

文章编号 1004-924X(2016)增-0613-09

高精度弹簧三维视觉检测和全面误差比较

宋丽梅^{1*}, 李晶¹, 乔琛智¹, 郭庆华¹, 习江涛²

(1. 天津工业大学 电工电能新技术天津市重点实验室, 天津 300387;

2. 澳大利亚伍伦贡大学 电气、计算机与通信工程学院, 澳大利亚 2500)

摘要: 为了实现对弹簧各参数的精密测量和误差比较, 设计了三维弹簧多参数综合测量系统, 建立了弹簧三维误差全面比较理论。对该系统采用结构光条立体匹配技术、基于图像归一化转动惯量的模式识别方法、线性最小二乘法、ICP 等算法进行研究。首先, 采用高精度环状编码标记点对双目相机进行标定。接着, 利用投射结构光条技术进行立体匹配。然后, 利用归一化转动惯量方法进行特征提取, 从而进行立体拼接, 得到弹簧的三维点云, 通过使用弦高差法进行噪声去除、滤波平滑后得到 STL 模型。再对三维点云进行圆柱拟合和平面拟合来评价弹簧的长度和圆柱度, 最后, 建立弹簧三维误差全面比较理论, 对不合格弹簧进行快速识别。实验结果表明: 三维检测出的点云与物体唯一相关, 景深可以达到 300 mm, 因此避免了由于摄像机和弹簧相对位置变化而引起的误差, 采用二维图像和三维检测相结合, 精度可以达到 0.05 mm, 另外, 使用弹簧三维误差全面比较理论可以使得弹簧检测系统具有更快的检测速度。本论文所使用的三维视觉弹簧检测方法, 属于高精度非接触无损测量, 稳定可靠, 精度高, 速度快, 可以满足在线检测的要求。

关键词: 计算机视觉; 归一化转动惯量; 圆柱和平面拟合; 弹簧精密测量; 三维误差全面比较理论

中图分类号: U260 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0613

High-precision spring 3D visual inspection and comprehensive error comparison

SONG Li-mei^{1*}, LI Jing¹, QIAO Chen-zhi¹, GUO Qing-hua¹, XI Jiang-tao²

(1. Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology,
Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering,
University of Wollongong, Keiraville 2500, Australia)

* Corresponding author, E-mail: lilymay1976@126.com

Abstract: In order to achieve precision measurement of the spring parameters and error comparison, three-dimensional spring multi-parameter measurement system was designed. A three-dimensional spring error comparison theory was established. Algorithm such as pinstripe exponential growth stereo matching technology, pattern recognition method for rotational inertia based on image normalization, linear least square method were applied in this paper. First, high-precision cyclic coded targets were applied in binocular camera calibration, Next, take advantage of structured light stripe technolo-

收稿日期: 2016-04-15; **修订日期:** 2016-05-31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60808020; No. 61078041); 天津市应用基础及前沿技术研究计划资助项目 (No. 10JCYBJC07200); 天津市应用基础与前沿技术研究计划一般项目 (No. 16JCYBJC15400)

gy, it was implemented to stereo matching. Then, Normalized moment of inertia was introduced for feature extraction to obtain a three-dimensional point cloud of the spring. The chord method was used to reduct noise, and the STL model was obtained by filtering. And then the three-dimension length and cylindricity of the spring wre evaluated through Cylindrical fitting and plane fitting of 3D point choud. Finally, a comprehensive spring three-dimensional error comparison theory was set up to comply a rapid identification of unqualified spring. The results show that three-dimensional point cloud detected uniquely associated with the object and the depth of field can reach 300 mm, thus avoiding errors due to the changes in the relative position of the camera and the spring, and the combination of two-dimensional image and three-dimensional detection, so that the accuracy can reach 0.05 mm. The spring measurement system has a faster detection speed due to the comprehensive spring three-dimensional error comparison theory. The proposed three-dimensional visual spring detection method is high-precision, non-contact and non-destructive measurement. The method also has advantage of stable and fast detect speed which meets the requirements of online testing.

