

文章编号 1004-924X(2013)03-0782-08

车载光电跟踪系统跟踪转台的初始标定

徐 涛^{1,2,*}, 李 博¹, 刘廷霞¹, 薛乐堂^{1,2}, 陈 涛¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:提出了基于坐标变换的目标跟踪转台初始标定方法,用于提高车载光电跟踪系统的跟踪精度。首先,运用坐标变换理论,建立了转台精标定的数学模型,求解了转台标定的变换矩阵;然后,根据转台标定的实际需要,通过合理地分析和近似,推导了一种转台的粗标定方案;最后,将粗标定与精标定方法相结合对跟踪转台进行初始标定实验。实验结果表明,该标定方法提高了初始标定的效率,对大于等于 10 km 的远距离目标,精标定之后的转台跟踪误差小于 0.1° ,完全满足车载光电跟踪系统的精度要求。该标定方法已在一批车载光电跟踪系统中得到了成功应用。

关键词:车载光电跟踪系统;初始标定;跟踪转台;坐标变换

中图分类号:V556 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132103.0782

Initial calibration of tracking turntable for vehicle-borne opto-electronic tracking system

XU Tao^{1,2,*}, LI Bo¹, LIU Ting-xia¹, XUE Le-tang^{1,2}, Chen Tao¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: xut@ciomp.ac.cn*

Abstract: An initial turntable calibration method based on coordinate transformation was proposed to improve the target tracking precision of a vehicle-borne tracking system. First, according to the coordinate transformation theory, a precise turntable calibration model was established and a transformation matrix for the turntable calibration was obtained. Then, an approximate calibration approach based on the practical need was derived with reasonable analysis and careful approximation. Finally, a combined calibration method by using both approximate calibration and precise calibration was implemented in the turntable initial calibration process for a practical vehicle-borne opto-electronic tracking system. Experimental results show that the combined calibration method can improve the efficiency of turntable initial calibration. After precise calibration, the tracking error of the turntable is smaller than 0.1° for a remote target larger than 10 km away, which completely satisfies the precision requirements of the vehicle-borne opto-electronic tracking system. This calibration method has been successfully used in several vehicle-borne opto-electronic tracking systems.

Key words: vehicle-borne opto-electronic tracking system; initial calibration; tracking turntable; coordinate transformation

收稿日期:2012-10-19;修订日期:2013-01-13.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 061X20C060)

1 引言

车载光电跟踪系统要实现动态跟踪目标,必须应对车体扰动对跟踪的影响。车体扰动是指载车行进过程中车体在航向、俯仰和横滚3个方向上的随机振动,主要取决于路面情况和载车运动状态等。车体扰动传导至视轴,会引起视轴指向的变化,导致目标偏离视场中心甚至偏出视场^[1-3]。

车载光电跟踪系统的跟踪转台通过减震系统与车体相连,可以在一定程度上削弱车体振动对转台的影响。在转台底部安装一个捷联惯导系统,实时测量转台的姿态变化,转台伺服控制系统可根据获取的惯导姿态信息控制跟踪视轴准确地跟踪目标。然而当载车处于行进中时,车体扰动引起的视轴扰动量,不能由惯导测量的姿态角直接获取,只有通过合理地选择测量坐标系,在视轴扰动和惯导姿态之间建立确定的变换关系才能得到。转台初始标定的目的,就是求得这一变换关系^[4-6]。

考虑上述需求,本文对目标跟踪转台的初始标定方法进行了研究。建立了转台标定模型,求解了转台标定的变换矩阵,并推导建立了转台标定方案。最后基于提出的方案对跟踪转台进行了初始标定实验。

2 车载光电跟踪系统的工作原理

图1为车载光电跟踪系统的结构示意图。跟踪转台的底座通过减震系统与车体相连,转台底部固连一个捷联惯导系统,用来测量转台的姿态。车体处于静止状态时进行惯导的安装,安装时使惯导的航向轴、俯仰轴和横滚轴分别与垂直车体向上方向、从车尾向车头看去的右向和车尾指向车头的方向基本一致。惯导的姿态是随着车体姿态的变化而变化的,但是由于转台底座与车体之间隔着减震器,导致转台底座平面与车体平面以及路面并不平行,从而惯导测量的姿态并不等于车体的姿态,而是转台底座的姿态。

