

DOI: 10.7652/xjtuxb201404001

汽车伞齿轮多目视觉检测系统与算法

刘瑞玲, 钟德星, 韩九强
(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对人工检测汽车伞齿轮表面缺陷与尺寸参数存在成本高、工作量大、检测速度慢且产品一致性差等问题,利用机器视觉技术进行研究,开发了一种集缺陷检测和尺寸测量于一体的伞齿轮多目视觉检测装置。通过构建的邻域均差缺陷提取、圆逼近和快速旋转定位 3 种高效图像处理算法,解决了伞齿轮齿面多、外形结构复杂、缺陷种类多样等复杂条件下的齿轮缺陷与尺寸检测难题。可检测缺陷包括磕碰伤、裂纹、充填不满、划痕、凹陷与凸起、麻点、花键重复拉削等,可检测最小缺陷尺寸为 0.4 mm×0.4 mm,测量精度为 40~50 μm,单次检测耗时小于 1.3 s,检测精度与速度均满足伞齿轮高速自动化生产线的实时在线检测需求。

关键词: 多目视觉;伞齿轮;缺陷检测;尺寸测量

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)04-0001-07

Bevel Gear Detection System with Multi-Camera Vision

LIU Ruiling, ZHONG Dexing, HAN Jiuqiang
(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is expensive, inefficient, slow and imprecise to detect surface defects and dimension parameters of automotive bevel gear by manual observing. A synthetic bevel gear detection system and device with multi-vision technology are developed. The system is able to detect surface defects and measure gear dimension simultaneously. Three efficient image processing algorithms named Neighborhood Mean Value Difference Defect Extraction, Circle Approximation Method and Fast Rotation and Position are proposed, and knocked holes, cracks, scratches, dints, gibbosities and repeated cuttings of spline can be rapidly detected. The detection process takes no more than 1.3 seconds. The dimensions of the detectable defects are 0.4 mm×0.4 mm and the dimension measurement precision reaches 40-50 μm.

Keywords: multi-vision; bevel gear; defect detection; dimension measurement

伞齿轮又称汽车换挡齿轮,是汽车变速器中的重要传动部件,其质量好坏直接影响变速系统乃至整个汽车的运行状态^[1]。据统计,汽车变速器故障约占汽车底盘故障的 1/3,其中由于齿轮质量问题造成的故障比重最大^[2]。虽然目前汽车伞齿轮从设计、材料到制造工艺等方面已相当成熟和规范,但在高速生产线中仍难免产生如尺寸偏差、表面划痕、压伤、凹陷、填充不满等缺陷。使用有缺陷的齿轮不仅会给厂家带来巨大的损失,更会降低汽车的实用性能,埋下安全隐患^[3-5]。

目前,国内外主要采用人工完成伞齿轮的缺陷检测,效率低、工作量大,难以保证质量的稳定性和一致性。近年来,日本大阪精密机械株式会社研发出一种高精度的齿轮测量仪,但其检测速度缓慢,无

收稿日期: 2013-11-01。 作者简介: 刘瑞玲(1977—),女,讲师;钟德星(通信作者),男,讲师。 基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2012JQ8042);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xjj2013020)。

网络出版时间: 2014-03-06 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140306.1027.004.html>

法满足伞齿轮高速生产线的检测需求。国际上已有采用机器视觉技术进行齿轮缺陷检测的应用,但主要是针对普通齿轮的断齿或平面缺陷进行检测,对结构更为复杂的伞齿轮缺陷检测尚无先例。由于伞齿轮外形结构复杂,尺寸测量任务多,缺陷种类多样,采用传统的单相机视觉系统难以获取足够的有效信息,无法实现多尺寸快速精准测量和全面准确的缺陷检测分类。

机器视觉是用机器模拟人眼对目标对象进行检测、识别、判断和测量的一种先进检测技术^[6-7]。针对上述问题,本文研制出一种集缺陷检测和尺寸测量于一体的伞齿轮多目视觉检测装置,并提出邻域均差缺陷提取、圆逼近和快速旋转定位等3种高效图像处理算法,成功解决了伞齿轮齿面多、外形结构复杂、缺陷种类多样等复杂条件下的齿轮缺陷与尺寸参数的高速高精度检测难题。

