

doi: 10.7690/bgzdh.2013.04.022

一种光电转塔精确跟踪算法

丁涛

(洛阳电光设备研究所光电系统部, 河南 洛阳 471009)

摘要: 针对常规跟踪解算方法难以满足俯仰角大范围观测跟踪性能要求的问题, 提出一种可应用于俯仰角大角度时的精确跟踪算法。分析光电转塔目标跟踪的常规跟踪算法原理, 根据图像坐标转换关系以及矢量等效旋转, 推导高精度跟踪指令, 对目标偏离量做执行轴投影, 再把第三维跟踪运动分解为另外两维等效运动, 最终使跟踪运动指令精确执行, 并采用仿真定量分析 2 种跟踪算法的跟踪指令精度。仿真结果表明: 该算法能有效解决俯仰过顶跟踪错误问题, 并提高跟踪精度。

关键词: 常规跟踪算法; 精确跟踪算法; 等效旋转; 过顶跟踪; 仿真

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

A Precise Tracking Algorithm of Photoelectric Turret System

Ding Tao

(Photoelectric Systems Department, Institute of Electro-Optical Equipment in Luoyang, Luoyang 471009, China)

Abstract: Aiming at conventional tracking algorithm can not meet the requirement of large area observation and tracking performance of pitching angle, put forwards a precise tracking algorithm apply to pitching large-angle. Analyze conventional tracking algorithm principle of photoelectric turret target tracking. According to image coordinates transformation relation and vector equivalent rotation, deduce high precision tracking index and carry out execution axis projection target offset. Then, decompose the third dimension tracking motion into other second dimension equivalent motion. At last, precisely carry out tracking motion index, and use simulation quantitative to analyze tracking index precision of 2 tracking method. The simulation results show that the algorithm can effectively solve pitching head tracking error and improve tracking precision.

Key words: conventional tracking algorithm; precise tracking algorithm; equivalent rotation; head tracking; simulation

0 引言

随着各种类型飞机越来越多地使用机载光电转塔观瞄平台, 各种扩展使用要求被提出^[1]。其中, 俯仰角大角度观测就是最常见的一种, 为此有必要对俯仰角大角度(以及过顶)观测时的跟踪性能进行研究。

通常, 光电转塔探测系统俯仰角使用范围为 $-30^{\circ} \sim +60^{\circ}$, 常规跟踪解算方法利用图像机输出目标偏离量为跟踪指令, 经 PID 算法修正后控制相应轴系完成目标跟踪^[2]。但由于二轴稳定平台中第三维自由度的缺失, 常规跟踪解算方法的跟踪性能将随俯仰角增大而下降, 过顶时尤为显著, 难以满足俯仰角大范围观测的跟踪性能要求; 因此, 笔者提出一种可应用于俯仰角大角度时的精确跟踪算法, 不仅解决了过顶目标跟踪丢失问题, 还提高了整个观测过程的跟踪性能, 具有简单易用, 通用性强的特点。

1 高精度目标跟踪算法推导

笔者借助二环二轴光电转塔进行算法推导, 推导结果同样适用于四环二轴系统。二环二轴光电系统结

构示意如图 1 所示。

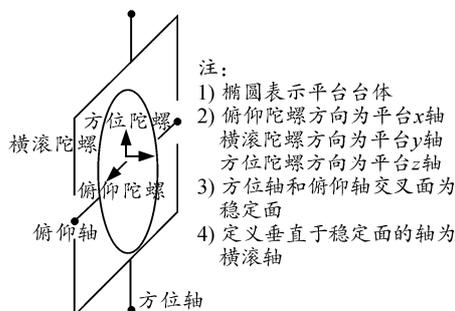


图 1 二环二轴光电转塔结构示意图

1.1 坐标系定义

基座坐标系: 基座固联于载机, 与载机有个固定安装偏角, 转塔的方位旋转轴就是基座坐标系的 z 轴, 转塔前向即为基座坐标系的 y 轴。

外环坐标系: 基座坐标系绕转塔方位轴正向旋转方位角 ψ , 得到的坐标系即为外环坐标系。

平台坐标系^[3]: 外环坐标系绕俯仰轴正向旋转俯仰角 θ , 得到的坐标系即为平台坐标系(也是内环坐标系)。

收稿日期: 2012-10-20; 修回日期: 2012-11-04

作者简介: 丁涛(1981—), 男, 河南人, 回族, 硕士, 工程师, 从事惯性设备伺服控制系统、数据处理系统研究。

执行轴坐标系：对于二轴转塔来说，其执行轴为方位电机旋转轴与俯仰电机旋转轴，这就构成了执行轴坐标系。显而易见，二轴转塔的执行轴坐标系与外环坐标系重合。

笔者不考虑轴系不正交误差以及轴系安装偏差。

1.2 算法推导

常规跟踪算法直接将图像的两跟踪量作为方位跟踪指令和俯仰跟踪指令驱动电机完成跟踪^[4]。但因坐标系差别及运动解析不到位将导致跟踪指令解算出现偏差，甚至过顶时跟踪错误。笔者针对跟踪量坐标关系及光轴等效运动，经推导出精确跟踪指令。

