ロボット用力計測センサに関する基礎的研究*

(第4報, 光ファイバを用いたロボット用6軸力センサ)

福田 敏男^{*1}, 細貝 英実^{*2}, 佐藤 聡^{*3}

A Study on a Sensor for the Force Measurement of a Robot Hand (4th Report, New Method of Sensing Force and Moment Using Optical Fiber)

Toshio FUKUDA, Hidemi HOSOKAI and Akira SATO

This paper deals with a new method of sensing force and moment for robotic applications using optical fibers. The six components of force and moment can be measured by microbending phenomena of optical fibers. If forces are applied on an optical fiber, then microbending decreases the optical transfer efficiency rate so that the magnitude of the force can be given by measuring the output of a photodiode receiver. Based on this methodology, a new method of sensing force and moment using optical fibers is here proposed to measure both stressing and compressing of six components of force and moment with pretention structure. Also, to decrease interference among of six components of force, we propose a lower interference method using calibration matrix; this method is shown to be effective through some experimental results.

Key Words: Robotic Force Sensor, Robot Applications, Force and Moment Measurement, Six Components of Force, Optical Fiber, Lower Interference Method, Calibration Matrix

1. はじめに

これまで, ロボット用センサとして種々のセンサが提案され, 実用化されており⁽¹⁾⁽²⁾, 著者らもロボット用力センサを試作し報告してきた^{(3)~(5)}. 近年ロボットの作業領域が拡大し, それに伴ってセンサに求められる性能も変化してきている. 例えば, 宇宙空間でロボットが作業を行う場合, ひずみゲージタイプの力センサを用いると, 温度変化の影響が大きく作用する環境では, ひずみゲージの特性上温度補償が必要であり, 必ずしも十分な機能を発揮するとはいえない. また, 引火性の高い気体中の作業などでは, 電気系統により生ずるアークが事故につながる可能性があり, 危険を伴う. 高電圧下でのロボット作業においては, 電気絶縁などが必要である. そこで, 本論文では, 以上のような問題を考慮し, 磁場の影響が少ない, 温度変化の影響が少ない, 干渉性が少ない, 軽量であるなどの特長を有している光ファイバ^{(6)~(8)}を用いた, 新しいタイプの力センサを考案, 試作し, 新しい力の計測方法を提

案する.

また, 力センサの小形・軽量化に際して, 互いの力の干渉が問題になるが, ここでは, 干渉の度合を示すキャリブレーション行列を導入して, 6分力の干渉を低減する方法を提案し, 6分力の計測実験によって, その有効性を示す. 本論文では, センサの静特性についてのみ検討を行う.

今回報告する力センサは, 力検出素子として光ファイバを用い, さらにセンサから得られる情報を伝達する手段としても光ファイバを用いるものであり, その有用性についても考察を行う.

2. 光ファイバを用いた 力計測の原理

光ファイバの基本構造は図1に示すように, 中心部のコアとその外側のクラッド層からなっており, 光は, コアとクラッド層との境界面で全反射を繰返して伝達される. このとき, 光ファイバに過度の曲がりが生ずると, 全反射しない光が生じそれが漏えい光として外部に漏れてエネルギー損失になる. このような曲がりは微小であっても, 連続である場合には多大な損失となるので, 光ファイバシステムを構成する場合には注意が必要である. 本論文では, 光ファイバに外力を作

* 原稿受付 平成元年5月2日

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町1).

^{*2} 正員, 東京理科大学工学部 (〒162 東京都新宿区神楽坂1-3).

^{*3} ローランド(株) (〒432 浜松市大久保町1227).

用させて曲がりを生じさせ、出力光量の変化を読取ることによって、光ファイバに作用している力を計算するという方法を用いるが、これをマイクロベンディングと呼ぶことにする。光ファイバに外力が作用している場合の、受光部フォトダイオードの出力例を図2に示す。この結果を見ると、光ファイバマイクロベンディングは、適当な荷重であればヒステリシスも少なく、直線性も良好であることから力検出素子として使用することが可能である。今回試作したセンサには、力検出素子として取扱いが楽になるように、図3に示すような力検出ユニットを製作し、これを利用した。さらに、図4に示したセンサモデル図において、この力検出ユニットを点 P_n に配することにより、以下に示すように力の6成分の計測が可能となる。ただし、式中で使用する記号は次のとおりである。

