

サニャック干渉光学系を用いた旋光計によるグルコース計測

熊谷 達也*・大貫 渉*,†・梶岡 博**・山下 悠斗***・佐々木恵逸***

*日立電線(株) 〒319-1418 日立市砂沢町 880

** (株)グローバルファイバオプティクス 〒101-0061 東京都千代田区三崎町 3-4-10

***北日本電線(株) 〒989-1761 宮城県柴田郡柴田町大字葉坂字白板 54-1

Glucose Measurement with a Polarimeter Using a Sagnac Interference Optical System

Tatsuya KUMAGAI*, Wataru OHNUKI*,†, Hiroshi KAJIOKA**, Yuto YAMASHITA*** and Keiichi SASAKI***

*Hitachi Cable, Ltd., 880 Isagizawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 319-1418

**Global Fiberoptics, Ltd., 3-4-10 Misaki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0061

***54-1 Aza-Shiraita, Oaza-Hasaka, Shibata-cho, Shibata-gun, Miyagi 989-1761

The angle of optical rotation was measured by detecting the phase difference between clockwise and counterclockwise circular polarized lights which propagate a sensing loop. Since this polarimeter is constituted by a Sagnac interference optical system with a polarization maintaining optical fiber, it is the feature not to be influenced by the control limitation of the polarization rotation angle and the optical power fluctuation by scattering light, reflection or polarization rotation in an optical system. The angle of rotation was measured from the phase difference when the concentration of glucose was changed, and it checked that the resolution of the polarimeter was 5×10^{-4} degrees and that the measured specific rotation of glucose was mostly equal to a value of physical property.

Key words: polarimeter, optical rotation, circular birefringence, Sagnac interference, glucose

1. はじめに

グルコースなどの旋光性物質に直線偏光を入射すると偏光面が回転する。偏光面の回転角度である旋光度を計測すれば、溶液中における純物質の濃度が計測できる。このような旋光角を計測する旋光計の応用のひとつとして、糖尿病患者のための血糖値測定がある。現状の血糖値測定は侵襲タイプのみで、痛みからのストレスなど患者に多くの負担を強いるものである。このため、簡便かつ迅速に計測可能な非侵襲タイプの測定器が望まれており、種々の光学的な計測方法が検討されている¹⁾。その一方式である旋光度による測定に関しては、従来、透過光強度を検出する受光器の出力が最小になるように入射側の偏光子または出射側の検光子を回転調整した角度で計測していた。この測定系では、光を空間伝搬させることや、偏光子の回転機構が必要になることなどから測定器の小型化が難しく、また機械的な計測精度の限界が存在する。一方、機械的な偏光方位調整が不要になる、入射偏光をファラデー変調する方式が提案されているが²⁾、変調素子が比較的大きくて高価にな

り、変調に高電圧や電流が必要になるなど、取り扱いが容易ではない。また、光出力強度を計測する方式であるため、被測定物質内での散乱光や光学系を構成している部品からの反射光、さらにファラデー変調素子の複屈折やその温度特性による偏光方位のドリフトが計測誤差になる可能性がある。実用的な旋光計としては、光の空間伝搬部が少なく信頼性が高い、小型で安価な方式であることが重要である。

ところで、直線偏光は左右円偏光のベクトル和であり、物質に直線偏光を入射することは左右円偏光を同位相で入射することと同じである。一方、旋光は左右円偏光に対する光学活性物質の屈折率差である円複屈折であり、物質中を伝搬する左右円偏光の速度が異なるため位相差が生じる。光ファイバージャイロ (FOG: fiber-optic gyroscope)³⁾のサニャック干渉光学系は、センシングループを伝搬する時計回り光 (CW: clockwise) と反時計回り光 (CCW: counterclockwise) の位相差が検出できるので、円偏光を用いた干渉光学系を構成すれば旋光度が光の位相差で計測でき

† E-mail: wataru.onuki.xv@hitachi-cable.com

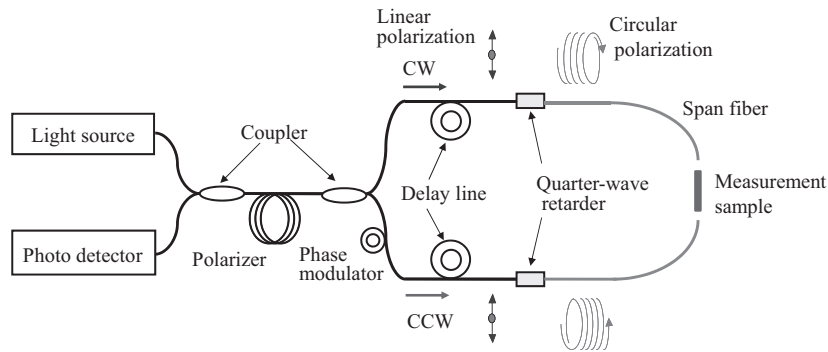


Fig. 1 Configuration of optical rotation measurement system with a Sagnac interferometer.

