

磁気吸着ユニットと空圧アクチュエータを用いた船体壁面歩行ロボット

松葉佐 哲 仁*

浅 沼 智 幸**

正 会 員 木 村 元***

A Hull Wall Walking Robot Using Magnetic Adsorption Unit and Air Actuator

by Akihito Matsubasa

Tomoyuki Asanuma

Hajime Kimura, Member

Key Words: IB Magnet, Robot, air cylinder

1. 緒 言

船舶の製造や運用において、特に船体壁面の移動を伴う点検や清掃・塗装などの作業では、ロープや梯子、足場などの煩雑な段取り作業を伴う上に危険作業であるため自動化・省力化が切に求められている。しかし現状ではコストの問題で船体壁面の作業をロボットに行わせることは難しいため、安価かつ信頼性のある壁面移動ロボットの開発が急務である。先行研究ではカムを用いた内部力補償型吸着ユニット (Internally Balanced Magnetic Unit; 以後 IB マグネット) を搭載した脚型ロボットが最適であるとし、その吸着機構の検討・検証が行われている¹⁾。

本研究ではカーゴホルドの点検やクリーニング、壁面のエッジ部の塗装作業等での実用化を目指した安価なロボットを作成するため、まず先行研究で明らかになった誤差の問題について検討を行い、その中で IB マグネットにカム機構を利用するメリットについて明らかにしつつ IB マグネットのカム形状に条件の計算を行い、長所を十分に生かす IB マグネットのカムの設計を可能にした。そのカムを用いてエアで駆動する IB マグネットの設計を行って実際にエアで動作確認を行った。

さらに、安価なロボットの開発の為に小型化及び構造の単純化が必要であるとの考えから空気圧を動力として用いたロボットの設計を検討し、上記の吸着脚を搭載することで壁面に吸着してカウンターウェイト等の補助なしに単独で壁面歩行を行えるロボットの製作及び壁面歩行実験を行った。

2. IB マグネットについて

鋼板壁面歩行ロボットを考える上では吸着機構には永久磁石を用いるとして用いることのメリットは大きい。その理由としては停電時でも落下せずに安全である点、軽量な点、安価に入手できる点があげられる¹⁾。そのため本研究では永久磁石を用い、同一の磁石を用いても大きな吸着力を発揮する継鉄 (ヨーク) 付きの永久磁石を用いている。

次に IB マグネットの概要を説明する。IB マグネット

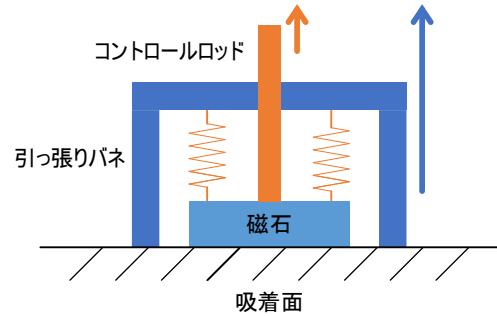


Fig.1 Principle of the IB magnet unit.

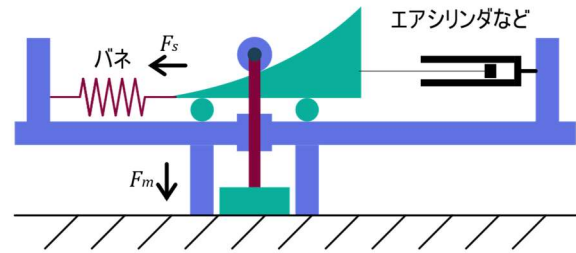


Fig.2 An improved IB-magnet unit.

