

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 15 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560268

研究課題名（和文）ロボット関節剛性を高速に調節する機構の開発とその制御の基づく動的器用さの実現

研究課題名（英文）Development of joint mechanism with stiffness adjuster and achievement of skillful robotic motion using it

研究代表者

梶川 伸哉 (KAJIKAWA SHINYA)

東北学院大学 工学部 教授

研究者番号：80290691

研究成果の概要（和文）：本研究では、まず、任意方向へ関節剛性を高速に調節する機構の検討し、シリコンゴム製の弾性体を関節内の運動伝達部に挿入し、その変形を制御することで高速に任意方向への剛性調節を実現した。また、その関節機構を搭載した4本指ロボットハンドの製作を行い、基本性能の評価を行った。これと並行して、ハンドの応用を目的として、物体投射作業を取り上げ、ハンド関節の運動および剛性制御アルゴリズムを構築するため、人間の手指関節の制御方策について解析を行い、各関節の役割、制御方策を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed a novel robot hand system with adjustable multi-directional joint stiffness. In our joint mechanism, we inserted Silicone Rubber Cushions between two motor driven disks. This cushion can adjust joint stiffness quickly by controlling its inside pressure. We investigated its basic performance through several experiments.

Furthermore, we analyzed human finger motion during throwing a ball. This analysis shows that how human controls each finger according to the goal position.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械知能学・機械システム

キーワード：人間機械システム、剛性可変関節、ロボットハンド、物体投射

## 1. 研究開始当初の背景

人と同様の運動性能が期待されるロボットシステムへの期待が高まっており、様々なヒューマノイド型ロボットの開発が行われている。その実現には、人と同じようなしなやかさと力強さを併せ持つ機構上の特徴が必要である。

従来のロボットシステムでは、歯車等を組

み合わせた剛関節が主であり、制御による疑似的な柔らかさが創出されており、制御遅れが作業遂行や安全性に対して致命的な影響を与える恐れがあった。

これに対し、本質的に柔らかさを有し、安全性も高いものとして人工筋アクチュエータを利用したシステムが注目を集めている。こちらは、人工筋アクチュエータを人の筋骨

格構造を模倣した配置し、それらの拮抗制御により、関節位置と剛性を個別に調節することが可能である。このことにより、人と同様の器用な運動の実現が期待されていた。しかしながら、こちらもアクチュエータの駆動に時間を要すること、システムの非線形性が顕著であるなど、制御上の問題を抱えている。

## 2. 研究の目的

本研究では、人と同様の器用さを有するロボットハンドの実現を目指し、人と同様に関節剛性の調節が可能なハンドの開発を行う。

また、その剛性調節機能を利用した動的で器用な作業の実現を目指す。

## 3. 研究の方法

研究は、以下の2点を中心に行った。

(1) 剛性を高速に調節できる機構の開発し、それを搭載したロボットハンドの製作と評価。

(2) 動的な作業である物体投射運動を取り上げ、その運動中の手指関節運動の特徴と制御方策の考案。

この両者を組み合わせることにより、関節剛性の特性を利用した、より高度なロボット作業が実現できると考えた。

(1)については、当初、弾性梁を用いた関節剛性調節機構を想定していたが、試作検討の結果、剛性遷移の不可逆性が確認された。すなわち、剛→柔の逆である柔→剛への調節が困難であることが確認された。そのため、以下に示す新たな方式の剛性可変機構を開発した。これは、これまで当研究室で開発を行ってきた、任意方向への柔軟性と外力推定機能を有する関節機構に、新たに剛性を調節する機能を追加したものとなっている。さらに、人の手構造を単純化し、高速に駆動できる腱駆動方式のハンドの試作も行った。

一方、(2)に関しては、モーションキャプチャーと筋電位計測器を用いて、物体投射運動時の指関節の運動、およびMP関節については、さらにその駆動に寄与する伸筋と屈筋の活動電位を計測し、関節剛性の変化についても考察を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 関節剛性可変ロボットハンドの開発

まず、開発した関節剛性可変機能を有するロボットハンドシステムについて説明する。図1に開発した剛性可変機構を有する関節の概要を示す。この図に示すように関節内では、二種類のゴム製クッション(Cushion A、Cushion B)を利用している。Cushion Aは2枚のモータ駆動歯車の間に挿入され、その上面部分がそれらと接触する。モータの回転運動は両者の摩擦力によってリンクに伝達さ

れる。

一方、Cushion Bは外部の空気圧制御ユニットと接続され、その内圧が制御される。これにより、Cushion Aの歯車への押しつけ力が制御でき、結果として関節の剛性を調節することが可能となる(図2参照)。また、Cushion Bの容積は非常に小さく、高速に膨張させることができ、迅速な剛性制御が期待できる。

