

# チェビシェフ機構を用いた線上移動機構の開発

○西田裕貴(立命館大学) 平井慎一(立命館大学)

## 1. 緒言

近年、航空改正法が施行されるなど、マルチコプターの商用利用に向けて、環境整備がなされてきている。マルチコプターとは無線により遠隔操作されるUAVの一種であり、放射線上に4つから8つのローターブレードを配置するフレームデザインが特徴である。回転方向の異なるローターの差動推力を調整して、安定した飛行を可能にしている。そのため、個人から企業に至るまで、上空からのカメラ撮影や農薬散布など、様々な用途で使用されている。マルチコプターは飛行できることで、人が梯子やリフトを使わなければ届かない高所に容易に到達することができ、高所での作業に適していると言える。

高所での枝切り作業を人が行う場合、高所での作業が必要となってくるので、落下事故などの危険が伴う。また、作業の能率を考えたときに梯子や、高所作業車を用いた枝切り作業では目的とする切断位置へのアプローチの際に目標以外の枝が障害になることがある。マルチコプターに枝切り機構を搭載した場合、人に対するリスクは軽減されるが同様の障害が発生する。

着脱可能なロボットに枝切り機構を組み合わせることで、マルチコプターの接近が難しい場所でも、接近可能な場所に着脱可能なロボットを、目標位置へのアプローチが可能となる。本研究では、マルチコプターに搭載でき、着脱可能な線上移動機構をもったロボットを開発することを目的とする。

## 2. 着脱可能ロボットの機能と利点

### 2.1 着脱可能ロボット

着脱可能ロボットの利点は2つある。1つ目は、マルチコプターから独立して作業を行うことが可能なため、マルチコプターがホバリングしながら枝を切る作業に比べて、バッテリーの消耗を抑えることができる点である。2つ目は、枝切りなどの作業や、線上移動を行う際に、マルチコプターの機体自体が邪魔になる場合があるので、移動をマルチコプターに一任し、作業を着脱可能ロボットにさせることで、作業能率の向上が見込める点である。

### 2.2 枝切り作業

作業手順を以下に示す。

1. マルチコプターの上部に本研究のロボットを搭

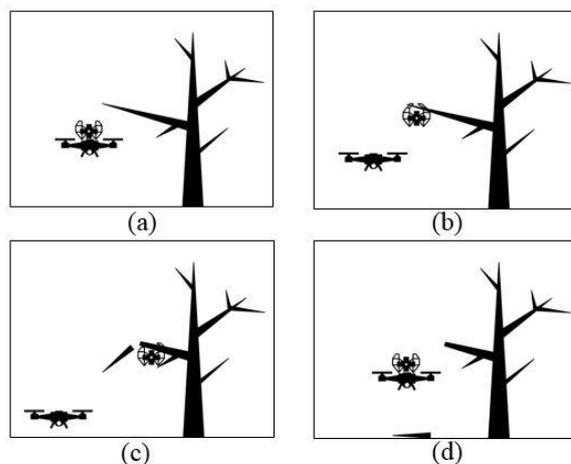


図1 作業手順

載し、目標の枝まで飛行(図1(a))

2. アームで枝を把持し、マルチコプターがロボットから離脱(図1(b))

3. ロボットが枝を切るポイントまで移動し、枝切り(図1(c))

4. マルチコプターがロボットに接近、結合した後に飛行(図1(d))

## 3. チェビシェフリンク機構

チェビシェフリンク機構は閉リンク機構の1つである。閉リンク機構は剛性が高く、しかも可動部を軽量化できるので、高速・高精度・高負荷の作業に適しており、幅広い分野での応用が期待されている。閉リンク機構の中でも1つのモーターで疑似的直線運動が可能なチェビシェフリンク機構はコスト面、重量面において優れている。

