

力覚フィードバック鉗子のための 小型高出力リニアモータの開発研究

横浜国立大学大学院工学研究院
准教授 下野 誠通

1. 研究目的

近年、低侵襲性外科手術の発展による患者の身体的負荷の少ない高度医療の実現が注目されている中、極めて繊細で高難度な手術を実行可能な手術支援ロボットの開発が、更なる患者のQoL向上のための社会的課題となっている。そして、このような革新的な手術支援ロボットの実現のための鍵技術として、鮮明で微妙な力覚を外科医に知覚せしめることが可能な力覚フィードバック技術の開発が強く希求されている[1]。

低侵襲性外科手術支援ロボットは、外科医が直接操作を行うマスタシステムと実際に患者に対して手術を行うスレーブシステムから構成される。マスタシステムとスレーブシステムの間で鮮明な力覚フィードバックを実現するためには、透明性の極めて高い双方向性の運動制御が必要となる。既往の研究により、加速度制御に基づくバイラテラル制御によって高い透明性を獲得でき、鮮明な力覚伝送が可能であることが明らかにされている[2]。そして、この制御手法を応用することで、力覚フィードバック機能を有する医療用鉗子が実現可能であることが示されている[3]。しかしながら、実際の手術に実用するためには、手術において要求される器用で柔軟な動作を実現する必要がある、力覚フィードバック鉗子の多自由度化が一つの大きな課題となっている。

低侵襲性外科手術では、鉗子の運動として開閉、直動、ピッチ、ロール、ヨーの五つの動きが最低必要となる。鉗子の把持を担う開閉運動を実現するアクチュエータは、大きな出力が求められる一方で、ロボットの鉗子先端部に搭載される場合には小型軽量であることが必要となる。したがって、アクチュエータには高い力覚フィードバック特性が要求されることは当然であるが、推力／体積（重量）比も高い必要がある。力覚フィードバック特性を確保するためには、摩擦などの機械的損失が少ないダイレクトドライブモータが適しており、コギング力の発生しないコアレス構造が望ましい。また、高推力密度化を達成するには、磁束密度の向上が重要となる。そこで本研究では、力覚フィードバック鉗子への応用を目指し、積層構造に基づく小型で高出力なダイレクトドライブモータを新たに開発することを目的とする。

2. 研究方法

本研究では、図1(a)に示すような薄板構造をしたリニアモータモジュールを何層にも積層することで、小型軽量で高出力なリニアモータを実現することを検討する。一つのリニアモータモジュールでは、永久磁石が貼り付けられた二枚の薄板を連結することで固定子

を構成している。可動子は二枚の薄板に挟まれる形で配置されており、複数個のコイルが横に連結されて一体化して運動する構造となっている。このモジュール単体が既にリニアモータとして機能することが可能であるが、単体では大きな推力を獲得することが難しいため、本研究では図1(b)のように積層することで全体としての小型高出力化を達成する。

研究方法としては、まずリニアモータモジュールの積層数を変化させたときの積層形リニアモータ全体の推力特性について、電磁界解析ソフトウェアを用いたシミュレーション検証を行う。そして、実際に本モータを試作し、実験検証を行う。これらの検証を通して、新たに開発する積層形リニアモータの原理を明らかにし、有用性を確認する。

