

钢丝绳在线非接触测长系统研究

李伦友¹, 王 珩², 苏 明², 郑继明², 王发平¹

(1. 贵州钢绳股份有限公司, 贵州 遵义 563000

2. 贵州师范大学 机械与控制仿真重点实验室, 贵阳 550014)

摘要: 钢丝绳成品长度是供货合同的重要指标, 与经济效益、企业信誉息息相关; 针对在线钢丝绳纹理变化特点, 提出一种基于线结构光的非接触测长系统, 通过比较钢丝绳在不同时刻, 不同位置的线结构光投射条纹图像的相似性, 间接测量绳长; 对投射条纹提取、条纹相似性度量等关键算法进行了阐述; 实验证明, 系统解决了传统接触测长固有的打滑、磨损等问题, 避免了钢绳在线速度变化、捻距误差等因素的影响, 具有准确、高效、实时性强的特点。

关键词: 钢丝绳; 非接触测长; 线结构光; 图像相似性; 机器视觉

Non-contact Measuring System of Length of on-line Steel Wire Rope

Li Lunyou¹, Wang Heng², Su Ming², Zheng Jiming², Wang Faping¹

(1. Guizhou Wire Rope Co., Ltd, Zunyi 563000, China;

2. Simulation Laboratory of Mechanical & Control Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550014, China)

Abstract: The length of the steel wire rope product is an important indicator of supply contract and is closely related to the economic benefit and reputation of the corporate. An non-contact measuring system of the length based on the changing texture characteristics of the online steel wire rope is presented, which indirectly tests the length of the wire rope by calculating the similarity of the linear structured light images of the steel wire rope in different time and location. The algorithms of extracting the linear structured light texture and calculating the image similarity are described. The experiments indicate that the system has the characteristics of high accuracy, high efficiency and strong real-time and overcomes the disadvantages of the skid and abrasion of the contact length measurement and the influences of the changing rope speed and the wire pitch error.

Keywords: steel wire rope; non-contact measuring; linear structured light; image similarity; machine vision

0 引言

钢丝绳是长度类金属制品, 其绳长是供货合同的重要指标, 因此, 在生产线上准确测量钢绳长度, 提高测长精度与企业的供货质量、经济效益、品牌信誉息息相关。

目前, 国内多数企业仍然采用接触法进行在线钢绳测长^[1-6], 即在生产线上对由钢绳带动旋转的压紧轮、牵引轮或卷筒计数, 旋转圈数与其周长相乘得到的累计长度即为钢丝绳长度。由于该方法存在打滑、磨损等固有缺陷, 因此测长误差往往较大, 精度提升有限。文献 [7-8] 提出基于励磁读磁技术的非接触测长方法由于可行性、安全性等问题也未能在企业中应用。

本文针对在线钢丝绳在行进中, 其表面纹理呈周期性变化的特点, 提出一种基于线结构光的在线非接触测长系统, 通过比较钢丝绳不同时刻, 不同位置的线结构光投射条纹图像的相似性, 间接计算绳长。系统从根本上避免了接触测长固有的打滑、磨损, 测长不受钢绳速度变化、捻距误差等因素影响, 可行性、安全性高, 具有准确、高效、实时性强的优点。

1 系统原理及框架

1.1 钢丝绳特征分析

钢丝绳由对多条绳股围绕绳芯捻制而成, 是具有空间螺旋

结构的金属线材, 其表面均匀分布多条螺旋线, 螺旋线上任意一点的运动轨迹在捻制圆柱坐标系下可用参数方程表示为^[9]:

$$\begin{cases} x = \frac{d_0}{2} \cos \omega t \\ y = \frac{d_0}{2} \sin \omega t \\ z = v \cdot t \end{cases} \quad (1)$$

其中, v 为钢绳直线行进速度, ω 为其旋转角速度, t 为运动时间, d_0 为绳的捻制圆直径。可见, 行进中钢绳表面各点既在做圆周运动也在做直线运动, 此时将一束与钢绳垂直的线结构光斜向投射到其表面某一位置, 则形成的投射条纹可实时反映该位置的纹理变化, 即投射条纹也会随着该处螺旋线的圆周运动作周期性旋转, 如图 1 所示, 且旋转速度和方向与钢绳行进速度和方向直接相关。

