

# 基于无标定视觉伺服的激光标记自动跟踪 视频引伸计控制系统设计

张立见, 田秋红, 谢森栋, 陈本永

(浙江理工大学精密测量技术实验室, 杭州 310018)

**摘要:** 本控制系统采用图像雅克比矩阵在线辨识的方法,建立了激光标记与试件标记的实际距离,即激光标记的跟踪位移量到图像空间跟踪位移量的映射关系,不仅避免现有视频引伸计的摄像机标定环节,而且实现了激光标记对试件标记的精密全程跟踪。通过低碳钢和铸铁的拉伸实验,分别实现跟踪精度  $1.8\ \mu\text{m}/10\ \text{mm}$  和  $0.9\ \mu\text{m}/2.5\ \text{mm}$ ,验证了设计的控制系统的有效性和精确性。

**关键词:** 视频引伸计; 激光标记; 摄像机标定; 图像雅克比矩阵; 无标定视觉伺服

**中图分类号:** TH871

**文献标志码:** A

## 0 引言

光电测量技术的发展及视觉图像处理技术的不断完善,为非接触式视频引伸计的研制奠定了坚实基础。视频引伸计一般在被测试件的上、下端口印制标记,然后在拉伸过程中实时跟踪上、下两标记的位移,根据两者的位移之差计算形变量<sup>[1-5]</sup>。方菲等<sup>[6]</sup>提出了宽带激光扫描技术与线阵 CCD 成像技术相结合方法实现材料在加载过程中径缩点位置与径缩量的在线测量。Zhang Ye-wei 等<sup>[7]</sup>提出了一个固定平面上单摄像机测量模型,采用张正友标定法<sup>[8]</sup>进行标定,做了半实物实验验证了利用相机标定实现视频引伸计高精度测量的可行性。Fauster 等<sup>[9]</sup>提出了利用激光器产生两束线结构光射在特制的带有圆孔标定模板上,采用相应的标定算法实时标定,经图像处理计算试件的形变量。由于 CCD 内外参数未知,因此这些方法都需要设计摄像机标定模板和标定算法,且在重复实验中摄像机位置、焦距等参数会改变,因此需重新标定,这使得测量过程繁琐复杂且引入误差。因此,研究无标定技术的高精度视频引伸计具有重要的实际意义。

无标定技术是指在不预先标定摄像机和被测参数的情况下,直接通过图像上的系统状态误差设计实际控制律,驱动被控对象运动,使系统误差收敛到一个允许的误差域内<sup>[10]</sup>。本文设计了一种基于无标定技术的激光标记自动跟踪视频引伸计控制系统,描述了该系统结构和测量原理,采用图像雅克比矩阵方法<sup>[11]</sup>,动态建立了实际空间中激光标记的跟踪位移量到图像空间跟踪位移量的映射关系,构建了基于视觉反馈的激光标记自动跟踪控制算法,并进行实验验证。

## 1 系统结构与测试方法

激光标记自动跟踪视频引伸计的系统结构包括激光标记自动跟踪系统和图像处理系统,如图 1 所示。激光标记自动跟踪系统由伺服电机、反射五棱镜、控制器、CCD 构成。拉伸实验中试件所受拉伸力垂直于水平面,因此即使激光标记宽度在每个采样时刻使激光标记中心点横坐标产生变化,也不会对试件竖直方向的形变测量产生影响,故控制系统只需根据两标记中心点的纵坐标之差制定控制律。经图像处理系统获得试件标记和激光标记中心点在

收稿日期: 2013-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(90923026);浙江省自然科学基金项目资助(Y1110538)

作者简介: 张立见(1988-),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为计算机网络技术。

通信作者: 田秋红,电子邮箱: tianqiu hong@zstu.edu.cn

图像空间中的像素坐标为 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ ,纵坐标之差 $f_{\text{error}} = y_1 - y_2$ 。上位机通过串口通信发送控制指令给控制器,驱动伺服电机旋转,实现激光标记以相应速度对试件标记的实时跟踪。由于 CCD 成像模型是非线性的,导致激光标记与试件标记的实际距离变化到图像特征距离变化的映射关系也是非线性,可见本控制系统是一个具有未建模动态的非线性系统控制问题。