1.2.1 图像偏差的分解

图像机输出的目标跟踪偏差是平台坐标系下目标的 x 轴旋转量和 z 轴旋转量，显然，对于目标跟踪系统，必须将跟踪信息投影到执行轴坐标系中才能最终转化为跟踪指令。

将目标跟踪偏差投影转化为外环系(执行轴系)下 3 个维度的旋转量。设图像偏差量为矢量 $r^{内}=[\theta_x, 0, \theta_z]^T$ ，坐标转换矩阵为 $C^{外内}$ ，可得图像偏差量在外环坐标系的投影为

$$r^{外} = C^{外内} r^{内} = \begin{bmatrix} \theta_x \\ -\theta_z \sin \theta \\ \theta_z \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_t \\ \gamma_t \\ \psi_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.2.2 执行轴运动分析

目标跟踪时应将控制量分解到执行系，才能够使反馈控制正常进行。由于外环系就是执行系；因此，目标的俯仰旋转分量 θ_t 及方位旋转分量 ψ_t 均可直接反馈控制电机进行处理。

而目标的横滚分量 γ_t ，二轴转塔没有相应的横滚自由转动轴，无法由绕横滚轴方向旋转直接完成跟踪；因此，笔者根据矢量旋转的等效转动理论，利用转塔方位与俯仰方向 2 次旋转将转塔瞄准线轴(内平台 y 轴)转到相应的目标位置，如图 2 所示。

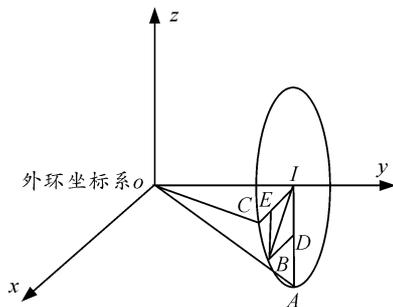


图 2 目标的横滚分运动等效分析

具体可推得，完成目标横滚方向运动跟踪的 2 个等效旋转角分别为：

等效方位旋转角

$$\psi_\gamma = -\arctg(\tg \theta \cdot \sin \gamma_t) \quad (2)$$

等效俯仰旋转角

$$\theta_\gamma = \arctg(\tg \theta \cdot \frac{1 - \cos \gamma_t}{1 + \tg^2 \theta \cdot \cos \gamma_t}) \quad (3)$$

将上述 2 个等效旋转角分别与对应的跟踪旋转分量叠加即为最终跟踪信号，即方位方向跟踪信号为 $\psi_t + \psi_\gamma$ 、俯仰方向跟踪信号为 $\theta_t + \theta_\gamma$ 。具体控制流程图如图 3 所示。

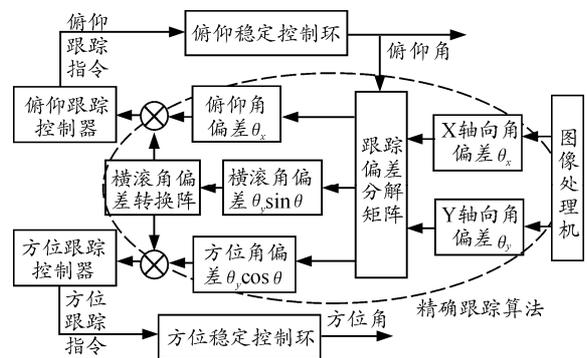


图 3 精确跟踪控制原理

2 仿真

2.1 仿真方案

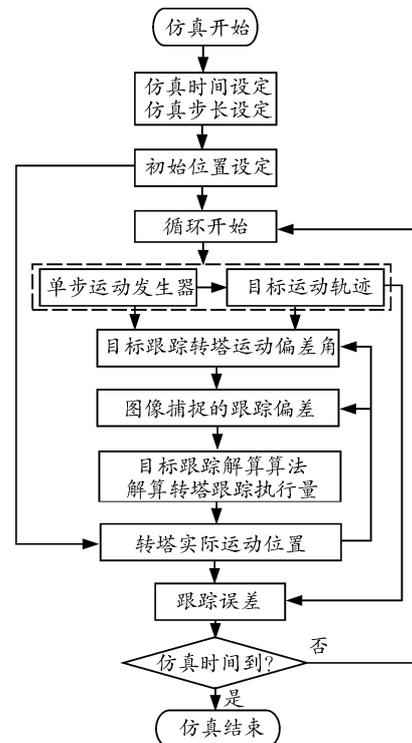


图 4 仿真流程

本仿真方案不考虑控制机构及图像畸变带来的误差，仅考虑因跟踪指令解算带来的误差及错误影响。仿真的核心内容是观察因跟踪解算算法的不同而带来的跟踪误差，因此文中主要做常规算法与精确解算算法在同一目标运动状态下的跟踪仿真。仿真流程如图 4 所示。