跟踪转台是一个三轴系统:方位轴垂直向上,控制俯仰轴在方位方向运动;俯仰轴与方位轴正交,控制视轴在高低方向运动;视轴与

俯仰轴正交,它随着方位轴和俯仰轴的转动而运动,对目标进行跟踪。安装时应保证三轴交于一点^[7]。

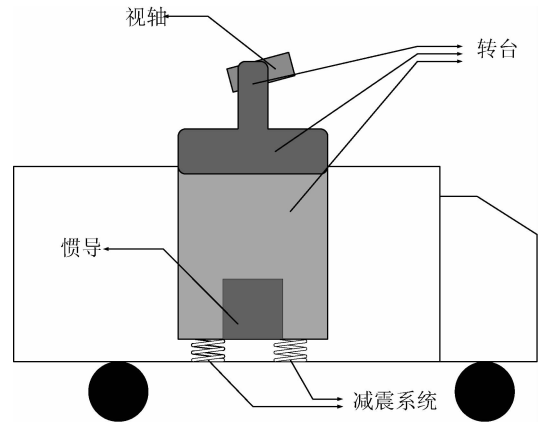


图1 车载光电跟踪系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of vehicle-borne opto-electronic tracking system

图2是转台伺服控制系统的原理图。转台具有3种跟踪方式:单杆跟踪、数引跟踪和红外自动跟踪。单杆跟踪由操作手通过操纵单杆来控制转台的方位和俯仰运动,用于对目标的搜索。数引跟踪是转台接收来自显控计算机的目标位置信息,自动转动转台,将视轴指向目标;当已知目标位置时,常用数引方式将目标引入视场。红外跟踪是利用图像处理的方法对进入视场的目标进行自动捕获和跟踪,使目标处于视场中心。方位编码器和俯仰编码器用来测量转台在方位和俯仰方向的转角^[8]。

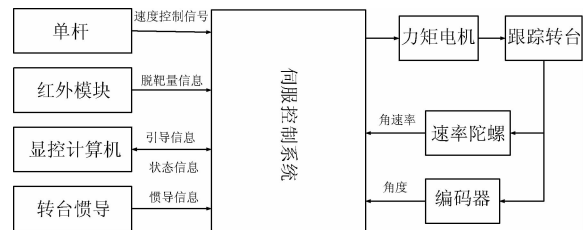


图2 转台伺服控制系统原理图

Fig. 2 Block diagram of turntable servo control system

3 转台标定的原理

建立视轴扰动和惯导姿态之间的变换关系的

过程,就是合理地建立坐标系、确定坐标系之间的变换矩阵的过程^[9-10]。

3.1 坐标系的建立

设目标的位置用地理坐标系 $O-X_n Y_n Z_n$ (简称 n 系) 表示为 (x_n, y_n, z_n) , 对应的方位角和俯仰角为 (A_n, E_n) 。地理坐标系即东北天坐标系, 它的原点 O 在载车重心处, OX_n 轴指向地理正东, OY_n 轴指向地理正北, OZ_n 轴垂直向上。

惯导具有航向轴 OZ_i , 俯仰轴 OX_i 和横滚轴 OY_i , 构成惯导坐标系 $O-X_i Y_i Z_i$ (简称 i 系)。当惯导的 3 个姿态角均为 0 时, i 系与 n 系重合。当惯导具有偏航角 H 、俯仰角 P 和横滚角 R 时, 将 n 系依次绕 OZ_n 轴旋转 $-H$ 角、绕 OX_n 轴旋转 P 角、绕 OY_n 轴旋转 R 角, 即得 i 系。其中 H 前的负号是由于惯导定义的偏航角的方向是绕 OZ_n 轴 (从上往下看) 顺时针旋转为正, 与通常定义的右手坐标系的角度旋转方向相反。 n 系和 i 系的关系如图 3 所示^[11]。

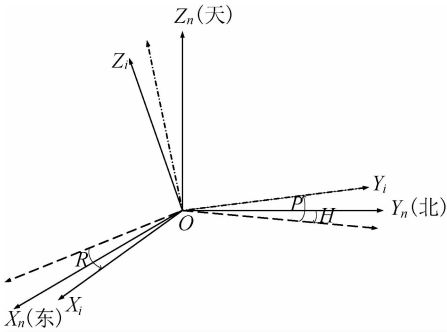


图 3 地理坐标系 $O-X_n Y_n Z_n$ 和惯导坐标系 $O-X_i Y_i Z_i$

Fig. 3 Geography coordinate system $O-X_n Y_n Z_n$ and inertial navigator coordinate system $O-X_i Y_i Z_i$

转台视轴在跟踪目标的过程中, 编码器测量的角度是视轴相对于转台编码器零位值所转过的角度。为了能够根据惯导的姿态角和编码器的读数确定视轴的姿态, 按如下方式定义一个相对 i 系固定不变的转台坐标系 $O-X_t Y_t Z_t$ (简称 t 系)。

由于惯导和转台的安装误差, 导致转台的方位轴与 i 系的 OZ_i 轴 (即惯导的航向轴) 有夹角, 但这个夹角在系统装配完成之后是固定的, 也即转台的方位轴相对于 i 系是固定不变的, 故定义 OZ_t 轴与方位轴重合, 向上为正; 旋转方位轴, 使得俯仰轴与车体左右方向基本一致, 将此处设为方位编码器的零位, 此时俯仰轴与 OX_i 轴有夹角,