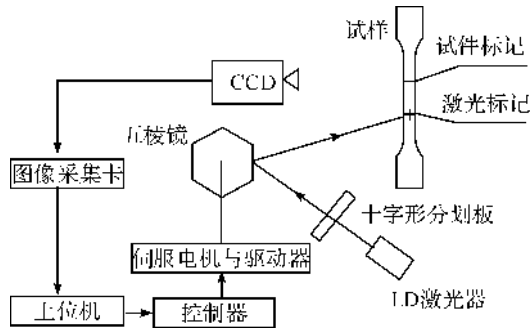


图1 激光标记自动跟踪视频引伸计的结构

本文设计了基于无标定视觉伺服的激光标记自动跟踪引伸计控制系统,采用图像雅克比矩阵在线辨识的方法,建立了实际空间中激光标记的跟踪位移量到图像空间跟踪位移量的映射关系。通过辨识出雅克比矩阵与两标记中心点像素距离差计算出控制量,控制伺服电机带动五棱镜旋转,实现激光标记对试件标记的实时精密跟踪,拉伸过程中的激光标记位移量即为试件形变量。

## 2 激光标记自动跟踪控制建模

CCD 固定在被测试样标记的正前方,记录同一平面内激光标记与试件标记的运动轨迹。由于两者在同一个平面内做二维运动,设激光标记中心点在实际空间坐标系下坐标为 $(x_w, y_w, z_w)$ ,激光标记中心点在 $x$ - $o$ - $y$ 平面运动空间坐标为 $\mathbf{p} = (x_w, y_w)$ 。同时定义激光标记中心点在固定摄像机图像空间坐标 $\mathbf{f}^g = (u_g, v_g)$ 。因此,采用图像雅克比矩阵建立了激光标记中心点与试件标记中心点的实际距离,即激光标记的跟踪位移量到图像空间跟踪位移量的映射关系:

$$\dot{\mathbf{f}} = \mathbf{J} \times \dot{\mathbf{p}} \quad (1)$$

式中:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_g}{\partial x_w} & \frac{\partial u_g}{\partial y_w} \\ \frac{\partial v_g}{\partial x_w} & \frac{\partial v_g}{\partial y_w} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\mathbf{J}$  是摄像机观察激光标记运动的雅克比矩阵,

它与激光标记中心点的当前位置和摄像机的内外参数有关。采用针孔模型描述摄像机的成像投影关系<sup>[12]</sup>,即:

$$\begin{cases} u_g = f \frac{X_c}{Z_c} \\ v_g = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $(X_c, Y_c, Z_c)$ 为激光标记中心点在摄像机坐标系中的坐标, $f$ 为 CCD 的焦距。激光标记实际运动空间坐标到摄像机坐标的变换关系式<sup>[13]</sup>如下:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$ 为 CCD 外参数旋转矩阵,

$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$ 为 CCD 外参数平移矩阵。

由式(1)、(3)、(4)得公式(5):

$$\mathbf{J} = \frac{1}{Z_c} \cdot \begin{bmatrix} f \cdot r_{11} - u_g \cdot r_{31} & f \cdot r_{12} - u_g \cdot r_{32} \\ f \cdot r_{21} - v_g \cdot r_{31} & f \cdot r_{22} - v_g \cdot r_{32} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $(u_g, v_g)$ 为图像空间激光标记中心点的横、纵坐标, $f$ 为 CCD 的焦距, $Z_c$ 是激光标记在摄像机空间的坐标分量, $r_{i,j} (i=1,2,3; j=1,2)$ 为摄像机外参数矩阵成员变量。

可见,在跟踪过程中激光标记运动会引起 $Z_c, u_g, v_g$ 的变化,从而 $\mathbf{J}$ 矩阵随之变化,故需设计 $\mathbf{J}$ 矩阵的在线估计算法。本文采用卡尔曼滤波器实现对 $\mathbf{J}$ 的在线辨识。

定义观察参数矢量 $\mathbf{x}$ 为一个四维矢量,包含雅克比矩阵 $\mathbf{J}$ 的全部参数,即:

$$\mathbf{x} = \left( \frac{\partial u_g}{\partial x_w}, \frac{\partial u_g}{\partial y_w}, \frac{\partial v_g}{\partial x_w}, \frac{\partial v_g}{\partial y_w} \right)。$$

系统状态方程如下:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \boldsymbol{\omega}(k)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{f}^g(k+1) - \mathbf{f}^g(k) = \mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{x}(k) + \boldsymbol{\psi}(k) \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}(k), \boldsymbol{\psi}(k)$ 分别为状态噪声和观察噪声, $\mathbf{x}(k)$ 是系统的状态变量, $\mathbf{z}(k)$ 为激光标记相邻时刻的坐标变化量,作为观测变量。

