

基于倾角传感器的二自由度云台指向方法分析

吴昊, 高世杰, 伞晓刚, 刘永凯

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 130033)

摘要: 阐述倾角传感器对于轻量化小型云台的设计有很大的价值。针对在倾斜安装面上二自由度云台的姿态定向问题, 提出了一种使用倾角传感器作为测量装置的云台指向方法。该方法利用倾角测量结果和外部靶标作为输入量, 通过反演计算获得安装平面的姿态参数, 进行姿态补偿, 从而实现云台的准确定向。仿真分析对指向方法进行了验证。

关键词: 倾角传感器, 指向机构, 云台, 指向方法设计。

中图分类号: TP212, TP273

文章编号: 1000-0755(2023)03-0019-03

文献引用格式: 吴昊, 高世杰, 伞晓刚, 刘永凯. 基于倾角传感器的二自由度云台指向方法分析[J]. 电子技术, 2023, 52(03): 19-21.

Analysis of Two Degree of Freedom Pan Tilt Pointing Method Based on Inclination Sensor

WU Hao, GAO Shijie, SAN Xiaogang, LIU Yongkai

(Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Jilin 130033, China.)

Abstract — This paper expounds that the inclination sensor has great value for the design of lightweight and small PTZ. Aiming at the attitude orientation problem of a two degree of freedom PTZ on an inclined mounting surface, a PTZ pointing method using an inclination sensor as a measuring device is proposed. This method uses the inclination measurement results and external targets as input, obtains the attitude parameters of the installation plane through inverse calculation, and performs attitude compensation to achieve accurate orientation of the PTZ. Simulation analysis verifies the pointing method.

Index Terms — inclination sensor, pointing mechanism, pan-tilt, pointing method design.

0 引言

二自由度云台是一种轻量化指向机构, 具有轻量化、集成化、结构简单、易于批量制造等优点。在实际应用场景中, 二自由度云台多起到承载设备、稳定轴向、姿态补偿等作用, 在安防、机器人、摄影摄像、通信等诸多领域均有广泛应用。上述应用场景中对云台的指向精度通常有着较高的要求。云台自身的特点决定了其需要具备快速部署能力, 实际的安装、调平、摆放方式具有多样性。因此, 需要一种具有通用性和准确性的指向方法。

1 研究背景

近年来, 以MEMS技术为基础的小型惯性元件被广泛应用于医疗、交通、运动追踪、消费电子、国防工业等领域。当前, 在各类指向机构的设计与应用中, 大量使用以惯性测量单元IMU为代表的惯性元件。这些元件能够快速给出测量结果, 通过一定的计算过程应用于姿态测量和补偿, 减少了

不必要的重复工作。对于复杂多变的使用场景尤其是外场应用环境, 惯性元件有着巨大的优势。对于二自由度云台, 考虑成本问题和系统可靠性, 可以使用倾角传感器作为测量手段, 以实现云台的高精度指向。基于上述问题, 本文设计了一种基于倾角传感器的二自由度云台指向方法。使用两轴倾角传感器作为测量元件, 快速测算二自由度云台的当前姿态, 然后通过姿态修正和补偿, 使得云台能够克服安装平面的倾斜, 直接对大地坐标系下的任意方向定向。通过数值仿真和实物测量等手段, 保证了指向方法的准确性。所提方法完成了系统搭建与验证, 相关成果可以根据实际需求进一步开发, 为在大地坐标系下工作的各类高精度指向端机的设计提供了技术手段。

2 云台简化模型

二自由度云台具备方位和俯仰两个转动角度上的自由度。云台的方位轴系固联安装在平台上, 其

作者简介: 吴昊, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 硕士, 研究方向: 激光通信、PAT子系统、电子学设计。

收稿日期: 2022-06-16; 修回日期: 2023-03-12。

设备承载面则与俯仰轴系固联。通过方位、俯仰轴的任意转动，实现设备视轴的指向。本文采用将倾角传感器固联在方位轴系上的布局方案。这种方案具备易于机械装调、避免俯仰轴系误差、不需要确定方位轴系零点等优点。云台的简化结构如图1。

