

采用 GRIN 透镜的微胶囊内窥镜成像技术*

丁 琴 王惠南

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘 要 研究了采用新型的 GRIN 透镜的微胶囊内窥镜成像的工作原理. 根据近轴子午光线方程, 用矩阵分析法分析 GRIN 透镜成像原理, 并提出自动调焦、CCD 光电转换、图像传送和无线传送电能等的实现方法. 为研发微型生物医学仪器提供了必要的理论基础和重要的技术方法.

关键词 GRIN 透镜; 内窥镜; 矩阵分析; 电荷耦合器件

中图分类号 TH773 **文献标识码** A

0 引言

GRIN 透镜一般应用于光纤通讯中. 作为光线耦合元件, 或者应用于强度型光纤传感器中^[1]. GRIN 透镜同普通透镜的区别在于, GRIN 透镜材料不仅能够使沿径向传输的光产生折射, 而且其沿径向逐渐减小的折射率分布, 能够实现出射光线被平滑且连续的汇聚到一点; 其两端为圆柱形平面, 直径小, 一般为半颗粒大小, 通光效率高, 容易加工. 尤其是 1/4 周期长度的 GRIN 透镜, 具有端面聚焦的特性^[2]. 利用 GRIN 透镜成像, 结合 CCD 技术^[3], 使成像清晰度较传统技术大大提高. 若同时采用无线电微波技术来传送所成的像, 能达到随拍随传, 进行实时检测, 亦可硬盘储存, 以便随时调取. 这是微光电技术 (MEMS) 在生物医学工程 (BME) 中应用的一个典型而有深远意义的范例.

1 GRIN 成像工作原理

1.1 GRIN 透镜成像光线分析

首先, 用矩阵分析法对射入 GRIN 透镜的光线进行分析, 以阐明 GRIN 透镜如何成像.

假设选用的 GRIN 透镜之径向折射率分布为抛物线型分布, 由下式给出^[2]

$$n(r) = n(0) \left(1 - \frac{1}{2} \alpha^2 r^2 \right) \quad (1)$$

式中 $\alpha = \frac{2\pi}{L}$ 为聚焦 (分布) 常数; L 为 GRIN 透镜中子午光线的周期长度; r 为 GRIN 透镜中距轴线的径向距离; $n(0)$ 为 GRIN 透镜轴线上的折射率.

如图 1 所示, 光线 PA 以入射角 θ_1 射到端面 AO 上, 折射后光线在 GRIN 透镜中沿 AB 曲线 (正弦) 传到 B , 再经过 BO' 端面折射, 沿 BC 射出.

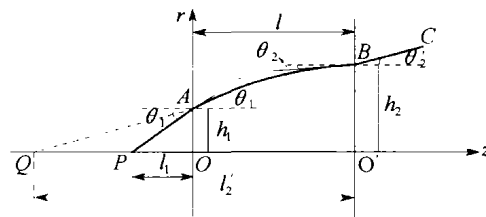


图 1 GRIN 透镜光线路径
Fig. 1 Ray path of GRIN lens

1.1.1 光线方程

AO 端面的光线折射

根据折射定律^[2], 光线在 AO 端面发生折射, 有 $\theta_1 = n\theta_1'$ (2)

式中 θ_1 为入射角; θ_1' 为折射角; n 为 A 点折射率.

由于我们讨论的是 GRIN 透镜中的近轴光线, 故这里近似地用轴线 OO' 上的折射率 $n(0)$ 代表 n , 则有

$$\theta_1 = n(0)\theta_1' \quad (3)$$

为了便于写成矩阵形式, 附加一方程

$$h_1' = h_1 \quad (4)$$

式中 h_1' 为折射光线在 A 点的出射高度.

将式 (3)、式 (4) 写成矩阵的形式, 有

$$\begin{bmatrix} h_1' \\ \theta_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

GRIN 透镜内部光线传播

根据折射率分布^[2], 有光线传播的曲线 (AB) 的方程

$$r = R \sin \alpha (z + z_0) \quad (6)$$

z 为子午光线在轴线方向的坐标值.

