

· 光电工程系统技术 ·

二维指向镜的定域扫描方式的扫描特性分析

吴 凡, 王大鹏

(光电系统信息控制技术国家级实验室, 河北 三河 065201)

摘 要:在光学反射矢量理论的基础上,分析了二维指向镜的定域扫描方式的非线性扫描特性,给出了指向镜二维扫描的轨迹及像旋角的计算公式,提出了对扫描轨迹进行非线性校正的方法.在不进行消旋处理的情况下,将二维指向镜的定域扫描方式直接应用于点源探测系统如红外系统中.

关键词:二维指向镜;定域扫描;像旋;扫描轨迹

中图分类号:TN214

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2009)04-0016-05

Analysis of Scanning Traces Characteristics of the Two-Axis Pointing Mirror in the Mode of Scanning in Given Area

WU Fan, WANG Da Peng

(National Laboratory of Electro-Optic System Technology, Sanhe 065201, China)

Abstract:Based on the vector theory of optical reflection, nonlinear scanning traces characteristics of the two-dimensional pointing mirror in the scanning mode in the given area is analyzed. The expression of scanning trace and image rotation angle and the method of non-linear scanning trace modification are given. Without eliminating the image rotation, this mode can be used in point object detecting system, such as IR detecting system.

Key words:two-dimensional pointing mirror; scanning mode in the given area; image rotation; scanning trace

二维指向镜具有在一定时间内完成相机指向的前视、后视和侧视摆动功能,这种摆动可提供大视场搜索和小视场跟踪的转换功能并提供最短的转换时间,而且还可缩短对重点目标的重访周期;另外还可将相机置于自准位置,以便实现调焦、检焦.

二维指向镜绕两轴旋转时,系统视视角与两轴转角之间存在非线性关系,即线性驱动两轴将得到非线性的扫描轨迹,从而扫描空间不能均匀覆盖,造成搜索时目标漏警.此外,二维指向镜转动时,探测器在物空间的像将绕视轴旋转,即产生像旋.像旋对单元探测器系统影响不大,对线列或面阵探测器,像旋会使图像畸变,对线列扫描图像尤为甚.像旋也会使提取的目标离轴信息失真,如不加以校准,将无法对目标进行精确的跟踪瞄准.因此,深入研究二维

扫描镜的成像特性及其扫描轨迹,为软件校正像旋、提高扫描跟踪精度提供理论依据是非常必要的.

二维指向镜在应用中常见的扫描轴系有 2 种^[1]:YZ 轴系和 ZQ 轴系,如图 1 所示. XYZ 为基准坐标系, \vec{N} 是指二维扫描镜的法线方向, \vec{N} 与 X 轴夹角 135° ;扫描镜短轴沿轴 Z 方向;扫描镜长轴与 Q 轴平行; \vec{P} 为沿后光路光轴方向的单位矢量, \vec{P}' 是 \vec{P} 的像矢量. YZ 轴系是扫描镜绕 Y 轴摆动 α 角度进行物方方位角扫描,绕 Z 轴摆动 β 角度进行物方俯仰角扫描; ZQ 轴系是扫描机构绕扫描镜短轴 Z 摆动 α 角度进行物方俯仰角扫描,绕 Q 轴摆动 β 角度实现物方方位角扫描. 因为扫描时一定是先做方位扫描然后调整俯仰扫描基线做俯仰扫描,所以在 YZ 轴系中 Y 轴是固定轴 Z 轴是运动轴;而在

收稿日期:2009-06-29

作者简介:吴凡(1977-),男,河南商城人,学士,主要研究方向是红外光学系统的开发与应用.

ZQ 轴系中 Z 轴是固定轴 Q 轴是运动轴. 其中 YZ 轴系应用最为广泛, 即为常见的 45° 扫描镜系统, 文献[2]对其扫描特性进行了详细的分析.

