

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03961

研究課題名(和文)衝突安全性と機敏な接触安定性を兼ね備えたロボットアーム用関節機構

研究課題名(英文)Joint mechanism for robot arm that features both collision safety and quick contact stability

研究代表者

相山 康道(Aiyama, Yasumichi)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：60272374

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：今回の研究期間で新たな空気圧を利用した可変剛性機構を開発した。ゴムホースをつぶす方向で使うことで剛性の高い空気袋を採用したこと、弾性部の可動範囲を狭めることで、剛性を以前に開発した機構の40倍程度に上げることに成功した。この機構を使った1自由度ロボットアームを作製し、衝突時の撃力減少の効果とゴムホースの粘性を利用した振動抑制のモデル化および実機実験を行った。衝突時の撃力は弾性部より先の質量のみが影響するため、撃力の大きさが減少する。また弾性部があると衝突後に跳ね返り振動を起こすが、押し付け力を発生させる軌道生成を行うと、短時間で跳ね返りはなくなり安定することをモデル及び実機実験により示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、サービスロボット分野だけでなく、工場におけるロボットの利用においても人間とロボットの協働が重要となってきている。本研究では人間協働ロボットにおいて最も重要な安全性を確保するために制御だけに頼るのではなく機械的な本質安全を確保するために関節に可変剛性を導入することを提案した。可変剛性関節を導入することで人間や環境との接触時の撃力を低減することができるだけでなく、環境との衝突・接触時の振動の静定時間を短くできることを示した。これにより、人間が行っているようなてきぱきとしたピックアンドプレイス作業が可能となり、生産性の向上、サービスの質の向上(待たせる時間の短縮)などが期待できる。

研究成果の概要(英文)：A novel variable stiffness mechanism using compressed air is developed in this research period. By using a rubber hose in a crushing direction, a highly rigid air bag was introduced, and by narrowing the range of motion of the elastic part, the rigidity increased to about 40 times that of the previously developed mechanism.

A one-degree-of-freedom robot arm is made using this mechanism, and modeling and actual experiments are conducted on the effect of reducing the impact force during collision and vibration suppression using the viscosity of a rubber hose. The impact force at the time of collision is affected only by the mass prior to the elastic part, and thus the magnitude of the impact force can be reduced. The elastic part of the hose causes bouncing vibration after the collision, but the model and the experiments on the machine show that the bouncing is eliminated and stabilized in a short period of time by generating a trajectory that generates a pushing force.

研究分野：ロボット工学

キーワード：マニピュレーション 人間協働ロボット 安全 衝突

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

「なぜロボットは人間のようにてきぱきと作業できないのか？」

近年、ロボット技術は進化を続け、ロボットアームの動作速度(最高速度)は どんどんと上昇してきた。しかしその後、進歩のトレンドは、人間型双腕ロボット、人間協働ロボットへと移ってきた。大量生産に限らず、人が行っている作業をそのまま置き換える、というコンセプトで、安全柵がなくとも使用可能で、人と並んで作業をすることができるロボットとして開発されている。

人が行っている作業をそのままロボットに置き換える、特に、製造ラインの中で人に混ざってロボットが入るといった場合に、タクトタイムを守るためには、ロボットによる作業能力は人間と同等かそれ以上でなければならない。しかし、人間の安全を確保するため、協働ロボットはその移動速度を ISO, JIS 規格で制限されている(250 mm/秒以下)。この速度は人間の腕の速度に比べてアドバンテージはなく、これではロボット化による作業効率の改善は望めない。

このことを、学術面から検討する。

嵌合作業を行う際や、掴んでいるワークをテーブル上で滑らせるなどの際には、力センサ等を用いた力制御を行うことが多いが、センサの耐衝撃性能、力制御理論が準静的な前提のもとで安定性を含め構築されていること、ソフトウェアベースの制御系が接触状態遷移へ安定的に追従できないこと、などから、十分に速度を落として作業を遂行すべき、とされている。これに対し人間は、押し当てる等の軽微な衝突をしながら嵌合作業やテーブルにワークを置く等の作業が可能であり、これにより高速機敏な作業遂行ができています。ロボットは従来、最高速度の高さから作業の高速化を図っていたが、嵌合や複雑な環境下での作業が求められる人間協働の環境下においては、人間のような高速機敏な動作は不可能であり、作業効率の点で人間に比べ劣っている。

このことから、周辺環境や人間との接触や衝突を伴う複雑環境下において、人間と同等かもしくはそれ以上の機敏性をロボットに持たせることが、今後の人間協働環境においてロボットが活用されるために重要なキーポイントとなる。