$z = 0$ 时, 有

$$R \sin \alpha z_0 = h_1 = h_1' \quad (7)$$

AB 在 A 点切线斜率为

$$\tan \theta_1' \approx \theta_1' = \left(\frac{dr}{dz} \right)_{z=0} = \alpha R \cos \alpha z_0 = \alpha \sqrt{R^2 - h_1'^2} \quad (8)$$

设透镜长度为 l , 则有

$$h_2 = R \sin \alpha (l + z_0) = R \sin \alpha \cos \alpha z_0 + R \cos \alpha l$$

*航空基础学科基金项目 (99E52036) 资助
Tel: 025-84891938 Email: dingqinnuaa@hotmail.com
收稿日期: 2003-07-10

$$\begin{aligned} \sin \alpha z_0 &= \sin \alpha l \sqrt{R^2 - h_1'^2} + h_1' \cos \alpha l = \\ h_1' \cos \alpha l + \theta_1' \frac{\sin \alpha l}{\alpha} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \theta_2 &\approx \left(\frac{dr}{dz} \right)_{z=l} = \alpha R \cos \alpha (l + z_0) = \alpha R (\cos \alpha l \cdot \\ \cos \alpha z_0 - \sin \alpha l \sin \alpha z_0) &= \alpha \cos \alpha l \frac{\theta_1'}{\alpha} - \alpha h_1' \cdot \\ \sin \alpha l &= -h_1' \alpha \sin \alpha l + \theta_1' \cos \alpha l \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} h_2' \\ \theta_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha l & \frac{\sin \alpha l}{\alpha} \\ -\alpha \sin \alpha l & \cos \alpha l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1' \\ \theta_1' \end{bmatrix} \quad (11)$$

端面 BO' 的光线折射

与 AO 面类似

$$h_2' = h_2 \quad (12)$$

$$\theta_2' = n(0) \theta_2 \quad (13)$$

将式(12)、(13)写成矩阵的形式,有

$$\begin{bmatrix} h_2' \\ \theta_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

将式(5)、(11)代入式(14),得

$$\begin{bmatrix} h_2' \\ \theta_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha l & \frac{\sin \alpha l}{\alpha} \\ -\alpha \sin \alpha l & \cos \alpha l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1' \\ \theta_1' \end{bmatrix} \quad (15)$$

即

$$\begin{bmatrix} h_2' \\ \theta_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha l & \frac{\sin \alpha l}{\alpha n(0)} \\ -\alpha n(0) \sin \alpha l & \cos \alpha l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1' \\ \theta_1' \end{bmatrix} \quad (16)$$

由上式可以看出,GRIN 透镜可以对近轴光线成像.

l_1 为物点 P 离开 AO 面的距离.

$$l_1 = \frac{h_1}{\theta_1} \quad (17)$$

l_2' 为像点 Q 离开 BO' 面的距离.

$$l_2' = \frac{h_2'}{\theta_2'} \quad (18)$$

当 l_1 一定,即 $\frac{h_1}{\theta_1}$ 一定时, l_1, θ_1 成正比例变化时,

h_2' 和 θ_2' 也成正比例变化,即 l_2' 也不变,这就说明了 GRIN 透镜可对近轴光实现成像.

1.1.2 焦距值和主平面位置

如图 2 所示,焦距值:即 $\theta_1 = 0$ 时,有

$$f' = \frac{h_1}{-\theta_2'} = \frac{1}{\alpha n(0) \sin \alpha l} \quad (19)$$

主平面位置:即 $\theta_1 = 0$ 时,有

$$h' = f' - \frac{h_2'}{-\theta_2'} = \frac{h_1}{-\theta_2'} - \frac{h_2'}{-\theta_2'} = \frac{h_1(1 - \cos \alpha l)}{\alpha n(0) \sin \alpha l h_1} =$$

$$\frac{1 - \cos \alpha l}{\alpha n(0) \sin \alpha l} \quad (20)$$

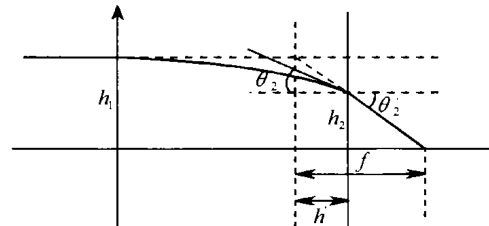


图 2 平行光入射 GRIN 透镜

Fig. 2 Parallel ray shoot into GRIN lens

当 $l = \frac{1}{4}L$ 时,即 $\alpha l = \frac{2\pi}{L} \frac{L}{4} = \frac{\pi}{2}$ 时,有

$$\begin{bmatrix} h_2' \\ \theta_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\alpha n(0)} \\ -\alpha n(0) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1' \\ \theta_1' \end{bmatrix} \quad (21)$$

即

$$h_2' = \frac{\theta_1'}{\alpha n(0)} \quad (22)$$

$$\theta_2' = -\alpha n(0) h_1' \quad (23)$$

$$f' = h' = \frac{1}{\alpha n(0)} \quad (24)$$

$$l_1 = \frac{h_1}{\theta_1} \quad (25)$$

$$l_2' = \frac{h_2'}{\theta_2'} = \frac{\frac{\theta_1'}{\alpha n(0)}}{-\alpha n(0) h_1'} = \frac{\theta_1'}{-\alpha^2 n^2(0) h_1'} = \frac{1}{-l_1 \alpha^2 n^2(0)} \quad (26)$$

