

文章编号 1004-924X(2011)11-2671-08

激光电子经纬仪动态跟踪引导系统的设计

周 虎^{*}, 郝继贵, 张滋黎, 叶声华

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:设计了一种基于视觉的激光电子经纬仪跟踪引导系统来提高电子经纬仪工作效率, 实现其在大空间范围内目标点的动态测量。介绍了跟踪引导系统结构组成并分析了外置扫描设备以及激光电子经纬仪的运动特性。建立扫描设备运动学模型, 说明了利用空间坐标转换关系, 通过光轴搜索法实现了经纬仪激光点自动引导的策略。然后, 给出了镜头的变焦控制方法。最后, 提出了基于扩展 Kalman 滤波估值的运动目标动态跟踪方法, 将动态目标物与经纬仪激光点同时定位于摄像机视场中心区域。实验结果表明, 所提方法能够正确预测估计运动目标状态, 经纬仪激光点引导精度最终可达 $0.08 (^{\circ})/m$ 。该系统结合了激光跟踪动态测量以及电子经纬仪不受测量目标类型限制的优势, 实现了基于激光电子经纬仪的传统空间角度交汇方法在动态精密测量领域的应用。

关键词:电子经纬仪; Denavit-Hartenberg 模型; Kalman 滤波器; 目标跟踪; 引导

中图分类号: TH761.1; TH712 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111911.2671

Design of dynamic tracking and guiding system for laser-electronic theodolite

ZHOU Hu^{*}, ZHU Ji-gui, ZHANG Zi-li, YE Sheng-hua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

^{*} Corresponding author, E-mail: zhouhu0728@sohu.com

Abstract: A tracking and guiding system based on machine vision for a laser-electronic theodolite was designed to improve its work efficiency and implement the dynamic measuring in a large space. Systematic architectures of the system was introduced and the motion characteristics of outrigger scanning instruments and laser-electronic theodolite were analyzed. Based on establishing a motion model of scanning instruments, the strategy of automation guidance for laser spots of the theodolite was realized by coordinate transformation and the process of searching the optical axis of a lens. Then, the method to focus and control the lens was given. Finally, the dynamic tracking method using extended Kalman filtering estimation for a moving object was proposed to locate the target and laser spots in a center region of the image simultaneously. The experimental results indicate that the status of the moving object can be predicted accurately and the final guiding accuracy for laser spots has been

收稿日期: 2011-03-22; 修订日期: 2011-05-05.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(No. 50735003); 天津市科技支撑计划重点项目(No. 08ZCGYGX11800)

reached $0.08(^{\circ})/m$. In conclusion, the proposed system combines the advantages of the dynamic measurement process for laser tracking and no limitation in measurement styles for theodolite, which allows the laser-electronic theodolite systems based on traditional angle forward intersection to dynamic measuring fields.

Key words: electronic theodolite; Denavit-Hartenberg model; Kalman filtering; object tracking; guidance

1 引言

近年来,随着国民经济的快速发展和国家装备制造制造业水平的不断进步,航空航天、汽车、船舶制造等行业对大空间坐标测量提出了越来越高的要求。一些需要精密配合的零部件,表面形貌复杂,尺寸可达几十米,使得传统大尺寸测量仪器和方法很难单独完成工件局部形貌和关键点的实际测量^[1]。若在工件近端采用不同类型的可移动式测量设备,并由大尺寸测量仪器作为全局实时坐标控制手段来实现不同类型目标点的动态测量,可以有效提高测量效率,解决工件整体尺寸大与局部空间复杂之间的矛盾。

作为传统的大尺寸测量设备,电子经纬仪能够实现同一目标物中不同位置、不同类型点的测量,但需要对每一测量点进行人工瞄准,测量效率低下^[2];激光跟踪仪以及全站仪可以主动跟踪运动目标,但都需要合作靶镜,不能直接测量待测特征,限制了其适用范围^[3],使得两者都无法应用于指定目标的动态跟踪领域。为综合两类设备优点,兼顾测量效率和使用范围,一些学者搭建了一系列基于数字经纬仪平台的实验系统,如 Kahmen 等人以电视经纬仪和激光经纬仪分别作为主从测站,完成目标点半自动搜索和对准操作^[4]; Niessner 进一步利用彩色 CCD 代替电视经纬仪目镜端的普通相机,借助颜色信息完成复杂目标点的空间坐标计算^[5];马彩文等对电视经纬仪视场内的多目标进行识别与定位^[6]。但受经纬仪望远镜自身视场范围较小的限制,以上各系统均假定被测目标为按一定空间规律分布的高密度静态特征点,或者经纬仪自身处于静止状态,均难以进行大空间范围内目标自动搜索。