1.2 系统原理

基于上述特性, 本文提出一套基于线结构光的在线非接触测长系统, 如图 2 所示, 由两组线激光发射器和高速工业相机以及工控机组成, 其中, 线激光发射器 1 和高速工业相机 1 通过左端支架安装在钢丝绳上方, 线激光发射器 2 和高速工业相机 2 通过右端支架安装在钢丝绳上方, 两组设备安装的位置、距离、高度等参数均相同。接通电源后, 线激光发射器 1 向 A 处投射线结构光, 得到投射条纹 1, 线激光发射器 2 向 B 处投射线结构光, 得到投射条纹 2, 经调节, 两投射条纹均与钢丝绳垂直, 且线宽 ≤ 1 mm; 高速工业相机 1 位于 A 处正上方, 可实时获取投射条纹 1 的图像, 高速工业相机 2 位于 B 处正上

收稿日期: 2014-08-01; 修回日期: 2014-10-10。

作者简介: 李伦友(1963-), 男, 贵州遵义人, 硕士, 高级工程师, 主要从事钢丝绳设计生产即使用钢丝绳设计生产及使用方向的研究。

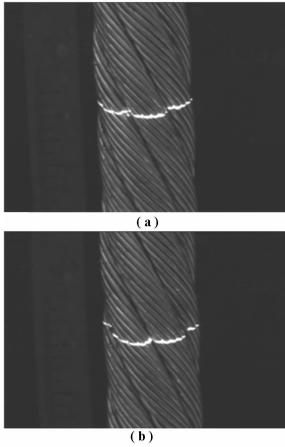


图 1 不同时刻下的钢丝绳投射条纹

方, 可实时获取投射条纹 2 的图像。

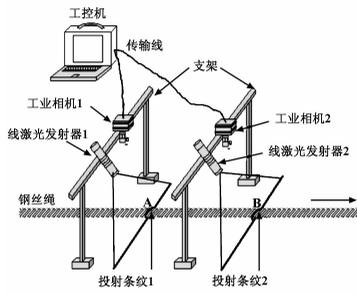


图 2 系统原理图

测长时, 设钢丝绳从左至右行进, 并在压紧轮等机械装置的作用下处于绷紧状态, 不发生扭转, 投射条纹 1、2 间的距离 l_{AB} 控制在一个螺距内, 经精确测定后输入工控机。测长流程如图 3, 设 t_1 时刻高速工业相机 1 获得激光投影条纹 1 的图像 I_1 , 之后在 t_2 时刻高速工业相机 2 获得激光投影条纹 2 的图像 I_2 , 将 I_1 作为目标图像, I_2 作为待判别图像输入工控机进行图像处理, 若两图像中条纹形状一致, 则表明在 $\Delta t = t_2 - t_1$ 时间内, 钢丝绳已由行进一个螺距, 行进距离为 l_{AB} , 此时由工控机对绳长进行累加, 并开始下一次测长; 若投射条纹不相同, 则由工业相机 2 继续获取投影条纹 2 的图像 I_2 , 并反复与 I_1 比较, 直到两条纹再次相同。

2 关键算法研究

2.1 投射条纹提取算法

如上节所述, 从获取的图像中准确提取投射条纹, 是实现测长的前提。如图 2 所示, 系统采用高速彩色工业相机拍摄, 获取的 RGB 图像具有以下特点: 1) 红色的线结构激光投射到钢绳的金属表面后, 投射条纹亮度远高于图像背景, 形成了趋于白色的高亮度带。2) 高亮度带周围分布有部分红色散射光, 其亮度较高, 是提取投射条纹的主要干扰因素。

针对上述特点, 本文采用基于亮度信息的改进算法分割投射条纹, 首先将 RGB 图像转换到 HSV 颜色空间, 然后对 V (亮度) 分量进行直方图分析, 多次实验发现, V 分量中投射条纹的灰度值通常 > 250 , 且分布稳定, 能与图像背景的灰度值明显区分。考虑到系统的实时性要求, 采用阈值分割法对 V 亮度分量进行分割, 如式 (2), 其中 $u(x, y)$ 为分割后图