Key words: computer vision; normalized rotational inertia; cylinder and plane fitting; spring precision measurement; 3D-error comprehensive comparison theory

1 引 言

我国工业和加工制造业发展迅猛,迫切需要提高我国基础行业产品的加工和检测水平。弹簧的性能和质量是确保航空、航天、汽车、高速火车、精密仪表、轮船等相关行业安全、快速发展的有力保证。目前的弹簧测量方法主要是简单的大致性测量,人为误差比较大,而且不能对弹簧的全方位多视角的细微变化进行检测,因此,提高弹簧的检测方法和检测手段势在必行。三维计算机视觉的测量方法属于非接触的测量方式,对检测工件没有任何破坏,也没有任何受力影响,因此非常适合应用在弹簧的检测领域。本文所研究的弹簧检测方法和相关检测原理,还可以推广到表面包装生产线、织物瑕疵、生产工件形貌检测等多种在线领域。

目前为止,国内外专家学者在弹簧检测方面做了很多研究。郑建勇,周家春^[1]介绍了一种智能弹簧的检测方法,利用机电结构实现弹簧检测,但是设计比较复杂,速度慢;王黎明,丁洪萍^[2]使用双摄像镜头,成 90°夹角放置于弹簧两侧,当弹簧组件运动到镜头前时,摄像头在两个方向同时采集图像,经过视觉图像处理软件计算得出测量数据,但两个摄像机的光学中心和机械结构的差异无法解决。李芹,王国林^[3]介绍了一种基于计算机立体视觉的橡胶空气弹簧检测系统,采用图像匹配的方法来进行弹簧的测量,通过寻找图像

中的匹配点,经过试验测得在测量 100 mm 直径的橡胶囊时,最大误差为 0.56 mm,其要求检测对象是要具有连续曲面的橡胶囊,还不能满足机械弹簧的检测要求。胡伟,黄平,魏昕等^[4]利用线阵 CCD 摄像机,配合精密光学转台来进行弹簧的测量。但对弹簧安装位置和角度都有比较严格的要求,由于相机为线阵相机,在旋转中转台的误差也会对测量结果有很大影响。许昊,范详,魏文杰等^[5]设计了一种基于机器视觉的弹簧内径在线监测方案,检测精度较高,但只能检测弹簧的内径。

利用二维图像所得到的测量数据比较有限,因此将三维机器视觉系统用于弹簧的全面检测中是一个有效的解决方案。三维机器视觉检测系统是上个世纪 70 年代开始出现的一门新技术方向,主要是利用两个或两个以上摄像机,或者一个带有辅助信息的摄像机进行拍照,根据不同方向的视差实现对物体三维数据的生成^[6]。一般利用主动光源照明,投射出点、线、面结构光或光栅,根据左右相机读取的主动光源的反射信息,获得物体表面的三维立体形貌。

2 三维弹簧多参数综合测量系统

2.1 三维弹簧多参数综合测量系统的硬件构成

本文基于面结构光测量原理,设计了一个用于三维测量的弹簧立体视觉试验测量系统,如图 1 所示。

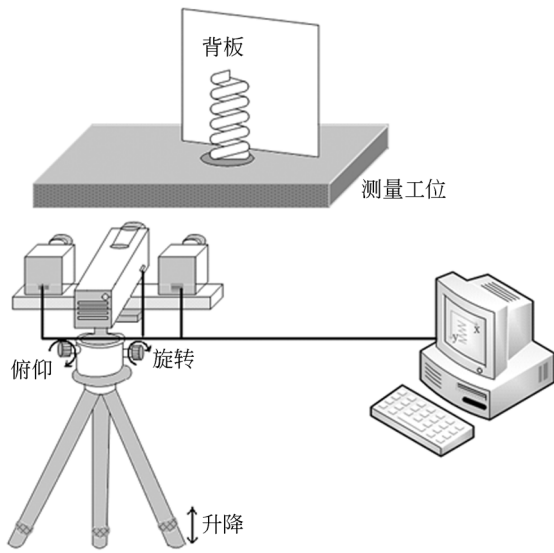


图 1 弹簧立体视觉测量系统

Fig. 1 Spring stereo vision measurement system

2.2 弹簧三维立体视觉测量过程

三维弹簧测量系统属于双目视觉测量系统,为了实现高精度测量,首先需进行摄像机标定。

实验使用高精度的环状编码标记点^[7]对相机进行标定。通过对不同角度获得的图像进行标定得到具体标定参数,如表 1 所示。

只有正确选择弹簧立体匹配方案,才能得到高精度的弹簧三维测量数据。立体匹配的任务是确定物空间中任意一点在左右摄像机中的成像位置^[8]。只有正确找到每个点对应的成像位置,才能正确计算出物空间点的正确三维坐标。

由于弹簧属于镂空的工件,通过光源投射的光很难进行立体匹配。为了准确找到投射在被测物体上面的光条的对应关系,本实验系统使用投射结构光条立体匹配方法^[9],以解决弹簧三维成像过程中的立体匹配难题。

在立体视觉测量中,由于视角限制,每次只能采集到被测视场的一幅立体数据,如果想要获得被测物体的整体三维数据,必须对不同视角的数据进行拼接^[10]。在立体拼接过程中,通常需要在被测物体上面粘贴一些参考标记点,标记点一般为圆形或者圆环形。