据以上分析可以了解,对于 $l = \frac{1}{4}L$ 的 GRIN 透镜,当从一端面输入一束平行光时,经过 GRIN 透镜后光线会汇聚在另一端面上. 这种端面聚焦的功能是传统曲面透镜所无法实现的. 当物离开 AO 面的距离 l_1 已知时,则可以知道 l_2' 的大小,即可知,像将成在距离 BO' 面 $\frac{1}{-l_1 \alpha^2 n^2(0)}$ 的位置.

1.2 自动调焦系统

1.2.1 自动调焦的几种主要方式

在摄影摄像技术中,调焦是保证感光介质所记录的影像取得清晰效果的关键步骤. 调焦机构就是用来调节摄像镜头和感光介质之间的距离,使得像平面落在感光介质的表面. 自动调焦,即根据被摄目标的距离,由集成电路指使镜头前后移动到相应的位置上,从而使被摄目标自动清晰成像^[4].

从基本原理来说,自动调焦可以分成两大类:一类是基于镜头与被摄目标之间距离测量的测距方法,另一类是基于调焦屏上成像清晰的聚焦检测方法.

测距方法的自动调焦主要有三角测量法、红外

线测距法和超声波测距法. 红外线式和超声波式自动对焦是利用主动发射光波或声波进行测距的,称之为主动式自动对焦. 聚焦检测方法主要有对比度法和相位法. 对比度法是通过检测影像的轮廓边缘实现自动调焦的. 相位法是通过检测像的偏移量实现自动调焦的.

各种自动对焦方式各有其局限性^[5]. 例如红外测距和超声测距的对焦方法,当被测目标对红外光或超声波有较强的吸收作用时,将使测距系统失灵或对焦不准确;而对比度法聚焦检测受光照条件的制约,当光线暗弱或被摄体与背景明暗差别很小时,调焦就会有困难,甚至失去作用.

1.2.2 适用于采用 GRIN 透镜的微胶囊内窥镜的一种自动调焦方法

本文采用相位差检测法的基本原理,改进了其中的控制机构和执行机构等.

CCD 阵列前有两个分像透镜,它把 GRIN 透镜所成的像分离成左右两个像. 调焦原理如下:调焦正确时,通过 GRIN 透镜的光线经过分像透镜成像在 CCD 阵列上,形成两个基准像;当像点位置超前时,在 CCD 上的两个像之间的距离小于合焦时的像间距;反之,像点处于后焦位置,像间距大于合焦时的像间距. 这样,以合焦时的像间距为基准值,测出像距差计算出离焦值,从而驱动镜头的移动达到自动调焦的目的.

如图 3 所示,CCD 阵列接受来自镜头的光束,输出反映调焦状态的像间距信号,输入到运算控制中心. 运算控制中心得到 CCD 的信号,根据相位差(像间距于基准距之差)运算出离开正确位置的方向和距离,即镜头需要移动的距离;同时,把这个距离信号转化为电流的大小和方向. 镜头置于线圈中,线圈外有两个极块,当电源流过线圈时,便建立磁场,在极块与线圈之间产生斥力和吸力,控制其电流的大小和方向,使镜头移动到合适位置.

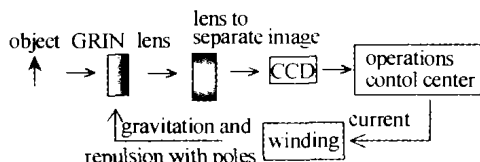


图 3 自动调焦方法示意图
Fig. 3 A method of auto-focusing

当然,这种方法需要增加亮度,所以,在此系统中,我们在镜头周围放置两个白色 LED 作为照明用.

2 微胶囊内窥镜的整体结构

微胶囊内窥镜主要由以下几部分组成:光学圆盖,GRIN 透镜,自动调焦机构,照明 LED,CCD 成像

系统,信号发送器,磁线圈,电容器等. 其结构如图 4 所示.

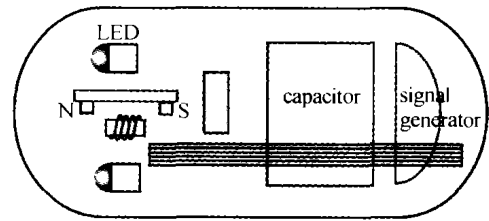


图 4 胶囊内窥镜结构图
Fig. 4 The structure of capsule endoscope

当光通过 GRIN 透镜成像,在像平面放置 CCD 光敏阵列,形成光学图像,CCD 器件把光敏元上的光信息转换成与光强成比例的电荷量. 用一定频率的时钟脉冲对 CCD 进行驱动,在 CCD 的输出端可获得被测对象的视频信号. 视频信号中每一个离散电压信号的大小对应着该光敏元所接收光强的强弱,而信号输出的时序则对应 CCD 光敏元位置的顺序. CCD 用自身电子扫描方式完成信息从空间域到时间域的变换.

