

[研究助成 (A)]

MRI・CT 画像下治療のための
多自由度空圧ステッピングモータの開発

研究代表者

名古屋大学

准教授

部 矢

明

2241024

[研究の目的]

MRI・CT 画像を見ながら術者が病変に針を刺すのみで肝・腎・肺などのがん治療や病変採取等を行う画像下治療が注目されている。画像下治療は外科手術と比較して患者へのダメージが小さいため、高齢化も相まってニーズが高まっている。しかし、人が入ったMRI・CTガントリ内は狭小空間となるため、手技の空間が狭く、アプローチが困難な場合がある。また、MRIは強磁場による金属の吸引事故の危険性があり、CTはX線により患者だけでなく医師も被ばくする。加えて、MRI・CTの撮像面に金属が存在する場合、ノイズにより画像信号が欠損（金属アーチファクト）し、画像診断が困難となる問題がある。これらの背景から、術者が手術室の外から遠隔操作する非金属性手術支援ロボット⁽¹⁾⁽²⁾が開発されている。しかし、従来のMRI・CT画像下治療用手術支援ロボットの針の姿勢変更機構は、1自由度空圧モータを複数組み合わせており、大型化が課題となる。加えて、姿勢測定のためにはモータの数だけの角度センサが必要となり、姿勢測定機構の小型化にも課題が残る。そこで本研究では、MRI・CT環境で駆動可能な小型多自由度回転機構の実現を目的として、樹脂のみで構成可能かつ1台で多自由度回転を実現する多自由度空圧ステッピングモータを提案する。

[研究の内容、成果]

〈コンセプト〉

本研究で提案するモータのコンセプトを以下に示す。

- ① 1台で2自由度回転
- ② 樹脂のみで製作可能
- ③ 角度センサを用いずに高精度位置決め

上記コンセプト①を満たすため、球状歯車を回転子として採用し、複数方向から直動する歯を微小にずらして噛み合わせることで2自由度回転を実現できないかと着想した。そして、この歯の直動機構に空圧シリンダの構造を応用すれば、空圧力によって回転を生み出し、一般的な電磁モータのように金属が必要なく、樹脂のみで製作できると考えた（コンセプト②）。さらに、直動する歯を等間隔で固定して配置すれば、球状歯車に対して歯を噛み合わせた回数（＝歯の直動回数）によって現在角度が決定するため、ステッピングモータのように角度センサが不要と考えた。また球状歯車の歯のピッチを細かくすることで高精度化が可能のため、コンセプト③を満足すると予想した。以上のコンセプトをもとに、実際に検討した構造について次に示す。

〈基本構造〉

提案構造を図1に示す。回転子は内側に配置された球状歯車であり、その外側には球状歯車をヨー方向に回転させるためのヨーギアユニッ

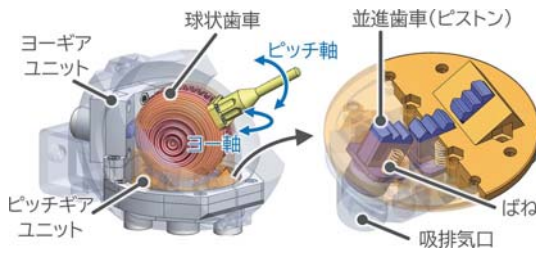


図1 2自由度空圧ステッピングモータ

ト、ピッチ方向に回転させるためのピッチギアユニットが配置されている。

各ユニットの内部には先端に歯形を有する空圧ピストン（並進歯車）が3つ配置されている。ピストン内部には復動用のコイルばねを設置しており、加圧することでピストンが直動し、開放することでばね反力によって戻る。そのため、加圧と開放を繰り返して往復運動が可能となっている。球状歯車は、図2に示すように、ヨー回転用の同心円状の歯形と、中心にピッチ回転用の歯を有している。従来の球状歯車は図2中の左のように1方向からのみ歯形を有するものであり、提案歯車は、図2右のように部分的に2方向から切られた歯形を有することが特殊な点である。

