

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：32410

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820084

研究課題名(和文) 弾性大変形の受動的変形様相制御による弾性フィンガーグリッパの高機能化

研究課題名(英文) High functionalization of an elastic finger gripper by passive control of elastic large deformation

研究代表者

安藤 大樹 (ANDO, Hiroki)

埼玉工業大学・工学部・講師

研究者番号：60377819

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)：弾性フィンガーの弾性大変形の变形様相を受動的に制御することにより小形化とソフトで安定した把持の両方を実現する高機能グリッパの最適設計を機構と制御の両面から検討し、その最適な変形様相制御条件を明らかにした。

さらに、受動的変形様相制御は、小形化を目的とした制御では、弾性フィンガーの弾性大変形による把持力増大の効果を増大させ、最大把持力を飛躍的に増大させる役割を果たし、ソフトで安定した把持を目的とした制御では、対象物とのソフトな接触の後にフィンガー全体の剛性を増大させ、把持力変動を低減するフィードバック制御系の負担を軽減する役割を果たすという知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Optimal design of a robot gripper with elastic fingers to realize both its miniaturization and stable soft-gripping by passively controlling elastic large deformation of the fingers was studied from the aspects of both the mechanism and control, and the optimal conditions of the passive deformation control was clarified.

Moreover, it was found that the passive deformation control plays a role of increasing the rigidity around the fingertips and dramatically enhancing a maximum gripping force under the control for the purpose of miniaturization, and a role of increasing the rigidity of the whole fingers after a soft contact with the object and reducing loads on the feedback control system for reducing perturbation of gripping force under the control for the purpose of stable soft-gripping.

研究分野：構造系と制御系の統合化設計

キーワード：ソフトメカニクス フレキシブルメカニズム

### 1. 研究開始当初の背景

近年、柔軟性を積極的に利用し、構造に新しい機能をもたせる試みが注目されており、コンプライアントメカニズム[1]、機能的連続体[2]、連続体ロボット[3]などの研究が国内外で活発に行われている。

これらの研究は、構造の弾性変形を利用することにより、部材数の低減、小形化、軽量化、高性能化、バックラッシュや騒音および潤滑の必要性の除去、製造工程のコストおよび時間の削減などを達成しており、さらには卓越した運動能力を有する小型ロボット[4]の開発も行われている。我々はこれまで、このような柔軟構造の運動性を利用した制御機械システムの構造系と制御系を統合的に最適化する統合化設計[5]の研究を行ってきた。平行リンク機構の回転対偶を弾性ヒンジで実現した変位拡大機能を有する高速位置決めアクチュエータを対象に行った統合化設計[6,7]では、制御帯域を従来型の7.6倍向上させるとともに、「柔軟構造の運動制御に構造全体の弾性変形を利用することにより、リンク機構を前提とした柔軟構造に比べ、本来トレードオフの関係にある“静特性と動特性”および“制御性能とロバスト性”の両方をともに向上させることができる」ことを示した。この研究成果から我々は、次に、一枚の弾性薄板から成形される弾性フィンガー全体の変形を利用して物体のソフトな把持を行うロボットグリッパの研究に取り組み、その機構の基本特性[8]を明らかにするとともに、その応用開発[9]を行ってきた。

しかし柔軟構造の運動性に関するこれまでの研究のほとんどは、部材数の低減、小形化、軽量化を主目的としていることから、構造の弾性変形はそのまま利用されている。

これに対し我々は、構造の弾性変形をより有利な変形様相となるよう制御すれば、より高性能あるいは高機能な構造が実現される可能性があると考え、物体把持後の弾性フィンガーの大変形をエネルギー的に有利な変形様相となるよう外部から受動的に制御し、構造のエネルギー安定姿勢を変化させることにより最大把持力が飛躍的に増大することを実験[10]により示した。そしてこの研究成果を設計に反映させるため、弾性フィンガーの大変形解析[11]を行うとともに、その大変形効果を明らかにした。

