

アクチュエータ特性のばらつきを考慮した Loosely Coupled Mechanism の静力学解析

吉村 尚洋, 柴田 瑞穂, 平井 慎一 (立命館大学)

Static Analysis of Loosely Coupled Mechanism Considering Actuator Property Variations

Takahiro YOSHIMURA, Mizuho SHIBATA, Shinichi HIRAI (Ritsumeikan Univ.)

Abstract: This paper describes a static analysis of loosely coupled mechanism, which is a humanlike flexible link, considering actuator property variations. We simulate the motion of this link including random parameters and analyze statistically. This results shows that an expectation of the link angle converge using many actuators. In addition, we confirm that an analysis of static equations shows this effect.

1 緒言

近年、人間の関節を参考にして筋肉や軟骨部などの柔軟要素を積極的に利用する研究がなされている。筆者らは人間の関節を元に、軟骨や筋肉に相当する要素を持つリンク機構を提案している。このリンク機構を loosely coupled mechanism (LCM) と呼ぶ。LCM は一般的なジョイントとは異なり、人間の軟骨部を想定した粘弾性体を介して、ソケットとリンクが柔らかく接続されている。リンクは人工筋肉の収縮により引張られることで、屈曲運動する。また、外力に対してリンクは容易に並進・回転する。

これまでに形状記憶合金 (shapme memory alloy; SMA) コイルを用いた LCM の角度制御を実現した [1]。さらに、単体では発生力の小さい SMA をアクチュエータ束として複数並列に使用することで、全体として発生力が大きくなることを確認した。Fig.1 にアクチュエータ束で駆動される LCM を示す。各 SMA コイルに同じ電圧を与えると協調的にリンクに作用するが、特性のばらつきなどの影響により意図しない横ずれや傾きが起きる場合もある。Fig.2 は 8 本の SMA によって駆動されるリンクの動きを示しており、リンクがずれや傾きを伴いながら上方へ移動していくことがわかる。

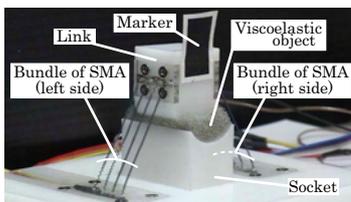


Fig.1 Loosely coupled mechanism driven by actuator bundles

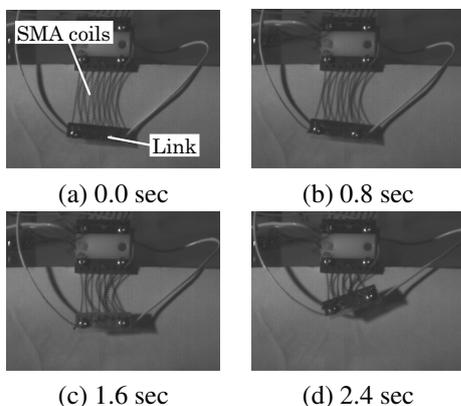


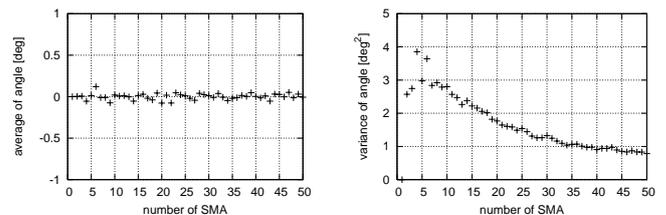
Fig.2 Motion of the link pulled by actuator bundles

本論文では特性にばらつきのある SMA をアクチュエータ束としたときの LCM の動作について、特に SMA の本数に注目して解析する。はじめに、SMA コイルのパラメータをランダム値として、繰返しリンクの運動をシミュレーションした結果を統計的に解析する。次にこのシミュレーションをふまえて、複数のばねをリンクに接続し、ばね定数を確率変数としたときの静力学解析を行う。

2 運動シミュレーションの統計的解析

複数の SMA コイルによって駆動されるリンクの運動シミュレーションと、その結果の統計的解析について述べる。ここでは 2 次元平面内にある棒状の剛体リンクに、重力と各 SMA の引張力が加わったときの運動をシミュレーションする [1]。SMA のモデリングには生田らのモデル [2] と Madill らのモデル [3] を参考にした。SMA は電流を受けて温度が上昇し、相変態が起こる。この相変態に伴い SMA は剛性が高くなるので、長さや姿勢からリンクに与える力が計算される。

本論文では SMA の本数を 2 本から 50 本まで増やしなから、それぞれ 1000 回シミュレーションした。各 SMA の初期長さを 9 mm から 11 mm の範囲の一様乱数から決める。設定した SMA の長さに比例して電気抵抗を 5.5 Ω から 6.5 Ω、ばね定数を 5.5 g/mm から 4.5 g/mm に設定した。全



(a) average (b) variance
Fig.3 Relationship between number of SMA and link angle

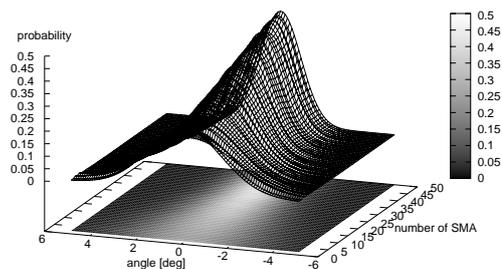


Fig.4 Distribution of link angle

ての SMA は時刻 0 sec において 20 mm に伸ばした状態とし、長さ 20 mm のリンクを等分割するように接続する。シミュレーション時間は 2 sec とし、その間全ての SMA に同じ 4 V の電圧を加え、運動するリンクの位置や速度を記録する。