但同样是固定不变的, 定义 OX_t 轴与此时的俯仰轴重合, 向右为正; OY_t 轴的方向根据右手定则确定。如此定义的 t 系, 与 i 系的相对关系是固定的, 且 OZ_t 轴对应着转台的方位轴, OX_t 轴对应方位零位时的俯仰轴, 而 OY_t 轴对应方位和俯仰编码器均在零位时的视轴指向, 如图 4 所示。

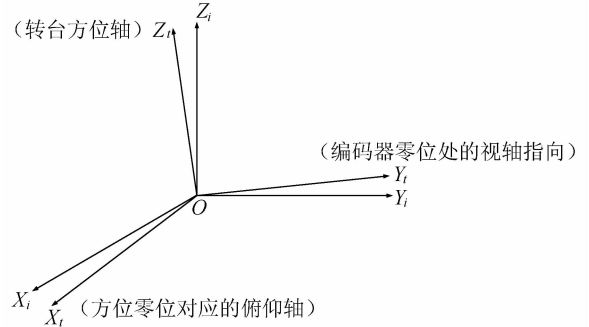


图 4 惯导坐标系 $O-X_i Y_i Z_i$ 和转台坐标系 $O-X_t Y_t Z_t$

Fig. 4 Inertial navigator coordinate system $O-X_i Y_i Z_i$ and turntable coordinate system $O-X_t Y_t Z_t$

根据 t 系的定义, OY_t 轴对应方位和俯仰编码器均在零位时的视轴指向。但是定义中只规定了方位编码器的零位, 俯仰零位的具体位置尚需在物理上进行确定。俯仰零位的确定方法如下。

采用数引跟踪方式, 将转台定位在方位的零位和俯仰的大致零位处, 此时视轴相对于 t 系的俯仰角为待求的 α_0 。将水平仪沿视轴方向放置在视轴上, 测出视轴相对于水平面的俯仰角 α , 这一角度包含了 OY_t 相对于水平面的倾角 α_1 (由方位轴 OZ_t 与水平面不垂直导致) 和视轴相对于 t 系的俯仰角 α_0 , 且有: $\alpha = \alpha_1 + \alpha_0$ 。保持转台的俯仰不变, 采用数引跟踪方式将方位调转 180° , 用水平仪测出调转后视轴相对于水平面的倾角 α' , 此时 OY_t 相对于水平面的倾角变为 $-\alpha_1$, 视轴相对于 t 系的俯仰角仍为 α_0 , 且有: $\alpha' = -\alpha_1 + \alpha_0$ 。从而求得视轴相对于 t 系的俯仰角为: $\alpha_0 = (\alpha + \alpha')/2$ 。求出 α_0 之后, 将视轴在俯仰方向旋转 $-\alpha_0$ 角, 即可回到俯仰的零位。

严格来说, t 系、 i 系及 n 系的原点并不重合。因为车载光电跟踪系统跟踪的是远距离目标 (≥ 10 km), 而以上 3 个坐标系的原点彼此非常接近 (< 1 m), 同一目标在不同坐标系下的角度误差最大不超过 $\arctan(1/10\ 000) = 21''$, 故可以认为 3 个坐标系共原点。

3.2 坐标变换的原理

根据坐标变换理论,设坐标系 $O-X_0Y_0Z_0$ 绕 OZ_0 轴旋转 α 角后得到坐标系 $O-X_1Y_1Z_1$, $O-X_1Y_1Z_1$ 绕 OX_1 轴旋转 β 角后得到 $O-X_2Y_2Z_2$, $O-X_2Y_2Z_2$ 绕 OY_2 轴旋转 γ 角后得到 $O-X_3Y_3Z_3$, 3 次旋转的变换矩阵可依次表示为:

$$\mathbf{T}_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_1^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_2^3 = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

于是,从 $O-X_0Y_0Z_0$ 到 $O-X_3Y_3Z_3$ 的总的变换矩阵为:

$$\mathbf{T}_0^3 = \mathbf{T}_2^3 \mathbf{T}_1^2 \mathbf{T}_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \gamma \sin \alpha + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \beta \sin \gamma \\ -\cos \beta \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ \cos \alpha \sin \gamma + \cos \gamma \sin \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma \sin \beta & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

相应地,若变换矩阵 \mathbf{T}_0^3 已知,即:

$$\mathbf{T}_0^3 = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_0^3[1,1] & \mathbf{T}_0^3[1,2] & \mathbf{T}_0^3[1,3] \\ \mathbf{T}_0^3[2,1] & \mathbf{T}_0^3[2,2] & \mathbf{T}_0^3[2,3] \\ \mathbf{T}_0^3[3,1] & \mathbf{T}_0^3[3,2] & \mathbf{T}_0^3[3,3] \end{bmatrix} \quad (2)$$

