

## 三轴稳定航测正射云台设计与实现

袁红卫, 闵志方, 张建民

(华中光电技术研究所—武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 设计了一种用于航空摄影测量的三轴稳定正射云台。该云台搭载高清数码相机、微型电视等传感器,采用角速率闭环和惯性指向位置闭环的控制方式实现惯性稳定下的正射观察与拍照。与传统方位环安装陀螺,并依赖机载惯性导航信息不同,该云台采用独立的微机电GPS组合导航系统实现运动扰动隔离及正射指向。推导了组合导航系统安装于外壳实现稳定所需的角速度、角速度稳定补偿方程,详细描述了控制管理模块、图像处理单元、测角模块、稳定伺服模块等控制组件的设计原理、方法以及模型。测试结果表明稳定后的传感器光轴能够垂直于地水平面,正射误差能够控制在 $3^\circ$ 以内,保证航向重叠率和旁向重叠率,防止出现航空摄影漏洞。

**关键词:** 航空摄影测量; 三轴稳定; 陀螺稳定; 正射云台

**中图分类号:** V271.3<sup>+2</sup>      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2013)06-0096-04

## Design and Realization of a Three-Axis Stabilized Orthographic Platform for Aerial Survey

YUAN Hongwei, MIN Zhifang, ZHANG Jianmin

(Huazhong Institute of Electro-Optics—Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A three-axis stabilized orthographic barrel was designed for aerial survey. This barrel carried a high-definition (HD) digital camera and a micro-TV, and realized orthographic observation and photograph with inertial stability by using angular speed closed-loop control mode and inertial pointing position closed-loop control mode. Different from traditional gyro installation in bearing ring, this barrel used independent MEMS GPS integrated navigation system to realize disturbance isolation and orthographic direction. The desired angle position and angle speed compensation equation when the integrated navigation system was installed on the barrel shell were derived, and the design principle, method and model of control modules were presented. The testing results showed that the stabled line of sight is perpendicular to the ground, the orthographic error can be controlled within  $3^\circ$ , which can guarantee the longitudinal and transverse overlapping rate, reduce the appearing of aerial photograph hole.

**Key words:** aerial survey; three-axis stabilization; gyro stabilization; orthographic platform

### 0 引言

摄影测量是指利用各种传感器设备,通过记录、量测、分析与表达等处理,获取地球及其环境和其他物体可靠信息的工艺、科学与技术。航测正射云台是一种以飞机或浮空器为载体,以CCD数码相机为主要有效载荷,正射获取规则重叠度影像的航空摄影测量系统<sup>[1-2]</sup>。云台一般由飞行平台、有效载荷、地面监控站、数据链路等部分组成<sup>[3-6]</sup>。正射云台在航空摄影

测量过程中,要求数码相机等载荷的瞄准光轴正对地面,且保持平稳,不随载体的摇摆振动而改变姿态;载荷所覆盖的视场要求航向重叠率和旁向重叠率均大于一定数值,这需要相机保持近似垂直对地。当姿态角变化较大时,航空摄影图像易出现重叠率过低或者没有重叠,造成航空摄影漏洞,导致存在漏洞的航线影像数据不能使用,需要重新航空摄影。因此,航空摄影测量云台一般使用稳定平台补偿飞行平台的姿态变化,保证相机摄影质量,方便后续测图<sup>[7-10]</sup>。航测正射云台在飞行作业过程中,飞机受到气流的影响,会产生俯仰、滚转等无规律姿态变化,相机光轴也会随飞机姿态的变化而改变对地垂直入射角,本文采用陀螺和加速

