

高精度なMRIコンパチブルカセンサの開発

Development of a High-Precision MRI-Compatible Force Sensor

徳野 貴士 (中央大) 多田 充徳 (産総研) 梅田 和昇 (中央大)

Takashi Tokuno¹ Mitsunori Tada² Kazunori Umeda¹¹ Chuo University² Digital Human Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

This paper presents a newly designed MR-compatible optical force sensor: its principle, structure and performance. Our force sensor employs an optical micrometry based on differential measure of light intensity. This technology enables highly accurate and sensitive two degrees-of-freedom displacement sensing by using a point source, a photo detector and an optical lens. The developed force sensor achieves MR compatibility by placing all the electric and metallic components outside the scanner room, and extending the light path between the optical components using multi-core optical fibers. The sensor head component is made of glass fiber reinforced poly-ether-ether-keton that helps reducing hysteresis characteristics of plastic resin. The accuracy of this force sensor is better than 1.6 % under the applied force ranging from 0 to 3 N.

Key Words : Force sensor, optical micrometry, MRI

1 はじめに

MRIはその撮像原理上、磁性体や電子回路の持ち込みが著しく制限されている¹⁾。このため一般的に用いられているセンサデバイスをMRI内に持ち込むことは難しい。しかし近年では、皮下組織の構造解析²⁾、MRI環境下での手術支援³⁾、随意運動中の脳機能解析⁴⁾など、様々な分野でMRI画像と力情報の同時計測が望まれている。

Tadaらは光学式のMRI適合力センサを開発した^{5, 6)}。このセンサは、点光源LED、起歪体に固定された光学レンズ、4分割フォトダイオードから構成されており、レンズの変位に伴う点光源像の変化をフォトダイオードで検出することで力の計測を実現している。また、光学素子間の光路を10 mの多芯線光ファイバで延長するため、アンブや電源をMRI室外に設置することができる。しかし、この力センサは軸間の干渉が考慮されていないため、任意の軸方向の力に対する計測精度は3%程度にとどまる(治具を用いて単軸力だけが加わるようにした場合には1%の精度を実現可能である)。

そこで本論文では、軸間の干渉に強くより精度の高いMRI適合1軸力センサの開発を行う。具体的には、Tadaらの計測原理と新規に設計した起歪体を用いることで、1.5%程度の計測精度の実現を目指す。

2 原理

Fig. 1にTadaらが提案した力センサの原理を示す^{5, 6)}。 $[0, 0]^T$ (原点)に焦点距離 f の光学レンズ、 $[0, -2f]^T$ に点光源、そして $[0, 2f]^T$ に受光素子を配置する。レンズの光軸が z 軸方向を向いているため、点光源が受光素子の中心へと結像する。ここで、レンズに微小な並進移動 $[dx, dz]^T$ を与えると、それに伴う結像点の変位 $[dX, dZ]^T$ との間に次の関係を得る。

$$[dX, dZ]^T = \left[2dx - \frac{dx dz}{f + dz}, \frac{dz^2}{f + dz} \right]^T \quad (1)$$

式中の高次項を無視すると次式を得る。

$$[dX, dZ]^T = [2dx, 0]^T \quad (2)$$

この式から明らかなように、光学レンズの x 軸方向の変位が2倍に増幅されるのに対し、 z 軸方向の変位は結像位置の変化にほとんど影響を与えない。この特性が、センサ感度の

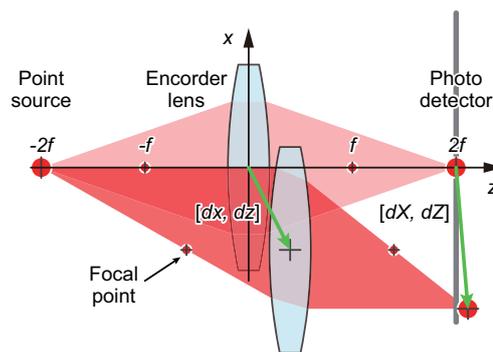


Fig. 1: Principle of the force sensor

向上に貢献する。結像位置の変化を計測するためには、2分割フォトダイオードやPSDを用いることができる。

この原理を2軸の変位計測法へと拡張することもできる。この場合、4分割フォトダイオードか2次元PSDを用いることで、光軸に垂直な面内での光学レンズの変位を計測可能となる。なお、次節で行う実装に関する説明では、この2軸変位の計測が可能な光学系を紹介するが、本研究で開発する力センサは単軸であるため1軸分の情報しか使用しない。

