

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04048

研究課題名(和文) 不確定環境下でのロボット作業における環境認識と物体操作の同時実行理論の構築

研究課題名(英文) Construction of simultaneous execution theory of object recognition and manipulation in robot work with an uncertain environment

研究代表者

植村 充典 (Uemura, Mitsunori)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：00512443

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、以下の成果を得た。(1)軽量かつ逆可動性の高いワイヤー駆動機構やワイヤー駆動ロボットやハンドを製作した。(2)動画上の特徴点や各画素の移動情報から、不確定物体の移動情報とセグメンテーションを可能にするアルゴリズムを構築した。(3)ロボットが不確定物体と接触した後、物体の回転を抑制するようにロボットを制御することで物体の力学的重心がある方向を推定し、重心を挟み込むように安定に物体を把持できる制御法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不確定環境下でロボットが作業するために必要な、ハードウェアと環境認識、物体操作に関する新しい枠組みを提案した。本枠組みでは、ロボットと不確定な物体との接触を利用し、物体の動きを利用した認識や、物体の動きを抑制する制御により、物体情報がわからなくても物体を認識しつつ、安定に把持できる。

本手法を拡張していけば、現在産業界で人手に頼っている作業の多くを自動化することができると期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this project, we obtained the following results.(1) We manufactured a wire drive mechanism, wire drive robot, and hand that are lightweight and have high back-drivability.(2) We constructed an algorithm that enables acquisition of movement information and segmentation of uncertain objects from feature points on moving images and movement information of each pixel.(3) We proposed a control method that detects the direction of the mechanical center of gravity of an uncertain object by controlling the robot so as to suppress the rotation of the object. After the robot detects the direction of the center of gravity, the robot can stably grasp the uncertain object by sandwiching the center of gravity.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボット作業 不確定環境 環境認識 ロボット制御 軽量 高逆可動

1. 研究開始当初の背景

AI 技術の急速な進展に伴い, AI を搭載したロボットに人が行っている作業を代替させることが現代科学技術の最重要課題の一つである. しかし, 人の行う作業は現在ロボットが行う作業に比べて不確定な要素が圧倒的に多く, 現在のロボットでは対応できていない. 実際, 不確定環境でのロボット作業を行う DARPA Robotics Challenge では, ロボットの遠隔操縦が許されているにも関わらずロボットの作業効率は人と比べて圧倒的に悪い. その原因は, 現在のロボットが高重量であることと, 関節が堅いことにある. このようなロボットが環境と接触すると, 環境とロボットの間に大きな衝撃力が生じロボットか環境が破壊されてしまう. よって, ロボットは極めて保守的に動作する必要があり, 作業効率が低下する. 近年ロボット産業界で推進されている人と共同作業が可能なロボットも, ほぼ同様な課題を持つ. これらを解決するには, 軽量かつ関節が柔軟なロボットが必要となる.

この問題に対し, 申請者は可変剛性機構やそれを用いた省エネルギー制御法, 可変把持力・重力補償機構, 反力利用弾性アクチュエータを提案した. また, 近年機械的性能が飛躍的に進化した先端化学繊維を用いたワイヤー駆動により, 駆動系をロボットの土台部分に集約する機構も提案している. これらの駆動方法は, ロボットの軽量化と関節柔軟化に貢献するものであり, 不確定な環境で作業するロボットのハードウェア基盤に貢献した.

上記のハードウェア基盤により, 環境との接触を積極的に使った環境の認識方法と物体操作の可能性が生まれている. つまり, 図1のようにロボットが環境と接触することで生まれる環境の動きから, 接触状態や触れている物体のセグメンテーション, 3次元形状, 質量, 粘弾性などの情報がオンラインで取得可能となり, これらの情報を用いた物体操作が可能となる. これにより, ロボットの環境認識能力や作業能力を大幅に向上できる. そこで, 本研究は環境と容易に接触できる利点を活かした環境認識方法とそれに基づく物体制御法を理論的に導出する.

