

SMA を用いた Loosely Coupled Joint の視覚フィードバック制御

吉村 尚洋, 柴田 瑞穂, 平井 慎一 立命館大学

Visual Feedback Control of Loosely Coupled Joint Using SMA Actuators

Takahiro YOSHIMURA, Mizuho SHIBATA, Shinichi HIRAI
Ritsumeikan Univ.

Abstract: We presents a link mechanism with a *loosely coupled joint*, modeled on human joints. A viscoelastic object functions as cartilage and soft actuators as muscles. We show that the link mechanism using shape memory alloy (SMA) actuators to regulate the angle of the link. The compliance of the link is variable due to the SMA actuators and the cartilage area.

1 緒言

近年, 人間の関節を模した滑らかに動く回転関節が研究されている [1, 2]. 岡田らは, 肩関節の動きを模した, 閉リンク 3 自由度構造の関節機構を開発した [1]. しかし, この関節機構では人間の軟骨に相当する部分は考慮されていない. Mizuuchi らは, 人間の脊椎にあたる部分の機構を提案し, 背骨を有するヒューマノイドを開発した [2]. 脊椎部にはゴムを使用しており, この部分が人間の軟骨に相当するが, 軟骨部が持つ運動の特徴は明らかにされていない. そこで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た [3]. このリンク機構を *loosely coupled joint* と呼ぶ. Fig.1 に平面内で駆動する *loosely coupled joint* の概略図を示す. *loosely coupled joint* は一端を半円形状にしたリンクおよびソケットを, 人間の軟骨を想定した粘弾性体を挟んで組み合わせた機構である. アクチュエータには人工筋肉を用い, リンクが屈曲運動できるように配置する. 粘弾性体の変形と人工筋肉の長さ変化に伴いリンクの位置および角度が変化するが, 一般的な回転リンク機構と異なり, リンクは円形の軌道を描かない [3]. 本論文ではこのリンク機構を実際に作成し, フィードバック制御とリンクのコンプライアンスについて実験的に検証する.

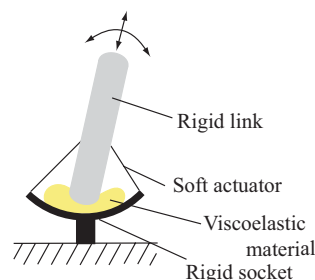


Fig.1 Concept of loosely coupled joint

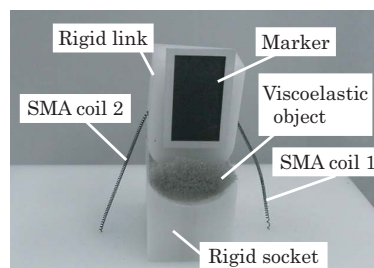


Fig.2 Prototype of loosely coupled joint

2 実験

2.1 試作機

アクチュエータとして SMA コイル (トキコーポレーション 製 BMX200) を用いて作成した *loosely coupled joint* を Fig.2 に示す. 粘弾性体には厚さ 10 mm, 質量 0.08 g, ヤング率が約 40 kpa のポリウレタンスポンジを使用した. リンクとソケットはポリアセタール製で, それぞれ組み合わせる部分を半円形に加工している. リンクが滑らないようにスポンジとリンク, ソケットをそれぞれ接着した. リンク長は 27 mm で, 人間の指と同程度である. PC の D/A 出力からドライバ IC (Texas Instruments 製 ULN2003AN) に電圧を加えて SMA に電流を流し, リンクを動作させる.

2.2 フィードバック制御

粘弾性体や SMA に非線形性や特性のばらつきがあるため, *loosely coupled joint* をフィードフォワードで制御することは困難である. よってフィードバックを用いて制御し, その性能を確かめる. ただし回転中心が変化するという構造上の特徴から, エンコーダおよびポテンショメータで角

度を測定することはできない. したがって本論文では CCD カメラを用いてリンクを撮像し, 画像処理を適用してリンクの角度を得る. 具体的には Fig.2 に示したように, 大きさ $9.5 \times 19.5 \text{ mm}^2$ のマーカーをリンク上に配置し, その 2 次モーメントからリンクの角度を算出する. 時刻 t における角度を $\theta(t)$ として, 以下の式を用いて比例制御する.

$$\begin{cases} v_{\text{inp}}^1 = -K_P(\theta(t) - \theta_d) + v_{\text{offset}}, \\ v_{\text{inp}}^2 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

ただし $v_{\text{inp}}^1, v_{\text{inp}}^2$ はそれぞれ, SMA coil 1, 2 を駆動するドライバ IC に加える電圧, K_P は比例ゲイン, θ_d は目標角, v_{offset} はドライバ IC が動作する最低電圧とする. v_{offset} を 1.7 V, 目標角 θ_d を 20 deg とし, ゲイン K_P を 0.05 と 2.0 と 2 通りに設定して実験した. このときの角度の推移を Fig.3 に示す. ゲイン K_P が 0.05 の場合, リンク角度は 12% の定常偏差を残して目標値に収束する. ゲイン K_P を 2.0 と大きくすると定常偏差は 0.86% まで小さくなった.

