

# 弾性フィンガーグリッパの把持力変動シミュレーション

安藤 大樹

埼玉工業大学工学部機械工学科

ando@sit.ac.jp

## Gripping Force Fluctuation Simulation of an Elastic-Fingered Gripper

Hiroki ANDO

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology

### Abstract

This paper presents a numerical simulation of gripping force fluctuations of a robot gripper in pick-and-place operations. This gripper consists of a linear actuator and two elastic fingers that are formed by bending a narrow strip of thin elastic plate. Its gripping mechanism utilizes large elastic deformation of the fingers to transmit force and motion of the actuator. To address large elastic deformation of the fingers, the gripper is modeled as a series of rigid links connected by torsional springs. The equation of motion of the gripper is derived on the basis of Lagrange's equation of motion. A gripping force fluctuation of the gripper in a pick-and-place operation is shown by performing a time-history analysis of the motion with Newmark's  $\beta$  method.

**Key Words:** gripper, elastic finger, large elastic deformation, Lagrange equation of motion, Newmark  $\beta$  method

### 1. 緒言

ロボットマニピュレータの先端に取り付けられ物体の把持を行うグリッパは、マニピュレータへの負荷低減のため小形かつ軽量であることが要求される。村松ら<sup>1)</sup>は、微小部品を対象に超小型化に適した単純構造の把持機構を提案した。この機構は一つの弾性部材のみから成り、一体化された複数の弾性フィンガーの開閉動作を部材全体の弾性変形により行う。弾性フィンガーはソフトな把持が要求される対象物に対して剛体フィンガーより有利である<sup>2)</sup>。筆者ら<sup>3-5)</sup>は、小形かつ軽量なグリッパの開発を目的とし

て、弾性フィンガーグリッパが把持可能な対象物の範囲を拡大するための機構について研究してきた。しかし、これまでの研究はフィンガー開閉量と把持力の拡大に焦点が当てられており、弾性フィンガーの柔軟性に起因するマニピュレーション時の把持力変動については十分検討されていない。グリッパの設計段階で把持力変動を把握しておくことは重要である。

本研究では、ピックアンドプレース操作を行う際のグリッパの把持力変動の解析を目的とした弾性フィンガーグリッパの動力学シミュレーションを行う。グリッパは、弾性関節

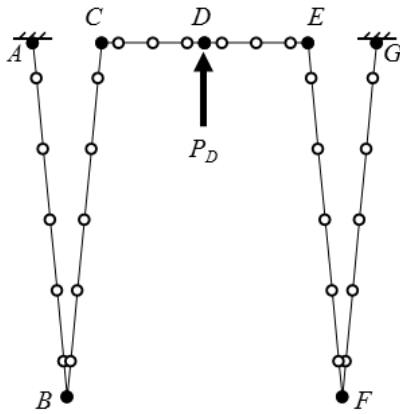


Fig.1 Discretized model of the gripper

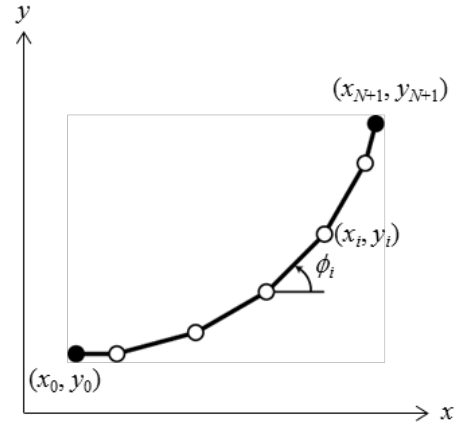


Fig.2 Discretized model of an elastic member

で連結された剛体リンクの直鎖でモデル化された弾性梁状部材を連結してモデル化される。グリッパの運動方程式は、等式制約条件を付したラグランジュ方程式で定式される。マニピュレータにより高速移動されるグリッパの把持力変動は、Newmark's  $\beta$ 法を用いて計算される。

## 2. 弾性フィンガーグリッパのモデル化

弾性フィンガーグリッパの把持機構は、一枚の細長い短冊状の弾性薄板を折り曲げることにより成形される。本研究では、成形された機構を図 1 に示すように両端が剛結合された無負荷状態にて真直な六つの弾性部材  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$ ,  $DE$ ,  $EF$ ,  $FG$  からなる構造とし、各部材を線形弾性関節で連結された剛体リンクの直鎖でモデル化する。板の両端  $A$ ,  $G$  をグリッパ本体に固定し、中央  $D$  に駆動力  $P_D$  を矢印の方向へ作用させると、フィンガー先端  $B$ ,  $F$  が互いに接近するように構造全体が弾性変形し、フィンガーが閉じる。本機構は、無負荷状態にて駆動力の作用線に対して左右対称な構造である。

