

# 桥吊摆绳摆角的视觉检测

潘涛, 徐为民

(上海海事大学 航运技术与控制工程交通部重点实验室, 上海 201306)

**摘要:** 桥吊摆角的准确测量是实现吊车防摇控制的前提条件; 文中将视觉识别技术引入到吊车防摇控制中来, 提出了基于局部梯度变化和标准差的图像自适应增强处理算法, 解决了不同背光条件下吊绳摆动位置信息获取问题, 有效地实现了桥吊负载摆绳图像特征的提取; 同时, 采用两次下采样和梯度法相结合的圆心的识别算法, 解决了圆检测的实时性问题, 从而成功识别出目标及其所在的空间位置, 并用几何方法准确地测量出负载钢丝绳的摆角; 最后, 实验结果证实了该方法的有效性。

**关键词:** 桥吊; 图像增强; 两次下采样; 梯度法

## Detection of Rope and Rope's Swaying Angle of Overhead Crane Based on Computer Vision

Pan Tao, Xu Weimin

(Ministerial Key Laboratory of Marine Technology and Control Engineering,  
Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The key point to clearing out overhead crane's swaying is the accurate measurement of the angle. The thesis introduces vision technique into the anti-swaying control over the crane. The adaptive image enhancement method based on local gradient and standard deviation is proposed to solve the problem of acquiring the rope's swaying position under different backlight conditions. It extracts the image features effectively. Meanwhile, twice down-sampling algorithm combined with gradient algorithm is introduced in this paper to identify the goal and its location; and it satisfies the real-time performance. Then, we use the geometric method to guarantee the measuring accuracy of the angle. The performance of the proposed method is verified by the experimental results.

**Keywords:** overhead crane; local gradient; backlight condition

## 0 引言

桥吊的运行中, 需要解决负载的防摇定位控制等问题。传统的吊车防摇控制系统中, 钢丝绳摆角一般采用电位器或光电编码器等方法来测量, 传感器安装在吊车系统内部, 增加了吊车系统机械机构设计的难度。同时, 也使得摆角测量装置不具有独立性。近年, 很多研究人员开始采用实时视觉跟踪方法来实现摆角的非接触式测量<sup>[1]</sup>。

在不同光照实时性的研究中, 文献 [2] 通过设定简单背景, 对于摆角的检测有较好的实时性, 但易受光照的影响。文献 [3] 拍摄吊具上由 3 个发射灯组成的结构光源, 实现了在阴天或晚上的视觉检测, 但强光照没有考虑。Hideki Kawai 等人<sup>[4]</sup>采用 VCC 模板匹配的方法, 有效地克服了光照带来的影响, 但实时性效果不明显。还有一些学者<sup>[5-7]</sup>考虑到了光照和实时性, 但由于所用的视觉跟踪算法过于复杂并且实验设备昂贵, 不能很好的将光照和实时性有效地结合起来。

在此基础上, 本文提出了一种基于局部梯度变化和标准差的自适应图像增强方法, 该方法能快速处理不同光照条件下的

图像, 并提取出图像特征。此外, 本文采用的是识别标定小球的方法来检测摆角, 提出了一种基于两次下采样和局部约束的随机霍夫圆检测算法, 保证了圆心检测的精确性, 提高了检测速度<sup>[8-10]</sup>。

## 1 基于局部梯度变化和标准差的桥吊摆绳摆角检测

正常光照条件下, 图像中目标的信息完整且边缘轮廓容易进行检测。在晚上和光照较弱时, 图像平均灰度值很低; 当光照比较强烈时, 图像对比度很低。所以需要选择性地增强图像中的某些信息 (占有较多像素的灰度) 而抑制另一些信息 (占有较少像素的灰度)。