3 実装

Fig. 2に実装の概要を示す。両サイドの光学レンズ(W18-S0290-063-ABC, 日本板硝子)はベースに固定されており、中心の光学レンズ(前出の光学レンズと同型)は起歪体に固定されている。点光源LED(VS679TM, アルワン電子)から発せられた光がEmission Lensによって多芯線光ファイバ(FU-77, Keyence)の端面に結像する。この多芯線光ファイバの中には217本の芯が存在する。多芯線光ファイバを通過した光は、起歪体に固定されている光学レンズを介し、次の多芯線光ファイバに結像する。再び、多芯線光ファイバを通過した光はReception Lensを介し、4分割フォトダイオード(MI-1515H-4D, モリリカ)の中心に結像する。ここで、起歪体に力が加えられ光学レンズに変位が生じると、式(1)で表される結像点の変位が4分割フォトダイオードの受光面に生じる。

MRI環境内で計測を行う場合、多芯線光ファイバを延長することによって磁性体の含まれていないセンサ計測部のみを

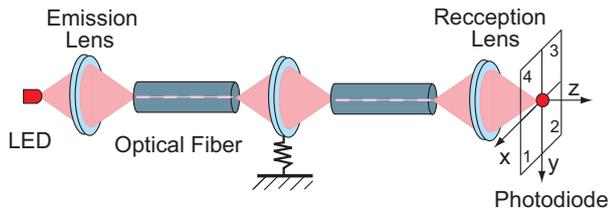


Fig. 2: Implementation of the optical micrometry

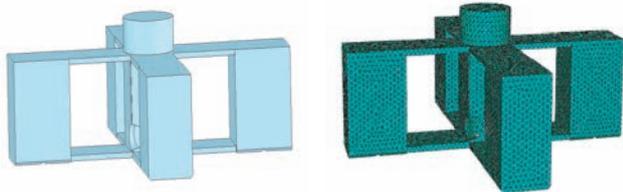


Fig. 3: Designed elastic body Fig. 4: Finite element model

撮像近傍に持ち込むことが可能となる。

また、4分割フォトダイオードの各面の出力電流をオペアンプ(OP400, Analog Device Inc.)より構成されるI-V変換器を用いて増幅する。このI-V変換器の出力電圧を計装器(INA105, Texas Instruments Inc.)を用いて式(3)の計算を行う。ここで S_1 から S_4 をそれぞれのセグメントからの出力電圧とする。

$$\begin{aligned} S_x &= (S_1 + S_4) - (S_2 + S_3) \\ S_y &= (S_1 + S_2) - (S_3 + S_4) \end{aligned} \quad (3)$$

起歪体に固定された光学レンズの変位が微小である場合、その変位は出力電圧の差分に比例する。つまり、加える荷重と電圧の差分を関係付ける係数を求めることにより、起歪体に加わった力を算出することが出来る。

4 センサ計測部の製作

4.1 起歪体 起歪体とは、光学レンズを固定し、力が加えられた際に微小に歪み、レンズを変位させる部位である。軸間の干渉に対し頑強さが求められる1軸力センサであるため、起歪体は計測する垂直荷重に対してはレンズが十分に充分に変位し、計測しないせん断荷重に対してはレンズが変位しにくい構造が望ましい。せん断荷重によるレンズの変位は精度を下げる原因となる。垂直荷重が加わった場合とせん断荷重が加わった場合に生じるレンズの変位の比を出来る限り大きく、加工し易い単純な構造を目指した。そこで、起歪体には可動部と固定部とを二枚の薄板で挟んだ平行平板構造を用いた。両薄板に対して垂直方向の力が加わった場合のみ、可動部は変位しやすい。この構造により、垂直荷重に対して歪み、レンズが変位するが、せん断荷重の影響はほぼ受けない。周りの4つのブロックが固定部となり、中央の柱体が可動部になる。

