

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.



# [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200710043767.2

A61B 1/00 (2006.01)  
A61B 5/06 (2006.01)  
G06F 19/00 (2006.01)  
G06F 17/16 (2006.01)

[43] 公开日 2008 年 1 月 9 日

[11] 公开号 CN 101099657A

[22] 申请日 2007.7.13

[21] 申请号 200710043767.2

[71] 申请人 上海大学

地址 200444 上海市宝山区上大路 99 号

[72] 发明人 钱晋武 易新华 章亚男 沈林勇  
张 震

[74] 专利代理机构 上海上大专利事务所

代理人 何文欣

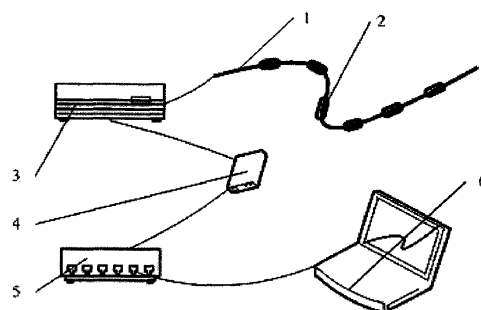
权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 4 页

## [54] 发明名称

细长柔性杆的空间形状检测装置和方法

## [57] 摘要

本发明涉及一种细长柔性杆的空间形状检测装置和方法。该装置由细长柔性杆、光纤光栅传感器阵列，光纤光栅调制解调仪、局域网路由器、数据采集与数据处理模块和显示设备构成。利用在细长柔性杆上布置一组由四根光纤组成的光栅阵列，通过离线标定曲率与波长之间的比例因子，利用光纤光栅调制解调仪测得细长柔性杆在空间的五个离散点处的 20 个光栅点的波长，从而得到离散点处的空间曲率大小和方向，利用数据处理模块重建出该杆在空间上的形状。本发明的细长柔性杆的空间形状检测装置结构简单，检测方便，可用于医疗中的人体腔道及细小管道形状的实时跟踪检测。



1. 一种细长柔性杆的空间形状检测装置，包括一根柔性细长杆（1），其特征在于所述的柔性细长杆（1）外表面上粘贴光纤光栅传感器阵列（2），而依次连接一个光纤光栅调制解调仪（3）、一个局域网路由器（4）、一个数据采集与形状重建模块（5）及显示设备（6）。
2. 根据权利要求1所述的细长柔性杆的空间形状检测装置，其特征在于所述的光纤光栅传感器阵列（2），每组为四根光纤光栅沿周向均布在柔性检测杆（1）上，每根光纤上有五个光栅点，且相邻的光纤在细长柔性杆（1）的截面上的夹角互为 $90^{\circ}$ 。
3. 根据权利要求1所述的软性内窥镜三维曲线形状检测装置，其特征在于所述的光纤光栅阵列（2）中利用两个光栅点在圆形截面上成 $180$ 度分布，使两个传感器采集到的数据进行差值，消除温度对数据的影响。
4. 一种细长柔性杆的空间形状检测方法，采用权利要求1所述的细长柔性杆的空间形状检测装置进行检测，其特征在于检测步骤如下：

①光栅点的波长与曲率的比例因子的标定：曲率与光栅的波长的变化关系表示为：

$$C = \frac{\Delta\lambda_B}{(1-P)\lambda_B r}$$

式中 $P$ 为弹光系数， $\lambda_B$ 为光栅的中心波长， $r$ 为细长柔性杆的半径， $\Delta\lambda_B$ 为波长的变化量， $C$ 为细长柔性杆的弯曲曲率；

采用了标定的方法：利用已知曲率半径的各个圆弧，将带有光纤光栅传感器阵列（2）的细长柔性杆（1）以不同的方位进行标定，通过测得光栅点在最大拉压处波长的变化量及中性面波长的变化量，利用所得到的数据采用插值的方法得到波长与曲率的比例因子 $K$ ；利用线性拟合的方法得到该比例因子，其关系可以表示为：

$$C_i = K\Delta\lambda_{B_i} + e \quad (i = 80mm, 100mm, 200mm, 300mm, 500mm, 800mm)$$

式中 $C_i$ 表示标定时不同曲率值， $\Delta\lambda_{B_i}$ 表示在不同曲率半径下的波长变化量， $K$ 表示在得到的比例因子， $e$ 为得到的误差值；