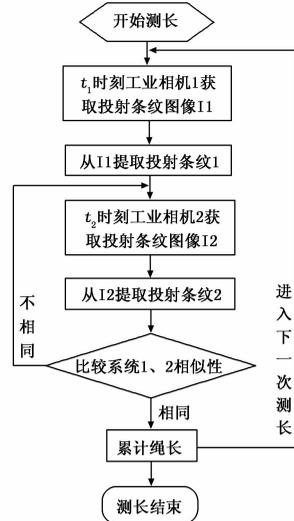


图 3 钢绳测长流程图

像, $v(x, y)$ 为原 V 分量图像。

$$u(x, y) = \begin{cases} 1 & v(x, y) > 250 \\ 0 & v(x, y) \leq 250 \end{cases} \quad (2)$$

经观察发现 $u'(x, y)$ 中仍含有部分亮度较高的散射光干扰, 考虑到这些散射光在原图中呈红色, 因此按式 (3) 将 $u'(x, y)$ 分别与原图像绿色分量的分割结果 $g'(x, y)$ 和蓝色分量的分割结果 $b'(x, y)$ 进行异或操作, 再将操作结果相加从而去除红色散射光, 得到完整准确的投射条纹图像 $u'(x, y)$, 如图 5。

$$u'(x, y) = u(x, y) \oplus g'(x, y) + u(x, y) \oplus b'(x, y) \quad (3)$$

将 $u'(x, y)$ 进行膨胀和细化处理后, 最终提取的线结构光投射条纹如图 6。

2.2 投射条纹相似性计算

根据系统原理, 从目标图像和待判别图像中分别提取投射条纹后, 就需要对二者形状的相似性进行计算。本文通过计算条纹间形状特征的 Minkowski 距离^[10]测量二者的相似性, 如式 (4) 所示。

$$d_M = p \sqrt[p]{\sum_{i=1}^N |x_i - y_i|^p} \quad (4)$$

其中, N 维向量 x, y 分别为两投射条纹的形状特征向量; p 取值为 2, 即采用欧式距离度量函数, 若距离值 d_M 趋近

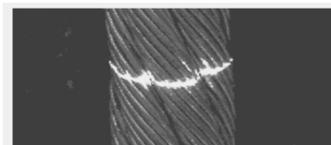


图 4 图 1(a) 的亮度 V 分量

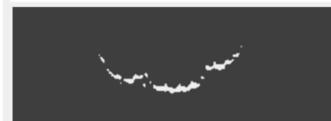


图 5 图 1(a) 的分割图像

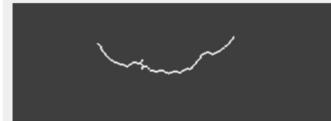


图 6 图 1(a) 中提取的投射条纹

于 0，则判定两条纹相同。

由图 6 可知，提取的投射条纹为非封闭的凹凸线图形，无法用描述封闭图形的傅里叶描绘子等方法提取形状特征，本文通过提取条纹的周长 L 、形状复杂度 D 、凹凸性 E 等区域形状特征^[11]构成向量进行相似性计算。

形状复杂度 D 的计算式为：

$$D = \frac{L^2}{S} \tag{5}$$

凹凸性 E 的计算式为：

$$E = \frac{S_c}{S} \tag{6}$$

其中， S 为投射条纹面积； S_c 为投射条纹凹形面积。

3 实验与分析

在实验室条件下，取一段总长 35 m，直径 20 mm，捻距 24 mm，绳股数为 6 的钢丝绳进行测长实验，各次实验中均随机加入了行进速度变化、抖动等干扰因素，实验结果如表 1 所示。

表 1 系统实验结果

序号	实测长度/mm	系统测长/mm	误差率/ (%)
1	35.011	35.074	0.18
2	34.989	35.054	0.18
3	34.996	35.063	0.19

测长误差主要来源于线结构光投射位置和角度的偏差，导致分割的投射条纹形状不准确，造成累加绳长的时刻出现偏差。实验证明，系统在实验室条件下可达到 0.2% 的精度要求。

(上接第 1453 页)