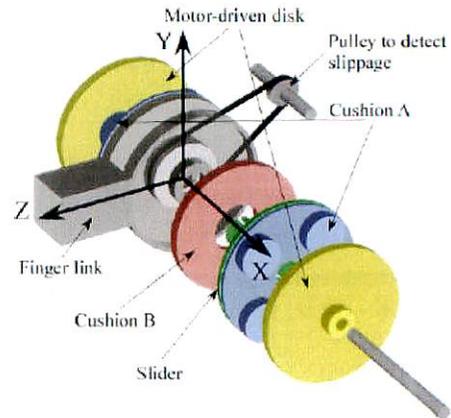


図1 関節機構概要

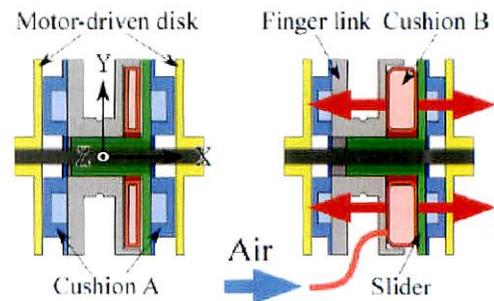


図2 関節剛性機能概要

次に、この関節を各指のMP関節部に搭載したロボットハンドを図3に示す。また、関節剛性の可変域を示す結果を図4に示す。

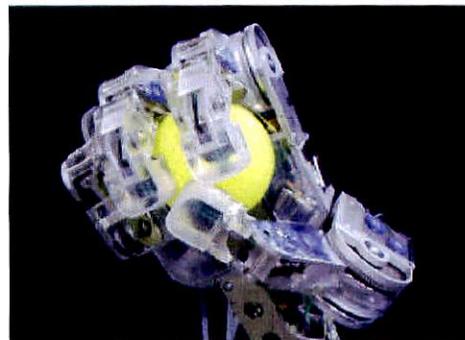


図3 ロボットハンド試作品

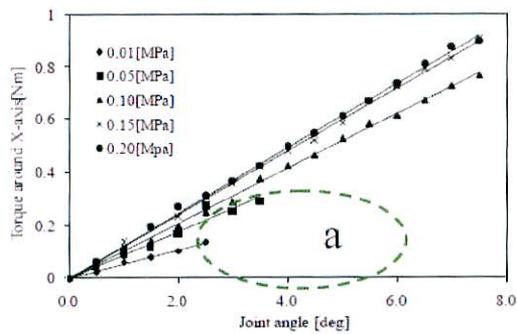


図4 関節剛性域

図3に示すロボットハンドは、ほぼ人と同程度の大きさであり、3関節4本指を有する。また、図4は、外力に対するリンクの応答角度を示しており、Cushion Bの内圧制御(0.01~0.2MPa)により剛性はおよそ2.5倍の範囲で変化することが示されている。図中aの領域はCushion Bの内圧が低い領域であり、外力に対して、リンクが滑りを生じている範囲である。この剛性の変化に要する時間は、最大でも500ms以内であり、従来提案されている剛性可変機構に比べ、高速な調節が可能であることが確認された。

またCushion Aの内圧バランスを考慮することにより、外力の方向と大きさを推定する機能も持ち合わせている。この機能についても評価実験を行い、良好な結果を得ることができた。

このように、任意方向の関節剛性調節、高速性、さらに外力推定機能を備えた多機能の関節機構は類を見ないものであり、この関節機構は、器用なロボット作業の実現のみならず、高い安全性と快適性が求められる介護等人との身体的なインタラクションが行われる分野への応用も大いに期待できる

また、更なる高速性を求め、人の腱配置を単純化し、ワイヤと弾性バネを組み合わせた筋駆動方式のロボットハンドを試作した。こちらは、基礎的な性能評価実験により、人と同様の投げ上げ動作を実現するために必要な各関節の高速駆動と剛性調節が可能であることが確認された。実際に物体投射作業を試み、実現可能であることが確認もできた。

今後、このハンドの制御方法をさらに検討する。

#### (2) 物体投射時の手指運動の解析

ここでは、物体投射に利用する関節数と投射目標位置を変え、各被験者の運動データを解析し、指関節の役割と制御方策について考察した。まず、図5に示すように手首、MP関節のみによる物体投射作業を解析した。こ

のとき、MP関節の駆動に関わる筋電位についても計測を行った。

図6に運動中の関節角度の変化、図7に筋電位の計測結果を示す。図6上段は指先と物体の接触力の変化、下段の $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ は、それぞれ手首関節、MP関節の角度変化を表している。

