

報告日 2013 年 (平成 25 年) 8 月 30 日
報告者 東京大学 大学院情報理工学系研究科 准教授

正宗 賢

1. 研究概要

(和文)

(1)課題名 (日本語) MRI 下治療支援用空圧制御アクチュエータの開発

(2)研究者氏名 正宗 賢, 東京大学大学院情報理工学系研究科
知能機械情報学専攻 准教授

(3)研究概要 (日本文)

本研究では, MRI 画像撮影環境下において駆動する高精度なロボットによる治療を実現するための基盤技術の開発として, 回転および直動アクチュエータを開発した. 鋸歯をスライドして回転運動を生み出す機構を考案・開発し, 空圧制御によりステッピング動作を実現した. アクチュエータは完全非磁性非金属材料から構成されて MRI に影響を与えない. また, 評価実験を行い, マニピュレータ駆動に十分なトルクと高精度な位置決めが可能であることを確認した. また, 高い MR 対応性を有していることを確認した. これにより, あらゆる強磁場環境下で使用可能な位置決め機構等の開発を行うことが可能となる.

(4)キーワード

非磁性アクチュエータ, 空圧制御, ステッピングモータ, MRI, 手術支援ロボット

(英文)

(1) **Research title**

Non-metal Manipulator with Pneumatic Stepping Actuators for MRI guided Surgery

(2) **Name of researcher with title of position**

Ken Masamune, Associate Professor, Dept. of Mechano-Informatics, Graduate school of Information Science and Technology, the University of Tokyo

(3) **Summary**

In this study, a new rotation motor and a linear motion actuator are developed as the basic technology for surgical robots driven under the MRI imaging environment. Sawtooth mechanism and pneumatic control system are applied, and the actuators are composed of completely non-magnetic metallic material. The evaluations of these actuators were performed to validate their specifications.

(4) **Key Words**

Non-magnetic actuator, Pneumatic control, MRI, Stepping motor, Surgical robot

2. 本研究の意義・特色

MRI (磁気共鳴画像撮像装置) の撮影環境下における手術支援は、その優位性から脳神経外科手術を皮切りに様々な治療部位にて行われはじめてきている。MRI は高磁場の環境であり医療環境でもあることから、より安全かつ高精度な治療を行うにはそれらの環境に適合したロボット技術を用いた支援デバイスの開発が重要である。特に重要な点として MR 対応性が挙げられる。すなわちデバイス自体が 0.2T~10T という高磁場環境下で動作に問題を呈さないことかつ、MRI 画像に対して電磁波によるノイズを与えないこと、磁性を有することで画像を歪めないこと等が要求される。通常のアクチュエータは磁力を利用してそのため不適である。そこでこれまでに MRI 環境下では超音波モータが多く利用されているが、駆動時に発生する電磁波による MR 画像へのノイズが課題として残っている。

そこで本研究では、完全に非磁性・非金属材料からなるアクチュエータの開発をめざしている。特に位置決め動作などを目的としてステッピング動作を行うこと、また、構造を出来るだけシンプルに部品点数を減らしたコンパクトさを特色とする。これにより、あらゆる強磁場環境下で使用可能な位置決め機構等の開発を行うことが可能となる。

3. 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

強磁場環境下でのアクチュエータの基礎コンポーネントとして、非磁性非金属材料で構成された空圧式の回転型アクチュエータおよび、直動型アクチュエータの開発を行った。原理の詳細および試作・評価を以下に述べる。

3-1 回転型アクチュエータ (Continuous Piston Driven Rotation (CPD-R) Actuator)

動作に必要なギアは、1つの Rotation Gear と3つの Direct Acting (DA) Gear から構成される。DA Gear はそれぞれがギアピッチの3分の1ずれた状態で配置される。これらの Rotation Gear が順番に空圧により押し上げられ DA Gear と噛み合うことで Rotation Gear が回転する。また、同時に噛み合っていた DA Gear は押し下げられる。押し上げる順番を変えることで右回り (CW)、左回り (CCW) を実現する(Fig.1)。