1 检测项目与需求分析

本文所研制的伞齿轮缺陷检测系统装置目前主要针对 A_4 和 F_6 两种直齿伞齿轮进行缺陷检测和尺寸测量,如图1所示。

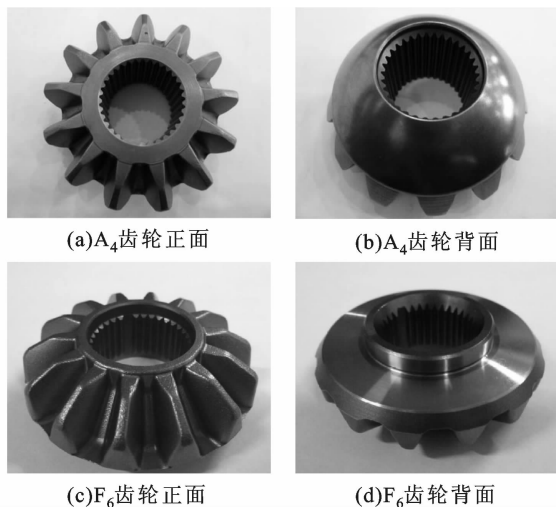


图1 A_4 和 F_6 两种直齿伞齿轮的样品图

两种伞齿轮的缺陷检测和尺寸测量需求如下。

(1)如图2所示,伞齿轮齿端表面、球面或安装端面的缺陷检测,包括磕碰压伤、裂纹、充填不满、折叠、划痕、凹陷与凸起、花键重复拉削等,其最小可检测缺陷尺寸大于 $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 。

(2)伞齿轮高度、花键大小径、止口直径、大外圆直径和小外圆直径的测量,检测精度为 $80 \sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 。

(3)检测速度要求为一次检测耗时大约1 s。

2 硬件设计方案

伞齿轮的齿数多、齿面侧向各异、缺陷类型多样,例如 A_4 齿轮有13个齿、26个齿面, F_6 齿轮有14个齿、28个齿面,如何能够实现伞齿轮全齿各异侧面缺陷实时在线检测是伞齿轮缺陷检测面临的最大困难。一种方案是采用单相机旋转定位拍摄方式,但这种方式需要高精度的旋转定位系统,检测速度过慢,满足不了生产线的高速检测需求。

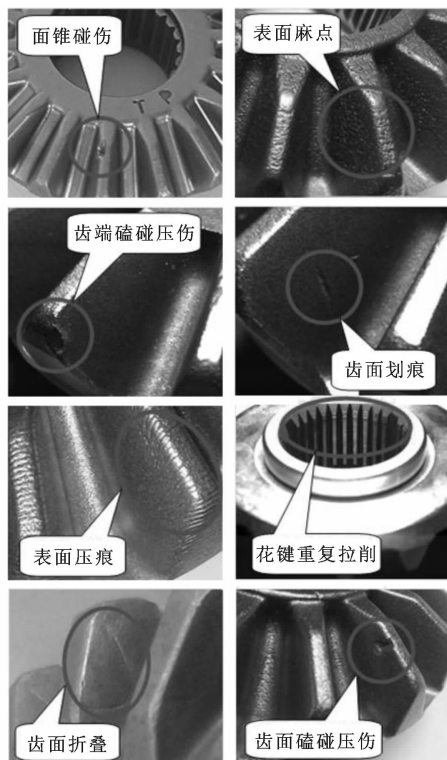


图2 伞齿轮表面缺陷举例

针对伞齿轮齿面均匀分布、旋转对称的结构特点,提出多台高速相机同步采集处理的检测方案,其检测速度比单相机旋转定位方式提高了一个数量级。

本系统采用的检测方案如图3所示,以9台高速USB相机对伞齿轮的不同部位同时进行拍摄。顶面相机是整个图像采集系统的核心,用于伞齿轮的定位和上下表面的缺陷检测与尺寸测量。7台侧面相机均匀布设在伞齿轮的周围,相对于水平面的倾角约为 45° ,与伞齿轮的齿槽基本垂直,用于对伞齿轮侧齿表面的缺陷检测。对 A_4 齿轮而言,每个侧面相机的视场中有4~5个齿面,这样7台相机可以拍摄到所有的齿面,不存在死角。此外,在设备台面上固定一台视野为水平方向的相机,用于齿轮的高度信息测量。当上料完毕后,操作人员发出指令控制多台相机同时拍摄,采集的图像分时传送到工