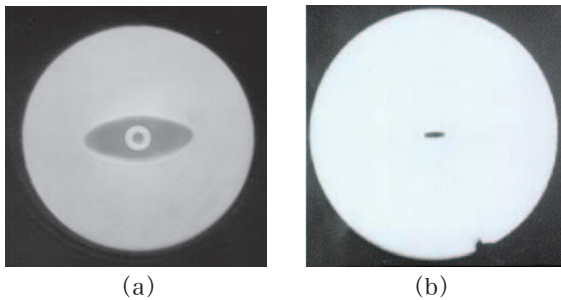


Fig. 2 Cross-sectional structures of (a) elliptical jacket type and (b) elliptical core type PMFs.

Table 1 Specifications of PMFs.

Item	EJ-PMF	EC-PMF
Material	Silica glass	
Cladding diameter (μm)	80	
Core diameter (μm)	5	1 \times 5
Beat length at 633 nm (mm)	1.5	2.0
Polarization crosstalk (dB/300 m)	-25	-15
Attenuation at 840 nm (dB/km)	5	10

る。また、FOG は広い分野に適用され、過酷な環境下において安定した特性や信頼性がすでに確認されており⁴⁾、これを応用すればフィールドでの耐久性や量産効果による低コスト化が期待できる。そこで、サニャック干渉光学系を用いた旋光計測の検討に着手した。旋光性を有するグルコースの旋光度から濃度を求め、その分解能と安定性を評価し、さらに比旋光度を求めて物性値と比較することにより計測精度を確認した。

2. 旋光計測の検討

2.1 サニャック干渉光学系

FOG のサニャック干渉光学系は回転角速度を計測するセンシンググループに直線偏光を伝搬させて干渉信号を検出するが、旋光度計測系では円偏光を用いるため、1/4 波長素子を挿入する必要がある。旋光度計測系の構成を Fig. 1 に示す。干渉系には石英系のシングルモード光ファイバー (SMF: single mode fiber) を使用するが、通信用の SMF では互いに直交した伝搬定数のわずかに異なる 2 つの固有偏光モードが伝搬し、かつ振動や温度変化などの外乱でモード変換が発生する。このモード変換による干渉雑音はゼロレベルの変動要因になり、また偏波の回転は干渉強度の変動となって感度やスケールが不安定になることから、Fig. 2

の断面構造を有する偏波面保存光ファイバー (PMF: polarization maintaining fiber) で光路を形成した⁵⁾。楕円ジャケット型 PMF (EJ-PMF: elliptical jacket PMF) と楕円コア型 PMF (EC-PMF: elliptical core PMF) の仕様を Table 1 に示す。EJ-PMF は伝送損失が低く、かつ高い偏波保持特性を有することから、遅延用光ファイバースパンと偏光子に用いる。一方、EC-PMF は低コストではあるが長距離の特性に難があるため、光ファイバークラッパなどの光部品に適用する。1/4 波長素子から出力する円偏光は空間を伝搬させるか、円偏波を保持するスパンファイバーを伝送させる。スパンファイバーは、ねじり率 10 回/m 程度で一方方向のねじりを加えて線引きした真円のコアを有する SMF である。光源には干渉型センサーの性能向上に有効な波長 840 nm の SLD (super luminescent diode) を使用した。

Fig. 1 の光源出射光は、偏光子を介して直線偏光となり、第 2 の光ファイバークラッパでセンシンググループの CW と CCW 方向に分岐される。それぞれの直線偏光は 1/4 波長素子で円偏光になり、被測定サンプルを透過して、もう 1 つの 1/4 波長素子で直線偏光に戻り光ファイバークラッパで結合する。直線偏波が PMF 伝搬中に他の偏光軸へクロストークして干渉した光信号は性能劣化要因になるため、偏光子で不要偏光成分を除き受光器に信号光が入射される。CW と CCW 光が全く同じ光路を伝搬する相反干渉光学系を構成するため⁶⁾、2 つの光ファイバークラッパを使用する。