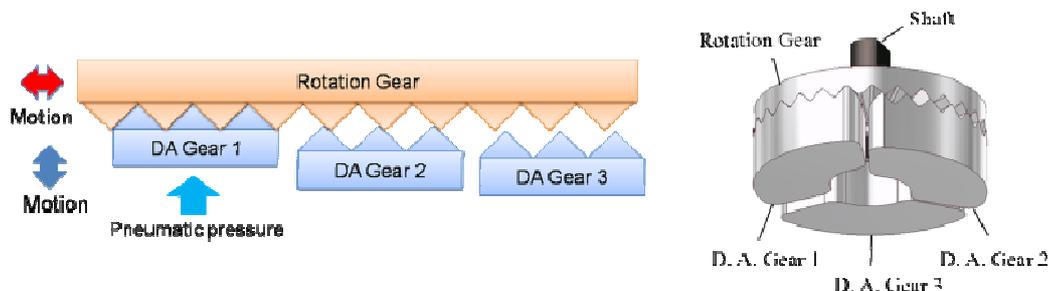


Fig. 1 Rotation gear and Direct Acting (DA) gears in pneumatic stepping actuator; (Left): Motion principle 2D schematic representation; (Right): Main components of stepping actuation; These

components convert direct acting movement to step rotation movement.

3-2 直動型揺動螺旋歯アクチュエータ (Continuous Piston Driven Linear (CPD-L) Actuator)

径の異なる二つの円のうち、径の小さな円（小径円）を径の大きな円（大径円）に対して内接させながら転がすことで、接触位置が円周の長さの差の分だけずれる(Fig.2). この大径円と小径円を円筒形状で構成し、それぞれの表面に、らせん状の歯を設けることで、そのずれの分だけ直動方向に動作することが可能となる. この減速比は大径円の半径を R 、小径円の半径を r とすると、 $(R-r)/r$ となる.

これにより、大径円の位置に対し小径円が相対的に移動し、らせん運動する. この運動をキー溝により直動動作に変換することで直動アクチュエータを実現した.

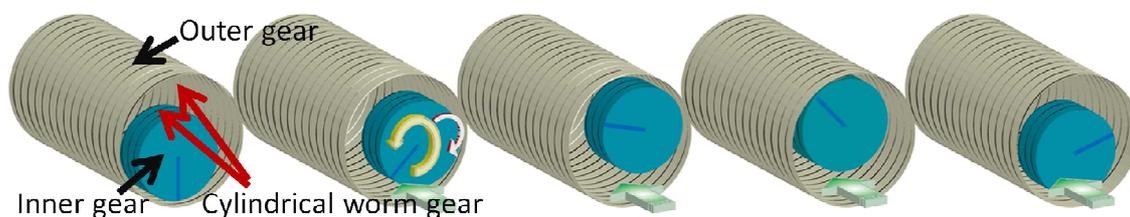


Fig.2 Linear movement principle with rolling motion of CPD-L Actuator.

Fig.3 に、開発したモータを示す. Fig.3 左の上から、CPD-L 型($\phi 38.5$), CPD-R 型($\phi 30.0$), CPD-R 型($\phi 22.0$), CPD-R&L 型($\phi 22.5$)を示す. CPD-R&L 型とは、直動と回転機構を組み合わせた機構であり、筒内部を Fig.3 右に示す. これにより非常にコンパクトな回転および直動動作可能なアクチュエータを実現した. また、製作にあたり、鋸歯部および空圧ピストンロッドには PEEK を使用した. また、内側が鋸歯となる部品については、3D プリンタを活用し、試作スピードを速めた.