从 CCD 输出的视频信号非常微弱,所以要先对信号进行放大,然后送至视频处理放大器,对信号进行补偿和处理,消除干扰,校正失真,提高清晰度. 经过处理校正之后的图像信号,送至编码器,把复合同步信号,复合消隐信号,和图像信号组合在一起. 采用负极性视频信号及负极性调制方式. 在接收方面,把发射出调制在载波上的信号接收下来,还原为图像信号. 经过 CDS/AGC 的模数换,进入 DSP 处理,最后送至显示设备. 这样,我们可以在接收端观测到需要的图像信息.

目前,在微型成像器件中,常用的电源是纽扣电池. 但它含有对人体有害的物质,其在体内滞留过长的时间显然是不合适的.

一种完全无害的电池,必须体积很小,方可装入胶囊内,目前尚无. 为此我们选择无线电能传送的方法.

如图 5 所示,可以利用变压器的原理,体外有一组线圈,体内也有一组线圈. 外部控制单元无线发送的电能由线圈接收,对胶囊内的电容器充电. 当被充电的能量快速地向转子线圈释放时,一个较大的磁力便在很短的时间内产生,电流流向外部定子线圈时形成较大磁力. 电能可以提供给 CCD 和照

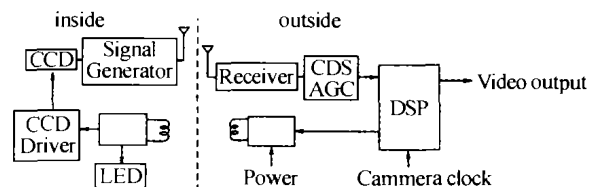


图 5 电能传送示意图
Fig. 5 Power transmission

明的 LED 使用。

3 结论

本文用矩阵分析法分析光线在 GRIN 透镜中的传播,证明 GRIN 透镜能够良好成像。对于四分之一周期长度的 GRIN 透镜,具有端面聚焦的功能,而且有超短焦距。说明采用 GRIN 透镜设计内窥镜在原理上是完全可行的。

由于新型的 GRIN 透镜有其体积小,成像质量高等特点,更加适合于微胶囊内窥镜的要求。采用 GRIN 透镜的微胶囊内窥镜研制成功后,将大大提高医疗领域的工作效率。

参考文献

- 1 王惠南. 采用 GRIN 透镜之光纤加速度计原理分析. 光子学报, 1995, 24(1): 18 ~ 24
Wang H N. *Acta Photonica Sinica*, 1995, 24(1): 18 ~ 24
- 2 徐大雄. 纤维光学的物理基础. 北京: 高等教育出版社, 1982. 34 ~ 65
Xu D X. *Fibre optics physical foundation*. Beijing: China Higher Education Press, 1982. 34 ~ 65
- 3 王庆有, 孙学珠. CCD 应用技术. 天津: 天津大学出版社, 1993. 58 ~ 66
Wang Q Y, Sun X Z. *CCD applied technology*. Tianjing: Tianjing University Press, 1993. 58 ~ 66
- 4 安文化. 现代照相机技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1992. 90 ~ 142
An W H. *Modern camera technology*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992. 90 ~ 142
- 5 薛建平, 高景林. 35 毫米自动调焦新型照相机. 北京: 中国摄影出版社, 1994. 44 ~ 66
Xue J P, Gao J L. *35mm auto-focusing new pattern camera*. Beijing: China Photography Press, 1994. 44 ~ 66

An Imaging Technique of Microcapsule Endoscope Using a GRIN Lens

Ding Qin, Wang Huinan

College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

Received date: 2003-07-10

Abstract A new microcapsule endoscope using a GRIN lens is introduced in this paper. According to meridian equation for paraxial rays, GRIN lens imaging principle by matrix analysis method is analyzed. And besides, auto-focusing, how to convert light to electricity using CCD, image transmission, power transmission by wireless and so on are also discussed. All of these provide the essential principle foundation and important technique methods for the research of minitype instruments of biomedicine.

Keywords GRIN lens; Endoscope; Matrix analysis; CCD

Ding Qin was born in Wuxi in December, 1979. She is a graduate student in College of Automation Engineering of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her major is Precision Instrument and Mechanism.