建立卡尔曼滤波器递推公式如下:

$$\mathbf{Q}(k+1) = \mathbf{P}(k) + \mathbf{R}_1$$

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{Q}(k+1) \cdot \mathbf{H}^T(k) \cdot [\mathbf{H}(k) \cdot \mathbf{Q}(k+1) \cdot \mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}_2]^{-1}$$

$$\begin{aligned} P(k+1) &= [I - K(k+1) \cdot H(k)] \cdot Q(k+1) \\ \hat{x}(k+1) &= \hat{x}(k) + K(k+1) \cdot [z(k+1) - \\ &\quad H(k) \cdot \hat{x}(k)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $R_1, R_2$  为噪声方差阵, 取  $R_1 = 0.8 \cdot I_4, R_2 = 0.8 \cdot I_2$ , 初始值取  $P(0) = 10^6 \cdot I_4$  ( $I_n$  为  $n$  维单位矩阵)。  $K(k+1)$  为卡尔曼增益混合因数矩阵,  $Q(k+1)$  为后验估计协方差矩阵,  $P(k)$  为先验估计协方差矩阵,  $H(k)$  为观测模型矩阵, 将真实状态空间映射成观测空间。

实验中,  $x(k)$  作为卡尔曼滤波器的状态输入。实验开始前, 先记录激光标记的两次线性无关的位移量为  $\Delta p_1, \Delta p_2$ , 然后记下激光标记在图像空间中的位置变化量为  $\Delta f_1, \Delta f_2$ , 计算出  $J$  矩阵初始值<sup>[14]</sup>:

$$\hat{J}(0) = (\Delta f_1 \quad \Delta f_2) \cdot (\Delta p_1 \quad \Delta p_2)^{-1} \quad (8)$$

使用  $\hat{J}(0)$  构成  $\hat{x}(0)$ 。即通过卡尔曼滤波器辨识得出每个采样时刻的  $J(k)$ , 根据式(1)和图像处理获得试件标记与激光标记中心的位置差  $f_{\text{error}}$ 。因此, 求出两标记在实际运动空间的位置之差:  $p_{\text{error}} = J^{-1} \cdot f_{\text{error}}$ 。根据  $p_{\text{error}}$  的纵坐标分量控制伺服电机转速, 使激光标记在一个采样周期内自动跟踪试件标记至两者重合。

### 3 激光标记自动跟踪控制算法

基于无标定视觉伺服的激光标记自动跟踪视频引伸计控制系统如图2所示。通过上述方法获得图像雅克比矩阵, 根据 CCD 的反馈信息利用图像雅克比矩阵计算控制量, 控制伺服电机使激光标记跟踪至期望位置坐标。跟踪算法实现步骤如下。

a) 通过图像处理获得第  $k$  与  $k-1$  时刻的试件标记的坐标根据公式(9)预估  $k+1$  时刻试件标记中心点的图像坐标  $f^{\#}(k+1) = (u_0(k+1), v_0(k+1))$ , 即为  $k$  时刻激光标记的期望坐标。同时获取当前  $k$  时刻激光标记的图像坐标  $f^g(k) = (u_g(k), v_g(k))$ , 本系统中两标记中心点横坐标对系统误差没有影响, 故系统误差可表示为:

$$f_{\text{error}}(k) = f^{\#}(k+1) - f^g(k) = (0, v_0(k+1) - v_g(k))。$$

$$\begin{aligned} \hat{f}^{\#}(k+1) &= f^{\#}(k) + (f^{\#}(k) - f^{\#}(k-1)) = \\ &2f^{\#}(k) - f^{\#}(k-1) = (u_0(k+1), \\ &2v_0(k) - v_0(k-1)) \end{aligned} \quad (9)$$

b) 通过卡尔曼滤波器观测出两标记位置关系的雅克比矩阵  $J(k)$ 。

c) 根据公式(1), 等式两边左乘矩阵  $J(k)^{-1}$ , 根

据公式(10)计算出激光标记实际空间中的位移量  $\dot{p}(k)$ 。

$$\dot{p}(k) = J(k)^{-1} \cdot (0, v_0(k+1) - v_g(k))^T \quad (10)$$

d) 根据公式(11)计算出  $P_{\text{error}}$  控制伺服电机转速, 带动五棱镜旋转。使激光标记在试件上扫描  $P_{\text{error}}$  位移量, 实现激光标记对试样标记的自动跟踪。

$$P_{\text{error}} = K \cdot \dot{p}(k) \quad (11)$$

式中:  $K$  为伺服电机速度响应约束参数, 取  $K = \frac{(v_0(k+1) - v_g(k))}{\dot{p}_k[2, 1]}$ , 避免了系统产生较大的超调。