- f_n : 力の検出点 P_n にかかる力
 (u, v): 力の作用点の x, y 座標
 k_* : 各成分に対するセンサの構造上のばね効果による定数
- $$F_z = (f_0 + f_1 + f_2 + f_3) \cdot k_{fz} \quad (1)$$
- $$u = \frac{f_0 + f_1 - f_2 - f_3}{f_0 + f_1 + f_2 + f_3} d_0 \quad (2)$$

図1 光ファイバの基本構造

図2 マイクロベンディングによる出力電圧の変化

$$v = \frac{-f_0 + f_1 - f_2 + f_3}{f_0 + f_1 + f_2 + f_3} d_0 \quad (3)$$

$$M_x = d_0(-f_0 + f_1 - f_2 + f_3) \cdot k_{mx} \quad (4)$$

$$M_y = d_0(-f_0 - f_1 + f_2 + f_3) \cdot k_{my} \quad (5)$$

$$F_x = \frac{d_0}{l_0} (f_0 + f_1 - f_2 - f_3) \cdot k_{fx} + \frac{l_1}{l_0} (f_4 + f_5 - f_8 - f_9) \cdot k_{fx} \quad (6)$$

$$F_y = \frac{d_0}{l_0} (-f_0 + f_1 - f_2 + f_3) \cdot k_{fy} + \frac{l_1}{l_0} (f_6 + f_7 - f_{10} - f_{11}) \cdot k_{fy} \quad (7)$$

$$M_z = d_0(f_4 - f_5 + f_6 - f_7 + f_8 - f_9 + f_{10} - f_{11}) \cdot k_{mz} \quad (8)$$

ここで式(2), (3)を除く以上の式をマトリックスで表現すれば、

$$F = Cf \quad (9)$$

となる。また、式中 k_x は実験によりキャリブレーションする必要がある。 k_* を求める計算式は、実際の力を

図3 力検出モジュール概略図

図4 センサモデル図

それぞれ F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z とすれば,

$$k_{mx} = \frac{M_x}{d_0(-f_0 + f_1 - f_2 + f_3)} \dots\dots\dots(10)$$

$$k_{my} = \frac{M_y}{d_0(-f_0 - f_1 + f_2 + f_3)} \dots\dots\dots(11)$$

$$k_{fx} = \frac{F_x - \frac{d_0}{l_0} (f_0 + f_1 - f_2 - f_3) \cdot k_{mx}}{\frac{l_1}{l_0} (f_4 + f_5 - f_8 - f_9)} \dots\dots\dots(12)$$

$$k_{fy} = \frac{F_y - \frac{d_0}{l_0} (-f_0 + f_1 - f_2 + f_3) \cdot k_{my}}{\frac{l_1}{l_0} (f_6 + f_7 - f_{10} - f_{11})} \dots\dots\dots(13)$$

$$k_{mz} = \frac{M_z}{d_1(f_4 - f_5 + f_6 - f_7 + f_8 - f_9 + f_{10} - f_{11})} \dots\dots\dots(14)$$

以上の式よりすべての係数が決定されるが、これらの係数は既知の荷重をかけて実験により算出するものであり、その手順に注意する必要がある。まず式(10)、(11)より k_{mx} , k_{my} を求めた後、それを利用して式(12)、(13)で k_{fx} , k_{fy} を求めなければならない。そのほかの係数については任意に算出してよい。

3. 力計測センサの構造

ロボットハンドに作用する力は、 x , y , z 軸に対する軸力と、それぞれの軸回りのモーメントという六つの力によって完全に規定される。そこで、この力の6成分をそれぞれ独立に計測できるセンサの構造を考案し、センサの基本構造とする。今回光ファイバを利用して構成した力検出モジュールの概略を図3に、センサの基本構造を図5に示す。ここで、①は力の作用する面で、②の板ばねによって支持され、 x , y 軸回り、および z 軸方向に対して自由度を有している。また、③は支持部④によって支持され、 x , y 軸方向、および z 軸回りに自由度を有している。これらの自由度を有する各ブロックを、図4のモデル図に示すように、力検出素子によって拘束することによって、力の6成分