例，能够满足舰船系统以太网连接设备所含的嵌入式软件的测试要求，从应用效果来看，测试执行效率和自动化程度大大提高，达到了预期效果。

6 小结

本文研究的面向船舶软件的仿真测试系统具有功能性、通用性、可扩展性、实时性等基本特性，使用本仿真测试环境有以下 5 个优点：

- 1) 仿真测试环境真实再现了嵌入式软件的实际运行环境，保证了测试的有效性；
- 2) 在仿真测试环境中，对于输入的控制更为灵活，可以模拟输入各种正常及异常情况，避免了对真实运行环境中相关软硬件设备的依赖，降低了测试成本，也提高了测试的充分性；
- 3) 仿真测试环境的建立使得在软件研制完毕时即可以开始测试，而不需等待相关联的设备都研制完毕，保证了充裕的测试时间，也使得软件有充足的修改及回归测试时间，从而提高软件质量；
- 4) 在仿真测试环境中，更容易获取嵌入式软件运行过程中对其交联设备输入的响应和返回的中间结果，可以更好的进行测试数据分析；
- 5) 在仿真测试环境中，可以更有效的开展自动化测试技

4 结束语

本文提出的钢丝绳在线非接触测长系统解决了传统接触式测长固有的打滑、磨损等问题，且不受钢绳在线速度变化、捻距误差等因素的影响，实验证明，可达到预期的精度要求；本文采用的图像处理算法简单，数据量小，执行效率高，效果较好，可满足系统的实时性要求。下一步工作将在实际生产线上进一步完善和改进系统。

参考文献：

- [1] 鲁建勇. 钢丝绳长度测量方式及其比较 [J]. 金属制品, 2009, 35 (6): 37-38.
- [2] 马洪飞, 王毅, 徐殿国. 非接触式钢丝绳计长仪 [J]. 金属制品, 1999, 25 (6): 37-39.
- [3] 唐跃林, 肖沙里, 丘柳东, 等. 钢丝绳实时测长系统 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (9): 813-815.
- [4] 周宴, 肖沙里, 丘柳东, 等. 钢绳绳在线测长系统 [J]. 重庆大学学报, 2004, 27 (10): 118-120.
- [5] 孟祥武, 白文科. 钢丝绳长度计量机的设计 [J]. 橡塑技术与装备, 2003, 29 (11): 32-36.
- [6] 孟祥武, 王铁宏, 李树. 钢丝绳长度计量机的设计 [J]. 金属制品, 2003, 29 (5): 30-32.
- [7] 李昔华, 邢宏, 严学书. 钢丝绳在线测长仪的研制 [J]. 重庆工商大学学报 (自然科学版), 2006, 23 (3): 263-265.
- [8] 陈军, 佟巨山. 智能钢绳测长仪 [J]. 仪表技术与传感器, 1998 (4): 20-22.
- [9] 李前桂. 钢丝绳生产 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1959.
- [10] 柴华. 目标形状特征提取方法 [J]. 计算机与现代化, 2013, 53 (4): 108-109.
- [11] 贾永红. 数字图像处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.

术，包括测试用例的自动执行，测试数据的自动收集与分析，从而可以提高测试效率、测试准确性，大大降低人为操作造成的时间消耗和不精确性，降低测试成本。

参考文献：

- [1] 陈哲. 软件自动化测试系统的研究与实现 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2008.
- [2] 林丹丹. 嵌入式软件仿真测试系统开发 [J]. 信息技术, 2012 (10).
- [3] 刘斌, 高小鹏, 陆民燕, 等. 嵌入式软件可靠性仿真测试系统研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2000 (3): 490-493.
- [4] 通用嵌入式软件测试环境 GESTE 介绍及用户指南 [Z]. 北京航空航天大学.
- [5] 张丽波. 软件自动化测试的设计和实现 [J]. 佳木斯大学学报, 2004, 22 (4): 568-572.
- [6] 姚颖颖, 肖沙里, 等. 软件测试自动化中建立可维护脚本的技术 [J]. 计算机工程, 2003, 29 (11): 79-81.
- [7] Paul Baker, Zhen Ru Dai. Model- Driver Testing [M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 27-35.
- [8] 刘斌. 软件可靠性仿真测试环境的研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000.
- [9] 崔小乐. 嵌入式软件仿真测试系统及仿真模型 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.