那么与之相应的旋转角可通过变换矩阵的元素得出,如式(3)所示:

$$\begin{cases} \tan \alpha = -\frac{\mathbf{T}[2,1]}{\mathbf{T}[2,2]} \\ \sin \beta = \mathbf{T}[2,3] \\ \tan \gamma = -\frac{\mathbf{T}[1,3]}{\mathbf{T}[3,3]} \end{cases} \quad (3)$$

设空间中某一点 P 在 $O-X_0Y_0Z_0$ 下的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 在 $O-X_3Y_3Z_3$ 下的坐标为 (x_3, y_3, z_3) , $O-X_0Y_0Z_0$ 到 $O-X_3Y_3Z_3$ 的变换矩阵为 \mathbf{T}_0^3 。则有:

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_0^3 \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$$

若 P 点两坐标系下对应的方位角和俯仰角分别为 (A_0, E_0) 和 (A_3, E_3) , 则上式可化为:

$$\begin{bmatrix} \cos E_3 \sin A_3 \\ \cos E_3 \cos A_3 \\ \sin E_3 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_0^3 \begin{bmatrix} \cos E_0 \sin A_0 \\ \cos E_0 \cos A_0 \\ \sin E_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{T}_n^i = \begin{bmatrix} \cos H \cos R + \sin H \sin P \sin R & -\cos R \sin H + \cos H \sin P \sin R & -\cos P \sin R \\ \cos P \sin H & \cos H \cos P & \sin P \\ \cos H \sin R - \cos R \sin H \sin P & -\sin H \sin R - \cos H \cos R \sin P & \cos P \cos R \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(4)即为两坐标系之间方位角和俯仰角的变换关系。

3.3 转台标定的变换矩阵

对于车载光电跟踪系统, n 系到 i 系的变换以及 n 系到 t 系的变换是可以测量的。将 n 系到 t 系的变换 \mathbf{T}_n^t 分成两部分,即 n 系到 i 系的变换 \mathbf{T}_n^i 和 i 系到 t 系的变换 \mathbf{T}_i^t 。则有:

$$\mathbf{T}_n^t = \mathbf{T}_i^t \mathbf{T}_n^i \quad (5)$$

将式(5)两边右乘 $(\mathbf{T}_n^i)^{-1}$, 得 \mathbf{T}_i^t 的表达式为

$$\mathbf{T}_i^t = \mathbf{T}_n^t (\mathbf{T}_n^i)^{-1} \quad (6)$$

式(6)即为转台标定的变换矩阵。

4 转台的初始标定方法

由式(6)可知,转台标定的过程就是通过 \mathbf{T}_n^t 和 \mathbf{T}_n^i 求 \mathbf{T}_i^t 的过程。

4.1 变换矩阵的求取

从 n 系到 i 系的变换矩阵 \mathbf{T}_n^i 可由惯导的姿态角得到。设惯导的姿态角为 (H, P, R) , 令(1)式中的 $\alpha = -H, \beta = P, \gamma = R$, 即得 n 系到 i 系的变换矩阵为:

从 n 系到 t 系的变换矩阵 \mathbf{T}_n^t 按如下方法求得。

假设载车处在位置 T 处, 转台视轴对准位置 N 处的目标, 载车和目标的位置均已知, 则可以计算出目标在地理坐标系下的角位置 (A_n, E_n) ; 目标在转台坐标系下的角位置 (A_t, E_t) 由编码器测得。由式(4)有:

$$\begin{bmatrix} \cos E_t \sin A_t \\ \cos E_t \cos A_t \\ \sin E_t \end{bmatrix} = \mathbf{T}_n^t \begin{bmatrix} \cos E_n \sin A_n \\ \cos E_n \cos A_n \\ \sin E_n \end{bmatrix}, \quad (8)$$

\mathbf{T}_n^t 可看作 n 系绕相应的轴依次旋转偏航角 H' 、俯仰角 P' 和横滚角 R' 得到 t 系。由(1)式, \mathbf{T}_n^t 可表示为:

$$\mathbf{T}_n^t = \begin{bmatrix} \cos H' \cos R' + \sin H' \sin P' \sin R' & -\cos R' \sin H' + \cos H' \sin P' \sin R' & -\cos P' \sin R' \\ \cos P' \sin H' & \cos H' \cos P' & \sin P' \\ \cos H' \sin R' - \cos R' \sin H' \sin P' & -\sin H' \sin R' - \cos H' \cos R' \sin P' & \cos P' \cos R' \end{bmatrix}. \quad (9)$$