本文从组合测量原理出发,将近距离测量设备视为一运动目标,用电子激光经纬仪作为全局

控制设备,设计并实现了一种基于视觉的经纬仪引导跟踪方法。该方法借鉴视频监控领域中广泛采用的电视跟踪技术^[7],利用外置大视场相机代替电视经纬仪成像,使得传统空间角度交汇方法应用于动态测量领域成为可能。由于该方法充分结合了激光跟踪仪可以动态跟踪以及激光经纬仪能够对不同类型特征点进行连续测量的优势,如在机器人柔性视觉检测系统的标定^[8]等现场环境中使用,可以极大地提高工作效率。

2 系统结构及工作原理

电子激光经纬仪自动跟踪引导系统由两台带双轴马达驱动的 TM5100A 电子激光经纬仪、镜头/摄像机、二维运动云台以及工作 PC 组成。摄像机与变焦镜头固定于云台上,可实现大测量空间范围内的连续扫描。DL2 激光器置于经纬仪目镜端,激光束与经纬仪视准轴共线同焦,投射到物体表面的光斑中心即为经纬仪实际瞄准位置。

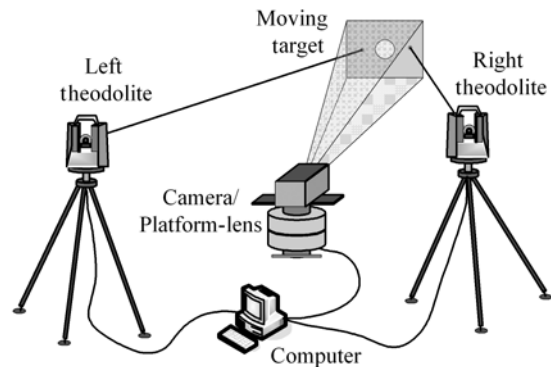


图 1 系统结构

Fig. 1 Systematic architecture

如图 1 所示,系统工作过程分为摄像机跟踪和经纬仪引导及测量两步。PC 机实时处理视频数据并控制云台跟随目标物转动,使固定于目标物表面的引导标记始终出现在摄像机视场内。目

标到达一个新的测量位置并暂停,系统即驱动经纬仪运动,引导激光点进入摄像机视场。

将镜头置于长焦模式,完成当前位置引导标记附近全部特征点的瞄准测量任务^[9]后,缩短镜头焦距,目标物继续运动,系统进入新一轮的跟踪引导-自动测量过程,直至完成全部测量工作。本文主要讨论激光经纬仪跟踪引导方法,不涉及具体的测量过程。

3 跟踪引导模型

3.1 经纬仪激光点引导模型

云台沿水平、俯仰方向扫描时,摄像机-镜头组成的光学扫描系统位姿随之发生改变。将光轴视为一虚拟转轴,利用标准 Denavit-Hartenberg 模型^[10](D-H 模型)分析云台运动过程,可建立如图 2 所示的运动学模型。图中, $O_T X_T Y_T Z_T$ 为定向后的经纬仪坐标系^[11]。 $O_0 X_0 Y_0 Z_0$, $O_1 X_1 Y_1 Z_1$, $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 分别固定于云台水平轴,云台俯仰轴,扫描系统光轴轴线上,并随旋转轴一块绕 Z_i 转动。 $O_c X_c Y_c Z_c$ 亦固定于光轴,其坐标原点位于光心位置。各坐标系 X_i 轴定义为沿 Z_{i-1} 到 Z_i 的公垂线,且指向离开 Z_{i-1} 轴的方向, Y_i 轴由右手法则确定。