2. 研究の目的

「衝突安全ロボット関節機構の開発と高速機敏な動作制御」

上述したように、ロボットアームは人間協働の環境において高速機敏な動作ができない。本研究では、その原因を機構と制御の両面から解決し、高速機敏なてきぱきとした作業遂行を可能とすることを目的とする。

このために核となるポイントは、最高速度を上げるのではなく、衝突を含めた加減速時の素早さを高めることである。そこで本研究では、剛性が低く時定数の大きな機構の導入と、それに伴う弱点を補う制御手法の構築を主たる目的とする。

3. 研究の方法

(1) Series Elastic Actuators (SEA)

SEA は Variable Impedance Actuator (VIA) 類の一つで、数多く研究がなされてきた。マニピュレータ関節に導入される場合、モータとリンクの間に弾性要素が入り、コンプライアント変位が許容される。しかし、コンプライアンスと同時に、リンク位置の誤差と弾性部による振動も現れ、より複雑な制御や機能的な対策が必要になる。様々な制振技術が存在するが、システムの応答時間が遅く制御が間に合わないという問題がある。剛性の観点から応答時間の検討を進めた研究もあるが、上述同様に制御ベースの技術になる。SEA に可変剛性機能を導入することで、使用範囲を広げる提案もある。剛性の調整を行い、場面に応じる可能性が追加された。

従来研究により、SEA が衝撃を軽減できることが示されている。更に可変剛性機能があれば、Pick-and-place タスクにも対応でき、安全性も確保できる。上記に基づいて、SEA の利用により、人間のような環境との接触方法の実装が可能と考えられる。ただし、制御における課題へのアプローチも必要である。

(2) 本研究の提案

本研究の最終目標は安全性を考慮した上、人間のような衝突を許容しながら素早い接触動作を実現することである。特に Pick-and-place の置くタスクに着目し、SEA の機能を用いて最初の衝撃を軽減しながら、押し付け力への制限を設計する。加えて、リンクのコンプライアント変位の補正制御を行わず、関節のモータの制御のみで操作することを提案する。これにより、一般のマニピュレータ制御が使用可能になる。ただし、選定された戦略により SEA の振動という課題が残る。ここで、本研究のもう一つの提案は、環境との接触力を利用し、リンクの振動を抑えるこ

とである。

具体的には、振動を抑えるために手先の目標位置を接触面より奥の方に選定する。接触点と目標位置の差から、関節に現れるコンプライアント変位が計算できる。更に、関節剛性の選定により、押し付け力への影響が可能になる。最終的に、整定時間の短縮かつ最小必要な接触力が得られるパラメータ選定を調べることが目的である。

4. 研究成果

(1) 圧縮空気を用いた可変剛性機構の改良
 本研究では可変剛性 SEA の仕様が要になるため、まず我々がこれまでに開発した機構について検討した。図 1 のように、機構の内部に空気袋を設けるスペース(以降、内部屋)が 2 つある。空気袋に挟まれて回転できる可動壁が存在する。2 つの空気袋に同じ圧力の圧縮空気が設定されると、可動壁が中心位置でつり合い状態になる。可動壁が回転して位置が変わると、空気袋内の圧力が変化し、空気バネにより復元力が発生する。可動壁が出力軸を通してリンクに繋がっているため、トルクが伝達される。しかし、計測された剛性の最高値は $28.5 \times 10^{-3} \text{ Nm/deg}$ であったため、本研究では設計の更新を提案し、使用可能な剛性の範囲を拡張した。

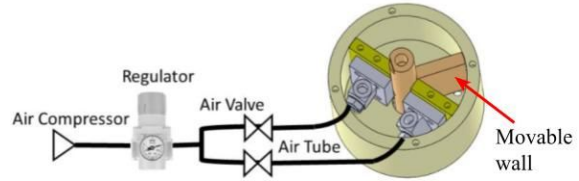


図 1 これまでに開発した可変剛性 SEA

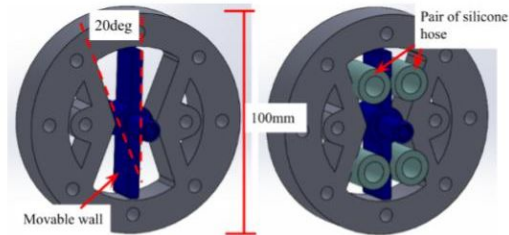


図 2 新たに開発した可変剛性 SEA

先行研究では、ビニル袋やジャバラに圧縮空気を入れたものを空気バネとして実装した。しかし、このアプローチでは素材の耐久により圧縮空気の圧力に制限があった。本研究ではシリコンホースを導入した。圧力 1.0MPa まで耐えられるものを使用することにより、同サイズの機構でも、選択可能な剛性の範囲を広げることができた。