收稿日期:2013-03-27

修回日期:2013-04-16

作者简介:袁红卫(1969—),男,江西宜春人,硕士,高工,研究方向为光电装备与技术。

度计计算云台的瞬间姿态变化量,引导伺服机构维持正射姿态不变。

## 1 正射云台总体设计

设计中选用的照相机成像靶面为全画幅 CMOS 探测器,像元大小为  $6.4 \mu\text{m}$ ,横向分辨率为 5625;选用的相机镜头为焦距 35 mm 的高清定焦镜头,因此横向视场角为  $54.4^\circ$ 。在载体飞高 500 m 时,横向覆盖区域为 514.2 m,假设横摇  $1^\circ$ ,载体飞高不变,覆盖畸变万分之三,覆盖范围偏移约 10.9 m;假设横摇  $2^\circ$ ,飞高不变,覆盖畸变约千分之二,覆盖范围偏移约 21.6 m;假设横摇  $3^\circ$ ,飞高不变,覆盖畸变约千分之三,覆盖范围偏移约 32.2 m。若 GPS 对飞机定位精度控制在 5 m 以内,正射拍照姿态控制在  $3^\circ$  以内,则两次拍摄同一区域可能偏移的最大距离为  $5 \times 2 + 32.2 \times 2 = 74.4 \text{ m}$ ,此时对同一区域的两次拍摄覆盖重叠率可以达到 85% 以上。

由此,本文提出了一种基于微型惯性姿态测量元件的三轴稳定航测正射云台设计方法。正射云台通过隔离载机的横纵摇摆、偏航和振动,使图像传感器瞄准线在机载环境下保持高精度正射稳定。该正射云台考虑到轻型机载工作环境要求,采用三维等刚度减振器降低机体振动和空气动力学因素带来的振动对成像质量的影响。传感器集中密封安装于吊舱内部,不遭受灰尘、雨水、盐雾等侵扰。传感器各信号线布置在平台内部,不受雨水腐蚀和阳光照射,有效提高了传感器传输线路的防腐和抗老化性能;传感器各信号线与平台控制线集中引出,位于平台安装面内部,使得安装后的光电平台外部无任何电缆电线,进一步增加了设备的抗老化性能,也使设备外观整洁。

三轴稳定平台采用角速率闭环和惯性指向位置闭环的控制方式实现惯性稳定下的正射拍照。安装在稳定平台内的姿态测量元件的惯性测量单元敏感出载体的摇摆角速率,通过陀螺稳定回路,使平台在飞机摇摆、振动条件下保持速率闭环的稳定控制,并通过惯性测量元件解算出来航姿信息(欧拉角、旋转四元数或旋转矩阵),通过控制管理模块计算出吊舱本体各轴系需要转动的角度,从而实现位置闭环稳定控制,使其承载的图像传感器能够获取正射图像。

稳定平台采用三轴系平台的机械结构,其结构原理如图 1 所示。整个稳定平台通过精密轴承连接在一起,使得各框架之间能够相互转动,框架配置由外到内依次为滚转框架、俯仰框架和方位框架。被稳定的对象固定安装在方位框架内的稳定平面上,在 3 条支撑轴的一端分别装有与轴直接相连的力矩电机,用于驱

动平台各自对应的框架转动;各自轴对应的旋变用于测量稳定平台相对载体在方位、俯仰和滚转 3 个方向上相对各自框架的轴向角偏差;角速率陀螺用于敏感平台在 3 个方向上相对于惯性坐标系运动的角速度参数;惯性测量单元用于得到平台相对于惯性坐标系的旋转运动矩阵或旋转四元数等参数。

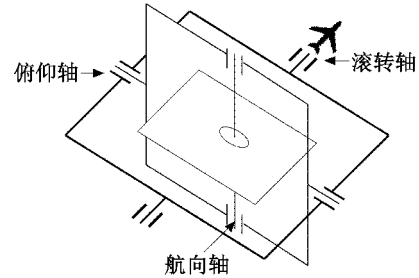


图 1 三轴稳定平台轴系结构原理图

Fig. 1 Principle chart of three-axis stabilized platform framework

## 2 正射云台控制组件设计与实现

正射云台的控制组件采用三轴结构的一体化设计,控制电路实现模块化设计,零件采用开放式设计,达到增加刚性、提高可靠性、精细控制重量的目的。

### 2.1 三轴稳定模块及载体扰动隔离方程

三轴稳定模块由三轴环架、电子线路模块和传感器组件等惯性测量单元组成,包括滚转轴系、方位轴系、俯仰轴系、驱动电机、测角元件、轴承、限位装置、传感器、电子线路以及密封环节等。