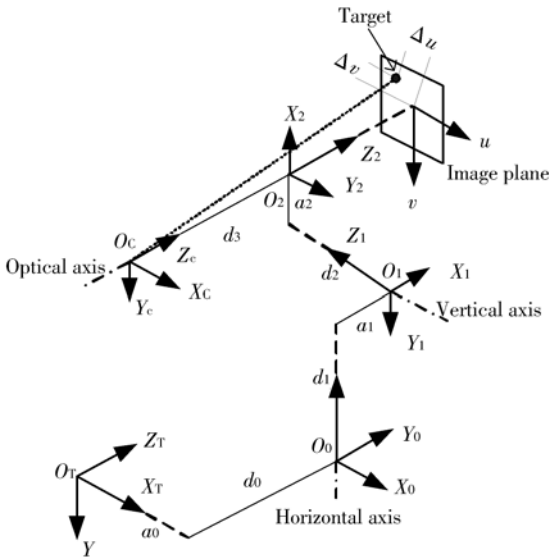


图 2 扫描系统运动学模型
Fig. 2 Motion model of scanning system

同时规定连杆长度 a_i 为 Z_{i-1} 到 Z_i 的公垂线长度,连杆距离 d_i 为两公垂线 a_{i-1} 到 a_i 间的距离,

X_{i-1} 到 X_i 绕 Z_{i-1} 轴的夹角 θ_i 以及 Z_{i-1} 到 Z_i 绕 X_i 轴的夹角 α_i ,称之为 D-H 参数^[12],则相邻坐标系 $i-1$ 到 i 的转换矩阵满足:

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i \alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i \alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

S, C 分别表示求相应角度的正弦、余弦值。除 d_3 为与镜头参数有关的变量, θ_1, θ_2 分别为云台水平轴、俯仰轴旋转角度外,其余各 D-H 参数均为固定值,可利用坐标拟合或者标定方法获得。由式(1),光心坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 到经纬仪坐标系 $O_T X_T Y_T Z_T$ 的转换关系可表示为:

$$F(\theta) = T_T = T_T^0 T_0^1 T_1^2 T_2^3, \quad (2)$$

式中 $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$, 故经纬仪坐标系中光心坐标以及光轴方向矢量可分别表示为:

$$p_T(\theta) = [X_l, Y_l, Z_l]^T = [T_T^0(1,4), T_T^0(2,4), T_T^0(3,4)]^T, \quad (3)$$

$$\alpha_T(\theta) = [n_l, o_l, \alpha_l]^T = [T_T^0(1,3), T_T^0(2,3), T_T^0(3,3)]. \quad (4)$$

若令 $d_3 = 0$, 即 $p_T(\theta)$ 与 O_2 重合,建立过光轴 $l(\alpha_T(\theta), p_T(\theta))$ 及经纬仪 $T_i (i=1, 2)$ 回转中心的平面 $M_i (i=1, 2)$, 并驱动经纬仪视准轴在该平面沿光轴搜索,即可将激光点引导至摄像机视场中心位置,如图 3 所示。

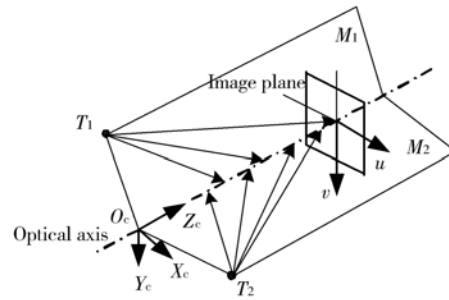


图 3 经纬仪引导方法
Fig. 3 Guidance method for theodolite

3.2 目标跟踪模型

设 t 时刻云台角度值为 $\theta(t) = [\theta_1(t), \theta_2(t)]^T$, 目标物表面引导标记质心 P 在经纬仪坐标系中的实时坐标值为 $P_T(t) = [X_T(t), Y_T(t), Z_T(t)]^T$ 。建立与 $t=0$ 时刻光心坐标系重合的静态坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$, 并设光心 O_c 及点 P 在该坐标系下实时坐标分别为 $p_c(\theta(t)) = [X_{lc_0}(\theta(t)), Y_{lc_0}(\theta(t))]$,