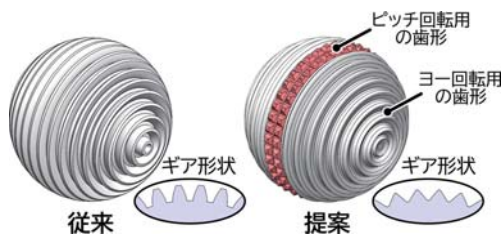


図2 提案モータにおける球状歯車

〈動作原理〉

提案モータの動作原理について述べる。まず、1軸回転における動作原理を図3に示す。歯車のピッチ θ に対して、各回転軸周りに3つの並進歯車が $\theta/3$ の間隔で配置されている。そのため、並進歯車が空圧により押し出され、球状歯車と噛み合うことで $\theta/3$ 回転することができる。この一連の動作を各並進歯車で順番に行うことによって、連続的に回転することができる。ま

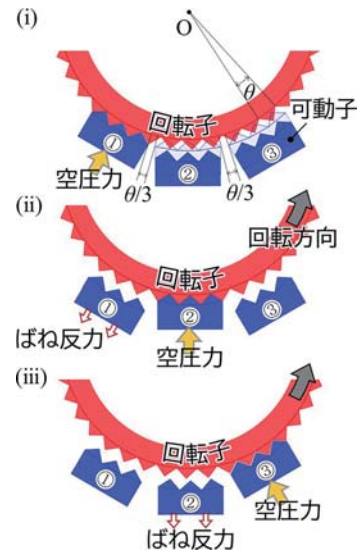


図3 1軸回転原理

た、並進歯車の駆動順序を変えることで回転の方向を変えられるため、任意の方向へ回転が可能である。

この1軸回転原理は既存の1自由度ステッピングモータ（Sajima et al., JRM, 2012）と同様である⁽³⁾。単純にこれを利用して2自由度回転を試みても、各軸が互いの軸に干渉し、幾何的に拘束されるため、2自由度回転は不可能である。そこで考案した2自由度回転原理を図4に示す。ピッチギアユニットは球面歯車に同期してヨー回転するため、常に球状歯車と同一平面となりピッチ回転用の歯との噛み合いが保たれる。また、ヨー回転用の歯形は同心円状のため、ピッチ回転時にヨー回転用の並進ギアと干渉しない。このように、各軸で独立して回転を行うため、入力圧力波形の指定のみで2自由度回転

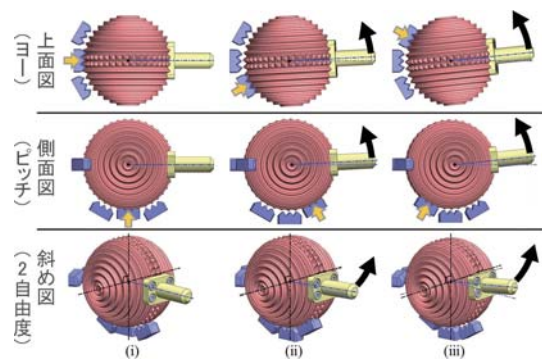


図4 2自由度回転原理

の位置決めが可能となる。

〈試作機〉

製作した試作機を図5に示す。球状歯車の外径は60 mmである。また、歯車のピッチは9 deg.とし、ステップ角はヨー・ピッチ回転ともに3 deg.である。図6に駆動ユニットと球状歯車の外観を示す。

駆動ユニットの内部構造を図7に示す。前述の動作原理に示したように、空圧ピストン内部にはばね定数 k の復動ばねが組み込まれている。圧力 P をピストン受圧面 S にかけ、推力 F が発生し、変位 x が起こる。この空圧ピストンに働く推力を力センサ（PFS080YS102U6S, レプトリノ社）により実測した。その測定環境を図8に示す。空圧シリンダ部にかかる空圧は圧力制御バルブ（VP5010SBJ111H00, NORGREN社）を利用しており、バルブに与える電圧に応じて圧力を制御できる仕様となっている。0.1