2.2 位相差検出原理

被測定サンプルの円複屈折により旋光度に相当する位相差 $\Delta\phi$ が発生し, CW と CCW 光間の位相差 $\Delta\theta$ は $\Delta\theta = 2\Delta\phi$ となる. 受光器で検出される干渉光強度は $\cos \Delta\theta$ に比例するため, ゼロ付近の位相差, すなわち微小な旋光に対する感度が低い. そこで円筒型の piezoelectric (チタン酸ジルコン酸鉛, PZT) のシリンダに光ファイバーを巻きつけて固定し, PZT の共振周波数近傍である 22 kHz の正弦波電圧を加えて光ファイバーに伸縮を与え, 光の位相を変調する. この光位相変調器は干渉系の一端に設けられているので, 左右両回り光が変調されてから光ファイバークップラーに到達するまでの時間が異なり, その時間差を τ とすると, 両回り光間に余弦波の位相差が誘起される. このとき, 受光器の出力信号 $P(t)$ は位相変調周波数 fm を基本波とする式 (1) のようなひずみ波信号となる⁷⁾.

$$P(t) = K\{1 + v \cos(\Delta\theta + \phi e \cos 2\pi f m t)\} \quad (1)$$

ここで, K は受光パワーと電子回路の増幅率で決まる係数, v は光干渉係数, ϕe は位相変調振幅 ϕm に比例する実効位相変調指数で式 (2) のように表される.

$$\phi e = 2\phi m \sin(\pi f m \tau) \quad (2)$$

式 (1) はフーリエ・ベッセル級数に展開され, その奇数次成分と偶数次成分の振幅 $S_{(2n-1)}$, S_{2n} はベッセル関数 J_n を用いて次式で表される⁸⁾.

$$S_{(2n-1)} = 2KvJ_{(2n-1)}(\phi e) \sin(\Delta\theta) \quad (3)$$

$$S_{2n} = 2KvJ_{2n}(\phi e) \cos(\Delta\theta) \quad (4)$$

光源の出力, 電子回路の増幅率や位相変調器の変調効率の変動による影響をなくすため, 1, 2, 4 次の周波数成分の比を用いて位相差 $\Delta\theta$ を求める. まず 1, 2 次成分の比を $x_0 = S_1/S_2$ とすると, 式 (3), 式 (4) から,

$$\Delta\theta = \tan^{-1}(mx_0) \quad (5)$$

$$m = J_2(\phi e)/J_1(\phi e) \quad (6)$$

となり, 一方 2, 4 次成分の比である

$$y_0 = S_4/S_2 = J_4(\phi e)/J_2(\phi e) \quad (7)$$

y_0 を一定値に制御すれば, 実行位相変調指数に依存する m を定数にすることができるので, 式 (5) から位相差 $\Delta\theta$, すなわち旋光度 $\Delta\phi = \Delta\theta/2$ を求めることができる. 位相変調方式を用いることで, 位相差ゼロ付近の感度とスケールの安定性が改善できることを示した. 空間伝搬で光学系を構成した場合, 左右両回り光の時間差を得ることが困難であるため, 位相変調方式には PMF を用いた光学系が必要になる. ところで, 被測定サンプルまで引き出すスパンファイバーに振動などの外乱が加わると, 位相変調の原理と同様に CW と CCW 光が振動点に到達するまでの時間差 τ に依存して位相差が発生し, 不要な信号を出力す

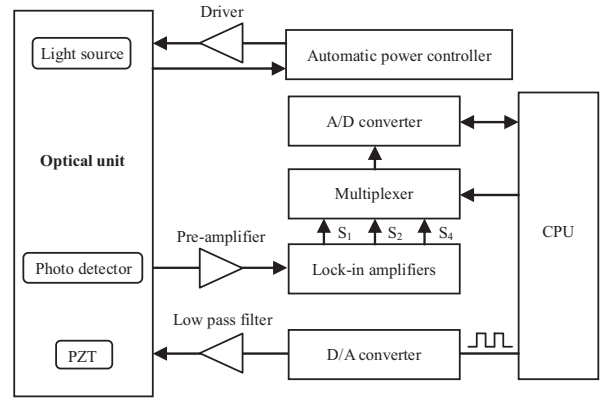


Fig. 3 Configuration of signal processing electronics.

