

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107412

基于改进 L-K 光流法的电缆断裂伸长率测量技术*

陈俊松¹, 龚俊², 张格悠¹, 刘凯¹

(1. 四川大学电气工程学院 成都 610065; 2. 成都产品质量检验研究院有限责任公司 成都 610041)

摘要:针对现有电缆断裂伸长率测量方法稳定性差、自动化程度低的缺陷提出了一种基于改进 L-K 光流法的电缆断裂伸长率测量方法。首先,在待测电缆表面的两端,使用一种黑色圆环标记符构建特征点。然后采用边缘提取和圆度计算等方式获取电缆标记符的初始形心位置,并与 Harris 算法检测出的特征点按欧氏距离最小的原则匹配,从而实现特征点的自动选取。接着在电缆拉伸的过程中,使用改进的 L-K 光流法追踪特征点并实时计算特征点的加速度和间距。本文提出了一种加速度突变判据,该判据能够准确定位电缆断裂所在帧,从而解决了人工判定电缆断裂瞬间精度差的问题。最后根据电缆变形前后特征点间的距离计算得到电缆的断裂伸长率。实验测得电缆断裂伸长率平均误差为 2.78%,算法平均速度为 21 frames/s,表明本文算法能够快速准确地测量电缆断裂伸长率。

关键词: 断裂伸长率;特征点检测;光流法;目标追踪;Harris 算法

中图分类号: TH741 O438 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

An improved L-K optical-flow-based measurement of cable elongation at break

Chen Junsong¹, Gong Jun², Zhang Geyou¹, Liu Kai¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Chengdu Institute of Product Quality Inspection Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: The existing cable elongation at break measurement methods have defects of poor stability and low automation degree. To address these issues, a method based on the improved L-K optical flow is proposed. Firstly, black ring markers at both ends of the cable surface are used to extract feature points. Secondly, edge extraction and roundness calculation are utilized to obtain the initial centroid positions of the markers. The centroid with the feature points detected by the Harris algorithm is matched according to the principle of minimum Euclidean distance. In this way, the automatic selection of feature points is achieved. During the process of cable stretching, the improved L-K optical flow method is used to track the feature points and calculate the acceleration and spacing of the feature points in real time. An acceleration mutation criterion is proposed, which can accurately locate the frame where the cable breaks. The problem of poor accuracy of artificial judgment at the cable rupture moment is solved. Finally, according to the distance between the feature points before and after the cable deformation, the elongation at break of the cable is calculated. Experimental results show that the average error of cable elongation at break is 2.78%, and the average speed of the algorithm is 21 frames/s. Results indicate that the algorithm can measure the cable elongation at break quickly and accurately.

Keywords: elongation at break; feature point detection; optical flow method; target tracking; Harris algorithm

0 引言

电缆参数的准确测量对于把控电缆产品的质量有着重要作用,而电缆的断裂伸长率^[1]是评估产品是否合格

的重要参数之一,因此精确地测量电缆的最大形变显得尤为重要。目前,传统的电缆参数测量主要使用人工检测技术,测量方式是使用拉伸装置对电缆进行拉伸,并将直尺与电缆线平行放置,人工地判断电缆断裂瞬间的同时测量标记点间距。人工检测的方式使得测量效率低、

收稿日期:2021-01-19 Received Date: 2021-01-19

* 基金项目:国家自然科学基金(61473198)、四川省科技厅重点研发项目(2020YFG0029)资助

成本高,且有一定的安全隐患。智能化的检测方案能够极大地提升测量精度与效率,对电缆产品质量起到更加严格的把控作用,促进电缆行业高质量发展^[2]。

特征检测与运动跟踪是基于连续图像的运动结构重建研究的核心内容^[3]。特征点是指图像中的角点、边缘、纹理等潜在兴趣点,常见的 Speeded-Up Robust Features^[4]、Small Univalue Segment Assimilating Nucleus^[5]、Difference of Gaussians^[6]、Hessian-Laplace^[7]算法均能有效地检测出图像特征点,并有各自的优势场景。Harris 角点检测算法^[8]因其计算简单、运行速度快,角点检测稳定高效的优点而被广泛应用。该算法通过特定窗口滑动引起灰度值变化的方式找出图像中的兴趣点,并利用响应函数检测出图像中的所有角点,在实际运用中拥有良好的实用性。运动目标追踪是指通过图像序列根据追踪目标的先验信息预估其在下一帧图像中的信息,较为常用的运动目标检测算法有帧间差分法,光流法,背景减除法。Gibson 等^[9]于 1950 首次提出了光流的概念:空间运动的物体在二维图像序列中产生像素运动的瞬时速度即为光流,一类新的运动目标检测算法随之产生。Lucas 等^[10]和 Horn 等^[11]提出了不同光流约束条件,分别产生了 L-K (Lucas-Kanade) 光流算法和 H-S (Horn-Schunck) 光流算法两大经典算法,前者的追踪对象通常是多个具有明显特征的点,其优势在于跟踪相对稳定,且因其计算开销小而带来良好的实时性;后者属于稠密光流的范畴,对图像中的某一区域逐像素匹配后计算区域内所有像素点的偏移量以形成稠密光流场,跟踪精度高,但计算耗时长,难以满足实时跟踪要求。