- ②光电信号的采集：利用数据采集与形状重建模块（5）向光纤光栅调制解调仪（3）发送命令字，光纤光栅调制解调仪（3）将得到的光电信号转换为数字信号通过局域网路由器（4）传送到数据采集与形状重建模块（5）中指定的存储数组。
- ③计算5个检测点的空间曲率：利用得到的各个光栅点的波长，利用步骤①中得到的比例因子，得到5个检测点的曲率的大小和曲率在空间的方向；
- ④空间形状的绘制：根据光纤光栅调制解调仪（3）得到的波长信息，利用数据采集与形状重建模块（5），利用离散点之间的位姿矢量变化关系重建出整个形状而在显示设备（6）上显示出来。
5. 根据权利要求4所述的细长柔性杆的空间形状检测方法，其特征在于所述的步骤④中的利用离散点的位姿矢量变化关系重建其图形的方法是：首先得出前一个离散点相对于后一个离散点的位置变化，表达为：

$$\begin{cases} dx = \frac{1}{k} \cdot (1 - \cos \theta) \cdot \cos \phi \cdot d_s \\ dy = \frac{1}{k} \cdot (1 - \cos \theta) \cdot \sin \phi \cdot d_s \\ dz = \frac{1}{k} \cdot \sin \theta \cdot d_s \end{cases}$$

即：平移矢量为： $P'_i = [dx \quad dy \quad dz]^T$

后一点相对于前一点的坐标系的旋转变化，表达为：

$$R'_i = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \\ o_x & o_y & o_z \\ a_x & a_y & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-2b^2-2c^2 & 2ab-2sc & 2ac+2sb \\ 2ab+2sc & 1-2a^2-2c^2 & 2bc-2sa \\ 2ac-2sb & 2bc+2sa & 1-2a^2-2b^2 \end{bmatrix}$$

因此，后一离散点相对于前一离散点的位姿变化矩阵为：

$$T'_i = \begin{bmatrix} R'_i & P'_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将这些离散点依次进行叠加计算，从而构成整个细长柔性杆的空间形状。

## 细长柔性杆的空间形状检测装置和方法

### 技术领域

本发明涉及一种细长柔性杆的空间形状检测装置和方法，其中涉及的重点是以光纤光栅传感器阵列为基础的空间柔性杆的形状检测装置和方法。

### 背景技术

这个装置主要用来对细长柔性杆的三维形状进行检测，这里，主要以结肠内窥镜为背景，考虑结肠镜在插入人体后，利用细长柔性杆的弯曲信息来重现结肠的形状信息。目前，结肠镜检查是诊断直肠、乙状结肠疾病的重要方法之一，大约70%左右的大肠癌都位于直肠和乙状结肠，因此结肠镜检查对直肠和乙状结肠早期癌变的发现和确诊有重要的意义。结肠镜在插入检查的过程中，要经过一段很复杂的路径，其中包括三维曲线的弯曲与扭转，主要走向为直肠、乙状结肠、降结肠和横结肠。由于插入的过程中不稳定因素的存在，在外力作用下很容易造成内窥镜在肠内结襻，以及结肠镜的前端会顶住肠壁，稍有不慎会造成穿孔，因而在检查时对病人产生巨大的心理压力，而且只有经验丰富的医师才能够完成这种检查。为了帮助医生很好的掌握好进镜过程中的情况，目前常用的方法是在进镜前进行对病人进行X光检查，以便医生了解结肠的结构，然而这种方法并不能实时对进镜检查的过程进行监控，因此有必要提出一种能够实时显示内窥镜柔性杆形状，并帮助医生在进镜时进行导航。

在内窥镜的形状显形方面，已有的技术包括 OLYMPUS 公司基于美国专利 6059718，利用磁场定位原理，通过在检测目标周围空间内设定一个已知的空间磁场，然后利用柔性杆上的磁感线圈对其所在的位置磁场进行感知，测得每个感应线圈的位置和方向，利用检测设备对感应线圈进行周期的采样，从而利用这些实时数据进行内窥镜柔性杆的重建，该方法易受到外界电磁信号的影响。另外德国 SIEMENS AG 公司基于美国专利 6470205，利用光纤光栅设计了一种医疗器具的定位装置，该装置采用多节连杆进行连接，连杆之间通过两自由度的旋转关节进行连接，利用光纤光栅对每个自由度旋转角度的测定，就能够得到每个关节的旋转角度，

利用各个连杆之间的位姿关系，从而得到最后一个连杆前端的位置和方位。而该方法利用了多连杆机构，对于医疗器具前端的定位精度较高，对于插入式医疗装置机构的缺点是检测的范围比较小，而且该方法不能实时显示插入腔道的形状。

## 发明内容

本发明的目的在于针对已有技术存在的缺陷，提供一种细长柔性杆的空间形状检测装置和方法，利用柔性杆上各个点的弯曲程度与波长的变化关系及空间曲线的重建算法，通过网络化测试技术对数据进行实时的采集，从而重构出整个柔性杆的形状。

