

MR 磁場を利用するアクチュエータの性能向上に関する研究

66806 デディ ヌル ザマン

指導教員 佐久間 一郎 教授

Combining Intra Operative Magnetic Resonance Imaging and Surgical Assist Robot to an MR-compatible Surgical Assist Robot is expected to improve quality of operation. We developed a novel actuator for MR-compatible Surgical Assist Robot, which actively uses MR magnetic field and rotates by regulating pulse current. Ratchet mechanism was adopted to make this actuator can be encoder-less controlled like a stepping motor. Moreover clock-wise rotation, counter clock-wise rotation, constrained and non-constrained conditions were achieved by using this mechanism. But in further we found that full constraint and full non-constrained condition is still not achieved. We propose second prototype (120x89x69 [mm³], 756 [g]) which eliminate friction mechanism and introduce knock mechanism and adopted ratchet gear and ratchet pawls. Performance of the second prototype is better than first.

Key words: MR Compatible Actuator, Encoder-less, Ratchet Mechanism

1. 背景

近年、より安全で精確な手術の実現を目的として、MR 対応手術支援ロボット研究が行われている。しかし、MRI は強くかつ安定した磁場を必要とするため、MRI 装置近傍に磁場を歪めてしまう金属を用いたロボットやそれを駆動する電磁モータを導入することは困難である。

そこで材料に樹脂材やチタンの使用 1)、MRI 対応アクチュエータとして水圧によるアクチュエータ 2)や非磁性超音波モータ 1)の採用といった対策がとられている。しかし、両者のアクチュエータはフィードバック制御が必要であり、その使用は煩雑である。そこで本研究では、オープンループでの位置決めを可能とする新型アクチュエータを提案した。

先行研究では従来の電磁モータの原理を参考にし、MR 磁場を積極的に利用し、コイルの微小往復回転運動とラチェット機構を用いてオープンループで位置決め可能な 1 次試作機を製作した (Fig.1)。本体には樹脂 (PEEK)、回転軸にはチタンを用いた。サイズは 84×76×58 [mm³] で、重量は 380 [g] である。コイルは直径 0.5 [mm] の銅線を用い、巻き数 540 回、力を発生させるコイルのサイズ 40×12×52 [mm] で駆動電流 0.5 [A] とした。これは摩擦を考慮しないと 0.3 [T] の静磁場内で 75 [mNm] のトルクを発生する。

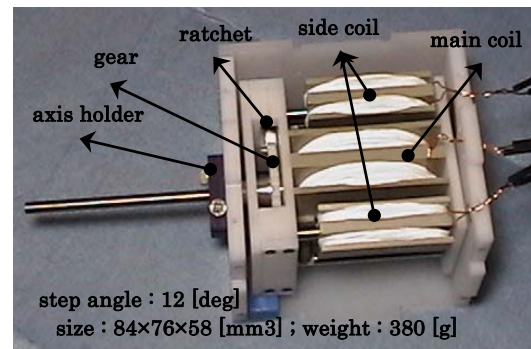


Fig. 1 First prototype of novel actuator

1 次試作機ではいくつかの問題点を残している。

- 軸を締め付ける機構を使用することによって完全フリー状態が実現できていない
- 軸を締め付ける機構を使用することによって完全保持状態の実現ができていない
- 軸を締め付ける機構を使用することによって出力が小さい
- バックラッシュがまだ残る
- オーバランに対応していない

2. 目的

本研究の目的は 1 次試作機の性能評価を行い、評価の結果を元に性能を向上させる。

3. 評価実験

0.3 [T]の磁場環境下でアクチュエータの位置決めを可能にするステップ状の回転や正転、逆転、保持、フリーという4つの状態が確認された。そして1次試作機の性能評価実験を行った。