Fig.3 に時刻 2 sec における静止状態のリンク角度を記録し、平均と分散を計算した結果を示す。リンク角度の平均は SMA の本数によらずほぼ 0 deg であるが、分散は SMA の本数が増加するにしたがって減少していく傾向がある。Fig.4 は得られた角度データが正規分布であると仮定して確率密度関数を計算し、グラフにしたものである。SMA 本数が増えると、リンク角度の分布がより狭い範囲に収まることがわかる。以上のことから SMA の本数が多いほど、リンクの傾きを抑制できるといえる。ここでは静止時のリンク角度についてのみ述べたが、左右方向の位置ずれや速度についても同様の傾向を確認している。

3 確率変数を用いた静力学解析

前節の結論を、簡単な力学モデルに置き換えて解析的に示す。Fig.5 にこのモデルを図として表す。ここでは SMA コイルの代わりに n 本のばねでリンクを支えるものとする。また、簡単のためにばねの初期長さは 0 とし、全長が $2l$ のリンクを等分割するように配置する。リンクの中心座標と角度を $x = [x, y, \theta]^T$ 、質量を m とする。このとき i 番目のばねの端点の変位ベクトルは次のようになる。

$$d_i = \begin{bmatrix} x + \frac{l}{n-1}(n-2i+1)(\cos\theta - 1) \\ y + \frac{l}{n-1}(n-2i+1)\sin\theta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

ばね定数を確率変数 K_i 、重力を g とすると、 n 本のばねによる弾性エネルギーと重力による位置エネルギーを合わせた全エネルギーは

$$U = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} K_i |d_i|^2 \right) + mgy \quad (2)$$

と表せる。リンクが静止状態にあるとき U は極小値をとるので

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

となり、これを解いて整理するとリンク角度は次のように表せる。

$$\tan\theta = \frac{F}{G} \frac{mg}{l}. \quad (4)$$

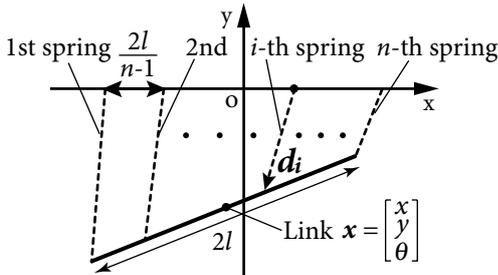


Fig.5 Model of LCM for static analysis

ただし式 (4) で F, G は以下のとおりである。ここで j は i 番目のばね以外のばねを表す。

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{n-2i+1}{n-1} K_i, \quad (5)$$

$$G = \frac{4}{(n-1)^2} \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n (i-j)^2 K_j K_i. \quad (6)$$

確率変数であるばね定数 K_i の平均を μ 、分散を σ^2 としたときの、式 (4) の分布とばねの本数との関係を探る。式 (5) について、平均は $E(F) = 0$ である。分散は以下のようになる。

$$V(F) = \frac{n(n+1)}{3(n-1)} \sigma^2. \quad (7)$$

また、式 (6) について平均と分散は次のように表せる。

$$E(G) = \frac{n^2(n+1)}{3(n-1)} \mu^2, \quad (8)$$

$$V(G) = \frac{4n^2(2n^3 + 2n^2 - 3n - 3)}{15(n-1)^3} (n\mu^2\sigma^2 + \sigma^4). \quad (9)$$

ここで F と G が正規分布であると仮定すると、その値はほぼ 3 シグマ範囲に収まるといえる。式 (4) が最大値あるいは最小値をとるように、符号に注意して式 (7) から式 (9) を使って書くと、

$$H = \frac{\pm 3\sqrt{V(F)}}{E(G) - 3\sqrt{V(G)}} \frac{mg}{l} \quad (10)$$

となる。式 (10) は n の次数から、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} H = 0 \quad (11)$$

となるので、設定したモデルにおいてばねの本数を多くすると、リンク角度の期待値は 0 に収束する。

4 結言

本論文では SMA の本数が LCM に与える影響について、シミュレーションと静力学解析を使って検討した。まず SMA のパラメータをランダムに設定してシミュレーションを繰り返し、統計的解析結果から SMA の本数が多いほどリンクの傾きを抑制できることを確認した。次にこれに類似した静力学モデルを考え、ばね定数を確率変数としたときのリンク角度の期待値の範囲を求め、これが SMA の本数を増やしていくと 0 に収束することを導出した。これらのことから、特性にばらつきのある SMA でも十分多く並列に用いることで全体として発生力を大きくし、かつ期待値を収束させることができるといえる。

参考文献

- [1] 吉村, 柴田, 平井: "アクチュエータ束により駆動される Loosely Coupled Mechanism の運動解析, SICE SI 2007, CD-ROM, 2007.
- [2] K. Ikuta, M. Tsukamoto, and S. Hirose: "Mathematical Model and Experimental Verification of Shape Memory Alloy for Designing Micro Actuator", *Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp.103-108, 1991.
- [3] D. R. Madill and D. Wang: "Modeling and L2-Stability of a Shape Memory Alloy Position Control System", *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol.6, No.4, pp.473-481, 1998.