为了达到上述目的，本发明采用下述技术方案：一种细长柔性杆的空间形状检测装置，包括一根柔性细长杆，其特征在于所述的柔性细长杆外表面上粘贴光纤光栅传感器阵列，而依次连接一个光纤光栅调制解调仪、一个局域网路由器、一个数据采集与形状重建模块及显示设备。上述的光纤光栅传感器阵列，每组为四根光纤光栅沿周向均布在柔性检测杆上，每根光纤上有五个光栅点，且相邻的光纤在细长柔性杆的截面上的夹角互为 90 度。上述的光纤光栅阵列中两个光栅点在圆形截面上成 180 度分布，使两个传感器采集到的数据进行差值，消除温度对数据的影响。

上述装置的工作原理为：光纤光栅传感阵列（2）由四根光纤均布在细长柔性杆（1）上，且邻近光纤的夹角为 90 度，每四个对应的光栅点组成一组检测点。利用光纤光栅调制解调器（3）和局域网路由器（4）对解调后的数据通过 TCP/IP 协议传送到形状重建模块进行数据分析与重建，将重建的结果发送到显示设备，以便观察。

一种细长空间柔性杆的空间形状检测方法，采用上述的细长柔性杆的空间形状检测装置进行检测，其特征在于检测步骤如下：

一种细长柔性杆的空间形状检测方法，采用权利要求 1 所述的细长柔性杆的空间形状检测装置进行检测，其特征在于检测步骤如下：

①光栅点的波长与曲率的比例因子的标定：曲率与光栅的波长的变化关系表示为：

$$C = \frac{\Delta\lambda_B}{(1-P)\lambda_B r}$$

式中  $P$  为弹光系数,  $\lambda_B$  为光栅的中心波长,  $r$  为细长柔性杆的半径,  $\Delta\lambda_B$  为波长的变化量,  $C$  为细长柔性杆的弯曲曲率;

采用了标定的方法: 利用已知曲率半径的各个圆弧, 将带有光纤光栅传感器阵列 (2) 的细长柔性杆 (1) 以不同的方位进行标定, 通过测得光栅点在最大拉压处波长的变化量及中性面波长的变化量, 利用所得到的数据采用插值的方法得到波长与曲率的比例因子  $K$ ; 利用线性拟合的方法得到该比例因子, 其关系可以表示为:

$$C_i = K\Delta\lambda_{B_i} + e \quad (i = 80mm, 100mm, 200mm, 300mm, 500mm, 800mm)$$

式中  $C_i$  表示标定时的不同曲率值,  $\Delta\lambda_{B_i}$  表示在不同曲率半径下的波长变化量,  $K$  表示在得到的比例因子,  $e$  为得到的误差值;

② 光电信号的采集: 利用数据采集与形状重建模块 (5) 向光纤光栅调制解调仪 (3) 发送命令字, 光纤光栅调制解调仪 (3) 将得到的光电信号转换为数字信号通过局域网路由器 (4) 传送到数据采集与形状重建模块 (5) 中指定的存储数组。

③ 计算 5 个检测点的空间曲率: 利用得到的各个光栅点的波长, 利用步骤①中得到的比例因子, 得到 5 个检测点的曲率的大小和曲率在空间的方向;

④ 空间形状的绘制: 根据光纤光栅调制解调仪 (3) 得到的波长信息, 利用数据采集与形状重建模块 (5), 利用离散点之间的位姿矢量变化关系重建出整个形状而在显示设备 (6) 上显示出来。

1. 上述空间柔性杆的形状检测方法, 其中步骤④中的利用离散点的位姿矢量变化关系重建其图形的方法是: 首先得出前一个离散点相对于后一个离散点的位置变化, 表达为:

$$\begin{cases} dx = \frac{1}{k} \cdot (1 - \cos\theta) \cdot \cos\phi \cdot d_s \\ dy = \frac{1}{k} \cdot (1 - \cos\theta) \cdot \sin\phi \cdot d_s \\ dz = \frac{1}{k} \cdot \sin\theta \cdot d_s \end{cases}$$

即: 平移矢量为:  $P'_i = [dx \quad dy \quad dz]^T$

后一点相对于前一点的坐标系的旋转变化，表达为：

$$R'_i = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \\ o_x & o_y & o_z \\ a_x & a_y & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-2b^2-2c^2 & 2ab-2sc & 2ac+2sb \\ 2ab+2sc & 1-2a^2-2c^2 & 2bc-2sa \\ 2ac-2sb & 2bc+2sa & 1-2a^2-2b^2 \end{bmatrix}$$

因此，后一离散点相对于前一离散点的位姿变化矩阵为：

$$T'_i = \begin{bmatrix} R'_i & P'_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将这些离散点依次进行叠加计算，从而构成整个细长柔性杆的空间形状。