3次元CADを用いて、設計した起歪体をFig. 3に示す。全体は縦・横25mm、高さ10.1mm、各平行平板は長さ5.6mm、幅3.8mm、厚さ0.4mmとした。光学レンズは、中心にある柱状部分の下部に挿入し固定される。

4.2 レンズの変位量 力センサに対し10Nの垂直荷重とせん断荷重を与えた際のレンズの変位量を、Abaqus 6.7を用

Table 1: Material constants

弾性係数	8300 N/mm ²
ポアソン比	0.28
密度	0.0014 g/mm ³

Table 2: Displacement of the optical lens

垂直荷重	9.01611 × 10 ⁻² mm
せん断荷重 1	1.08639 × 10 ⁻³ mm
せん断荷重 2	5.32906 × 10 ⁻⁴ mm
せん断荷重 3	1.90090 × 10 ⁻⁴ mm

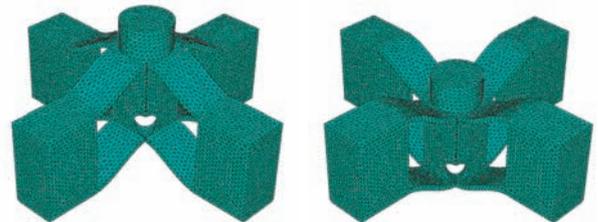


Fig. 5: Result of the modal analysis: first mode, 4.8 kHz

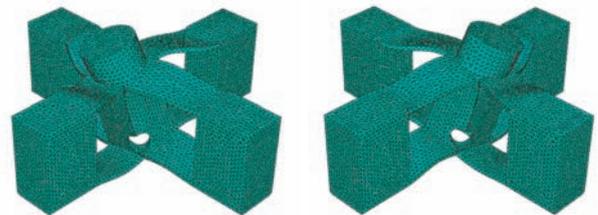


Fig. 6: Result of the modal analysis: second mode, 2.6e1 kHz

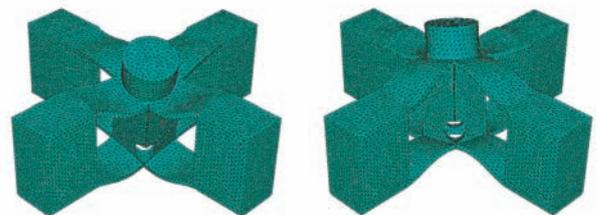


Fig. 7: Result of the modal analysis: third mode, 2.7e1 kHz

いた有限要素解析より算出した。解析にはTable 1に示す材料定数を用いた。せん断荷重の方向はそれぞれ光学レンズ挿入方向に0度、45度、90度をなす3方向で解析を行った。要素形状は四面体、要素数は119133個とした。要素分割した起歪体をFig. 4に示す。

また、解析結果ををTable 2に示す。垂直荷重による変位量は0.090mm、最も大きいせん断荷重による変位量は0.0011mmという結果を得た。これより変位量の比は、約83:1となる。

4.3 固有振動数 Abaqus 6.7を用いて、起歪体と、起歪体を固定する役割を持つベースの固有振動数を求めた。

各モードの振動数と変形状況をFig. 5からFig. 7に示す。1次モードの振動数は4.8kHzであり、起歪体の光学レンズが挿入される中心の柱体が上下に震動する形となった。2次

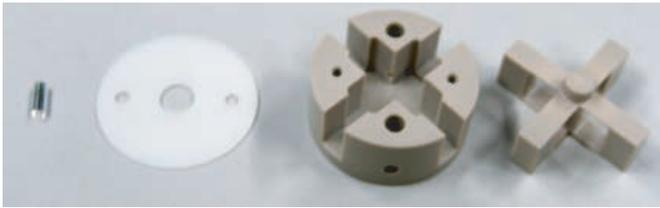


Fig. 8: Optical lens, cover, base and elastic body

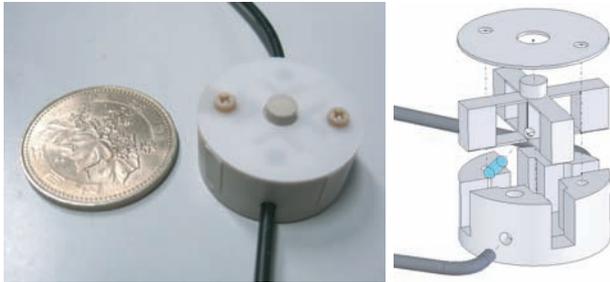


Fig. 9: Detecting element of the force sensor

モードの振動数は 26 kHz であり、起歪体の柱体上部の先端部分が大きく左右に振れる形となった。3 次モードの振動数は 27 kHz であり、2 次モードの振動に似ているが、3 次の場合は紙面に対して垂直な方向に先端部が振れている。