とは永久磁石による強力な吸着力を生じると同時に、内部力をバネユニットで打ち消す構造を持たせ、容易に着脱を可能にする装置²⁾である。これにより、小型のアクチュエータで動作可能であるとともに吸着時の衝撃を防ぐことが可能である。動作に原理について Fig.1 で説明すると、コントロールロッドを引くとバネが吸着力を補償しているため小さな力で磁石を引きはがすことが可能であるが、フレームは磁石の吸着力と同じ力でバネに引っ張られているため強力に固定されていることになる。

ただ、この IB マグネットを設計する上での、補償力が線形であるにもかかわらずマグネットの吸着力が非線形であるという問題がある。先行研究¹⁾からそのバランスを取るにあたり Fig.2 のカム機構を用いるのが設計上良いことが示されている。その設計基礎式を以下の式(1, 2)に示す。 F_m , F_s はマグネットの吸着力と補償力を表す。Fig.3 に示すカム形状 (ただしカムフォロワ半径ゼロ) を $f(x)$ として式(1)の微分方程式を解き、式(2)によってカムフォロワの半径を考慮したカム形状に変換する。

$$f'(x) = \frac{F_s(x)}{F_m(f(x))} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_x = P_x + r \sin \theta \\ Q_y = P_y - r \cos \theta \\ \theta = \arctan f'(x) \end{cases} \quad (2)$$

* 九州大学 大学院工学府

** 九州大学 工学部地球環境工学科

*** 九州大学 大学院工学研究院

原稿受付 (学会にて記入します)

公開日 (学会にて記入します)

秋季講演会において講演 (学会にて記入します)

©日本船舶海洋工学会

ここで Q_x, Q_y はFig.4に示すようにカムフォロワがカムに接触する点Qの x, y 座標を示す。

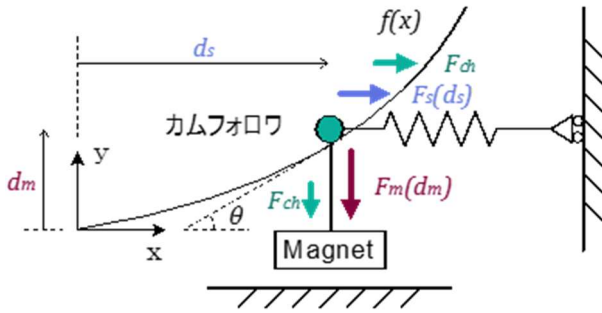


Fig. 3 Model of the improved IB magnet.

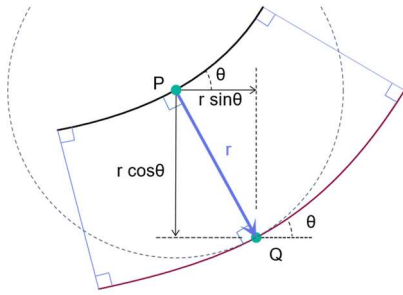


Fig.4 Relationship between the locus of the center of the cam follower and the shape of the cam considering the radius of the cam follower in Fig.3.

3. カムを用いた IB マグネットの分析・実験

3.1 誤差耐性についての解析

Fig. 3 のように操作に必要な外力（垂直な外力を F_{cv} , 水平の外力を F_{ch} ）を加えてカムフォロワの釣り合いを考えると以下の式(3)が成り立つ：

$$f'(x) = \frac{F_s(x) + F_{ch}}{F_m(f(x)) + F_{cv}} \quad (3)$$

これを F_{ch}, F_{cv} について解いて各項に誤差を含むと仮定して多変数テイラー展開を行うと以下の式(4, 5)で表すことが可能である：

$$F_{cv} \cong C_{vv}e_v + C_{vh}e_h + C_{vk}e_k + C_{v\theta}e_\theta \quad (4)$$

$$F_{ch} \cong C_{hv}e_v + C_{hh}e_h + C_{hk}e_k + C_{h\theta}e_\theta \quad (5)$$

