

转镜扫描的非线性研究

罗必凯 倪晓武 陆 建 贺安之

(南京理工大学应用物理系, 南京 210014)

提要 从光学基本原理出发,得到了四面柱体转镜扫描的非线性解析解,并进行了数值计算,从而给出了四面柱体转镜扫描的非线性曲线。在理论分析的基础上,设计了一种单片双面镜二维扫描系统。利用该系统能有效地克服多面柱体转镜-摆镜二维扫描系统的非线性特性,给后续的计算机实时图像处理工作带来了方便。

关键词 三维激光成像雷达,激光二维扫描,扫描非线性

1 引 言

三维激光成像雷达因其具有较高分辨率和优异的抗电子干扰性能,因而在目标跟踪与识别领域得到广泛应用^[1~3]。在激光成像雷达的二维扫描机构设计时,常采用转镜-摆镜系统^[1],其中的转镜又多用多面柱体。激光束在多面柱体的表面反射,从而达到探测的目的。但是,多面柱体用于扫描时不可避免地存在非线性现象,因而影响探测精度和目标定位。

本文从光学基本原理出发,以四面柱体为例进行了分析和计算,得到了四面柱体转镜扫描的非线性解析解,并进行了数值计算,从而给出了四面柱体转镜扫描的非线性曲线。在理论分析的基础上,设计了一种单片双面镜二维扫描系统。利用该系统能有效地克服多面柱体转镜-摆镜系统的非线性特性,给后续的计算机实时图像处理工作带来了方便。

2 四面柱体转镜扫描的非线性现象分析

现有的转镜-摆镜系统在工作时,光束入射在转镜镜面上的位置是不断变化的,而且反射光线的延长线不可能都通过转轴。因此,该结构的行扫描必然是非线性的;若入射到摆镜上的行扫描线不能通过摆轴,则帧扫描也是非线性的。下面以四面柱体为例,利用该柱体的外接圆来定量分析这一非线性特性。

将四面柱体的某一表面置于 XOY 坐标系中,

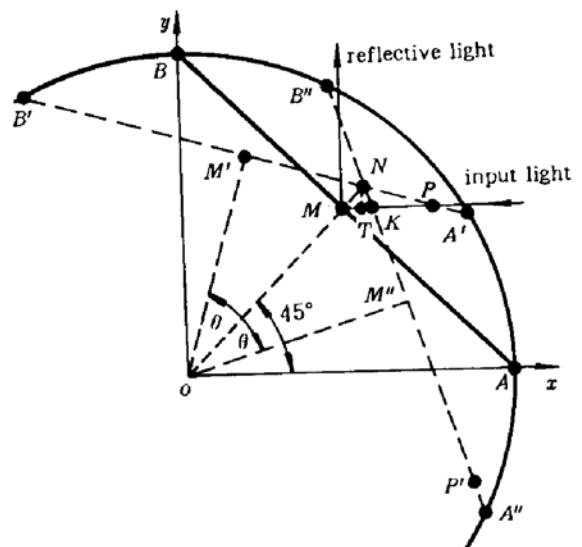


Fig. 1 Diagram of theoretical analysis

如图 1 所示。当光线平行于 X 轴入射在四面柱体的 AB 平面上 M 点处时,入射角 $i_0 = \angle AOM = 45^\circ$ 。在时刻 t_0 时,入射光线在 AB 面的 M 点处反射;到时刻 t_1 时, AB 面旋转 θ 角至 $A'B'$,因而反射点移至 P ,即四面柱体旋转了 θ 角就将导致反光点在空间移动了 MP 距离,对应于 AB 面上平移了 $M'P$ 的距离。为求 MP 和 $M'P$ 的表达式,不妨延长 OM ,从而与 $A'B'$ 相交于 N 点;再从 N 点作 MP 的垂线 NT 和四面柱体的外接圆,并设该外接圆半径为 r ,则有

$$OA = OB = r$$

$$MN = ON - OM = r[1/(\cos\theta) - 1]/\sqrt{2} \quad (1)$$

由图 1 亦可见 $\angle NMT = i_0 = 45^\circ$,固有

$$NT = MN \cdot \cos 45^\circ = r[1/(\cos\theta) - 1]/2 \quad (2)$$

再根据图 1 可知 $\angle MNP = 90^\circ + \theta$ 和 $\angle PNT = \angle MNP - \angle MNT = 45^\circ + \theta$,则有

$$TP = NT \cdot \operatorname{tg} \angle PNT = r[1/(\cos\theta) - 1] \operatorname{tg}(45^\circ + \theta)/2 \quad (3)$$

$$MP = MT + TP = (1/\cos\theta - 1)[1 + \operatorname{tg}(45^\circ + \theta)]r/2 \quad (4)$$

