

	のうみまさひろ
氏名	能見 公博
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)航空宇宙工学専攻
学位論文題目	テザー宇宙ロボットの空間移動と手先位置姿勢制御
指導教官	東北大学教授 内山 勝
論文審査委員	主査 東北大学教授 内山 勝 東北大学教授 パーク・チョル 東北大学教授 小菅 一弘 東北大学教授 猪岡 光 新潟大学教授 ドウラゴミル・ネンチェフ

論文内容要旨

第1章 序論

本章では、本研究の目的を示し、研究の背景について述べ、論文の構成と概要について説明する。

本研究の目的は、「テザーロボットシステム」の運用に必要な基本的な制御法を確立することである。テザーロボットシステムとは、大型母船と小型ロボットをテザーにより連結した新しい宇宙機である。テザーに連結されたロボットを「テザーロボット」と呼ぶ。

近年、宇宙開発において、軌道上作業を行うため、宇宙空間に浮遊するロボットが注目を集めている。また、「テザー」いわゆる「ひも」は軽量かつ収納性がよいため、宇宙空間においての利用が期待されている。テザーロボットは、推進エネルギーを用いず、テザー張力により宇宙空間を移動でき、母船と離れた位置の対象物に対し作業を行うことができる。その基本的な移動方法は、二通り考えられる。一つは、宇宙ロボットの新しい移動方法である「キャストイング」である。それは、母船搭載マニピュレータを用いてテザーロボットを投げる方法である。もう一つは、従来のテザー伸展技術を利用した移動方法である。さらに、外力が作用した場合、テザー張力を利用した制御が可能であると期待できる。

第2章では、システムの定式化を行ない、必要な技術を明確にする。第3章では、宇宙ロボットの移動に関する新しい手法であるキャストイングについて論ずる。第4章では、軌道上の重力および遠心力とテザー張力による平衡状態におけるテザーロボットの手先位置姿勢制御について論ずる。第5章では、テザーロボットに対する外乱を補償する制御法について論ずる。第6章では、第2章から第5章までの内容のまとめ、および今後の課題を簡単に述べる。

第2章 テザーロボットシステム

テザーロボットシステムを用いることが有効であるミッション例として、宇宙構造物の建設援助・テザーを利用した宇宙空間輸送・衛星サービス・月惑星への軟着陸支援などが考えられる。システムの定式化を行い、その工学的特徴を明確にすると、次の技術が必要となることがわかる。

(i) テザーロボットの宇宙空間移動技術

- 重力を利用したテザー張力制御による移動方法
- 軌道修正制御を用いたキャストイングによる移動方法(新技術)

(ii) テザーロボットの手先位置姿勢制御技術

- テザー張力が作用する状態における手先位置姿勢制御技術(新技術)

- テザー張力が作用しない状態における手先位置姿勢制御技術

(iii) テザーロボットの外乱補償に関する制御技術

- テザー張力を利用した外乱補償に関する制御技術（新技術）
- テザー張力が作用しない状態における外乱補償に関する制御技術

ここで、新技術と記した技術は、従来の宇宙ロボットと異なる新しい手法が必要となる。以降、各章において、新技術に関する基礎的な制御法の考案、およびシミュレーションによる検証を行なう。

第 3 章 キャスティングによる宇宙空間移動

キャストリングは図 1 に示す三つのフェーズから構成され、次の通り行われる。

フェーズ (1): 母船搭載マニピュレータを動かし、テザーロボットに目標地点方向の速度を与える。

フェーズ (2): 母船搭載マニピュレータの手先より、テザーロボットを切り離す。

フェーズ (3): 母船搭載マニピュレータの手先位置の動きにより、適当なテザー張力をテザーロボットに作用させて目標地点に到達させる。

キャストリングの課題は、テザーロボットを目標地点へ正確に到達させることである。そこで、フェーズ (3)

