

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 25 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820081

研究課題名(和文)車両搭載型クレーン間のテザー懸垂による空間移動装置を用いた広域作業システムの構築

研究課題名(英文)Development of Far-Reach Tethered Working Tool between Mobile Crane Platforms

研究代表者

程島 竜一 (HODOSHIMA, Ryuichi)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：10432006

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：労働力の省力化という観点から広大な空間を作業する機械システムとして、車両などの移動機械を用いた自動走行システムや複数のテザーによる懸垂装置を用いた作業システムが開発され実用化されてきた。本研究ではこれら従来システムを発展させ、広大な作業環境領域を有し、かつ多様な作業を遂行可能な広域作業ロボットシステムの基盤構築を目指した。

具体的には、(1)並走する2台の車両搭載型クレーン間に2本のテザーをループ状に架け渡し、そのテザーにより懸垂される移動装置を用いた広域作業システムの試作、(2)その試作システムを用いたアプリケーションの一つである広域草刈システムの模擬実験を行った。

研究成果の概要(英文)：Automatic running vehicle system and tether-suspended tool have been developed for working robot system in a large area to reduce human work load.

In this study, I aimed to construct a foundation of far-reach tethered working robot tool by improving the conventional working robot system in a large area. The proposed working robot tool can conduct traveling or work in a wide range and perform various works. I tackled this issue by focusing on multiple mobile cranes for traveling and a parallel manipulator using multi-tether drive system for work.

My main achievements were twofold: 1) I developed the prototype of far-reach tethered working robot tool by an end-effector controlled by two tethers stretched in loop shape between two mobile cranes. 2) I verified the validity of a grass cutter system that is one of the applications of far-reach tethered working robot tool.

研究分野：ロボット工学

 キーワード：テザーロボット 広域作業システム パラレルテザー制御 車両協調走行制御 テザー懸垂移動装置
機構設計

1. 研究開始当初の背景

(1) 広大な土地における作業を省力化する目的でロボットを導入する試みが長年続けられている。このような広域作業システムの例としては、GPS を用いた農業用自動走行トラクタ、山岳地などの急傾斜地における林業用のテザーを用いた架線集材システム、マルチコプターによる極限環境下でのモニタリング作業が挙げられる。しかしながら、自律走行車両やマルチコプターといった広域作業システムは、作業を行うための移動に多大な時間を要したり、環境によっては移動そのものが困難になったりする場合がある。

(2) 一方、移動機構を用いない広域作業システムとして、複数のテザーを並列に繋ぐことにより対象物を広範囲に移動させる平行テザー懸垂装置が研究されている。この機構の特徴として、制御対象の著しい軽量化、他の機構よりも高い可搬重量、移動範囲が大きい、高速性などが挙げられる。実際に過去に数多くの平行テザー懸垂装置が提案されて、実用化されている例もある。

(3) 研究代表者はテザーによる移動作業ロボットシステムとその応用に関する系統的な研究開発を行ってきており、それらの機構設計、運動制御、センサ技術に関して知見を重ねてきた。そこで、テザー移動ロボット技術と平行テザー懸垂装置の技術を統合し、従来システムを発展させた新しい広域作業システムを提案し、実用化のための基礎研究を行うこととした。

2. 研究の目的

(1) 提案する屋外広域作業システムの概念図を図 1 に示す。テザー懸垂移動装置は、2 台のウィンチ機構により車両間を上下左右に移動し走行車両自体も移動するため、空間を立体的に移動することが可能である。以下の各構成要素により、屋外広域作業システムを実際に構築し基礎研究を行うことを本研究の目的とする。

① テザー駆動システム：片側の車両に 2 台のテザー駆動のためのウィンチを同軸となるよう配置する。2 本のテザーにより懸垂装置を上下左右に移動させられる。一方、ウィンチの出力をクラッチ機構により連結すると、2 本のワイヤを 1 本の繋がった擬似的な閉ループ構造に切り替えられる。これにより、従来の平行テザーシステムで問題となっていた負のエネルギーの発生 (図 2) を解消し、移動ロボットシステムでは重要な課題の一つであるエネルギー効率の向上を図る。