以上から、柔軟構造の変形様相制御に関する研究のさらなる発展により、新たな機能の創成を含む柔軟構造のさらなる高機能化を達成する機能的変形様相制御手法の構築が期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、弾性フィンガーの弾性大変形の変形様相を受動的に制御することにより小形化とソフトで安定した把持の両方を実現する高機能グリッパの最適設計を機構と制御の両面から検討し、その最適な変形

様相制御条件を明らかにするとともに、開ループ系および閉ループ系における受動的変形様相制御の役割を明らかにすることである。

### 3. 研究の方法

(1) 対象とする弾性フィンガーグリッパの構造と駆動原理

図1に対象とする二本の弾性フィンガーをもつ弾性フィンガーグリッパの構造と駆動原理を示す。細長い短冊状の弾性薄板を図1中に破線で示した形状に折り曲げ、両端 $A, A'$ を固定すると、互いに向かい合う二本の弾性フィンガー $ABC, A'B'C'$ をもつグリッパが成形される。そして図1中に実線で示したように、板の中央 $D$ を矢印の方向に変位させるとフィンガー先端 $B, B'$ が互いに接近するようにグリッパ全体が弾性変形し、対象物を把持する。駆動点 $D$ をさらに変位させると、対象物を把持した弾性フィンガーは図2に示すように外側へ大きく膨らむように変形する。

(2) 受動的変形様相制御の方法

受動的変形様相制御は、対象物把持後の弾性フィンガーの大変形を図3に示されるような受動的変形制御要素を配置することによって外側から受動的に制御することにより行われる。この受動的変形様相制御は、対象物との接触前のフィンガーの開閉操作を妨げないため、開閉量に影響を与えない。

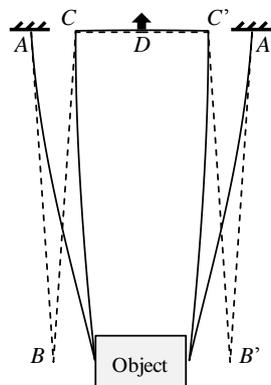


図1 二指の弾性フィンガーグリッパ

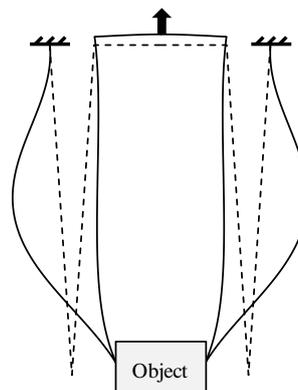


図2 弾性フィンガーの大変形

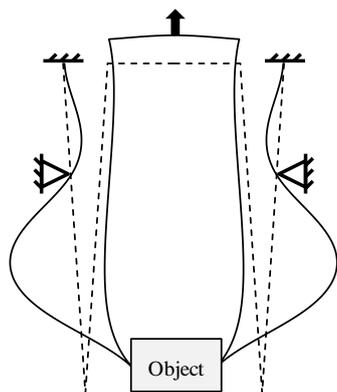


図3 弾性フィンガーの変形様相制御

(3) 最適設計の方法

受動的変形制御要素を付加した弾性フィンガーグリップの設計は、弾性フィンガーを弾性関節で連結された剛体リンクの直鎖で近似した離散化モデルを用い、対象物へのアプローチ段階、対象物把持段階、受動的変形制御要素による変形制御段階といった三段階からなる把持プロセスのシミュレーションを通して解析的に行われる。弾性フィンガーグリップの小形化およびソフトで安定な把持という二つの各制御目的に対し、弾性フィンガーの大変形をエネルギー的に有利な変形様相となるよう制御することにより最大把持力を増大させアクチュエータを含めた小形化を達成する最適制御条件、およびグリップの高加速度運動時の把持力変動を低減する最適変形制御条件を、受動的変形制御要素の配置とフィードバック制御系に関するパラメータスタディにより検討する。