実際の使用環境下で想定される振動数は数十 Hz であり、それに比べ本力センサの固有振動数は 4 kHz 以上と遥かに大きいため、固有振動数に関しては問題ないと思われる。

4.4 カセンサ計測部のパーツ 製作されたセンサの各パーツを Fig. 8 に示す。光学レンズ、カバー、ベース、起歪体である。カバーは外部の余分な光のセンサ計測部内へ進入や起歪体の先端部以外の箇所にかがかることを防ぐ。ベースは起歪体と多芯線光ファイバを固定する役割を持つ。各パーツと多芯線光ファイバを組み合わせたものを Fig. 9 に示す。センサ計測部の大きさは縦・横 25.0 mm、高さ 9.5 mm である。

起歪体とベースの素材には、日本ポリペンコ社のポリエーテルエーテルケトン素材ガラス繊維強化グレードを用いた。連続使用温度は 250 であり、耐摩擦磨耗性、機械加工性等においてバランスの取れた熱可塑性プラスチックである。カバーの素材にはデルリンを用いた。

5 センサの特性

5.1 キャリブレーション センサに加えた垂直荷重と計装器の出力電圧の関係(青プロット)と、同じ大きさの垂直荷重とせん断荷重を加えた際の荷重と計装器の出力電圧の関係(赤プロット)を Fig. 10 に示す。それぞれの計測を 10 回ずつ繰り返した。きれいな線形関係がみてとれ、力の計測が正しく行えることがわかる。Fig. 10 の直線は全プロットを最小二乗法により直線近似したものであり、この近似直線の傾きを力と出力電圧の係数とする。

5.2 センサの精度 カセンサに垂直荷重を加えた際の挙動を Fig. 11 に示す。この計測は連続して 3 回繰り返し行った。どのプロットも同じ直線上に重なり、ヒステリシスはほぼ見られないことを確認した。またこの計測値は 3N を超えたところで飽和すること、垂直荷重での最大誤差は 1.4 % であることを確認した。