② 並走する 2 台の車両：並走する 2 台の車両間に 2 本のテザーを張り、その間をテザー懸垂移動装置が自由に移動する。なおテザー懸垂移動装置が移動する平面と車両の移動

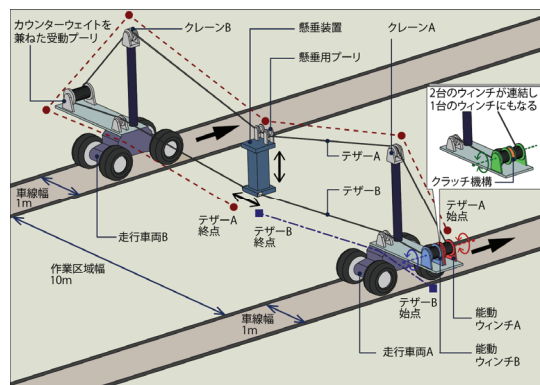


図 1 提案する広域作業システムの概念

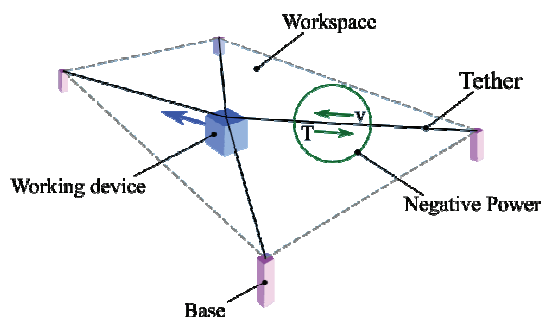


図 2 従来の平行テザー懸垂装置の課題

方向が直交しているため、テザー懸垂移動装置は三次元空間を自由に移動できることになる。

③ テザー懸垂移動装置：テザーで懸垂され車両間を移動する。用途毎に装置先端の作業機を交換することで、様々な作業を行うことが可能である。応用可能な広域作業として除草作業や農薬散布、トンネルの劣化度調査、地形の高速な測量計測などを検討している。

(2) 新しい軟体・剛体連成システムの動力学解析、およびセンサ誤差や、外乱にロバストなシステムの制御方法の構築などを理論的・実験的に行う。具体的には以下の項目を明らかにする。

① テザー (軟体) と懸垂移動装置・車両 (剛体) が混在する系の逆運動学や逆動力学を解析する。同時に懸垂移動装置がテザーにより車両間を移動するために必要な運動軌道を計画する。

② テザーを固定する端部が常に移動するため、従来報告されてきたテザー懸垂移動装置の制御手法ではなく、懸垂移動装置を制御する手法を新たに開発する。

③ ウィンチ機構やクレーンの設計開発などを行い、実際の試作を通して機構設計法をまとめ上げる。

④ テザーの張力を保つため走行車両が一定の間隔を保ちながら走行する必要がある。そ

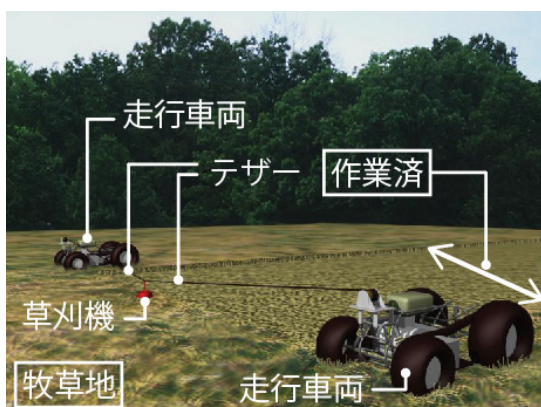


図3 テザーロボットの活用例

ここでリーダー・フォロワ型制御による車両の協調走行制御器の開発を行う。

⑤ ロバストな制御系を実現するため、計画軌道内でテザー懸垂装置の揺動を防ぐ手法を検討する。

⑥ 牧草地の草刈り(図3)やトンネル内の劣化度調査など、工学への応用例を試作システムにより検証する。

3. 研究の方法

(1) テザー(軟体)および車両・懸垂移動装置(剛体)が混在する系の動力学解析と運動軌道の計画を行う。提案する新しいテザーシステムに関する動力学の解明や懸垂移動装置の新たな制御手法を開発し、計算機シミュレーションやスケールモデルによる予備実験で検証を行う。