この誤差の係数CをグラフにしたものがFig. 5である。 F_{ch} の誤差項係数が、 F_{cv} の誤差項係数に比べて小さくなっていることがわかる。 F_{ch} はカムを操作したとき、 F_{cv} はコントロールロッドを操作したときの力を表していることから、カムを操作するIBマグネットのほうが誤差に対して強いことがわかる。一般的なIBマグネットの欠点として吸着面の塗膜の厚さの影響でバランスが簡単に崩れるというものがあるが、カムを用いることによってその影響を最小限にとどめることが可能であることが明らかとなった。また、既製品のバネのバネ定数は精度等級にもよるが±10%程とJIS規格で定められており³⁾、この誤差もIBマグネット設計上は無視できないものであったがカムを用いることでこれらの問題も解決できることが明らかとなった。

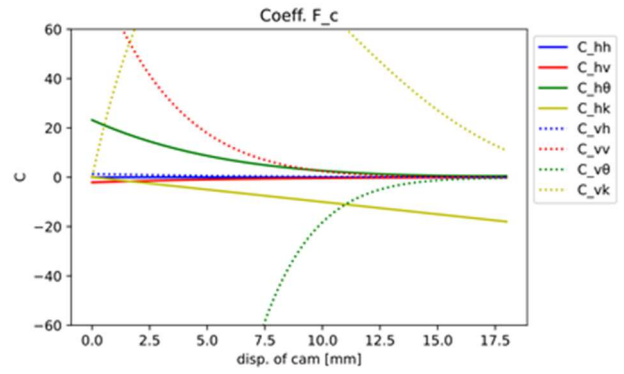


Fig. 5 Comparison of the coefficients of the error term.

3.2 カム形状の成立条件の解析

先行研究ではカムフォロアの半径を無視した状態のカムの形状が上に凸であるとFig. 6のように補正後のカム形状に折り返し地点が発生してしまうことが経験的にわかっていた。本研究ではその条件式を算出した。その結果、上に凸かどうかではなく以下の式(6)を満たすかどうかで補正後カム形状の破綻の可否を判定することが可能であることが分かった。

$$\frac{d}{dx} Q_x = \kappa r + 1 > 0 \quad (6)$$

ただし κ はカムフォロア中心軸の軌跡の曲率半径、 r はカムフォロアの半径を表す。この式によって以下の手順でカムの形状、および補償バネの最適化が可能になる：

- (1) バネ定数の最適化
(式(6)を満たす範囲で $f'(x)$ の最小化)
- (2) 最適化されたバネ定数に近いバネを選定
- (3) バネの使用域を最適化（カム形状の最適化）

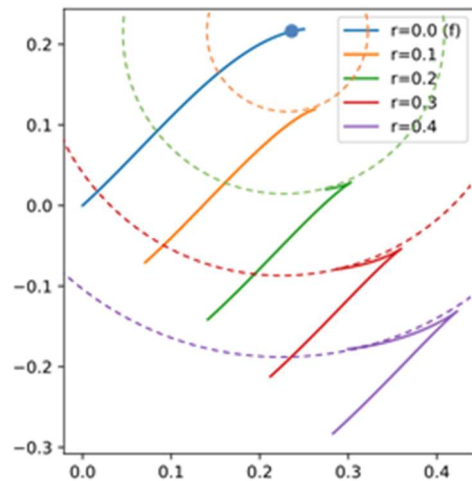


Fig. 6 Example of cam shape folding after correction.

3.3 エアによる駆動の検証

3.2節の最適化方法でカムおよびIBマグネット本体を作成し、エアシリンダでの駆動試験を行った。汎用品のなかで見つかった最も小型の直径12[mm]のエアシリンダを用い、空圧機器としてはかなり低圧である0.15[MPa]で動作し、吸着時の吸着面と平行な方向への摩擦力は7.0[kg]であった。