可见 \mathbf{T}_n^t 实际上只有 3 个独立的未知变量, 因而由式(9)即可求出 \mathbf{T}_n^t 。

4.2 变换矩阵的实测方法

直接求解(8)式比较困难, 实际标定时, 可以测出 3 组 (A_n, E_n) 和 (A_t, E_t) 的值, 依次记为 (A_{n1}, E_{n1}) 和 (A_{t1}, E_{t1}) 、 (A_{n2}, E_{n2}) 和 (A_{t2}, E_{t2}) 、 (A_{n3}, E_{n3}) 和 (A_{t3}, E_{t3}) , 各组对应的惯导姿态角为 (H_1, P_1, R_1) 、 (H_2, P_2, R_2) 、 (H_3, P_3, R_3) , 得到 3 组方程

$$\begin{bmatrix} \cos E_{tk} \sin A_{tk} \\ \cos E_{tk} \cos A_{tk} \\ \sin E_{tk} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_n^t(k) \begin{bmatrix} \cos E_{nk} \sin A_{nk} \\ \cos E_{nk} \cos A_{nk} \\ \sin E_{nk} \end{bmatrix},$$

$k=1, 2, 3$

由式(5), $\mathbf{T}_n^t(k) = \mathbf{T}_i^t \mathbf{T}_n^i(k)$, 代入上式得

$$\begin{bmatrix} \cos E_{tk} \sin A_{tk} \\ \cos E_{tk} \cos A_{tk} \\ \sin E_{tk} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_i^t \mathbf{T}_n^i(k) \begin{bmatrix} \cos E_{nk} \sin A_{nk} \\ \cos E_{nk} \cos A_{nk} \\ \sin E_{nk} \end{bmatrix},$$

$k=1, 2, 3,$ (10)

其中:

$$\mathbf{T}_n^i(k) = \begin{bmatrix} \cos H_k \cos R_k + \sin H_k \sin R_k \sin P_k & -\cos R_k \sin H_k + \cos H_k \sin P_k \sin R_k & -\cos P_k \sin R_k \\ \cos P_k \sin H_k & \cos H_k \cos P_k & \sin P_k \\ \cos H_k \sin R_k - \cos R_k \sin H_k \sin P_k & -\sin H_k \sin P_k - \cos H_k \cos R_k \sin R_k & \cos P_k \cos R_k \end{bmatrix},$$

令:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{tk} \\ \hat{y}_{tk} \\ \hat{z}_{tk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos E_{tk} \sin A_{tk} \\ \cos E_{tk} \cos A_{tk} \\ \sin E_{tk} \end{bmatrix}, k=1, 2, 3,$$

写成矩阵的形式为

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{t1} & \hat{x}_{t2} & \hat{x}_{t3} \\ \hat{y}_{t1} & \hat{y}_{t2} & \hat{y}_{t3} \\ \hat{z}_{t1} & \hat{z}_{t2} & \hat{z}_{t3} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_i^t \begin{bmatrix} \hat{x}_{i1} & \hat{x}_{i2} & \hat{x}_{i3} \\ \hat{y}_{i1} & \hat{y}_{i2} & \hat{y}_{i3} \\ \hat{z}_{i1} & \hat{z}_{i2} & \hat{z}_{i3} \end{bmatrix},$$

从而得到 i 系到 t 系的变换矩阵 \mathbf{T}_i^t 的表达式

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{ik} \\ \hat{y}_{ik} \\ \hat{z}_{ik} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_n^i(k) \begin{bmatrix} \cos E_{nk} \sin A_{nk} \\ \cos E_{nk} \cos A_{nk} \\ \sin E_{nk} \end{bmatrix}, k=1, 2, 3,$$

$$\mathbf{T}_i^t = \begin{bmatrix} \hat{x}_{t1} & \hat{x}_{t2} & \hat{x}_{t3} \\ \hat{y}_{t1} & \hat{y}_{t2} & \hat{y}_{t3} \\ \hat{z}_{t1} & \hat{z}_{t2} & \hat{z}_{t3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{i1} & \hat{x}_{i2} & \hat{x}_{i3} \\ \hat{y}_{i1} & \hat{y}_{i2} & \hat{y}_{i3} \\ \hat{z}_{i1} & \hat{z}_{i2} & \hat{z}_{i3} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (11)$$

则式(10)可表示为:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{tk} \\ \hat{y}_{tk} \\ \hat{z}_{tk} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_i^t \begin{bmatrix} \hat{x}_{ik} \\ \hat{y}_{ik} \\ \hat{z}_{ik} \end{bmatrix}, k=1, 2, 3,$$