传感器的运动由滚转框架、俯仰框架、方位框架和载体的运动(平台基座的运动)经过复杂的耦合关系得到。下文推导隔离载体扰动方程。

#### 1) 载体坐标系→横滚框架坐标系。

设载体相对于惯性坐标系的角速度矢量  $\omega_b = (\omega_{bx}, \omega_{by}, \omega_{bz})^T$  耦合到横滚框架坐标系下的角速度矢量  $\omega_r = (\omega_{rx}, \omega_{ry}, \omega_{rz})^T$ ,根据坐标系变换关系得

$$\omega_r = \begin{bmatrix} \omega_{rx} \\ \omega_{ry} \\ \omega_{rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 & -\sin \theta_r \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_r & 0 & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{bx} \\ \omega_{by} \\ \omega_{bz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

#### 2) 横滚框架坐标系→俯仰框架坐标系。

设载体相对于横滚框架坐标系的角速度矢量  $\omega_r = (\omega_{rx}, \omega_{ry}, \omega_{rz})^T$  耦合到俯仰框架坐标系下的角速度矢量  $\omega_p = (\omega_{px}, \omega_{py}, \omega_{pz})^T$ ,根据坐标系变换关系得

$$\omega_p = \begin{bmatrix} \omega_{px} \\ \omega_{py} \\ \omega_{pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_p & \sin \theta_p \\ 0 & -\sin \theta_p & \cos \theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{rx} \\ \omega_{ry} \\ \omega_{rz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

#### 3) 俯仰框架坐标系→方位框架坐标系。

设载体相对于俯仰框架坐标系的角速度矢量  $\omega_p =$

$(\omega_{px}, \omega_{py}, \omega_{pz})^T$  耦合到方位框架坐标系下的角速度矢量  $\omega_y = (\omega_{yx}, \omega_{yy}, \omega_{yz})^T$ , 根据坐标系变换关系得

$$\omega_y = \begin{bmatrix} \omega_{yx} \\ \omega_{yy} \\ \omega_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & \sin \theta_y & 0 \\ -\sin \theta_y & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{px} \\ \omega_{py} \\ \omega_{pz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

为了隔离每个框架上的干扰角运动, 需要建立 3 条平台稳定回路, 即横滚轴稳定伺服回路、俯仰轴稳定伺服回路和方位轴稳定伺服回路, 分别使用力矩电机产生的反向补偿角速度抵消耦合到平台上的干扰角速度, 设补偿的角速度分别为  $\delta_x, \delta_p, \delta_y$ , 这些角速度耦合到方位框架坐标系的角速度为

$$\omega_\delta = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & \sin \theta_y & 0 \\ -\sin \theta_y & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_p & \sin \theta_p \\ 0 & -\sin \theta_p & \cos \theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_y & \sin \theta_y & 0 \\ -\sin \theta_y & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \delta_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

可得

$$\omega_y + \omega_\delta = 0 \quad (5)$$

根据使用需求, 本设计中采用小型 GPS 组合导航系统, 因此可将其安装于外壳并采用位置环稳定的方法。3 个轴上敏感到的角速度为:  $\Omega = (\omega_{bx}, \omega_{by}, \omega_{bz})^T$ 。

化简方程组

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_p & \sin \theta_p \\ 0 & -\sin \theta_p & \cos \theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 & -\sin \theta_r \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_r & 0 & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{bx} \\ \omega_{by} \\ \omega_{bz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_p & \sin \theta_p \\ 0 & -\sin \theta_p & \cos \theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \delta_r \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \delta_y \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

可得:

$$\begin{cases} \cos \theta_r \omega_{bx} - \sin \theta_r \omega_{bz} + \delta_p = 0 \\ \cos \theta_p \omega_{by} + \sin \theta_p \sin \theta_r \omega_{bx} + \sin \theta_p \cos \theta_r \omega_{bz} + \cos \theta_p \delta_r = 0 \\ -\sin \theta_p \omega_{by} + \cos \theta_p \sin \theta_r \omega_{bx} + \cos \theta_p \cos \theta_r \omega_{bz} - \sin \theta_p \delta_r + \delta_y = 0 \end{cases} \quad (7)$$

解上式得:

$$\begin{cases} \delta_p = \sin \theta_r \omega_{bz} - \cos \theta_r \omega_{bx} \\ \delta_r = -(\omega_{by} + \tan \theta_p \sin \theta_r \omega_{bx} + \tan \theta_p \cos \theta_r \omega_{bz}) \\ \delta_y = \sin \theta_p \omega_{by} - \cos \theta_p \sin \theta_r \omega_{bx} - \cos \theta_p \cos \theta_r \omega_{bz} + \sin \theta_p \delta_r \end{cases} \quad (8)$$