光流法广泛地应用于测量和运动跟踪领域。孙平等^[12]提出了一种基于 L-K 局域光流的测量技术,能够通过两幅条纹图准确地恢复物体面形高度分布。类智方等^[13]通过分析对比 H-S 光流法和 L-K 光流法,得出了光流法在位移测量中分辨力强,测量精度高的结论。李成美等^[14]提出了三帧差分法、Shi-Tomasi 角点检测和金字塔 L-K 光流法相结合的跟踪算法,能够稳定地跟踪目标且有较好的实时性,但有较大的跟踪误差。陈昊等^[15]采用对原始图像进行奇异值分解的方式消除灰度值异常对光流计算的影响,利用金字塔分层细化方法提高光流计算的准确性,最后根据光流生成的伪彩色图像,实现对轴承滚子表面缺陷的检测。伍济钢等^[16]提出了光流点匹配跟踪的薄壁件振动模态测试方法,利用 L-K 光流法有效地避免了逐帧进行特征分割、提取等复杂的图像处理。黄鑫等^[17]利用强角点和光流法对运动车辆进行追踪,能够准确检测出车辆的异常行为。林宇凌等^[18]提出的基于 L-K 光流法的速度检测方法能够有效检测微流控芯片中流体的速度。高振斌等^[19]提出的电缆拉伸长度测量方法中采用阈值分割法提取标记点边缘,利用标记符的

重心得到标记符间距,一定程度上能减小标记符形变的影响,但并未提出有效判断电缆断裂瞬间的方法。现有方法不能较好地处理电缆断裂瞬间的判定和标记符形变对测量产生影响的问题。

电缆断裂伸长率的测量任务中,电缆断裂瞬间的判定是影响测量精度的关键因素,人工判定电缆断裂的方式精度低,主观性强,仅使用图像处理技术不利于对电缆是否断裂进行界定。本文提出的加速度阈值判据能够有效解决该问题,获取圆环标记符的特征点后,采用改进后的 L-K 光流法实时追踪特征点,并同步计算特征点的加速度等运动信息,通过判定加速度突变的方式准确定位电缆断裂所在帧。L-K 光流法的优势在于,相较于稠密光流法计算量小,能够满足实时追踪所需的快速性要求;追踪稳定,能够在目标点运动速度相对较大的情况下表现稳定;基于特征点的追踪能够降低标记符形变对测量产生的影响。该测量方法原理简单,具有较高精度和实用性,并且可推广到其他材料的形变测量中。

1 原 理

1.1 Harris 角点检测算法

Harris 角点检测能够快速有效地检测出图片中的特征点。角点是指窗口沿着任意方向滑动均会引起窗口内图像灰度值剧烈变化的点,通常是轮廓交点等灰度梯度有明显变化的区域。由窗口函数 $w(x,y)$ 所在区域移动引起的灰度变化可表示为:

$$E(u,v) = \sum_{x,y} w(x,y) [I(x+u,y+v) - I(x,y)]^2 \quad (1)$$

其中, $I(x,y)$ 和 $I(x+u,y+v)$ 分别为窗口移动前后图像的灰度值。对 $I(x+u,y+v)$ 进行泰勒展开,并忽略高阶无穷小可得到:

$$I(x+u,y+v) = I(x,y) + \frac{\partial I}{\partial x}u + \frac{\partial I}{\partial y}v \quad (2)$$

满足窗口移动为微小移动时,将式(2)代入式(1),可近似将灰变化表示为:

$$E(u,v) \cong [u,v]A \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$A = \sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} & \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y} \\ \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y} & \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其特征值的分布反映了角点的存在情况。为简化特征值分布的判断,Harris 等在文献[2]设计了响应函数,其表达式为:

$$CRF = \det \mathbf{A} - k(\text{trace } \mathbf{A})^2 \quad (5)$$

其中, $\det \mathbf{A}$ 为矩阵 $\mathbf{A}$ 的行列式; $\text{trace } \mathbf{A}$ 为矩阵 $\mathbf{A}$ 的迹; k 为常数; CRF 为响应函数值, 其值的大小反映了角点存在可能性的大小, 响应函数使特征点检测过程变得更为简便。通过上述方法检测出图像中所有角点后, 将角点与标记符形心按欧氏距离最小的原则匹配筛选出目标特征点, 进一步地, 采用 L-K 光流法追踪目标特征点。