図 2 で確認できるように、SEA の可動壁をシリコンホースのペアで挟み、両側に空気バネを実装する構造になっている。しかし、可動壁の変位により、シリコンホースの形状が変化し可動壁との接触面積も変わることになる。そのため、先行研究より、力学的な分析が複雑になる。剛性を実験的に調べるため、既知の負荷トルクによって、リンクに見られる角度変位を計測し図 3 の結果を得た。

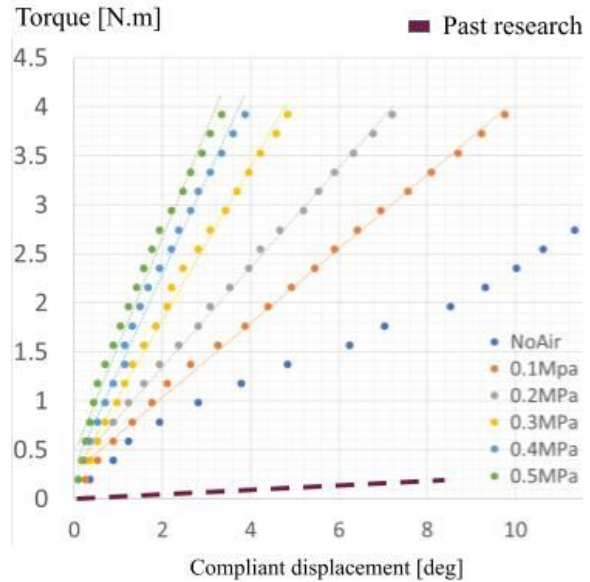


図 3 新たな機構の剛性

No Air は圧縮空気が供給されていない状態である。つまり、シリコンホースだけの影響が見られるカーブである。No Air の場合、素材と形状の影が非線形な特徴を見せる。しかし、圧力が上がるに連れ、シリコンホースの存在が薄くなり、空気バネの影響が目立ち、線形に近づく傾向が見られる。得られた剛性は最大で約 1.10 Nm/deg であり先行研究の 38 倍となった。同じ圧力選定で比較しても、0.3MPa の場合、27 倍の剛性が得られた。

(2) 衝突に対する剛性と押し付け力の関係

図 4 のように、開発した SEA をモータに取り付け、可動壁及び出力軸にリンクを設置した。

10 deg から離れた位置を初期位置とし、目標位置と目標速度を指令してモータを制御する。ロードセルで計測されたデータを図 5 に示す。ただし、センサの特徴により、約 4N のオフセットが含まれている。最初の接触力のピークは剛性と目標位置により影響がほぼないことが分かる。計測された押し付け力は SEA の特徴から想定される値と合致することが確認できた。更に、リンクを固

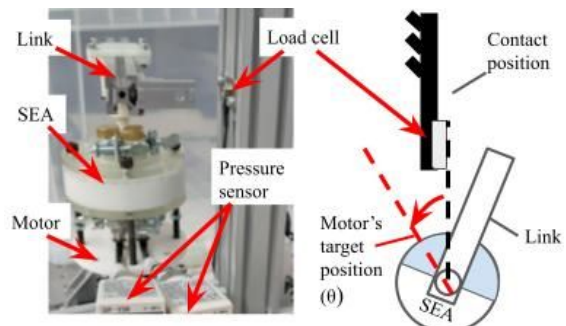


図 4 衝突実験装置構成

定することにより、3 つ目のグラフが得られ、ほぼ剛体の衝突と SEA 有りの反応を比較することができた。同じ接触力を実現するため、SEA がないアームはより小さい速度で動作しなければならないことが分かる。この結果により、作成された可変剛性 SEA を用いて提案手法の実装は可能であると確認できた。

(3) SEA 関節を用いた 1 リンクアームシミュレーション

シミュレーションの目的は目標位置、関節剛性、手先速度を変化させ、整定時間と接触力への影響を調べることである。

まず、目標位置パラメータの影響を調べた。目標位置を 0deg(接触位置)および 1deg に設定した。速度は 0.5 m/s、剛性は 0.5 Nm/deg の一定でシミュレーションを行った。図 6 の左が 0deg、右が 1deg の結果である。目標位置が 0deg の場合、リンクが何回も跳ね返ることになる。接触の際に手先速度が減少しているため、接触力の影響も見られる。目標位置が 1 deg の場合、0 deg に比べてリンクの跳ね返りが早く収束していることが分かる。

