

[研究助成 (A)]

インフラ点検のための壁面移動可能な 自動操舵付きプロペラ推進移動ロボットの実現

Development of a Propeller-Propelled, Wall-Climbing Robot for Infrastructure Inspection

2231030



研究代表者

秋田県立大学
システム科学技術学部

助 教 山 内 悠

[研究の目的]

日本のインフラは高度成長期に建設されたものが多く、そのため現在では老朽化が進行し、深刻な社会問題となっている。国土交通省によると、今後20年で老朽化するインフラが急増すると予測されている。2020年時点で2m以上の橋梁の30%、トンネルの22%が建設から50年以上が経過しており、2040年には橋梁の75%、トンネルの53%が建設から50年以上が経過すると予測されている。

老朽化が原因で崩落事故が発生することを防ぐために、2m以上の道路橋およびトンネルの定期点検は5年に1回の頻度で行われることになっている。しかし、人口減少による点検作業員の不足から、これらの定期点検にはロボットやセンサなどの新技術の導入が進められている。2021年4月から7月の調査によれば、新技術を導入している施設管理者はわずか46%であり、半数に満たない状況である。

現在の定期点検は基本的に、作業員による直接の目視点検であるが、ロボットを用いた定期点検の導入が進んでいる。現在、橋梁の点検では足場を組み、ベテランの点検員が打音検査を行い、内部の状況を確認している。たとえば、壁面を叩くことのできるロボットを開発し、壁面を叩きながら移動が可能になれば、ロボットを用いた点検が可能になる。

しかしながら、これらのロボットを用いた定

期点検には現在いくつかの問題が存在している。例を一つ挙げると、橋脚やトンネルの壁面を移動する際には、必ず上からワイヤを降ろし、落下防止の対策を行わなければならない。このような問題を解決するために、本研究では、落下時に重力に抗うことができ、段差乗り越え等の運動性能を高められるロータによる推進機構に焦点を当てている。

本研究では、移動点検ロボットを駆動するプロペラ推進移動機構の開発およびその制御方法を提案する。

提案する推進機構は、2つのロータの方向を個別に制御することで、推進機構の方向を合力方向へ安定に追従させることができる。また、この機構を車輪移動ロボットに適用した例を提案する。

[研究の内容、成果]

1. 自動操舵可能なプロペラ推進機構のコンセプト

本研究では、図1に示すように、複数の方向可変ロータを備えた移動機構を提案し、推進力の大きさと方向を指令することで自動的に機構

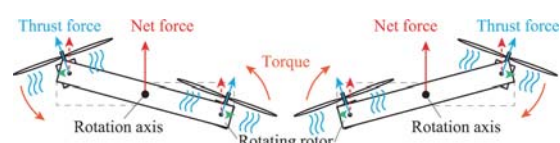


図1 自動操舵可能なプロペラ推進機構

の姿勢を制御可能な推進機構を実現する。ここでは、2次元平面上に2つの方向可変ロータを備えた推進機構を想定する。

提案する移動機構の姿勢は、目標合力の方向に自動的に回転させるトルクが発生するため、姿勢を制御するためのアクチュエータを必要としない。各ロータの方向を変えるためのアクチュエータには可動範囲があり、360度すべての方向に目標合力の大きさと方向を実現するには、姿勢の制御は欠かせない。しかし、姿勢制御するアクチュエータを搭載すると、機構の重さが増えてしまい、ロボットに搭載した際のペイロードの低下が問題となる。そのため、本手法を用いることで、従来の手法よりも軽量の機構を実現できる。

本機構を実現するためには、方向可変ロータが発生する推力の方向を外向きにすることが重要である。外向きと内向きの違いによって発生するトルクの変化し、外向きの場合は目標合力の方向へ回転させるトルクが発生するが、内向きの場合は目標合力の方向と逆のトルクが発生する。推力の方向を外向きにすることで、2つの方向可変ロータの中心にトルクのフィードバックを発生させ、目標合力の方向に機構の姿勢を回転させる。