1.2 L-K 光流法

金字塔 L-K 光流法是在传统光流法的基础上引入图像金字塔理论^[20], 使得光流算法能够良好追踪运动速度相对较大的特征点。光流法的基本假设条件为: 1) 同一目标在不同帧的图片中亮度恒定不变; 2) 相邻帧间目标对象的运动距离相对较小。设任意特征点 $I(x, y, t)$ 在下一帧图像中为 $I(x + dx, y + dy, t + dt)$, 根据亮度恒定的假设有:

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt) \quad (6)$$

设 $\mathbf{u} = \frac{dx}{dt}$, $\mathbf{v} = \frac{dy}{dt}$ 分别为光流沿二维坐标轴的速度矢量。

令 $I_x = \frac{\partial I}{\partial x}$, $I_y = \frac{\partial I}{\partial y}$, $I_t = \frac{\partial I}{\partial t}$ 分别表示图像中像素点 $I(x, y, t)$ 分别对于 x, y, t 的偏导数, 则可得到基本的光流约束方程^[10]:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (7)$$

该约束方程中含有 u, v 两个未知量, 需添加约束条件才能得到准确解。L-K 光流法引入了目标像素点的邻域内光流相同的附加条件, 即同一场景下像素点的邻近像素点有相同的速度, 设该邻域为的 $m \times m$ 窗口内共有 n 个像素点, 则可由基本的光流约束条件建立方程组, 其矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} \\ I_{x2} & I_{y2} \\ \vdots & \vdots \\ I_{xn} & I_{yn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{t1} \\ I_{t2} \\ \vdots \\ I_{tn} \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

采用最小二乘法对方程(8)进行求解, 可得

$$\mathbf{V} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T (-\mathbf{B}) \quad (9)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} & \cdots & I_{xn} \\ I_{x1} & I_{y1} & \cdots & I_{yn} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

$\mathbf{V} = [u \ v]^T$, $\mathbf{B} = [I_{t1} \ I_{t2} \ \cdots \ I_{tn}]^T$, 从而计算出目标特征点的光流矢量 $\mathbf{V}$ 。L-K 光流法的基本条件之一为假定目标运动为微小运动, 当目标移动速度较大时, 算法的追踪会出现较大误差。因此, 引入金字塔分层的方法缩小图像尺寸, 从而降低目标的运动速度。金字塔分层的处理方式, 首先将每一帧图像建立高斯金字塔, 并按分辨率从低到高从金字塔顶层至底层排列。从顶层开始, 目

标像素点的光流通过最小化其邻域范围内的匹配误差和得到。除顶层外的每层图像尺寸大小是其上一层的尺寸的一半, 设原图像中目标位移为 d , 则金字塔每一层中目标位置可表示为:

$$d^L = \frac{d}{2^L} \quad (11)$$

其中, L 代表金字塔图像的层数。将顶层光流的结果反映到次顶层, 并作为该层的光流估计值 g , 则次顶层的光流可表示为:

$$g^{L-1} = 2(g^L + d^L) \quad (12)$$

在每一层图像中, 首先通过光流估值相应地移动邻域窗口以获得较小的残差位移向量, 满足了小运动这一假设条件, 便能够使用标准 L-K 算法进行计算。然后通过最小化匹配误差函数值的方式获得该层的光流, 依次迭代可将金字塔底层的目标位移 d 表示为:

$$d = g^0 + d^0 \quad (13)$$

通过光流的分层累积将目标的较大运动转化为相对较小的运动, 从而处理目标的大像素位移, 实现目标点的稳定追踪, 算法过程由图 1 所示。

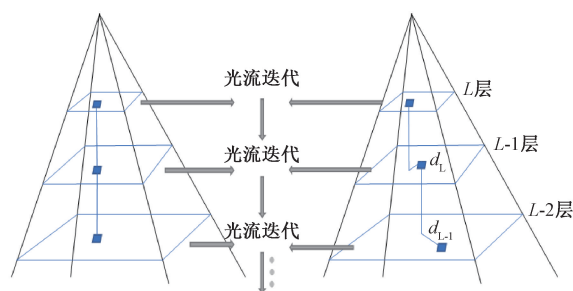


图 1 金字塔光流迭代^[10]

Fig. 1 Pyramid optical flow iteration^[10]

2 基于 L-K 光流法的自动测量技术

为了实现电缆断裂伸长率的准确测量, 本文设计了电缆断裂伸长率测量系统, 测量系统由微机控制电子万能试验机、摄像机和计算机构成, 万能试验机实物图和测量系统简图分别如图 2 和 3 所示。