2.2 仿真条件

本仿真目标运动轨迹以转塔视角发生，目标方位运动于基座坐标系。

从基座坐标系方位 0° 起始，按照每 $\Delta T = 0.002\text{ s}$ 时间运动 $\Delta\psi = (15 \pm 1) \times 0.0003^\circ$ ，运动 20 s；目标俯仰运动基于外环坐标系，从外环坐标系俯仰 90.5° 起始，按照每 $\Delta T = 0.002\text{ s}$ 时间运动 $\Delta\theta = (-2 \pm 1) \times 0.0003^\circ$ ，运动 20 s，其运动与方位运动同步。本系统为离散系统仿真，仿真步长 2 ms。

光轴与目标之间的偏差应该是：上时刻光轴随动残差叠加上本时刻目标单步运动。而图像机捕捉到的显然与转塔目标运动有坐标转换关系。设转塔目标单步运动为 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\psi$ ，图像目标偏差推导如下：

$$C_{\text{外}}^{\text{内}} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\text{外}} = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\text{内}}$$

$$C_{\text{外}}^{\text{内}} C_{\text{基}}^{\text{外}} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta\psi \end{bmatrix}^{\text{基}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta\psi \sin\theta \\ \Delta\psi \cos\theta \end{bmatrix}^{\text{内}}$$

图像机捕捉到的图像单步偏差量 x 轴向转角 $\Delta\theta$ ； z 轴方向转角 $\Delta\psi \cos\theta$ 。

2.3 仿真曲线

常规跟踪算法的仿真曲线如图 5。

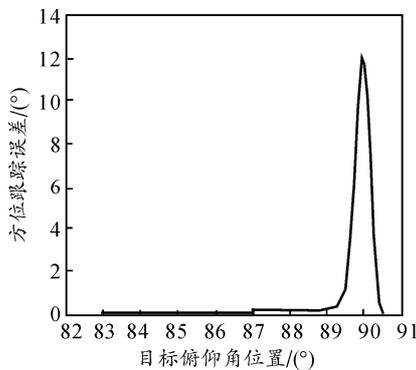


图 5 常规跟踪算法方位跟踪误差曲线

精确跟踪算法仿真的仿真曲线如图 6。

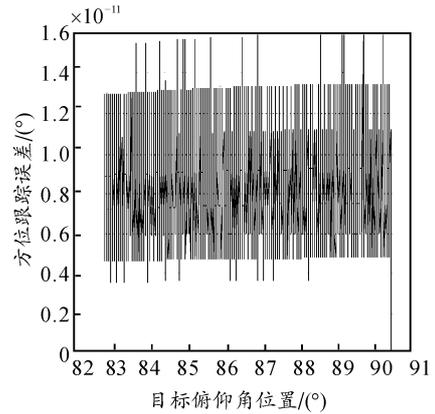


图 6 精确跟踪算法方位跟踪误差曲线

2.4 仿真结果分析

通过仿真结果可以看出，精确跟踪算法的方位跟踪误差在俯仰角任意角度都不超过 $(2 \times 10^{-11})^\circ$ 。而常规跟踪算法方位跟踪误差在俯仰角大于 70° 时达到 0.02°，并且在接近 90° 时激增，超过 90° 时产生错误。

3 结论

仿真结果证明，光电转塔精确跟踪算法能有效解决二环二轴平台过顶时的方位跟踪指令解算错误。另外，运用该精确跟踪算法，还可以大大提高非过顶区域的跟踪指令精度，实现严格的跟踪指令对应，可有效提高跟踪性能。文中所述的光电转塔精确跟踪算法在四环二轴光电系统中具有通用性，进行目标跟踪时也具有相同的效果。

参考文献：

- [1] 王连明. 机载光电平台的稳定与跟踪伺服控制技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002: 1-81.
- [2] 黄一, 吕俊芳. 机载光电跟瞄平台稳定与跟踪控制方法研究[J]. 飞机设计, 2003(3): 38-42.
- [3] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 95-202.
- [4] Michael K. Masten. Inertially Stabilized Platforms for Optical Imaging Systems[J]. IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE, 2008: 47-64.
- [5] 郭鑫, 周丰. 角探测序列机动检测在目标跟踪中的应用[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(8): 128.