移動機構の姿勢の時間応答は、回転体に比例微分 (PD) 制御を適用した場合と同様の振る舞いをし、これらのゲインは移動機構の幾何パラメタにより調整することが可能である。比例 (P) ゲインに相当するパラメタは、2つのロータの距離と各ロータの推力の大きさによって決定される。また、微分 (D) ゲインに相当するパラメタは回転軸の粘性係数である。

2. モデルによる原理検証

2.1. モデル

以下の仮定の下、プロペラ推進移動機構のモデル (図2) を設計する。

(A1) プロペラ推進移動機構は、中央の回転軸と左右の2つの方向可変ロータから構成される。

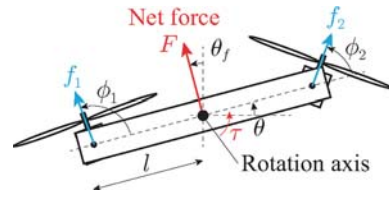


図2 プロペラ推進機構のモデル

このプロペラ推進移動機構は、方向可変ロータの質量を無視した剛体（質量： m ）とする。

(A2) 目標合力が慣性座標で一定（大きさ： $F>0$ 、方向： θ_f ）と仮定し、姿勢の時間応答を検討する。

(A3) 方向可変ロータは、ダイナミクスを伴わない推力（大きさ： $f_1>0, f_2>0$ ）を指令することができる。推力の方向は各ロータ単位で ϕ_1, ϕ_2 と定義される。なお、モータのダイナミクスは機械的な移動機構のダイナミクスに比べて十分時間応答が早いと見做す。

慣性空間に対するプロペラ推進移動機構の姿勢、回転軸周りの慣性モーメント、粘性係数、ロータと回転軸との距離をそれぞれ $\theta, J>0, D>0, l>0$ とする。モデルの一般化座標を θ とし、制御入力としてロータの方向 ϕ_1, ϕ_2 とする。

パラメタの範囲を以下のように定義する。目標合力に対する方向可変ロータの位置関係が変化しないように、機構の姿勢と目標合力の方向は $-\pi/2 < \theta_f - \theta < \pi/2$ を満たすように目標合力の方向を決定する。目標合力の大きさの範囲は $0 < F < f_1 + f_2$ であり、方向の範囲は $-\pi \leq \theta_f < \pi$ である。

2.2. 制御器

目標合力（大きさ： F 、方向： θ_f ）を実現するためのロータの方向を求める。プロペラ推進移動機構に働く力のつり合いは、以下のようにあらわすことができる。

$$\begin{aligned} F \cos(\theta_f - \theta) &= f_1 \sin \phi_1 + f_2 \sin \phi_2 \\ F \sin(\theta_f - \theta) &= f_1 \cos \phi_1 + f_2 \cos \phi_2 \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)を、ロータの角度について解くと、以下のように求められる。

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \frac{\pi}{2} - \theta_f + \theta - \cos^{-1} \left(\frac{F^2 + f_1^2 - f_2^2}{2Ff_1} \right) \\ \phi_2 &= \frac{\pi}{2} - \theta_f + \theta - \cos^{-1} \left(\frac{F^2 - f_1^2 + f_2^2}{2Ff_2} \right) \quad (2)\end{aligned}$$

なお、 $\pi > \phi_1 - \phi_2 > 0$ の関係により、 $-\frac{\pi}{2} < \theta - \theta_f < \frac{\pi}{2}$ では推力が互いに外側に発生することが保証される。

2.3. 運動方程式

運動方程式は、剛体の回転運動方程式をもとに、以下のように導く。

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} = \tau \quad (3)$$

ここで、 τ は回転軸に周りに発生するトルクであり、以下のようにあらわすことができる。

$$\tau = l(f_2 \sin \phi_2 - f_1 \sin \phi_1) \quad (4)$$

式(4) に式(2) の ϕ_1 , ϕ_2 を代入すると、次のような式が得られる。

$$\tau = l\sqrt{2f_1^2 + 2f_2^2 - F^2} \sin(\theta_f - \theta + \phi) \quad (5)$$