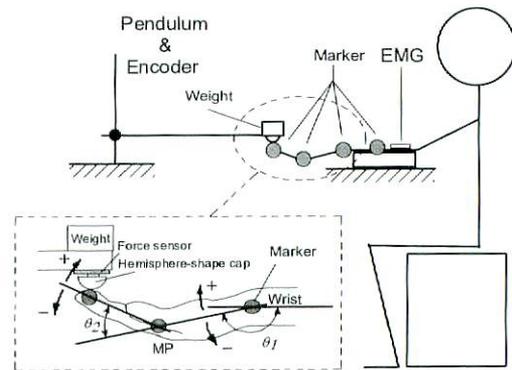


図5 実験の様子

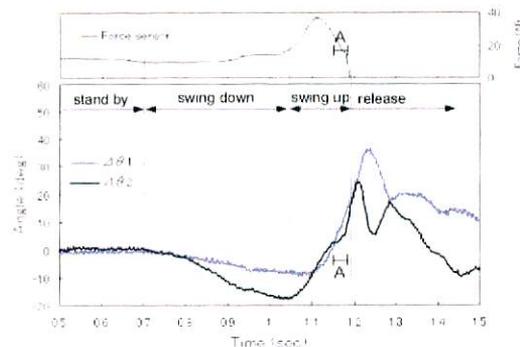


図6 関節角の時間変化

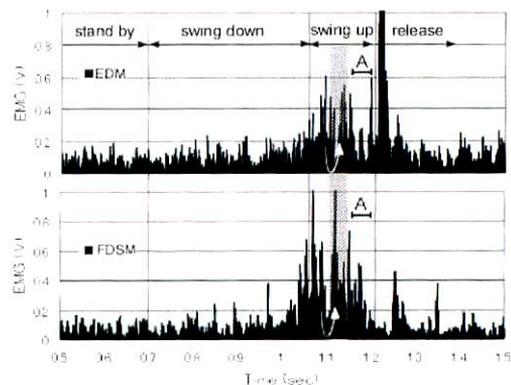


図7 筋電信号(上:伸筋 EDM、下:屈筋 FDSM)

図6より、MP関節においては、運動が停滞する領域(A)が確認され、このとき、図7の筋電位データでは、伸筋(EDM)と屈筋(FDSM)の同時活性化がみられる。この後、MP関節の速度が急速に高まり、物体のリリースに至ることから、MP関節の拮抗状態(高剛性)を作りだし、その後、蓄えられた弾性エネルギーの解放により関節運動の高速化を図っているものと考えられる。

現在、柔軟性を有するロボットの開発が多く行われているが、その柔軟性に付随する弾性エネルギーを運動生成に利用している例は極めて少ない。今後は、それを利用した器用でダイナミックな運動生成が望まれると考えられる。その際に、今回の結果は有益な情報になると期待される。

次に、より器用な動作を対象とし、すべての指関節を利用したボール投げ運動について解析を行った。こちらは、被験者により、異なるボールの手のひら上での扱いに違いが現れた。それに伴い、各指の運動にも大きな違いが現れた。

一方は、手のひらでボールを転がし、その転がり運動をボールの放出速度の向上に利用するものである。他方は、ボールを指先先端にとどめ、関節のしなり(弾性エネルギーの解放)によりボールを放出する方法である。前者は、各指リンクとボールの接触状態を適切に制御し、ボールの速度を調節する。後者は、ほぼ各関節が伸展姿勢の状態の手首とMP関節の運動を主として行われる。

また、ボール運動の制御には、指の皮膚、皮下組織の粘弾性変形も有効に利用していることが推察された。

以上の、物体投射運動中の腕の解析は数多くあるが、手指に関する研究報告は少なく、今回の成果は、非常に有益なものとする。

## 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2件)

- ① S.Kajikawa and K.Abe, Robot Finger Module With Multidirectional Adjustable Joint Stiffness, IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, 査読有, Vol.17, No.1, 2012, 128-135.
- ② 梶川伸哉, 門間好功, 佐藤友昭, 長谷秀之介, 物体投げ上げ運動における手指関節運動の解析, 人間工学, 査読有, Vol.46, 2010, 282-285.

[学会発表] (計10件)

- ① 門間好功, 柴田裕規, 八木亮輔, 梶川伸哉, 投げ上げ運動における手指運動の解析, 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, 平成22年12月23日~25日, 東北大学川内キャンパス
- ② S.Kajikawa, M.Nasuno and K.Hayasaka, Development of Human-friendly Robot Arm with Adjustable Joint Compliance, 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 平成22年12月7日~10日, Grand Copthorne Water Front Hotel, Singapore
- ③ S.Kajikawa and Y.Yonemoto, Joint Mechanism with a Multi-directional Stiffness Adjuster, IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, 平成22年10月18日~22日, Taipei International Convention Center
- ④ 阿部啓, 梶川伸哉, 空気圧クッションを利用した剛性可変関節を搭載したロボットフィンガ, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会(Robomec2010), 平成22年6月13日~16日, 旭川大雪アリーナ
- ⑤ 阿部啓, 梶川伸哉, 剛性を調節できるロボットフィンガ支持機構, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会(SI2009), 平成21年12月24日~26日, 芝浦工業大学豊洲キャンパス, 東京
- ⑥ 門間好功, 佐藤友昭, 長谷秀之介, 梶川伸哉, 物体投げ上げ動作における手指運動の解析, 計測自動制御学会東北支部第254回研究集会, 平成21年12月17日, 東北学院大学多賀城キャンパス

[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.tohoku-gakuin.ac.jp/kaji-lab/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

梶川 伸哉 (KAJIKAWA SHINYA)  
東北学院大学 工学部 教授  
研究者番号: 80290691