図 2 に  $x$ - $y$  直交座標平面上に任意に配置された無負荷状態にて真直な弾性部材の曲げ形状の離散化モデルを示す。部材は  $N$  個の弾性関節で連結された  $N+1$  個の剛体リンクで離散化される。部材の一端を始点とし、節点番号

は始点より 0 から  $N+1$  まで、リンク番号は始点側より 1 から  $N+1$  まで付す。部材全長を  $l$  とし、リンク長さは両端以外で  $l/N$ 、両端で  $l/(2N)$  とする<sup>6)</sup>。第  $i$  リンクの  $x$  軸からの傾斜角および長さを  $\phi_i$ ,  $l_i$  で表し、第  $i$  関節の節点座標を  $(x_i, y_i)$  で表す。第  $i$  関節の曲げ角度と曲げモーメントの関係を与えるばね定数  $k_i$  は式 (1) で与えられる。

$$k_i = \frac{EI_i N}{l} \quad (1)$$

ここで、 $E$ ,  $I_i$  はそれぞれ部材の縦弾性係数、第  $i$  関節における部材の断面二次モーメントである。また、各リンクの重心をリンク中央とする。

把持対象物は図 3 に示すように線形弾性体としてモデル化される。その重心を左右のフィンガー先端を通る直線上とする。

弾性部材の幾何学的境界条件、剛体リンク条件、対象物の重心に関する拘束条件、および駆動変位を制約条件とする系の運動方程式は式 (2) のラグランジュ方程式で表すことができる。

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} - \sum_{j=1}^{N_g} \frac{\partial \lambda_j G_j}{\partial q_i} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $T$  は系全体の運動エネルギー、 $U$  はポテンシャルエネルギー、 $D$  は散逸エネルギー、 $G_j$  は等式制約条件、 $\lambda_j$  はラグランジュ乗数、 $N_g$

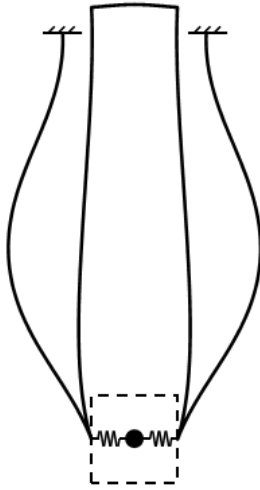


Fig.3 Model of the gripped object

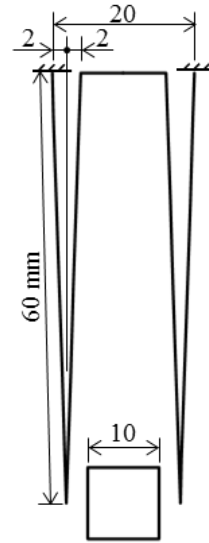


Fig.4 Gripper and the object

は制約条件の総数,  $t$  は時間,  $q_i$  は弾性部材の各節点の  $x, y$  座標および各リンクの  $x$  軸からの傾斜角,  $\dot{q}_i$  は  $q_i$  の一階時間微分である. ラグランジュ乗数  $\lambda_j$  も運動方程式 (2) の未知変数であるため, 式 (2) だけでは不定となる. そこで, 式 (2) と制約条件式の二階時間微分式を連立させ, 系の運動方程式を未知変数ベクトルにラグランジュ乗数を含めた形に拡張した式 (3) で表す.

$$[M_{m,m}]\{\ddot{q}_m\} = \{f_m\} \quad (3)$$

ここで,  $[M_{m,m}]$  は拡張された質量マトリクス,  $\{f_m\}$  は拡張された力ベクトル,  $\{\ddot{q}_m\}$  は  $\ddot{q}_i$  と  $\lambda_j$  からなる拡張された加速度ベクトルである.

### 3. 把持力変動シミュレーション

本研究では, ピックアンドプレース操作を行う際の弾性フィンガーグリッパの把持力変動の解析を目的とし, 対象物をピックアップした状態のグリッパをマニピュレータにより水平方向に高速移動させるシミュレーションを行う.

シミュレーションに用いる弾性フィンガーは, 細長い短冊状のばね用りん青銅薄板 (板幅 8 mm, 板厚 0.2 mm, 密度 8890 kg/m<sup>3</sup>, 縦弾性係数  $E = 110$  GPa) を図 4 に示すように折

り曲げて成形されるとする. 解析において, 部材  $AB, BC, CD, DE, EF, FG$  の弾性関節数  $N$  をそれぞれ 10, 10, 5, 5, 10, 10 として離散化し, 関節の減衰係数  $c_i$  を 8 mNs/rad とする. また, 駆動変位を 0.511 mm とし, 対象物の質量, ばね定数, 減衰係数をそれぞれ 5 g, 1313 N/m, 17 mNs/m とする.