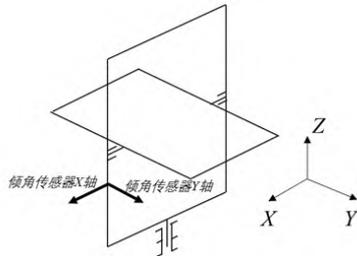


图1 二自由度云台简化结构

2.1 云台俯仰、方位转角

理想状态下二自由度云台指向简化模型如图2所示。以云台的俯仰、方位角全部归零时为云台的初始状态，建立云台零点坐标系，其x、y、z轴分别对应云台归零时的俯仰轴、指向轴和方位轴。云台瞬时指向轴对应的方位、俯仰轴系各自相对于初始状态的实际转角为云台的方位角和俯仰角。

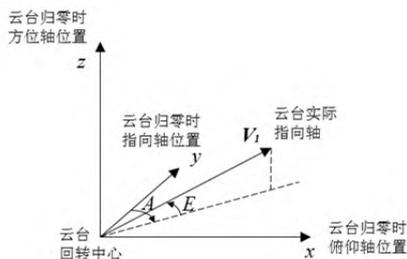


图2 理想状态下二自由度云台指向角度简化模型

记云台视轴指向某一目标时的方向矢量为 V_i ，在云台零点坐标系中的分量列阵为 $[x_i \ y_i \ z_i]^T$ ；目标相对于原点的方位、俯仰角为 $[A \ E]$ ；则存在对应关系如式(1)。

$$\begin{cases} x_i = \cos E \sin A \\ y_i = \cos E \cos A \\ z_i = \sin E \end{cases} \quad (1)$$

2.2 云台安装面参数化表征

在理想条件下，云台零点坐标系与当地（北东天）坐标系相重合。此时在大地坐标系给定的任意目标 $[x_t \ y_t \ z_t]^T$ 均直接可换算为云台方位、俯仰角 $[A_t \ E_t]$ ，从而实现对目标的定向。

在实际应用场景中，云台零点坐标系与当地坐标系之间存在着角度偏差。造成偏差的因素有两点，即：（1）云台安装平面相对于大地的安装倾角；（2）云台方位轴零位与安装平台零位方向之间的夹角。

相关姿态角度的定义如图3所示。三个姿态角的含义分别如下：（1） α 表征安装平面+Z方向相对于大地铅垂轴的综合偏离角度，取值范围为 $0 \sim 90^\circ$ ；（2） β 表征安装平面+Z轴的偏离方向，

数值上等于+Z轴在大地水平面的投影与当地坐标系+x轴（正东方向）的夹角，取值范围为 $0 \sim 360^\circ$ ；

（3） γ 表征处于初始状态的云台在安装平面内的旋转，等于云台归零坐标系+x轴与安装平面+x轴之间的角度差值，取值范围为 $0 \sim 360^\circ$ 。

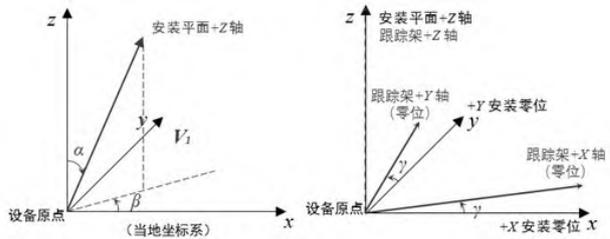


图3 二自由度云台与当地坐标系间姿态角示意图

云台的全部倾斜安装状态可以唯一确定地通过一组 $[\alpha \ \beta \ \gamma]$ 描述。

3 安装平台倾角反演计算

3.1 坐标变换

设坐标系1 ($0x_1y_1z_1$)、坐标系2 ($0x_2y_2z_2$) 均为笛卡尔坐标系。

假定矢量V在坐标系1、坐标系2中的分量列阵分别为 $[x_1 \ y_1 \ z_1]^T$ 、 $[x_2 \ y_2 \ z_2]^T$ ，则存在一个矩阵，使得对任意矢量V，均有式(2)。

$$[x_1 \ y_1 \ z_1]^T = T_{21} \times [x_2 \ y_2 \ z_2]^T \quad (2)$$

记 T_{21} 为坐标系2向坐标系1的坐标变换矩阵。

任意坐标变换均可视为一系列绕坐标轴旋转运动的集合，因此，写出最基本的三个绕转变换矩阵如式(3)。

$$T_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, T_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & \cos \alpha & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}, T_x = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