本发明与现有技术相比较，具有如下显而易见的突出实质性特点和显著优点：

1. 整个检测装置由光纤光栅传感器阵列、光纤光栅调制解调仪及计算机组成，该技术不需要其它外围的辅助设别，不受电磁的干扰，另外能够进行长距离的远程监测。
2. 由于本技术是通过在细长柔性杆上放置多个曲率检测光纤光栅，利用并行方式对多点的曲率同时进行检测，因此整个形状检测系统是实时的，这种检测技术既能适用人体细小腔道内的形状检测，也能适用任意空间曲线的检测，而且能够达到很高的实时响应性。
3. 光纤光栅传感方式具有尺寸小，测量范围大的优点，可以在微小尺寸下进行动态的大应变的测量。

本发明的内窥镜三维曲线形状检测装置系统构成简单，检测方法简便，可实行远程的实时检测，而且能够运用到医疗的胃镜、结肠镜的形状跟踪检测。

#### 附图说明

图 1 是本发明三维曲线形状检测装置的结构示意图。

图 2 是本发明均布有 20 个光纤光栅点的柔性检测杆的结构示意图。

图 3 是本发明的一个光栅点在最大拉压情况下的波长与曲率的变化关系图。

图 4 是本发明的光纤光栅的温度补偿示意图。

图 5 是本发明的光纤光栅点所在位置的空间曲率的确定方法图。

图 6 是本发明的空间曲线重建的数学模型。

图 7 (a)、图 7 (b) 分别是本发明的一实施例的细长柔性杆的实际形状图和重建图。

图 8 细长柔性杆的空间形状检测流程图。

## 具体实施方式

本发明的一个优选实施例结合附图论述

请参见图 1，本细长柔性杆的空间形状检测装置由细长柔性杆（1）、光纤光栅传感器阵列（2）、光纤光栅调制解调仪，采用美国 MOI 公司型号为 Si425 的光纤光栅调制解调仪（3）、局域网路由器，采用美国科动控制系统公司型号为 EI 互联型集线器（4）、数据采集与形状重建模块（软件系统）（5）、通过光纤跳线、信号线顺序连接组成并利用 Philips 公司的型号为 107T 显示器显示重建的形状及其它参数。在柔性检测杆(1)上沿轴向均匀设置一组共四根光纤光栅组成的传感阵列，四根光纤光栅（2）90 度均布在柔性细长杆（4）的四周，利用数据采集与形状模块（5）将采集到的信号转换成空间形状。

本发明的光纤光栅传感器阵列的分布图如图 2 所示，在检测前，首先采用已知圆弧曲率的曲线对封装好的每个光纤光栅点进行波长与曲率变化关系的比例因子 K 的标定，具体方法为：先测出柔性检测杆（2）在几个不同曲率半径  $\rho$  下的各个光栅点波长的变化量  $\lambda$ ，然后利用线性拟合的方法得出比例因子 K。

在检测时，将细长柔性杆（1）插入到被检测的腔道或者管道中，插入后的细长柔性杆（1）的弯曲程度就反映了管道的弯曲程度，根据由光纤光栅（2）实时感知的弯曲信息，从而获得柔性检测杆（1）表面的五个位置的离散点的弯曲信息。五个离散点的弯曲信息通过计算机发送命令字传送到计算机的数据采集与形状模块（5），进行数据的分析与处理，然后经过基于离散点的曲率信息重建出整个形状。

本发明三维曲线形状检测装置的检测原理为：粘贴在柔性检测杆(1)上的每个光纤光栅(2)输出中心波长  $\lambda$  与光纤光栅所在点的曲率半径  $\rho$  成反比，与曲率  $c$  成正比：

$$\lambda = K / \rho = K \times c$$

图 3 是利用细长柔性杆的一个光栅点在不同的曲率下的曲率与波长变化的关系，从图可以看出，其满足线性关系，与理论的结果一致。

由于受环境因素的影响，本技术采用如图 4 的温度补偿方法，采用双 FBG 传感器的封装方式来消除温度对应力的影响，因为 FBG 传感器是封装在圆形截面上，因此当两个传感器封装位置通过截面圆心时，如图 4 所示，它们的拉压情况完全相反，而受温度的影响是一样的。假设外部传感器受到的拉应力和温度的影响为  $\varepsilon_1 + \Delta T$ ，而内部传感器的影响为  $\varepsilon_2 + \Delta T$ ，因此有：

$$2 \Delta \varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = d / 2R$$



其中  $d$  为光栅点到中性面的距离,  $R$  为柔性杆的直径。这种方法消除了因为温度的变化给应力测试带来的影响。

如图 5 所示, 利用 FBG c 和 FBG d 的差值来消除 X 轴方向上的温度影响和得出弯曲方向在 X 轴上的曲率的大小, 同理利用 FBG a 和 FBG b 的差值来消除 Y 轴方向上的温度影响和得出弯曲方向在 X 轴上的曲率的大小, 于是有:

$$\Delta\varepsilon_1 = \varepsilon_a - \varepsilon_b \quad \Delta\varepsilon_2 = \varepsilon_c - \varepsilon_d$$

