

凝视热像仪搜索系统回扫速率分析

金刚石, 王 斯

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要:凝视热像仪快速回扫技术已经广泛应用在光电搜索系统中。凝视热像仪回摆扫描速率与转台扫描速率的匹配精度关系到热像仪的成像质量, 本文在线性空间建立两轴转台运动模型, 根据坐标变换理论分析了两轴转台在运动时目标相对热像仪的运动情况, 推导了凝视热像仪搜索系统的回扫速率与两轴转台扫描速率的数学公式, 为凝视热像仪快速回扫技术的应用提供了关键的理论基础。

关键词:搜索; 回扫; 摆镜; 转台

中图分类号: TP202 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.05.014

Analysis on flyback rate in staring thermal imager searching system

JIN Gang-shi, WANG Si

(North China Research Institute of Electro - Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The rapid flyback technology of the thermal imager has been widely used in the photoelectric searching system. The matching accuracy between the scanning rate of the thermal imager and the scanning rate of the rotary table is related to the imaging quality of the thermal imager. A two - axis turntable motion model is established in linear space. According to the coordinate transformation theory, the motion of the target relative to thermal imager in the two axis rotating table is analyzed, and a mathematical analytical equation for the scanning rate of the searching system and the scanning rate of the two - axis rotary table is derived, which provides a key theoretical basis for the application of the rapid flyback technology in thermal imager.

Key words: search; flyback; mirror; turntable

1 引 言

搜索系统指的是利用两轴转台的方位和俯仰运动将成像设备的观察范围扩展至 360° 全景或者是整个半球形空域的系统。当成像设备为凝视热像仪时如果不采用任何技术处理则图像会产生运动模糊, 即在热像仪成像积分时间内目标相对热像仪产生了运动。为了抵消转台运动产生的图像模糊, 在像端采用摆镜回扫是一种有效的技术手段, 而回扫速率的正确匹配直接决定了搜索系统的成像质量。

本文分析了两轴转台在运动时目标相对热像仪的运动情况, 为回扫摆镜的设置与控制提供了关键的理论依据。

2 坐标系的建立

为了通过数学手段分析系统中的运动关系, 首先需要建立两轴转台的基座坐标系和负载坐标系。为了分析和描述方便, 转台的框架结构选用最常见的形式, 即外框架为方位轴, 内框架为俯仰轴, 方位轴的定子与大地固联称为转台的基座, 方

作者简介: 金刚石 (1979 -), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事控制器的设计与相关控制理论的研究、视频监控系统的设计与相关应用技术的研究。E-mail: chinajgs@163.com

收稿日期: 2017-09-06; **修订日期:** 2017-11-03

位轴的转子和俯仰轴的定子固联,俯仰轴的转子和成像设备(热像仪)固联称为转台的负载,方位轴一般垂直于水平面,俯仰轴垂直于方位轴,热像仪的光轴垂直于俯仰轴,俯仰角为零时光轴垂直于方位轴,当转台的方位角和俯仰角都为零时,定义光轴所指的方向为前方。

基座坐标系(O_A)的定义如图1所示。基座坐标系与基座固联,观察者面向前方时, X 轴向上,又称为方位轴,绕 X 轴旋转的角度为方位角 α , Y 轴向右,又称为俯仰轴,绕 Y 轴旋转的角度为俯仰角 β , Z 轴向前,又称为横滚轴(和光轴相同),绕 Z 轴旋转的角度为横滚角 γ , α 、 β 、 γ 的正负按照右手定则确定。

当转台的方位角和俯仰角都为零时,负载坐标系(O_B)与基座坐标系(O_A)相同,负载坐标系与负载固联,负载坐标系与基座坐标系的关系为旋转变换关系,变换顺序为:从负载坐标系与基座坐标系重合时开始先绕负载坐标系的 X 轴旋转 α 角,再绕负载坐标系的 Y 轴旋转 β 角。负载坐标系的定义如图1所示(图中的 O_B 还存在横滚角但本文不涉及)。

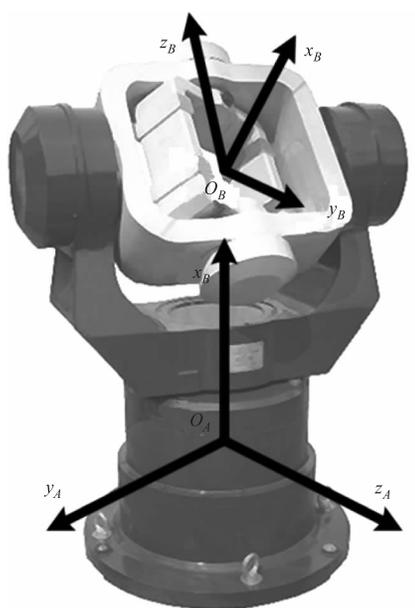


图1 基座坐标系与负载坐标系的建立

Fig. 1 Establishment of base coordinate system and load coordinate system

3 运动学分析

为了确定负载坐标系相对于基座坐标系的关系,定义负载坐标系的三个单位主矢量 x 、 y 、 z 相对

于基座坐标系的方向余弦组成 3×3 矩阵^[1-3]:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

绕 x 轴、 y 轴、 z 轴旋转 ψ 角的旋转矩阵分别为^[4]:

$$R(x, \psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix}$$

$$R(y, \psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi \end{bmatrix}$$

$$R(z, \psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由于坐标系由基座坐标系(O_A)变成负载坐标系(O_B)的旋转过程是相对运动坐标系而言的,所以 O_B 到 O_A 的变换矩阵应该按照“从左向右”的顺序相乘,所以负载坐标系(O_B)相对基座坐标系(O_A)的姿态变换矩阵为:

$$\begin{aligned} {}^A T_B &= R(x, \alpha) R(y, \beta) \\ &= \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ \sin\alpha \sin\beta & \cos\alpha & -\sin\alpha \cos\beta \\ -\cos\alpha \sin\beta & \sin\alpha & \cos\alpha \cos\beta \end{bmatrix} \end{aligned}$$

假设在扫描过程中,方位的角速度为 ω_x ,俯仰的角速度为0,横滚角速度为0,即扫描矢量在基座坐标系(O_A)中表示为:

$$\omega_A = \begin{bmatrix} \omega_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

由于:

$$\omega_A = {}^A T_B \cdot \omega_B, {}^B T_A = {}^A T_B^{-1} = {}^A T_B^T,$$

所以:

$$\begin{aligned} \omega_B &= {}^B T_A \cdot \omega_A = {}^A T_B^{-1} \cdot \omega_A \\ &= {}^A T_B^T \cdot \omega_A = \begin{bmatrix} \omega_x \cdot \cos(\beta) \\ 0 \\ \omega_x \cdot \sin(\beta) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

由此可见,当系统进行方位扫描时,负载的运动是由两个分量构成,一个分量是方位运动,

其值为 $\omega_x \cdot \cos(\beta)$, 另一个分量为横滚运动, 其值为 $\omega_x \cdot \sin(\beta)$ 。

4 图像模糊与回扫

假设热像仪的水平像素数为 W 、垂直像素数为 H 、瞬时视场为 δ 、探测器积分时间为 T , 并且定义积分时间内图像移动的像素数 N 与用户要求图像移动的像素数 N_{\max} 的关系满足 $N \leq N_{\max}$, 则判定为图像清晰, 一般 N_{\max} 取值为 $0.2 \sim 1.0$ 。

由于图像与大地固联, 负载(热像仪) 相对大地转动, 所以图像位移的角速度 ω_C 与负载角速度 ω_B 互为相反数, 即图像运动的角速度 $\omega_C = -\omega_B$, 也就是说对于水平周扫系统, 图像相对热像仪的移动速度为(这也是增加回扫机构后需要抵消掉的角速率):

$$\begin{cases} \omega_{Cx} = -\omega_x \cdot \cos(\beta) & (\text{方位}) \\ \omega_{Cy} = 0 & (\text{俯仰}) \\ \omega_{Cz} = -\omega_x \cdot \sin(\beta) & (\text{横滚}) \end{cases}$$

方位运动造成图像模糊比较简单, 积分时间内移动的像素数为:

$$N_x = |\omega_{Cx} \cdot T / \delta| = |\omega_x \cdot \cos(\beta)| \cdot \frac{T}{\delta}$$

横滚造成的图像模糊以图像顶角最为严重, 设图像顶角到图像中心的像素数为 R_{\max} , 则 $R_{\max} = \sqrt{(0.5W)^2 + (0.5H)^2} = 0.5\sqrt{W^2 + H^2}$ 。积分时间内图像的位移量为:

$$N_z = |\omega_{Cz} \cdot R_{\max} \cdot T| = |\omega_x \cdot \sin(\beta)| \cdot R_{\max} \cdot T$$

当不需要保证整个屏幕都是清晰图像时, 清晰范围 R_{\max} 可以自行定义为 R , 也就是说, 对于水平周扫系统, 在积分时间内图像相对热像仪移动的像素数为:

$$\begin{cases} N_x = |\omega_x \cdot \cos(\beta)| \cdot \frac{T}{\delta} & (\text{方位}, \delta \text{ 为瞬时视场}) \\ N_x = 0 & (\text{俯仰}) \\ N_z = |\omega_x \cdot \sin(\beta)| \cdot R \cdot T & (\text{横滚}, R \text{ 为清晰范围}) \end{cases}$$