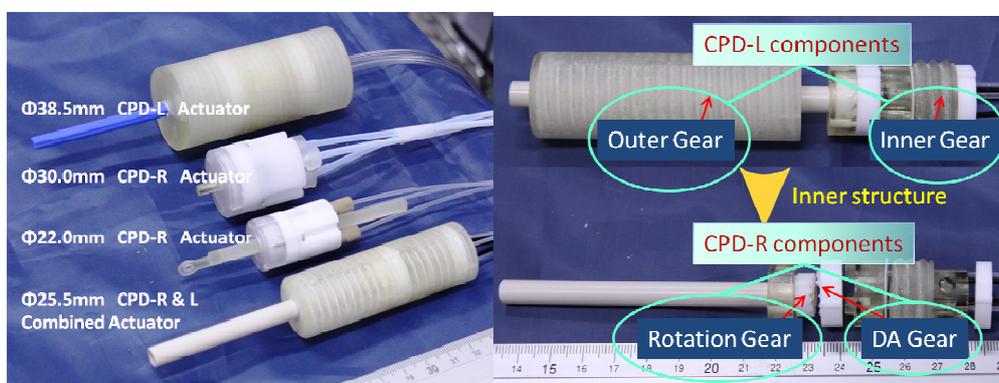


Fig.3 (Left): Various type of CPD actuator

(Right): Inner structure of $\phi 25.5$ mm CPD-R and L combined Actuator

アクチュエータを駆動するための空圧システム構成を Fig.4 に示す。アクチュエータ 1 個につき 3 チャンネルの流路が必要であり、また空圧を制御するためのバルブとの距離は短い方が良いため、MRI 撮像室の中にバルブ回路を設置した。コンプレッサで作られた圧縮空気はエアードライヤーを通して冷却・乾燥された後、補助タンクに蓄えられる。この圧縮空気は電磁弁までチューブを通して送られ、電磁弁のさらに先にはアクチュエータが取り付けられるようになっていいる。この電磁弁は PC からの指令により開閉が行われ、それによってピストンが動作する仕組みである。また、ピストンを送られた圧縮空気の排気時はマフラを通すことで排気音の消音を行っている。また、電磁弁を除くシステムは全て MR 室外に設置し、電磁弁のみを MR 室内に設置した。さらに、電磁弁はアルミケースの中に格納し、さらに EM シールドを施すことで MR 対応性を満たすようにした。使用する空圧はおおよそ 0.4~1MPa 近辺を使用するが、レギュレータにより設定できる。

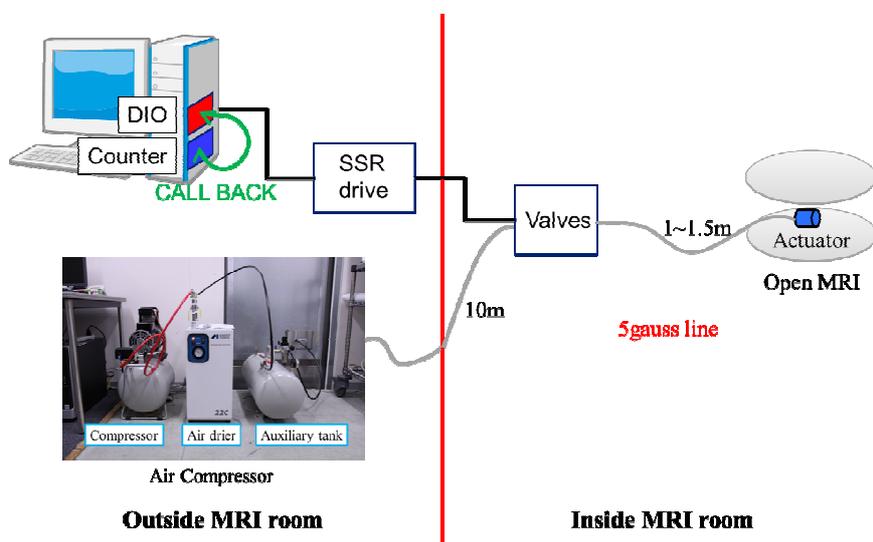


Fig. 4 Pneumatic system configuration

3-3 性能評価実験

試作開発したアクチュエータの評価をそれぞれについて行った。

3-3-1 φ30mm CPD-R Actuator バックラッシュ評価

0 度から 360 度までを 3 回往復させ、60deg ごとの回転角度を光学式エンコーダ (RE12D-300-201-1, COPAL ELECTRONICS.) で計測することにより、各角度での位置決めヒステリシス、および、理論値からの誤差を評価した。その結果、それぞれの点でのヒステリシスは±0.3deg 以下、誤差は±2.1deg 以下であった。Fig.5 にアクチュエータの概観及び計測時のセットアップを示す。