① 逆動力学解析および運動軌道生成法の計画: システムの逆運動学・逆動力学解析を行い、その計算により懸垂移動装置の運動軌道生成法を検討する。また計算機シミュレーションにより、安定して作業できる領域の算出、システムのエネルギー消費量、車両加減速による懸垂装置の挙動などに関して定量的な評価を行う。

② スケールモデルを用いたテザー懸垂システムの前準備検証: 動力学シミュレーションの結果を実験により予備的に検証するために、テザー懸垂移動装置に関するスケールモデルを製作して検証実験を行う。

(2) テザー懸垂移動装置の駆動手法の開発: 従来はテザー長を制御するために懸垂移動装置などの位置情報を取得する必要があったが、本提案システムは全体が移動するため懸垂移動装置の位置情報の取得が困難である。そこで速度変換行列(ヤコビ行列)やセンサ情報により、新たな懸垂移動装置の位置制御手法を構築する。

(3) 提案テザーシステムの試作および開発による実用機の基盤となる機構設計論の構

築: 本提案システムに関する解析結果を実験で検証するために、(1) および (2) の結果を基に試作システムを開発する。

① 小型・軽量でテザーの張力や長さが測定可能なウィンチ機構およびクラッチ機構: 小型・軽量でテザーの張力・放出長さ測定が可能な2台のウィンチ機構とクラッチ機構を開発する。NC工作機械(現有設備)と精密加工を得意とする加工業者の協力により、試作開発を行う。

② 自身の位置や姿勢が測定可能な懸垂移動装置: 姿勢センサなどを使用し、自身の姿勢やテザー張力を計測可能な懸垂移動装置を開発する。①と同様に、NC工作機械(現有設備)と加工業者を利用して開発を行う。

③ 車両搭載型クレーン: 走行車に製作予定のクレーンを搭載することで、車両搭載型クレーンを試作開発する。提案システムの基本的な性能を確認するための固定式ブーム型クレーンと路面の高低差への対応など発展的な目的のための可動式ブーム型クレーンを検討する。

(4) 車両の協調走行制御器の開発: テザーで連結された2台の車両を安定的に並走させるために、センサ情報を利用したリーダー・フォロワ型協調走行制御器を開発する。

(5) ロバストな懸垂移動装置の制振制御器: 提案するシステムは、テザーという軟体を含んでいるため外乱により懸垂移動装置が振動しシステムが不安定になりやすい。そこでシステム安定化のために、周波数と時間に関して最適化計算したパラメータによるノッチフィルタを組み込んだ制振制御器を開発する。当初の計画通りに進まない時には、さらにInput Shaping法、負荷トルクオブザーバを用いた方法の二つを検討し、良好な結果が得られた制御器を採用する。

(6) 農業や産業への広域作業システムの応用例の構築と検証: 提案システムの農業や産業への応用を模索することを目的とし、市場を調査し応用例ごとに模擬試験を行う。まずは最も有望だと考えている、高速回転する円盤カッターを用いた牧場の草刈りシステムを試す。

4. 研究成果

(1) 逆動力学の解析および懸垂移動装置の運動軌道生成法の計画: 図4のように解析モデルを設定し、逆運動学および逆動力学を解析した。同時に二次元に限定してではあるが、テザーが張力を保てる領域、エネルギー消費量の変化などを計算機シミュレーションにより明らかにした。

