

·光电系统·

基于坐标变换的视轴稳瞄算法

李大成, 赵宏斌

(东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

摘要:介绍了车载稳瞄系统的结构组成与工作原理,对如何消除惯性导航设备和转台之间的安装误差进行了分析,针对两轴伺服转台提出了基于坐标正变换和逆变换的2种视轴稳瞄算法,并给出了对应的控制方案,通过实际系统的成功应用验证了算法的准确性。

关键词:视轴稳定;安装误差;坐标变换;稳瞄算法

中图分类号:O438

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)02-0005-04

Line of Sight Stabilization Algorithms Based on Coordinate Transformation

Li Da-cheng, ZHAO Hong-bin

(Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: The system structure and working principle of the vehicle-mounted line of sight (LOS) stabilization system are introduced. The method for how to eliminate the installation error between the navigation device and turret is proposed, and then two LOS stabilization algorithms of dual-axis servo turret based on coordinate transformation and inverse coordinate transformation are presented, the corresponding control schemes are also given. The accuracy of the algorithm is proved through the successful application of the actual system.

Key words: line of sight (LOS) stabilization; installation error; coordinate transformation; LOS stabilization algorithm

车载光电系统的视轴稳定是光电设备正常工作的有力保障,而由于车体机动颠簸引起的姿态变化会造成光学仪器视轴的空间指向不稳定,所以车载高精度稳瞄系统应具有很强的隔离车体扰动的能力^[1,2]。因车体机动而带来的影响可以视为是对稳瞄转台的一种扰动作用^[3,4]。稳瞄转台的主要作用就是要抑制这种扰动,以便隔离车体的姿态运动,消除车体姿态变化带来的影响,使光学仪器视轴的空间指向稳定。通过惯性导航装置可以定量地测得扰动变化,即车体在地理坐标系中的3个姿态角信息,通过坐标变换可以解算出为保持视轴空间指向稳定,转台所应该保持的方位角与俯仰角的

数值,并作为指令送入伺服控制回路,进而实现视轴空间指向的稳定。

1 稳瞄系统工作原理

稳瞄系统实际为两轴伺服转台及与之配套的光电设备。转台由方位和俯仰2个控制通道来分别完成2个自由度的角运动。如图1所示,方位环通过轴承与基座相连,俯仰环安装在方位环内。其中, G_1 为俯仰陀螺; G_2 为方位陀螺; G_3 为方位光栅; G_4 为俯仰光栅; M_1 为方位力矩电机; M_2 为俯仰力矩电机。瞄准线即视轴与y轴平行,所谓稳瞄即通过实时地调整俯仰角和方位角来保持y轴的空间指向稳定。

收稿日期:2011-02-23

基金项目:国家部委基金项目

作者简介:李大成(1972-),男,辽宁锦州人,高级工程师,主要从事光电系统设计与伺服控制;赵宏斌(1985-),男,河北石家庄人,工学硕士,研究方向为机电伺服控制。

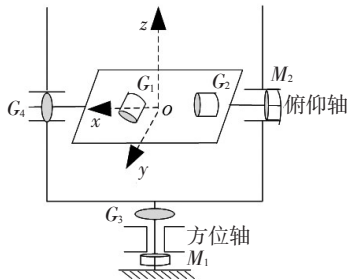


图1 两轴稳瞄转台工作原理图

单通道控制回路如图2所示,包含位置外环和速度内环2个闭合回路。其中,速度环的反馈元件为光纤速率陀螺,位置环的反馈元件为光栅,分别测量运动角速度和角度。速度环主要实现稳定功能,但是由于陀螺零漂的存在,视轴还是会随着时间变化有缓慢偏移,而位置环则主要实现对零漂作用的抑制,并进一步提高稳定精度。以下只讨论应用于位置环的视轴稳瞄算法。