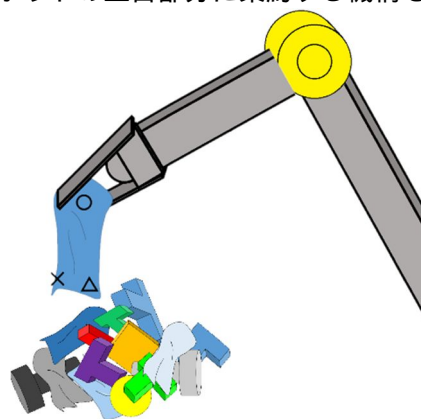


図1 不確定環境でのロボット作業

2. 研究の目的

本研究の目的は, 不確定な環境で作業できるロボットの環境認識と物体操作の同時実行理論を構築することである.

環境と相互作用可能なロボットは, 現在のロボティクスにおいて大きな課題であり, ハードウェア面からは直列弾性アクチュエータ (SEA) や空気圧駆動, 油圧駆動を用いる研究が多い. 特に, SEA を用いたロボットは近年注目されており, ヒューマノイド型ロボットに採用されたり, Rethink Robotics 社が発売した Baxter によって実用化されたりしている. また, 空圧や油圧駆動は現在の産業でも実用化されている. しかし, これらの駆動方法は制御性能を悪化させるため, 適用範囲は一部に限られる. また, 空圧・油圧駆動は外部に大型の駆動源が必要になるという問題もある.

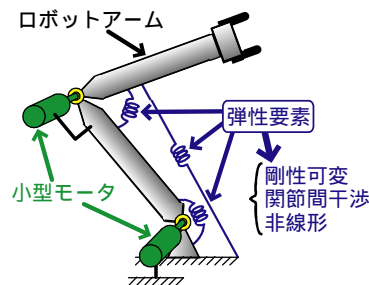
そこで, 申請者はロボットの制御性能を従来と同等に保ちつつ軽量化と関節柔軟化に貢献する駆動方法を提案してきた. これらの駆動方法は, 他ではほとんど見られないにも関わらず有用性も高い. つまり, 申請者は不確定な環境で作業できるハードウェア基盤を世界で先駆けて利用できる立場にあり, これを利用した新しい環境認識と物体操作理論は, これまでのロボティクスにはほとんど見られない高い学術的独自性と創造性を有する.

本研究で用いる可変剛性機構とそれを用いた省エネルギー制御法とは, 図2のようにロボットの各関節に取り付けた可変剛性機構の剛性をリアルタイムで最も消費エネルギーが少なくなるように適応的に調節する方法であり, 実機実験により 90%以上の省エネルギー化を確認している.

可変把持力・重力補償機構では, 図3のようにロボットの土台部分のアクチュエータ1つで各関節の重力補償と物体を把持する際に必要な把持力を補償する. 実験の結果, 把持力と重力を補償できることを確認している.

反力利用弾性アクチュエータは, 図4のようにリンクとバネの間にアクチュエータを配置する新機構であり, 高い制御性能と関節柔軟性を両立できる.

軽量化と関節柔軟化をさらに推し進めるため, 先端材料を導入する. 構造部材には軽量かつ高強



度な CFRP を採用し、先端化学繊維のワイヤーを用いてアクチュエータは土台部分に集約する。これにより、従来の同等な仕様のロボットアームや脚ロボットに比べて重量は4分の1程度となった(図5, 図6)。



図3 可変把持力・重力補償機構

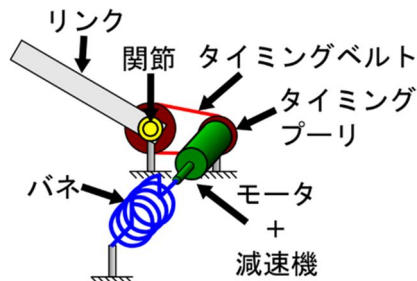


図4 反力利用弾性アクチュエータ



図5 軽量脚ロボット

3. 研究の方法

本研究では、以下の3点を明らかにする。

- ・不確実な環境にロボットが接触した際の環境の動きから、接触状態や接触した物体のセグメンテーション、3次元形状、物理パラメータ(慣性、粘性、弾性)をオンラインで推定するアルゴリズムを構築する。
- ・得られた環境や作業対象物の情報から物体を操作する制御理論を構築する。
- ・軽量で関節が柔軟なロボットを製作し、それを用いた実験により構築した理論の有効性を確認する。