因此最大的应力:

$$\Delta\varepsilon_{MAX} = \sqrt{\Delta\varepsilon_1^2 + \Delta\varepsilon_2^2}$$

因此可以得到应力与 X 方向的夹角:

$$\phi = \arctan\left(\frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta\varepsilon_1}\right)$$

其中  $\Delta\varepsilon_1$  为在 X 轴方向上的应力的变化量,  $\Delta\varepsilon_2$  为在 Y 轴方向的应力的变化量,  $\varepsilon_a$ 、 $\varepsilon_b$  分别为 X 轴上的两个光栅点受弯曲和温度的变化引起的应力的变化量,  $\varepsilon_c$ 、 $\varepsilon_d$  分别为 X 轴上的两个光栅点受弯曲和温度的变化引起的应力的变化量。

$\Delta\varepsilon_{MAX}$  为合成的最大应力,  $\phi$  为应力方向与 X 轴方向上的夹角。

当获得了柔性检测杆(1)上五个离散点的曲率之后, 便可以根据下列步骤获得基于递推方法的曲线拟合方程。

1. 根据两个离散点的空间曲率关系, 可以得到两个离散点之间的任意的离散点的空间曲率关系, 假设空间曲线上的邻近的离散点  $P_i, P_{i+1}$  的曲率和法向量均已知, 分别为  $C_i, C_{i+1}$ , 其法向量与 Y 轴的夹角分别为  $\beta_i, \beta_{i+1}$ , 其在该曲线的长度为  $(s_i \sim s_{i+1})$ , 假设空间曲线的两点间的曲率关系与两点的曲率成线性关系, 将这段曲线分成  $n$  段, 这样可以求出曲线上任意一个点的曲率和方向。

2. 利用任意邻近点的相对位置变化, 后一个邻近点相对于前一个邻近点的位置变化为:

$$\begin{cases} dx = \frac{1}{k} \cdot (1 - \cos\theta) \cdot \cos\phi \cdot d_s \\ dy = \frac{1}{k} \cdot (1 - \cos\theta) \cdot \sin\phi \cdot d_s \\ dz = \frac{1}{k} \cdot \sin\theta \cdot d_s \end{cases}$$

用矢量表达为:  $P'_i = [dx \ dy \ dz]^T$

3. 利用四元数方法可以得到后一个临近点相对于前一个临近点的旋转关系, 其表达式为:

$$R'_i = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \\ o_x & o_y & o_z \\ a_x & a_y & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-2b^2-2c^2 & 2ab-2sc & 2ac+2sb \\ 2ab+2sc & 1-2a^2-2c^2 & 2bc-2sa \\ 2ac-2sb & 2bc+2sa & 1-2a^2-2b^2 \end{bmatrix}$$

其中:  $s = \cos(\frac{\theta}{2})$ ,  $v = u \sin(\frac{\theta}{2}) = \{a \ b \ c\}$ , 其中  $u$  是沿所选旋转轴的单位向量,

$\theta$  是绕此轴的指定旋转轴。

4. 这样可以得到相邻点的位姿变化的其次表达式为:  $T'_i = \begin{bmatrix} R'_i & P'_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

5. 以内窥镜的端部为基点, 利用位姿适量的坐标转换关系, 图 6 为该方法的数学模型可以得到如下的方程:

$$T_i = \prod_1^i T'_i$$

利用上面的技术可以得到曲线上任意一点的位置相对于端部基点的位置, 这样将各个离散点利用曲线拟合的方法, 就可以得到整个细长柔性杆 (1) 的空间形状的显示。

下面以一个细长柔性杆插入到内窥镜的钳道中为例子, 利用细长柔性杆的形状与内窥镜的形状一致, 来检测检测内窥镜在进入人体腔道的形状。图 7 (a) 为内窥镜的实际形状图, 图 7 (b) 为内窥镜的检测得到的三维图形。

图 8 是整个系统的程序流程图, 首先通过离线的各个光栅点的曲率与波长变化关系得比例因子的标定得到比例系数  $K$ , 然后通过软件向 TCP/IP 发送采集命令字, 光纤光栅将实时的数据通过局域网路由器 (4) 传送到软件的指定的数组中, 然后结合得到的系数  $K$ , 得到五个离散点的空间曲率, 然后利用基于位姿矢量的重建算法得到整个细长柔性杆的形状。