控机中,工控机完成图像处理,并根据处理结果发出相应的指令或进行显示。

针对伞齿轮不同位置的检测精度要求,本装置采用了 300 万像素、200 万像素和 130 万像素 3 种分辨率的工业相机,根据伞齿轮实际尺寸和成像尺寸可以计算出图像中一个像素代表的实际尺寸约为 40~50 μm 。图像检测结果的单位是像素,也就是说,对汽车伞齿轮的高度、花键大小径、止口直径等尺寸测量精度为 40~50 μm 。

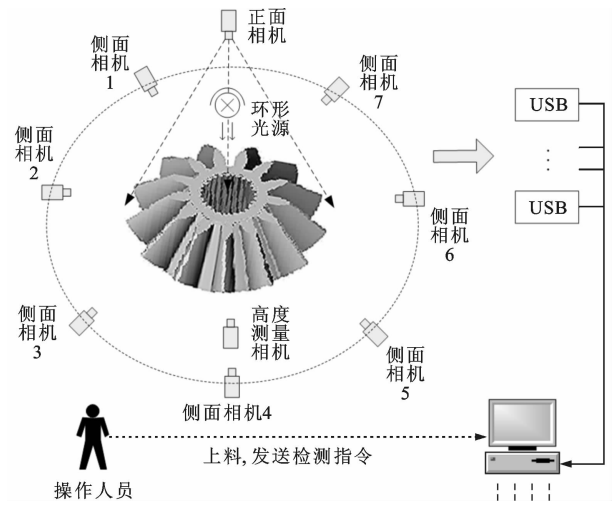


图 3 伞齿轮检测方案示意图

系统硬件结构分为 4 个模块:摄像模块、控制与处理模块、输入与输出模块和齿轮旋转模块,如图 4 所示。摄像模块由 9 路高速工业相机和一个顶面环形光源构成,环形光源用于对整个系统的照明,9 路相机用于对伞齿轮各个部位进行图像采集;控制与处理模块是整个检测系统的中枢,负责图像处理和检测结果与指令的输出;输入与输出模块包括显示器、键盘、鼠标和踏板,显示器用于显示伞齿轮检测

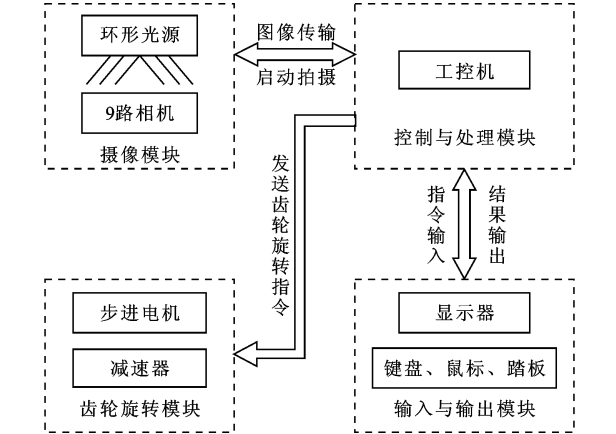


图 4 伞齿轮检测方案硬件结构框图

结果,鼠标和键盘用于对软件操作,脚踩踏板用于启动检测(本系统另有软件按钮触发和自动触发两种启动模式);齿轮旋转模块由步进电机和减速机组成,用于在模板采集和齿轮特殊部位检测时对伞齿轮进行高精度旋转。

3 软件设计方案

在硬件基础上,针对多任务、高精度、高速度检测要求,在 MFC 和 OpenCV 平台下开发出伞齿轮缺陷检测系统软件。伞齿轮的检测包括正面检测和背面检测两大模块。系统可自动识别出当前检测的是伞齿轮的正面还是背面,并判断出伞齿轮是否放正。正面检测又包括伞齿轮上表面检测和侧面检测两个子模块。每个子模块都包含缺陷检测和尺寸测量两部分。伞齿轮缺陷检测系统的整体流程如图 5 所示。对于一个新样本的检测,系统按照上表面检测→侧面检测→背面检测的流程进行,如果在某一环节检出缺陷,立即对缺陷进行标注,输出缺陷信息和已测量出的尺寸信息,终止检测进程。