ロボットが環境と接触した際の環境の動きは、カメラなどの視覚センサにより取得する。この視覚情報から、SLAMの技術を応用して動いた点の3次元位置を追跡する。SLAMではロボットが移動することにより環境を認識するのに対し、本研究ではロボットが環境を動かすことにより環境を認識する。追跡した点の情報から、接触した物体の情報を抽出する。

得られた環境の情報から、行う作業を決定する。決定した作業に基づき、接触した物体を所定の位置に移動させるといった物体操作を行う。その際も、接触による環境の動きを追跡し続け、その追跡点が目標の状態に収束するような制御理論を構築する。

提案した環境認識と物体操作理論の有効性は、図6の我々が製作した軽量・柔軟関節ロボットを用いて確認する。また、さらに軽量化・関節柔軟化を推し進めるため、我々の提案した機構を組み合わせたロボットアームも製作し、実験に用いる。可能であれば、双臂を搭載するヒューマノイド型ロボットを製作し、不確定環境下での作業を行う

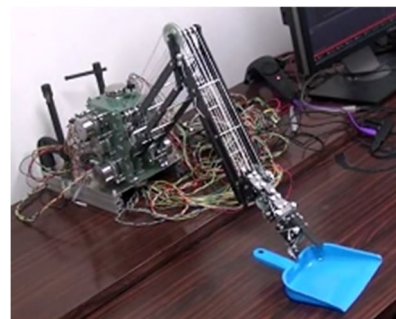


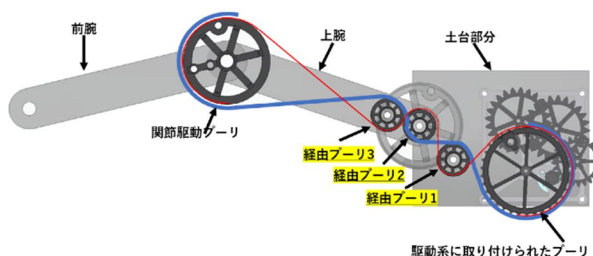
図6 軽量・柔軟アーム

4. 研究成果

本研究では、以下の成果を得た。

- (1) 軽量かつ逆可動性の高いワイヤー駆動機構やワイヤー駆動ロボットやハンドを製作した。
- (2) 動画上の特徴点や各画素の移動情報から、不確定物体の移動情報とセグメンテーションを可能にするアルゴリズムを構築した。
- (3) ロボットが不確定物体と接触した後、物体の回転を抑制するようにロボットを制御することで物体の力学的重心がある方向を推定し、重心を挟み込むように安定に物体を把持できる制御法を提案した。

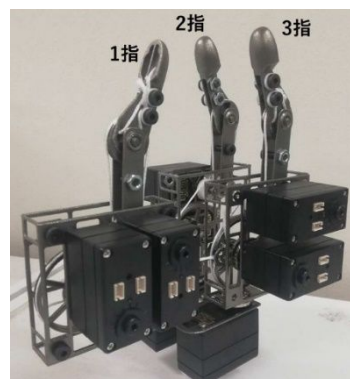
(1)については、右図のようにワイヤーが関節を経由する際に、3つの小型プーリによりワイヤーを案内することで、ワイヤーの摩擦・摩擦を起こさずに経路機構を小型・軽量化できる。従来の1つだけの経路プーリを使ったワイヤーが関節を経由する機構では、ワイヤーの摩擦をなくすためには大型のプーリが必要であり、小型のものにすると大きなワイヤーの摩擦・摩擦が生じる問題があった。提案した3連プーリ機構では、この問題を解決している。また、3つのプーリを最適に配置することで関節の可動域を最大化する手法を理論的に



3連プーリ機構

導出しており、3連プーリを用いることで関節の可動域が狭くなる問題は少ない。

また、右図のような軽量かつ逆可動性の高いワイヤー駆動ロボットハンドを製作した。本ハンドは、金属3Dプリンターを用いて製作している。ワイヤー駆動ロボットハンドは、その構造の複雑さから高重量化しやすいが、金属3Dプリンターを用いることで、この問題を解決している。