3.1 出力トルク

アクチュエータ軸に取り付けたワイヤで荷重を巻き上げることによって出力トルクの測定を行った。最大出力トルクが15.1 [mNm]となった。

3.2 位置決め

アクチュエータのステップ角、位置決め誤差、バックラッシの評価を行った。

3.2.1 ステップ角

アクチュエータを1パルス回転させて、回転した量を計測した。時計回り回転と反時計回り回転についてそれぞれ10回繰り返した結果、時計回りのステップ角が 12.04 ± 0.28 [deg]、反時計回りのステップ角が 12.22 ± 0.36 [deg]であった。

3.2.2 位置決め誤差

アクチュエータを60 [deg]、120 [deg]、180 [deg]、240 [deg]、300 [deg]、360 [deg]時計回りに回転させ、回転角度を測定した。同様にし、反時計回りの評価も行った。その結果をそれぞれFig 2とFig 3に示す。

3.2.3 バックラッシ

アクチュエータを時計回り120 [deg]回転させ、そのときの角度を記録する。次に同方向に120 [deg]回転させ、静止後120 [deg]逆方向に回転させ、回転角度を先に記録した回転角度の差を求め、記録する。10回繰り返した結果、バックラッシュ (CW→CW→CCW) が 0.855 ± 1.6 [deg]となった。同様にして反時計回り評価も行った。10回繰り返した結果、バックラッシュ (CCW→CCW→CW) が 0.904 ± 1.0 [deg]となった。

