

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870218

研究課題名(和文) 作業対象と周辺環境の接触センシングのための可変剛性パラレルメカニズムの開発

研究課題名(英文) Development of Variable Stiffness Manipulator for Tactile Sensing of Surrounding Environment

研究代表者

松浦 大輔 (Matsuura, Daisuke)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40618740

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：効果的な災害対応を行うためのロボットシステムの開発に資する、可変剛性マニピュレータ機構と周辺物体の力学的性質の測定アルゴリズムを開発した。対象物体の力学的性質を測定する際の零でない小さな力から作業時の大きな発揮力までをカバーする、広いダイナミックレンジの関節剛性を実現するため、差動入力により板ばねの有効長と出力節の角変位を制御する5R閉ループ可変剛性機構を採用し、所望の剛性範囲を実現可能とする機構を設計・試作した。さらに、これを肩関節に具備するシリアルマニピュレータを試作し、TOF方式の画像センサと組み合わせ、周辺物体の形状測定及び測定平面を決定するアルゴリズムを構築した。

研究成果の概要(英文)：This research project has developed a robotic manipulator and an algorithm of evaluating stability of surrounding objects for disaster response. To achieve force measurement with high dynamic range including a non-zero specific minimum value and a very large maximum value, a variable stiffness mechanism (VSM) having a closed-loop mechanism driven by a couple of motors and a leaf spring connecting a static link and an output link was designed. Both angular displacement and rotational stiffness of the mechanism can be changed by using the principle of differential drive and adjustable effective length of the leaf spring. In order to evaluate how target objects easily collapse or are suitable for supporting effective load, an algorithm called tactile sensing scheme was formulated. This algorithm validates stability of surrounding objects based on visual information measured by TOF sensor and force information obtained by measured displacement and given stiffness of the VSM.

研究分野：弾性冗長機構の解析と設計、画像計測、設計工学

キーワード：弾性冗長機構 可変剛性機構 接触センシング 災害対応 ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

日本における東日本大震災やその後の原発災害をはじめとして、人口増加に伴う沿岸部・山間部の開発の活発化と異常気象の多発に伴う大規模な自然災害が世界各国で毎年発生しており、迅速な救助活動を可能とする技術開発が以前にも増して必要とされている。このような災害現場の複雑かつ未知の環境において瓦礫等を迅速に除去するためには、効果的なロボットシステムの導入が不可欠である。未知の環境内で活動するロボットは、図1に示すように形状や固定状況が不確定な足場や作業対象に対応して、最適な動作を計画する必要がある。そのためにはまず周囲の物体の状況を測定する必要がある。従来、このような未知環境のセンシングは複数のカメラやレーザーレンジファインダを用いた形状測定に基づいて行われてきたが、ロボットが対象物に接触した際にどのような変化が生じるかを予測することは不可能であった。また、煙や泥水等で視界が遮られる場合には、これらの方法では測定が困難となる。

以上の問題を解決するためには、本格的な作業を行う前に対象物と予備的な接触を行い、その固定状況を調べる接触センシングを用いる必要がある。従来、ロボットと周辺物体との接触状況を計測する手法としては、図2に示すように外装に取り付けた圧力センサを用いる手法やアクチュエータのインピーダンス制御等を用いる電気的手法、非線形特性を有する弾性要素を用いる手法等があった。しかし、多自由度の剛性を変更可能としつつ、その値を対象物の崩壊を生じない小さな値からロボット本体の質量を支持できる大きな値まで変化させることは困難であった。また、従来の剛性制御手法はロボット本体を静止節に固定することを前提としたものが多く、移動プラットフォーム上に搭載され、不安定な足場で作業するロボットの制御には適さない。さらに、実用性を考慮すると、手先は破損や汚染物質の付着が生じた際には取り替え可能とする必要があり、また接触センシングの際のばね上質量を最小とする必要があるため、手先は可能な限り単純・軽量とすることが求められる。これらの問題を解決するため、本研究では姿勢角および手先剛性を制御するためのパラレル機構にエンドエフェクタとなるワイヤ駆動のシリアル機構を接続した複合形の機構を用いることを提案し、後述する研究を行った。

2. 研究の目的

本研究では、ロボットが対象物体に接触する際の手先の姿勢角および剛性を制御するための肩関節の機構に閉ループ機構を採用し、その上に腕部となるワイヤ駆動のシリアル機構を接続した複合形の機構を用いることを提案し、次の2つを研究目的とした。