这种方法求解变换矩阵 \mathbf{T}_i^t , 避免了(9)式复杂的三角函数运算; 同时该方法实质上相当于对(9)式测量了 3 次求平均值。

在标定过程中, 为了得到多组数据, 需要改变载车的位置或姿态以及目标的位置。根据实际情况, 选择改变载车或目标中的一个即可。由于载车

运动比较方便,通常选择改变载车的方式;可以人为设置台阶,改变载车姿态,或者将载车开至新的位置。

如果能够方便地改变目标位置,维持载车的位置和姿态不变,则 T_n^t 为定值,(11)式还可以化简。

5 转台的粗标定方法

5.1 转台粗标定的意义

直接按前面的方法去标定转台,遇到的一个问题是目标可能不太容易找到。转台标定的第一步是操作手首先通过数引或单杆跟踪方式将视轴大致指向目标方向。然而由于红外跟踪的视场较小($1^\circ \times 1^\circ$),如果视轴指向与目标有较大偏差,将导致搜索目标的角度范围较大,搜索的时间较长甚至难以找到目标;此时如果搜索到了一个与目标红外辐射特性相近的伪目标,还将导致错误的实验结果。为此,车载光电跟踪系统采用了一种近似的转台标定方法,用来进行载车运行前的粗标定。经过粗标定之后再精确标定,可以确保在找寻目标时,俯仰方向能较准确地定位,视轴只需在方位上

进行小角度的搜寻。

5.2 转台粗标定的方法

转台近似标定的原理,是将 i 系到 t 系的变换矩阵用转台与惯导姿态角的差值来近似。设想 t 系上固连一个捷联惯导,可以直接测量 t 系相对于 n 系的姿态角(H_t, P_t, R_t),那么 n 系到 t 系的变换矩阵可以直接求出。 t 系相对 n 系的姿态角(H_t, P_t, R_t)等于 i 系相对 n 系的姿态角(H, P, R)加上两组姿态角的差值($\Delta H, \Delta P, \Delta R$)。当车体姿态角较小时, ($\Delta H, \Delta P, \Delta R$) 近似不变。在室内进行转台粗标定时,主要是借助水平仪测出俯仰角和横滚角的差值 ΔP 和 ΔR 。

先用数引跟踪方式将转台调转至方位和俯仰的零位,此时视轴指向 t 系下的 OY_t 方向。将水平仪沿视轴方向放置在视轴上,测出水平仪的倾角,此即 t 系相对于 n 系的俯仰角 P_t ;再将转台的方位调转 90° 使视轴向右,此时水平仪的读数即 t 系相对于 n 系的横滚角 R_t 。惯导的俯仰角 P 和横滚角 R 可直接由惯导给出。记下姿态角的偏差值: $\Delta P = P_t - P, \Delta R = R_t - R$ 。由此得到 n 系到 t 系的一个近似变换矩阵 \tilde{T}_n^t 为

$$\tilde{T}_n^t = \begin{bmatrix} \cos H_t \cos R_t + \sin H_t \sin P_t \sin R_t & -\cos R_t \sin H_t + \cos H_t \sin P_t \sin P_t & -\cos P_t \sin R_t \\ \cos P_t \sin H_t & \cos H_t \cos P_t & \sin P_t \\ \cos H_t \sin R_t - \cos R_t \sin H_t \sin P_t & -\sin H_t \sin R_t - \cos H_t - \cos H_t \cos R_t \sin P_t & \cos P_t \cos R_t \end{bmatrix}, \quad (11. a)$$

其中:

$$H_t = H, P_t = P + \Delta P, R_t = R + \Delta R, \\ \text{粗标定不标定偏航角 } H_t, \text{故令 } H_t = H.$$

6 转台标定实验

转台的标定工作分两步:内场粗标定和外场精标定。内场粗标定采用第5节的近似标定方法,以提高标定的效率。外场精标定运用第4节所述的标定模型,求取变换矩阵。

6.1 内场粗标定

3.1节在建立 t 系时,需要确定俯仰编码器的零位。这一工作可以与内场粗标定结合进行。

采用数引跟踪方式,将转台定位在方位的零位和俯仰的大致零位处,将水平仪沿视轴方向放置在视轴上,测出视轴相对于水平面的俯仰角 α 。设此时视轴在 t 系下的俯仰角为 α_0 , t 系相对于 n 系的

俯仰角为 P_t ;则有: $\alpha = P_t + \alpha_0$ 。保持俯仰不变,将转台方位调转 180° ,用水平仪测出调转后视轴相对于水平面的倾角 α' ,此时视轴相对于 t 系的俯仰角仍为 α_0 ,而 t 系相对于 n 系的俯仰角变为 $-P_t$;故有: $\alpha' = -P_t + \alpha_0$ 。因而视轴相对于 t 系的俯仰角为: $\alpha_0 = (\alpha + \alpha')/2$; t 系相对于 n 系的俯仰角为 $P_t = (\alpha - \alpha')/2$ 。将视轴在俯仰方向旋转 $-\alpha_0$ 角,即可回到俯仰编码器的零位。