3.3 最大無負荷回転速度

無負荷回転速度の評価を行った結果、最大無負荷回転速度が20 [rpm]という結果が得られた。

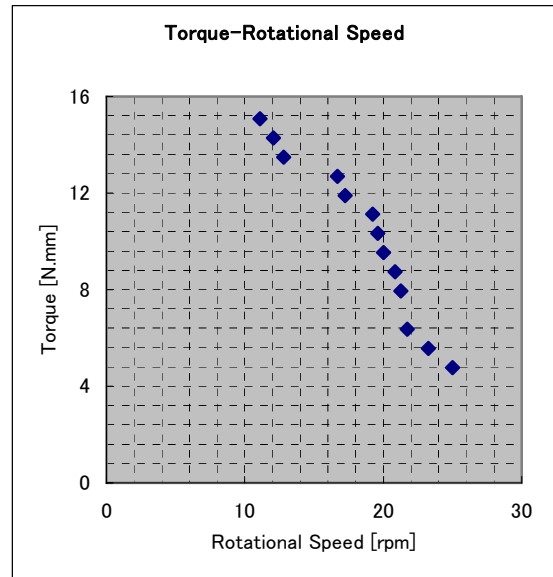


Fig.2 Torque Evaluation

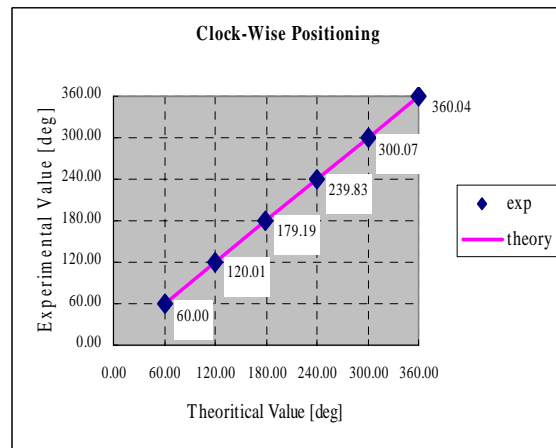


Fig.3 Positioning accuracy on CW rotation

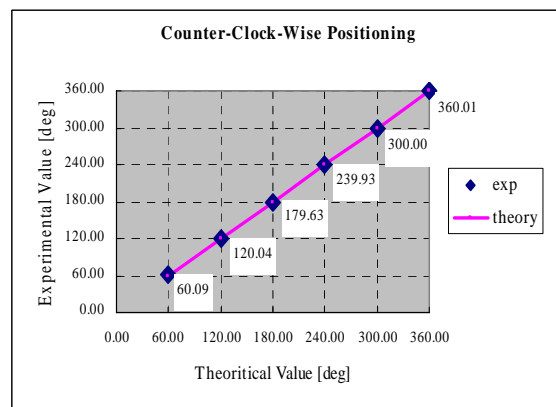


Fig.3 Positioning accuracy on CCW rotation

3.4 MR 対応性

0.2 [T]のオープン MRI 環境でファントムを用いて SN 比の評価を行った結果、アクチュエータが設置されるとない場合の SN 比がほぼ同じであった。

4. 1 次試作機の問題点の解決法

2 次試作機では 1 次試作機にあった問題点をなくすために開発された。完全保持状態、完全フリー状態、出力の減少の問題に対して 1 次試作機にあった軸を締め付ける機構をなくし、ラチェット爪の数を 4 つにした。2 つは駆動用のラチェット爪に、他の 2 つストッパー用に使う。さらにインボリュート歯車を 2 つのラチェット歯車の組み合わせに変えた。ロータ部を軽量化するためにラチェット切り替え用コイルをロータから外しカバーにつけた。駆動用のラチェット爪の状態を保持するために新たなロック機構を導入した。

5. 2 次試作機の性能評価

0.2[T]のオープン MRI で出力トルクと最大無負荷回転速度の評価を行った。

5.1 出力トルク

アクチュエータ軸に取り付けたワイヤで荷重を巻き上げることによって出力トルクの測定を行った。回転速度を変えながらトルクを観察的に測った。結果は

5.2 最大無負荷回転速度

0.2 [T]のオープン MRI 環境で最大無負荷回転速度を計った。31.25 [rpm]という結果が得られました。

6 結論

1 次試作機の発生するトルクが計算値 75 [mNm]の約 20%しか出なかった。原因として考えられるのは、動作する時に摩擦力が常にロータ軸にかかる必要があり、主コイルが発生するトルクを減らしてしまう点である。本アクチュエータの

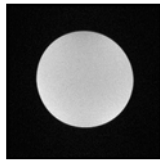
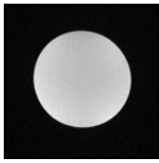

With Motor	Control	Difference
		
SNR (n=10) Avg. : 66.3; SD: 0.9	SNR (n=10) Avg. : 67.7; SD: 0.7	No significant differ

Fig 4. Evaluation on the image with system control actuator off

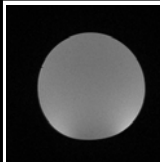
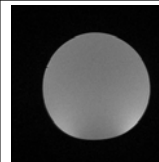
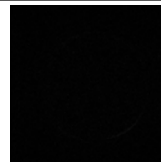
With Motor	Control	Difference
		
SNR (n=10) Avg. : 70.8; SD: 1.3	SNR (n=10) Avg. : 70.9; SD: 1.1	No significant difference

Fig 5. Evaluation on the image with system control actuator on

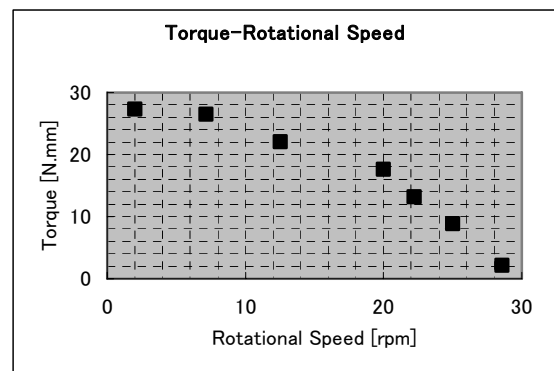


Fig 6. Torque Experiment

駆動原理を考えるとこの摩擦は避けられないため、発生するトルクは理論上では最大主コイルのトルクの 50%となる。軸を閉めこむ機構の摩擦量を微小にコントロールできるように改良する必要がある。また、コイル全体の慣性モーメントを考慮し、解析を行い、コイルの最適なサイズを求める必要もある。