4. 研究成果

(1) 開ループ系における受動的変形様相制御の最適変形制御条件の解明

開ループ系における弾性フィンガーグリップの小形化とソフトで安定な把持を両立する受動的変形様相制御の最適変形制御条件の解明のため、受動的変形制御要素の配置に関するパラメータスタディを行った。パラメータスタディの結果、グリップの小形化、ソフトで安定した把持、およびそれらを両立する最適条件として、それぞれの目的に応じた異なる結果を得た。

(2) 閉ループ系における受動的変形様相制御の最適変形制御条件の解明

フィードバック制御系を付加した閉ループ系における弾性フィンガーグリップの小形化とソフトで安定な把持を両立する受動的変形様相制御の最適変形制御条件の解明のため、受動的変形制御要素の配置とフィードバック制御系に関するパラメータスタディを行った。パラメータスタディの結果、グリップの小形化とフィードバック制御系の性能限界を超えるソフトで安定した把持を両立する最適変形制御条件の存在を確認し

た。

(3) 開ループ系および閉ループ系における受動的変形様相制御の役割の解明

研究全体を通して得られた結果を比較し、受動的変形様相制御の役割について検討した。弾性フィンガーグリップの小形化およびソフトで安定な把持という二つの各制御目的に対して得られた最大把持力発生時の変形状を図4および図5に示す。それぞれの目的に最適な受動的変形制御要素の配置は異なっており、二つの制御目的を両立する受動的変形制御要素の最適な配置は、各制御目的に最適な配置の間に存在し、両制御目的の間の重みのバランスによって決定される。グリップの小形化を目的とした制御は、弾性フィンガーの弾性大変形による把持力増大の効果[11]を損なわずにフィンガー先端付近の剛性を増大させ、最大把持力を飛躍的に増大させる役割を果たし、グリップのソフトで安定した把持を目的とした制御は、対象物とのソフトな接触の後にフィンガー全体の剛性を増大させ、把持力変動を低減するフィードバック制御系の負担を軽減する役割を果たすという知見を得た。

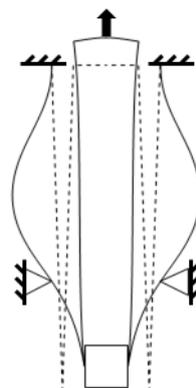


図4 小形化を目的とした受動的変形様相制御により得られた最大把持力発生時の変形状

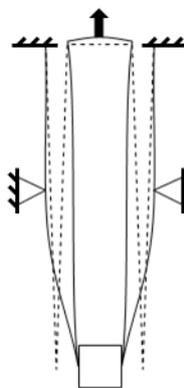


図5 ソフトで安定した把持目的とした受動的変形様相制御により得られた最大把持力発生時の変形状

#### (4) 得られた成果の意義

これまで柔軟構造の運動性を利用した機械の研究は多くの分野で活発になされてきたが、それらの研究のほとんどは柔軟構造の運動性をそのまま利用するものであり、柔軟構造の変形様相を制御することでその運動性のさらなる高機能化を達成しようとする研究は学術的に未発達な分野である。本研究の成果として得られた開ループ系および閉ループ系における受動的変形様相制御の役割に関する知見は、柔軟構造の機能的変形様相制御の基礎を築く上で大きな意義があると思われる。

#### (5) 今後の展望

本研究で対象とした弾性フィンガーグリップは、産業用ロボットの分野において高速・高精度なピックアンドプレース操作を行うロボットグリップへの応用のみならず、その構造の柔軟性を活かして軟性内視鏡の細く長い鉗子用管路を通過可能な軟性内視鏡用細径鉗子といった医療機器分野への応用も期待できる。近年、軟性内視鏡を用いて体表に一切キズをつけずに行う超低侵襲な手術法に注目が集まり、その患者への応用における多くの技術的課題解決のための研究が行われている[12]。この手術法では、狭い消化管内での使用を前提とした軟性内視鏡の構造上、硬く短く太い腹腔鏡下手術用の高性能で種類豊富な手術器具を利用できない。今後、軟性内視鏡用細径鉗子による表面が滑りやすい大きな臓器の安定した把持といった課題[13]に対し、そのような高い把持性能を実現する細径管内へ収納可能な柔軟鉗子の受動的変形様相制御機構の研究等を行い、柔軟構造の機能的変形様相制御に関する研究のさらなる発展を目指す。

