

一种机载光电跟瞄平台的控制器设计

Controller Design of a Airborne Electro-Optical Scanning Platform

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 2.中国科学院研究生院) 苗用新^{1,2} 郭 劲¹ 张 堃^{1,2}

MIAO Yong-xin GUO Jin ZHANG Kun

摘要: 在传统三轴光电平台基础上,改变第三轴的坐标原点位置,消除平台的球顶盲区的同时,有效减小了平台外置部件体积,。将模型及其含有非线性项复杂进行简化和变形,最终得到适合控制器设计。

关键词: 控制器; 三轴; 耦合

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Abstract: On the basis of the traditional three-axis electro-optical platform, the origin of the third axial is moved to avoid the "blind-region" on the tip of the ball and reduce the volume of the outside components efficiently. The model and the complicated details are simplified. Finally, a suitable controller design is completed.

Key words: controller; three-axis; couple

传统的光电扫描设备在跟踪和捕获目标的时候,由于本身结构的限制,在其工作球域的顶端产生一个盲区——球顶盲区。该模型将其第三轴的原点位置重新定位,从而克服这个缺点。同时,为了克服各种扰动,精确地跟踪指定目标,需要设计平台的跟踪控制器,而跟踪控制器的设计和仿真验证都是建立在数学模型的基础之上的,所以,首先要建立平台伺服系统的数学模型,然后对其进行控制设计。

1 平台介绍

如图1所示,三轴跟瞄平台在工作状态下共有三个自由度:方位、俯仰、横滚(绕基座平面向转动)。最内框为方位框,与光电探测器或反射镜片固连,同时,方位框通过方位轴与俯仰框相连,方位框可以绕方位轴相对于俯仰框转动。俯仰框通过俯仰轴与横滚框相连,可以绕俯仰轴相对于横滚轴转动。最外面的框架是横滚框,通过横滚轴与基座相连,并可以绕横滚轴相对于基座转动,基座与飞机固连。方位力矩、俯仰力矩和横滚力矩由力矩电机通过3个转轴作用于3个框架上。如图2设计中方位轴的位置不同于传统三轴平台,通过改变方位框的位置,使俯仰框在更灵活的方位内转动,使平台俯仰角度超过270°。

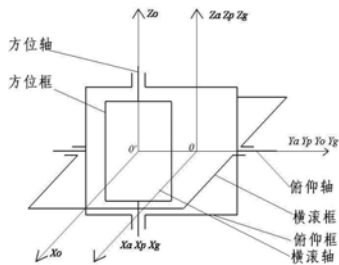


图1 三轴框架

苗用新: 硕士

基金项目: 申请人: 郭劲; 基金项目名称: 中科院二期创新项目; 颁发部门: 中国科学院(Q05C06Z)

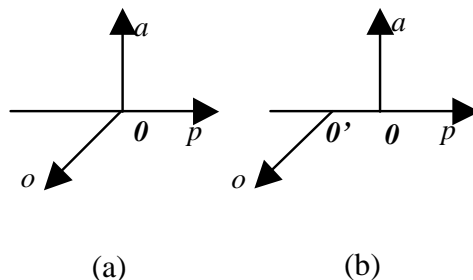


图2 传统方案与新方案比较

注 图2中 (a)为传统方案 (b)为新方案 a 为横滚轴, p 为俯仰轴 o 为方位轴。

2 光电平台控制系统设计

2.1 建立坐标系

框架由方位框、俯仰框和横滚框组成,其结构的复杂性导致了运动的复杂性。坐标系的建立就是为了更为方便、清楚的研究各个框架的运动,以及各个运动之间的耦合关系,从而建立框架运动方程(如图1):

o 系 $O'-X_oY_oZ_o$ 与方位框固连的运动坐标系 Z_o 与 Z_p' 重合 o 系可绕 Z_o 轴相对于 p' 系转动转过角度为 φ , 角速度为 φ' , X_o 轴为光学元件视轴;

p' 系 $O'-X_pY_pZ_p'$ 为 p 系原点 O 沿 Y_p 方向平移距离 d 得到的坐标系(如图2(a));

p 系 $O-X_pY_pZ_p$ 与俯仰框固连的运动坐标系 X_p 与 Y_a 重合 p 系可绕 Y_p 轴相对于 a 系转动, 转过角度为 θ , 角速度为 θ' ; a 系 $O-X_aY_aZ_a$ 与俯仰框固连的运动坐标系 X_a 与 X_g 重合 z 系可绕 X_a 轴相对于 g 系转动, 转过角度为 α , 角速度为 α' ;

g 系 $O-X_gY_gZ_g$ 与基座固连的运动坐标系, 基座固连在飞机上, 随飞机运动。设基座相对于惯性系 n 的角速度在 X_g 轴、 Y_g 轴和 Z_g 轴上的投影分别为 λ' 、 η' 、 ξ' 。