$\dot{p}_k[2, 1]$  是  $2 \times 1$  矩阵  $\dot{p}(k)$  的元素。

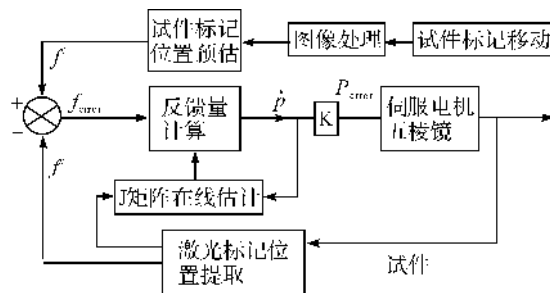


图2 激光标记自动跟踪引伸计的控制系统

### 4 实验结果

为了验证设计的激光标记自动跟踪视频引伸计控制系统的可行性, 搭建了如图3所示的实验装置。CCD 摄像机图像分辨率  $k_s$  为被测试件的直径与试件直径的像素个数的比值, 本实验中使用材料直径  $D = 10 \text{ mm}$ , 经计算得图像空间中材料直径所占像素个数为 65 pixel, 可得 CCD 的分辨率为  $k_s = 0.15 \text{ mm/pixel}$ 。试验机为济南试金集团 WOW-100 微机控制电子万能试验机, 伺服电机采用三菱 HF-KP13 永磁交流伺服电机, 通过不同频率的脉冲串控制其转速, 电子齿轮参数设定为 0.4, 采用最大分辨率 262 144 脉冲/r, 此时伺服电机的步距角为  $\Delta\theta = 5.5 \times 10^{-4}^\circ$ 。五棱镜到试件的距离  $L = 50 \text{ cm}$ , 伺

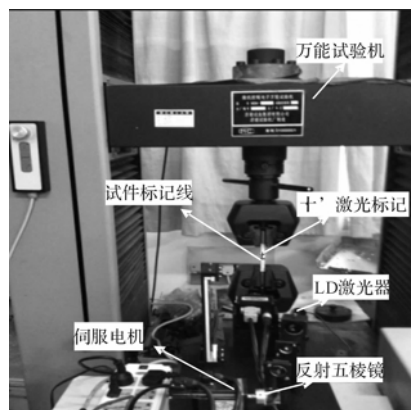


图3 激光标记自动跟踪视频引伸计实验系统

电机转动一步激光标记在试件上扫描位移为  $4.7 \mu\text{m}$ , 系统的采样周期是  $60 \text{ ms}$ 。

实验前, 激光标记和试样标记中心点不重合, 测得两标记中心点距离大约为  $10 \text{ mm}$ 。低碳钢拉伸实验中, 取  $(\Delta f_1 \quad \Delta f_2) = \begin{pmatrix} 4 & 6 \\ 5 & 6 \end{pmatrix}$ , 则  $(\Delta p_1 \quad \Delta p_2) = \begin{pmatrix} 4 \times k_s & 6 \times k_s \\ 5 \times k_s & 6 \times k_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.6 & 0.9 \\ 0.75 & 0.9 \end{pmatrix}$ 。根据公式(8)可得雅克比矩阵的初始值:  $\hat{J}(0) = \begin{pmatrix} 0.15 & 0 \\ 0 & 0.15 \end{pmatrix}$ 。因此, 初始阶段  $k_s$  的大小会影响图像雅克比矩阵的准确性, 产生跟踪误差。但在此后的每个采样时刻, 系统会根据激光标记的跟踪运动信息, 利用卡尔曼滤

波器对图像雅克比矩阵辨识获得其准确值, 由  $k_s$  带来的跟踪误差在  $0.6 \text{ s}$  内被修正, 从而实现激光标记对试件标记的精确跟踪。

图像空间中两标记中心点坐标初始距离差为  $f_{\text{error}}(0) \approx (0, 10)^T (\text{pixel})$ , 取  $K=0.188$  激光标记实际空间的跟踪位移量为:  $P_{\text{error}} = \hat{J}(0)^{-1} \cdot f_{\text{error}}(0) \cdot K \approx 9.97 \text{ mm}$ 。在每个采样周期内, 利用卡尔曼滤波器更新雅克比矩阵, 然后计算出激光标记实际空间的跟踪位移量, 实现对试件标记的全程精密跟踪。拉伸过程中, 如图 4(b) 所示: 曲线的第一个跳跃点取  $K=0.662$ , 第二跳跃点取  $K=0.532$ , 其它时刻取  $K=0.26$ 。