表 1 具体标定参数

Tab. 1 Specific calibration parameters

个数	参数	左相机	右相机	
一个相机	内部参数	焦距	15.752 7	15.652 2
		图像距离	690.212 7,510.896 6	640.699 5,563.402 5
		水平系数	0.999 1	0.999 2
		像素尺寸	0.005 2	0.005 2
		旋转矩阵	0.966 3,0.049 6,-0.252 5	0.988 2,-0.026 5,0.150 8
	外部参数	旋转矩阵	-0.004 0,0.983 9,0.178 1 0.257 3,-0.171 1,0.951 0	-0.001 6,0.983 0,0.185 5 -0.152 9,-0.181 6,0.971 4
		平移矩阵	-187.432 9 -164.572 0 1041.520 2	-173.240 6 -160.887 0 1107.169 5
		旋转矩阵	0.915 6,-0.003 2,0.402 1	0.915 6,0.000 9,-0.402 1,
		旋转矩阵	0.000 9,0.999 9,-0.005 9 -0.402 1,-0.005 0,0.915 9	-0.003 2,0.999 9,-0.005 0, 0.402 1,0.005 9,0.915 9
		平移矩阵	-420.947 4 -2.306 4 77.376 8	416.532 7 1.329 9 98.427 9

立体拼接的原理是在每个视角分别对场景中的标记点进行拍照,如果在相邻两个视角中能看

到 3 个公共的标记点,就可以计算两个视角存在的旋转和平移矩阵,进而可以将两个视角拼接

一个坐标系下^[11]。

在弹簧的测量过程中,由于弹簧本身是比较细的非连续的物体,不容易在上面粘贴标记点,只能将标记点粘贴在其所在的环境中。为了对粘贴在立体空间的标记点进行快速的检测和识别,并提取圆心,本文使用归一化转动惯量的模式识别方法。该方法最大的特点是识别率高,识别速度快,且具有旋转、平移和缩放不变性,是三维测量中对圆形目标进行模式识别的较好方法。该方法既能快速识别圆形目标,又能识别精度和准确率高的目标。

下面将详细介绍基于图像归一化转动惯量的模式识别方法。

在数字图像处理中,可以将二维数字化灰度图像($M \times N$)看成是二维 XOY 平面上的 $M \times N$ 个像素点,每个像素点 (x, y) 的灰度值为 $f(x, y)$ 。

根据物理上重心的概念,将灰度图像 $f(x, y)$ 的质心 (cx, cy) , 定义如公式(1)所示:

$$\begin{aligned} cx &= \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x \times f(x, y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)} \\ cy &= \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N y \times f(x, y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中,质心 (cx, cy) 代表图像灰度的重心。

图像围绕质心 (cx, cy) 的转动惯量记为 $J_{(cx, cy)}$, 如公式(2)所示:

$$\begin{aligned} J_{(cx, cy)} &= \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [(x, y) - (cx, cy)]^2 f(x, y) = \\ &= \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N ((x - cx)^2 + (y - cy)^2) f(x, y). \end{aligned} \quad (2)$$

根据图像的质心和转动惯量的定义,可给出灰度图像绕质心 (cx, cy) 的归一化转动惯量,如公式(3)所示:

$$\begin{aligned} NMI &= \frac{\sqrt{J_{(cx, cy)}}}{m} = \\ &= \frac{\sqrt{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N ((x - cx)^2 + (y - cy)^2) f(x, y)}}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $m = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)$ 为图像质量,代表图像所有灰度值之和。

通过对同一场景,从不同角度、不同比例进行拍照,获得的多幅图像进行圆形目标的提取。归一化转动惯量方法具有良好的缩放、旋转和平移不变性,因此可以作为物体的识别特征。

在识别弹簧标记点之前,首先要对标记点图像进行阈值分割和边缘提取的预处理。在本实验系统中,选用最大方差阈值分割^[12]效果图来进行阈值分割,如图 2 所示。通过实验可以发现,Pre-witt 边缘算子的边缘提取效果较好,对于采集图像平均灰度较暗的场合,使用 Prewitt 边缘算子,既能获得较好的边缘图像,又可以避免噪声的干扰,如图 3 所示。