位置決め評価から本アクチュエータの精度が高いことが分かったが、その精度をさらに向上させるためにラチェット専用の歯車を用いる改良が考えられる。

1次試作機の制御系を改良し、無負荷最高回転速度を35.71[rpm]に向上させた。さらに1ステップ応答も6.7[msec]から0.9[msec]に向上させた。

2次試作機では1次試作機にあった問題点を解決した。2次試作機のトルクは1次試作機よりも上がった。最大無負荷回転速度は31.35[rpm]であった。

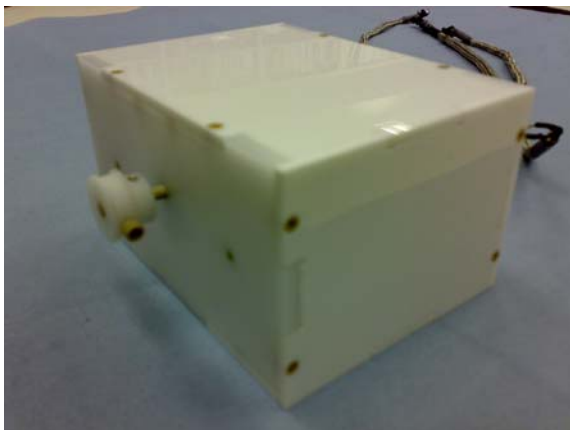


Fig. 7 Second prototype of novel actuator
Size 120x69x89[mm³] weight 756 [g]

参考文献

- 1) K. Chinzei, et al.: MR Compatibility of Mechatronic Devices: Design Criteria, Proc. MICCAI '99, pp. 1020-1031, 1999.
- 2) D. Kim, et al., A new, compact MR compatible surgical manipulator for minimally invasive liver surgery, MICCAI '02, pp. 164-169, 2002.

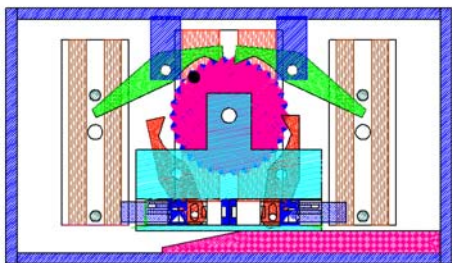


Fig 8.1 ready for ccw rotation

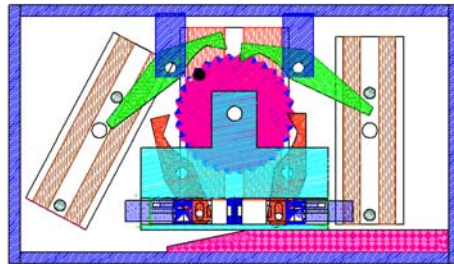


Fig 8.2 left ratchet opens left lock pawl

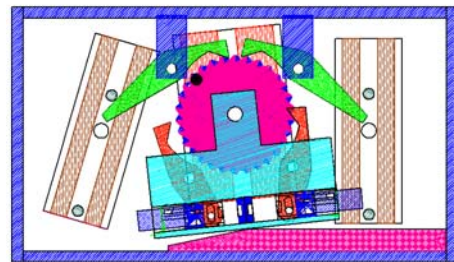


Fig 8.3 main coil + gear rotate ccw

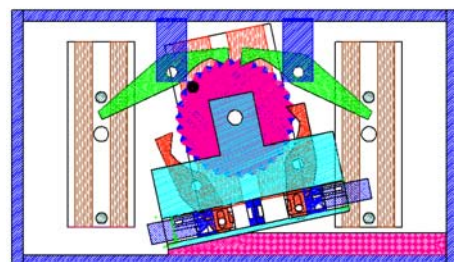


Fig 8.4 rotation limited by angle limiter

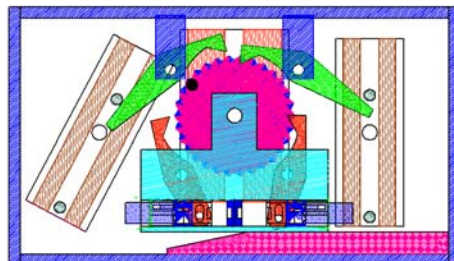


Fig 8.5 step finished