図5 試作機



図6 駆動ユニットと球状歯車

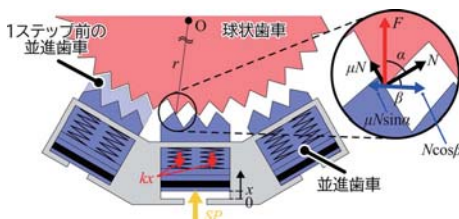


図7 駆動ユニット内部構造

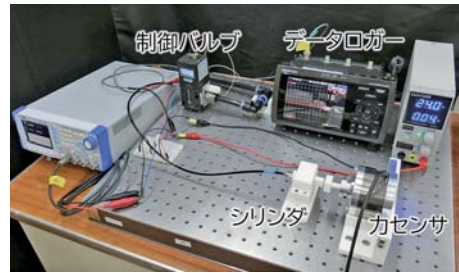


図8 空圧シリンダの推力測定環境

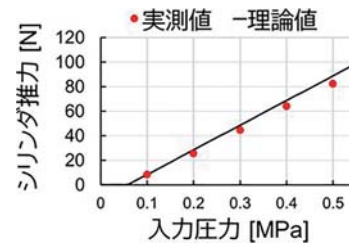


図9 空圧シリンダの推力

MPa ずつ圧力を上げた際の力センサによる推力測定結果と理論値を図9に示す。なお、最大0.5 MPaまで加圧した。理論値と実測値を比較して、その誤差は10%以下であったことから、両者の定性的な一致を確認した。

〈動作精度検証〉

提案モータの動作精度を評価するため、図10に示す実験環境にて動作試験を行った。モータの出力軸は2つのガイドレールに接続されており、出力軸の回転によってガイドレールがそれぞれ1方向に回転する機構となっている。モータのヨー・ピッチ回転角度は、ガイドレールの回転角度をエンコーダによって測定することで取得する。なお、本実験においては、エン

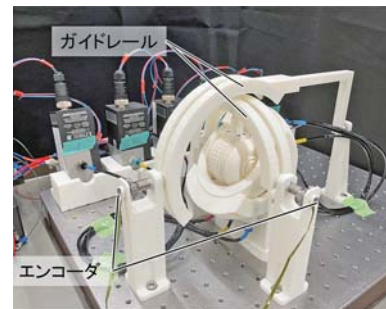


図10 動作精度検証の実験環境

コードは角度検出のみに用いており、モータの制御には一切利用していない。2自由度同時回転を含む圧力指令を与えたときの回転角度を3回測定し、その平均値を求めた。本実験における圧力指令は回転速度が9 deg./s となるよう与え、入力圧力が0.2 MPa となるパルス波とした。駆動システムを図11に示す。制御用PCからデジタルシグナルプロセッサシステム(sBox II, MIS 社)へ指令を出し、圧力制御バルブにはコンプレッサ (SLP-07EEDC6, ANEST IWATA 社) から圧縮空気が供給されており、電圧に応じて圧力が変化し、提案モータの各空圧シリンダの圧力を変化させる。

動作検証結果について述べる。ヨー方向の角度測定結果を図12(a)に、ピッチ方向の角度測定結果は図12(b)に示す。赤線がエンコーダによる測定結果であり、黒波線が圧力指令に

よる理想角度である。実験結果から、全時間においてモータが目標角度まで回転していることが確認できる。これは、2軸同時回転時にも動作原理通りに駆動していることを示している。目標角度との最大誤差は、ヨー角で1.64 deg., ピッチ角で0.97 deg.であった。駆動のために角度センサは利用していないため、角度センサなしで位置決めを実現できている。

