

柔軟ビームの動特性を活用した 非同期型高速リサージュ曲線状振動生成法

機械工学専攻 機械工学コース
東森研究室 宮崎 悠人

1. 背景・従来研究

近年、柔軟構造体の動的な形状変化を活用したソフトロボットが盛んに研究されている[1]. 粘弾性と異方性を有する柔軟構造体に対して振動を与え、特定の周波数で振幅が増大する、共振を活用することによって駆動されるロボットが開発されてきた。しかし、従来研究ではモータによって入力される波形が正弦波状のものに限定されていることが多く、柔軟構造体の動的挙動は、直線、円弧、楕円形状の振動軌道に留まり、ロボットの動作パターンを多様化するまでには至っていなかった。

2. リサージュ曲線状振動生成法（同期型）

著者らは、独自の振動アクチュエータを用いて、2 正弦波の合成波を与えることで多様な振動軌道を形成する手法を構築した[2]. 当該アクチュエータは図 1 (a-i) に示したように回転型モータと矩形断面の柔軟ビームおよび付加質量を組み合わせた構造を有しており、図 1 (a-ii) に示したように柔軟ビーム断面両主軸 (x, y 軸) がモータ回転軸に対して非平行となっていることを特徴とする。次のような入力を回転型モータに与える。

$$\theta(t) = a_1 \sin(2\pi f t - \zeta_f) + a_2 \sin(2\pi \gamma f t - \zeta_{\gamma f} + \phi) \quad (1)$$

a_1, a_2 を入力振幅、 f を入力周波数、 $\gamma = \{1.5, 2, 3\}$ を周波数比、 ϕ を位相差とする。 $\zeta_f, \zeta_{\gamma f}$ は調整用パラメータとする。柔軟ビームの共振周波数は x 軸方向（断面短手方向）に対して小さく、 y 軸方向（断面長手方向）に対して大きくなる性質があり、低周波成分は x 軸方向に、高周波成分は y 軸方向に振動しやすい。したがって、 f として x 軸方向の共振周波数に近い値を与えることで、先端点はおおむね x 軸方向に周波数 f で、おおむね y 軸方向に周波数 γf で振動し、2 つの直交する単振動が合成されることによって図 1 (b-i)–(b-iii) に示したような振動軌道が形成される。このような 2 つの直交する単振動の合成によって描かれる曲線はリサージュ曲線と呼ばれる。

図 2 (a) に、当該アクチュエータを適用したマニピュレータを示す。マニピュレータは柔軟アクチュエータ先端点にプレートを取り付けた構造を有している。回転型モータに対して、式(1)のような 2 正弦波の合成波入力を与えプレートをリサージュ曲線状に振動させることで、摩擦力と慣性力を活用してプレート上の対象物を操作する。周波数比 1.5 (図 2 (b-i))、2 (図 2 (b-ii)) の場合は並進、3 (図 2 (b-iii)) の場合は回転が生じる。

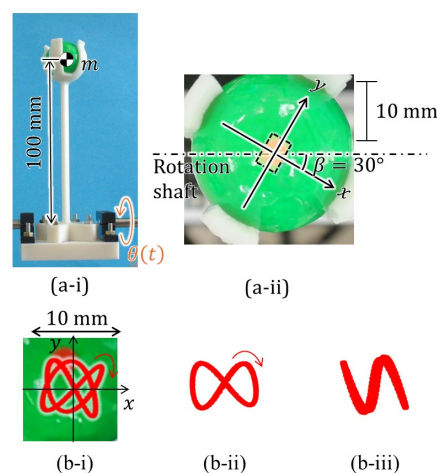


図 1 : アクチュエータ駆動の様子 (a-i) 振動アクチュエータ. (a-ii) アクチュエータを上面からみた様子. (b-i) $\gamma=1.5$, (b-ii) $\gamma=2$, (b-iii) $\gamma=3$ の場合の生成軌道例。

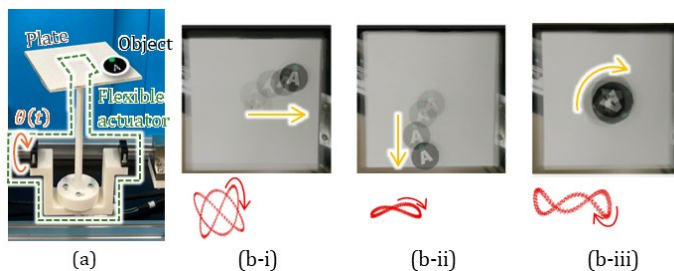


図 2 : (a) マニピュレータ. (b-i) $\gamma=1.5$, (b-ii) $\gamma=2$, (b-iii) $\gamma=3$ の場合のプレート中心軌道及び対象物操作の様子。

