

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	宇宙飛行士の船外作業能力拡張を目的とする 装着型マニピュレータシステムの研究
Title(English)	Development and Analysis of a Wearable Manipulator System Enhancing Astronaut 's Extravehicular Working Capability
著者(和文)	武井悠人
Author(English)	Yuto Takei
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9776号, 授与年月日:2015年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小田 光茂,大熊 政明,松永 三郎,鈴森 康一,野田 篤司,齋藤 滋規
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9776号, Conferred date:2015/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

Tokyo Institute of Technology
Graduate School of Science and Engineering



Development and Analysis of a Wearable Manipulator System

Enhancing Astronaut's Extravehicular Working Capability

宇宙飛行士の船外作業能力拡張を目的とする
装着型マニピュレータシステムの研究

Supervisors
指導教官

Prof. Mitsushige Oda
小田 光茂 教授

Associate Prof. Atsushi Noda
野田 篤司 連携准教授

A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy (Engineering)

Department of Mechanical and Aerospace Engineering

by

Yuto Takei

February 17, 2015

Development and Analysis of a Wearable Manipulator System Enhancing Astronaut's Extravehicular Working Capability

Yuto Takei

Oda Laboratory, Department of Mechanical and Aerospace Engineering

Tokyo Institute of Technology

Phone & FAX: 03-5734-2644

Address: I1-554, 2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo, 152-8552, JAPAN

Email: takei@srobot.mes.titech.ac.jp

©2015 by Yuto Takei. All rights reserved

Abstract

Extravehicular Activity (EVA), which is essential for maintaining manned space facility, requires astronauts (EV crew) to work outside the habitable module taking various risks due to the environment and its long duration. While it is partly supported by existing robotic systems, still complicated and contingency tasks are handled by EV crews. Therefore this research first claims that enhancing astronaut's working capability is essential for further improvement of EVA efficiency and safety, to propose a novel WEARABLE MANIPULATOR SYSTEM in order to provide robotic support in proximity of an EV crew.

Chapter1 introduces the background, motivation, related works, and objectives of this research.

Chapter2 presents above system which includes "a space suit wearable robotic arm" and "a detachable wrist interface mechanism suitable for EVA support in proximity" as 2 technological elements newly proposed. In addition to the conceptual design, expected dynamic models and formulas applicable for the system are prepared for the dynamic analysis reported in Chapter6.

Chapter3 proposes a new wrist interface called Detachable Wrist Interface Mechanism (DWIM) which is suitable for EVA support in proximity. After describing results of requirement analysis and state-of-the-art survey, DWIM is proposed and its novelties in concept and mechanical design are described. Then validity of DWIM was verified as the results of functional testing using a prototype model.

Chapter4 focuses on reporting the development results of a wearable manipulator ground prototype and the results of functional and conceptual verification test using the prototype.

Chapter5 aims to validate the effectiveness of proposed concept and extracts feedbacks toward a practical design through operation tests using the prototype. Operability and work capability were evaluated objectively by quantitative measures and subjectively by rating/comments from operators.

Chapter6 proposes design strategies toward a practical model based on the validation results from previous chapter and dynamic analysis results obtained in this chapter. In addition to the properties prepared for the analysis, an Optimum Work Envelope is introduced as a condition unique to the proposed concept. As a result, total 14 design strategies from 5 topics are extracted toward future practical design.

Chapter7 summarizes the outcomes and results of this study as conclusions.

論文概要

国際宇宙ステーションの組み立て、運用、保守に代表されるように、宇宙活動の拡大に伴い宇宙飛行士の船外活動（EVA：Extravehicular Activity）が増加している。船外活動をする宇宙飛行士（EV クルー）は極限環境である曝露空間において様々なリスク（微小デブリの衝突、放射線、熱真空環境など）に晒されることに加え、一般に複数人で最長 8 時間行われる EVA は宇宙飛行士の長時間労働に伴いコストも大きい。そのためこれまで複数の EVA 支援ロボットシステムによって一部作業の代替や EV クルーの支援などが実現されているが、複雑かつ突発的な作業は依然として宇宙飛行士にしか対処できない。