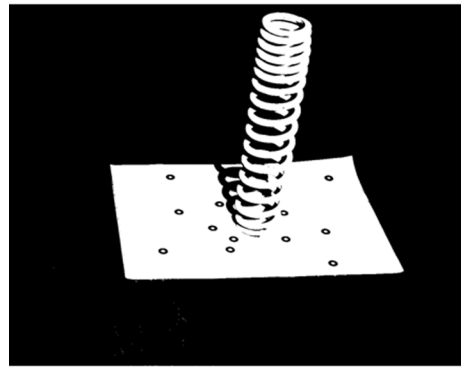


图 2 阈值分割效果图

Fig. 2 Threshold segmentation effect graph

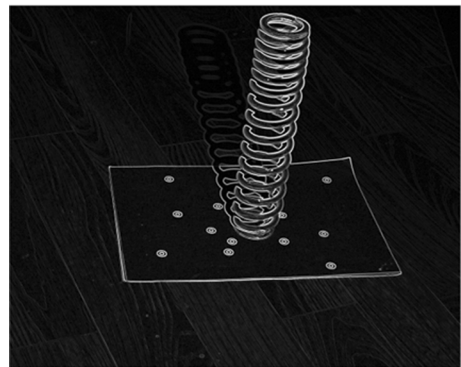


图 3 边缘检测效果图

Fig. 3 Edge detection effect graph

一般需要从 4 个角度对相关信息进行采集,以实现弹簧的整体拼接,这就可以获得物体的整体三维数据。4 个角度的采集图片如图 4 所示。

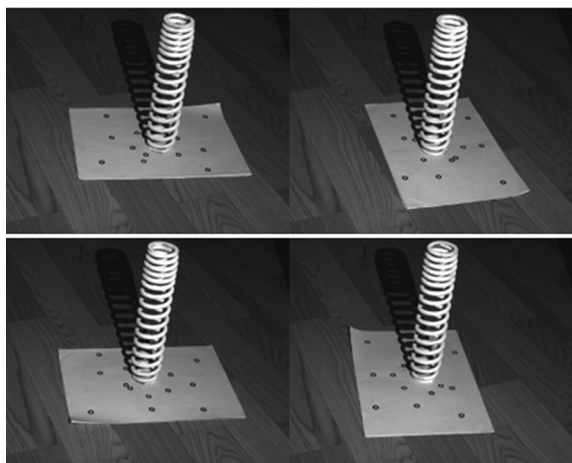


图 4 弹簧 4 个视角采集图

Fig. 4 Measured spring captured from four perspectives

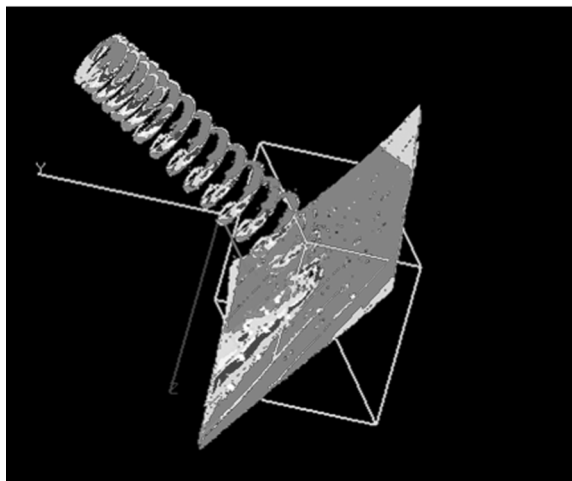


图 5 三维拼接效果图

Fig. 5 Three-dimensional splicing effect

按照立体匹配原理分别获得不同视角的三维坐标信息,并利用相邻两幅图像所采集到的公共点,自动将不同视角的数据拼合到一个坐标系下,不同颜色代表不同视角的点云^[13],如图 5(彩图见期刊电子版)所示。