### 1.1 基于局部梯度变化的灰度修正

对于灰度增强, 常用的方法大多是基于直方图均衡化<sup>[11]</sup>的方法, 虽然易于实现, 但存在因灰度减少而导致的细节丢失, 出现伪轮廓等缺点。此外, HE 是对整幅图像进行操作, 而且在确定变换和转移函数时也是基于整幅图的统计量。在此基础上, 本文提出了基于局部梯度变化的自适应增强, 可以在灰度增强的同时保存细节。由于图像高频信息主要体现在图像梯度上, 因此可以通过梯度变化来分析直方图均衡化 (HE) 对图像细节信息的影响。计算经 HE 处理后图像梯度, 与原图的梯度相比, 梯度增大部分包含像素较多的灰度级次所在像素位置, 这部分图像灰度比原图更高。而梯度减小部分为像素数较少的灰度级次所在像素位置, 这部分会导致信息丢失, 所以通过比较原图和经过 HE 处理后图像的局部梯度变化, 修正该像素的灰度值, 增强其局部梯度。修正公式为<sup>[9]</sup>:

收稿日期: 2014-10-15; 修回日期: 2014-12-16。

**基金项目:** 交通部应用基础项目 (主干学科) (2013329810190); 上海市自然科学基金 (13ZR1418800); 上海海事大学科研基金 (20130456) 的资助。

**作者简介:** 潘涛 (1991-), 男, 江苏人, 硕士研究生, 主要从事船舶与港口设备传动控制技术方向的研究。

$$x_{i,j} = \begin{cases} m_{i,j}^{HE} + k(x_{i,j} - m_{i,j}) & |d_{ij}^{HE}| < s |d_{ij}| \\ x_{ij}^{HE} & |d_{ij}^{HE}| \geq s |d_{ij}| \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $x_{i,j}$ 、 $x_{ij}^{HE}$ 、 $x'_{i,j}$  分别为原图、经 HE 处理和局部灰度修正算法处理后的中心像素;  $m_{i,j} = \frac{1}{m \times n} \sum_{(i,j) \in W} x'_{i,j}$  为原图中以  $x_{i,j}$  为中心的窗  $W$  内各像素的灰度平均值;  $d_{ij}$ 、 $d_{ij}^{HE}$  分别为原图和经 HE 处理后图像的梯度值;  $s$  为梯度变化阈值;  $k$  为自适应修正因子, 可取<sup>[12]</sup>:

$$k = k \left[ \frac{\sigma_{ij}^2}{\sigma_n^2} - 1 \right] \quad (2)$$

式中,  $\sigma_{ij}^2$  为窗  $W$  内的灰度方差;  $\sigma_n^2$  为整幅图像的噪声方差;  $k$  为比例系数。设初始窗口大小为  $W_1 = 2w + 1$ , 计算它的均值  $\mu$  和方差  $\sigma$ ,  $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$  反应该窗口的灰度分布, 如果窗口范围小于  $\epsilon$ , 则可认为该窗口不够大, 需要增加窗口的大小。

### 1.2 基于局部标准差的对比度自适应增强

令  $r$  表示区间  $[0, L - 1]$  上代表离散灰度的离散随机变量,  $p(r_i)$  表示  $r_i$  出现的概率估计值。  $E_G$  为整幅图像的灰度平均值:

$$E_G = \sum_{i=0}^{L-1} r_i p(r_i) \quad (3)$$

$\mu_G$  表示图像的标准差, 即全局对比度为:

$$\mu_G = \sum (r_i - E_G)^2 p(r_i) \quad (4)$$

以  $x_{i,j}$  为中心的窗  $W$  内各像素的灰度平均值, 即局部灰度平均值为:

$$m_{i,j} = \frac{1}{m \times n} \sum_{(i,j) \in W} x'_{i,j} \quad (5)$$

$\mu_L$  表示中心的窗  $W$  内的标准差, 即局部对比度为:

$$\mu_L = \sum (r_i - m_{ij})^2 p(r_i) \quad (6)$$

选定较暗区域和较低对比度的区域, 得到如下计算式:

$$x'_{i,j} = \begin{cases} \lambda m_{i,j}^{HE} + \frac{k(x_{i,j} - m_{i,j})}{\mu_G / \mu_L} & |d_{ij}^{HE}| < s |d_{ij}| \& k_1 \mu_G < \mu_M < k_2 \mu_G \\ x_{i,j} & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$\lambda$  为自适应增强系数,  $k_1, k_2$  是小于 1 的正常数, 且  $k_1 < k_2$ 。