このような状況に対し本論文は EVA における生産性と安全性の更なる向上には宇宙飛行士自身の船外作業能力を向上させることが不可欠であると指摘し、“Development and Analysis of a Wearable Manipulator System Enhancing Astronaut’s Extravehicular Working Capability（宇宙飛行士の船外作業能力拡張を目的とする装着型マニピュレータシステムの研究）”としてロボットによる新たな EVA 支援コンセプト及び要素技術の提案と開発、検証を通してそれらの有効性を評価している。本論文は以下の 7 章により構成される。

第 1 章（Introduction：研究背景）では上記に示す通り宇宙活動の拡大に伴い増大する船外作業要求に対して、小型かつ器用さを兼ね備えた次世代型 EVA 支援ロボットシステムによる宇宙飛行士の船外作業の生産性・安全性の向上が期待されていることを述べ、関連研究と本研究の目的を示している。

第 2 章（A Novel Wearable Manipulator System for EVA Support：EVA 支援を目的とした装着型マニピュレータシステムの提案）では初めに、ロボットシステムによる EV クルー近傍での支援（以降、クルー近傍 EVA 支援）を通じた宇宙飛行士の作業能力拡張というアプローチが必要であると指摘し、次の 2 点の新規技術要素「宇宙服装着型ロボットアーム」及び「クルー近傍 EVA 支援に適した手首部インターフェース」を含む上記システムを提案し、これまで検討されてきた次世代型 EVA 支援ロボットや従来のインターフェース装置との差別化を含む概念検討結果を示している。また、本研究で提案するシステムの動力学解析に必要な力学モデルの仮定と理論式を展開している。

第 3 章（Development of Detachable Wrist Interface Mechanism (DWIM)：着脱可能手首部インターフェース機構の開発）では、従来の宇宙用ロボットアーム性能や EVA 規定を源泉と

した要求分析を行い、クルー近傍 EVA 支援に求められる数値要求として一般化している。そして現状技術調査として従来のインターフェース装置の分類・整理を行った上で、クルー近傍 EVA 支援に適合する新しい手首部インターフェースとして DWIM を提案している。その概念上及び機構上の新規性について述べた後に開発した試作機の概要とその機能確認試験による主要機能の評価を行い、要求事項の成立性と設計の妥当性を確認した。

第 4 章 (Development of a Wearable Manipulator Ground Prototype : 装着型マニピュレータ地上用試作機の開発) は本提案コンセプトの検証を目的とする試作機の開発と試験に焦点を当てており、はじめに試作の目的と範囲を定義する。クルー近傍 EVA 支援に適合する機能要求と地上検証可能な作業要求を定め、開発結果について述べている。そして要求検証試験を通して試作目的の達成度を定性的に評価し、提案システムの成立性を確認している。

第 5 章 (Validation of the Proposed Concept through Operation Tests : 操作試験を通じた提案コンセプトの検証) では提案コンセプトの有効性評価と実用化へ向けた知見の獲得を目的として、前述の試作機を模擬的に装着した複数の被験者による操作試験とその結果について述べている。被験者は一般的な操作器による操作と直接接触によるアーム力覚を通じた操作を含む複数の方法によりマニピュレータ先端の繰返し動作を行い、その操作性及び作業性を操作方法ごとに客観的な定量評価と被験者による主観的なレーティング・コメント評価により検証している。以上の結果より提案コンセプトの有効性を示すと共に、実用化へ向けた設計上のフィードバックに加え、本提案システム固有の課題を抽出している。

第 6 章 (Design Strategy toward a Practical Wearable Manipulator System : 装着型マニピュレータ実利用へ向けた設計戦略) では前章の操作試験結果に加え本章にて実施する動力学解析結果に基づき、実利用可能な装着型マニピュレータシステムの実現へ向けた設計戦略の策定を目的としている。初めに試作機をベースとしたマニピュレータの幾何・運動学・動力学特性の定義による解析準備に加え、本提案システムに固有の解析条件として EV クルーの最適作業領域 (Optimum Work Envelope : OWE) を考慮するべきであると指摘している。解析では OWE 内におけるアーム先端動作と第 2 章で定式化したベース干渉力制御の「2 重タスク」に関するケーススタディを行い、結果としてその有効性と限界に加え現状アーム構成の課題について述べている。以上の解析結果と第 5 章の結果を踏まえ、設計戦略として 5 つのトピックに関する計 14 の方針を策定し、本提案システムの実用化へ向けた道筋を明らかにした。

第 7 章 (Conclusions : 結論) では本研究の成果を要約している。