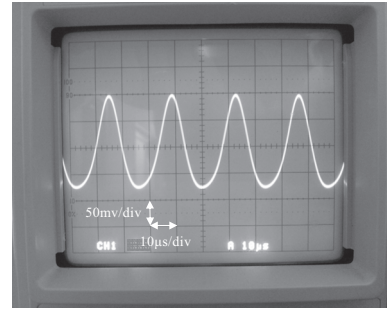


Fig. 4 Signal output from pre-amplifier.

る. そこで, センサーケーブルの両端に長さ等しい遅延用光ファイバークラウドを挿入した. これにより, 被測定サンプルに両回り光が到達する時間が等しくなるので, 振動などの外乱による影響を小さくすることができる.

Fig. 3 に信号処理部の構成を示す. アナログ部は光源駆動回路, 位相変調回路, および 3 個のロックインアンプから成り, デジタル部は CPU, マルチプレクサー, A/D, D/A 変換器で構成されている. 1, 2, 4 次の周波数成分はロックインアンプで検波し, A/D 変換器でデジタル値に変換される. CPU では x_0 , y_0 の値や位相差などを演算し, さらに y_0 が一定値になるように D/A 変換器を用いて位相変調信号の振幅を制御する. 一方, 1/4 波長素子の特性が理想的でない場合に位相バイアスやスケール誤差が生じるため, CPU のメモリーに位相差に対する出力値の校正テーブルを備え, さらに温度補正テーブルも備えて旋光計の精度を改善している.

2.3 機能確認

センシングループを伝搬した CW, CCW 光の干渉信号を信号処理回路のプリアンプ出力で確認した. オシロスコープで検出した信号波形を Fig. 4 に示す. ベッセル関数の引数である ϕe は 1 次成分の感度が最大になる 1.8 に制御するのが一般的であるが, y_0 の制御精度に配慮して, 1 次

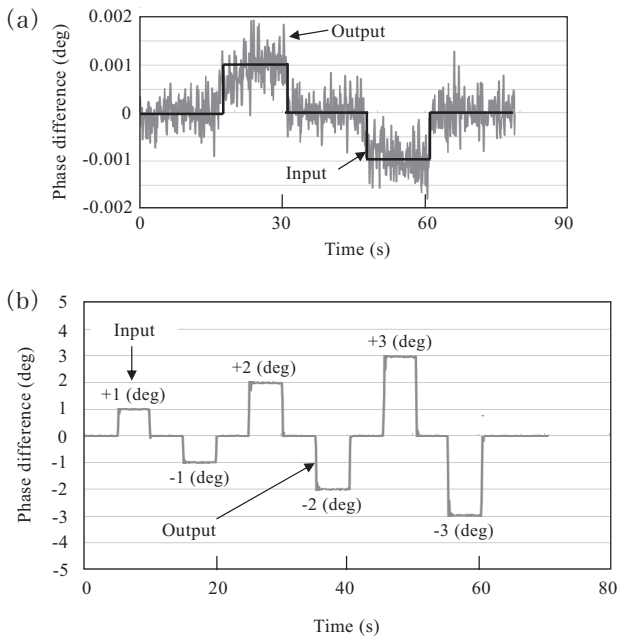


Fig. 5 Input-and-output characteristic of phase difference, (a) near resolution and (b) in the step of ± 1 degree.

と2次成分の感度がほぼ等しく、4次成分の感度がある程度大きくなる $\phi e \approx 2.4$ になるように位相変調振幅を制御した。したがって、2, 4次の周波数成分が重なった波形は、変調度が大きいためピークがつぶれた形状になっている。回転角速度の影響を除くため、旋光計では2つの遅延用光ファイバの長さは等しくし逆巻きになるように配置するが、機能確認のため回転角速度が計測できる向きに巻き方向をそろえた。Fig. 1の被測定サンプルを除いたスパンファイバのみで、1/4波長素子間を接続する。レートターンテーブルで光学系に位相差を与えたときの出力特性をFig. 5に示す。正弦関数が比較的直線的な位相差である30度をフルスケールにして積分時間を100msに設定したとき、1/1000度の位相差が計測できることと、入出力のリニアリティを確認した。旋光度は位相差の1/2であり、旋光計の分解能は 5×10^{-4} 度である。