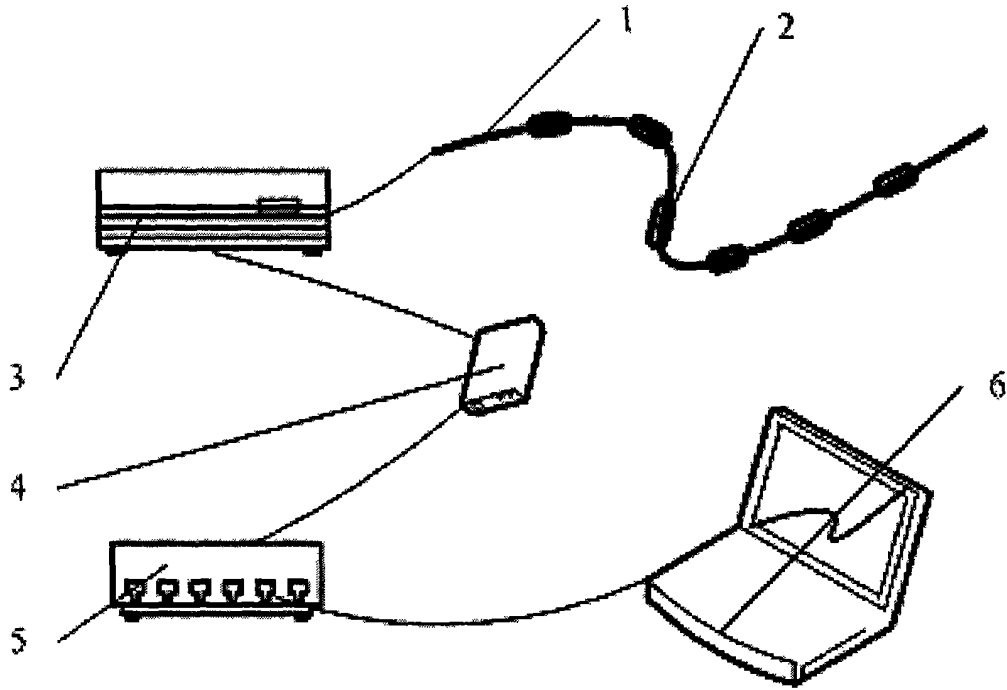


图1

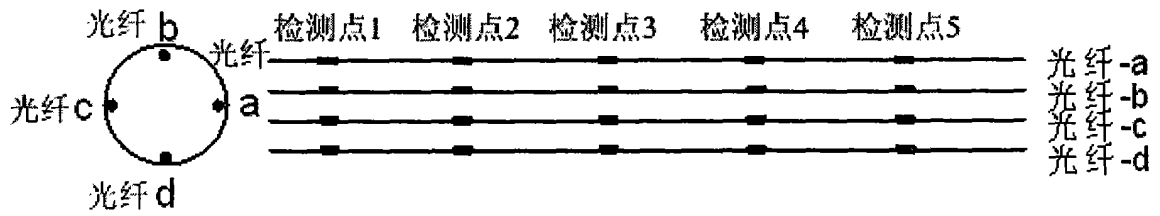


图2

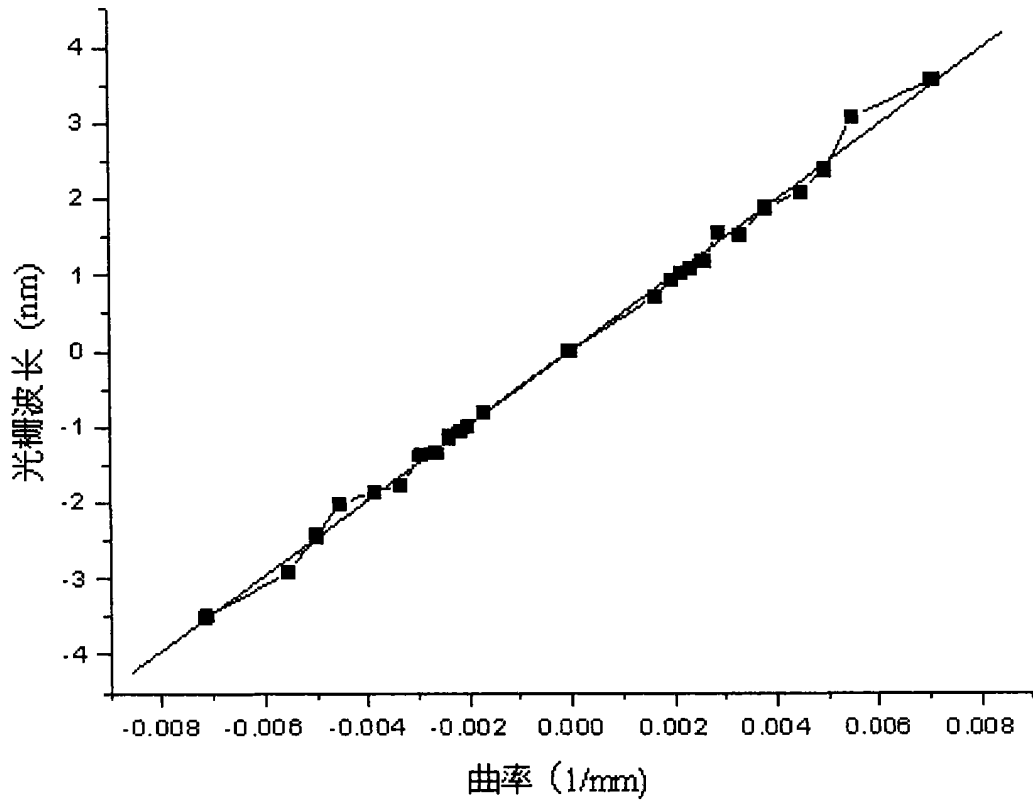


图 3