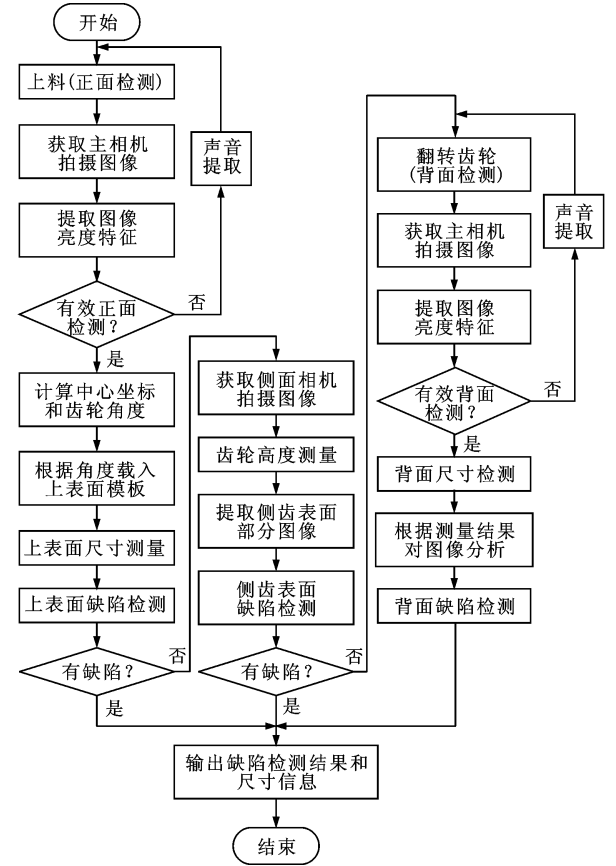


图 5 伞齿轮缺陷检测系统的整体检测流程

伞齿轮缺陷检测系统软件包括缺陷检测、设备校准、模板采集和参数设定 4 大模块。其中设备校

准模块对9个相机的位置、光圈和焦距进行校准,模板采集完成标准合格齿轮的样本采集与尺寸校准,参数设定针对不同的伞齿轮检测任务进行相关参数设置,缺陷检测则给出当前检测任务的缺陷信息、图像标注、尺寸信息和统计信息等。本系统对某伞齿轮上表面进行缺陷检测的情况如图6所示,画面显示该齿轮的齿端有两处磕碰伤。



图6 伞齿轮上表面有缺陷的检测结果

4 缺陷检测关键技术

针对伞齿轮表面缺陷复杂多样、检测时间要求短,一般缺陷检测算法难以胜任的问题,本系统采用多线程处理技术,提出了邻域均差缺陷提取、圆逼近、快速旋转定位等多种高效图像处理算法。

4.1 邻域均差法

从纹理的角度来看,物体表面的各种缺陷表现为纹理的波动、扭曲、起伏、粗糙等特征,可以通过对齿轮表面纹理的分析进行缺陷检测。基于灰度直方图的纹理描述算子包括均值、标准差、平滑度、三阶矩、一致性和熵等,经过大量实验验证三阶矩和平滑度两种描述算子的组合对齿轮表面的缺陷识别效果最好。

基于灰度直方图的纹理量度描述算子很多,例如峰度、粗糙度等,因此具有较好的可扩展性,但该方法对外界干扰比较敏感,阈值设定复杂,需要经过大量的实验来确定。这类算子计算出来的数据不能直接全面地表达缺陷的性质,因此本系统重新提出一种邻域均差缺陷提取算法,步骤如下:

步骤1 计算某个邻域内的像素均值,设邻域区域为 $D \times D$ 像素,本系统中 $D=30$,统计该邻域内像素大于0的像素点个数 N ;

步骤2 统计该邻域内像素值的总和 S , $S =$

$\sum_{i=0}^{D-1} \sum_{j=0}^{D-1} p(i, j)$, 其中 $p(i, j)$ 是坐标为 (i, j) 的点的像素值;

步骤3 求出该邻域内像素的均值 M , $M=S/N$;

步骤4 当该邻域内某点像素值与均值差异较大时,标记该点为缺陷点,即当 $|p(i, j) - M| > \delta$ 时,令 $p(i, j) = 255$, δ 为设定的阈值。

邻域均差缺陷提取算法可以将缺陷整体提取出来,并通过计算缺陷的面积将较大的缺陷检测出来,而忽略一些面积较小、对产品质量影响不大的缺陷。此外,通过膨胀腐蚀等操作可以在一定程度上滤除样品表面的杂质、灰尘和污垢等干扰。