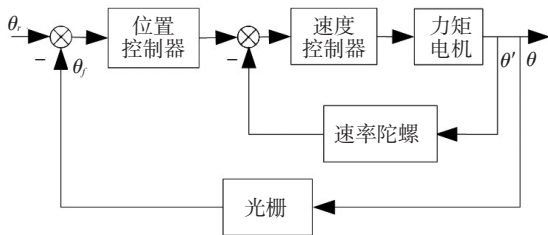


图2 单通道控制系统框图

2 基于坐标变换的稳瞄算法

2.1 坐标系定义

后面用到的3个坐标系,分别为:(1)地理坐标系 $OXYZ$:原点 O 为转台重心在地面上的投影, OX 轴指向正东, OY 轴指向正北,且 XOY 构成当地水平面, OZ 轴当地沿地理垂线指向上方,与另外两轴构成右手直角坐标系。(2)车体坐标系 $o_1x_1y_1z_1$:原点 o_1 为车体重心, o_1x_1 轴沿车体横轴指向右侧, o_1y_1 轴沿车体纵轴指向前方, o_1z_1 轴与另外两轴构成右手直角坐标系并指向上方为正。(3)转台坐标系 $oxyz$:原点 o 为转台2个旋转轴的几何交点, ox 轴沿转台俯仰轴指向右侧, oy 轴沿转台视线轴指向前方, oz 轴沿转台方位轴与另外两轴构成右手直角坐标系,且指向上方为正。

在实际应用中,车体的姿态信息能够被车载惯性导航装置精确测量。但是由于安装误差的存在,转台坐标系和车体坐标系是不重合的,所以惯性导

航装置测量到的车体的姿态数据不能直接用于转台控制,需要考虑消除安装误差的影响,下面进行分析。

2.2 安装误差分析

一个向量在2个不同直角坐标系的投影之间存在的变换关系用矩阵表达为

$$L(\alpha, \beta, \gamma) = L(\alpha)L(\beta)L(\gamma) \quad (1)$$

式中, α, β, γ 分别为绕三个坐标轴旋转过的角度。坐标变换采用“312”转序,即先绕 z 轴转过 α 角度,再绕 x 轴转过 β 角度,最后绕 y 轴转过 γ 角度,对应的旋转矩阵如下

$$L(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$L(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$L(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

于是,地理坐标系、转台坐标系和车体坐标系三者之间的关系如图3所示。

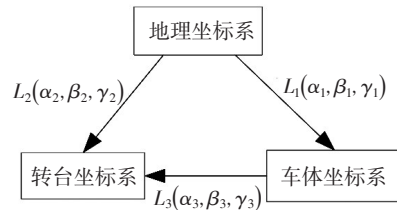


图3 各坐标系之间关系

取地理坐标系中某一向量 $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$,按照图3中所表示的关系,折算到车体坐标系中为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = L_1(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1) \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

折算到转台坐标系中为

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = L_2(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2) \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可以得到从车体坐标系到转台坐标系之间的转换关系

$$L_3(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3) = L_2(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)L_1^{-1}(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1) \quad (7)$$

从式(7)可以看出,要想求得 L_3 ,需要同时知道车体和转台姿态信息,车体姿态信息可以直接由

车载惯性导航设备测得,下面介绍一种转台姿态信息的测量方法。

首先,需要寻找一个与方位轴垂直的基准面,借助千分表是一种比较简单实用的方法。千分表可以将测杆直线位移转变为角位移,并通过刻度表盘指针来显示。如图4所示,将千分表固定安装,并使测头与俯仰顶盖(平面度较好)良好接触,调整俯仰轴位置(俯仰轴与方位轴垂直,所以只需要调整俯仰就可以找到垂直面),并将方位轴旋转一周,如果指针读数无变化,说明对应的平面与方位轴垂直,转台的俯仰轴和视轴均在这一平面内,此平面即为基准面。