2.2 三轴框架的动力耦合

2.2.1 框架角速度计算

由于框架间存在耦合关系,在计算框架角速度的时候,采用3×3阶矩阵进行变化。如图1,通过框架间的相对运动关系得到各系之间的转换矩阵 C_{ij} (由i系到j系的变换矩阵):

$$C_{p/o} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad C_{ap} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad C_{g/a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

为了便于计算各框架坐标系之间角速度投影,用 ω_{ijk} 表示i系相对于j系的角速度在k系上的投影:

o系相对于p系的角速度在o系上的投影为: $\omega_{p/o} = (0 \ 0 \ \varphi')^T$;

p系相对于a系的角速度在p系上的投影为: $\omega_{ap/p} = (0 \ \theta' \ 0)^T$;

a系相对于g系的角速度在a系上的投影为: $\omega_{ga/a} = (\alpha' \ 0 \ 0)^T$;

g系相对于n系的角速度在g系上的投影为: $\omega_{gn/g} = (\lambda' \ \eta' \ \xi')^T$;

从框架的几何关系可以得出: $\omega_{p/o} = \omega_{p/p} + \omega_{p/o}$ $\omega_{ap/p} = \omega_{ap/p} + \omega_{ap/p}$ $\omega_{ga/a} = \omega_{ga/a} + \omega_{ga/a}$

2.2.2 框架模型的简化

从上一节可以看出:基座、俯仰框和横滚框的转动惯量以及俯仰框坐标系的转换都将导致动力学方程非常的复杂。为了方便设计,将三轴框架问题简化处理:把横滚框、俯仰框视为基座,其运动由原基座、横滚框和俯仰框自身转动合成;而将方位框、俯仰框之间的运动分离出来,单独考虑。

横滚框相对于惯性系的角速度为: $\omega_{an} = C_{ga} \omega_{p/g} + \omega_{an} = (\sigma' \ \Lambda' \ \Omega')^T$ 其中, $\sigma' \ \Lambda' \ \Omega'$ 表示横滚框相对于惯性系的角速度在轴 X_a, Y_a, Z_a 上的投影。

俯仰框相对于惯性系的角速度为:

$$\omega_{pnp} = C_{ap} C_{ga} \omega_{p/g} + C_{ap} \omega_{ga/a} + \omega_{pnp} \quad (1)$$

方位框相对于惯性系的角速度为:

$$\omega_{ono} = C_{po} C_{ap} C_{ga} \omega_{p/g} + C_{po} C_{ap} \omega_{ga/a} + C_{po} \omega_{pnp} + \omega_{ono} \quad (2)$$

2.3 建立框架动力学方程

2.3.1 建立方位框动力学方程

根据动量定理可得,方位框绕定点o的动量矩为:

$$M_1 = \left(\frac{dH_o}{dt} \right)_z = \left(\sum \left[m_{io} \vec{r}_{io} \times \left(\vec{\omega}_{ono} \times \vec{r}_{io} \right) \right] + m_{io} \vec{r}_{io} \times \left(\vec{\xi}_{ono} \times \vec{r}_{io} \right) \right)_z \quad (3)$$

其中, $\vec{r}_{io} = \vec{r}_{io}' + d$

2.3.2 建立俯仰框动力学方程

由动量矩定理得俯仰框对定点o的动量矩为:

$$\frac{dH_p}{dt} = \sum \left[m_{ip} \vec{r}_{ip} \times \left(\vec{\omega}_{pnp} \times \vec{r}_{ip} \right) \right] + m_{ip} \vec{r}_{ip} \times \left(\vec{\xi}_{pnp} \times \vec{r}_{ip} \right)$$

作用在俯仰框转动轴的力矩总和等于方位框对定点o的动量矩投影到p系沿y轴的分量与俯仰框对定点o的动量矩在p系上沿y轴的分量的和:

$$M_2 = \left(C_{ap} \left(\frac{dH_o}{dt} \right)_z \right)_y + \left(\frac{dH_p}{dt} \right)_y \quad (4)$$