次に関節剛性パラメータの影響を調べた。剛性を 0.1Nm/deg, 0.3Nm/deg, 0.9 Nm/deg に設定した。速度は 0.5 m/s、目標位置は 2.5 deg に設定した。図 7 がシミュレーションの結果である。衝突後の接触力は剛性に比例して大きくなるが、衝突時の撃力の大きさは基本的に変化はない。

最後に手先速度パラメータの影響を調べた。手先速度を 0.25m/s, 0.5m/s, 1 m/s とし、剛性は 0.1 Nm/deg、目標位置は 2.5 deg に設定した。図 8 がシミュレーションの結果である。押し付け力への影響は見られないが、衝突時の撃力のピークは手先速度に比例していることが分かる。速度を変化させても、整定時間に大きな変化は見られなかった。

(4) SEA 関節を用いた 1 リンクの実機実験

開発した SEA 関節を搭載した 1 リンクマニピュレータとして、図 9 の実験装置を作成した。関節剛性は柔らかく(0.38Nm/deg) 目標位置は深く(2.5deg) 設定して、実機実験を行った。

図 10 がこのときの実験結果とシミュレー

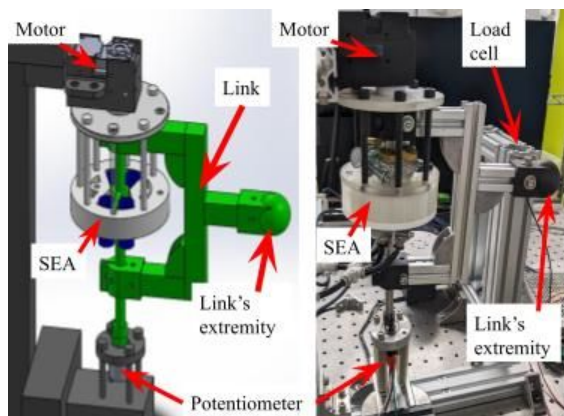


図 9 SEA 搭載 1 リンクマニピュレータ

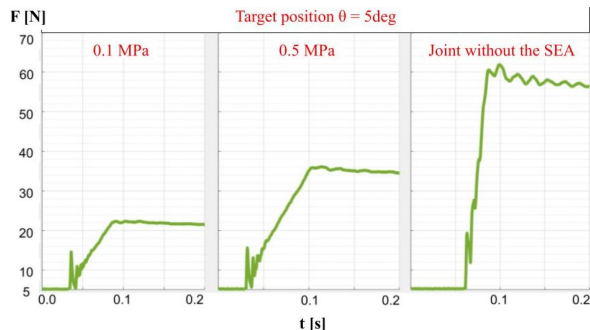


図 5 衝突による接触力の変化

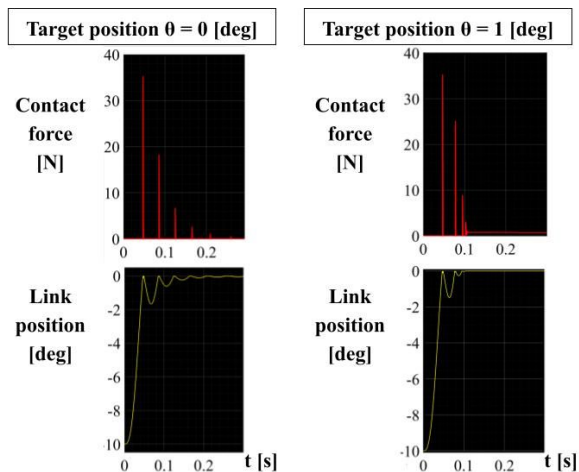


図 6 目標位置による接触力の変化

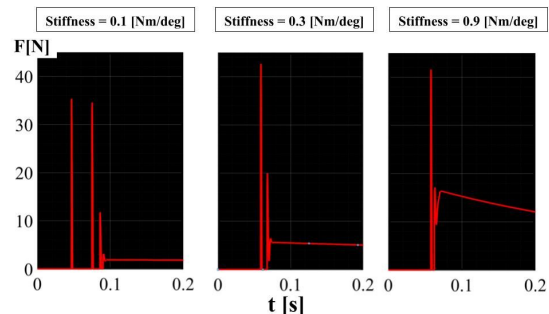


図 7 関節剛性による接触力の変化

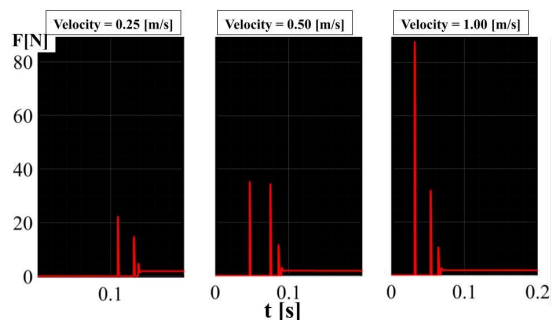


図 8 手先速度による接触力の変化

シヨンの比較である。

接触力の傾向がシミュレーションと似ていると言えるが、接触力のピークは想定されたより 10 倍小さかった。このもっとも大きな要因の一つはゴムホースの粘性と考えている。今回のモデルではゴムホースの粘性は考慮に入れていないが、実際のゴムホースはかなり大きな粘性を有している。このために接触力のピークが下がったものと考えられる。

また、実験装置のリンクやモータの取り付け位置と環境との相対位置のずれがあるとその影響も大きなものになると考えられる。その他、組付け時のねじのゆるみやモータ自体の剛性・バックラッシュなども影響を与える要因となりうる。

(5) 結論と今後の展望

本研究でめざしたものは人間のよう
