

# A Model-based Compliant Motion Control of a Manipulator Using Vision and Force Information

著者	南本 高志
号	58
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第004989号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/58880">http://hdl.handle.net/10097/58880</a>

氏名	なんもと たかし 南本高志
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成26年3月26日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) バイオロボティクス専攻
学位論文題目	A Model-based Compliant Motion Control of a Manipulator Using Vision and Force Information
指導教員	東北大学教授 小菅 一弘
論文審査委員	主査 東北大学教授 小菅 一弘 東北大学教授 村田 智 東北大学教授 内山 勝 東北大学教授 橋本 浩一 東北大学准教授 平田 泰久

## 論文内容要旨

This thesis proposes the model-based compliant motion control of a manipulator using vision and force information. Many problems, especially for assembly tasks, can be solved by integrating impedance control with model-based compliant motion definition, visual servoing, and external force coordinate frame tracking. In the framework, the external force coordinate frame, which is attached to the object by model-based compliant motion definition, is adjusted when it moves during the assembly task by the external force coordinate frame tracking. Visual information is also utilized to control the task progress by visual servoing. This is important because the end of the task should be defined as a relative pose of the assembled parts, and not the pose of the manipulator.

In this thesis, a redundant manipulator with seven degrees-of-freedom (DOF) and an offset rotation axis is utilized for experiments. Therefore, before going into details of the control framework, we present an analytical solution for the inverse kinematics of the redundant manipulator. The proposed solution, enables the manipulator to freely move in a task space while avoiding obstacles, singularities, joint limits, etc., and is important for the proposed control framework that is presented in this thesis to be applied in practice.

Here, we provide a model for the redundant manipulator and introduce its self-motion. Considering the geometric symmetry, 16 sets of manipulator joint angles are obtained at once. The avoidance of singularities and obstacles is illustrated by the simulation results. Besides, the applicability of the proposed solution to an actual redundant manipulator is validated through several experiments.

The proposed control framework is validated by first considering the 3-DOF case. To simplify the control framework, a simple visual tracking algorithm with a single camera is used, and only translational motion is considered. According to the experimental results, the proposed control framework is effective for assembling

two parts such as the connector insertion task, in which the compliant motion should be designed according to the geometric structure of the assembled part, such as the shape of a socket. During the insertion task, the progress is controlled by visual servoing and is finished when the relative pose of the assembled parts is the same as the reference pose that is prepared in advance.

In the proposed control framework, visual tracking plays an important role because it is utilized to adjust the external force coordinate frame, which is attached to the object by a model-based compliant motion definition, even if the object moves during the assembly task. Besides, the result of the visual tracking is used to generate the desired pose of the manipulator for the object to be the same as the reference pose, which is depicted in the reference image by position-based visual servoing. Thus, a 3D object-tracking algorithm based on virtual visual servoing (VVS) with a stereo camera is proposed. Theoretically, the 3D position and orientation of the object can be calculated using one camera. However, the texture sensitivity in the optical axis direction and two rotational motions (pan and tilt) is not very high; therefore, we utilize the stereo trigonometry and weighted least squares. For the stereo camera, the texture of the object is generated by computer graphics (CG) rendered with the computer-aided design (CAD) model. The camera image of a real object and the CG-rendered image are aligned virtually by a visual servoing, for which the control law is to minimize the sum of square difference (SSD). The best-matched position and orientation will give an estimate of the object position parameters. By using a stereo setup, the maximum likelihood estimation for two cameras can be obtained by the weighted least squares estimation. In this thesis, several estimation methods that are employed for position estimation and orientation estimation are evaluated separately. Then, we propose a hybrid method that consists of the best pair of estimation methods. The simulation results clearly show the superiority of the hybrid method for both position and orientation accuracy.

Then, we present a high-speed and high-accuracy visual servoing system. The algorithm has important improvements that are for use in practice, including a consideration of industrial position controller, and real-time implementation issues with non-real-time image processing hardware. To resolve this issue, visual servoing is implemented by the position-based approach in which the proposed tracking algorithm is applied for object pose estimation. The operation speed is enhanced using graphic processing unit (GPU) acceleration. In the acceleration scheme, squared differences are calculated in parallel with each pixel, and the reduction summation is applied twice to sum up the squared differences considering bank conflicts, loop unrolling, and the synchronization of threads. In addition to the GPU acceleration, we propose an online trajectory generator that can accommodate the variable feedback cycle of the visual servoing and the fixed

feedback cycle of the position control. Due to these improvements, a 10-ms feedback cycle was realized, and several experimental results illustrate the effectiveness of the proposed framework.