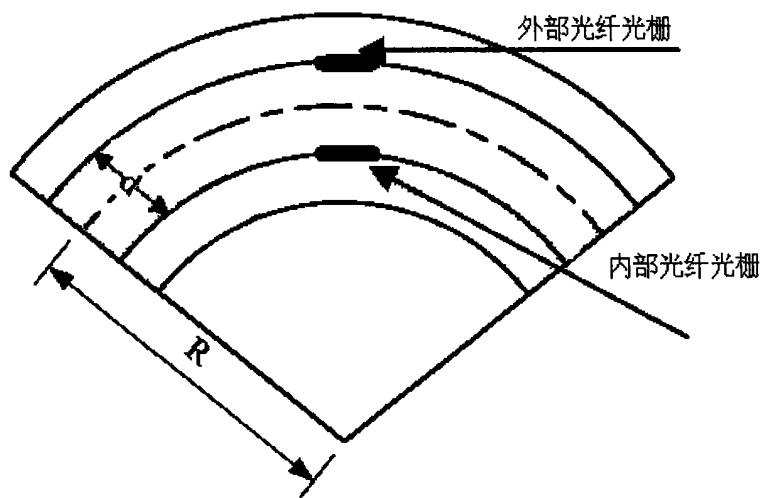


图 4

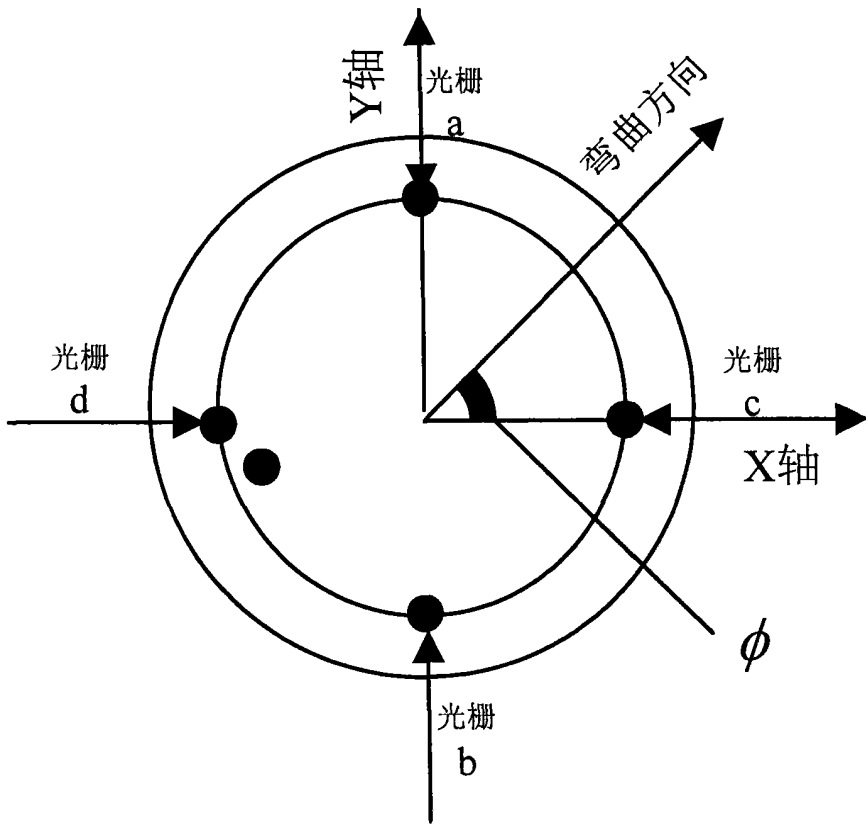


图 5

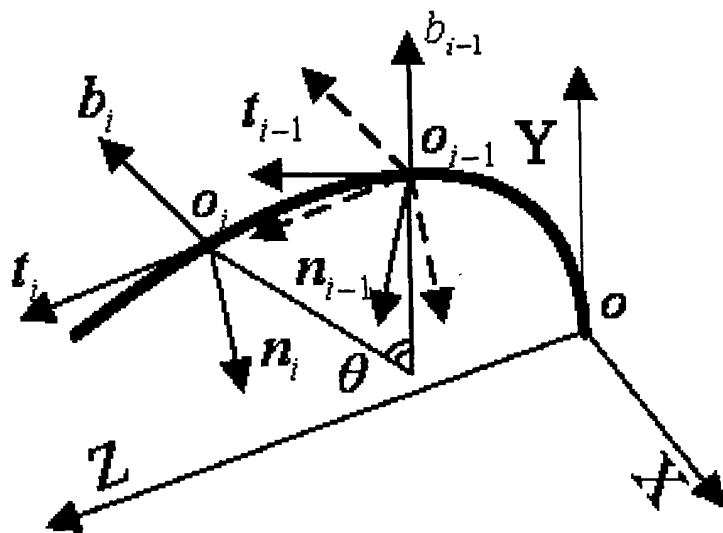


图 6