从大地起至云台方位轴止，在云台上可以建立五个坐标系。它们之间存在着一定的转换关系。云台的坐标变换过程如图4所示。在这一转换过程中，未知量为安装倾角 α 、 β 和零位偏离角 γ ；将这几个角求出，即可实现五个坐标系之间的任意转换。

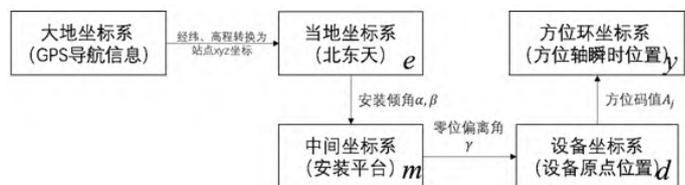


图4 坐标变换过程

3.2 参数 α 和 γ 的计算

由测角原理，某一轴向上的测角结果为被测轴同当地水平面之间的夹角。记被测轴的单位方向矢量为 $[x_q \ y_q \ z_q]$ （本地坐标系下），则测角结果 $\eta = \arcsin z_q$ 。建立俯仰横滚测角读数 $[\Phi_i \ \psi_i]$ 、方位编码器读数A与偏差角之间的方程如式(4)。

$$\begin{cases} [x_j & y_j & z_j]^T = T_{je} \times [1 & 0 & 0]^T \\ [x_i & y_i & z_i]^T = T_{ie} \times [0 & 1 & 0]^T \end{cases} \quad (4)$$

展开得式 (5)。

$$\begin{cases} \sin \phi_j = -\sin \alpha \cos(\gamma - A_j) \\ \sin \psi_j = \sin \alpha \sin(\gamma - A_j) \end{cases} \quad (5)$$

式中, α 、 γ 为未知量, 其余为已知量。

现在讨论三角函数的多解性。根据 α 、 β 、 γ 的实际物理意义, 不难得出 $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$, $0 \leq \beta < 360^\circ$, $0 \leq \gamma - A_j < 360^\circ$ 。可见 $\sin \alpha$ 在定义域内为单调函数, 对应 α 的值是唯一的。

再考虑 $(-A_j + \gamma)$ 角。其实际取值可由 $\cos(-A_j + \gamma)$ 和 $\sin(-A_j + \gamma)$ 共同决定。这样, 最少只需要 1 组测量值即可进行求解。

3.3 参数 β 的计算

在本地坐标系下, 由 GPS 导航信息可计算出方向矢量在本地坐标系下的分量 $V_{1e} = [x_{1e} \ y_{1e} \ z_{1e}]^T$ 。由坐标变换关系如式 (6)。

$$V_{1d} = T_{ed} \times V_{1e} = T_{md} \times T_{em} \times V_{1e} \quad (6)$$

解得式 (7)。

$$\begin{cases} x_e \cos \beta + y_e \sin \beta = x_d \cos \alpha \cos \gamma - y_d \cos \alpha \sin \gamma + z_d \sin \alpha \\ -x_e \sin \beta + y_e \cos \beta = x_d \sin \gamma + y_d \cos \gamma \\ z_e = -x_d \sin \alpha \cos \gamma + y_d \sin \alpha \sin \gamma + z_d \cos \alpha \end{cases} \quad (7)$$