$\phi \in [-\pi, \pi)$ は、以下の関係を満たすように定義されている。

$$\begin{aligned}\sin \phi &= \frac{f_2^2 - f_1^2}{F\sqrt{2f_1^2 + 2f_2^2 - F^2}} \\ \cos \phi &= \frac{2F^2f_1^2 + 2F^2f_2^2 + 2f_1^2f_2^2 - F^4 - f_1^4 - f_2^4}{F\sqrt{2f_1^2 + 2f_2^2 - F^2}} \quad (6)\end{aligned}$$

2.4. 平衡点・応答性

運動方程式の平衡点 θ^* は、式(5) に $\tau=0$ を代入することで導くことができる。平衡点は、 $\theta_f + \phi$ である。なお、 $f_1 = f_2$ の場合は $\phi=0$ となるため、プロペラ推進移動機構は目標合力の方向に対して垂直となり、目標合力と機構の姿勢が一致する ($\theta^* = \theta_f$)。

次に、応答性を特徴付けるためのパラメタについて議論する。運動方程式は、微小変位 $\delta\theta = \theta - \theta^*$ を用いて、次のように線形化することができる。

$$J\delta\ddot{\theta} + D\delta\dot{\theta} = -K\delta\theta \quad (7)$$

ここで、 $K = l\sqrt{2f_1^2 + 2f_2^2 - F^2} > 0$ となる。このことから、システムの応答性は、回転軸の慣性モーメント $J > 0$ 、回転軸の粘性係数 $D > 0$ 、回転軸と方向可変ロータの距離 $l > 0$ 、各ロータの推力 $f_1 > 0$, $f_2 > 0$ 、および目標合力の大きさ $F > 0$ によって決定される。特に安定性の観点からは、 $K = D^2/4J$ が最も良い減衰をもたらす臨界減衰を保証する。

3. 実機実験

3.1. プロペラ推進移動機構の開発

2つの方向可変ロータをもつ受動ステアリング制御が可能な推進機構を開発した(図3)。この機構は、ロータ (FMA-2929KV1150, 双葉電子工業), プロペラ (LP10050E (P), Landing Product), サーボモータ (JR DS8421, 小西模型), スピードコントローラ (MC930A, 双葉電子工業), 制御用マイコン (mbed LPC 1768, NXP セミコンダクターズ), エンコーダ (E6A2-CW3C 200P/R, オムロン), 無線機器 (XBee PRO S2B, デイジ インターナショナル), バッテリー (Hyperion G3 CX 2S 7.4 V 850 mAh, HYPERION) から構成される。制御用マイコンから無線機器を通して、離れた位置に配置したノートパソコンと通信を行う。

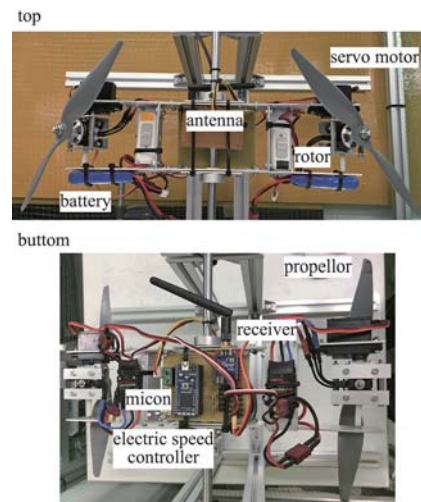


図3 開発したプロペラ推進機構

開発した機構は、 $550 \times 260 \times 90$ mm であり、プロペラの直径とピッチはそれぞれ 10 inch, 5 inch である。また、慣性モーメント J は設計に用いた 3 次元 CAD から算出した値である。