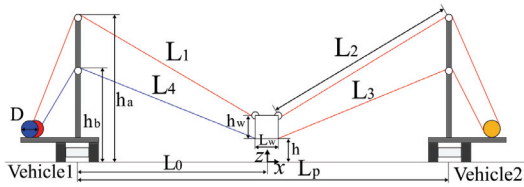


図4 提案システムの解析モデル

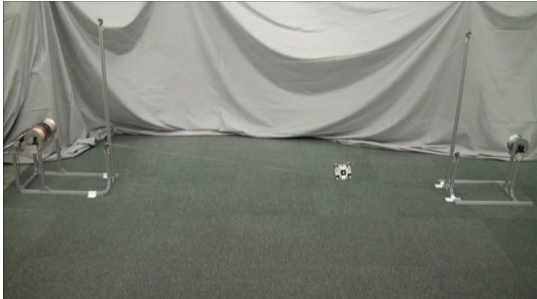


図5 テザー懸垂移動装置のスケールモデル

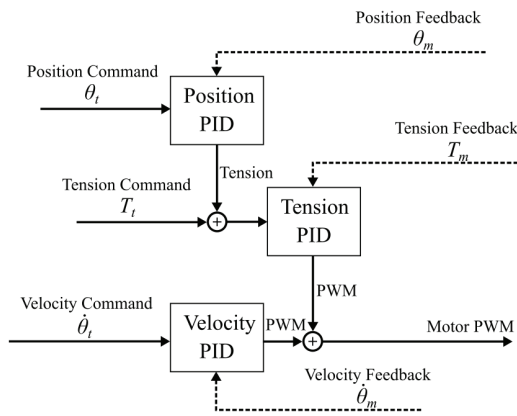


図6 開発したウィンチ機構のサーボ系

また懸垂移動装置の運動軌道については、懸垂同装置は車両間を往復運動するケースが多いと予想し、単振動を基本とした運動軌道を計画した。次に、図5に示すテザー懸垂移動装置のスケールモデルを作成し、解析結果を実験により予備的に検証した。主に懸垂移動装置の作業領域およびテザー張力とウィンチ機構トルクの関係をそれぞれ検証し、解析結果の妥当性を確認した。

(2) テザー懸垂移動装置の駆動手法の開発：当初は速度変換行列（ヤコビ行列）による位置制御手法を予定していたが、実際はヤコビ行列による誤差蓄積の解消が困難であることが判明したので、テザーの放出角度を測定しフィードバックすることで、懸垂移動装置の位置決め精度を向上することにした。単純な方法であるが、実験により位置決め精度の向上が確認できた。またウィンチ機構の駆動制御で最も基礎的な部分であるサーボ系を図6のようにカスケード構造にすることで安定化を図った。