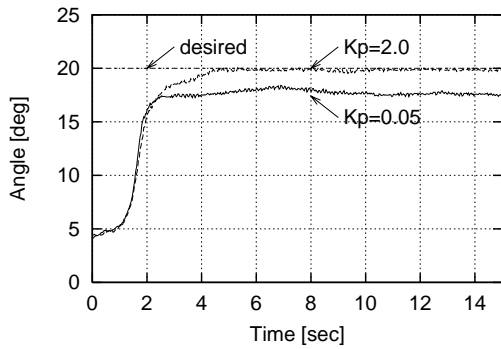


Fig.3 Experimental results under P control

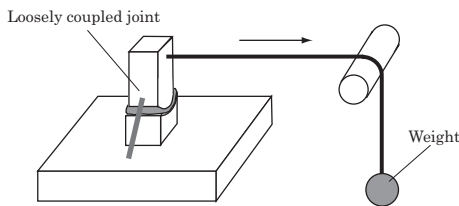


Fig.4 Experimental setup for measuring compliance

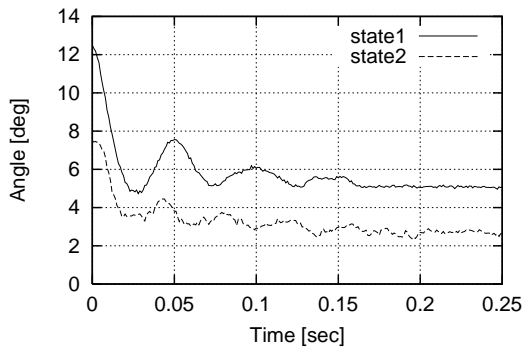


Fig.5 Test results for compliance

2.3 コンプライアンスの検証

人間を模したロボットには柔軟さが重要であると考えられる。本節ではリンクのコンプライアンスを検証する。Fig.4 に示すように、loosely coupled joint を紐を介して 50 g のおもりで引張る。この紐を切って荷重が無くなった後のリンクの角度変化を調べた。また両方の SMA に通電させてリンクを引張り、通電させないときと比べて応答がどのように変化するかを調べた。Fig.5 は CMOS カメラを用いて、サンプリング周波数 1,000 Hz で計測したリンク角度の変化である。実線は SMA に通電しない state1、破線は v_{inp}^1 に 3.0 V、 v_{inp}^2 に 2.0 V を印加して通電させた state2 の実験結果である。この電圧はなるべくリンクが垂直に沈むように選んだ。Fig.5 より初期状態の角度を比べると、state1 では 12 deg、state2 では 7.5 deg となっており、通電している状態の方が傾きが小さくなっている。これらのことから loosely coupled joint はコンプライアンスを有し、複数の人工筋肉を組み合わせて動作させることでコンプライアンスが変化することがわかる。

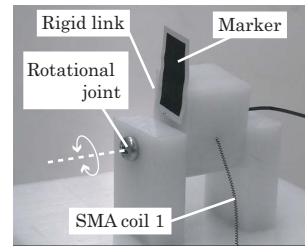


Fig.6 Joint mechanism without the cartilaginous area

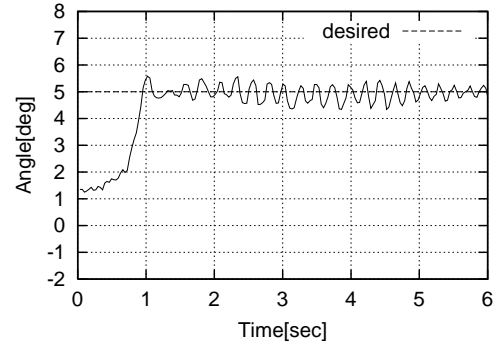


Fig.7 Experimental result of joint without the cartilaginous area

2.4 軟骨部の有効性の検証

前節までは軟骨を有するリンク機構について議論してきた。本節では一般的な回転対偶によって接続されたリンク機構と loosely coupled joint とを比較する。Fig.6 にリンク接続部にベアリングを用いた試作機の概観を示す。3.2 節と同様のシステムにおいて K_P を 2.0、目標角 θ_d を 5 deg として実験したときの結果を Fig.7 に示す。角度制御は Fig.3 と比べて明らかに不安定になっており、軟骨としての粘弾性体が loosely coupled joint の安定性に大きく関わっていることが示唆される。

3 結言

軟骨としてポリウレタンスポンジ、筋肉として SMA コイルを用いて人間の関節を模した loosely coupled joint を試作した。この試作機をビジュアルフィードバックを用いて比例制御し、リンク角度が収束すること、ゲインの増加に従い定常偏差が小さくなることを確認した。また、2つのアクチュエータを組み合わせて動作させることで、リンクのコンプライアンスが変化することがわかった。さらに、粘弾性体が機構の安定性に影響を与えることを実験的に確かめた。

参考文献

- [1] 岡田, 中村: "サイバネティック・ショルダの開発 人間の肩の動きを模倣した 3 自由度機構", 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.5, pp.74-82, 2000.
- [2] I. Mizuuchi, R. Tajima, T. Yoshikai, D. Sato, K. Nagashima, M. Inaba, Y. Kuniyoshi and H. Inoue: "The Design and Control of the Flexible Spine of a Fully Tendon-Driven Humanoid Kenta", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligence Robots and Systems*, pp. 2527-2532, 2002.
- [3] 柴田, 日野, 上段, 平井: "Loosely Coupled Joint の試作とモデル化", SICE SI 2005.