Next, the model-based compliant motion control of a manipulator using vision and force information is extended to a 6-DOF case. To do so, we propose external force coordinate frame tracking to adjust the definition of compliant motion depending on the object pose. The external force estimation is used to calculate forces and moments from the sensor outputs in the external force coordinate frame. Then, the control framework of impedance control and visual servoing are presented. Thus, to implement the control framework to an actual manipulator system, we propose noise reduction and synchronization between image processing and impedance control. Experimental results show that the control framework works correctly and enables the completion of assembly tasks, despite environmental changes. In addition, the design of compliant motion by defining the compliance center, which equals the origin of the external force coordinate system in the control framework, is important to complete assembly tasks.

Finally, we summarize the contributions made in this thesis, and discuss several future works that will make the proposed control framework more practical and user-friendly.

# 論文審査結果の要旨

産業用ロボットが開発されてから約半世紀が経過し、多数のロボットが工場で使われるようになった。しかし、現在のロボットは、作業対象を固定する専用の治具や、特定の作業に対して設計された専用のエンドエフェクタを用いないと作業ができないという点においては、50年前からほとんど進歩していない。本研究は、特殊な治具やエンドエフェクタを用いずに、汎用ハンドのみを用いて複数の組み立て作業を実現することを目指し、視覚と力覚を利用したマニピュレータの新しい制御システムを提案するもので、全編7章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的および構成について述べている。

第2章では、専用の治具やハンドを用いずに作業を行う際に必要となる、7自由度マニピュレータの逆運動学の解析解について議論している。マニピュレータの根元の3つの関節の回転軸が1点で交わらない7自由度マニピュレータの逆運動学問題を、オフセット角という概念を新たに導入することにより、解析解を求めることに世界で初めて成功したもので、一般的な構造の7自由度マニピュレータの実用化にとって、有用な成果である。

第3章では、視覚情報と力覚情報に基づくマニピュレータの新しい制御システムの問題を提案し、3次元の物体の組み付け問題に適用し、その有効性を示している。提案する手法は、CADモデルに基づくビジュアルトラッキングシステムと、CADモデルに基づき制御座標系が設定されるインピーダンス制御システムとを統合することによって実現するもので、重要な成果である。

第4章は、CADモデルとステレオビジョンを用いた、6次元高精度ビジュアルトラッキングシステムを提案している。6次元高精度のトラッキングを実現するためには、位置のトラッキング誤差と姿勢のトラッキング誤差の最小化を行う必要がある。様々なトラッキング誤差最小化手法を比較検討し、位置と姿勢の高精度なビジュアルトラッキングが可能なトラッキングシステムを開発している。これは、重要な知見である。

第5章は、前章で提案した6次元高精度ビジュアルトラッキングシステムを用いた、ビジュアルサーボシステムの高速化を目的としている。前章のアルゴリズムを並列化し、GPUを用いて実装することによって、ステレオビジョンを用いた6次元高精度ビジュアルトラッキングシステムが、実時間で実行できることを示している。これは、6次元ビジュアルサーボシステムの実用化に向けた有用な成果である。

第6章は、以上の成果に基づき、CADモデルとステレオビジョンを用いた、視覚情報と力覚情報に基づくマニピュレータの新しい制御システムを提案し、7自由度マニピュレータに実装し、物体の組み立て作業実験を行いその有効性を示している。これは、視覚と力覚を用いることによって、汎用ハンドを用いた物体の高精度の組み立て作業が可能なことを世界で初めて示したもので、重要な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、汎用ハンドを用いた物体の組み立て作業実現を目的として、CADモデルを用いた、視覚情報と力覚情報に基づくマニピュレータの新しいコンプライアントモーション制御システムを提案し、その有効性を示したもので、バイオロボティクスおよび機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。