不同视角的测量数据拼接完毕后,相互重叠部分会有很多重复的点云。将重复的点云去除后,可以获得能够进行后续分析的整体三维点云测量数据,如图 6 所示。

获得弹簧的整体三维数据后,必须经过恰当的数据处理,才能进行各种参数的比较。

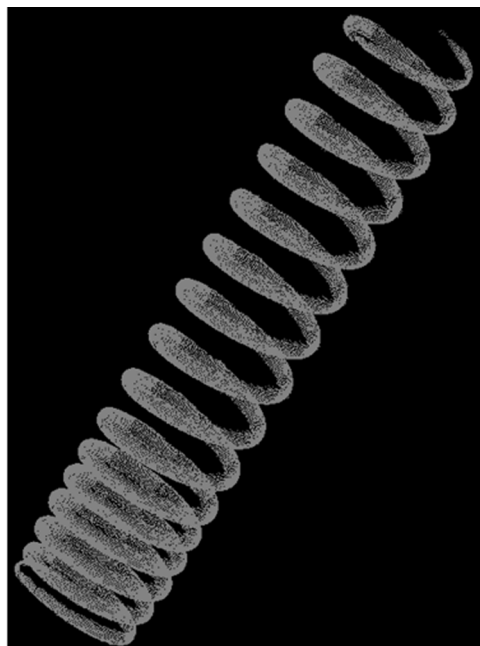


图 6 弹簧三维点云

Fig. 6 Spring 3D point cloud

3 弹簧三维数据的处理理论及实验

3.1 弹簧三维数据的处理

3.1.1 孤立点噪声的去除

在曲面测量中,结构光条在边缘处常会出现乱点或奇异点,这种奇异点会导致生成 STL (STereo Lithography) 的时候出现突起的棱角,因此,需要在点阵中将其滤除。本实验采用的是弦高差法进行滤噪^[14]:连接检查点前后两点,计算选取一点 p_i 到弦的距离 e_i ,如果 $\|e_i\| > [\epsilon]$, ($[\epsilon]$ 为给定的允差),则认为 e_i 是坏点,应以剔除。这种方法适合测量点均布且点较密集的场

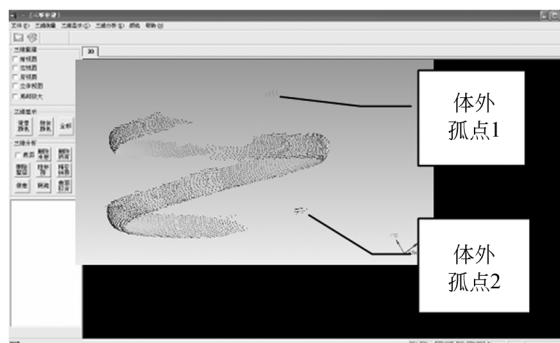


图 7 体外孤点处理示意图

Fig. 7 External isolated point diagram

合,特别是曲率变化较大的位置。如图 7 所示,点云中存在的体外孤点将被选中并进行处理。

3.1.2 数据平滑

根据高斯滤波器^[15]在指定域内的权重为高斯分布来做数据平滑,其平均效果较小,故在滤波的同时能较好地保持原数据的形貌。

3.1.3 STL 模型的建立

对于三维点阵的分析,目前通用的方法是将三维点云转换为 STL 数据模型。根据滤波、平滑并去除孤立点的三维点阵,可以生成指定数量的三角网格。

3.2 弹簧参数测量原理

弹簧最主要的两个指标为长度和圆柱度,完成对这两个指标的测量需要进行三维点云的圆柱拟合和平面拟合,根据两个拟合平面的距离确定弹簧长度,根据弹簧上的各点对于拟合圆柱的偏差确定弹簧的圆柱度。

圆柱拟合^[16]通过对圆柱点云数据进行拟合,从而得到圆柱参数,如轴线方程及圆柱半径等。本文柱面求解过程参照 Levenberg-Marguardt 原理,可以得到圆柱体的参数,轴线方程及半径。为了对弹簧长度进行评价,需要对弹簧的两个端面进行拟合。

在空间坐标系内,平面的方程^[17]均可用三元一次方程 $Ax+By+Cz+D=0$ 来计算,但点云数据由于未知数过多,可结合线性最小二乘法^[18]来求取。

基于以上方法,可以快速拟合出弹簧的端面。对其中一组弹簧的测量点云进行了圆柱拟合,结果如图 8 所示。

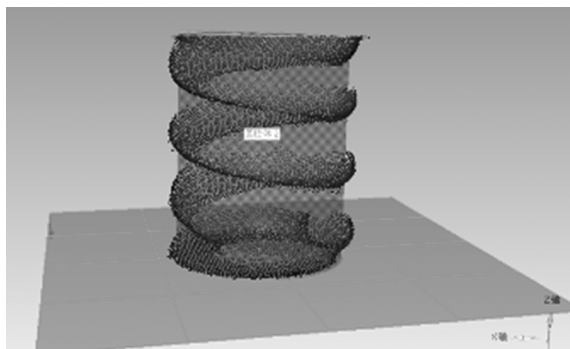


图 8 弹簧拟合圆柱效果图

Fig. 8 Spring fitting cylindrical effect graph

拟合圆柱主要参数如下:

基点:166.080 9, 166.916 7, 3.110 4 (单位:mm)

方向:0.005, -0.747, 0.665 (表示轴线的 3 个方向的夹角)