$Z_{c_0}(\boldsymbol{\theta}(t))^T, \mathbf{P}_{c_0}(t) = [X_{c_0}(t), Y_{c_0}(t), Z_{c_0}(t)]^T$ 。由式(2)可知:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{c_0}(\boldsymbol{\theta}(t)) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta}(0)) \begin{bmatrix} \mathbf{P}_T(\boldsymbol{\theta}(t)) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/R_u & 0 \\ 0 & 1/R_v \end{bmatrix} \left[\frac{1}{Z_{c_0}(t) - Z_{lc_0}(\boldsymbol{\theta}(t))} \begin{bmatrix} X_{c_0}(t) - X_{lc_0}(\boldsymbol{\theta}(t)) \\ Y_{c_0}(t) - Y_{lc_0}(\boldsymbol{\theta}(t)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(\theta_1(t) - \theta_1(0)) \\ (\theta_2(t) - \theta_2(0)) \end{bmatrix} \right], \quad (7)$$

括号中第一项为点 \mathbf{P} 相对于光心平移引入的像面位移,第二项为光轴旋转引入的目标附加像面位移,负号表示云台旋转角正方向与像素坐标正方向相反, R_u, R_v 为单位像素对应的视场角。当摄像机与目标距离远大于参数值 a_1, a_2, d_2, d_3 时,可忽略云台旋转造成的光心微小位置偏移 $\Delta p_{c_0}(\boldsymbol{\theta}(t))$,将式(7)改写为:

$$\begin{cases} u(t) = \frac{X_{c_0}(t)/Z_{c_0}(t) - \theta_1(t) + \theta_1(0)}{R_u} + \xi_u \\ v(t) = \frac{Y_{c_0}(t)/Z_{c_0}(t) + \theta_2(t) - \theta_2(0)}{R_v} + \xi_v \end{cases}, \quad (8)$$

式中 ξ_u, ξ_v 为忽略光心位置偏移等原因导致的误差项,可视为随机白噪声处理。上式对时间 t 求导,可得目标在像平面中移动速度:

$$\begin{cases} \dot{u}(t) = \frac{1}{R_u} \left(\frac{Z_{c_0}(t) \dot{X}_{c_0}(t) - \dot{Z}_{c_0}(t) X_{c_0}(t)}{Z_{c_0}^2(t)} - \omega_1(t) \right) \\ \dot{v}(t) = \frac{1}{R_v} \left(\frac{Z_{c_0}(t) \dot{Y}_{c_0}(t) - \dot{Z}_{c_0}(t) Y_{c_0}(t)}{Z_{c_0}^2(t)} + \omega_2(t) \right) \end{cases}. \quad (9)$$

式中 $\omega_1(t), \omega_2(t)$ 为云台水平、俯仰轴旋转角速度。根据式(8)或者式(9),即可对引导标记像面位置预测估值。

3.3 镜头变焦控制方法

由于目标跟踪时引导标记物距属于未知量,很难通过摄像机离线标定制作查找表的方法得到满意的实时焦距参数,故跟踪引导系统采用三可变镜头实现镜头工作模式的自动转换。通常情况下,可分别为广角、长焦模式设置一先验的焦距值,并将连续图像序列中的 robert 梯度作为像距调节依据。即基于爬山法动态调整镜头像距,将

$$G = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} (|f(i, j) - f(i, j+1)| + |f(i+1, j) - f(i, j)| + |f(i, j+1) - f(i+1, j+1)| + |f(i, j) - f(i+1, j+1)|), \quad (10)$$

为最大值或者超过某一阈值时的像距值作为理想

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{c_0}(t) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta}(0)) \begin{bmatrix} \mathbf{P}_T(t) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

以图像中心位置为原点建立像平面像素坐标系,估计点 P 在该坐标系中的位置:

测量位置。其中 M, N 分别为包含目标的图像子区域宽度与高度。

4 跟踪引导过程的实现

直接对每一帧图像进行全局搜索,会得到比较精确的引导标记质心坐标 $(u(t), v(t))$,但是该方法耗时长,不能在线预测目标轨迹。同时,由于现场测量中可能存在的目标遮挡、复杂背景干扰等不利因素,必须采用鲁棒性更好的跟踪策略。Kalman 滤波器^[13]是一个线性递归滤波器,可以由当前运动信息预测目标下一时刻可能出现的区域,预测时具有无偏、稳定和最优的特点,能够有效缩小目标搜索范围,实现实时跟踪。