3. 非同期型振動生成法

図 1 (b-i) のような 8 の字状の振動軌道
は、昆虫をはじめとした飛翔性動物の翼端軌道でも観察されることが知られており[3], 著者らは、当該アクチュエータを小型飛翔ロボットの羽ばたき機構に適応することを見据えている。しかし、数十～数百 Hz の高速な振動を生成する必要がある、回転型モータの応答性がボトルネックとなる。再度、飛翔性動物に注目してみる。生体システムは、一般的に入力として神経による単純なインパルスが採用されており、そのタイミングや強さによって身体運動が制御されている。また、非同期型間接飛翔筋と呼ばれる、筋骨格系の共振周波数に基づいて、神経インパルスの周波数よりも大きい羽ばたき周波数を実現できるシステムの存在が知られている[4]。著者らは、このような生体システムの有する特徴から着想を得て、インパルス列入力を採用し、柔軟ビームの持つ共振周波数を活用することで入力の周波数よりも振動の周波数が大きくなるような振動生成法を構築した[5]。図 3 に実験の様子を示す。アクチュエータは図 1 (a-i) のものと同様の構造を有しており、柔軟ビームの共振周波数は x 軸方向と y 軸方向で 1:2 となるように調整されている。はじめに、入力 $\theta(t)$ として x 軸方向の共振周波数と同じ周波数のインパルス列入力を与える（図 3 (a)）。このとき x 軸方向では、先端点が 1 往復するごとに、y 軸方向では 2 往復するごとにインパルスが入力されるため、x 軸方向には x 軸方向の共振周波数に基づいて、y 軸方向には y 軸方向の共振周波数に基づいて振動が生じ、8 の字状のリサージュ曲線状軌道が生成される。続いて、その状態からインパルス列入力の周波数を 1/3 にして与える。この場合では x 軸方向では 3 往復するごとに、y 軸方向には 6 往復するごとにインパルスが入力され、それぞれの共振周波数で振動することによって、同様の振動軌道が生成される（図 3 (b)）。さらに周波数を 1/5 にして与えた場合でも、粘性減衰による軌道の乱れが生じているものの、おおむね 8 の字状の軌道が維持されている（図 3 (c)）。以上によってインパルス列入力を与える手法により、入力の周波数よりも大きい周波数の振動を生成することが示された。

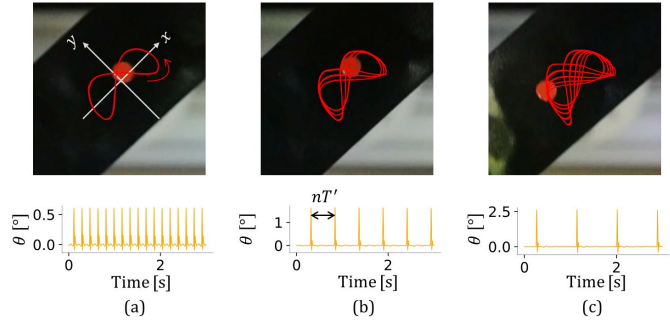


図 3：非同期型振動軌道形成手法。(a) x 軸方向の共振周波数と一致した周波数および、その (b) 1/3, (c) 1/5 の周波数のインパルス列入力を与えた場合の生成振動軌道と入力 $\theta(t)$ 。

4. まとめ

本研究では、構造的な異方性を有する独自の振動アクチュエータの 2 次元リサージュ曲線状振動生成法を提案した。今後は非同期型振動生成法を改良し、10 Hz オーダーの低速な入力から 100 Hz オーダーの高速振動の生成に取り組み、小型飛翔ロボットの羽ばたき機構への適用を行う予定である。

参考文献

- [1] 一般社団法人日本ロボット学会：“特集：刺激 - 応答性に基づくロボティクス”，日本ロボット学会誌第 42 巻 8 号，2024.
- [2] Y. Miyazaki and M. Higashimori: “Generation of Desired Lissajous Curve-Like Vibrational Orbits for a Single Motor-Based Flexible Actuator,” IEEE Robot. Automat. Lett., vol. 10, no. 4, pp. 3660-3667, 2025.
- [3] H. Liu: “生物規範飛行の学理とバイオミメティクス”，生物多様性を規範とする革新的材料技術，pp. 55-67, 2013.
- [4] 岩本裕之：“昆虫たちのすごい筋肉：1 秒に 1000 回羽ばたく虫もいる”，pp. 55-82, 裳華房，2019.
- [5] 宮崎悠人，東森充：“柔軟ビームの動特性を活用した非同期型高速リサージュ曲線状振動軌道形成法”，日本ロボット学会誌，2025 (accepted).