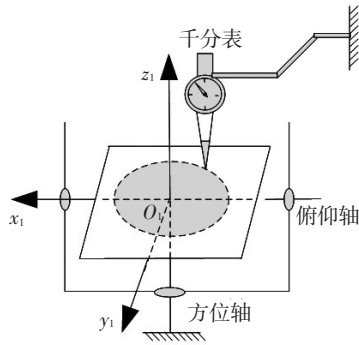


图4 千分表的安装方式

然后,将转台的方位轴旋转到光栅零位固定,并在基准面上安装一个小型惯性导航装置,记录下当时的3个姿态角数据 $\alpha_{20}, \beta_{20}, \gamma_{20}$,同时记录车载惯性导航设备的姿态角数据 $\alpha_{10}, \beta_{10}, \gamma_{10}$,由式(7)可得

$$L_3(\alpha_{30}, \beta_{30}, \gamma_{30}) = L_2(\alpha_{20}, \beta_{20}, \gamma_{20}) L_1^{-1}(\alpha_{10}, \beta_{10}, \gamma_{10}) \quad (8)$$

记为

$$L_3 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 L_3 即表征了由于安装误差导致的车体坐标系和转台坐标系之间的不重合度,是一个固定关系。进而得到地理坐标系和转台坐标系之间的关系为

$$L_2 = L_3 L_1 \quad (10)$$

2.3 坐标正变换稳瞄算法

在实际工作过程中,视轴的稳定控制只依赖于车上惯性导航设备的数据 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$,分别为偏航角、

俯仰角和滚转角的数值,于是有

$$L_1 = \begin{bmatrix} \cos \gamma_1 & 0 & -\sin \gamma_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma_1 & 0 & \cos \gamma_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_1 & \sin \beta_1 \\ 0 & -\sin \beta_1 & \cos \beta_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据式(10)和式(11)就可以计算出为保持视轴稳定转台的2个轴应该转过的角度 α_r 和 β_r ,具体求解过程如下:

定义地理坐标系中一个单位矢量 V_0 ,并用方位角 α_0 和俯仰角 β_0 表示

$$V_0 = \begin{bmatrix} \sin \alpha_0 \cos \beta_0 \\ \cos \alpha_0 \cos \beta_0 \\ \sin \beta_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

则在姿态数为 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ 时,向量 V_0 在转台坐标系中的投影为

$$V_s = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = L_2 V_0 = L_3 L_1 V_0 \quad (13)$$

于是,可以得到

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{x_s}{y_s}\right) \quad (14)$$

$$\beta_r = \arcsin(z_s) \quad (15)$$

其物理意义为:欲将视轴稳定在地理空间中方位 α_0 和俯仰 β_0 所代表的方向,当车体姿态为 α_1, β_1 和 γ_1 时,转台的方位和俯仰需要转到的角度分别为 α_r 和 β_r 。

由于方位角的角度范围为 $0 \sim 360^\circ$,所以在求解 α_r 的值时需要进行象限判断,如图5所示。

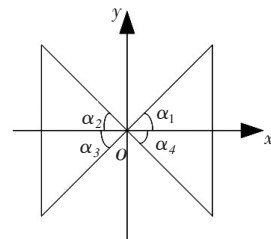


图5 方位角的象限分布关系

为了避免分母为零情况,可处理如下

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{|Y_s|}{|X_s| + \Delta}\right) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (16)$$

其中, $\Delta > 0$ 且其取值不能影响计算精度,例如可取 $\Delta = 1 \times 10^{-10}$ 。

则有

$$\alpha_r = \begin{cases} \alpha_i & X_s > 0, Y_s > 0 \\ 180^\circ - \alpha_i & X_s < 0, Y_s > 0 \\ 180^\circ + \alpha_i & X_s < 0, Y_s < 0 \\ 360^\circ - \alpha_i & X_s > 0, Y_s < 0 \end{cases} \quad (17)$$

对应到图2所示的控制框图而言, α_r 和 β_r 相当于输入指令 θ_r 。此时的 θ_r 是一个依赖于 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ 的实时变化量, 控制系统根据 θ_r 动作即可实现视轴稳定。