前端设备存在局部空间范围内相对于摄像机的平移和旋转,导致视场内引导标记位置和形状同时发生改变。采用局部阈值分割方法^[14]区分目标与背景,可令观测向量为:

$$\mathbf{y}(k) = [u(k), v(k), w(k), h(k)]^T, \quad (11)$$

式中离散化时间常数即帧序列 $k = t/\Delta t$, Δt 为摄像机拍摄两帧图像的时间间隔, $(w(k), h(k))$ 为当前图像中引导标记外接矩形的宽度和高度。

实际跟踪过程中云台采用连续驱动模式,即首先计算 t 时刻引导标记质心 P 在视场中的偏转角:

$$\begin{cases} \Delta\theta_u = -R_u u(k) \\ \Delta\theta_v = R_v v(k) \end{cases}, \quad (12)$$

并驱动云台转过相应角度值,云台运动一旦结束或强迫中止立即进入下一轮“计算-驱动”过程以防止引导标记移出摄像机视场。但云台通常以梯形加速模式完成一次水平或者俯仰运动。其目标角度较大时,角速度存在严重的非线性。由式(8),将观测向量改写为只与引导标记运动相关的形式:

$$\mathbf{y}'(k) = [u'(k), v'(k), w(k), h(k)]^T + \boldsymbol{\epsilon}(k), \quad (13)$$

式中

$$u'(k) = u(k) + \frac{\theta_1(k) - \theta_1(0)}{R_u}, \quad (14)$$

$$v'(k) = v(k) - \frac{\theta_2(k) - \theta_2(0)}{R_v}, \quad (15)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}(k)$ 为零均值的观测白噪声,其协方差可定义为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

由于相邻两帧图像拍摄间隔较短,由式(9),可将此时间间隔内引导标记视为匀速运动处理,并将现场各种干扰因素不加区分地作为作用于设备运动过程的随机加速度,从而建立引导标记的四状态方程^[15]:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k+1, k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{W}(k), \quad (17)$$

式中

$$\mathbf{x}(k) = [\mathbf{y}'(k), \dot{\mathbf{y}}'(k)]^T,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & 0 \\ 0 & \mathbf{K} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{2 \times 2} & \mathbf{E}_{2 \times 2} \\ 0 & \mathbf{E}_{2 \times 2} \end{bmatrix},$$

$\mathbf{W}(k)$ 为随机加速度矩阵,可视为方差为 1、均值为 0 的高斯噪声处理,且与 $\boldsymbol{\varepsilon}(k)$ 不相关。 $\dot{\mathbf{y}}'(k)$ 为观测向量 $\mathbf{y}'(k)$ 的帧间变化率,由相邻两帧图像相应观测数据差分得到, \mathbf{E} 为 2×2 单位矩阵。由于观测向量引入非线性项,式(17)构成扩展 Kalman 滤波器状态方程。根据式(11)、(17),并建立 Kalman 滤波器的估值方程组^[16]可完成对引导标记目标运动参数的预测估值和滤波估值,从而实现实时跟踪直至近端设备到达某一测量位置。

此时利用实际镜头参数估算物距 L ,则经纬仪坐标系中引导标记质心坐标 \mathbf{P}_T 满足:

$$[\mathbf{P}_T, 1]^T = \mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) [0, 0, L, 1]^T. \quad (18)$$

在计算得到的 \mathbf{P}_T 位置附近沿光轴搜索,驱动经纬仪使激光点进入摄像机视场后,不断缩小搜索步长,理论上可使激光点无限接近视场中心。

5 跟踪引导实验

将激光视觉传感器作为近端测量设备固定于 ABB IBR2400 工业测量机器人末端法兰盘上,并在传感器某一非工作面布置关键测量点与引导标记。

PC 机控制机器人在某一竖直面内做大空间范围平动,且在轨迹中某些位置短暂停留以模拟传感器测量零件局部关键形貌的过程。经纬仪测量站距机器人基座约 5 m。摄像机以 25 frame/s 的速率拍照并动态跟踪目标运动,CCD 像元尺寸为 $4.3 \mu\text{m} \times 4.6 \mu\text{m}$,云台水平、俯仰角精度为 0.0125° 。在传感器处于测量位置暂停时,系统即引导经纬仪激光点进入摄像机视场。如图 4 所示,传感器侧面中心白色大圆为引导标记,圆形两侧亮斑为经纬仪激光点,黑白相间的同心圆为测量点。