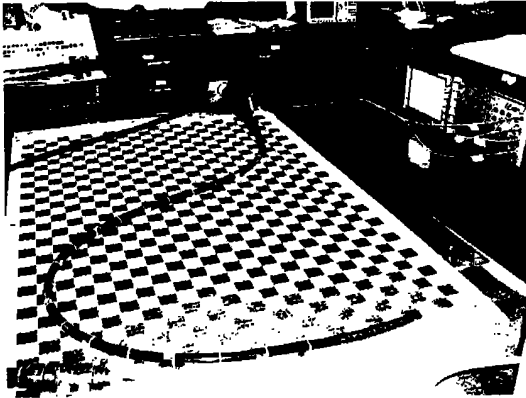


图 7(a)

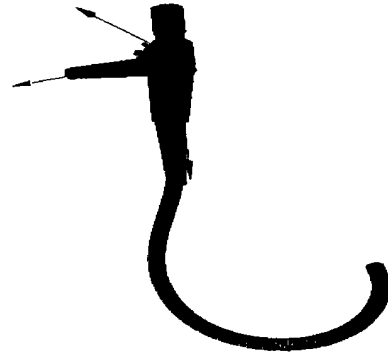


图 7(b)

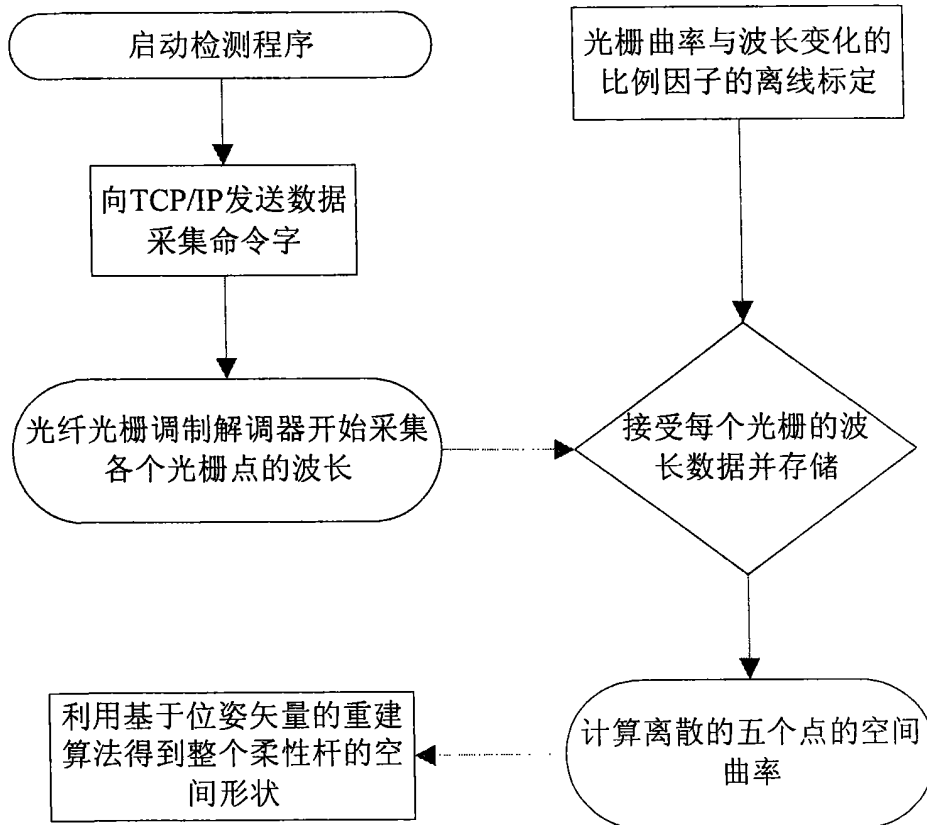


图 8