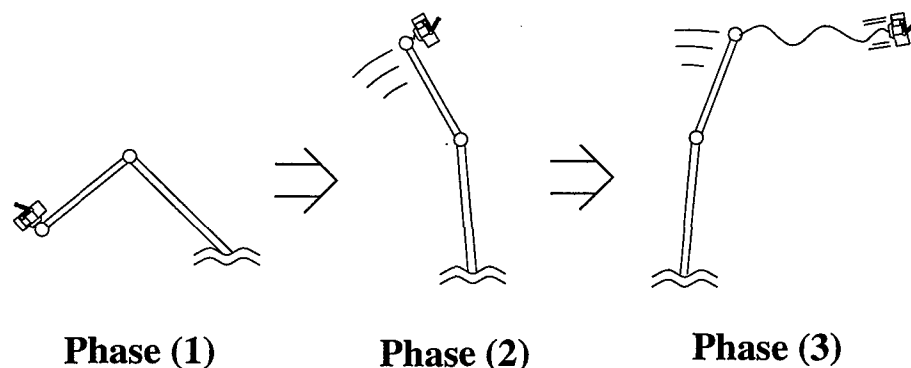


Fig. 1: Casting strategy

におけるテザーロボットの移動軌道修正制御法を提案する。その制御法の有効性は、母船搭載マニピュレータのパラメータおよび制御ゲインに大きく依存する。本章では、キャストリングのシミュレーションを行い、その結果より、テザーロボットが母船から離れる時点での速度が、到達地点の精度に大きく影響を及ぼすことを示し、さらに、提案した制御法を用いることにより目標地点に正確に到達することを確認する。

第 4 章 平衡点における手先位置姿勢制御

テザー先端に取り付けられる物体が質点と仮定できる場合、安定な平衡点は軌道中心とテザー伸展位置を結ぶ直線上であることがすでに知られている。テザーロボット重心がその安定な平衡点を維持するためには、さらにテザー連結位置がテザーロボット重心とテザー伸展位置を結ぶ直線上に位置することが必要である。このテザー連結位置に関する条件を考慮した制御法を用いることにより、安定な平衡状態を維持しつつ、テザーロボットを動かすことが可能となる。その制御法を用いるためには、テザーロボットに冗長自由度を必要とする。図 2 に手先位置制御、図 3 に手先姿勢制御に関して、母船より 1000 [m] 離れた地点にテザーロボットが位置

する状態でのシミュレーション結果を示す。これらの図において、テザーは z 軸に沿って伸展されており、テザー連結位置はその伸展方向に沿って動いていることが確認できる。