2.4 动力学方程简化

由上一节中的(1)到(4)式可以计算出框架的精确动力学模型,但方程过于复杂,不便于跟踪控制器的设计和仿真,所以这里进一步对其简化。设方位框上光电元件和俯仰框在自身固定系下对横滚轴、俯仰轴和方位轴的转动惯量分别为: $A_1, B_1,$

$C_1; A_2, B_2, C_2$ 。并且,模型满足:a)方位框绕自身轴的转角 $\varphi \leq 6^\circ$; b)基座的方位角速度和俯仰角速度满足 $\eta', \xi' \leq 5^\circ/s$ 。因此,可以近似取 $\sin \varphi = \varphi, \sin 2\varphi = 2\varphi, \cos \varphi = 1, \cos 2\varphi = 1$ 。将以上条件计算整理得:

$$M_1 = \left(\frac{dH_o}{dt} \right)_z = \theta' \Lambda' \varphi + C_1 \theta' \sigma' \cos \theta - C_1 \theta' \Omega' \sin \theta - (A_1 - B_1) \theta' \sigma' \cos \theta + (A_1 - B_1) \theta' \Omega' \sin \theta + C_1 \sigma' \sin \theta + C_1 \varphi' + C_1 \Omega' \cos \theta \quad (5)$$

$$M_2 = \left(C_{ap} \left(\frac{dH_o}{dt} \right)_z \right)_y + \left(\frac{dH_p}{dt} \right)_y = (A_1 - B_1) \theta' \Lambda' (\sigma' \sin \theta + 2\varphi' \cos \theta) + 0.5(A_1 + A_2 - C_1 - C_2) \theta'^2 \sin 2\theta - (A_1 - B_1 - C_1) \theta' \Omega' \sin \theta - 0.5(A_1 + A_2 - C_1 - C_2) \theta'^2 \sin 2\theta - (B_1 + C_1 - A_1) \theta' \sigma' \cos 2\theta + (B_1 + C_1 - A_1) \theta' \sigma' \cos \theta + (A_1 + A_2 - C_1 - C_2) \theta' \sigma' \cos 2\theta + (B_1 + B_2 + A_1 \varphi'^2) (\theta'' + \Lambda'') - 0.5(B_1 - C_1) \theta'^2 \Omega'^2 \sin 2\theta + (A_1 - B_1) \theta' (2\varphi' \theta' + \sigma' \cos \theta - \Omega' \sin \theta) \quad (6)$$

由 $\omega_{pnp} = (\lambda' \ \eta' \ \xi')^T$ 代如 $\omega_{an} = C_{ga} \omega_{pnp} + \omega_{an} = (\sigma' \ \Lambda' \ \Omega')^T$ 从而可以计算出:

$$\begin{pmatrix} \sigma'' \\ \Lambda'' \\ \Omega'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha'' + \lambda'' \\ -\eta' \alpha' \sin \alpha + \xi' \alpha' \cos \alpha + \eta'' \cos \alpha + \xi'' \sin \alpha \\ -\eta' \alpha' \cos \alpha + \xi' \alpha' \sin \alpha + \eta'' \sin \alpha + \xi'' \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (7)$$

在基座的方位角速度和俯仰角速度满足 $\eta', \xi' \leq 5^\circ/s$,为较小量,由此可得 Λ'', Ω'' 同样为较小量,忽略含有高阶较小量的项而进一步化简(5)、(6)两式得:

$$M_1 = C_1 \varphi'' + (B_1 - A_1) \theta' \theta'' + (A_1 - B_1) \theta' \sigma'^2 \cos^2 \theta + (B_1 - A_1 + C_1) \theta' \sigma' \cos \theta + C_1 \sigma'' \sin \theta + C_1 \Omega'^2 \cos \theta - (A_1 - B_1) \Lambda' \sigma' \cos \theta - C_1 \theta' \Omega' \sin \theta + (A_1 - B_1) \theta' \Omega' \sin \theta \quad (8)$$

$$M_2 = (B_1 + B_2) \theta'' + 2(A_1 - B_1) \theta' \theta'' + (A_1 - B_1 - C_1) \theta' \sigma' \cos \theta + 0.5(A_1 + A_2 - C_1 - C_2) \theta'^2 \sin 2\theta + (B_1 + B_2) \Lambda'' + (A_1 + A_2 - C_1 - C_2) \Omega' \sigma' \cos 2\theta \quad (9)$$