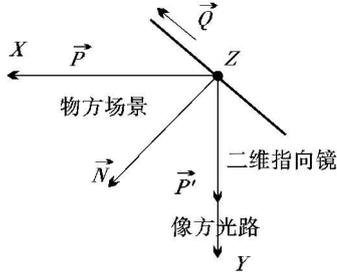


图 1 二维指向镜扫描成像

ZQ 扫描方式构成的是定域扫描方式^[3]. 可应用在已知目标可能出现的范围的成像探测、遥感遥测等领域, 或用于激光定域扫描投射方面. 文中参照文献[2]的分析方法对定域扫描方式进行了详细的研究分析, 为精确控制二维指向镜的扫描轨迹提供了数理基础.

1 光学反射矢量基本理论

如图 2 所示, \vec{N} 代表镜面法线单位矢量, \vec{A} 代

$$S_{P\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta + 2P_x^2 \sin^2(\theta/2) & -P_x \sin\theta + 2P_x P_y \sin^2(\theta/2) & P_y \sin\theta + 2P_x P_z \sin^2(\theta/2) \\ P_x \sin\theta + 2P_x P_y \sin^2(\theta/2) & \cos\theta + 2P_y^2 \sin^2(\theta/2) & -P_x \sin\theta + 2P_y P_z \sin^2(\theta/2) \\ -P_y \sin\theta + 2P_x P_z \sin^2(\theta/2) & P_x \sin\theta + 2P_y P_z \sin^2(\theta/2) & \cos\theta + 2P_z^2 \sin^2(\theta/2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

2 指向镜的成像特性分析

二维指向镜的方位轴、俯仰轴是正交的, 交点位于指向镜镜面的中心. 系统光轴经二维指向镜反射形成视轴. 视轴在物平面上的轨迹可称为扫描轨迹. 驱动方位轴、俯仰轴可改变视轴的二维指向. 讨论的二维指向镜的定域扫描方式如图 3 所示, 指向镜的方位轴(图中 Z 轴)为椭圆型二维指向镜的短轴, 俯仰轴为指向镜的长轴(图中 Q 轴), 光学系统的光轴是图中 Y 轴.

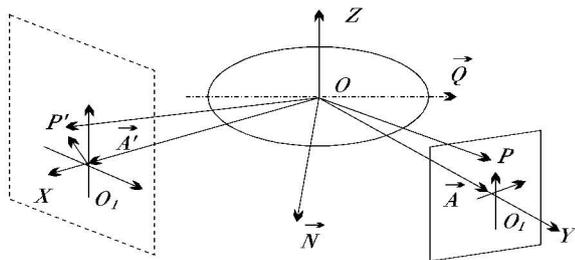


图 3 二维指向镜定域扫描示意图

表入射矢量, \vec{A}' 代表反射矢量. 像矢量 \vec{A}' 用线性变换关系可以表示为: $\vec{A}' = \mathbf{R} \cdot \vec{A}$, \mathbf{R} 为反射矩阵^[4].

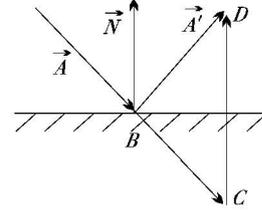


图 2 镜面反射矢量图

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_x N_y & -2N_x N_z \\ -2N_x N_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_y N_z \\ -2N_x N_z & -2N_y N_z & 1 - 2N_z^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

N_x, N_y, N_z 为平面镜法线矢量在所选基准坐标系内的投影. 矢量 \vec{A} 绕转轴单位矢量 \vec{P} 转动一角度 θ 成为矢量 \vec{A}' , 写成矩阵形式 $\vec{A}' = \mathbf{S}_{P\theta} \cdot \vec{A}$, 其中 $\mathbf{S}_{P\theta}$ 代表绕 \vec{P} 转 θ 角的转动矩阵.