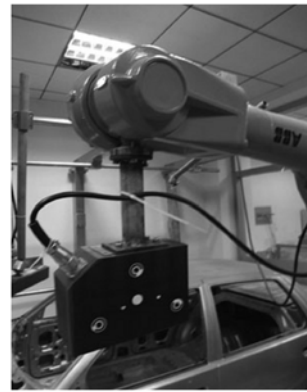


图 4 跟踪引导实验

Fig. 4 Tracking & guidance experiment

表 1 为跟踪引导之前标定得到的各 D-H 模型参数值,其中 θ_1, θ_2 为云台位姿与图 2 一致时的初始角度。

表 1 D-H 参数标定结果

Tab. 1 Calibration results of D-H parameters

参数 序号	α_i / (°)	θ_i / (°)	a_i / mm	d_i / mm
0	90	0	2578.356	335.275
1	-90	90	4.835	207.429
2	-89.09	-90	78.624	0
3	0	90	0	-

表 2 数据为机器人运动到 4 个不同测量位置时,经跟踪引导后得到的经纬仪角度值与精确瞄准引导标记时的理论角度值偏差情况,经纬仪到引导标记的 Z 向距离均以 5 m 计算,表中 $T_{1H}, T_{1V}, T_{2H}, T_{2V}$ 分别表示经纬仪 1、2 的水平角与垂直角度值。由表可知,对于不同测量位置,采用本

跟踪引导方法后,单方向瞄准精度基本控制在 ± 0.08 ($^{\circ}$)/m 水平,选择相应尺寸的受光面,即可在摄像机视场内同时检测到被测目标与激光点。为保证引导效率,经纬仪水平角、垂直角最小搜索步长均为 0.1° 。

表 2 经纬仪引导角度偏差

Tab. 2 Calibration results of D-H parameters

测量位置	经纬仪角度	精确瞄准	引导结果	角度偏差	每米角度偏差
1	T_{1H}	59.6224	59.6478	0.0254	0.0051
	T_{1V}	85.3262	84.9368	-0.3894	-0.0779
	T_{2H}	56.9111	56.7755	-0.1356	-0.0271
	T_{2V}	84.7583	85.0624	0.3041	0.0608
2	T_{1H}	56.2091	56.1713	-0.0378	-0.0076
	T_{1V}	87.0131	86.6612	-0.3519	-0.0704
	T_{2H}	61.5394	61.7705	0.2311	0.0462
	T_{2V}	86.1166	86.5217	0.4051	0.0810
3	T_{1H}	52.4838	52.4703	-0.0135	-0.0027
	T_{1V}	90.0743	89.7506	-0.3237	-0.0647
	T_{2H}	67.6126	67.8201	0.2075	0.0415
	T_{2V}	89.3427	89.7539	0.4112	0.0822
4	T_{1H}	55.4785	55.4941	0.0156	0.0031
	T_{1V}	79.3267	79.0361	-0.2906	-0.0581
	T_{2H}	62.6411	62.7963	0.1552	0.0310
	T_{2V}	77.8164	78.1823	0.3659	0.0732

图 5 为采用扩展 Kalman 滤波器,单次跟踪预测每帧图像中引导标记质心水平、垂直像素坐标与实际位置的偏差值。由于 D-H 参数 d_2 即云台俯仰轴与摄像机光轴距离较大,使得垂直方向质心位置预测偏差较大,但不超过 6 个像素。受云台运动性能的限制,目前允许机器人最高移动