チェビシェフリンク機構は、リンク機構について30年以上研究を重ねたパフヌティ・チェビシェフ(Pafnuty Chebyshev)によって発明されたものである。チェビシェフリンク機構は、回転運動を直線運動に変換する。

$$\text{条件 } \|\overrightarrow{J_{m0}J_{m1}}\| : \|\overrightarrow{J_{m0}J_{s0}}\| : \|\overrightarrow{J_{s0}J_{s1}}\| : \|\overrightarrow{J_{m1}J_{s1}}\| : \|\overrightarrow{J_{s1}P}\| =$$

1:2:2.5:2.5:2.5(1) を満たすとき、図2で示すD字の軌跡を描くことができる。P点を描く軌跡は

$$\left( 2 + 2(\sin \theta) \sqrt{\frac{5 + \cos \theta}{5 - 4 \cos \theta}}, 2 \left( 2 - \cos \theta \sqrt{\frac{5 + 4 \cos \theta}{5 - 4 \cos \theta}} \right) \right) \quad (2)$$

と表される。

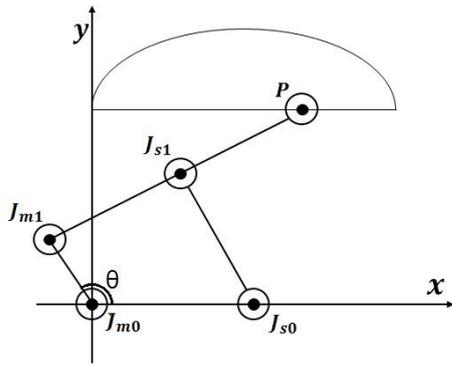


図2 チェビシェフリンク

## 4. 線上移動機構

### 4.1 システム構成

線上移動機構のシステム構成について記す。図3に示すとおり、線上移動機構は移動機構と把持機構の2つの構造で構成されている。把持機構で枝を把持し、移動機構によって把持機構を一定の軌道を描かせることで、枝状を前進、後進することが可能である。また、図3の写真の方向を正面とした時の線上移動機構の長さや重量を表1に示す。幅と高さは、機構が変形するため、最小値と最大値を記載する。

### 4.2 梁とたわみの関係性

本研究のロボットは、対象物の把持を行った後に線上移動を行うため必然的に片持ち状態の梁となる。把持対象物がロボットの中心に来ると仮定し、両持ち梁と片持ち梁を比較する。対象物とリンクは点接触とみなし、分布荷重ではなく集中荷重として計算する。片持ち梁のたわみを $\delta_x$ [m]、両持ち梁のたわみを $\delta_x$ [m]、荷重を $P$ [kN]、梁の全長を $l$ [m]、ヤング率を $E$ とする。たわみ $\delta_x$ と $\delta_x$ の比は

$$\frac{\delta_x}{\delta_x} = \frac{Pl^3 \left(1 - \frac{3x}{2l} + \frac{x^3}{2l^3}\right)}{48EI \left(\frac{3x}{l} - \frac{4x^3}{l^3}\right)} = 16 \times \frac{2l^3 - 3xl^2 + x^3}{6xl^2 - 8x^3} \quad (3)$$

と表される。例えば、全長を1[m]、たわみを求める箇所を0.5[m]と仮定した際、片持ち梁は両持ち梁の5倍のたわみが発生することとなる。

対象物把持の際にかかる自重による影響を可視化するため、同じスケールでモデルを作成し、構造解析を行った結果が図4である。拘束方法は全て回転運動のみを許容している。

式(3)、図4に示した通り、片持ち集中荷重によるひずみが閉リンクの動作に影響を与える度合いは無視できないことは明白なため、たわみを考慮した機構を実験的に製作する。