根据反射镜的物像共轭原理以及反射镜转动定理, 扫描反射镜转动时像矢量 \vec{A}' 与物矢量 \vec{A} 之间的关系在所选基准坐标系中表示为

$$\vec{A}' = (\mathbf{G}_{10} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{G}_{10}^{-1}) \cdot \vec{A} \quad (3)$$

由前面的推导可知, 指向镜绕 Z 轴旋转 α 角且绕 Q 轴旋转 β 角的转动矩阵或者说坐标转换矩阵为绕方位轴转动 α 角转动矩阵与绕俯仰轴转动 β 角转动矩阵的乘积, 其顺序应为固定轴转动矩阵在先, 运动轴转动矩阵在后. 所以转动矩阵为

$$\mathbf{G}_{10} = \mathbf{S}_{z\alpha} \cdot \mathbf{S}_{Q\beta} \quad (4)$$

在本系统中方位转动轴矢量 $P_z = [0, 0, 1]'$, 俯仰转动轴矢量为 $P_Q = [-\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}, 0]'$. 代入转动矩阵计算式(2)、式(4), 可得

$$\mathbf{S}_{z\alpha} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$S_{Q\beta} = \begin{bmatrix} \cos\beta + \sin^2(\beta/2) & -\sin^2(\beta/2) & -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\beta \\ -\sin^2(\beta/2) & \cos\beta + \sin^2(\beta/2) & -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\beta \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\beta & -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$G_{10} = \begin{bmatrix} \sin\alpha \sin^2(\frac{\beta}{2}) + \cos\alpha (\cos\beta + \sin^2(\frac{\beta}{2})) \\ -\cos\alpha \sin^2(\frac{\beta}{2}) - \sin\alpha (\cos\beta + \sin^2(\frac{\beta}{2})) \\ -\frac{\cos\alpha \sin\beta}{\sqrt{2}} + \frac{\sin\alpha \sin\beta}{\sqrt{2}} \\ -\cos\alpha \sin^2(\frac{\beta}{2}) + \sin\alpha (\cos\beta + \sin^2(\frac{\beta}{2})) \\ -\sin\alpha \sin^2(\frac{\beta}{2}) + \cos\alpha (\cos\beta + \sin^2(\frac{\beta}{2})) \\ -\frac{\cos\alpha \sin\beta}{\sqrt{2}} - \frac{\sin\alpha \sin\beta}{\sqrt{2}} \\ -\frac{\sin\beta}{\sqrt{2}} & -\frac{\sin\beta}{\sqrt{2}} & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

指向镜同时绕 Z 轴, Q 轴旋转时, 在初始位置 ($\alpha=0, \beta=0$) 指向镜法线矢量与光轴夹角为 45° , 法线矢量为 $\vec{N} = \frac{\sqrt{2}}{2}i + \frac{\sqrt{2}}{2}j + 0k$, 由式(1)可计算得指向镜的反射特性矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

设物矢量为单位入射矢量 $\vec{A} = [0, 1, 0]'$. 当指向镜绕 Z 轴转动 α 角, 绕 Q 轴转动 β 角时, 由指向镜反射的单位出射矢量(像矢量)为 \vec{A}' , 像矢量方向即系统视轴方向. 通过式(3)计算可得

$$\vec{A}' = \begin{bmatrix} -\cos 2\alpha \cos^2 \beta \sec 2\beta \\ -\sec 2\beta (\cos^2 \beta \sin 2\alpha + \sin^2 \beta) \\ \frac{(\cos \alpha + \sin \alpha) \tan 2\beta}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

视轴方位角 a 定义为视轴在水平面 XOY 内的投影与 X 轴的夹角, 视轴俯仰角 b 定义为视轴在垂直面 XOZ 内的投影与 X 轴夹角. 则指向镜方位、俯仰摆角 α, β 与扫描视线的方位、俯仰角 a, b 之间的关系为

$$a = \arctan\left(\frac{A'_y}{A'_x}\right) = \arctan(\tan 2\alpha + \sec 2\alpha \tan^2 \beta) \quad (10)$$

$$b = \arctan\left(\frac{A'_z}{A'_x}\right) = -\arctan\left(\frac{\sqrt{2} \tan \beta}{\cos \alpha - \sin \alpha}\right) \quad (11)$$

由此可分析得知:

(1) 当 $\alpha \neq 0, \beta = 0$ 时, 则有 $a = 2\alpha, b = 0$, 指向镜只进行方位扫描, 扫描轨迹为一条水平直线, 并且视线方位角等于指向镜方位转角的二倍, 呈线性关系.