该测量系统通过摄像机实时拍摄电缆拉伸画面并传输到计算机中, 由计算机完成相应的图像处理与测量任务。并提出了一种自动化测量方案, 算法流程图如图 4 所示。

该测量方案主要由特征点选定和特征点追踪两部分构成, 前者通过图像预处理获得标记符形心位置, 并与 Harris 算法检测出的特征点按欧氏距离最小的原则匹配实现, 后者采用改进后的 L-K 光流法追踪目标特征点, 并通过加速度阈值判断判断电缆断裂后完成测量任务。

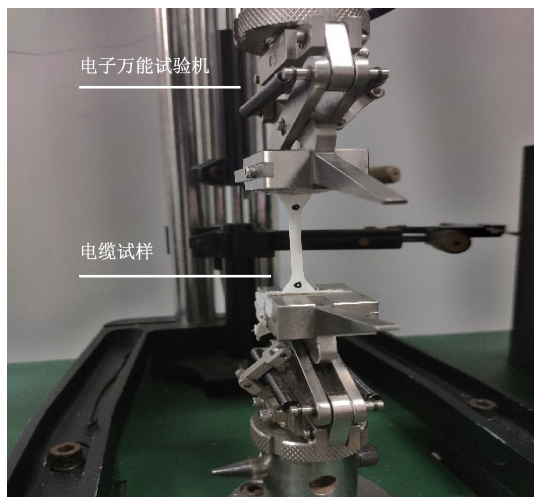


图2 万能试验机实物图

Fig. 2 Universal testing machine physical picture

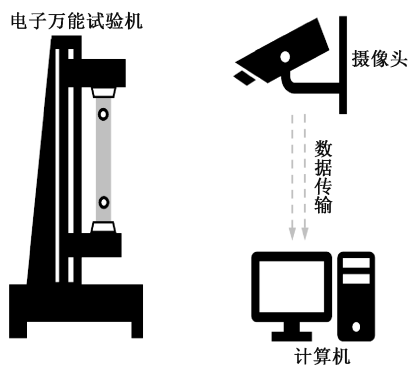


图3 测量系统简图

Fig. 3 Sketch diagram of the measurement system

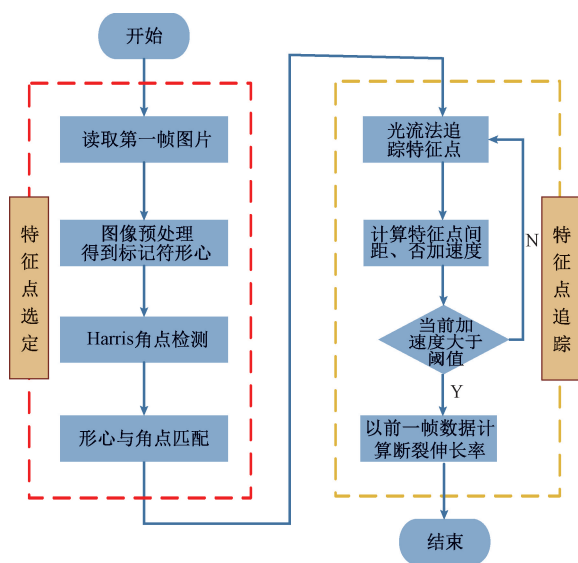


图4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart

2.1 特征点选定

通常,电缆线表面光滑、颜色均匀,特征点检测算法难以在电缆线上检测出特征点。因此,我们在电缆线两端绘制一种如图5所示的圆环标记符,从而完成特征点的构建。角点是指窗口沿着任意方向滑动均会引起窗口内图像灰度值剧烈变化的点,标记符中心的白色区域与角点的特征高度符合,且黑色圆环能够与白色电缆形成强烈色差,实验表明,特征点检测算法能够准确检测出圆环标记符的中心位置。



图5 标记符示意图

Fig. 5 Marker diagram

测量系统采集到的原始图像如图6(a)所示,通过设定阈值为100将原始图像二值化处理后得到如图6(b)所示结果。对二值化后的图像进行轮廓追踪^[21]得到若干连通域,再利用连通域面积阈值滤除大量无效边缘。考虑到标记符为圆环图案,计算剩余连通域圆弧度,通过圆弧度阈值(本文取值为0.7)准确地筛选出了目标标记符,目标标记符的筛选结果如图6(c)中圆环区域所示。进一步地,根据圆环边缘信息计算得到圆环中心点坐

(a) 原始图像
(a) Original image(b) 图像二值化
(b) Image binarization(c) 特征点提取
(c) Marker extraction