故有

$$\begin{aligned} M'P &= M'N + NP = OM' \operatorname{tg}\theta + TP/\sin \angle PNT \\ &= \left\{ \operatorname{tg}\theta/\sqrt{2} + (1/\cos\theta - 1)/[2\cos(45^\circ + \theta)] \right\} r \end{aligned} \quad (5)$$

对(4)和(5)式进行数值计算,可以得到反光点在空间的移动距离 MP 和在 AB 面上的平移距离 $M'P$ 与转角 θ 的关系曲线,如图 2 所示。同理,可得 AB 面在 $t_0 - t_1$ 至 t_0 时间(即 AB 面由图 1 中的 $A''B''$ 位置到 AB 位置)内,反光点在空间的移动距离 MK 和在 AB 面上的平移距离 KM'' 与转角 θ 的关系曲线如图 3 所示,对应的解析解表达式分别为

$$MK = (1/\cos\theta - 1)[1 + \operatorname{tg}(45^\circ - \theta)]r/2 \quad (6)$$

$$KM'' = \left\{ \operatorname{tg}\theta/\sqrt{2} - (1/\cos\theta - 1)/[2\cos(45^\circ - \theta)] \right\} r \quad (7)$$

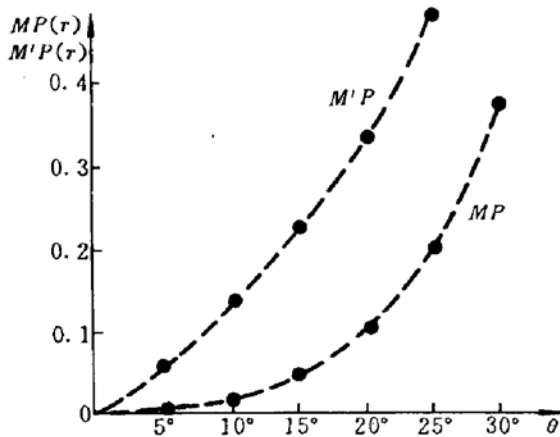


Fig. 2 Relation curve of MP and $M'P$ vs θ

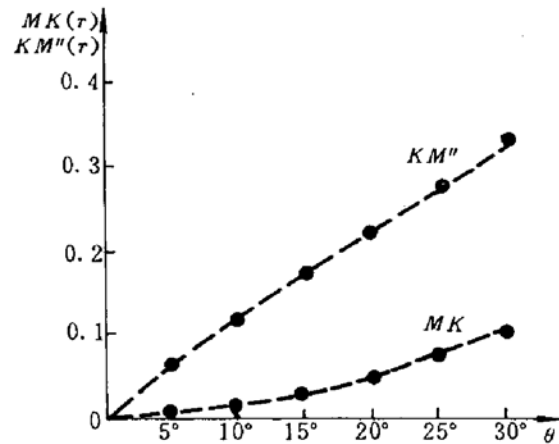


Fig. 3 Relation curve of MK and KM'' vs θ

综合图 2 和图 3 可以得到转镜由图 1 中的 $A''B''$ 位置到 $A'B'$ 位置间,反光点在 AB 面上的平移距离 KP' (r) 与转角 θ 的关系曲线,如图 4 所示。对应的解析解表达式为

$$KP' = \left(\sqrt{2} \operatorname{tg}\theta - \frac{1/\cos\theta - 1}{2\cos(45^\circ - \theta)} + \frac{1/\cos\theta - 1}{2\cos(45^\circ + \theta)} \right) r \quad (8)$$

注意到以上讨论的基础是四面体的外接圆,而与多面柱体的面数无关。因而,(8)式可用

于 n 面柱面体。事实上，由(8)式和图 4 可知，多面柱体对反射光的非线性效应只与转角 θ 和外接圆半径 r 有关。

图 2 和图 3 显示的平移距离随转角的非线性引起激光束行扫描($V = \omega R$)的非线性是随扫描角($\varphi = 2\theta$)增大而增大的，其最大值由最大转角($\theta = \pi/n$)和外接圆半径(r)限定。