また、せん断荷重の影響を調べるため、力センサにせん断荷重を加えた際の挙動を Fig. 12 に示す。せん断荷重の計測で

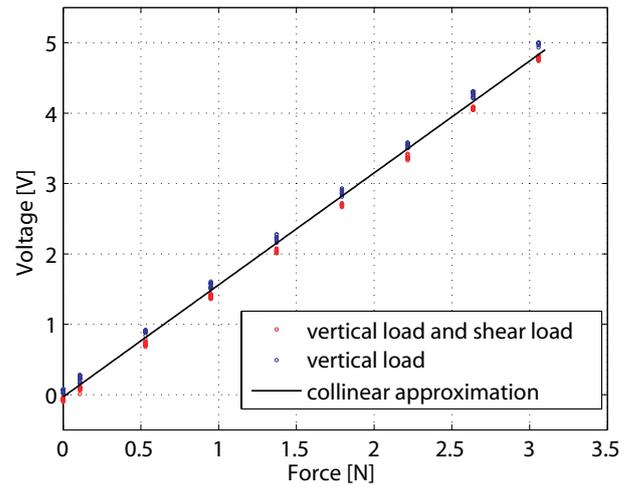


Fig. 10: Output voltage against the applied force

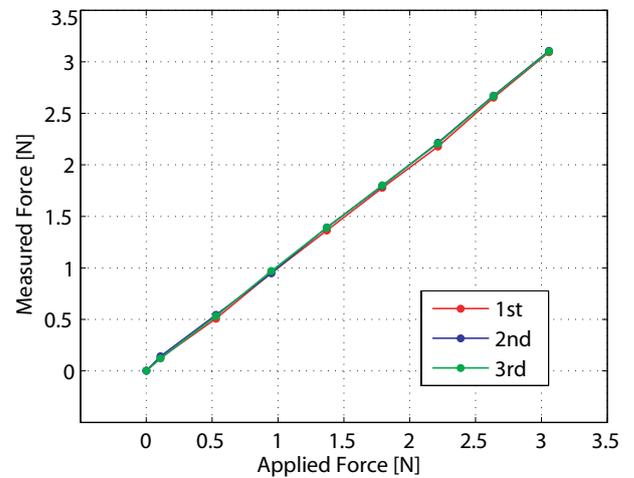


Fig. 11: Measured force against applied vertical force

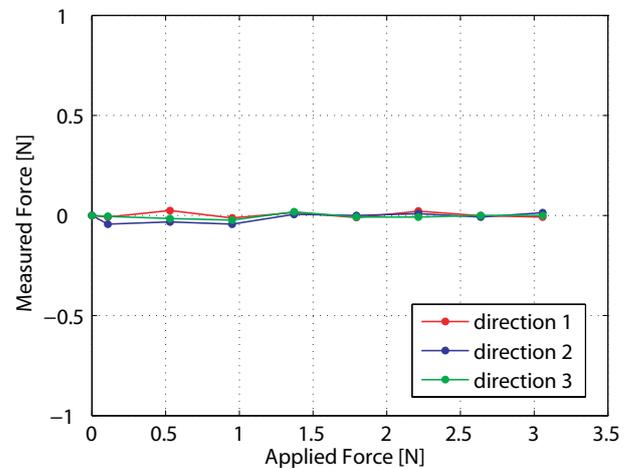


Fig. 12: Measured force against applied tangential force

は、それぞれ異なる方向の3つのせん断荷重の計測を行った。

せん断荷重の方向は、それぞれ光学レンズの光軸に対して0°, 45°, 90°をなす方向である。どのせん断荷重の計測値もほぼ0Nに近い計測結果になり、せん断方向の影響はほぼない。せん断荷重での最大誤差は、1.6%であることを確認した。

従って、本力センサはヒステリシス、軸間の干渉を含めて精度1.6%であることを確認した。TadaらのMRIコンパチブル力センサの精度は3%であり、本力センサは精度、軸間干渉の面において改善が確認できた。

6 結論

本研究では、高精度で軸間の干渉に強い光学式の1軸MRIコンパチブル力センサの開発を目指し、結果として、縦・横25.0 mm、高さ9.5 mm、定格3 N、軸間の干渉、ヒステリシスを含め精度1.6%の特性を得ることが出来た。既存のMRIコンパチブル力センサと比較してもとても高い性能を持つと言える。また、起歪体の平行平板のサイズを改良することにより、定格を大きくすることは充分可能であると考えられる。今後は、起歪体の平行平板部分の再設計を行うことで、定格の増加を目指す。

参考文献

- 1) Kiyoyuki Chinzei, Ron Kikinis, and Ferenc A. Jolesz. MR compatibility of mechatronic devices: Design criteria. In *Proceedings of the Second International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention*, pages 1020–1030, 1999.
- 2) Mitsunori Tada, Noritaka Nagai, Hiroaki Yoshida, and Takashi Maeno. Iterative FE analysis for non-invasive material modeling of a fingertip with layered structure. In *Proceedings of Eurohaptics 2006*, pages 187–194, 2006.
- 3) Daeyoung Kim, Etsuko Kobayashi, Nobuhiko Hata, Ichiro Sakuma, and Takeyoshi Dohi. A 6-DOF mechanism for a MR-compatible surgical manipulator. In *Proceedings of the 6th International Conference on Biomedical Engineering and Rehabilitation Engineering*, pages 67–69, 2002.
- 4) J. Z. Liu, T. H. Dai, T. H. Elster, V. Sahgal, R. W. Brown, and G. H. Yue. Simultaneous measurement of human joint force, surface electromyograms, and functional MRI-measured brain activation. *Journal of Neuroscience Methods*, 101:49–57, 2000.
- 5) Mitsunori Tada and Takeo Kanade. An MR-compatible optical force sensor for human function modeling. In *Proceedings of the International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention*, pages 129–136, 2004.
- 6) Mitsunori Tada and Takeo Kanade. Design of an MR-compatible three-axis force sensor. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2618–2623, 2005.