(d) 特征点匹配
(d) Feature point matching

图6 特征点的选定

Fig. 6 Feature points selection

标,使用 Harris 算法检测图像特征点,然后按照欧氏距离最小的原则将圆环中心点与特征点匹配,角点匹配结果如图 6(d) 中圆点所示,从而实现了目标特征点的自动选取。

2.2 特征点追踪

电缆拉伸过程中,以特征点初始位置为基础,利用改进 L-K 光流法在每一帧图像中预估目标光流信息,实现对标记符的稳定追踪。通过每一帧图像中目标特征点的坐标信息和特征点间初始距离,实时计算并保存特征点的速度、加速度和特征点间距,分别绘制坐标图如图 7 所示。

从图 7 中可观察到在实验进行前半程加速度数值相对稳定,并且在电缆断裂瞬间产生的突变最为剧烈,因此用加速度的突变作为电缆断裂的判断条件最为合适。在图像的每一帧中存在着高斯噪声,这些噪声对像素灰度值产生的影响会导致追踪的坐标产生高斯误差。类似地,标记点在空间中同样会产生服从高斯分布的抖动。因此,我们可近似地认为电缆断裂前的加速度 a 服从期望为 μ 标准差为 σ 的高斯分布:

$$f(a | \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(a-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (14)$$

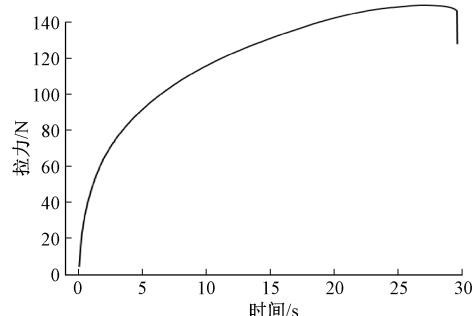
当电缆断裂时,加速度的突增使其不再服从正态分布,因而将电缆断裂的条件设置为:

$$a > \mu + 5\sigma \quad (15)$$

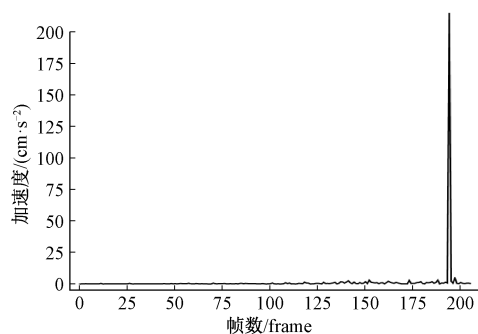
其中,系数 5 为实验后得到的经验参数。在图 7(b) 中可观察到在电缆拉伸过程中,特征点的加速度存在一定程度的波动,若该系数过小,则会将实验中的抖动误判为电缆断裂;若该系数过大,则无法判定出电缆断裂。因此,应根据实验环境合理调整该参数。并要求当前加速度大于一定常数(本文取 $1.6 \text{ pixel/frame}^2$),判定为电缆断裂,将前一帧中标记点间的距离作为断裂长度,通过电缆拉伸前后特征点间的距离即可计算出电缆的断裂伸长率。