対象物をピックアップした状態で静止しているグリッパの未知変数  $q_i, \lambda_j$  は, ラグランジュ乗数法を用いた準静解析により得られる<sup>7)</sup>. マニピュレータにより高速移動されるグリッパの運動は, 拡張された運動方程式 (3) を Newmark's  $\beta$  法を用いて解くことにより得られる. 本研究では, Newmark's  $\beta$  法に用いる  $\beta$  の値を 1/4 とする. マニピュレータは, 図 5 に示すようにグリッパを水平方向に 20 mm 高速移動させるとする.

### 4. シミュレーション結果

前章で述べたシミュレーションより得られた弾性フィンガーグリッパの把持力変動の結果を図 6 に示す. 対象物を把持力 0.26 N でピックアップした状態のグリッパをマニピュレータにより図 5 に示したように水平方向に高速移動させると, 把持力は最大 0.05 N (19%) 低下した.

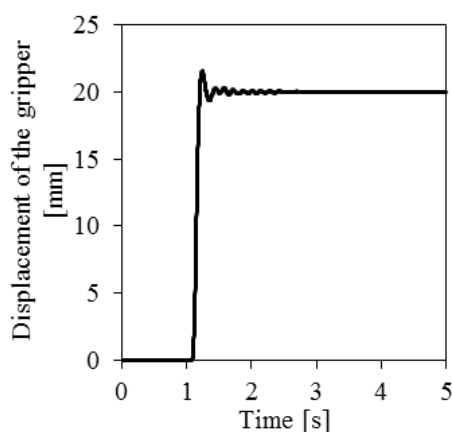


Fig.5 Time history of the displacement of the gripper

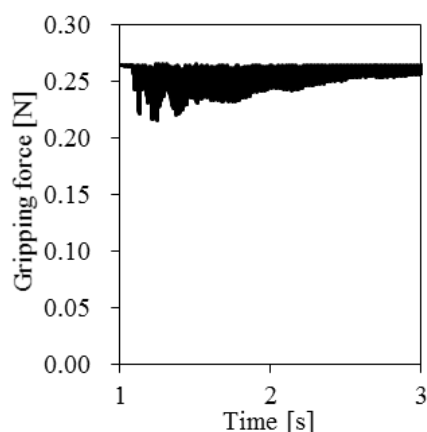


Fig.6 Time history of the gripping force

この変動はマニピュレータの加速度を抑えることにより低減されるが、そのような対応はピックアップ操作のサイクルタイムを延ばすことになる。このようなグリップの把持力変動を設計段階で把握することにより、その低減を多方面から検討することができる。

## 5. 結言

小形かつ軽量のロボットグリップの開発の一環として、弾性フィンガーグリップの柔軟性に起因するマニピュレーション時の把持力変動のシミュレーションを行った。今後、本シミュレーションの妥当性の検証および把持力変動を考慮したグリップの設計法および制御系設計法の検討を行う。

## 参考文献

- 1) 村松直樹, 伊藤秀信, 長柱の変位拡大原理を利用した小形グripperの開発, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.646 (2000), pp.1906-1911.
- 2) Becedas, J., Payo, I. and Feliu, V., Two-flexible-fingers gripper force feedback control system for its application as end effector on a 6-DOF manipulator, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.27, No.3 (2011), pp.599-615.
- 3) Ando, H. and Muramatsu, N., Gripping efficiency of simple gripping mechanism with hinges,

*Proceedings of the 2008 ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)* (2008), Paper No. DETC2008-49768.

- 4) Ando, H., Takami, Y. and Muramatsu, N., 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 (IMECE)* (2008), Paper No. IMECE2008-67131.

5) Ando, H. and Muramatsu, N., Deformation constraint of elastic fingers of a monolithic gripping mechanism for enhancing handling range and applying to agricultural robots, *Proceedings of the SICE Annual Conference* (2013), pp.1606-1611.

6) 桑水流理, 吉川暢宏, 中桐滋, 柔軟フレーム構造の納まり形状シンセシス, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.65, No.631 (1999), pp.682-687.

7) 安藤大樹, 村松直樹, 山田泰弘, 弾性フィンガーを用いた小形単純把持機構の大変形効果, 日本設計工学会誌, Vol.47, No.10 (2012), pp.469-476.