因姿态测量装置安装于云台壳体上, 所获得的壳体旋转矩阵为  $T$ , 则各轴的补偿角度  $\Delta\theta_x, \Delta\theta_p, \Delta\theta_r$  根据式(9)进行计算。

$$\begin{cases} \Delta\theta_x = \theta'_x - \theta_x \\ \Delta\theta_p = \theta'_p - \theta_p \\ \Delta\theta_r = \theta'_r - \theta_r \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $\theta'_x, \theta'_p, \theta'_r$  根据下式计算得到

$$C_{\theta'_x} C_{\theta'_p} C_{\theta'_r} T = E \quad (10)$$

$$C_{\theta'_x} C_{\theta'_p} C_{\theta'_r} = T^{-1} \quad (11)$$

因此

$$\begin{cases} \theta'_p = \arcsin(-\hat{i}_{13}) \\ \theta'_r = \arcsin\left(\frac{\hat{i}_{12}}{\cos \theta'_p}\right) \\ \theta'_x = \arcsin\left(\frac{\hat{i}_{23}}{\cos \theta'_p}\right) \end{cases} \quad (12)$$

### 2.2 GPS 组合导航系统

GPS 组合导航系统包含一个基于微机电系统的惯性测量单元、GPS 接收器和压力传感器。它提供了精确、无漂移的姿态和位置信息。这个微型惯性导航系统运行实时的扩展卡尔曼滤波器, 此滤波器以 100 Hz 的刷新频率来计算方向、位置和速度信息。相对于传统的姿态和导向参考系统, 该组合导航系统的精度通过去除 GPS 接收机测量的瞬时加速度的方法得到提高。

### 2.3 控制管理模块

控制管理模块采用高性能处理器 TMS320F2812 作为系统控制的核心, 采用 FPGA 进行逻辑控制, 采用 DSP 进行总线扩展, 实现外部的复杂逻辑控制。

控制管理模块的功能包括 3 部分:

- 1) 对数据链传输的指令进行解码, 并根据不同的指令控制进行相应的操作, 包括控制加断电, 控制传感器参数调整, 控制方位和俯仰旋转等;
- 2) 将无人机载光电探测设备本身的状态信息编码通过数据链传回控制中心, 使控制中心能对探测设备进行实时控制;
- 3) 完成探测设备内部的数据处理功能, 如自检、伺服系统控制、状态显示控制等。

控制管理模块主要由 DSP 处理及存储单元、D/A 扩展单元、外部总线扩展单元、异步串口扩展单元、I/O 扩展单元、测角扩展接口单元、FPGA 控制单元等组成。控制管理模块的组成如图 2 所示。

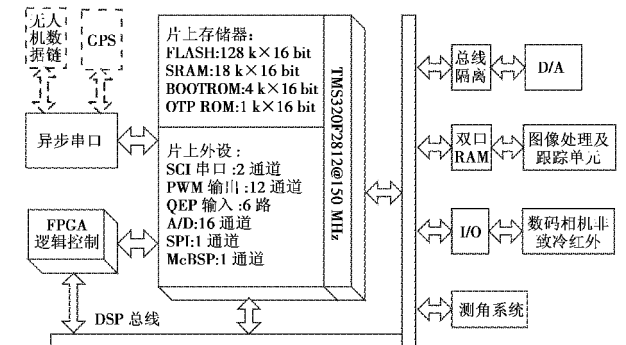


图 2 控制管理模块组成原理图

Fig. 2 Composition controlling management module

### 2.4 图像处理单元

图像处理及跟踪单元的功能是将目标位置相对光轴中心的角偏差及状态数据送给控制管理模块,用于自动跟踪陀螺稳定与伺服系统输入控制。

图像处理及跟踪单元采用美国 TI 公司的高端系列 DSP 处理器为处理核心、以大规模 FPGA 实现图像预处理与复杂逻辑控制,视频信号经过视频解码变换为数字图像信号,经数字图像预处理与滤波,送入双口 RAM 给 DSP 进行图像处理,图像处理经窗口检测,自适应图像分割,相关匹配等运算,测取目标位置相对光轴中心的方位、俯仰角偏差。图像处理及跟踪单元硬件结构如图 3 所示。