また、圧縮性流体である空気を用いた動作であっても脱着時の振動等は発生せず諸誤差による補償力とのバランスの重大な不均衡は確認されなかった。

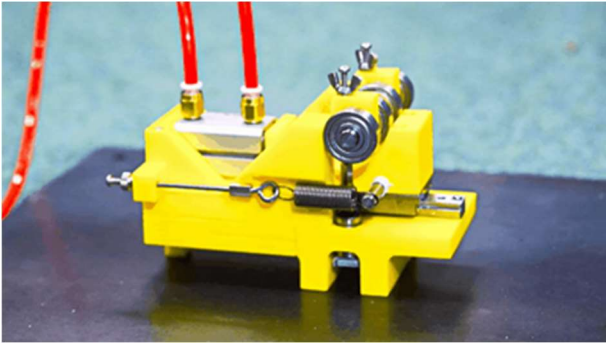


Fig. 7 Cam type IB magnet with air cylinder.

4. 空気圧について

4.1 空気圧機器の概要

空気圧はその手軽さから工場等で広く運用されている技術であるが、エネルギー効率が悪いこと、空気の圧縮性が高いことで精密な制御が難しいことから人工筋肉など一部の医療分野を除けば研究対象になりにくいのが現状である。一方で空圧機器は造船所や港において既に運用されていることから、海事業界においては導入コストの面で大幅なアドバンテージを持つ。また、アクチュエータも軽量、コンパクトなうえ信頼性の高いものが市販され、さらに使用後の流体を処理せずに大気中へ放出が可能である。これらは本研究の目的である安価・小型化といった要素を十分に満たし、軽量であることはロボットが自力で壁面を登るためには重要な要素であるため本研究では空気圧を動力として用いている。

4.2 空気圧を用いた精密制御

カーゴホールド内を清掃等する場合には壁面についた細かい粉などにより、ロボットが滑ることは想像に難しくない。完全に滑ってしまい落ちてしまうことは少ないにしてもアクチュエータの動作による重心移動で若干位置が動いてしまうことは通常の利用でも十分に起こりうることである。したがって進行方向が傾いてしまった場合などに目的の場所まで上るためには方向転換、もしくは左右移動をある程度の精密性で出来る必要がある。

空気圧は on-off 制御が基本ではあるものの高性能な電磁弁を用いることで精密な制御を行うことは可能である。ただし高性能な電磁弁は非常に価格が高く、研究段階はともかく実用化には至らないというのが通説であった。しかし筑波大学の以後氏による研究⁴⁾では価格が1~2万円程度の電磁弁であったとしてもアームを誤差1度程度で制御できることが示されており、採用が十分に検討できる。本研究では構造簡略化のため精密制御機能は取り入れていないものの実用化を考えると避けては通れないため今後の課題の一つとなる。

5. 新型ロボットデザインの提案

5.1 設計について

壁面吸着ロボットの設計を行う上で脚の数や左右移動の有無、シリンダの接続方法などが異なる設計案を6つ作成したが、最終的にはIBマグネット吸着脚1つ当たりの摩擦力や大きさ、3点で吸着することで曲面にも吸着できる点などから以下のFig.8の設計を採用した。これらの装置に圧力源から直径6[mm]長さ4[m]のゴムホース

を用いて1.0[MPa]の圧縮空気を送り込み動作させている。Fig.9にはFig.8の設計の概略を示す。

電磁弁はRaspberry-PI 3で制御しており、コンピューターからLAN経由で遠隔操作が可能となっている。本研究においては100Vの電源を直接引き込むことでコントローラや電磁弁を稼働させているが、将来的にはバッテリーを積みこむことで外部から圧縮空気のみを与えられれば稼働できる状態にすることを目指している。

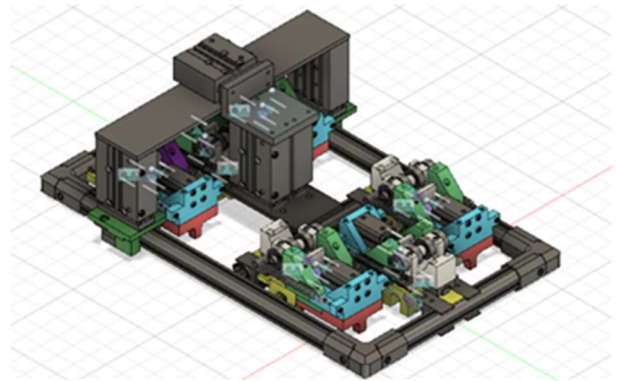


Fig. 8 The Design of the robot using CAD (fusion360).