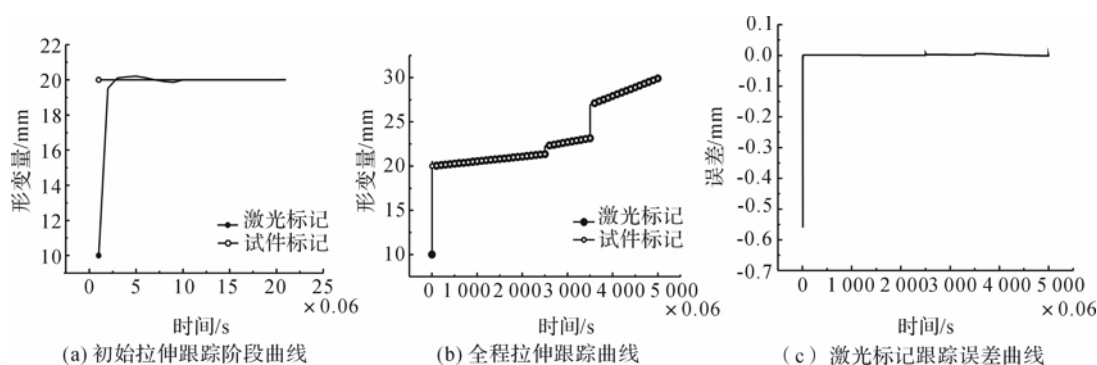


图4 低碳钢拉伸激光标记跟踪曲线

如图 4 所示, 低碳钢的形变量为  $10 \text{ mm}$  左右; 由图 4(a) 所示激光标记在初始跟踪阶段产生较小超调; 由图 4(b) 所示在整个跟踪过程中除上述超调外其他时刻跟踪性能良好, 激光标记的轨迹与试件标记运动轨迹完全重合; 如图 4(c) 所示, 初始时刻由于要求系统响应速度快, 因此会产生  $0.03 \text{ mm}$  左右的超调误差。跟踪过程中除低碳钢屈服和颈缩起始阶段曲线波动之外, 整个跟踪过程误差趋于 0, 图像雅克比矩阵的在线估计准确性较高。根据低碳钢拉伸跟踪误差数据、标准差公式, 计算出系统跟踪精度为  $1.8 \mu\text{m}/10 \text{ mm}$ 。

铸铁拉伸实验中, 两标记中心点距离大约为  $10$

$\text{mm}$ , 雅克比矩阵的初始值与低碳钢相同, 图像空间初始系统误差约为  $10 \text{ pixel}$ 。初始时刻取  $K=0.187$ , 得到的实际跟踪量约为  $10 \text{ mm}$ 。其他时刻取  $K=0.40$ 。跟踪曲线如图 5 所示。铸铁拉伸过程形变量为  $2.5 \text{ mm}$  左右。在初始阶段激光标记能够快速响应跟踪上试件标记, 且没有明显超调, 整个跟踪过程两标记重合。如图 5(c) 所示, 初始时刻由于要求系统响应速度快, 因此会产生  $0.009 \text{ mm}$  左右的超调误差, 整个过程跟踪误差趋于 0, 图像雅克比矩阵的在线估计准确性较高。根据铸铁拉伸跟踪误差数据、标准差公式, 计算出系统跟踪精度为  $0.9 \mu\text{m}/2.5 \text{ mm}$ 。