図5 力センサ概略図

を計測する。

また、製作した6分力計測センサの諸元を、表1に示す。

4. 実験装置

6分力計測装置の計測システムの概略を図6に示す。レーザ発生器から光ファイバに入射したレーザ光は、センサを通過した後、受光部フォトダイオードによって電流に変換され、サーキット部によって電流-電圧変換、および増幅されてA-D変換器を介してCPUに取り込まれる。レーザ光入射部は図7に示すように、光ファイバをスラブ状にしたものと、光ファイバによる回折光とによって、すべての光ファイバにレーザ光を入射することが可能となっている。なお、使用したレーザは出力5mwのHe-Neレーザで、光ファイバは外径5mmのプラスチック光ファイバである。

表1 6分力センサ諸元

W*B*H	70*70*50 (mm)
weight	750 (g)
capacity	f_z 0-20 (N) f_x, f_y 0-20(N) m_x, m_y 0-0.5(Nm) m_z 0-1.0(Nm)
opt.fiber	d=0.5(mm) prastic
laser	5mW He-Ne Laser

図6 計測システム概略図

図7 レーザ光入射部概略図

5. 実験結果

5・1 干渉を考慮しない場合 各荷重を単独に作用させた場合のセンサの出力結果を図8～13に示す。また、このときの各成分間での干渉の度合を表2に、測定精度を表3に示す。

図8～13, 表2, 3より、実際には荷重を加えていないかはずの成分にも、他成分からの干渉を受けて出力が出ていることがわかる。そこで、各成分間の干渉を打ち消すために、

$$F = CCf \cdots \cdots (15)$$

とし、 $\hat{c}$ をキャリブレーション行列と呼ぶことにす

表2 各成分間の干渉

Combination	Coupling	Combination	Coupling	Combination	Coupling
fx-fy	3.12	fy-fx	9.91	fz-fx	5.58
fx-fz	4.84	fy-fz	6.32	fz-fy	5.07
fx-mx	3.54	fy-mx	9.33	fz-mx	6.46
fx-my	2.43	fy-my	4.33	fz-my	3.69
fx-mz	2.99	fy-mz	2.60	fz-mz	7.65
mx-fx	4.32	my-fx	6.37	mz-fx	—
mx-fy	10.67	my-fy	7.31	mz-fy	14.08
mx-fz	—	my-fz	—	mz-fz	10.97
mx-my	7.18	my-mx	5.76	mz-mx	2.09
mx-mz	9.27	my-mz	9.34	mz-my	6.13

表3 測定精度 (干渉を考慮しない場合)

ingredient	accuracy	ingredient	accuracy
Fx	5.50%	Mx	21.69%
Fy	10.82%	My	9.06%
Fz	16.72%	Mz	7.53%

図8 F_x 測定結果 (干渉を考慮しない場合)

図9 F_y 測定結果 (干渉を考慮しない場合)

図10 F_z 測定結果 (干渉を考慮しない場合)

図11 M_x 測定結果 (干渉を考慮しない場合)

図12 M_y 測定結果 (干渉を考慮しない場合)

図13 M_z 測定結果 (干渉を考慮しない場合)

る。

$\hat{c}$ 行列は (6×6) 行列であり、ある成分に対する他の成分の干渉の度合をも示している。実験により実際に求めた $\hat{c}$ 行列を以下に示す。

図 14 F_x 測定結果 (干渉を考慮した場合)

図 15 F_x 測定結果 (干渉を考慮した場合)

図 16 F_x 測定結果 (干渉を考慮した場合)

図 17 M_x 測定結果 (干渉を考慮した場合)

図 18 M_x 測定結果 (干渉を考慮した場合)

図 19 M_x 測定結果 (干渉を考慮した場合)

表 4 各成分間の干渉

Combination	Coupling	Combination	Coupling	Combination	Coupling
$f_x - f_y$	10.52	$f_y - f_x$	8.75	$f_z - f_x$	10.92
$f_x - f_z$	47.89	$f_y - f_z$	13.64	$f_z - f_y$	16.36
$f_x - m_x$	21.54	$f_y - m_x$	29.68	$f_z - m_x$	9.77
$f_x - m_y$	81.92	$f_y - m_y$	13.75	$f_z - m_y$	5.78
$f_x - m_z$	20.73	$f_y - m_z$	8.78	$f_z - m_z$	5.39
$m_x - f_x$	22.11	$m_y - f_x$	36.71	$m_z - f_x$	84.58
$m_x - f_y$	41.00	$m_y - f_y$	31.43	$m_z - f_y$	13.24
$m_x - f_z$	—	$m_y - f_z$	—	$m_z - f_z$	38.32
$m_x - m_y$	79.39	$m_y - m_x$	26.51	$m_z - m_x$	1.67
$m_x - m_z$	16.93	$m_y - m_z$	11.66	$m_z - m_y$	2.77