高度:32.363 3 mm 直径:24.748 8 mm

圆柱拟合后,可以得到圆柱度,长度两个主要指标,点云比较可以得到弹簧的表面质量。本文对同一批次生产的 5 个弹簧进行了质量评价,得到结果如下。

表 2 抽样 6 个弹簧的测量数据和拟合结果

Tab. 2 Measurement data and fitting results of six sampling springs

弹簧号	圆柱直径	长度	基点(x, y, z)	轴线方向
1	24.768 8	32.363 3	166.080 9,	0.005,
			166.916 7,	-0.747,
			3.110 4	0.665
2	25.740 8	32.685 1	167.317 9,	-0.036,
			167.814 7,	-0.772,
			4.004 6	0.635
3	25.700 3	32.055 8	166.968 7,	-0.023,
			167.504 6,	-0.776,
			4.384 7	0.630
4	25.671 6	32.677 1	167.143 4,	-0.032,
			167.637 2,	-0.777,
			4.302 7	0.629
5	25.713 3	32.615 8	167.006 1,	-0.026,
			167.685 9,	-0.778,
			4.363 3	0.627
6	25.885 6	32.694 4	167.336 7,	-0.035,
			167.610 6,	-0.774,
			4.322 8	0.632

在所有数据中,可以迅速得出 3 号弹簧的长度超出平均值 0.3 mm 以上,可认为是不合格弹簧。

4 弹簧三维误差全面比较理论

在高精度测量和高精度数据分析的基础上提出了弹簧三维误差全面比较理论。该理论可以让弹簧所有测量点均参与到弹簧误差比较过程中,弹簧的点云间距为 0.05 mm,任何一个点的误差

均会在系统中给予提示,对于精度要求特别高的弹簧,应用三维误差全面比较理论可以保证所选弹簧的质量。

为了建立弹簧三维误差全面比较系统,需要将测量弹簧与标准弹簧所在的坐标系统一。转化坐标系的原则是先利用标记点进行坐标粗定位,再利用 ICP 和曲率等相关信息进行坐标精密对准。

坐标粗定位的基本原理是在被测物体点云集合 M_1 上选取不共线的 3 个点 A_1, B_1 和 C_1 ,称为重定位基准点,如图 9(a)所示。在 CAD 模型上与 A_1, B_1, C_1 对应的 3 个点为 A, B, C ,如图 9(b)所示。在进行精密拼接过程中,由于编码标记点个数有限,且标记点为平面图案,在不同视角下的变形较大,影响拼接精度。因此编码标记点只能做坐标的粗定位。

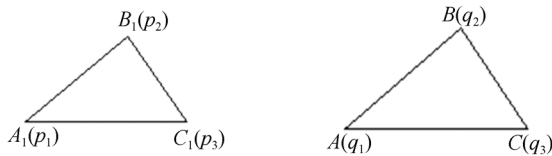


图 9 坐标粗定位的基本原理

Fig. 9 Principle of coordinate rough localization

在 CAD 模型上 $\triangle ABC$ 上作出 $\triangle A_1 B_1 C_1$ 的全等 $\triangle A B_2 C_2$,边 AC 与 AC_2 共线,求出 $\triangle A B_2 C_2$ 的顶点 B_2 和 C_2 在 CAD 模型下坐标 r_1, r_2 ,然后求出 $\triangle A_1 B_1 C_1$ 的 3 个顶点坐标到 CAD 模型下的 $\triangle A B_2 C_2$ 的 3 个顶点坐标的转换矩阵 T ,如公式(4)所示:

$$T = [q_1, r_1, r_2, Q][p_1, p_2, p_3, Q_1]^{-1}, \quad (4)$$

式中 $Q_1 = p_1 + \frac{p_1 p_2 \times p_1 p_3}{|p_1 p_2 \times p_1 p_3|}$, $Q = q_1 +$

$$\frac{q_1 r_1 \times q_1 r_2}{|q_1 r_1 \times q_1 r_2|}$$

然后被测物体的点云就转换到了 CAD 模型上,其转换公式为: $M_3 = T \cdot M_1$,其中, M_3 为 M_1 坐标转换后的点云集合,设基准点 A_1, B_1, C_1 经坐标转换后变为 A_3, B_3, C_3 。

由于存在测量误差,在两个坐标系下的对应点不可能完全一致,通过上述的坐标变换必将导致点云的变形,为求得最佳定位状态,可利用 ICP 算法^[19]进行误差处理。ICP 算法的基本思想是:给定的目标点集 P 和参考点集 Q ,为了使 P 能

够和 Q 对齐,对于 P 中的每个点,首先在 Q 中找一个与之距离最近的点,建立点对的映射关系,然后通过最小二乘法计算一个最优坐标变换 M ,且令 $P=M$,进行迭代求解直到满足精度要求为止,最后的坐标变换即为每次变换的合成。