速度为 100 mm/s。

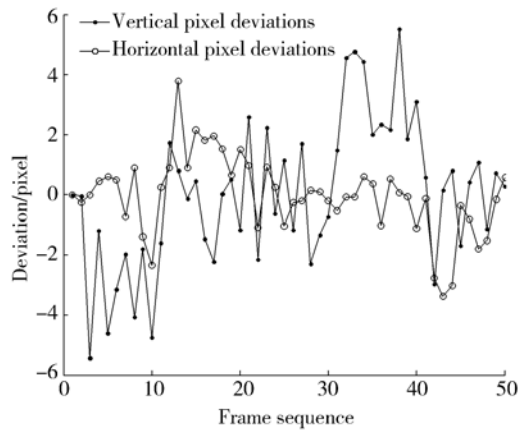


图 5 扩展 Kalman 滤波器估值偏差

Fig. 5 Estimation deviations by extended Kalman filter

6 结 论

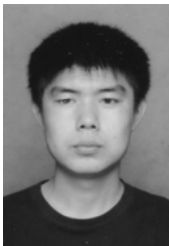
针对光电经纬仪,普通激光电子经纬仪存在视场范围小、实时性较差、不能同步跟踪运动目标的问题,本文设计了基于视觉的激光电子经纬仪跟踪引导系统。通过增加动态性能较好的大视场外置扫描设备,扩展 Kalman 滤波器对运动目标预测估值,再利用光轴搜索法,将电子经纬仪激光点与被测目标同时定位于摄像机视场内,即代替人眼来完成粗略瞄准目标的工作。采用该方法在 5 m 内单方向绝对瞄准精度为 $\pm 0.42^{\circ}$,单位距离瞄准精度可达 ± 0.08 ($^{\circ}$)/m。实验证明,利用电视跟踪技术,可将激光电子经纬仪应用于动态测量领域,满足组合测量的全局控制要求。

参考文献:

- [1] ZHU J G, YE S H, YANG X Y, *et al.*. On-line industrial 3D measurement techniques for large volume objects [J]. *Key Engineering Materials*, 2005, 295-296 (10):423-430.
- [2] 张滋黎, 郝继贵, 耿娜, 等. 双经纬仪三维坐标测量系统设计[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(5): 660-664. ZHANG Z L, ZHU J G, GENG N, *et al.*. The design of double-theodolite 3D coordinate measurement system[J]. *Journal of Transduction Technology*, 2010, 23(5): 660-664. (in Chinese)
- [3] 张博, 魏振忠, 张广军. 机器人坐标系与激光跟踪仪坐标系的快速转换方法[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(9): 1986-1990. ZHANG B, WEI ZH ZH, ZHANG G J. Rapid coordinate transformation between a robot and a laser tracker[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(9): 1986-1990. (in Chinese)
- [4] KALNEN H, REITERER A. Videotheodolite measurement systems-state of the art [C]. *ISPRS Commission V Symposium, Dresden, Germany*; CRC