3. グルコースの濃度計測

3.1 測定データの導出

観測者が光源の方に向いた状態で、偏光面が右に回転する右旋性を有するグルコース溶液の濃度を計測する。旋光度の大きさは、溶液の濃度と光の透過距離に依存する。光の透過距離が10cmで、溶液の濃度が1g/mlのときの偏光面の回転を、比旋光度 α_0 という。比旋光度 α_0 と旋光度 $\Delta\phi$ は次式の関係になる。

$$\alpha_0 = 100\Delta\phi / (lc_0) \quad (8)$$

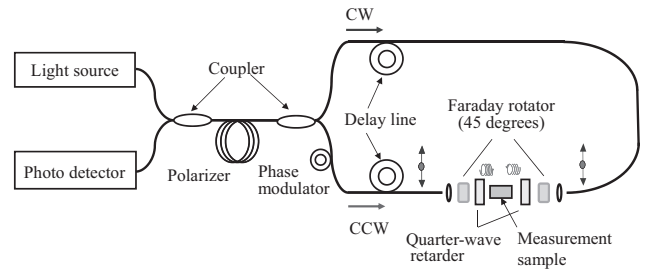


Fig. 6 Configuration of glucose concentration measurement system.

ここで、 l は試料の長さ(単位はdm, 1dm = 10cm)、 c_0 は溶液100ml(1dl)中の溶質の質量(単位はg)である。したがって旋光度 $\Delta\phi$ は、

$$\Delta\phi = lc_0\alpha_0 / 100 \quad (9)$$

となる。グルコースには比旋光度+112.2度の α 型と、比旋光度+18.7度の β 型があり、ここで右旋性はプラス符号、左旋性はマイナス符号で表す。グルコースを水に溶解させると、 α 型と β 型の間で変換が起こり、最終的に化学平衡に達して比旋光度は+52.7度になる。例えば試料を入れる観測管の長さを1dm(10cm)、グルコースの濃度を0.1g/dlとすると、式(9)から旋光度は 5.27×10^{-2} 度になるので、 5×10^{-4} 度の旋光度分解能があれば 1×10^{-3} g/dlまでのグルコース濃度が計測できる。

3.2 光学系の構成

グルコース濃度測定系の構成をFig. 6に示す。光源は波長840nmのSLDを用い、光学系はすべてPMFで構成した。グルコースの濃度測定では左右の異なる円偏光を試料の両端に入射する必要があるため、偏光面を45度回転させるファラデー回転子を挿入し、1/4波長素子の光学軸と偏光面を調整して左右の円偏光を形成する⁹⁾。遅延用光ファイバ出射光はレンズを用いて空間伝搬させ、ファラデー素子と1/4波長素子の組み合わせの中間に試料を入れる観測管を配置した。観測管には低複屈折の材料を使用している。測定系の外観をFig. 7に示す。計測装置本体から出力される位相差データを、RS232Cシリアル通信を介してパソコンで収集した。

3.3 評価結果

長さ1dmの観測管を用いて、グルコース溶液の濃度を変化させたときの旋光度に相当する位相差を計測し、評価結果をFig. 8に示した。計測波長は840nm、温度は室温である。Fig. 8の測定結果から求められる比旋光度は+51.6度であり、物性値に近い結果が得られた。さらに、左旋性を有するフルクトース溶液の濃度を変化させたときの旋光度も計測し、Fig. 8に重ねて記入した。測定結果から求

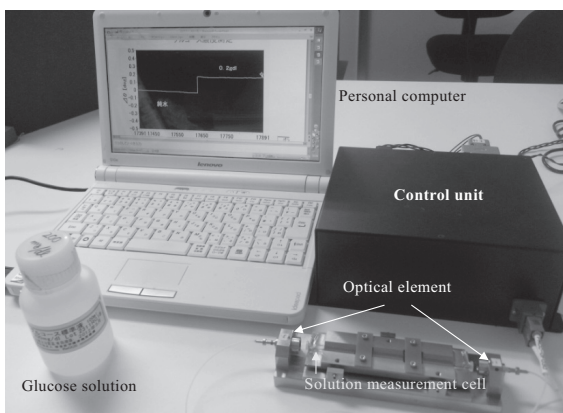


Fig. 7 Measurement setup of glucose concentration.

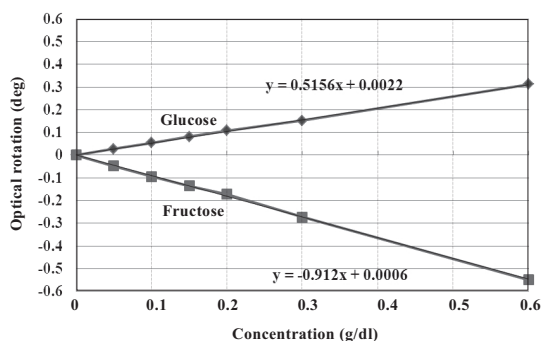


Fig. 8 Concentration measurement of glucose and fructose.