3.2. 実機実験による平衡点の検証

目標合力の方向 θ_f に対する機構の姿勢の平衡点 θ^* について検証する。ここで、目標合力の方向 θ_f を 0 度から 90 度まで 10 度ずつ変化させた。その後、90 度から -90 度まで -10 度ずつ変化させ、-90 度から 0 度まで 10 度ずつ変化させた。各入力は 10 秒間隔で行い、平衡点は入力後の 9 秒から 10 秒までの 1 秒間の平均値とする。推力の大きさ f_1 は 0.333 N を基準に 0, 5, 10% 増やし、推力の大きさ f_2 は 0.333 N を基準に 0, 5, 10% 減らす。この計 3 条件で計測を行う。また、時計回りと反時計回りで計測した理由は、静止摩擦の影響を確認するためである。

すべての条件で機構の姿勢が平衡点に収束することが確認できた。目標合力の方向と計測した機構の平衡点の関係を図 4 に示す。青点は、目標方向を 0 度から 90 度まで変化させた場合と -90 度から 0 度まで変化させた場合の時計回りの結果を示している。また、赤点は目標方向を 90 度から -90 度まで変化させた場合の反時計回りの結果を示している。黒線は、前述の運動方程式から計算された理論値である。

図 4(a) は、左右の推力の大きさが同じ場合の結果を示しており、実験と理論値は同様の傾

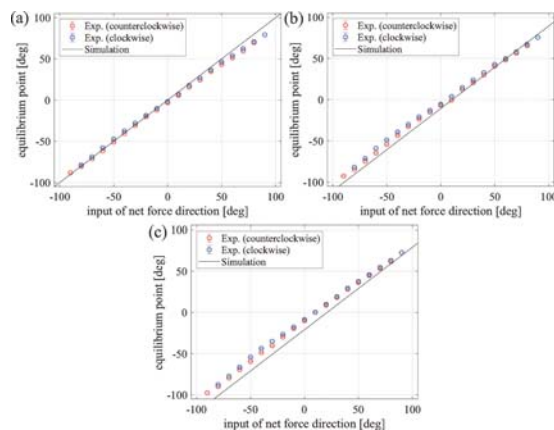


図 4 目標合力の方向と機構の収束姿勢の関係

向を示している。負の姿勢をとる場合、実験値と理論値を比較すると、時計回りは理論値より小さく、反時計回りは理論値より大きい結果となった。しかし、正の姿勢をとる場合、どちらの回転方向においても理論値を下回る結果となった。

図 4(b) は、 f_1 を 5% 増やし、 f_2 を 5% 減らした場合の結果を示している。左右の推力の大きさが同じ場合の結果と比較すると、平衡点が負の方向に変化したことが確認できる。理論値と比較すると、全体的に正の方向に平衡点がずれていることがわかる。

図 4(c) は、 f_1 を 10% 増やし、 f_2 を 10% 減らした場合の結果を示している。図 4(a), (b) と比較すると、平衡点がより負の方向に変化したことが確認できる。図 4(b) と同様に理論値と比較すると、全体的に正の方向に平衡点がずれていることがわかる。

平衡点が実験と理論値において誤差が生まれた理由は、実験の時間経過によって左右の推力の大きさ f_1 , f_2 に差が生まれたためと考えられる。今回行った条件では左右の推力差が大きいほど平衡点が負の方向へずれるが、理論値よりも実験値が大きくなったことから、推力差が小さかったと予想できる。この時、理論値を計算する際の推力の大きさは、前述の力覚センサを用いて測定した近似式を用いて電圧から推定している。しかし、本機構は各ロータに 1 つバッテリーを搭載しているが、推力の大きさ f_1 を発生させるロータに接続されたバッテリーは 2 つのサーボモータを同時に駆動している。これにより、実験の時間経過によりサーボモータ 2 つ分多くバッテリーの電圧を消費した結果、推力の大きさ f_1 が小さくなり、想定していた推力差が小さくなったと考えられる。