に高速度で、多少粗くても安全なモーションである。本研究で提案する可変剛性 SEA 機構を導入し、機械的なアプローチに着目することにより、制御戦略が簡易にできる。ロボットシステムに実装するため、これまでに開発してきた機構のデザインを更新し、新たな可変剛性 SEA を開発した。これによって以前よりも高い剛性の選択が可能になった。シミュレーションおよび実機実験を通し、衝突時の接触力の軽減ができることを確認した。加えて、環境に与えられる押し付け力はコンプライアント変位と関節剛性に比例することも確認した。関節に SEA がない場合とも比較し、同じ接触力を実現するために SEA がないアームでは、より大きな減速をしなければならず、作業時間に差がでることが分かった。

今後はモデルとシミュレーションの根拠を更に固めることが重要となる。更に、2 リンクおよび多リンクと、一般化を進めるために議論を深める必要がある。最終的には人間のようになってきばきとしたモーションで Pick-and-place の実現を目指す。

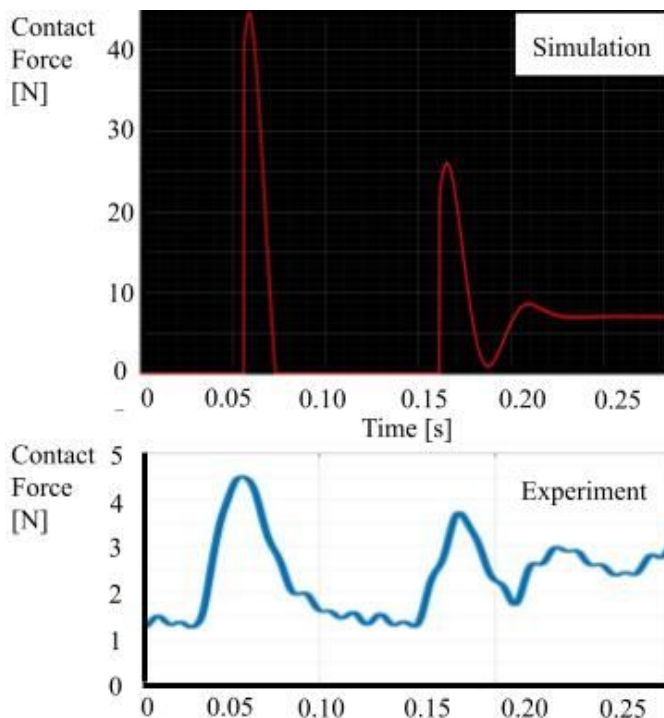


図 10 実機実験とシミュレーション
結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山崎佑太, 相山康道, 山崎聖平, Helio Nonose
2. 発表標題 衝突・接触時に変形するロボットアーム用リンク機構の提案
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ノノセ・エリオ, 山崎聖平, 相山康道
2. 発表標題 小さな衝突を許容するマニピュレーションのための圧縮空気を用いた可変剛性関節機構
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山崎聖平, Helio Nonose, 孫茂翔, 相山康道
2. 発表標題 ロボットの関節に搭載するピンガム流体を用いたロータリーダンパーの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Helio Nonose, Yasumichi Aiyama
2. 発表標題 Method for Human-like Environment Contact Motion using a Series Elastic Actuator
3. 学会等名 The 10th IEEJ International workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2024) (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------	---------