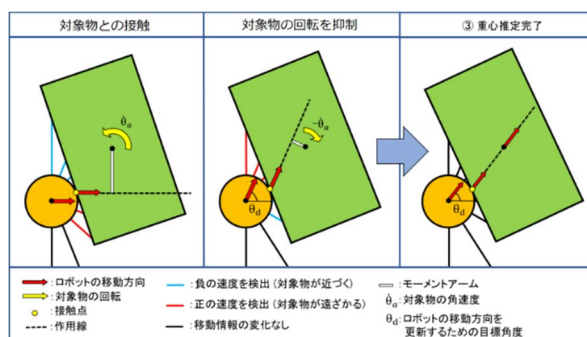
軽量ロボットハンド

更に、可変重力・把持力保証機構を搭載したロボットを製作し、アーム部分が1kgしかないロボットによって、1.5kgの物体を把持し、その時の重力と把持力を1つのアクチュエータで90%以上補償できることを確認した。

(2)では、未知物体の移動情報を推定するために、動画上の各画素の移動情報から基本行列を求め、RANSACにより正常値と外れ値に分類することで、物体のセグメンテーションと移動情報の推定を同時に行うアルゴリズムを提案した。本アルゴリズムは、物体の形状や色に関する情報を必要としないことが、他の手法に対する大きなアドバンテージである。

また、ステレオ動画の3つの特徴点の移動情報から、物体の移動情報を高速に推定するアルゴリズムも提案した。

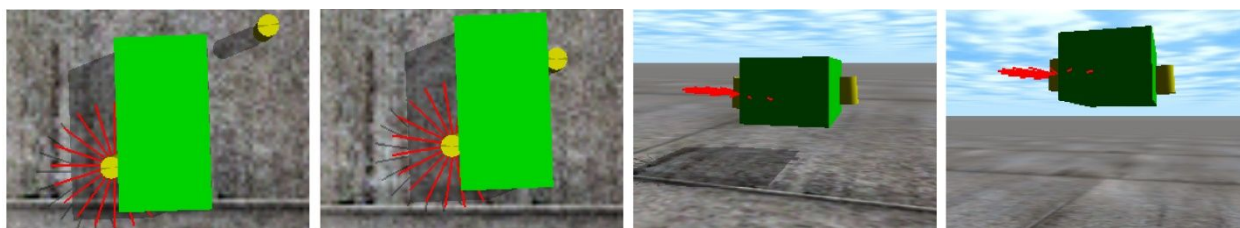
(3)では、未知物体を高速で認識しつつ把持するために、ロボットが接触した物体の重心位置をリアルタイムで推定し、重心を挟み込むように安定に把持する手法を提案した。物体の力学的な重心位置の推定は、接触して初めて可能になる。



接触を利用した物体の重心位置推定

具体的には、右図のようにロボットの指が物体に接触した後、物体の回転を抑制するように指の進行方向を制御する。物体の回転が抑制されると、力学的条件から、物体の重心がある方向が推定できる。重心がある方向が推定できれば、もう1つの指で逆方向から物体を挟み込めば、安定に物体を把持できる。

シミュレーションにより本制御法の有効性を確認したところ、下図のように重心方向を0.5秒以内に推定し、物体が把持できることを確認した。



物体把持シミュレーション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Uemura Mitsunori、Mitabe Yuki、Kawamura Sadao	4. 巻 37
2. 論文標題 Simultaneous gravity and gripping force compensation mechanism for lightweight hand-arm robot with low-reduction reducer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Robotica	6. 最初と最後の頁 1090 ~ 1103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/S0263574718001479	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Uemura Mitsunori、Hirai Hiroaki	4. 巻 16
2. 論文標題 Standing and Stepping Control with Switching Rules for Bipedal Robots Based on Angular Momentum Around Ankle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Humanoid Robotics	6. 最初と最後の頁 1950022 ~ 1950022
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0219843619500221	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上川 聡子、植村 充典、平井 宏明
2. 発表標題 脚ロボットの跳躍時における足首周りの角運動量を用いた着地制御
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2018）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 植村 充典、加古川 篤
2. 発表標題 連続炭素繊維3Dプリンターを用いた高逆可動な軽量減速機の試作
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------