4.2 圆逼近法

为快速检测齿轮结构上实圆或拟合圆的位置和尺寸,提出圆逼近算法。该算法利用了尺寸测量时已实现的伞齿轮定位结果,即可估计出待测圆的大概位置,其基本思想是:以初始化的圆心和半径绘制一个圆,慢慢将其扩张或收缩,同时圆心不断移动,使绘制圆逐渐向待检测圆逼近,直到两者完全吻合为止,具体步骤如下:

步骤1 对原始图像做阈值分割,提取出待检测圆边缘,作为目标像素集合 C ;

步骤2 设置拟合圆圆心和半径的初始值 (x_0, y_0) 、 r_0 ,设置角度旋转步长 θ ;

步骤3 令半径增大或减小,即 $r_0 = r_0 + \delta_r$ 或 $r_0 = r_0 - \delta_r$,其中 δ_r 为半径每次递增或递减的值;

步骤4 以当前圆心和半径值计算出拟合圆上的像素集合 C' ,并求出 C' 与集合 C 的交集 X 及 X 的元素个数 X_{num} ,如果 X 为空,返回步骤3;

步骤5 如果 X 不为空,判断 X_{num} 是否满足要求,若满足则输出圆心和半径信息,否则令圆心在其8邻域内移动,找到 X 内元素最少时的圆心值并记录,返回步骤3。

在判断集合 C 与 C' 的交集时,需要用到角度旋转步长 θ ,其计算方式如图7所示。 θ 为旋转的角度步长, A 、 B 为圆弧上的旋转起点和终点,圆半径为 R , A 、 B 之间的直线距离为 L 。为了计算方便,将圆心坐标设为 $(0, 0)$, B 点坐标为 $(R, 0)$, A 点坐标为 (x_1, y_1) ,则有

$$x_1 = R \cos \theta; \quad y_1 = R \sin \theta$$

$$L^2 = (R - R \cos \theta)^2 + R^2 \sin^2 \theta$$

因此, $\theta = \arccos((2R^2 - L^2)/2R^2)$ 。

理论上, θ 越大算法的执行速度越快,但同时算法对于干扰的鲁棒性会逐渐下降,检测精度也会不断

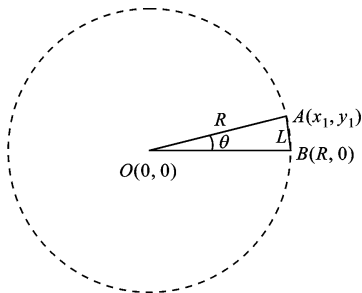


图 7 圆逼近算法中角度步长的计算示意图

降低,因此应该综合检测精度、执行速度和算法的抗干扰强度来设定角度旋转步长。此外,也可采用动态的步长设定方式,在圆逼近的初期,步长设置较大,快速地对待测圆逼近,一旦接触到待测圆后,立即减小步长,在小范围内对待测圆进行逼近拟合,这样既可以提高检测效率,又能保证算法的检测精度。

为了验证圆逼近算法的检测效果,使用圆逼近算法和 Hough 变换算法分别对图 8 中的月球轮廓进行拟合。两种方法拟合效果几乎完全相同,人眼无法分辨。表 1 给出了两种算法的比较结果,数据表明,圆逼近算法的初始参数设置与 Hough 变换相差不大,但圆逼近算法的检测速度却是 Hough 变换的 50 倍左右。另外,经典 Hough 变换算法不可用于高分辨率图像中的圆检测,其参数空间矩阵会随着图像分辨率增加急剧增大,导致运算量、存储空间都相当大,而圆逼近算法没有这方面的限制,其思想简单、计算量少、运算速度快,非常适合于高精度的圆检测场合。



图 8 月球图片(952×672 像素)及轮廓拟合效果

本算法要求初始化的拟合圆与待测圆有共同区域(包含或相交),当然也可以通过圆心遍历的方式来实现对任意圆进行检测,但是这样会使该算法的速度优势大打折扣。

表 1 Hough 变换与圆逼近算法拟合月球轮廓的效果比较

算法	最小半径/像素	最大半径/像素	圆心设置	角度步长/rad	半径步长/像素	检测时间/s
Hough 变换	150	250	无	0.1	1	5.662 3
圆逼近算法	150	250	图像中心	0.006	0.5	0.118 9