- Press, 2006:142-146.
- [5] WALSER B H. *Development and calibration of an image assisted total station*[D]. Zurich:Swiss federal institute of technology,2004.
- [6] 马彩文,李艳,柴饶军,等. 电视经纬仪复杂多目标图像处理软件系统的设计与实现[J]. 光子学报, 2004,33(8): 994-998.
- MA C W, LI Y, CHAI R J, *et al.*. Design & realization of complex multi-target image processing software system by TV theodolite[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(8): 994-998. (in Chinese)
- [7] 高韬,刘正光,张军. 基于交通视频序列的多运动目标跟踪算法[J]. 中南大学学报:自然科学版,2010, 41(3): 1028-1036.
- GAO T, LIU ZH G, ZHANG J. Traffic video based multiple moving targets tracking[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2010, 41(3): 1028-1036. (in Chinese)
- [8] 王一,刘常杰,任永杰,等. 通用机器人视觉检测系统的全局校准技术[J]. 光学精密工程,2009,17 (12): 3028-3033.
- WANG Y, LIU CH J, REN Y J, *et al.*. Global calibration of visual inspection system based on universal robots [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (12):3028-3033. (in Chinese)
- [9] ZHOU H, ZHU J G, ZHANG Z L, *et al.*. Resolution improvement of the electronic theodolite in automatic guided laser theodolite system by subdivided locating method of image [J]. *SPIE*, 2008,7160: 201-209.
- [10] 罗天洪,熊小辉. 六自由度重载装配机械手运动学分析及求解[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2009,28(6): 1126-1130.
- LUO T H, XIONG X H. Kinematics analysis and solution of heavy manipulator with 6-DOF[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Science and Technology*, 2009, 28(6): 1126-1130. (in Chinese)
- [11] 周富强,张广军,江洁,等. 现场双经纬仪三维坐标测量系统[J]. 机械工程学报,2004,40(1): 165-169.
- ZHOU F Q, ZHANG G J, JIANG J, *et al.*. Three-dimensional coordinate measuring system with bino-theodolites on site[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(1): 165-169. (in Chinese)
- [12] 单鹏,谢里阳,田万禄,等. 基于 D-H 矩阵的 Stewart 型并联机床位姿误差计算模型[J]. 机械工程学报,2010,46(17): 186-191.
- SHAN P, XIE Y L, TIAN W L, *et al.*. Modeling of position and pose error of stewart machine tool based on D-H transforming matrix [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46 (17): 186-191. (in Chinese)
- [13] 杨金显,袁赣南. 基于 MIMU/GPS 的组合导航设计及实验[J]. 光学精密工程,2008,16(2): 285-294.
- YANG J X, YUAN G N. Design and experiment for INS based on MIMU/GPS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):285-294. (in Chinese)
- [14] 王亮亮,王黎,高晓蓉,等. 两种改进的局部阈值分割算法[J]. 现代电子技术,2009,32(14): 78-80.
- WANG L L, WANG L, GAO X R, *et al.*. Two improved local threshold algorithms [J]. *Modern Electronic Technique*, 2009, 32(14): 78-80. (in Chinese)
- [15] 董刚,肖阳辉,王恩德. 基于预测与波门技术结合的抗红外干扰方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010,30(5): 69-72.
- DONG Y, XIAO Y H, WANG E D. The research on anti-IR anti-interference methods based on combination of prediction with gate technology [J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2010, 30(5): 69-72. (in Chinese)
- [16] 孙中森,孙俊喜,宋建中,等. 一种抗遮挡的运动目标跟踪算法[J]. 光学精密工程,2007,15(2): 267-271.
- SUN ZH S, SUN J X, SONG J ZH, *et al.*. Anti-occlusion arithmetic for moving object tracking[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):267-271. (in Chinese)

作者简介:



周 虎(1982—),男,河北万全人,博士研究生,2006 年于天津大学获得学士学位,主要从事机器视觉及机器人控制方面的研究。E-mail: zhouhu0728@sohu.com



张滋黎(1983—),女,山西朔州人,博士研究生,2005 年、2007 年、2010 年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事激光及光电测试技术,大尺寸测量技术的研究。E-mail: bme_zzl@126.com



郝继贵(1970—),男,安徽无为,人,教授,博士生导师,1990 年、1994 年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位、1997 年于天津大学获得博士学位,主要从事激光及光电测试方面的研究。E-mail: jigui@tju.edu.cn

导师简介:



叶声华(1934—),男,湖北沙市人,教授,博士生导师,院士,1956 年于华中工学院本科毕业,1962 年于天津大学研究生毕业,主要从事激光及光电测量技术方面的研究。E-mail: shhuaye@tju.edu.cn

●下期预告

Golay3 望远镜系统设计

范君柳¹,吴泉英^{1*},王福亮²,沈婷婷²

(1. 苏州科技学院 数理学院,江苏 苏州 215009;2. 苏州大学 信息光学工程研究所,江苏 苏州 215006)

为了保证望远镜系统角分辨率的同时能够减少系统的质量和体积,利用了 Golay3 稀疏孔径取代两镜系统中的主镜,并基于 Zemax 程序对望远镜进行了特性分析及优化。首先利用三级像差理论设计了一套两镜系统,其中主镜是球面,次镜是双曲面;将主镜以 Golay3 稀疏孔径代替,分析了填充因子与子镜半径的关系;然后通过 Zemax 程序对系统进行模拟,分析了系统的调制传递函数特性及点列图;最后在次镜后加入两块熔石英校正镜,并对校正镜表面曲率半径以及成像工作距离进行优化以改进视场。通过 Zemax 程序模拟发现:系统的截止频率随着主镜填充因子的减小而减小,从 $F=22.2\%$ 的 114.5 lp/mm 到 $F=15\%$ 的 97.7 lp/mm 再到 $F=10\%$ 的 77.8 lp/mm;另外成像面之前加入校正镜极大地提高了系统的视场,使加入校正镜之前最大像斑半径均方根值是加入后尺寸的 2.5 倍左右。