- (1) 空間5自由度運動 (並進3自由度, 回転2

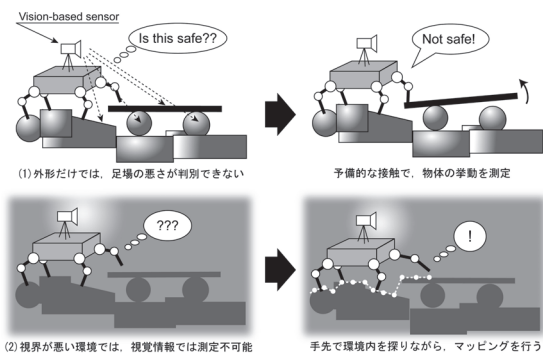


図1 視覚情報と接触情報を用いた動作計画

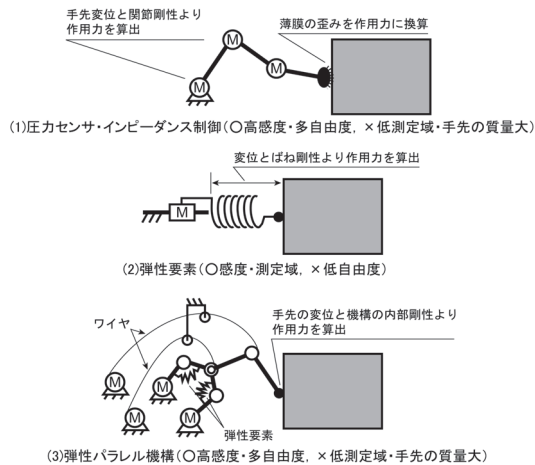


図2 作用力の測定のための手法の比較

自由度)と手先に関する3次元空間内の任意の平面上の出力剛性を制御可能とするシリアル・パラレル複合構造からなるマニピュレータ機構の総合手法を開発する。特に、接触センシングの際の感度向上と実用化の際のメンテナンス性確保のため、シリアル機構部分は簡易かつ軽量のワイヤ駆動を使用し、全アクチュエータをロボットのベースに配置する。

- (2) 移動プラットフォーム上にマニピュレータが搭載されるため、静止節とマニピュレータが剛に結合されていない運動系を取り扱うため、ロボットのベースと静止節、ロボットの手先と静止節およびロボットの機構内部にそれぞれ異なるばね・ダンパ系を有する運動系として手先の出力位置と出力剛性を定式化し、所望の位置・剛性を達成する運動制御則を確立する。

3. 研究の方法

まず、前章で述べた空間5自由度の出力運動と手先剛性を制御可能とするパラレル・シリアル複合形の構造を検討し、接触センシングに適した作業領域と剛性可変域を有する機構の設計を行う。この際、接触センシングを行うために最適な手先剛性のプロファイルを表す曲線の検討や、それを実現するための肩関節の閉ループ可変剛性機構の構成、各部の

運動および力の解析式の導出、画像計測により得られた測定点群から手先を接触させる物体の面および手先の位置・姿勢を決定するための数値計算を含む演算法を決定し、接触センシングを行うためのアルゴリズムを提案した。以上から得られた機構の構成に基づき、実験用マニピュレータを設計・試作し、画像計測系をTOF (time of flight) 方式の市販のセンサを用いて構築した。

この試作装置を用いて、肩関節に様々な回転剛性値を設定して手先を供試物体に接触させた際の各関節の変位、および供試物体と静止節との間に設置した力センサからの印加力の参照値を取得し、物体への作用力の推定結果の検証を行うことにより、提案手法の有効性や機構の制御性能を実験検証した。同時に接触センシングを行う際の、手先剛性の決定戦略および接触対象物の形状・剛性や固定状況の推定のためのモデルの定式化についても考察した。これらの結果に基づき、複数の可変剛性マニピュレータを有し、それらを移動用の脚と作業用のアームのいずれとしても使用可能な移動ロボットの開発、ならびに接触センシングを含む運動制御に必要な総合・解析手法を総合的かつ体系的に考察した。

4. 研究成果

本研究では、災害現場の未知環境内で足場の確認や不安定な瓦礫物体の除去・移動を行うための最適動作計画に必要な物体の力学的性質の測定に資する、可変剛性マニピュレータ機構のハードウェアの開発、および物体の力学的性質の測定および接触センシングのアルゴリズムの開発を行い、以下の結果を得た。

- (1) 周囲の物体の安定性を確認するための手法として、視覚情報から得た物体の形状情報と予備的な接触により得た力覚情報、すなわち作用力に対する変形・変位の大きさとの関係を用いて、対象物体の安定性を推定する接触センシングのアルゴリズムを構築した。
- (2) 上記の力覚情報を得るための災害対応マニピュレータの構造として、5つの回転関節を用いた空間シリアル機構の肩関節を、図3に示すばね要素を有する5R閉ループ機構により構成することで、角変位と回転剛性とを同時に所望の値とする方法を提案した。この構造により、手先にセンサを取り付けることなく肩関節の角変位情報に基づいて手先作用力の測定を可能とすると共に、構造の中でも特に複雑となる部分を胴体内に掩蔽し、耐環境性を向上させる設計を提案した。
- (3) 災害現場で物体の安定性を確認する際に必要な、手先作用力の最小測定分解能を1.5 Nと定め、それを実現する一方、非常に大きな発揮力も実現できるような閉ループ機構の設計を検討した。本機構により

実現される肩関節の回転剛性の理想曲線は図4に示すようになり、制御入力である板ばねの有効長に対して、上記の最小測定分解能に対応した最小値からマニピュレーション等の作業を行う際に必要な大きな値までの任意の剛性値を含む。試作マニピュレータの概観を、図5に示す。