表 5 測定精度 (干渉を考慮した場合)

ingredient	accuracy	ingredient	accuracy
F_x	1.87%	M_x	5.23%
F_y	5.04%	M_y	7.17%
F_z	5.03%	M_z	4.42%

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} 1.000 & -0.030 & -0.055 & 0.221 & 0.367 & -8.458 \\ -0.055 & 1.000 & 0.000 & 0.720 & 0.314 & -1.354 \\ -0.103 & 0.136 & 1.000 & 0.000 & 0.000 & 1.962 \\ -0.003 & 0.008 & -0.001 & 1.000 & -0.126 & 0.017 \\ 0.009 & 0.002 & -0.003 & 0.000 & 1.000 & -0.084 \\ 0.005 & -0.002 & -0.001 & 0.169 & 0.117 & 1.000 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

5・2 干渉を考慮した場合の実験結果

上に示したような $\hat{c}$ 行列を用いて、干渉を考慮して実験を行った結果を図 14～19 に示す。また、このときの各成分間の干渉の度合を表 4、測定精度を表 5 に示す。

以上の結果より、干渉の度合が減少し、6 分力計測センサとしての性能、信頼性が向上していることがわかる。

また、干渉を考慮した実験においても、測定誤差が残ってしまう原因として、荷重を作用させる場合に、特定の分力のみを作用させることが困難であり、他の成分も同時に発生してしまうこと、および、SN 比などの問題が考えられる。誤差を減少させるためには、力のキャリブレーション方法を工夫することが必要であると考えられる。また、電気回路から発生するノイズは、電気回路部分を金属薄で覆うなどのシールドを行うことにより、取り除くことができる。本論文においては、単一のレーザ光源を使用したため、光ファイバにレーザ光を入射するに際し、レーザ光を回折させる必要があり、光ファイバ端面と、レーザ光軸の角度が変化して効率が悪くなり、十分な光量が得られずにダイナミックレンジが狭くなり、さらに波長が可視光領域であるために、自然光によるノイズも加わり、光学系からのノイズが発生し、SN 比が小さくなると考えられる。したがって、これらの問題を解決するために半導体レーザを用いることにより、1 本の光ファイバにつき一つの発光素子を取付けるなどの方策を講じることにより、さらに良好な結果が得られると考えられる。

6. ま と め

(1) 力検出素子として光ファイバを用い、マイクロベンディング現象を利用した力の測定が可能であることを示した。

(2) 光ファイバのマイクロベンディング現象を用いた、新しいタイプの 6 分力計測センサを考案・試作し、6 分力の計測方法を示した。

(3) 試作した 6 分力計測センサを用いて、力の測定実験を行い、それに基づいて $\hat{c}$ 行列を導入し、良好な結果を得た。

今後、(1) センサの動特性や、(2) 精度の向上などについて検討を行う予定である。

文 献

- (1) 森村・山崎, センサ工学, (1982), 476, 朝倉書店.
- (2) Pugh, A., *Robot Sensors Volume 2 Tactile and Non-Vision*, (1986), 3, Springer-Verlag.
- (3) 福田・細貝・入江, ロボット用力計測センサに関する基礎的研究 (第 1 報, 光感応型半導体を用いた力・モーメント計測器の製作と基礎的実験), 機論, 53-487, C (1987), 721.
- (4) 福田・細貝, ロボット用力計測センサに関する基礎的研究 (第 2 報, 感圧型導電性ゴムを用いた力・モーメント計測器の製作と基礎的実験), 機論, 53-490, C (1987), 1283.
- (5) 福田・細貝・入江, ロボット用力計測センサに関する基礎的研究 (第 3 報, 光感応型半導体を用いたねじりモーメント計測機能を有する力計測センサ),
- (6) 木松・伊賀, 光ファイバ通信, (1976), 176, オーム社.
- (7) 音居・中原, 光ファイバ通信入門, (1986), 19, 啓学出版.
- (8) 光応用計測研究専門委員会編, 光応用計測の基礎, (1983), 86-110.