#### <引用文献>

- [1] L. L. Howell, "Compliant Mechanisms," Wiley-Interscience (2001).
- [2] 多加充彦, 尾田十八, "単純モデルの組み合わせによる機能的連続体の設計法," 日本機械学会論文集(A編), Vol. 68, No. 670, pp. 873-878 (2002).
- [3] S. Chiaverini, G. Oriolo and I. D. Walker, "Hyperredundant manipulators," Springer Handbook of Robotics, Springer, pp. 261-265 (2008).
- [4] 望山洋, 山田篤史, 藤本英雄, "閉ループ弾性体による瞬発力発生機構," 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 6, pp. 492-495 (2011).
- [5] 安藤大樹, 大日方五郎, 宮垣絢一郎, "磁気記録評価装置用変位拡大位置決め機構の構造系と制御系の統合化設計," 日本機械学会論文集(C編), Vol. 71, No. 703, pp. 987-994 (2005).
- [6] 安藤大樹, 酒井猛, 大日方五郎, "磁気記録評価装置用変位拡大位置決め制御

機構の機構形状とコントローラの統合化設計," 日本機械学会論文集(C編), Vol. 72, No. 719, pp. 2146-2153 (2006).

- [7] 安藤大樹, 森英季, 大日方五郎, "高速位置決めアクチュエータの機構形状とコントローラの統合化設計," Dynamics & Design Conference 2006 講演論文集(CD-ROM), 219 (2006).
- [8] 安藤大樹, 村松直樹, 山田泰弘, "弾性フィンガーを用いた小型単純把持機構の基本特性," 日本設計工学会誌, Vol. 47, No. 6, pp. 300-306 (2012).
- [9] 安藤大樹, 谷田真裕, 村松直樹, 山田泰弘, "手指障害者用電動ピンセットの開発," 日本設計工学会誌, Vol. 47, No. 10, pp. 477-484 (2012).
- [10] H. Ando, Y. Takami and N. Muramatsu, "Enhancement of gripping efficiency of miniature gripper applying elastic buckling phenomenon by constraining deformation," Proceedings of the 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (DVD-ROM), IMECE2008-67131, Boston, MA, USA (2008).
- [11] 安藤大樹, 村松直樹, 山田泰弘, "弾性フィンガーを用いた小型単純把持機構の大変形効果," 日本設計工学会誌, Vol. 47, No. 10, pp. 469-476 (2012).
- [12] 中島清一, "内科・外科統合型次世代超低侵襲内視鏡治療機器," Medical Photonics, No. 4, pp. 44-49 (2011).
- [13] 野方誠, 大林巧, 塩見尚礼, 谷徹, "軟性内視鏡用の大把持力を有する極細径鉗子の開発," 生体医工学, Vol. 50, No. 4, pp. 345-351 (2012).

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

- ① 安藤大樹, ピックアンドプレースにおける弾性フィンガーグリップの把持力変動, 日本機械学会, 2014年8月29日, 上智大学(東京都千代田区)
- ② 安藤大樹, 弾性フィンガーを用いた小型単純把持機構の大変形解析, 日本機械学会, 2013年10月10日, 燕山大学(中国河北省秦皇島市)
- ③ 安藤大樹, Deformation Constraint of Elastic Fingers of a Monolithic Gripping Mechanism for Enhancing Handling Range and Applying to Agricultural Robots, 計測自動制御学会, 2013年9月16日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 大樹 (ANDO, Hiroki)  
埼玉工業大学・工学部・講師  
研究者番号: 60377819