- (4) マニピュレータの手先作用力を推定する実験および視覚情報と力覚情報を統合して物体の動きやすさを推定する実験を行った。試作センサであるTOFセンサと、供試物体の設置例およびこの際に得られた測定点群を図6、7に示す。この実験の結果、肩関節周りのトルクの最小分解能が0.12 Nm、作用力の最小分解能が0.59 Nとなり、上記(3)の設計目標値を満足する結果が得られ、質量5kgの物体に滑りを生じさせる外力の大きさが5Nとなる結果が得られた。これらより、本研究で提案した可変剛性機構および接触センシングのアルゴリズムが物体の安定性を推定するために有効であることを示した。

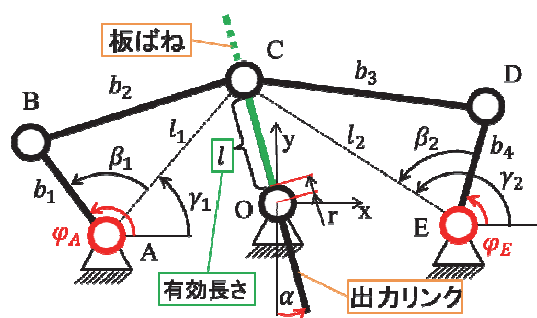


図3 閉ループ可変剛性機構の構成

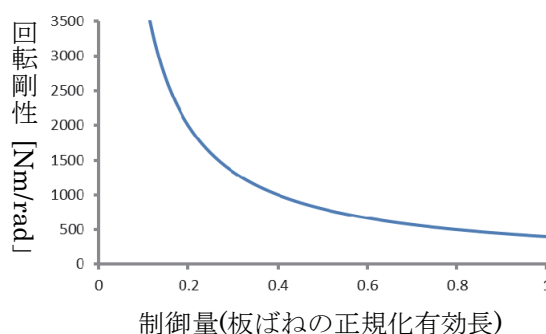


図4 肩関節の可変剛性特性の理想曲線

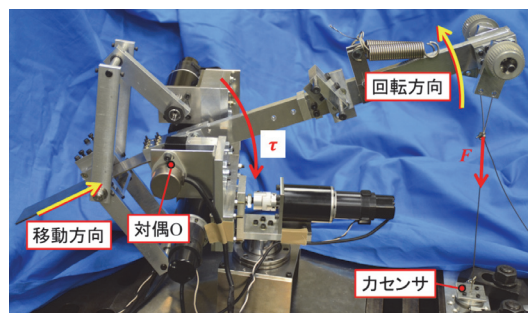


図5 試作可変剛性マニピュレータ機構

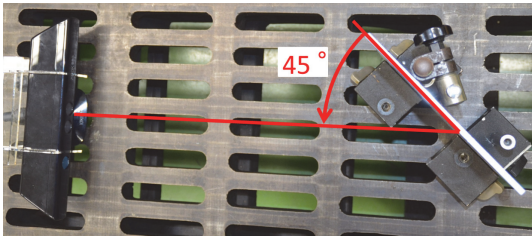


図6 TOF センサと供試物体の配置状況

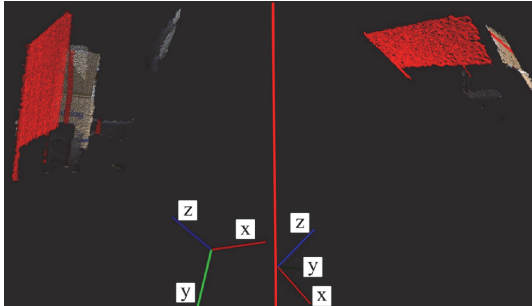


図7 可視光画像上にプロットした測定点群

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)

〔雑誌論文〕 (計0件)

〔学会発表〕 (計3件)

- (1) Daisuke Matsuura, Pavel Adodin and Yukio Takeda: Development of Variable Stiffness Manipulator for Tactile Sensing for Mobility and Deformability Measurement, CD-ROM proc. of 15th International Conference on Precision Engineering, pp. 1-5 [C24], 2014年7月25日, ホテル日航金沢 (石川県・金沢市).
- (2) アドディン・パヴェル, 松浦 大輔, 武田 行生: 可変剛性機構を用いた任意物体との接触における作用力の測定, 第19回日本 IFToMM 会議シンポジウム前刷集, pp. 37-42, 2013年6月15日, 東京工業大学(東京都・目黒区).
- (3) アドディン パヴェル, 松浦 大輔, 武田 行生: 接触センシングのための可変剛性マニピュレータ, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2013 講演論文集 CD-ROM [2A2-A09], 2013年5月24日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市).

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.titech.ac.jp/~msd/jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

松浦 大輔 (東京工業大学大学院 理工学研究科 助教)

研究者番号 : 40618740

(2)研究分担者

【該当なし】

(3)連携研究者

【該当なし】