3-3-2 φ30mm CPD-R Actuator 遅延時間評価

光学式エンコーダを用いて、駆動指令から実際にアクチュエータが動作するまでの遅延時間の評価を行った。電磁弁 (MHA2-MS1H-3/2G-2-K, Festo K.K.) からアクチュエータま

でのチューブ長を 1m(テフロン, 内径 2mm)とし, 5 回施行した. その結果, 遅延時間は 40msec 以下であった.

3-3-3 Double type CPD-R Actuator 脱調トルク評価

Fig.5 に示した二連の CPD-R Actuator に関して, デジタルフォースゲージ (FGP-2, NIDEC-SHIMPO Corp.) に対して, 負荷を与えることで, 脱調時のトルクを計測した. その結果を Fig.6 に示す.

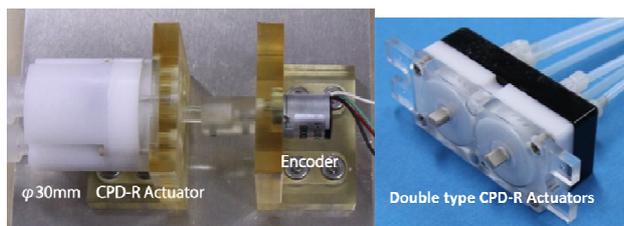


Fig.5: (Left): $\phi 30\text{mm}$ CPD-R Actuator and encoder

(Right): Double type CPD-R Actuator (Same size of main components with $\phi 30\text{mm}$ type)

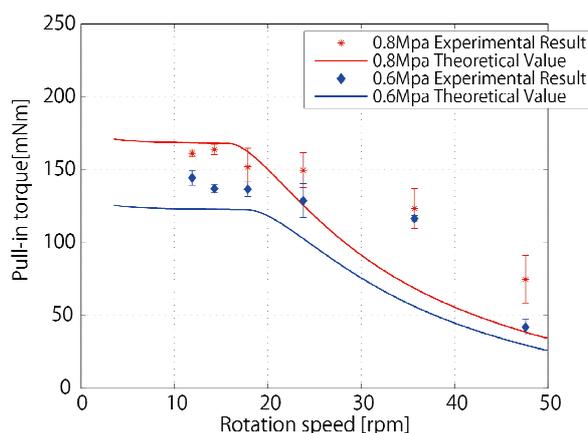


Fig.6 Pull-in torque evaluation result

3-3-4 CPD-L Actuator 繰り返し位置決め精度及び押し込み力評価

$\phi 38.5\text{mm}$ の CPD-L アクチュエータに関して, 30msec/step の速度で駆動し, 600steps ごとに進行方向を切り替え, レーザ変位計 (LK-G3000V, KEYENCE Corp.) により約 13mm 変位した場合の位置決め精度を評価した. 8 回の試行の結果, 標準偏差は 0.23mm であった. また, 0.4Mpa で駆動させたときの押し込み力をデジタルフォースゲージにて評価し, $24.8 \pm 0.8\text{N}$ の結果を得た.