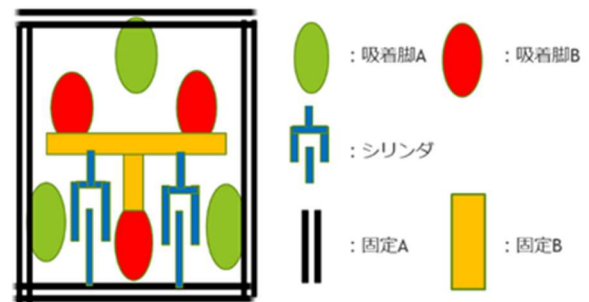


Fig. 9 Schematic diagram.

5.2 ロボットの製作

本ロボットの本体部分は一般に販売されている部品と3Dプリンターで造形した部品のみで製作されている。これによりコストダウンがなされただけでなく、制作速度も極めて高くすることが可能になった。一方で問題点としては3Dプリンターによって歪みが発生しやすいという点がある。これは3Dプリンターでどの樹脂を用いるか、どの方向で造形するかで異なるものの本研究で用いたABS樹脂では歪みが目立った。実用化を考える上では障害となりうる点であるが、IBマグネットにカムを用いたことから動作は可能であった。完成したロボットがFig.10である。

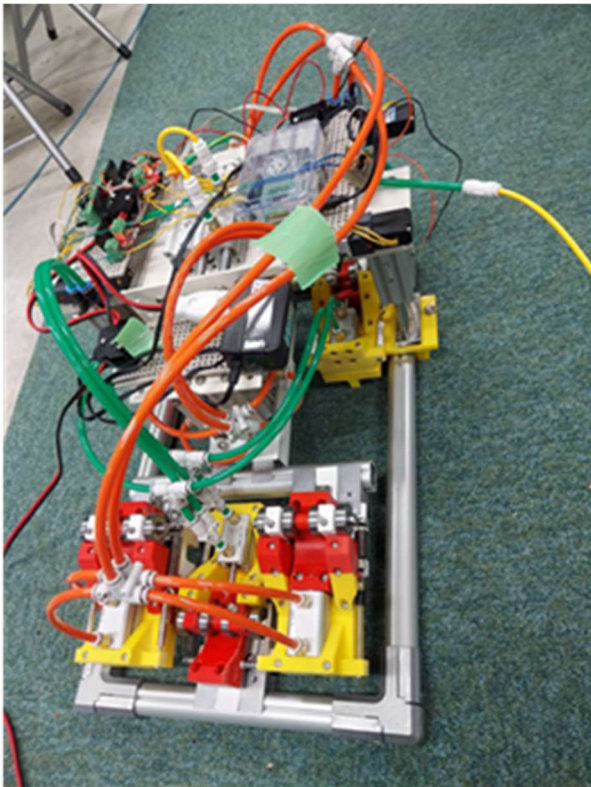


Fig. 10 Completed Robot.