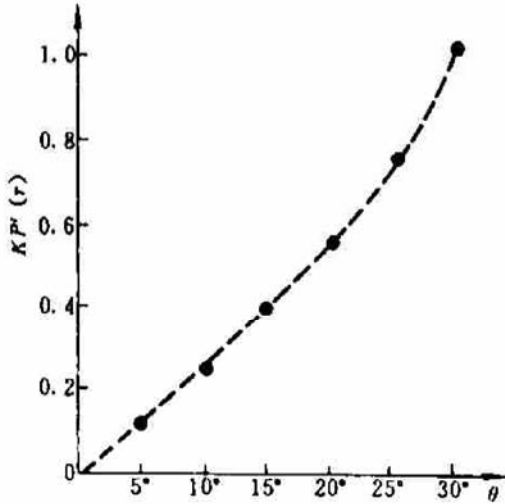


Fig. 4 Relation curve of $KP'(r)$ vs θ

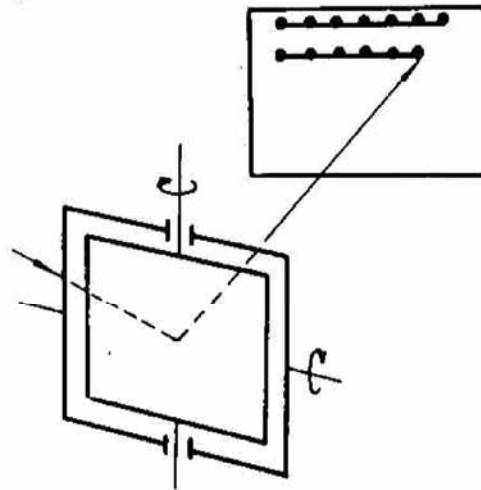


Fig. 5 Principle diagram of single-chip double-face mirror scanning system

3 单片双面镜二维扫描系统的原理和设计

正因为多面柱体转镜-摆镜系统存在不可避免的非线性现象，我们在研究激光相位成像雷达时^[2]，设计了一种单片双面镜二维扫描系统，其原理如图 5 所示，转镜在作高速旋转的同时作帧摆动。双面镜由一高速电动机驱动作行扫描，支撑双面镜转轴的框架由一低速电动机驱动作帧摆动，从而实现了二维扫描。由于转轴与摆轴垂直相交，光束通过该相交点反射作行扫描和帧扫描。显然，行扫描和帧扫描均具有恒定的角速度和均匀的角间隔。由 $v = \omega R$ 可知，该系统有良好的扫描线性度。

单片双面镜二维扫描系统还具有扫描角度范围大的特点，特别适合于智能机器人和自主式车辆的道路探测用的扫描-测距式三维视觉传感器。我们在研制激光相位成像雷达整机时，使用了根据上述原理制作的单片双面镜二维扫描系统，其水平和垂直扫描有效角可达 100° ，在不需作任何非线性修正就能获得无明显畸变的距离图像。图 6 给出了我们所研制的原理样机所获得的距离图像的照片。



Fig. 6 Photograph of distance image

(scanning sample, 256 point/line, 64 line/frame, sampling angle, level $\pm 40^\circ$, vertical $\pm 23^\circ$)

参 考 文 献

- 1 Max E. Bair. , Robert Sampson, David Zuk. *Proc. SPIE*, 1986, 726 : 274
- 2 贺安之, 罗必凯, 苗鹏程, 阎大鹏. 光学学报, 1993, 13(7) : 667
- 3 M. F. Reiley, D. C. Carmer, W. F. Pont. *Proc. SPIE*, 1991, 1416 : 295

Study of Nonlinearity of Rotating Mirror Scanning

Luo Bikai Ni Xiaowu Lu Jian He Anzhi

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210014)

Abstract In this paper, according to optical basic theory, an analytical solution for nonlinearity of the scanning with tetrahedral column rotation mirror is obtained, and a numerical calculation is made to gain a analysis. A single-chip double-face-mirror two-dimension scanning system, was designed. The system can overcome effectively the nonlinear feature of polyhedral column rotating-pendulum-mirror, and also bring convenience for succedent computer real image treatment.

Key words Three-dimension imaging radar, laser two-dimension scanning, scanning nonlinearity