(2) 当 $\alpha \neq 0, \beta \neq 0$ 时, 指向镜的扫描纯粹为非线性特性. 图 4 给出了不同俯仰转角 β 处指向镜在方位方向线性摆动时视轴的扫描轨迹, 图 4 中指向镜绕轴转动范围为: 方位摆动 $\pm 30^\circ$, 俯仰摆动 $\pm 30^\circ$. 从图 4 中可以看出, 俯仰转角 β 不变化时方位转角线性扫描时所得的轨迹均为曲线(除 $\beta = 0^\circ$ 外), $a = -60^\circ$ 视轴俯仰角较小, $b \approx a/2$, 而 $a = 60^\circ$ 视轴俯仰角较大, $b \approx a$.

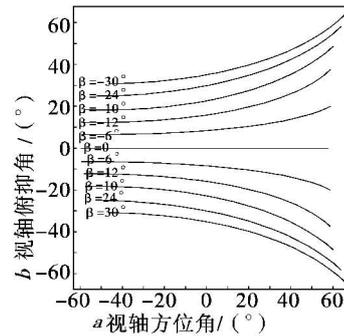


图 4 二维指向镜线性扫描时得到的非线性扫描轨迹

3 二维指向镜非线性扫描的补偿方法

从前面的分析可以看出, 二维指向镜的定域扫描方式为纯非线性扫描, 要得到正常无畸变的图像必须进行非线性校正.

从图 4 看出, 方位线性扫描时得到的视轴俯仰角不是恒定的. 所以首先考虑将视轴的俯仰角 b 在进行方位扫描时校正到一个恒定值. 根据式(11)可以作出当 b 为恒定值时俯仰转角 β 随方位转角 α 的变化关系曲线(如图 5 所示). 另外, 根据式(10)可以求出当 b 为恒定值时方位转角 α 和由 α 和视轴俯仰角 b 确定的俯仰转角 β 确定的视轴方位角 a . 利用 b 和对应求出的 a 的值作出校正视轴俯仰角 b 后方位转角 α 匀速线性转动得到的扫描轨迹图如图 6 所示, 图 6 中实线即为方位转角 α 为特定值时, 俯仰

转角 β 变化扫描得到的扫描轨迹.

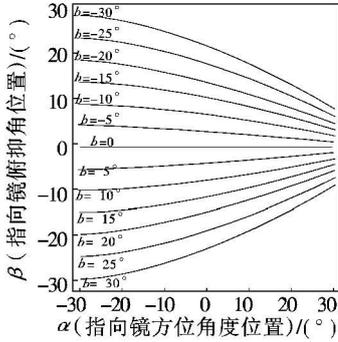


图 5 视轴俯仰角校正时指向镜俯仰转角与方位转角的对应关系曲线

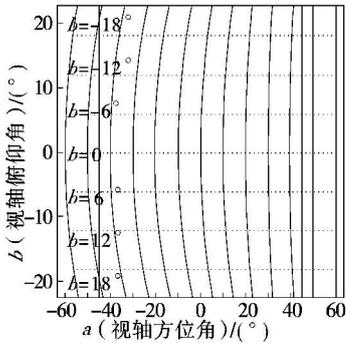


图 6 视轴俯仰角校正后视轴扫描轨迹 (指向镜方位转角仍进行线性扫描)

从图 6 可以看出,虽然校正了视轴俯仰角,使一次方位扫描得到的扫描轨迹为水平直线,但方位方向如果仍然按线性特性进行扫描,还不会得到理想的无畸变图像.因为,光电系统扫描成像时,图像的采集过程是由具有固定频率的采样时钟控制的,其采样周期是恒定的,如果指向镜仍然按照线性特征进行匀速扫描,势必在某些区域(例如 $\alpha = -30^\circ$ 附近)产生扫描畸变,使得在俯仰角 b 等于 0° 和 30° 时视轴方位角 a 相差很多.所以,还必须在方位方向进行非线性扫描校正,使指向镜的方位转角 α 按一定的规律进行非匀速扫描,配合图像采集系统匀速采集而得到无畸变的图像.