2.3 改进的 L-K 光流法

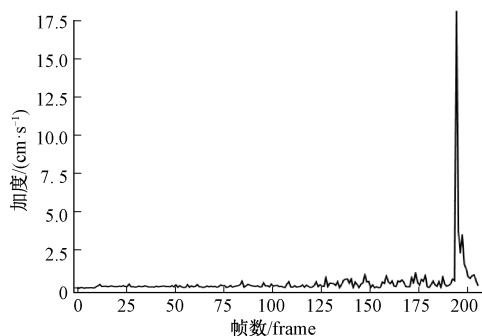
光流法的主要缺点一方面在于缺乏对特征点的选



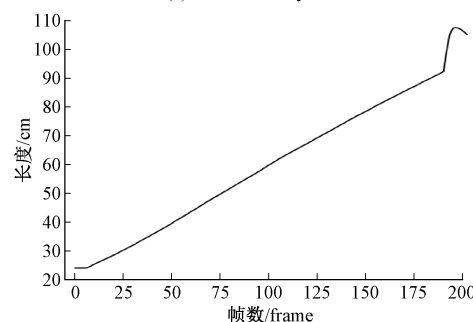
(a) 时间-拉力曲线
(a) Time-tension curve



(b) 帧数-加速度曲线
(b) Frame-acceleration curve



(c) 帧数-速度曲线
(c) Frame-velocity curve



(d) 帧数-长度曲线
(d) Frame-length curve

图7 标记符实验数据

Fig. 7 Marker experimental data

定,因而会追踪检测出的所有特征点,无法满足实际需求,本文采用绘制标记符构建特征点,并用图像处理技术自动选取目标特征点的方式解决了该问题;另一方面缺

少对追踪情况的度量,无法判断是否“跟丢”目标,且算法中金字塔层数这一参数须根据实际情况人工调整,对此本文提出了如图8所示的改进方案。

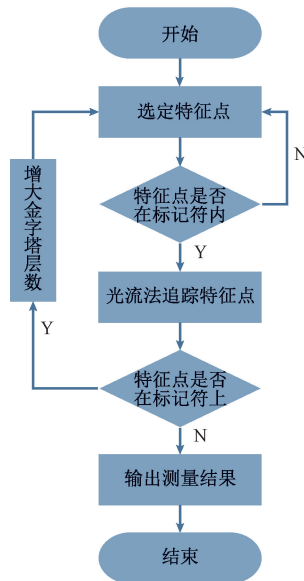


图8 特征点追踪判定与参数调整流程图

Fig. 8 Flow chart of feature point tracking and parameter adjustment

对于角点检测与图像处理得到的目标特征点首先依据标记符位置信息判定其是否处于标记符圆环内,若不满足则重新获取特征点,若满足则追踪特征点。光流法中金字塔层数是一个重要参数,通过式(11)可知,每一层金字塔图像像素大小为其下一层金字塔图像的一半,若层数过小则通过金字塔分层降低目标速度策略收效甚微;分层过大,过分压缩金字塔图像大小缺乏工程意义,并且会因为实验中存在的抖动情况引起追踪不稳定的问题。将该参数的初始值设置为1,在追踪过程中若追踪点所在像素点颜色变为黑色,即追踪点出现在标记符圆环上,则判定为追踪失败。自动增大金字塔层数,并重复上述过程直至完成测量任务。通过该方式实现了光流法金字塔层数的自动调整并确保了追踪点始终处于圆环标记符内。

3 实验结果与讨论

3.1 实验结果

根据现有国家标准,电缆材料断裂伸长率由操作员使用卡尺分别测量样品拉伸试验前后标记线间距后计算得到,标记线间距测量误差可控制在0.1 cm内。以人工测量数据作为真值,分别使用本文方法和文献[17]所述方法进行6组试验,得到如表1所示的实验结果。

表1 电缆断裂伸长率测量结果对比

Table 1 Measurement results comparison of cable elongation at break

组别	初始长度/cm	人工测量数据		本文方法		文献[18]方法	
		断裂长度/cm	断裂伸长率/%	断裂长度/cm	断裂伸长率/%	断裂长度/cm	断裂伸长率/%
1	3.49	11.96	242.69	11.90	241.06	12.19	249.28
2	3.55	11.18	214.93	11.34	219.31	11.28	217.65
3	3.62	12.44	243.65	12.59	247.87	12.76	252.48
4	3.43	11.22	227.11	11.17	225.70	11.44	233.56
5	3.38	11.56	242.01	11.58	242.69	11.71	246.65
6	2.05	7.28	255.12	7.37	259.49	7.20	252.89
误差				0.09	2.78	0.18	5.24

实验表明,本文方法得到电缆断裂伸长率测量结果与人工测量的参考值误差为2.78%,优于文献[18]所述的采用阈值分割法提取标记点边缘,并利用标记符的重心间距计算断裂伸长率的方法,证明了本文方法的可行性和有效性。基于L-K光流法的测量技术优势在于,一方面能够准确判定电缆断裂瞬间,另一方面基于特征点的追踪降低了标记符形变对测量产生的影响。本实验采用帧率为30 Hz的摄像机拍摄实验过程,使用Python语言在CPU型号为i9-9900 K的计算机中分别计算各组实验数据的平均帧率,结果如表2所示。

表2 本文算法测量速度

Table 2 Measurement speed of the proposed algorithm

组别	1	2	3	4	5	6
算法速度/(frame·s ⁻¹)	21.6	21.4	21.4	21.5	21.4	21.5

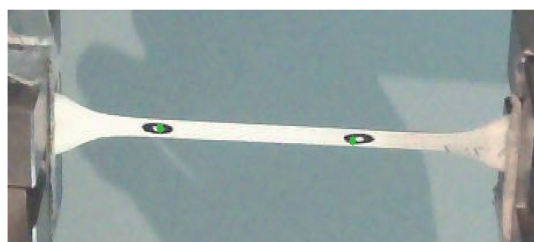
结果表明,本文方法在视频文件里对电缆断裂伸长率进行测量的过程中,算法速度能够稳定维持在21 frame/s以上,基本实现了电缆上特征点的同步追踪,并能够在电缆断裂的同时得到电缆断裂伸长率的测量结果。因此,本文算法具有良好的实时性。