〈従来球状歯車機構との比較〉

文献⁽⁴⁾では、球状歯車を有する2自由度回転機構が提案されている。電磁モータを駆動源として、球状歯車型回転子の2自由度回転が実現されている。また、文献⁽⁵⁾では、球状歯車と鞍状歯車を噛み合わせ、球状歯車型回転子の3自由度回転が達成されている。いずれも電磁モータを駆動源とすることを想定しており、本研究とは方向性が異なる。また、球状歯車の形状においても差異がある。本研究では、球状歯車に対して部分的にピッチ・ヨーの両方向に歯形を構成している。この構造を採用することで、球状歯車に対して中間の変換用歯車なく直接噛み合いトルクを与え、2自由度回転を生み出すことができる。この点が本研究の独自性となる。

〈まとめと今後の研究〉

本研究では、MRI・CT環境において撮影画像に影響なく駆動可能な樹脂製2自由度空圧ステッピングモータを提案した。球状歯車を採用した回転子に対して2方向から空圧駆動の並進歯車を噛み合わせることで2自由度回転が可能であることを試作機により実証した。また、並進歯車の直動回数によって現在姿勢が決定する動作原理により、角度センサなく任意姿勢への位置決めが可能であることを実験から示した。今後は、提案モータを複数製作し、それらを組み合わせて駆動するマニピュレータのMRI・CT環境での動作実験を予定している。

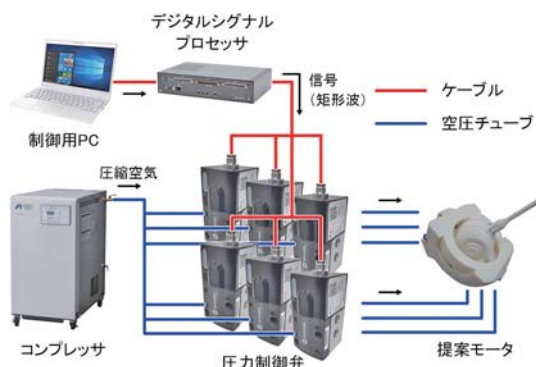
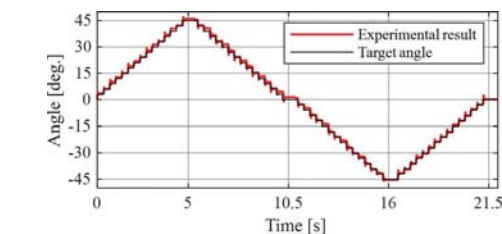
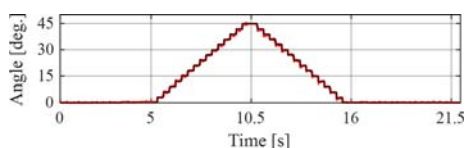


図11 駆動システム



(a) ヨー方向角度



(b) ピッチ方向角度

図12 動作精度の検証結果

[参考文献]

- (1) A. Melzer et al., INNOMOTION for Percutaneous Image-Guided Interventions, IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, vol. 27, no. 3, pp. 66-73, 2008.
- (2) Vincent Groenhuis et al., Design and Characterization of Stormram 4: An MRI-Compatible Robotic System for Breast Biopsy, 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017.
- (3) H. Sajima et al., MR-Safe Pneumatic Rotation Stepping Actuator, Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 24 no. 5, pp. 820-827, 2012.
- (4) 多田隈ら, 2自由度を有する球状全方向駆動歯車機構の研究, 日本ロボット学会誌, vol. 36, no. 9, pp. 627-638, 2018.
- (5) K. Abe et al., ABENICS: Active Ball Joint Mecha-

nism With Three-DoF Based on Spherical Gear Meshings, IEEE Transaction on Robotics, vol. 37, no. 5, 1806-1825, 2021.

[成果の発表, 論文など]

1. 森田希, 部矢明, 井上剛志, MRI・CT 画像下治療のための2自由度空圧ステッピングモータの動作検証, 第33回日本コンピュータ外科学会大会, 24(5)-6, 2024/11/09
2. 森田希, 部矢明, 井上剛志, 球状歯車型空圧モータ, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-A07, 2025/06/05
3. 世界初! MRI・CT 内で動く, 球状歯車型空圧モータを開発, 名古屋大学研究成果発信サイト, 2024/11/08