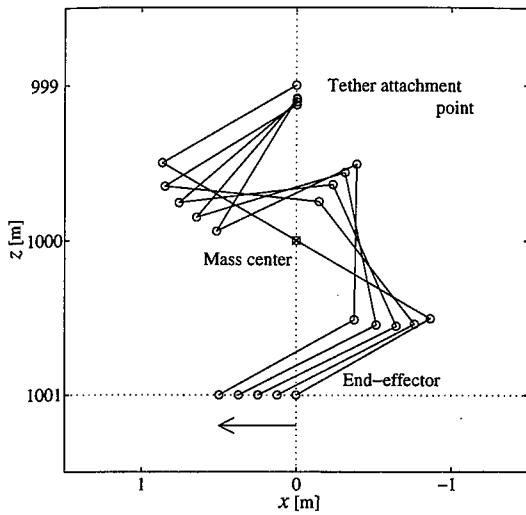


Fig. 2: End-effector position control

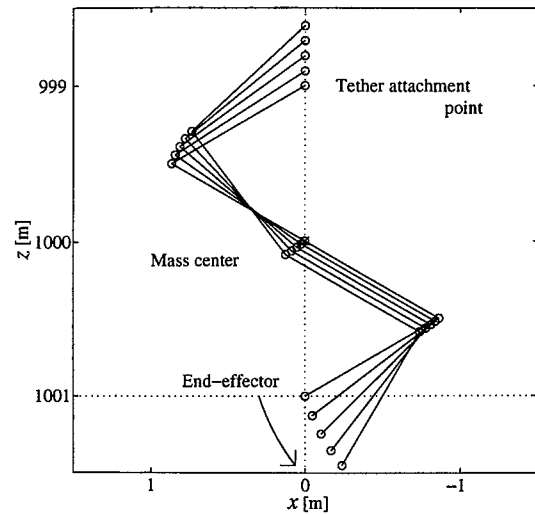


Fig. 3: End-effector attitude control

第 5 章 テザーロボットの外乱補償

本章では、テザーロボットに作用する外乱に対する補償制御について論ずる。空間浮遊型宇宙ロボットでは、外乱に起因する運動を補償するために、推進装置・リアクションホイールなどが必要である。ここでは、テザーロボットシステムの利点を活用し、テザー張力を積極的に利用することによる外乱補償を考える。

テザーロボットの運動を制御するとき、その運動量が重要となる。テザーロボットの並進運動量は、重心の運動量により表すことができる。これより並進運動量は、テザーロボットの移動に関する制御技術により、補償することができる。また、角運動量は重心回りの角運動量により表すことができる。そして、テザー張力によりテザーロボットに作用する回転力は、テザー連結位置を操作することによりその大きさを制御することができる。この性質を利用して、角運動量を補償することができる。提案した手法を用いたシミュレーションの結果より、キャスティングでは角運動量制御が、テザーロボット重心の移動軌道に影響を及ぼすこと、重力を利用したテザー張力制御を用いた場合、角運動量制御による回転運動の補償に比較して、並進運動の補償には時間を要することが確認できる。

第 6 章 結論と今後の課題

第 2 章から第 5 章までの内容をまとめ、本論文を総括する。さらに、テザーロボットシステムの実用化において、テザーとともに推進装置・リアクションホイールを併用することが現実的であること、テザーよりテザーロボットを切り離すことなどが考えられ、これらを考慮してハードウェアの設計を行なうことが今後の課題となる。

審査結果の要旨

宇宙開発における軌道上作業が必要不可欠となりつつある今日において、宇宙ロボットは、そのキーテクノロジーのひとつとして注目されている。一方、テザーは、軽量かつ収納性が良いことより、古くから、宇宙空間における利用が期待されていた。本論文は、これらの宇宙システムの利点を取り入れ、母船より伸展されたテザー先端に宇宙ロボットを取り付けた新しい宇宙機、テザーロボットシステムを提案し、これに関する研究成果をまとめたものであり、全編6章よりなる。

第1章は、序論である。

第2章は、テザーロボットシステムの定式化を行ない、システムに必要な技術をまとめている。そのなかで、キャスティングによる移動技術、テザー張力が作用する状態における手先位置姿勢制御技術、テザー張力を利用した外乱補償制御技術の三つが、新しい技術として重要であることを示している。

第3章では、キャスティングによるロボットの移動技術について論じている。母船搭載マニピュレータによりテザーロボットを投げ、テザー張力を作用させることにより目標地点で停止させるキャスティング法を説明し、移動時における軌道修正制御則の設計および評価を行っている。

第4章では、重力、遠心力、およびテザー張力が平衡するテザーロボットの安定点において、その手先位置姿勢を制御する問題を論じている。そして、安定状態を維持するために必要となるテザー連結位置の拘束条件を考慮した新しい制御法を提案している。これは、注目される成果である。さらに、提案した制御法を用いて手先位置制御・手先姿勢制御、それぞれについてシミュレーションを行い、有効性を検証している。

第5章では、テザーロボットに作用する外乱の補償制御について論じている。すなわち、テザー張力が作用する状態において、テザー張力を積極的に利用することにより、ロボットの並進運動量および角運動量を制御する方法を提案し、その制御系を設計している。そして、シミュレーションにより、その有効性を示している。

第6章は、結論である。

以上要するに本論文は、新しい宇宙機であるテザーロボットシステムを提案し、その特徴を明確にし、このシステムに必要なとなる制御技術に関して、基礎理論を研究したもので、航空宇宙工学およびロボット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。