3.2 误差分析

在电缆断裂伸长率的测量中,人工测量法会在电缆初始长度和最大拉伸长度测量时两次引入测量误差。电缆断裂瞬间的测量任务对操作人员的反应速度有较高要求,且标记符在拉伸过程中产生的形变会给电缆最大长度的测量引入较大误差,如图9所示。



(a) 标记符产生形变
(a) The deformation of marker



(b) 特征点稳定追踪
(b) Stable tracking of feature points

图9 标记符形变对特征点追踪影响微小

Fig.9 Marker deformation with little effect on feature

通过 Harris 算法选定的特征点具有一定的稳定性,可基本认为电缆发生形变后,追踪的特征点始终为初始选定的特征点。考虑到在实际测量过程中电缆所在平面与摄像机成像平面不重合的情况,如图10所示,其中 O 为摄像机光心, AB 为电缆试样。假设其夹角为 θ , $\overline{AB}$ 为原始特征点间距, $\overline{CD}$ 为最大拉伸形变时的特征点间距, A', B', C', D' 为对应电缆上的点在摄像机成像平面上的投影。

断裂伸长率 p 可由电缆原长 l 和最大伸长量 Δl 定义^[1]为:

$$p = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\overline{AC} + \overline{BD}}{\overline{AB}} \quad (16)$$

由于偏角 θ 的存在,实际伸长率是通过电缆在成像平面上的投影计算得到。通过简单的数学分析可得到由投影计算的伸长率与真实伸长率的计算结果一致,因此,当电缆所在平面与摄像机投影平面存在一定夹角时,不会对电缆断裂伸长率 p 的测量产生影响。

$$p' = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\overline{A'C'} + \overline{B'D'}}{\overline{A'B'}} = \frac{\cos\theta \cdot \overline{AC} + \cos\theta \cdot \overline{BD}}{\cos\theta \cdot \overline{AB}} = p \quad (17)$$

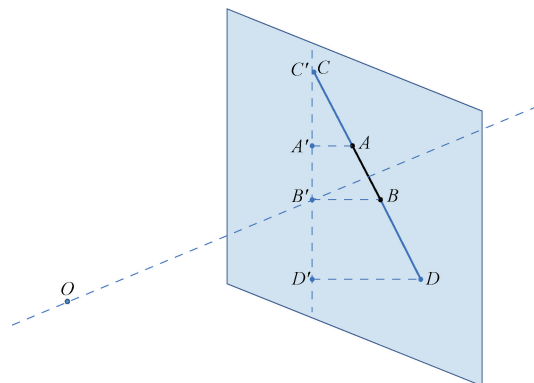


图10 摄像机与成像平面

Fig.10 Camera and imaging plane

此外,对于光流算法本身而言,L-K 算法引入的光流约束条件为:在给定的窗口大小范围内光流为同一常量,进而采用最小二乘法解方程组获得光流值。但在实际情况中,该邻域内的光流并不一定都相同,这样的近似处理在图像金字塔的迭代过程中会产生一定误差。在实验中,我们观察到 L-K 光流法预测的特征点始终处于圆环标记符内,并且与圆环标记符的相对位置几乎没有改变,因此我们认为由算法本身产生的误差在可接受的范围内。

4 结 论

提出了一种基于改进 L-K 光流法的电缆断裂伸长率测量方法。该方法通过光流法追踪电缆上特征点,并将加速度的突变作为电缆断裂的判断条件,依据电缆上特征点间的初始距离和产生最大形变时的距离得到电缆的最大拉伸形变量,从而计算得到断裂伸长率。该方法有效解决了人工判定电缆断裂瞬间精度低,主观性强的问题,并减小了标记符形变对测量产生的影响。由待测样品与摄像机成像平面的投影关系,电缆断裂伸长率测量不会受摄像机对待测物拍摄角度的影响,由算法本身引入的误差也在可接受范围内。实验表明,该方法得到的实验结果与人工测量值相近,本文方法测得样品断裂伸长率与人工测量值误差为 2.78%,这种测量方法可推广到其他材料的形变测量中。本文提出的方法同样存在一些问题,现场光照的稳定性、均匀性等因素影响着图像质量和测量系统的稳定运行,如何减弱或是消除这种影响将在今后的工作中进一步研究。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电缆和光缆绝缘和护套材料通用实验方法: GB/T 2951. 11-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 4.

- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Common test methods for insulating and sheathing materials of electric and optical cables: GB/T 2951. 11-2008[S]. BeiJing: China Standards Press, 2009: 4.
- [2] 杨泽勇. 电子万能材料试验机测控系统的研究[D]. 北京:北方工业大学, 2005.
- YANG Z Y. Research on measurement and control system of electronic universal material testing machine [D]. Beijing: North China University of Technology, 2005.
- [3] CHELLAPPA R, QIAN G, SRINIVASAN S. Structure from motion: Sparse versus dense correspondence methods[C]. ICIP, 1999(2): 492-499.
- [4] HERBERT B, ANDREAS E, TINNE T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359.
- [5] SMMTH S M, BRADY J M. SUSAN-A new approach to low level image processing[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45-78.
- [6] LOEW D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]. ICCV, 1999: 1150-1157.
- [7] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. Scale & affine invariant interest point detectors [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(1): 63-86.
- [8] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]. PAVC, 1988: 147-151.
- [9] GIBSON J J. The perception of the visual world[M]. Oxford: Hought Mifflin, 1950.
- [10] LUCAS B D, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [C]. IJCAI, 1981:674-679.
- [11] HORN B K P, SCHUNCK B G. Determining optical flow[J]. Artificial Intelligence, 1981, 17 (1-3): 185-203.
- [12] 孙平, 范超, 代晴, 等. 基于 L-K 局域光流的空间视线坐标法面形测量技术[J]. 光子学报, 2020, 49(9): 166-173.
- SUN P, FAN CH, DAI Q, et al. A L-K local optical-flow-based coordinate profilometry by using the capture line in space[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(9): 166-173.
- [13] 类智方, 孙平, 代晴. 典型光流算法在条纹位移测量中的分辨力和测量范围[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 149-157.
- LEI ZH F, SUN P, DAI Q. Discussion on resolution and measuring range of typical optical flow algorithm in fringe displacement measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 149-157.
- [14] 李成美, 白宏阳, 郭宏伟, 等. 一种改进光流法的运动目标检测及跟踪算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 249-256.
- LI CH M, BAI H Y, GUO H W, et al. An improved optical flow algorithm for moving object detection and tracking[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 249-256.
- [15] 陈昊, 张奔, 黎明, 等. 基于图像光流的轴承滚子表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 198-206.
- CHEN H, ZHANG B, LI M, et al. Surface defect detection of bearing roller based on image optical flow[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 198-206.
- [16] 伍济钢, 王刚, 蒋勉, 等. 光流点匹配跟踪的薄壁件振动模态测试方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(6): 80-858.
- WU J G, WANG G, JIANG M, et al. Vibration modal test method of thin walled parts based on optical flow point matching and tracking [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31(6): 80-858.
- [17] 黄鑫, 肖世德, 宋波. 监控视频中的车辆异常行为检测[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(2): 125-131.
- HUANG X, XIAO SH D, SONG B. Detection of vehicle's abnormal behaviors in surveillance video[J]. Computer Systems & Applications, 2018, 27 (2): 125-131.
- [18] 林宇凌, 金晓宏, 王中任. 基于 LK 光流法的微流控芯片中流体速度检测[J]. 激光与红外, 2020, 50(8): 1014-1019.
- LIN Y L, JIN X H, WANG ZH R. Fluid velocity detection in microfluidic chip based on LK optical flow method [J]. Laser and Infrared, 2020, 50 (8): 1014-1019.
- [19] 高振斌, 冯宁楠. 基于机器视觉的电缆护套拉伸长度测量[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(5): 1120-1122.
- GAO ZH B, FENG N N. Measurement of cable sheath

- stretching length based on machine vision[J]. Computer Measurement and Control, 2013, 21(5): 1120-1122.
- [20] 冈萨雷斯. 数字图像处理. 3 版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 291.
- Gonzalez. Digital image processing. Version 3 [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011: 291.
- [21] SUZUKI S, BE K. Topological structural analysis of digitized binary images by border following[J]. Computer Vision Graphics & Image Processing, 1985, 30(1): 32-46.

作者简介



陈俊松, 2019 年于南京工程学院获得学士学位, 现为四川大学硕士研究生, 主要研究方向为图像识别和目标追踪。

E-mail: 502742236@qq.com

Chen Junsong received his B. Sc. degree

from Nanjing Institute of Technology in 2019. Now he is a master student of Sichuan University. His main research interests include image recognition and target tracking.



刘凯(通信作者), 1996 年于四川大学获得学士学位, 2001 年于四川大学获得硕士学位, 2010 年于肯塔基大学获得博士学位, 现为四川大学教授, 主要研究方向为结构光三维成像及应用。

E-mail: kailiu@scu.edu.cn

Liu Kai (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Sichuan University in 1996 and 2001, and received his Ph. D. degree from University of Kentucky in 2010. He is currently a professor at Sichuan University. His main research interests include three-dimensional imaging of structured light and its application.