例如要得到方位 120° 俯仰 60° 的扫描范围,在校正视轴俯仰角的情况下,指向镜的方位转角 α 与视轴俯仰角 a 的对应关系曲线如图 7 所示.因为 $b=0$ 时 $a=2\alpha$,其对应的是最左上边的一条直线;而 $|b|$ 越来越大时, α 的值也越来越偏离这条直线,并在视场的左边偏离的多,在视场的右边($a > 0$)偏

的少,参照图 1 可以得知,光线入射角越大偏离这条直线越远.

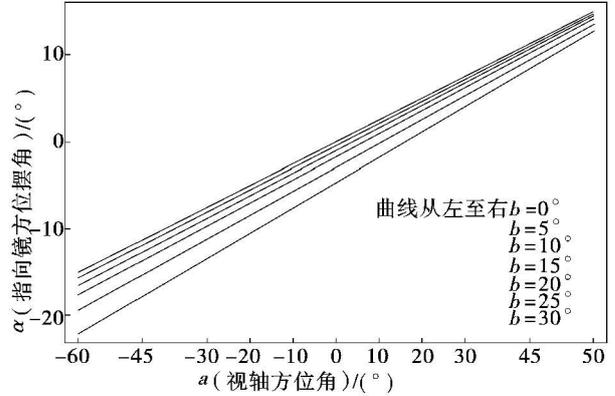


图 7 校正视轴俯仰角后指向镜的方位转角 α 与视轴俯仰角 a 的对应关系曲线

4 像旋角的计算

与二维指向镜的其他扫描方式一样,其定域扫描方式也不例外地存在一定的像旋转.像旋转产生的原因参见文献[2].下面详细分析这种扫描方式产生的像旋转的大小和可能用来消除像旋转的方法.

如图 3 所示, $OXYZ$ 为基准坐标系,系统光轴与 Y 轴重合.物矢量 $\overrightarrow{O_1P}$ 为由探测器像面中心点 O_1 指向像面上中心点之外的点 P 的矢量,其对应的像矢量是 $\overrightarrow{O'_1P'}$.

取 $\overrightarrow{O_1P} = [0, 0, 1]^T$,可算得像矢量 $\overrightarrow{O'_1P'}$ 为

$$\overrightarrow{O'_1P'} = (G_{10} \cdot R \cdot G_{10}^{-1}) \cdot \overrightarrow{O_1P} = \begin{bmatrix} -\frac{(\cos\alpha - \sin\alpha \tan 2\beta)}{\sqrt{2}} \\ -\frac{(\cos\alpha + \sin\alpha \tan 2\beta)}{\sqrt{2}} \\ \sec 2\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

像矢量 $\overrightarrow{O'_1P'}$ 在像面上投影与 Z 轴的夹角 θ 即为像旋角

$$\tan\theta = \frac{\overrightarrow{O'_1P'}_Y}{\overrightarrow{O'_1P'}_Z} = -[\sqrt{2}\sin\beta\cos\beta(\cos\alpha + \sin\alpha)] \quad (13)$$

从式(13)可以看出:

- (1)在 $\alpha \neq 0, \beta = 0$ 处 $\theta = 0$,即方位转轴与光轴正交时,做方位扫描无像旋;
- (2)在 $\alpha \neq 0, \beta \neq 0$ 处,像旋转的大小由式(13)

决定.

将式(13)与式(11)联立,消去参数 β ,并令 b 等于一固定值,可得到校正视轴俯仰角后像旋角 θ 与方位转角 α 的对应关系.当 b 为不同的值时,这种对应关系是不一样的,作出的曲线图如图 8 所示.