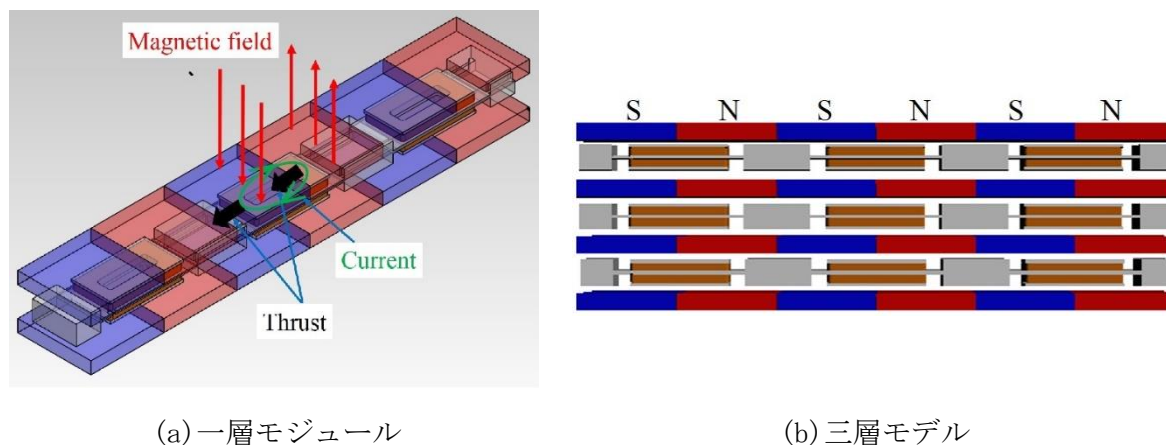


図1 積層形リニアモータのCAD図

3. 結果

3. 1. 電磁界解析結果

まず、図1(b)に示す三層構造の積層形リニアモータにおいて、各コイルの巻き数を80と設定し、電磁界解析を行ったところ、図2の磁束密度分布の結果を得た。第一層と第三層に比べて、中間の第二層では磁束密度が増加していることが確認できる。これは上層と下層

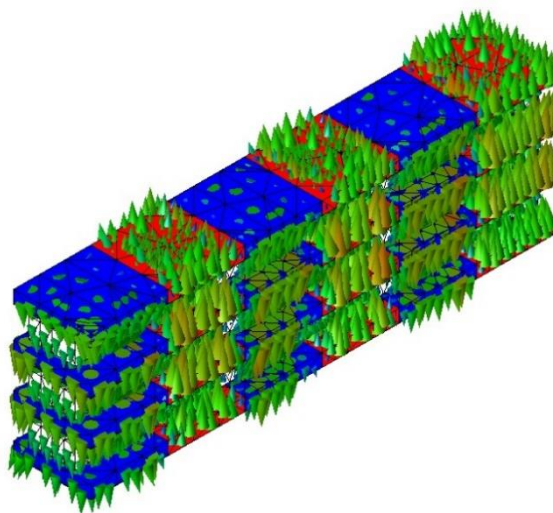


図2 磁束密度分布

の永久磁石から影響を受け、中間層において高密度化が達成されているものと考えられる。この三層モデルに対して、1[A]の電流を加えた際の各層の推力結果を図3に示す。上層（layer1）と下層（layer3）では同等の推力を得ているのに対し、中間層（layer2）では、10%程度の高推力化が達成されている。