由式 (7), 即可对 β 进行求解。

4 云台指向方法

4.1 指向方法的确定

由上述计算过程可建立如下的云台指向方法。

对于倾斜安装的二自由度云台, 其安装偏差角未知时, 按下述方法实施指向误差修正: (1) 使云台方位轴转动, 在其转动路径上选取 1~3 个不同的方位角位置, 记录方位、俯仰编码器读数 $[A_i \ E_i]$ 和俯仰、横滚轴测角读数 $[\Phi_i \ \Psi_i]$ 。(2) 使云台指向靶标, 测量原点与靶标的 GPS 坐标和高程 $[Lon_0 \ Lat_0 \ H_0]$ 和 $[Lon_1 \ Lat_1 \ H_1]$, 由 GPS 坐标和高程, 换算靶标在当地坐标系分量列阵 $[x_{1e} \ y_{1e} \ z_{1e}]^T$ 。(3) 依据前两步所测得的数据, 使用式 (5)、式 (7) 式求解 $[\alpha \ \beta \ \gamma]$, 完成安装偏差角度的计算。(4) 对于新给定的目标 2, 首先将其 GPS 坐标和高程 $[Lon_2 \ Lat_2 \ H_2]$ 换算为当地坐标系下的分量列阵 V_{2e} , 经由转换矩阵 $T_{e \rightarrow d}$ 变换为分量列阵 V_{2d} , 而后通过式 (1) 的转换关系, 变为方位、俯仰引导码值 $[A_2 \ E_2]$; 对云台实施控制, 完成对新目标点的指向。

4.2 仿真分析

在机械软件 UG 中, 建立一个仿真云台三维模型, 如图 5 所示。UG 软件本身带有运动仿真功能。将云台模型安放在两个角调整台模型上, 可通过模拟调整台的角旋转来模拟云台安装基座的不同倾斜状态。这样, 就可以使用 UG 的测量数据作为对照组, 对指向算法的数据进行验证。

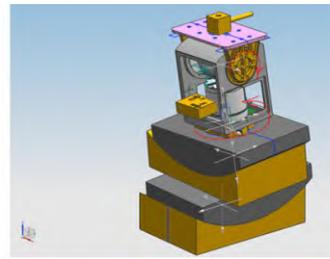


图5 仿真云台三维模型

将指向算法移植进 Matlab 软件中。向 Matlab 和 UG 施加相同的输入条件。MATLAB 根据算法计算指向结果, 而 UG 通过三维模型模拟实际转角。将二者的仿真结果进行对比分析, 即可对本文指向算法的准确性做出验证。

表 1 给出了某种典型工况下两个软件的分析结果。仿真结果表明, 算法自身造成的指向误差不超过 1 角秒。因此, 本文所述的云台指向方法得到了验证。

表1 两种软件仿真数据对比结果

序号	Matlab 方位引导值/°	Matlab 俯仰引导值/°	UG 方位引导值/°	UG 俯仰引导值/°	俯仰指向误差/°	方位指向误差/°
1	24.6401	-6.6338	24.6401	-6.6338	0.0000	0.0000
2	-65.0778	2.4241	-65.0778	2.4241	0.0000	0.0000
3	62.6284	22.2821	62.6284	22.2821	0.0000	0.0000
4	-71.0886	-71.0886	-71.0886	-71.0886	0.0000	0.0000
5	26.2047	26.2048	26.2047	26.2048	0.0000	0.0000
6	129.9487	-27.2125	129.9487	-27.2125	0.0000	0.0000
7	24.6401	-6.8068	24.6401	-6.8068	0.0000	0.0000
8	-45.2176	-0.1596	-45.2176	-0.1595	0.0000	-0.0001
9	-62.6284	22.1091	-62.6284	22.1091	0.0000	0.0000
10	39.5661	-22.2104	39.5661	-22.2103	0.0000	-0.0001

5 结语

本文建立了一种基于倾角传感器的云台指向方法。通过将 MEMS 惯性测量器件引入二自由度云台, 实现了对倾斜平台安装云台视轴的精确定向。本文所述的方法对小型云台的研制开发有一定的参考价值, 既可以作为实际云台产品的姿态控制策略, 可以作为其他惯性器件例如陀螺仪、加速度计等在云台上应用的基础。

参考文献

- [1] 关赵琦. 两轴云台控制系统设计与研究[D]. 陕西: 西安理工大学, 2019.
- [2] 赵炯, 谢正东, 周奇才, 熊肖磊. 二自由度云台控制系统设计及控制方法的研究[J]. 机械工程与自动化, 2020(06): 21-24.
- [3] 张建仓, 杨哲辉, 孙启富. 基于二自由度云台的目标跟踪系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(09): 2579-2581.
- [4] 刘家伦. 无人机伺服云台控制方法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(09): 176-183.
- [5] 田杰, 郝小鹏, 陈剑, 余鹏, 崔向宇. 三轴视频跟踪激光云台控制系统的设计[J]. 电子设计工程, 2020, 28(23): 188-193.