4.3 伞齿轮快速旋转定位

为了利用模板匹配算法实现缺陷检测,需要将齿轮原始图像变换到一个标准位置,从而提取相符的齿轮模板。该工作需要计算齿轮的旋转角度,主要包括 3 个步骤:

- 步骤 1 中心定位,提取伞齿轮中心圆的圆心;
- 步骤 2 获取完整的齿端顶面图像;
- 步骤 3 计算旋转角度 α 。

下面主要介绍 α 的计算。 A_4 齿轮有 13 个齿,齿与齿之间均匀分布,相邻两齿之间的夹角为 $360^\circ/13=27.69^\circ$,如图 9 所示。将每一个齿面的几何中心与圆心的连线到 x 轴的夹角定义为这个齿的角度,并将其换算为第一象限 0 到 27.69° 的范围内,剔除其中差异较大的角度值,其余的取均值,即为齿轮的标准旋转角度。

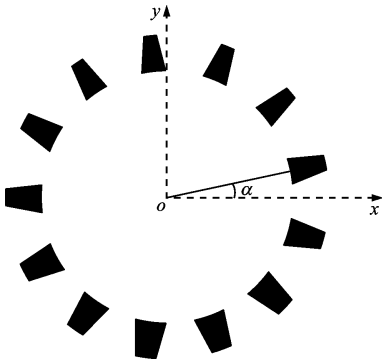


图 9 伞齿轮角度计算示意图

实验证明,上述齿轮旋转定位方法的精度非常高,误差在 0.005° 左右,完全可以满足齿轮定位的需求。

5 系统实物与检测结果

本文研制出的汽车伞齿轮多目视觉检测系统实物图如图 10 所示。由于伞齿轮加工的生产环境比较复杂,因此本装置在保证应有的检测功能之外,在设计加工过程中特别注重整个装置的稳定性,用料扎实,外观厚重。为了适应各种检测对象和测量任务,系统设计了一系列的位置调节元件,其中相机和光源距离桌面的高度可以通过设备上方的旋转拉杆进行调整,每个相机在水平方向的位置可以进行微调,侧面相机可以在较大范围内调整倾斜角度和到



图 10 伞齿轮缺陷多目视觉检测机实物图

齿轮的距离,因此本系统可以对绝大多数伞齿轮以及其他类似结构的齿轮或者零件进行检测和测量。

下面是本系统对 A_4 和 F_6 两种伞齿轮,各 84 个样品进行检测的结果。表 2、表 3、表 4 为 A_4 伞齿轮的缺陷检测数据,表 5、表 6、表 7 为 F_6 伞齿轮的缺陷检测数据。实验结果表明,系统对两种齿轮各个部位的尺寸测量准确率均为 100%,测量精度为 $45\text{ }\mu\text{m}$ 左右,反复测量误差不超过 $90\text{ }\mu\text{m}$,最小可检测缺陷尺寸为 $0.4\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}$,单次检测耗时小于 1.3 s ,检测精度与速度均可满足伞齿轮高速自动化生产线的实时在线检测需求。

表 2 A_4 伞齿轮上表面缺陷检测数据

检测结果	顶面圆环		顶面齿端			齿棱	
	连通缺陷	磕碰伤	凹坑	磕碰伤	充填不满	磕碰伤	充填不满
待检缺陷/个	1	7	10	15	1	13	10
检出缺陷/个	1	7	10	12	1	11	10
正确比率/%	100	100	100	80	100	84.6	100

表 3 A_4 伞齿轮侧面缺陷检测数据

检测结果	磕碰伤	划痕	凹坑	凸起	粗糙	表面剥落
待检缺陷/个	30	23	18	1	6	1
检出缺陷/个	28	19	16	1	6	1
正确比率/%	93.3	82.6	88.9	100	100	100

表 4 A_4 伞齿轮背面缺陷检测数据

检测结果	底面圆环		球面			花键
	磕碰伤	划痕	磕碰伤	划痕	凹坑	重复切削
待检缺陷/个	41	12	15	23	19	6
检出缺陷/个	39	12	15	22	19	6
正确比率/%	95.1	100	100	95.6	100	100