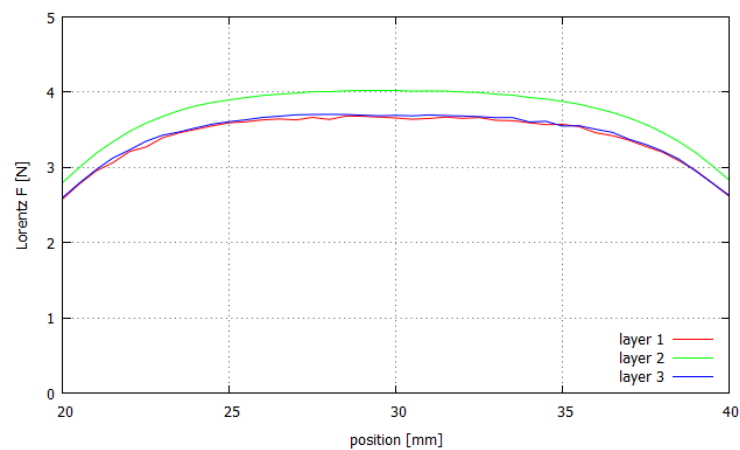


図3 シミュレーション結果

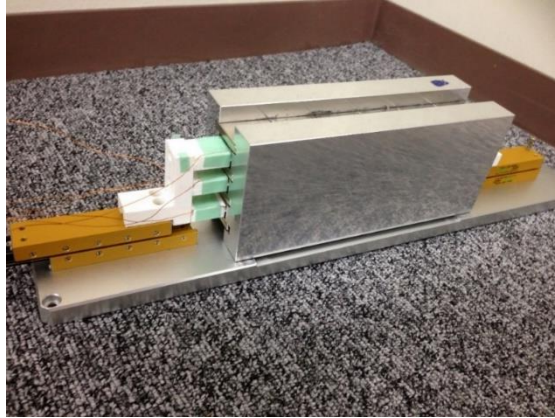
次に、積層形リニアモータの積層数を変化させた場合の、推力特性について検討を行った。その結果を表1に示す。積層数を増加させた場合は、一層モデルの最大推力に対する最大推力の比は積層数とは一致せず、高推力密度化が実現されていることが確認できる。これは、上層と下層とで挟まれる中間層が増えることで、より多くの層において磁束密度が高まり、結果としてモータ全体での高推力化に繋がったものと考えられる。

表1 層数を変化させた際の最大推力比

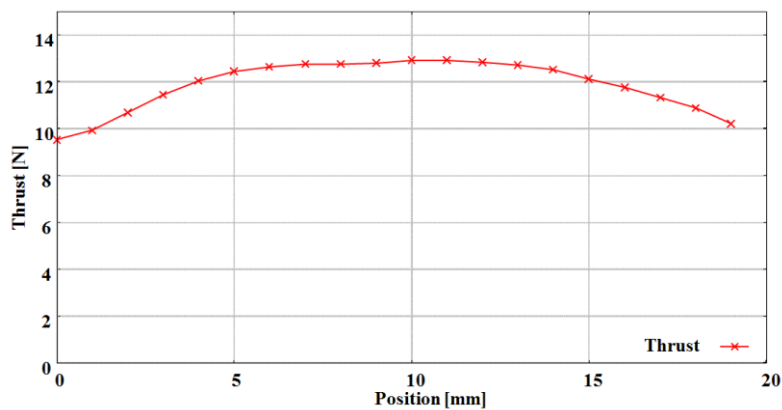
層数	最大推力 [N]	一層モデルに対する最大推力比
1	3. 2740	1. 0000
2	7. 3143	2. 2341
3	11. 438	3. 4937
4	15. 613	4. 7690
5	19. 825	6. 5547

3． 2． 試作機を用いた実験結果

積層形リニアモータの原理実証を行うために、図4(a)に示す三層モデルに基づいた試験機を実際に試作した。本試作機に対する基本特性試験の結果を図4(b)に示す。表1に示される三層モデルにおけるシミュレーション結果と比べて、実機では若干大きな最大推力を得たものの、概ね同様の特性を有していることが確認できた。また、推力特性が一定である範囲はおおよそ10mm程度であり、この可動範囲において高推力モータとして十分に使用可能であることが認められた。



(a) 三層モデルに基づく試作機



(b) 推力測定結果

図4 試作機を用いた基礎実験結果

4. まとめ

本研究では、力覚フィードバック鉗子への応用を目指し、積層構造に基づいた小型高出力の新たなダイレクトドライブモータの開発を行った。設計した積層形リニアモータモデルに対して電磁界解析を行い、提案構造によって中間層の磁束密度を高めることが可能であり、結果として高推力密度化が実現されることを確認した。また、実際にプロトタイプを製作し、実験実証を行った。今後は交流リニアモータへの応用を含め、さらなる高性能化についての研究を継続して行う予定である。

参考文献

- [1] 橋爪 誠, “手術支援ロボットの現状と将来”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 4, pp. 423-425, 2004.
- [2] W. Iida and K. Ohnishi, “Reproducibility and Operationality in Bilateral Teleoperation,” Proceedings of the 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 217-222, 2004.
- [3] K. Ohnishi, S. Katsura, and T. Shimono, “Motion Control for Real World Haptics,” IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol. 4, No. 2, pp. 16-19, 2010.