确定编码器的俯仰零位之后,用数引跟踪方式将转台调转至方位 90° 和俯仰 0° ,使视轴向右,此时水平仪的读数即 t 系相对于 n 系的横滚角 R_t 。读取惯导的俯仰角 P 和横滚角 R ,得到视轴和惯导的姿态角偏差: $\Delta P = P_t - P, \Delta R = R_t - R$ 。

标定中选用青岛前哨精密仪器有限公司生产的 SDS9 型数字式电子水平仪,选择 I 档测量倾角,1个数字=0.01 mm/m,显示的数字范围为 $[-2\ 000, 2\ 000]$;换算成角度可知,水平仪的灵敏度

为 $2.06''$, 测角范围 $[-1.15^\circ, 1.15^\circ]$ 。

对车载光电跟踪系统转台进行内场粗标定, 得到姿态角偏差: $(\Delta P, \Delta R) = (+0.186^\circ, -0.051^\circ)$ 。

6.2 外场精标定

内场粗标定完成之后, 将载车行至某处停下, 在距离载车大约 10 km 处放置一个目标。根据载车和目标的位置信息, 计算得到目标在 n 系下的位置为 $(A_{n1}, E_{n1}) = (239.712^\circ, -0.118^\circ)$, 将此角度值输入显控计算机, 根据已测出的偏差值 $(\Delta P, \Delta R)$, 采用(11)式表示的近似标定方法, 用数引跟踪方式对视轴进行调转, 未发现目标。根据粗标定的原理, 这应当是由于粗标定偏航角 H_i 导致方位偏差较大, 超出了红外跟踪视场的范围。将跟踪方式切换至单杆跟踪, 保持俯仰角不变, 仅在当前方位角附近进行搜索, 目标很快进入视场, 此时切换至红外跟踪模式, 目标被捕获到视场中心。利用粗标定变换矩阵 \tilde{T}_n 将转台编码器的角度值转换成 n 系下的角度值为 $(A_{n1}', E_{n1}') = (238.624^\circ, -0.09^\circ)$, 与已知的真实值之间的误差为: $(\Delta A_{n1},$

$\Delta E_{n1}) = (A_{n1}' - A_{n1}, E_{n1}' - E_{n1}) = (-1.088^\circ, 0.028^\circ)$ 。可以看到, 经过粗标定之后, 俯仰角的误差很小, 已经很接近视场中心。可见粗标定将目标搜索的范围从二维减小到了一维, 提高了标定的效率, 减少了出错的可能性。

记录此时的编码器角度值 (A_{i1}, E_{i1}) 和目标在 n 系下的角度值 (A_{n1}, E_{n1}) 以及当前惯导的姿态角 (H_1, P_1, R_1) ; 将载车行至新的位置, 并使其有一定的倾斜, 采用同样的步骤得到 (A_{i2}, E_{i2}) 、 (A_{n2}, E_{n2}) 和 (H_2, P_2, R_2) ; 再次改变载车的位置和姿态, 得到 (A_{i3}, E_{i3}) 、 (A_{n3}, E_{n3}) 和 (H_3, P_3, R_3) 。根据(10)式求出变换矩阵 T_i 。

6.3 跑车验证

完成标定之后, 将变换矩阵 T_i 的值写入转台伺服控制程序中, 进行跑车验证。载车处于 5 组不同的姿态和位置, 在红外跟踪模式下让视轴对准已知的目标。将显控计算机显示的角度值(即程序计算出的目标相对于 n 系的角度值)和目标的真实角度值比较, 结果如表 1 所示。

表 1 转台标定实验跑车验证数据

Tab. 1 Verification data of turntable calibration experiments

实验组号	惯导姿态			目标位置		
	H	P	R	显示值 (A_n', E_n')	真实值 (A_n, E_n)	误差角 $(\Delta A_n, \Delta E_n)$
第 1 组	89.55°	0.10°	-0.10°	$(1.04^\circ, 0.48^\circ)$	$(1.01^\circ, 0.50^\circ)$	$(0.03^\circ, -0.02^\circ)$
第 2 组	135.33°	-0.15°	-2.19°	$(1.10^\circ, 0.55^\circ)$	$(1.01^\circ, 0.50^\circ)$	$(0.09^\circ, 0.05^\circ)$
第 3 组	181.05°	-2.53°	0.89°	$(1.06^\circ, 0.45^\circ)$	$(1.01^\circ, 0.50^\circ)$	$(0.05^\circ, -0.05^\circ)$
第 4 组	181.05°	2.53°	0.88°	$(177.30^\circ, 1.21^\circ)$	$(177.40^\circ, 1.28^\circ)$	$(-0.10^\circ, -0.07^\circ)$
第 5 组	270.81°	1.07°	-0.49°	$(177.33^\circ, 1.24^\circ)$	$(177.40^\circ, 1.28^\circ)$	$(-0.07^\circ, -0.04^\circ)$