2.4 坐标逆变换稳瞄算法

所谓逆变换是指将转台坐标系中描述的矢量转换到地理坐标系中, 相对于上述变换是一个逆过程。同理, 在转台坐标系中的一个单位矢量 V_g 可以由2个旋转轴的光栅读数 α_g 和 β_g 来描述

$$V_g = \begin{bmatrix} \sin \alpha_g \cos \beta_g \\ \cos \alpha_g \cos \beta_g \\ \sin \beta_g \end{bmatrix} \quad (18)$$

将 V_g 折算到地理坐标系中为

$$V_{00} = \begin{bmatrix} x_{00} \\ y_{00} \\ z_{00} \end{bmatrix} = L_2^{-1} V_g = L_1^{-1} L_3^{-1} V_g \quad (19)$$

可以得到

$$\alpha_f = \arctan\left(\frac{x_{00}}{y_{00}}\right) \quad (20)$$

$$\beta_f = \arcsin(z_{00}) \quad (21)$$

其物理意义为: 欲将视轴稳定在地理空间中方位 α_0 和俯仰 β_0 所代表的方向, 当车体的空间姿态为 α_1, β_1 和 γ_1 时, 转台的方位和俯仰需要转到这样一个位置, 使得矢量 V_g 逆变换到地理空间后对应角度为 α_f 和 β_f , 且有 $\alpha_f = \alpha_0$ 和 $\beta_f = \beta_0$ 。

同样利用式(16)和式(17)对 α_f 进行象限判断处理。

将逆变换算法应用到控制系统如图6所示, 即将逆变换加到反馈通道中, 此时输入指令 θ_r 为一个地理空间的给定量, 是恒定不变的, 而反馈量 θ_f 则是一个与姿态信息 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ 相关的实时变化量, 给定量

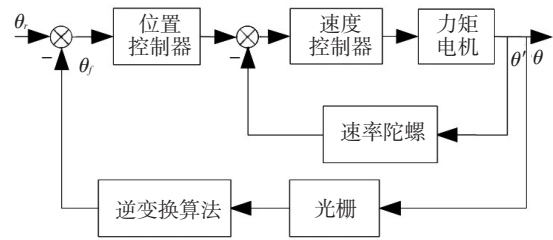


图6 单通道控制系统框图

θ_r 和反馈量 θ_f 之间的误差使得转台2个轴的电机动作直至误差消除, 进而实现视轴稳定。

3 结束语

针对两轴伺服转台提出了基于坐标正变换和逆变换的2种视轴稳瞄算法, 并给出了对应的控制方案。从控制系统角度而言, 正变换稳瞄算法对应的控制框图是在转台坐标系中描述的, 而逆变换稳瞄算法对应的控制框图则是在地理坐标系中描述的, 但实际上二者是等价的, 可以通过坐标变换建立联系。上述2种基于坐标变换的稳瞄算法均已成功运用到实际的稳瞄伺服控制系统中, 并结合PID控制算法和前馈、滤波等技术手段取得了良好的稳定效果。实践证明应用了视轴稳瞄算法的控制系统能够克服车体机动给转台带来的扰动作用, 实现了视轴的空间指向稳定, 同时验证了算法的准确性。

参考文献

- [1] 范大鹏, 张智永, 范世珣, 等. 光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 674-679.
- [2] 秦继荣, 曹晖. 车载高精度稳瞄系统的满意度设计[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(6): 65-67.
- [3] 罗兵, 黄国忠. 行进间瞄准线稳定技术[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(2): 9-12.
- [4] 施峥嵘. 车载设备视轴稳定与跟踪技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [5] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] 王振收, 徐非骏. 机载SAR稳定平台坐标变换及其软件实现[J]. 雷达与对抗, 2005(2): 64-68.

欢迎投稿

nloe@vip.163.com