(3) 提案テザーシステムの試作および開発

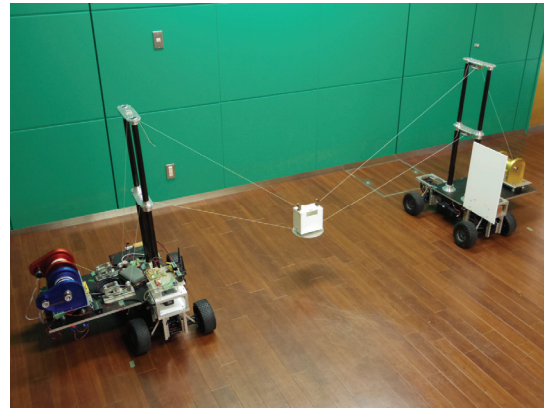


図7 開発した試作システム

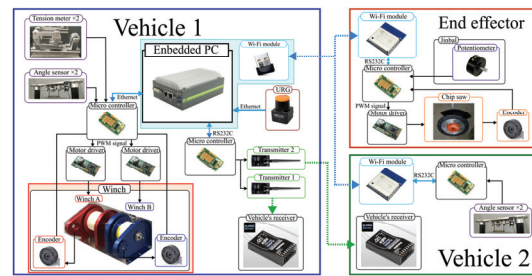


図8 制御システム

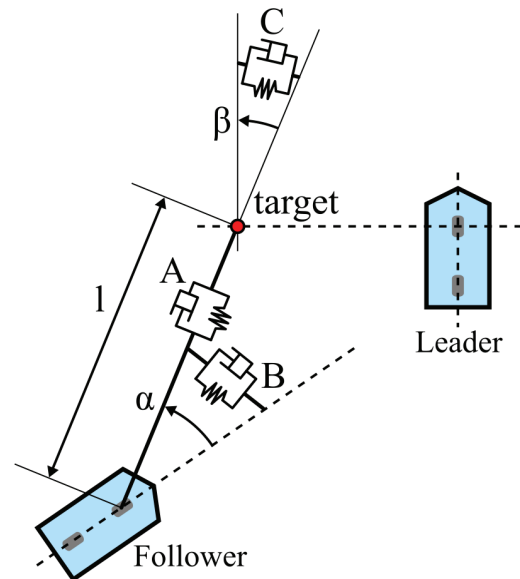


図9 仮想インピーダンス制御モデル

による実用機の基盤となる機構設計論の構築：小型・軽量でテザーの張力や長さが測定可能なウィンチ機構およびクラッチ機構、自身の位置や姿勢が測定可能な懸垂移動装置、車両搭載型クレーンをそれぞれ設計し開発した。開発した試作システムを図7、その制御システムブロック図を図8に示す。また改良機や実用機を開発する際の指針となる、設計の共通項、設計の過程で得られた知見をまとめ上げた。

(4) 車両の協調走行制御器の開発：テザーで連結された2台の車両を安定的に並走させるために、仮想インピーダンス制御を用いたり



図 10 草刈りシステム模擬実験の様子

ーダ・フォロワ型協調走行制御器を開発した。制御モデルを図 9 に示す。また、この手法をシステムに組み込むため、レーザレンジファインダを利用した車両の相対位置姿勢推定手法を同時に開発した。

(5) ロバストな懸垂移動装置の制振制御器の開発：懸垂移動装置の制振のために当初はノッチフィルタを組み込んだ制振制御器を開発する予定であったが、試作システムで実現することは困難であると判明したので、予備の手法として予定していた Input Shaping 法を応用し二段階加速法を用いた制振制御器を開発した。

(6) 農業や産業への広域作業システムの応用例の構築と検証：提案テザーシステムの農業や産業への応用を模索することを目的とし、高速回転する円盤カッターを用いた草刈りシステムを試作した。円盤カッターを備えた草刈機構を懸垂移動装置の先端に設置している。この草刈りシステムは円盤カッターの回転運動によるジャイロ効果で姿勢の自己安定化効果が期待できる。そして試作した草刈システムを用いて図 10 に示す草刈の模擬試験を行った。実際に草刈を行ってはいないが、懸垂移動装置が車両間を安定的に移動する様子が観察できた。この結果から、実際に草刈りを行える性能があると考えており、今後は実際に屋外で草刈り実験を行う予定である。また研究計画当初に予定していた他のアプリケーションについても、順次検証していく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 下鳥宇宙、富永涼太、望月恒星、高橋康文、程島竜一、琴坂信哉、福島 E. 文彦、広瀬茂男、走行車両間のテザー懸垂移動装置を用いた屋外広域作業システムの開発 一第 2 報：移動制御システムの構築と検証実験一、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016、査読無、2016 年 6 月 9 日、パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市)、1P1-06b6
- ② 望月恒星、棚林祐一郎、亀割拓、程島竜一、琴坂信哉、福島 E. 文彦、広瀬茂男、走行車両間のテザー懸垂移動装置を用いた屋外広域作業システムの開発 一第 1 報：屋外広域作業システムの概要および実験システムの試作一、第 33 回日本ロボット学会学術講演会、査読無、2015 年 9 月 3 日、東京電機大学東京千住キャンパス (東京都・足立区)、1K3-02

[その他]

ホームページ等

<http://design.mech.saitama-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

程島 竜一 (HODOSHIMA, Ryuichi)
 埼玉大学・大学院理工学研究科・助教
 研究者番号：10432006