3-3-5 MR 対応性に関する評価

試作したアクチュエータを組み込んだ樹脂製装置の MR 対応性を評価した. 0.2T の MRI を用い水溶液ファントムをコントロールとして 5 回撮像, 評価用にロボットをコイルに取り付け, アクチュエータを 4 つ全て動かした状態で 5 回撮像し, SN 比の低下およびノイズ, 歪みの確認を行った. その結果, コントロールで $\text{SNR } 52.6 \pm 0.1$, ロボット駆動で $\text{SNR } 51.8 \pm 0.7$

で、低下率は 1.4%と非常に小さな値であった。画像の歪みやノイズも見られなかった。

3-4 考察および結語

3-3-5 の結果から、MR 対応性に関して本アクチュエータは非常に優れていると言え、MR Safe の要求を満たすものである。アクチュエータの回転精度に関してはヒステリシスが 0.3deg 以下と低く、さらに減速機等を組み合わせることで高精度な位置決めが可能であると考えられる。指令から動作までの遅れ時間に関しては、流体圧を動力源として用いているため、電磁気力を用いたモータに比べ、値は大きくなった。しかしながら、MRI ガントリ内にて用いることを考慮すると、その使用目的の多くは位置決めなどの動作であり、ステップ数指示によるため遅れ時間が特に問題とはならない。また仮に、外部からの位置情報によるフィードバック制御を行う場合、アクチュエータの 1 ステップの動作速度は現在のところ最速で 15msec であるので、誤差は数ステップ以内に収まるものと考えられる。また、回転トルクは速度とトレードオフの関係にあり、40rpm 以上の速度で動作させたとしても、軽量物の位置決めや穿刺術には十分なトルクを有している。これにより、本アクチュエータをロボット等の機構と組み合わせることで、高精度での位置決めが可能になると考えられる。ただし、回転スピードは通常のモータに及ばないため、高速な動きには適さず、トルク制御等を行うことは出来ない。

本研究では、非金属空圧式回転・直動アクチュエータを開発した。評価実験により、マニピュレータ駆動に十分なトルクと高精度な位置決めが可能であることを確認した。また、高い MR 対応性を有していることを確認した。

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

正宗 賢 ・ 准教授

佐寫 浩之 ・ 大学院修士課程学生

5. 研究実施時期

2010 年（平成 22 年） 4 月 15 日から 2011 年（平成 23 年） 3 月 31 日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

1. Hiroyuki Sajima, Hiroki Kamiuchi, Kenta Kuwana, Takeyoshi Dohi and **Ken Masamune**, MR-Safe Pneumatic Rotation Stepping Actuator, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.24, No.5, pp.820-827, 2012
2. 佐寫浩之, 山下紘正, 土肥健純, **正宗賢**: MR 対応空圧式揺動螺旋歯直動型アクチュエータの研究開発; 第 19 回日本コンピュータ外科学会大会 (福岡, November 2010), 日本コンピュータ外科学会誌, Vol. 12, No. 3, pp. 468-469, 2010

3. 佐寫浩之, 佐藤生馬, 山下紘正, 廖洪恩, 土肥健純, **正宗賢** : Puncture Accuracy by Guiding Needle with a 2-DOF Non Metal Manipulator Equipment with Pneumatic Stepping Actuators inside Open type MRI ; 第49回日本生体医工学会大会 (大阪, June 2010), 日本生体医工学会誌 生体医工学, Vol. 48, Suppl. 1, p.133, FC-7-3(CD-ROM), 2010
4. 発明者 : 佐寫浩之, **正宗賢**, 土肥健純
発明の名称 : ステッピング・アクチュエータ
出願番号 : 特願 2010-117286
出願日 : 平成 22 年 5 月 21 日

7. 内外における関連研究の状況

2013年現在, MRI下で駆動する治療支援ロボットは世界的に多数研究されてきている。それらの中で, 本研究のような, ステッピング空圧アクチュエータの研究も何件か出始めてきている現状である。それらは我々が本研究を通して主張した, 部品点数が少なく, コンパクトに作れるという点を重視しており, 今後は多様化したモータが出て来るものと考えられる。

8. 今後の発展に対する希望

今後は本研究の成果を手術機器等へ組み込み, 実際に応用されることを希望している。また, 現在我々は本研究のアクチュエータの原理を非磁性のみならず金属材料を用いたモータへの応用を展開して開発を行っており, 今回の限られた環境下での利用だけでなく, 様々な状況における簡便なモータとして活用され発展していくことも大いに期待している。

以上