2.5 控制器设计

转台关节处驱动电机采用电枢控制直流水磁矩电机,一般忽略电枢电感,则其平衡方程为:

$$u_a(t) = \frac{R_a M_a}{C_a} + C_e \omega_a(t) \quad (10)$$

式中: u_a 为电枢电压(V); i_a 为电枢电流(A); L_a 为电枢电感(H); R_a 为电枢电阻(Ω); E_a 为反电动势(V); M_a 为电机给力矩(Nm); C_a 为电机-力矩比例常数(N/A); C_e 为电机反电动势比例常数(V/(rad·s)); ω_m 为电机轴输出角速度(rad/s)。

将(10)式代入(8)、(9)两式,并以角速度为输出,电压为输入进行拉氏变换得系统被控制量的传递函数矩阵 $G_p(s)$ 为:

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1 s^2 + \frac{C_a C_{e1} s}{R_{a1}} + (A_1 - B_1) \sigma'^2} & \frac{1}{(B_1 - A_1 + C_1) \sigma' s} \\ \frac{1}{\left[\frac{C_{a2} C_{e2}}{R_{a2}} - (B_1 - A_1 + C_1) \sigma' \right] s} & \frac{1}{(B_1 + B_2) s^2 + \frac{C_{a2} C_{e2} s}{R_{a2}}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

为了实现对平台的解耦控制,我们假设系统的开环传递函数矩阵 $G_0(s)$ 为:

$$G_0(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1 s^2 + \frac{C_a C_{e1} s}{R_{a1}} + (A_1 - B_1) \sigma'^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{(B_1 + B_2) s^2 + \frac{C_{a2} C_{e2} s}{R_{a2}}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

系统开环传递函数矩阵 $G_0(s)$ 和闭环传递函数矩阵 $G(s)$ 之间满足: $G(s) = [I + G_0(s)]^{-1} G_0(s)$,式中 I 为单位矩阵。若已知 $G_0(s)$ 可以求得系统开环传递函数矩阵 $G(s)$ 。又有 $G_0(s) = G_p(s) G_c(s)$,其中 $G_c(s)$ 为串联补偿器。在系统中加入补偿器达到解耦的目的,但系统并不能够满足控制要求,为了提高系统的控制

精度和稳定性,在系统中再串联接入 $ks+k'$ 控制环节,其中 k 为根据控制要求和设备性能确定的参数。

表 1 系统仿真参数^①

A1 ^②	B1 ^②	C1 ^②	A2 ^②	B2 ^②	C2 ^②
28.6 ^③	21.3 ^③	12.4 ^③	26.5 ^③	41.2 ^③	28.3 ^③
C ₁₁ ^④	C ₁₂ ^④	R ₁₁ ^④	C ₂₁ ^④	C ₂₂ ^④	R ₂₁ ^④
40.25 ^⑤	45.43 ^⑤	5.65 ^⑤	80.45 ^⑤	88.23 ^⑤	8.49 ^⑤

2.6 计算机仿真

在以上几节的理论基础之上,结合具体的参数对系统进行计算机仿真。选取的个参数如表 1 所示。

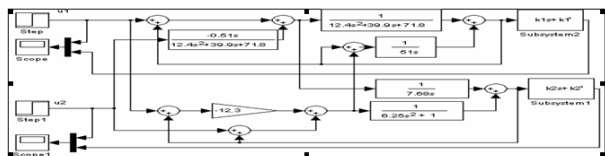
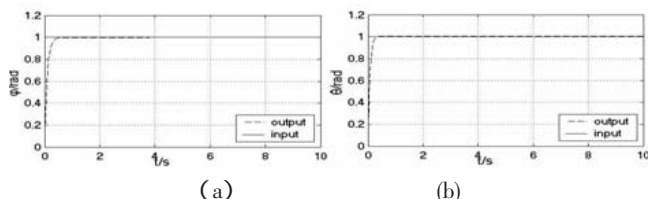


图 3 控制系统仿真模型

基座角速度及其加速度分别选取 $\omega' = 0.1$ $\sigma = 3.14$ 。在 simulink 下建立系统的仿真模型如图 3 所示:

图 4 选定参数 k 下系统的输入输出轨迹

仿真结果如图 4 所示。在图 4 中 (a) 为 $k_2=95$ $k_2'=1$ 时,俯仰框控制系统的输入输出轨迹;(b) 为 $k_1=30$ $k_1'=1$ 时方位框控制系统的输入输出轨迹。