由式 (7) 可知, 算法通过限定局部梯度变化和标准差, 选定暗的、低对比度的区域, 而将不需要增强的区域保持不变, 在图像局部增强的过程中, 根据局部梯度变化和标准差动态调整增强系数, 以实现有针对性地增强局部细节, 从而达到改善图像视觉效果的作用。

## 2 基于改进 RHT 算法的桥吊摆绳摆角图像检测

### 2.1 两次下采样和局部约束的 RHT 算法

与传统的图像识别算法<sup>[4]</sup>不同, 本文通过在吊具上方安装一个标定小球, 通过识别出标定小球球心, 然后结合预先在小车上选取的基准点, 通过简单的几何计算就能得到摆角和绳长, 充分满足了桥吊视觉检测所要求的实时性和适应性。而识别出标定小球, 反应在二维图像中就是圆的检测。

霍夫变换是一种在图像上寻找直线、圆及其他简单形状的方法。原始的霍夫变换是一种直线变换, 即在二值图像中寻找直线的一中相对快速方法。本文用到了小球, 故需要检测出圆及其圆心所在位置。与经典 HT 和广义 HT 相比, 随机 HT 是

一种检测圆的有效方法, 可以快速检测出具有圆形特征的运动物体, 但常会因为无目标的采样而引入无效的累积。围绕提高随机采样效率和候选圆检测效率, 文献[8]通过设置图像感兴趣区域来提高采样效率, 利用迭代思想不断调整参数, 实现对圆的检测; 文献[9]将候选圆的外切正方形和内接正方形作为检验区域。本文在此基础上, 提出一种改进算法, 该算法通过两次下采样和梯度法获得有效累积, 然后利用局部约束减少验证点的个数, 可以进一步优化提高检测速度。算法过程如下:

1) 用 Canny 算子进行边缘提取, 对宽高进行补齐, 使得图像的宽和高都能被 4 整除, 对新增加的宽和高的灰度值设置为零。

2) 对原图像进行两次下采样得到一幅缩小的图像, 采样因子为 2, 如图 1 所示, 得到一幅缩小 16 倍的图像, 对该图像进行霍夫梯度法圆检测, 即利用圆上任意一点的法线经过圆心这一性质提取有效累积。

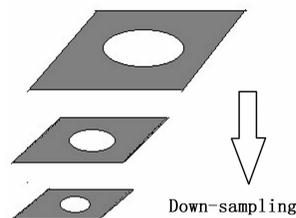


图 1 图像的下采

3) 假设候选圆的圆心是  $O_1(x_0, y_0)$ , 半径为  $r$ , 作该圆的内接正方形  $A_1 B_1 C_1 D_1$  和外切正方形  $A_2 B_2 C_2 D_2$ 。

4) 以  $O_1$  为圆心, 以  $\sqrt{2}r/2$  和  $\sqrt{2}r$  为半径作两个同心圆, 那么检验窗口就是这两个同心圆之间的圆环, 如图 2 所示的两个虚线之间的圆环。

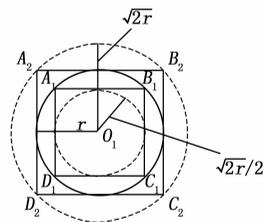


图 2 检测区域

5) 将以上所得的圆心坐标放大 4 倍, 即为所求的圆心。

### 2.2 桥吊摆绳摆角计算

桥吊摆角的检测依赖于小车位置和吊具位置的准确测量, 本文通过识别安装在吊具上黄色标定小球 (颜色区别于背景和前景中的其他物体) 的球心所在位置  $(y, z)$  之后, 可以得出绳长以及摆角计算公式:

$$l = (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \quad (8)$$

$$\theta = \arctan \frac{y - y_0}{z - z_0} \quad (9)$$

## 3 实验结果及分析

### 3.1 桥吊视觉识别实验设置

桥吊视觉检测系统是由一台 30fps 的 CCD 黑白摄像机、千兆网卡组成的图像采集设备 (如图 4 所示) 以及一台图像处

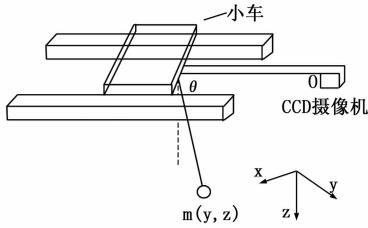


图 3 桥吊摆绳摆动情况示意图

理机 (内存 4G, I5CPU, 主频 2.5 GHz, ePCI 扩展卡)。经过图像采集之后, 直接在图像处理计算机上进行图像增强、识别等操作, 并得到相应的摆角数值。

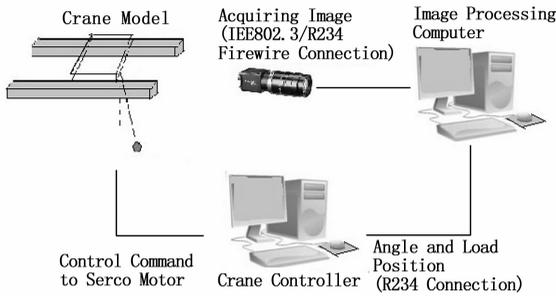


图 4 桥吊视觉伺服机构

为了最大化提高 CCD 摄像机的处理性能, 要求有快速的图像处理算法。本文提出的算法在实验中并不要求处理整幅图像, 而是对需要识别的区域进行局部增强, 突出目标所在的位置。

鉴于条件的限制, 实验中并没有考虑复杂背景下桥吊的摆角检测问题, 而是单一背景下进行桥吊摆角检测。通过在小车上标定基准点的位置, 以及在吊具上方安装黄色标定小球 (颜色区别于背景和前景), 在固定绳长条件下令负载摆绳摆动, 利用识别出标定小球球心的位置来计算得出摆绳的摆角。

### 3.2 不同光照条件下的图像的增强实验

图 5 中, (a) 为弱光下的原始图, (b) 为经过直方图均衡化处理之后的图像, 可看出对于噪声的抑制不明显; (c) 为文献 [4] 中 VCC 方法下图像的增强, 使得整幅图偏亮; (d) 为基于局部梯度变化和标准差增强的方法, 在整幅图偏暗的情况下, 通过比较原图和经过 HE 处理后图像的局部梯度变化, 对标定小球所在区域的灰度值进行修正, 在保证细节的同时满足

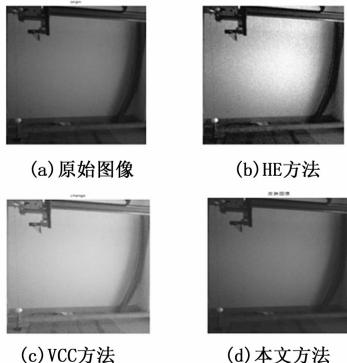


图 5 弱光照射下图像的增强

实时性要求, 能快速地对图像进行局部增强处理。图 6 中, (a) 为强光下的原始图, (b) 为经过直方图均衡化后的图像, 使得原图失去了大部分细节。(c) 为文献 [4] 中 VCC 方法下图像的增强, 整幅图偏亮, 标定小球难以识别。(d) 为基于局部梯度变化和标准差增强的方法, 在强光照射下, 图像对比度下降, 对比度反应在图像上可理解为标准差的大小, 通过对局部标准差和全局标准差的比值进行计算, 来实时地对标定小球所在的位置进行增强, 凸显出标定小球及球心所在位置, 方便后续的识别。