6. 壁面歩行実験

完成後のロボットは重量：9.9[kg]，W×D×H：302×503×169[mm]となった。

実験ではロボットは想定通りの動きをしたものの、吸着対象壁面との摩擦力が不足していたことからアクチュエータが動くたびに振動で若干滑り落ちてしまっていた。そこでゴム用接着剤を吸着脚の裏に塗ることで摩擦力を向上させると滑り落ちることはほぼなくなった。

また実験において脚を吸着させた直後に次の脚を上げようとするとき摩擦力が足りずに落ちてしまうという現象が発生した。十分な吸着力を発生させるのに1.5[s]ほど必要であることが分かった。これが原因でこの装置の進行速度が0.23[m/min]と実用性欠くものであることが確認された。磁石の吸着力の時間変化についても研究を進める必要が明らかになった。

以下のFig.11からFig.15の様子をコマ送りにて載せる。これを交互に行うことで上に進んでいく。

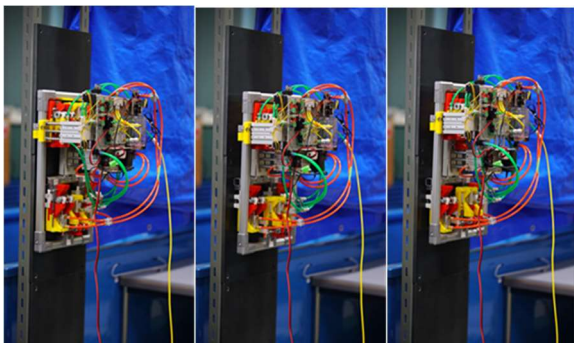


Fig.11
All legs are adsorbed.

Fig.12
One leg is adsorbed.

Fig.13
Slide the leg that is not adsorbed up.

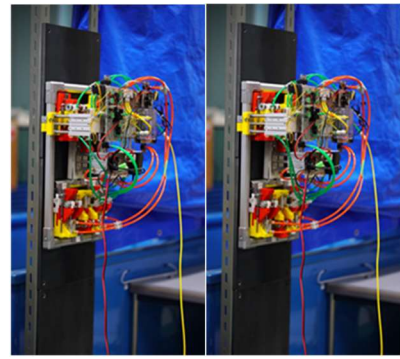


Fig.14
After sliding, bring the legs close to the wall again.

Fig.15
All legs are Adsorbed.

7. 結言

本研究ではカーゴホールド清浄などに使用できる多目的船体壁面歩行ロボットの開発を行った。開発にあたっては小型化及び低コスト化に主眼を置き、空気圧アクチュエータやIBマグネットを用いた吸着脚の使用により可能な限り簡略化しつつも壁面歩行能力のあるロボットの設計を行い、3Dプリンター及び市販されている汎用性の高い部品を用いることで速やかな製作をした。

特にIBマグネットの作成ではカムを用いたIBマグネットの誤差を解析し、その結果からカムを用いることにより誤差耐性が上がるという優位性が明らかになった。また、設計条件明らかにしバネ定数・カム形状の最適化を可能にし、誤差耐性という優勢を十分に発揮できるカムを設計可能になった。

製作したロボットは積載能力がほぼ無く、速度も遅いため実用には耐えられないものの自重を支えつつ安定した壁面歩行が可能であることを実験で示した。小型化・軽量化の余地が十分あることから、今後の実用化には十分に有望なアプローチであると考えられる。

また実験において、永久磁石が鋼板へ吸着直後は吸着力が弱く、所定の吸着力になるまで1.5[s]程度かかるという問題点を発見した。

参考文献

- 1) 松葉佐哲仁, 木村元: 船体壁面移動ロボット用の磁気吸着ユニットー永久磁石の壁面吸着力をバネとカム機構で補償し小さな力で脱着ー, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第33号, pp.335-336, 2021
- 2) 広瀬茂男, 今里峰久, 工藤良昭, 梅谷陽二: 内部力補償型磁気吸着ユニット, 日本ロボット学会誌 3 巻 1 号, pp.10-19, 1985.
- 3) コイルばね-第2部: 使用の表し方, JIS B 2704: 2018
- 4) 以後直樹: オフセット圧力調整による可変剛性空気圧アクチュエータ制御, 筑波大学システム情報工学科, 修士論文, 2012年度(2013年)