めた比旋光度は -91.2 度であり、フルクトースの比旋光度 -92.4 度に近い値が得られた。

測定系の積分時間を1秒に設定し、位相差出力のノイズレベルを評価した。0.1 g/dlのグルコース溶液を挿入したときの入出力特性と合わせてFig. 9に示す。ノイズ出力の 1σ で定義する $\Delta\theta$ の分解能は1/1000度であり、旋光度の分解能は 5×10^{-4} 度になる。グルコース溶液とファラデー素子の損失が大きく、光出力が減衰してノイズが大きくなったため、機能確認時の積分時間100 msに対して1秒に長くすることにより同程度の分解能が得られた。

4. まとめ

FOGのサニャック干渉光学系を応用した旋光計測を検討した。まず、1/4波長素子からの円偏光をスパンファイバーに入射してセンシングループを構成し、直線偏光と円偏光が混在した光学系でもレートターンテーブルの回転角速度による位相差が検出できることを確認した。正弦関数

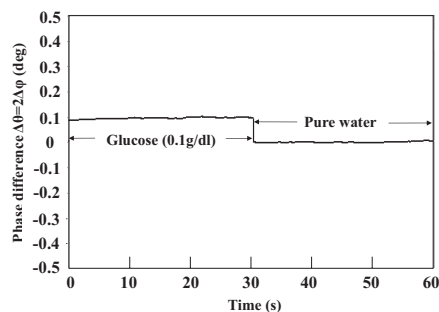


Fig. 9 Resolution of phase difference and optical rotation.

が比較的直線的な位相差30度をフルスケールに、積分時間を100 msに設定したとき、 5×10^{-4} 度の位相差が計測できることを示した。

次に、右旋性を有するグルコースと左旋性を有するフルクトースの旋光度と溶液濃度との関係性を評価した。旋光度の分解能は 5×10^{-4} 度であることから 1×10^{-3} g/dlまでのグルコース濃度が計測できること、測定結果から求めた比旋光度は物性値に近い値であり、サニャック干渉光学系は物質の旋光度計測に適用できる可能性があることを示した。計測波長や温度による影響などを補正することにより、計測精度を改善することが今後の課題である。

文 献

- 1) 宮内祐樹, 石澤広明, 兎山祥平, 手塚信一郎, 原 仁: “共焦点光学系を用いたグルコース計測システムの開発”, 電気学会論文誌 E, **132** (2012) 431-436.
- 2) 横田正幸, 米山誠秀, 山口一郎, 芳野俊彦: “鉛ガラスファイバーファラデー変調器を用いた旋光計”, 光学, **34** (2005) 97-102.
- 3) 熊谷達也, 油原敏哉, 梶岡 博: “量産型光ファイバジャイロの開発とその応用”, レーザー研究, **26** (1998) 304-309.
- 4) H. Kajioka, T. Kumagai, H. Nakai, T. Dohsho, H. Soekawa and T. Yuhara: “Commercial applications of mass-produced fiber optic gyros,” SPIE, **2837** (1996) 18-31.
- 5) T. Kumagai and W. Ohnuki: “Industrial applications of FOG,” IEICE Trans. Electron., **E83-C** (2000) 378-383.
- 6) S. Ezekiel and H. J. Arditty: “Fiber-optic rotation sensors,” *Fiber-Optic Rotation Sensors and Related Technologies*, Springer-Verlag Series in Optical Sciences Vol. 32, eds. S. Ezekiel and H. J. Arditty (Springer, 1982) pp. 2-26.
- 7) 於保 茂, 園部久雄, 牧野淳一, 荒木 宏, 梶岡 博, 根本宏, 岡林 繁: “車載実験用光ファイバジャイロの試作”, 電子情報通信学会論文誌, **J72-C-II** (1989) 811-819.
- 8) T. Yuhara, T. Kumagai, H. Soekawa and H. Kajioka: “Fiber-optic gyroscopes for automotive applications,” J. Circuits, Syst., Comput., **5** (1995) 17-36.
- 9) 梶岡 博, 飯塚 孝, 鳥取裕作: 特公平 22-4556463.