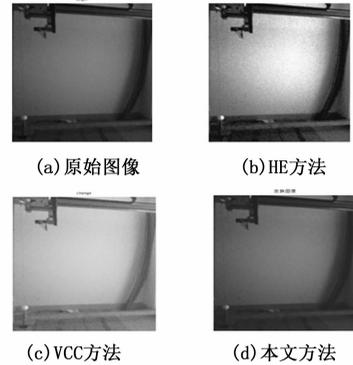


图 6 强光照射下图像的增强

上述不同光照条件下的图像的增强实验结果表明, 本文提出的基于局部梯度变化与标准差的自适应增强方法能够快速地对目标进行增强处理, 效果优于文献 [4—5]。

### 3.3 改进的图像识别方法实验

在强光以及弱光照射条件下, 颜色区分不明显, 故考虑用形状特征提取, 本文通过采用在吊具上安装小球的办法, 通过两次下采样和梯度法, 两次下采样的梯度法提高了随机采样效率, 即节省了圆检测所用的时间。区域约束提高了候选圆检测的效率, 排除了不必要图形的干扰, 能够快速检测出圆及圆心所在位置, 此外, 该方法不需要后续的图像配准, 所用时间为 0.43 ms (一般地, 在桥吊实时控制中, 我们的采样周期是 1 ms, 即 0.001 s), 较好地保证了实时性。

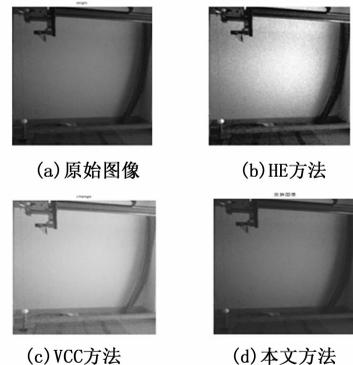


图 7 霍夫梯度法

为了验证本文所采用算法的快速性, 与文献 [8] 中的基于区域约束的随机霍夫变换, 文献 [9] 中的霍夫梯度法, 以及文献 [10] 中改进的 RHT 方法在运算时间上进行了比较, 实验结果如表 1 所示。

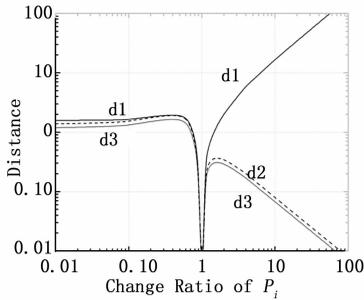


图 4 R2-C1 故障轨迹间距对比

### 4 结束语

本文在基于斜率的故障模型基础上, 基于被测电路电源电流和节点电压为变量提取故障特征, 分别在 2D 复平面和 3D 复空间建立故障模型, 实现了模拟电路单元件硬故障和软故障的检测和隔离。基于二阶滤波器电路的仿真结果表明, 本文提出的 2D 和 3D 故障模型具备良好的故障覆盖率, 理论上可以完全表征模拟元件的所有潜在故障, 并且有效提高了 FDR 和 FIR。后续的研究将采用旁路法<sup>[9]</sup>等可测性设计方法, 对故障模型中的模糊组进行处理, 进一步优化 FIR。

### 参考文献:

[1] 马 岚, 王厚军. 基于输出电压和电源电流协同分析的故障诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (8): 1872-1878.

(上接第 2265 页)

表 1 各种算法处理时间

待检测图像尺寸	处理时间/s		处理时间/ms	
	基于区域约束的 HT	霍夫梯度法	改进的 RHT	本文算法
342 * 421	0.52	0.03	1.23	0.43

从表 1 中可以看出, 本文提出的算法速度最快, 达到了所要求的实时性, 且相比较文献 [10] 中的方法, 速度也有所提升。

### 4 结论

为了解决不同背光条件下桥吊吊绳摆动识别的问题, 本文提出了基于局部梯度变化和标准差的图像增强处理方法, 以及两次下采样和梯度法的改进的霍夫圆检测算法, 准确地检测标定小球及球心, 实现了吊车系统重物摆角的视觉测量。对比实验研究, 结果表明, 文中所提出的算法能够更加快速地识别出小球的位置, 满足控制的实时性要求。由于该方法是一种基于视觉识别技术的非接触式测量方法, 消除了摆角检测噪声和其它干扰, 提高了吊车摆角检测的精度。