当上述某一分量无法满足清晰度要求时, 就必须配置回扫机构, 回扫机构要按照图像相对热像仪的移动速率抵消相应分量。

没有任何回扫机构时, 图像清晰条件为:

$$N \leq N_x + N_z \leq N_{\max}$$

$$|\omega_{Cx} \cdot T / \delta| + |\omega_{Cz} \cdot R \cdot T| \leq N_{\max}$$

$$|\omega_x \cdot \cos(\beta)| \cdot \frac{T}{\delta} + |\omega_x \cdot \sin(\beta)| \cdot R \cdot T \leq N_{\max}$$

5 实例分析

为了进一步分析实际问题, 假设 $\omega_x = 2\pi$, 即每秒钟扫描一圈, $W = 640, H = 180$, 即:

$$R_{\max} = 0.5\sqrt{W^2 + H^2} = 400,$$

$$\delta = 0.1 \text{ mrad} = 0.0001 \text{ rad},$$

$$T = 0.5 \text{ ms} = 0.0005 \text{ s}, N_{\max} = 0.5。$$

则此时图像清晰条件为:

$$\begin{aligned} N_x + N_z &= |\omega_x \cdot \cos(\beta)| \cdot \frac{T}{\delta} + |\omega_x \cdot \sin(\beta)| \cdot R_{\max} \cdot T \\ &= 10\pi |\cos(\beta)| + 0.4\pi |\sin(\beta)| \leq 0.5 \end{aligned}$$

在低空条件下, 俯仰角 β 较小, $\cos(\beta)$ 接近 1, 所以热像仪方位轴方向上必须设置回扫机构以抵消图像相对热像仪的运动, 使图像运动的 ω_{Cx} 分量消失, 要使图像清晰此时仍需满足:

$$N_z = 0.4\pi |\sin(\beta)| \leq 0.5$$

$$|\beta| \leq \arcsin\left(\frac{5}{4\pi}\right) \approx 0.4092 \text{ rad} \approx 23.446^\circ$$

不满足 $|\beta| \leq 23^\circ$ 时, 随着俯仰角绝对值的增大, 图像边缘模糊区域将会逐渐增大, 由于在热像仪横滚轴方向上设置回扫机构是比较困难的, 所以如果将图像清晰区域缩小为 $R = 0.5R_{\max}$ 的范围, 则图像清晰条件将变更为:

$$\begin{aligned} N_z &= |\omega_x \cdot \sin(\beta)| \cdot 0.5R_{\max} \cdot T \\ &= 0.2\pi |\sin(\beta)| \leq 0.5 \end{aligned}$$

$$|\beta| \leq \arcsin\left(\frac{5}{2\pi}\right) \approx 0.92 \text{ rad} \approx 52.7^\circ$$

此时俯仰角的工作区域已经覆盖 $\pm 50^\circ$ 范围, 可以满足大多数情况下的应用。

应用实例小结: 在转台 $\omega_x = 360^\circ/\text{s}$ 的水平扫描速度下, 640×480 的凝视热像仪在瞬时视场角为 0.1 mrad 、积分时间为 0.5 ms 的情况下, 如果保证外接圆中心一半区域图像清楚的话, 必需设置方位回扫机构抵消 $\omega_x \cdot \cos(\beta)$ 的图像移动速率, 其中 β 为转台的俯仰角, 此时避免设置横滚回扫机构的俯仰角工作范围约为 $\pm 50^\circ$ 。

6 总结

本文通过运动学分析阐述了凝视热像仪搜索系统图像模糊的机理, 给出了图像相对热像仪

的移动速度与转台水平扫描速度的数学关系,该数学关系正是设置回扫机构后需要抵消的速率。同时本文还进一步分析了回扫机构欠缺时图像清晰的条件,该条件决定了系统设计中是否设置回扫机构或者设置哪些回扫机构。本文只分析了水平扫描情况下的各种数学解析关系,水平和垂直二维联合扫描系统的数学解析关系可以参照本文方法扩展和推导。本文的成果已经应用于多个具有搜索告警功能的光电系统,其清晰的360°全景成像效果充分验证了本文所推导的理论依据的正确性。

参考文献:

- [1] XIONG Youlun, DING Han, LIU Encang. Robotics [M]. Beijing: China Machine Press, 1993. (in Chinese)
- [2] ZHOU Yuanqing, ZHANG Zaixing, XU Wanyong. Intelligent robot system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989. (in Chinese)
- 周远清, 张再兴, 许万雍. 智能机器人系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- [3] CAI Zixing. Fundamentals of robotics [M]. 2nd edition. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)
- 蔡自兴. 机器人学基础 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [4] MENG Qingxin, WANG Xiaodong. Fundamentals of robot technology [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- 孟庆鑫, 王晓东. 机器人技术基础 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.