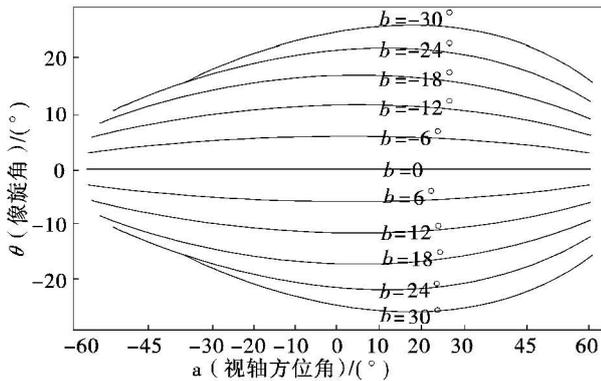


图 8 校正视轴俯仰角后像旋角与方位转角的对应关系曲线

对于单元探测器的系统,像旋并不影响系统功能,但对线列或面阵探测器的目标探测系统,像旋既影响对扫描空间覆盖的均匀性,也影响目标跟踪瞄准时真实离轴信息的获取.对于 45° 扫描镜系统(即 YZ 扫描轴系),像旋角与方位转角之间存在线性关系,可以采用同步旋转探测器方法消像旋,也可以采用转像棱镜(可见光)、或 K 镜(红外及可见光)等光学方法消像旋,但对于这里讨论的二维指向镜定域扫描系统都不太适合,因为像旋角与方位转角之间不存在线性关系,消旋机构的驱动控制显得非常复杂和困难.如果搜索视场不是很大,用图像处理方法消像旋不失为一种较为可行的做法.

因为点目标的检测与像旋角无关,即使存在很大的像旋也可以应用一定的检测算法提取出目标,并且点目标的像旋角可以由式(13)明确解析出来,从而可以精确求得点目标的方位俯仰信息.所以对于点源探测系统,如红外告警系统也可以应用定域扫描方式.

5 结 论

在光学反射矢量理论的基础上,详细分析了二维指向镜的定域扫描方式的非线性扫描特性,给出了指向镜二维扫描的轨迹及像旋角的计算公式,提出了对扫描轨迹进行非线性校正的方法.同时也指出,采用定域扫描方式同样存在像旋,而且像旋角与方位转角之间不存在线性关系,只能靠图像处理的方法进行消旋.因为点目标检测与像旋角无关,而且点源目标的实际方位和俯仰坐标可以通过像旋角计算出来,所以即使不进行消旋,二维指向镜的定域扫描方式也可以应用在与点源探测系统中.

参考文献

- [1] 惠彬,李景镇. 45° 二维扫描镜扫描轴系特性分析[J]. 红外技术,2006:508-511.
- [2] 李淑英,周世椿. 二维指向镜的成像特性分析[J]. 光电工程,2008:17-22.
- [3] 宋丰华. 现代空间光电系统及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004:49.
- [4] 连铜淑. 反射棱镜共轭理论[M]. 北京:北京理工大学出版社,1988:1-3.

(上接第 9 页)

件假设:匀加速运动假设和等高飞行假设,设计了一种仅利用目标方位信息进行轨迹预测的算法,实现了在无测距信息条件下的目标轨迹预测.仿真结果表明预测算法能够精确地预测目标方位角和高低角.在此基础上,设计了高度降低的直线飞行和盘旋飞行 2 种飞行场景以检验算法在假设不能满足情况下的预测性能.仿真结果表明,在这 2 种情况下,预测算法都能较准确地给出预测方位角和高低角,角

度预测误差均在毫弧度以下.

参考文献

- [1] 时成文,杨飞. 光电跟踪伺服参数设计与跟踪算法误差分析[J]. 光电技术应用,2007,22(2):12-14.
- [2] 程翔,张河. 基于纯测角的直升机飞行轨迹与拦截角估计[J]. 火箭与制导学报,2007,27(2):174-176.
- [3] 钟宜兴,高正,褚政. 直升机电载激光指示器发射未制导炮弹射击效能分析[J]. 南京航空航天大学学报,2004,36(4):433-437.