### 参考文献:

[1] Hirata, K. Kimura, Y. Sugimoto, K. Visual feedback control of cart-pendulum systems with webcam [A]. in Proc. Int. Conf. Mechatron [C]. May 2007, pp. 1-6.  
 [2] 郭源博. 基于视觉伺服的吊车防摆控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[2] 汪 鹏, 杨士元. 基于斜率故障模型的模拟电路软故障字典法 [J]. 微计算机信息, 2006, 22 (31): 1-2.  
 [3] Hu H Z, Tian S L, Wang H J, et al. Fault Diagnosis of Analog Circuits Based on Phasor Circle Model [A]. ICEMI' 2013 [C]. 2013: 810-813.  
 [4] Tian S L, Yang C L, Chen F, et al. Circle Equation-Based Fault Modeling Method for Linear Analog Circuits [J]. IEEE Transactions on Instrument and Measurement, 2014, 63 (9): 2145-2159.  
 [5] 王月海, 程 冉, 蒋爱民, 等. 模拟电路故障特征提取的小波基选取方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1329-1334.  
 [6] 龚茜茹, 李巧君. 遗传神经网络在模拟电路故障诊断中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (11): 2926-2928.  
 [7] Long B, Tian S L, Wang H J. Feature vector selection method using Mahalanobis distance for diagnostics of analog circuits based on LS-SVM [J]. Journal of Electronic Testing, 2012, 28 (5): 745-755.  
 [8] Stenbakken G N, Souders T M, Stewart G W. Ambiguity Groups and Testability [J]. IEEE Transactions on Instrument and Measurement, 1989, 38 (5): 941-947.  
 [9] Esfandiari E, Marium N B. Bypassing the short-circuit faults in the switch-ladder multi-level inverter [A]. ISIEA' 2011 [C]. 2011: 128-132.  
 [3] 倪 菲, 叶 军, 等. 基于机器视觉的吊具位姿检测系统 [J]. 起重运输机械, 2011 (10): 43-47  
 [4] Kawai H, Kim Y B, Choi Y W. Anti-sway system with image sensor for container cranes [J]. IEEE Trans, on industrial Electronics, 2007.5 (4): 1954-1957.  
 [5] Huang K C. The Implementation of a Visual Sensing System for 3-D Control of the RTG Crane [A]. Proceedings of the First International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC' 06) [C]. 2006.  
 [6] Lee L H, Huang P H, Shih Y. Sung-Chih Ku and Cheng-Yuan Chang, Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control to Overhead Crane by CCD Sensor [A]. IEEE International Conference on Control Applications [C]. 2011, pp. 474-478.  
 [7] 秦长海, 基于视觉定位的起重机智能化控制系统 [J]. 建筑机械化, 2009, 30 (5): 50-52.  
 [8] 张 翼, 孙永荣, 王 艳, 等. 圆形运动目标的快速检测方法研究 [J]. 计算机应用与软件. 2014 (1): 211-213.  
 [9] Cauchie J, Fioletb V, Villersa D. Optimization of an Hough transform algorithm for the search of a center [J]. Pattern Recognition, 2008, 41 (2): 567-574.  
 [10] 张显全, 苏 勤, 等. 一种快速的随机 Hough 变换圆检测算法 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 4 (22): 62-64.  
 [11] Arsenio A, Santos-Victor J. Robust visual tracking by an active observer [A], in Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Robots Syst, Sep [C]. 1997, vol. 3, pp. 1342-1347.  
 [12] 桑林琼, 邱明国, 王 莉. 图像局部增强的算法研究及实现 [J]. 价值工程, 2010 (20): 110-111.