAD モデルを利用してねじや CPU ファンのような PC 部品をばら積み状態からピンピッキングする手法も提案されている。ピンピッキングシステムを要素技術の組み合わせで構築するのではなく、動作計画に有用となる未検出物体が取り得る位置姿勢のパラメタを伝達情報に加えることにより、要素技術間の伝達情報の整合を取ろうとする手法も提案されている。

一方、ロボットシステムによる線状柔軟物のマニピュレーションについて考える時、静力学的に線状柔軟物のどこが把持し易いか、把持が安定するかについてシミュレーションして考察する研究が提案されている。他にもロボットによる線状柔軟物の位置変化に基づく物体の把持、挿入、移動といった生産ラインの仕事についてシミュレーションする手法、ロボットによるひも結び作業をするために、ひもの結び目の状態を3次元空間内の太さのない開曲線と定義してひもの状態を表現し、ひも繰りを行う手法も提案されている。

以上に述べたように、線状柔軟物をロボットシステムで扱うことを目的とした多くの研究がなされてきた。しかし、本研究の対象としているコンパウンドケーブルのような複雑な形状を持つケーブルのモデルは例がなく、形状記述する技術が必要不可欠である。

そこで本論文では第2章にて、コンパウンドケーブルを対象とした提案手法である外縁FCMクラスタリングを用いた詳細な形状記述のための手法とその結果について説明する。この手法は、ケーブル全体を均等に幾つかの部分に分け、その部分内においてケーブルの厚さや長さの情報を認識しながら、幅の情報を高すぎない分解能で認識するために中心および外縁部分を選択的にある程度詳細に記述するものである。この際にケーブルのような任意形状をクラスタリングする手法として、自己組織化特徴マップ (self-organizing map:SOM) や Fuzzy c-means 法といった手法が提案されているが、外縁部分を求めるということには適さないため、外縁部分を求めることに特化した外縁FCMクラスタリングを提案する。最後にこのクラスタリングの最適パラメータ実験、他手法との比較したケーブルの形状記述実験について述べ、提案手法の有効性を示す。

第3章では、第2章で紹介する形状記述手法の高速化をするためのケーブルモデルを提案し、産業応用のためにロボットシステムへ実装し、ケーブルモデルを利用した把持実験の結果について説明する。この手法は、まず微細複雑な形状変動に鈍感な姿勢計測処理の実現とセグメント毎の大まかなケーブルの厚みを認識するため、主成分分析を導入し、ケーブル状態を判定する要素になるケーブルの長さや幅といった情報を認識するために、セグメント毎になかば独立した中心部分と外縁部分の直線からなるケーブルモデルを提案するものである。さらにこのケーブルモデルを利用したロボットシステムにおける最適なケーブル部分の把持位置を推定する最適把持位置推定を提案する。最後に、ケーブルモデルを利用したケーブル形状記述実験、ケーブルの位置・姿勢認識実験、最適把持位置推定によるケーブルの把持実験を行い、提案手法の有効性を示す。

第4章では、結論として本研究において得られた成果をまとめる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 子 俊 一
副 査 教 授 金 井 理
副 査 准教授 田 中 孝 之

学位論文題名

次世代生産ロボットののための線状柔軟物の認識・把持技術 に関する研究

加工・組立・搬送などの産業分野において従来の自動化ラインにおける手法を産業用ロボットに移植し、自動化が進められてきている。ロボットによる柔軟物操作は徐々に明らかにされてきており、例えば紙をめくる作業は人間と同じように2つのハンドを紙の両端に近づけて曲げ変形をさせて隙間を作り、その隙間にハンドを差し込むことによってめくる作業を遂行することができるようになる。このようにロボットによる自動化のためには、本来人間作業者のために構成されていた作業環境の明示化・モデル化が必要となっている。特に作業対象物のモデル化について考えるとき、形状変化が把握し易い、例えばCAD/CAMシステム内において扱うことの容易である剛体部品が主な対象となっており、ケーブルやワイヤーハーネス部品あるいは付属するコネクタ部品などは対象外であった。生産工程におけるケーブルの扱い(回避、把持、移動、コネクタ挿入)をロボットにより自律的に行うことを支援するために、どのような特徴を取り上げるのか、どの程度詳述すればよいのか、どのくらいの精度で記述するのかなどのいわゆる記述仕様について、記述の効率性も含めて考える必要がある。こうした背景に基づき、本論文では線状柔軟物であるケーブルをロボットで扱うための形状認識および把持技術について論じている。

まず、本論文ではコンパウンドケーブルを対象とした提案手法である外縁FCMクラスタリングを用いた詳細な形状記述のために、ケーブル全体を均等に幾つかの部分に分け、その部分内においてケーブルの厚さや長さの情報を認識しながら、幅の情報を高すぎない分解能で認識するために中心および外縁部分を選択的にある程度詳細に記述するアプローチを取っている。この際にケーブルのような任意形状をクラスタリングする手法として、Fuzzy c-means法(FCM)やFuzzy c-Varieties法(FCV)といった手法が提案されているが、外縁部分を求めるということには適さないため、外縁部分を求めることに特化した外縁FCMクラスタリングを提案している。最後にこのクラスタリングの最適パラメータ実験、他手法との比較したケーブルの形状記述実験により提案手法の有効性を確認している。

次に本論文では、高速なケーブルの形状記述手法として多品種に対応可能なケーブルモデルを提案している。微細複雑な形状変動に鈍感な姿勢計測処理の実現とセグメント毎の大まかなケーブルの厚みを認識するため、主成分分析を導入し、ケーブル状態を判定する要素になるケーブルの長さや幅といった情報を認識するために、セグメント毎になかば独

立した中心部分と外縁部分の直線からなるケーブルモデルによりケーブルの形状記述ができることを確認している。さらにこのケーブルモデルを利用したロボットシステムにおける最適なケーブル部分の把持位置を推定する最適把持位置推定を提案し、ケーブルの形状記述実験、ロボットアームを用いた最適把持位置推定によるケーブルの把持実験を行うことで、提案手法の有効性を確認している。

これを要するに、著者は、ロボットビジョン分野においてコンパウンドケーブルを含めたケーブルを対象とした形状認識および把持に関する手法を提案し、実験的にその有効性を明らかにしている。これらの手法は従来にはない新規性の高い手法であり、本研究の成果はケーブルを扱う産業用ロボットの生産技術の発展に寄与するところが大きい。よって著者は、北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。