通过双目系统测量出来的三维点阵集合设定为 P ,标准三维点阵设定为 X ,从 P 中获得一点 p ,在 X 中寻找与 p 距离最近的一点 x ,构成点对 (p, x) ,所有的点对形成点对集合 (P, X) 。根据点对集合之间的距离,计算出两个点集间的旋转平移矩阵 R 和 T 。对 P 应用 R, T ,得到变换后的点阵 P_x ,应用最小二乘法计算 P_x 中的点和 X 中的点之间的距离,如超过设定要求,则继续进行迭代,直到使变换后的点对集合 (P, X) 的误差最小,此时的 R, T 就是最佳的旋转平移矩阵。在寻找三维点集中最佳匹配的过程中,本文还计算了点集区域的曲率变化信息,以保证曲率突出的地方优先匹配。

在测量中,由于弹簧每次安装位置和平面基本不变,因此,两幅点云之间的 R, T 搜索的运算量很小,一般进行不到 100 次的迭代就可以获得最佳值。

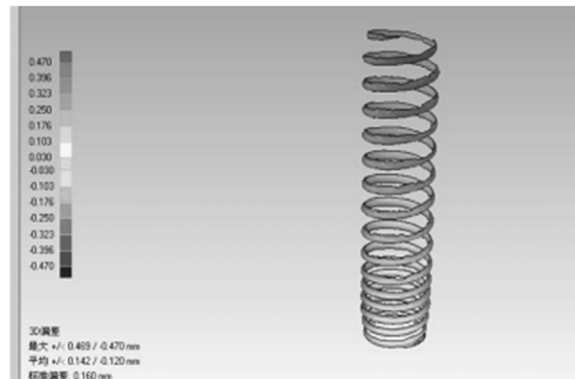


图 10 弹簧全面误差比较的三维色差图

Fig. 10 3D chromatic aberration chart of spring comprehensive error comparison

根据两次测量的标记点就可以直接完成点阵的粗定位,粗定位的精度可以控制在 0.1 mm 以内,经过精密拼接之后,精度可以控制在 0.05 mm 之内。从而提高了系统的响应速度,减少运算量。

点阵对准后,将自动生成三维误差全面比较色差图,如图 10(彩图见期刊电子版)所示,图中

红色方向代表正偏差逐渐增大,蓝色方向代表负偏差逐渐增大。

系统将根据三维点阵之间的距离直接判断弹簧是否合格,如果弹簧存在形变、长度不同,表面质量问题,会在三维点阵中迅速得到体现,不合格的弹簧将被系统快速识别出来,整个识别过程只需要 10 s 即可完成。

5 结 论

本文提出了一种应用三维立体视觉检测和平面图像检测相结合的弹簧快速特征检测系统。主要利用三维立体视觉原理,采用双目视觉结构和

主动光源形成弹簧的三维点云。通过三维点阵自动对准完成与标准弹簧数据的坐标转换,快速判断出弹簧是否属于合格品。对筛选后的弹簧进一步通过二维图像检测,给出其详细参数。由于三维检测出的点云与物体唯一相关,景深可以达到 300 mm,因此避免了由于摄像机和弹簧相对位置变化而引起的误差。采用二维图像和三维检测相结合,可以使得弹簧检测系统具有更快的检测速度,精度可以达到 0.05 mm,实验结果显示,本文提出的弹簧三维误差全面比较理论与系统,具有更高的准确性和全面性,可将不合格弹簧 10 秒内快速识别出来,完全可以满足在线检测的要求。

参考文献:

- [1] 郑建勇,周家春. 智能弹簧检测仪研制[J]. 自动化仪表,1994(3):39-42.
ZHENG J Y, ZHOU J CH. Development of smart spring tester[J]. *Automation Instrument*, 1994(3): 39-42. (in Chinese)
- [2] 王黎明,丁洪萍. 基于机器视觉的弹簧组件外观检测[J]. 汽车制造行业应用,2007(10):121-124.
WANG L M, DING H P, Alignment inspection of spring components based on machine vision[J]. *Automobile Manufacture Industry Application*, 2007(10):121-124. (in Chinese)
- [3] 李芹,王国林. 基于计算机视觉技术的橡胶空气弹簧三维变形测量[J]. 橡胶工业,2008,55(7):436-440.
LI Q, WANG G L, 3D deformation measurement of diaphragm-type rubber air spring based on computer vision technology[J]. *Rubber Industry*, 2008, 55(7):436-440. (in Chinese)
- [4] 胡伟,黄平,魏昕,等. 圆柱螺旋压缩弹簧检测系统研究[J]. 机床与液压,2008,36(11):112-114.
HU W, HUANG P, WEI X, *et al.*. Research of measuring system of cylindrical helical compressed spring [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008, 36(11):112-114. (in Chinese)
- [5] 许昊,范详,魏文杰,等. 基于机器视觉的弹簧内径尺寸检测研究[J]. 机电产品开发与创新,2016,29(1):78-79.
XU H, FAN X, WEI W J, *et al.*. Research of spring inner diameter detection based on machine vision technology [J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2016, 29(1):78-79. (in Chinese)
- [6] FANANY, IVAN M, KUMAZAWA, *et al.*. A neural network for recovering 3D shape from erroneous and few depth maps of shaded images [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2004, 25(4): 377-389.
- [7] 宋丽梅,陈昌曼,陈卓,等. 环状编码标记点的检测与识别[J]. 光学精密工程,2013,21(12),3239-3247.
SONG L M, CHEN CH M, CHEN ZH, *et al.*. Detection and recognition of cyclic coded targets[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12), 3239-3247. (in Chinese)
- [8] 陈彬. 实时双目立体匹配算法研究与实现[D]. 武汉:武汉科技大学,2014.
CHEN B. *Research and implementation of real-time binocular stereo matching algorithm* [D]. Wuhan: Wuhan University Of Science And Technology, 2014. (in Chinese)
- [9] 蔡洋涛,梁雯雯. 基于机器视觉的三维测量仪中激光条纹的提取算法[J]. 新技术新工艺,2016(1):46-48.
CAI Y T, LIANG W W. The algorithm for extracting laser stripe of the 3D measuring instrument based on machine vision[J]. *New Technology and New Process*, 2016(1):46-48. (in Chinese)
- [10] 胡笑莉,仲思东. 基于立体视觉的三维立体模型全自动拼接方法[J]. 科学技术与工程,2015(12):75-

80.
HU X L, ZHONG S D, A three-dimensional automatic stitching method based on stereo vision[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015(12): 75-80. (in Chinese)
- [11] 杨剑,吕乃光,董明利. 加权最小二乘法在机器视觉系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8), 1870-1877.
YANG J, LU N G, DONG M L, Application of weighted least square method to machine vision system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8), 1870-1877. (in Chinese)
- [12] 李宝顺,王玮,包亚萍,等. 一种邻域均值加权最大类间方差的阈值分割法[J]. *小型微型计算机系统*, 2014, 35(6): 1368-1372.
LI B SH, WANG W, BAO Y P, *et al.*. A thresholding segmentation method of neighborhood-mean weighed otsu[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2014, 35(6): 1368-1372. (in Chinese)
- [13] 陈刚,姚英学. 多视点大空间三维坐标数据归一化方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7), 1309-1314.
CHEN G, YAO Y X, 3D datum mosaic method of multi-view and large scale based on optical coding[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7), 1309-1314. (in Chinese)
- [14] 赵军. 整体叶轮逆向工程中数据处理方法与应用[D]. 西安:西京学院, 2015.
ZHAO J. *Data processing method and application of integral impeller reverse engineering* [D]. Xi'an: Xijing University, 2015. (in Chinese)
- [15] 苏鑫. 表面粗糙度测量数据采集与高斯滤波方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2015.
SU X. *The surface roughness measurement data acquisition and gaussian filter method research* [D]. Harbin: Harbin University Of Science And Technology, 2015. (in Chinese)
- [16] 路璐,尚丽平,宋丽梅. 基于投影的 Levenberg-Marquardt 圆柱拟合[J]. *计算机技术与发展*, 2009, 19(8): 133-136.
LU L, SHANG L P, SONG L M, Cylindrical fitting with Levenberg-Marquardt based on projection [J]. *Computer Technology and Development*, 2009, 19(8): 133-136. (in Chinese)
- [17] BI SH SH, ZHANG SH Q, ZHAO H ZH. Quasi-constant rotational stiffness characteristic for cross-spring pivots in high precision measurement of unbalance moment[J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 328-334.
- [18] SHI B Q, LIANG J. An integration method for scanned multi-view range images (MRIs) based on local weighted least squares (LWLS) surface fitting [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 77, 64-78.
- [19] 王瑞岩,姜光,高全学. 结合图像信息的快速点云拼接算法[J]. *测绘学报*, 2016, 45(1): 96-102.
WANG R Y, JIANG G, GAO Q X. Fast registration method for point clouds using the image information [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(1): 96-102. (in Chinese)

导师简介:



宋丽梅(1976—),女,河北秦皇岛人,教授,1999年、2001年和2004年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事计算机视觉、三维光学测量、逆向工程和模式识别方面的研究。E-mail: lilymay1976@126.com

作者简介:



李晶(1993—),女,辽宁锦州人,硕士研究生,2015年于天津工业大学获得学士学位,主要从事机器学习、模式识别、三维测量、机器视觉方面的研究。E-mail: 653982905@qq.com