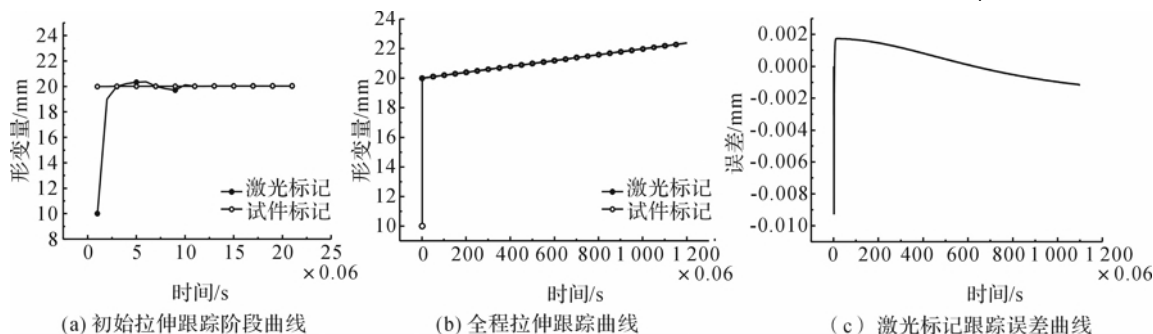


图5 铸铁拉伸激光标记跟踪曲线

## 5 结 论

本文设计并实现了一种基于无标定技术的激光标记自动跟踪视频引伸计控制系统。在摄像机参数、试样标记和激光标记运动与图像中位置变化的映射关系、以及试件标记的运动轨迹都是未知的情况下,系统采用了卡尔曼滤波器在线辨识图像雅克比矩阵的方法,实现了激光标记对试样标记的实时精密全程跟踪,避免了视频引伸计需对摄像机在线标定的环节。用低碳钢和铸铁材料的试样对该控制系统进行了实验验证,获得了试样拉伸形变量。

构建的激光标记自动跟踪式视频引伸计的控制系統,对实现视频引伸计准确、快捷地测量材料形变量具有重要意义,此外图像雅克比矩阵需要在线实时更新与求逆,会存在矩阵的奇异性问题。文中通过选取优良的初始值以及适当改变观测噪声矩阵的方法,解决了图像雅克比矩阵的奇异性问题,在以后的研究中将继续完善与优化,提高整个系统的跟踪精度和稳定性。

### 参考文献:

- [1] 王庆友,于涓汇,郭青德,等. 利用线阵 CCD 非接触测量材料变形量的方法[J]. 光电工程, 2002, 29(4): 20-24.
- [2] 张 宇,王一丁,郭树旭. 提高引伸计测量精度的小波去噪方法研究[J]. 光电子·激光, 2006, 17(8): 930-933.
- [3] 张新洁,谢哲东. 用于精密位移测量的视频引伸计系统的研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 61-65.
- [4] 张英杰. 基于视频图像的应变精密测量研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006: 1-64.
- [5] 门廷武,李新军,吕晓东. 金属拉伸试验中基于刻线的非接触实时应变测量[J]. 机械工程与自动化, 2007(5): 83-85.
- [6] 方 菲,王红平,曹国华. 材料拉伸过程颈缩量非接触检测方法的研究[J]. 长春理工大学学报, 2004, 27(3): 89-91.
- [7] Zhang Y W, Zhou F Q, Wang S. Design and simulation of high-precision video extensometer based on camera calibration[C]//International Conference on Multimedia Technology. Hangzhou, 2011: 6295-6298.
- [8] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [9] Fauster E, Schalk P, OLeary P L. Evaluation and calibration methods for the application of a to video-extensometer tensile testing of polymer materials[C]//Conference on Machine Vision Applications in Industrial Inspection XIII, 2005, 5679: 187-198.
- [10] 郭蓝彬. 基于图像雅克比矩阵的无标定工业机器人视觉伺服[D]. 西安: 西安理工大学, 2006: 1-51.
- [11] Weiss L E. Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, RA-3(5): 404-417.
- [12] 张剑清,潘 励,王树根. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009: 1-303.
- [13] 徐明飞. 摄像机线性标定方法[D]. 长春: 吉林大学, 2009: 1-48.
- [14] 马建章. 移动机器人的目标识别与运动跟踪[D]. 天津: 河北工业大学, 2007: 1-59.

## Design of Control System of a Laser Mark Automatic Tracking Video Extensometer Based on Uncalibrated Visual Servoing

ZHANG Li-jian, TIAN Qiu-hong, XIE Sen-dong, CHEN Ben-yong

(Precision Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** This control system uses image Jacobian matrix online identification method to establish the actual distance between laser mark and specimen mark, i. e. the mapping from laser mark tracking displacement to image space tracking displacement, which not only avoids camera calibration link of existing video extensometer, but also realizes whole process precision tracking of specimen mark by laser mark. In low-carbon steel and cast iron tensile tests, tracking precision  $1.8 \mu\text{m}/10 \text{ mm}$  and  $0.9 \mu\text{m}/2.5 \text{ mm}$  have been achieved respectively, which verifies the validity and precision of the designed control system.

**Key words:** video extensometer; laser mark; camera calibration; image Jacobian matrix; uncalibrated visual servoing

(责任编辑: 康 锋)