3 结论

(1)结构的改进使跟瞄平台跟为灵活,同时减小了整个平台的体积。

(2)通过动力学模型的简化完成了控制模型的简化。

(3)解耦控制器的设计,实现了系统的线性解耦控制,提高了系统的精度和稳定性。

(4)根据电子器件性能和系统要求选择不同的参数 k k' 可以满足不同的控制精度

参考文献

- [1]陈娟.光电经纬仪数字化伺服系统控制技术.长春:长春光学精密机械与物理研究所,2006.
- [2]李慧等.光电经纬仪的机电动力学建模与耦合[J].光学精密工程,2007,15(10):1577-1582.
- [3]王家骥等.机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J].光学精密工程,2005,13(2):142-147.
- [4]张丽敏等.快速反射镜双 X-Y 轴控制的仿真研究[J].光学精密工程,2005,13(21):142-147.
- [5]张涛,乔彦峰.UDP 广播通讯在光电经纬仪组网中的应用[J].微计算机信息,2008,3-1:210-211.
- [6]张智永等.光电稳定跟踪装置的控制系统设计[J].光学精密工程,2006,14(4):681-688.

作者简介:苗用新(1982-),男(汉),河北沧县人,硕士,主要从事机载光电对抗研究;郭劲(1964-),男(汉),吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光电对抗研究。

Biography: MIAO Yong-xin (1982-), male, Hebi, Master degree, research area: airborne EO countermeasure;
(130033 长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)

苗用新 郭劲 张堃

(100039 北京中国科学院研究生院)苗用新 张堃

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130033, china)
MIAO Yong-xin GUO Jin ZHANG Kun

(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China) MIAO Yong-xin ZHANG Kun

通讯地址:(130033 长春经济技术开发区营口路 20 号 D 座 315) 苗用新

(收稿日期:2009.01.23)(修稿日期:2009.02.25)

(上接第 39 页)

制,不仅使得铁炉沟隧道照明系统具有紧急预案,而且节省电能。

(3)针对目前照明系统的不足,建议二期工程中采用基于动态调光的隧道照明系统,以实现隧道照明的柔性调光控制,进而实现在提高照明舒适度基础上的节能管理和自动化管理水平。

项目经济效益约为 200 万元。

参考文献

- [1]MARUKAWA HIROYUKI. Light system for highway tunnel [J]. Dai-dan Technical Current News, 2001, 93:18-26
- [2]陈亮.高速公路隧道照明节能系统的设计与实现[J].中国交通信息产业,2007,1:123-125
- [3]叶培群.汕梅高速公路隧道群节能型智能照明控制系统研究[J].公路交通技术,2005,4:173-174
- [4]罗智佳,钟汉枢等.公路隧道照明控制系统[J].交通与计算机,2005,23(125):117-119
- [5]陈文成等.电磁感应灯应用于雁列山隧道照明的探讨与实践[J].照明工程学报,2005(16)1:51-55
- [6]沈艾中.隧道交通事故多发的成因及预防措施[C].“国际隧道研讨会暨公路建设技术交流大会”论文集,2002:770-774.
- [7]戚佳金,刘晓胜,李琰等.基于动态调光的隧道照明监控系统研究[J].电气应用,2006,25(12):123-127
- [8]汪新民.高速公路上视频监视系统的设计与实现[J].微计算机信息,2007,4-2:209-211

作者简介:郭兰英(1963.12-),女,汉族,江苏江都人,硕士,副教授,主要从事计算机控制技术的教学和科研工作。

Biography: GUO Lan-ying (1963.12-), born in Jiangdu county Jiangsu province, He is the associate professor in Chang'an university, majors on the study of Computer Control Technique.

(710064 长安大学信息工程学院陕西西安) 郭兰英 梁波
(School of Information Engineering, Chang'an University, Shaanxi, China) GUO Lan-ying LIANG Bo

通讯地址:(710064 陕西省西安市南二环路中段长安大学 467 信箱) 郭兰英

(收稿日期:2009.01.23)(修稿日期:2009.02.25)

书 讯

《现场总线技术应用 200 例》
55 元 / 本 (免邮资) 汇至

《PLC 应用 200 例》
110 元 / 本 (免邮资) 汇至

地址:北京海淀区皂君庙 14 号院鑫雅苑 6 号楼 601 室
微计算机信息 邮编:100081
电话:010-62132436 010-62192616(T/F)