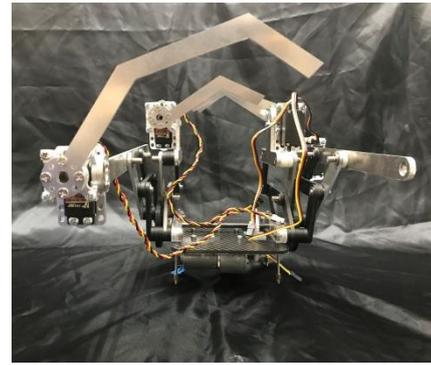


図3 全体図



図4 構造解析

表1 ロボットの寸法

重量	506 [g]
幅	257-560 [mm]
奥行き	337 [mm]
高さ	230-305 [mm]

### 4.3 移動機構

#### 4.3.1 使用部品とその役割

移動機構はチェビシェフ機構に習った閉リンク機構によって構成されている。移動機構はロボットの両サイドに付いており、合わせて2つある。移動機構1つにつきリンク部品は14個、スペーサーは16個によって構成されている。

#### 4.3.2 ジョイントの拘束方法

リンクは回転運動と、平面運動を可能とした拘束方法を用いている。ジョイント部には接触による外力がかかり、動作平面とは異なる方向に力がかかってしまう。それに伴うリンクの変位を抑えるためのEリングとジョイント部に使用しているベアリング、シャフト、ベアリングホルダを図5に示す。

リンクの可動範囲を拘束し、動作平面内のみでの運動を可能とするため、リンク同士の距離感を適切に保つための、長さの異なるスペーサーを用いている。リンクが平面内での運動をはずれると、不適切な箇所に応力が集中してリンクが折れてしまう場合や、モーターの力が十分に各リンクに伝達されずに動作が停止する事態が発生するため、スペーサーの長さは適切でなければならない。



図5 ジョイント部の使用部品

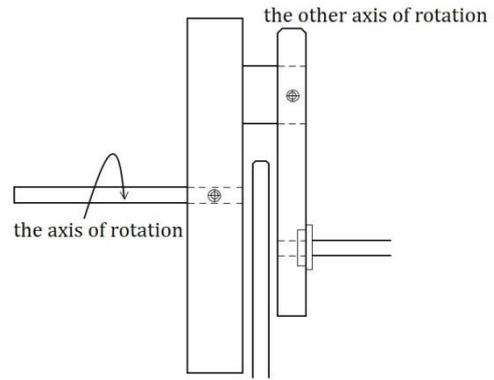


図6 クランクシャフト

### 4.3.3 クランクシャフト

クランクシャフト (crankshaft) はピストンの往復運動を回転運動に変えるために用いられるケースが多く、一般的にエンジンの構成部品としてとらえられている。本研究では図6に示す通り、アクチュエーターの回転軸とは異なる回転軸を生成する目的でクランクシャフトを用いる。1つのモーターが回転軸を2つ生成することで、線上移動をモーター1つで行うことができ、省スペース化と軽量化が図れる。

### 4.4 把持機構

対象物の把持を行うリンクは4つある。4つのリンクは閉リンクとのジョイント部にあるサーボモーターの回転により、開閉動作を行う。サーボモーターはHiTEC D995TWを使用する。スペックを表2に示す。

表2 サーボモーターのスペック

必要電圧	AT7.4[V]
回転速度	0.12[s/60°]
トルク	29.0[kg・cm]
重量	66[g]

4.2節で示した通り、対象物と接触するリンクには大きな曲げモーメントがかかる。本研究のロボットにおいては曲げモーメントがかかる箇所はサーボモーターである。曲げモーメントによる負荷を分散し、サーボモーターが耐えうる機械的負荷を高めるために図7の構造を採用した。