从实验结果来看, 最大误差不超过 0.1° , 对于 $1^\circ \times 1^\circ$ 的红外视场, 能够保证每次都能将目标引导至接近视场中心的位置, 完全满足系统的精度要求。

7 结 论

本文提出的基于坐标变换的标定模型, 具有较

高的精度: 对于 ≥ 10 km 的远距离目标, 标定误差不超过 0.1° , 满足系统的性能要求。在粗标定的基础上进行精标定的标定方法, 对车载光电跟踪系统及其他类似系统的转台标定工作提供了有益的参考, 具有较大的实用价值。

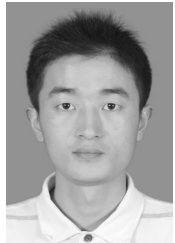
参考文献:

- [1] 李增. 车载经纬仪自主定位定向技术的研究[D]. 北京: 中国科学院, 2010.
LI Z. *Autonomous position and orientation technol-*

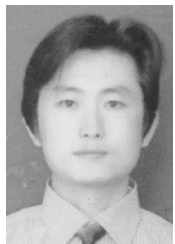
- ogy for trailer-mounted theodolite* [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
[2] 沈永良, 徐亚飞. 舰载平台下的光电跟踪技术[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(7): 13-15.
SHEN Y L, XU Y F. *Electro-optical tracking technology based on shipborne platform* [J]. *Fire Con-*

- trol and Command Control*, 2008,33(7):13-15. (in Chinese)
- [3] 葛兵,高慧斌. 舰载经纬仪视轴自稳定方法[J]. 舰船科学技术,2006,28(6):93-96.
GE B, GAO H B. Stabilization of LOS for Carrier-based Theodolite[J]. *Ship Science and Technology*, 2006, 28(6): 93-96. (in Chinese)
- [4] 范大鹏,张智永. 光电稳定跟踪装置的稳定机理分析[J]. 光学精密工程,2006,14(4):674-680.
FAN D P, ZHANG ZH Y. Research of basic principles of E-O stabilization and tracking devices[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 674-680. (in Chinese)
- [5] 姬伟. 陀螺稳定光电跟踪平台伺服控制系统研究[D]. 南京:东南大学,2006.
JI W. *Research on servo control system of gyro stabilized and opto-electronic tracking platform*[D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [6] 仇振安. 姿态稳定平台测控技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2006.
QIU ZH W. *A study on the measurement and control technology of the attitude stabilization platform* [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [7] 薛向尧,高云国,韩光宇,等. 水平式经纬仪指向误差的统一补偿技术[J]. 光学精密工程,2011,19(7):1524-1530.
XUE X Y, GAO Y G, HAN G Y, *et al.*. Total correction method of pointing error for level mounting theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1524-1530. (in Chinese)
- [8] 李连学,曹秋生. 光电跟踪仪的自主捕获技术研究[J]. 激光与红外,2006,36(12):1142-1145.
LI L X, CAO Q SH. Study on the autonomous-capturing target trechnology of opto-electronic tracker [J]. *Laser and Infrared*, 2006, 36(12): 1142-1145. (in Chinese)
- [9] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京:科学出版社,2006:5-8.
QIN Y Y. *Inertial Navigation* [M]. Beijing: Science Press, 2006: 5-8. (in Chinese)
- [10] 金光,王家琪. 利用坐标变换推导经纬仪三轴误差[J]. 光学精密工程,1999,5(10):89-94.
JIN G, WANG J Q. The three-error axis of theodolite with the utilization of the coordinate to the variation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 5(10): 89-94. (in Chinese)
- [11] TITTERTON D H, WESTON J L. *Strapdown Inertial Navigation Technology* [M]. 2rd ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2012: 12-39.

作者简介:



徐涛(1985—),男,湖北武汉人,博士研究生,主要从事光电跟踪与控制技术的研究。E-mail: xut@mail.ciomp.ac.cn



李博(1974—),男,吉林长春人,助理研究员,主要从事光电跟踪与控制技术的研究。E-mail: neptune1974@sina.com



刘廷霞(1973—),女,吉林抚松人,博士,副研究员,主要从事光电经纬仪的精密控制及其算法的研究。E-mail: liutingxia2001@sohu.com



薛乐堂(1980—),男,河南南阳人,博士研究生,主要从事电跟踪与控制技术的研究。E-mail: xut@mail.ciomp.ac.cn

导师简介:



陈涛(1965—),男,内蒙古赤峰人,研究员,博士生导师,主要从事光电精密跟踪测量技术的研究。E-mail: chent@ciomp.ac.cn