4. プロペラ推進移動ロボットの開発

2 つの方向可変ロータをもつ受動ステアリング制御が可能な推進機構を搭載したプロペラ推進移動ロボットを開発した (図 5)。前述の

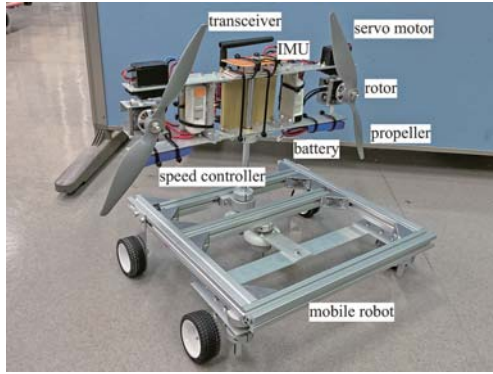


図5 開発したプロペラ推進移動ロボット

推進機構を搭載しており、姿勢の計測方法がエンコーダから慣性センサ（ICM-20948, Inven Sense）に変更されている。

開発したロボットを用いて、自動操舵が可能であるかを検証する実験を行った。実際に走行させながら合力の方向を変化させた場合に操舵が可能であるかの検証を行う。

実際に地面を走行させながら、合力の方向を変化させたときに自動操舵が可能かどうか検証する。初期位置を少し左を向いた状態とし、合力の方向を右に 20 度変化させた状態で、推力を発生させた。1 つ目の実験同様に、各ロータに発生する推力 f_1 , f_2 と合力の大きさ F を与えた。この時、各ロータに発生する推力 f_1 , f_2 , 合力の大きさ F , 合力の方向は一定であり、入力に変化させていない。

実際に、自動操舵が行われ、左向きの状態から、直進していく様子を図 6 に示す。0 秒は初

期位置であり、少し車体が左を向いている。4 秒では、車体が少し右に回転しており、自動操舵が行われている。8 秒では、操舵が終わり、車体が正面を向いている。12 秒では、自動的に操舵が元に戻っていることが確認できる。この時、ロボットに搭載したプロペラ推進移動機構は常に正面を向いていることが確認でき、合力の方向に車体を操舵していることが確認できる。

5. まとめ

本研究では、移動点検ロボットを駆動するプロペラ推進移動機構の開発およびその制御方法を提案した。提案した推進機構は、2 つのロータの方向を個別に制御することで、推進機構の方向を合力方向へ安定に追従させることをモデルから示した。また、提案した推進機構を開発し、実機実験においても同様の結果を示した。さらに、この推進機構を適用した自動操舵が可能な車輪移動ロボットを提案し、実機実験により自動操舵が行われることを示した。

本研究で得られた知見を用いて、壁面移動ロボットを開発中であり、2024 年 5 月に開催されるロボティクス・メカトロニクス講演会にて、発表を予定である。

最後に、本研究に対する立石科学技術振興財団の研究支援に心より感謝申し上げます。

[成果の発表, 論文など]

- [1] 山内悠, 下井信浩, “自動操舵の実現を目指した受動回転制御可能なプロペラ推進移動機構の提案”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 60, No. 4, pp. 314-322, 2024.
- [2] 山内悠, 下井信浩, “受動回転制御可能なプロペラ推進機構の車輪移動ロボットへの適用”, 計測自動制御学会 東北支部 第 345 回研究集会, 345-6, 2023 年 11 月 7 日, 優秀発表奨励賞.
- [3] 山内悠, 下井信浩, “インフラ点検のための自動操舵可能なプロペラ推進移動ロボットの開発”, ロボティクス・メカトロニクス 講演会講演論文集, 2P1-H10, 2023 年 6 月 30 日.

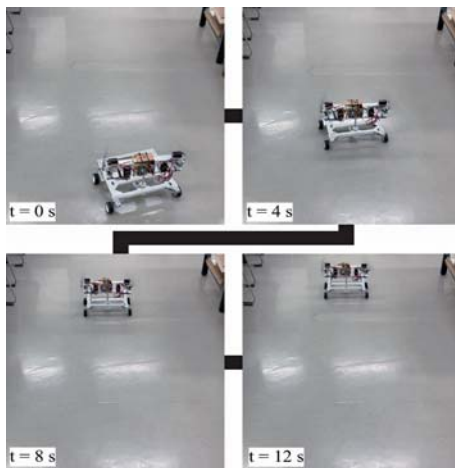


図6 自動操舵が行われる様子