## 5. 実験

### 5.1 実験目的

第4章で製作した線上移動機構の有用性を凹凸のない人工物を対象として線上移動実験を行う。接触による外力が働いていない状態での動作は2節に沿

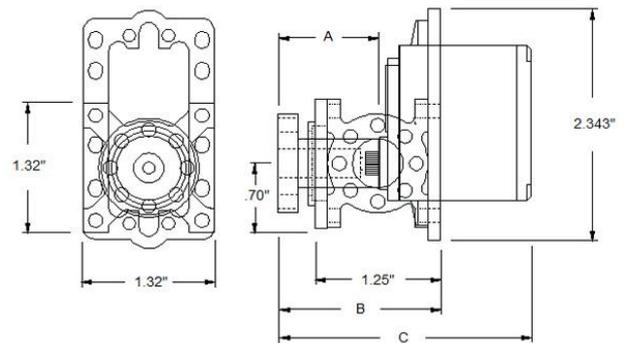


図7 サーボマウント

う動作が可能である。本実験では、外力が機構に働いている状態でも正常な動作が可能かを確認し、移動の可否、動作電圧を用いて評価を行う。

### 5.2 実験環境

直径40[mm]の円形の木材を把持対象物に設定する。各サーボモーターへの供給電力は5[V]であり、Arduino Uno専用モータドライバの5[V]出力ピンによって行われる。また、各サーボモーターに流れる電流を増加させるため、マイコンへの供給電力とは別に5[V]の電圧をモータドライバに加える。ロボットを人の手によって把持対象物まで近づけ、把持が完了したのを確認した後、DCモーターを駆動させ線上移動を行う。また、外部供給電源を用いずに同じ手順で実験を行う。

### 5.4 実験結果

DCモーターに加える電圧が7.2[V]以上の場合、線状物体に対して前進、後進ともに問題なく行えることが確認できた。よって、ロボットに線上移動を行わせるのにチェビシェフ機構を基本とした閉リンク機構の有用性は示せた。しかし、モータドライバを用いなかった場合、自重を支えることができずに落下してしまった。原因はマイコンとサーボモーターの動作を同一電源で行っているため、各装置に流れ

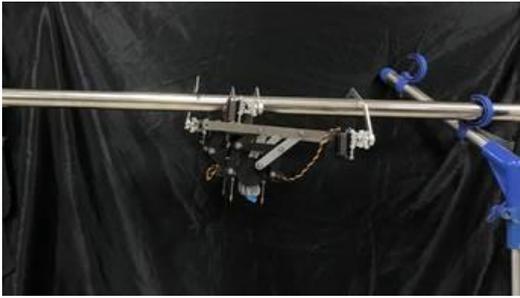


図 8 実験環境

る電流値が低かったためであると考えられる。軽量化と省スペース化のためにもモータドライバへの外部供給電源は使用しないことが望ましい。したがって、電流値が低くても安定した動作が望めるように、更なる軽量化が必要である。

## 6. 結言

本研究では線状物体上を移動可能な機構を試作した。少ないパーツで疑似的直線運動が可能なチェビシェフ機構を採用することにより、軽量化と安定性を有した機構の開発を試みた。閉リンク機構を採用するにあたり、アクチュエーターの製作に工夫する必要がある。本研究ではクランクシャフトを用いることで省スペース化とモーター数削減に成功した。また、曲げモーメントによる負荷の分散や、サーボモーターの機械的負荷の向上のため、サーボマウントを採用した。線上移動を実際に行わせた実験では、一定の電圧化で目標とする動作が確認できた。

今後は繰り返し実験を行い、機械的特性を評価していくとともに、外力によるモーメントを軽減する形状や機構の模索を行う。また、把持対象物の形状や角度を変更しつつ実験を繰り返し、本研究のロボットが把持可能な対象物の幅、ロボットと対象物の成す角度を求める。

## 参 考 文 献

- [1] 野波健蔵, 回転翼系ロボティクス, 日本ロボット学会誌, Vol.34 No.2, pp.74~80, 2016
- [2] 岡田昌史, 武石純, 非線形剛性のための静力学に基づく閉リンク機構総合と衝撃吸収のための着地機構への応用, 日本ロボット学会誌, Vol.29 No.3, pp.291~297, 2011