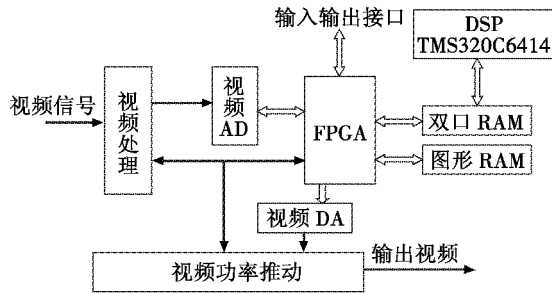


图 3 图像处理及跟踪单元硬件结构图

Fig. 3 Hardware composition of image processing and tracking unit

### 2.5 测角模块

测角模块是进行三轴稳定平台位置控制的基础,方位、俯仰和滚转测角原理和组成相同,主要由角度传感器(多极双通道旋转变压器)、信号激励电路、粗/精 RDC 转换电路、粗/精组合纠错电路、时序发生电路、数据输出缓冲电路等组成。

### 2.6 稳定伺服模块

控制管理模块接收组合导航系统数据及测角系统的角度,通过解算给出方位、俯仰和滚转补偿角大小,并得到相应的补偿角速度信号电压,稳定伺服模块根据速度信号电压的大小控制平台以一定速率进行方位和俯仰回转,实现对所处区域的目标的探测、跟踪。

稳定伺服系统由速度调节器、功放等组成,与控制管理模块、测角系统及速率陀螺构成典型 II 型速度无差控制系统,陀螺稳定与伺服系统的组成如图 4 所示。

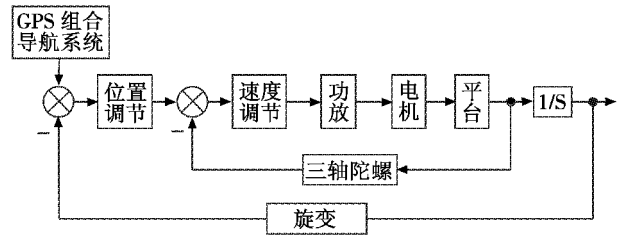


图 4 控制系统结构框图

Fig. 4 Framework of controlling system

## 3 结论

本文设计的三轴稳定航测正射云台充分考虑载机平台的性能及工作环境,设计的传感器能在飞行中不受飞机摇摆振动的影响,传感器光轴能够垂直于水平面,在动态摇摆台测试中正射误差能够控制在 3° 以内;结构紧凑、体积小、重量轻,环境适应性和载荷适装性强;外部机电接口简单,易于为载荷接纳,操作维护简便。其应用广泛,能够用于灾后评估、地貌勘探、航拍摄影等领域。

### 参考文献

- [1] 姬伟. 陀螺稳定光电跟踪平台控制系统研究[D]. 南京:东南大学,2006.
- [2] 曹晓平,江华诚. 两轴四框架光电稳定平台的稳定解算[J]. 光学与光电技术,2011,9(6):83-87.
- [3] 王慧君,王慧飞. 车载三轴稳定平台的陀螺耦合分析[J]. 制造业自动化,2011,33(6):106-108.
- [4] 董岩,张涛,李文明,等. 机载立体测绘相机滚转轴伺服系统的辨识与设计[J]. 光学精密工程,2011,19(7):1580-1587.
- [5] 高进,段哲民. 三轴稳定跟踪平台建模分析[J]. 火力与指挥控制,2012,37(11):127-130.
- [6] 阴蕊房,建成钟,麦英. 航空遥感用三轴惯性稳定平台动力学建模与仿真[J]. 中国惯性技术学报,2011,19(6):676-685.
- [7] 张强,吴云东,张超. 低空遥感小型三轴陀螺稳定平台的设计与实现[J]. 测绘科学技术学报,2012,29(4):276-281.
- [8] 王涛,朱明超,阎胜利,等. 稳定平台轴系精度对视轴指向误差的影响分析[J]. 红外与激光工程,2011,40(11):2265-2269.
- [9] 张延顺,朱如意. 一种新型机载对地观测用三轴稳定平台陀螺安装方式[J]. 航空学报,2010,31(3):614-619.
- [10] 付涛. 三轴稳定平台控制系统的设计与仿真研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.