表 5 F_6 伞齿轮上表面缺陷检测数据

检测结果	顶面圆环			顶面齿端		齿棱	
	无倒角	磕碰伤	凹坑	磕碰伤	凹坑	磕碰伤	充填不满
待检缺陷/个	2	7	8	17	9	34	18
检出缺陷/个	2	7	8	16	9	30	18
正确比率/%	100	100	100	94.1	100	88.2	100

表 6 F_6 伞齿轮侧面缺陷检测数据

检测结果	侧齿表面				侧齿斜面		
	磕碰伤	凹坑	划痕	充填不满	磕碰伤	凹坑	划痕
待检缺陷/个	42	8	11	3	13	5	4
检出缺陷/个	37	8	8	3	11	5	3
正确比率/%	88.1	100	72.7	100	84.6	100	75

表 7 F₆ 伞齿轮背面缺陷检测数据

检测结果	底面圆环		安装端面			花键
	磕碰伤	粗糙	磕碰伤	划痕	尺寸偏差	重复切削
待检缺陷/个	3	3	2	5	4	3
检出缺陷/个	3	3	2	4	4	3
正确比率/%	100	100	100	80	100	100

6 结 论

本文所研制的汽车伞齿轮缺陷多目视觉检测系统采用了先进的机器视觉技术,成功解决了伞齿轮齿面多、外形结构复杂、缺陷种类多样和高速高精度的检测难题。研究表明,采用机器视觉技术可以替代人工实现对伞齿轮的高速高精度、全方位缺陷检测和尺寸测量,提高伞齿轮加工的生产效率与自动化程度。

本系统装置主体功能已完成,但仍有一些地方需要改进。例如,伞齿轮的边缘区域成像效果复杂,目前方法尚不能可靠检测。在后续工作中,拟采用模板匹配和区域纹理量度相结合的方法或直接对待检图像进行模板匹配的方法进行检测,但这两种方案都要求待检图像和模板有很高的匹配度,对伞齿轮角度提取算法是一个考验。另外,本系统对对比度比较差的表面缺陷检测效果不太理想,主要为暗坑和暗划痕两种缺陷,拟通过改进光照和相关算法进行解决。

参考文献:

[1] SHAO Yimin, LIANG Jie, GU Fengshou, et al. Fault prognosis and diagnosis of an automotive rear axle gear using a RBF-BP neural network [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 305(1): 12063-12073.

[2] PAREY A, TANDON N. Impact velocity modelling and signal processing of spur gear vibration for the estimation of defect size [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(1): 234-243.

[3] SARAVANAN N, RAMACHANDRAN K I. Fault diagnosis of spur bevel gear box using discrete wavelet features and decision tree classification [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(5): 9564-9573.

[4] 张勇. 汽车设计齿轮分类方案比较分析 [J]. 现代商贸工业, 2009, 21(19): 292-293.

ZHANG Yong. Comparative analysis of automobile gear classification scheme [J]. Modern Business Trade Industry, 2009, 21(19): 292-293.

[5] HAYES M. Better bevel gear production [EB/OL].

(2010-01-01) [2013-09-28]. <http://www.gear-solutions.com/article/detail/6076/better-bevel-gear-production>.

[6] CUBERO S, ALEIXOS N, MOLTO E, et al. Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables [J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(4): 487-504.

[7] GOLNABI H, ASADPOUR A. Design and application of industrial machine vision systems [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(6): 630-637.

[本刊相关文献链接]

吕涛,刘志刚,邓忠文,等. 一种光纤组量程扩增的激光频率扫描干涉绝对测距系统. 2013,47(9):77-82. [doi:10.7652/xjtuxb201309013]

穆为磊,高建民,王昭,等. 考虑人眼视觉特性的射线检测数字图像质量评价方法. 2013,47(7):91-95. [doi:10.7652/xjtuxb201307017]

黄进,金伟东,秦娜,等. 消除阴影和高亮噪声的双梯柱体码本前景检测模型. 2013,47(4):28-34. [doi:10.7652/xjtuxb201304006]

郝元宏,韩静,齐春. 一种新的浮选泡沫图像识别方法. 2011, 45(4):104-108. [doi:10.7652/xjtuxb201104019]

刘京鑫,孙剑,孟德宇. 基于视觉原理的分类算法. 2010,44(10):116-119. [doi:10.7652/xjtuxb201010022]

张斌,梅魁志,郭青. 仿生物视觉的非均匀采样方法及其硬件设计. 2010,44(6):99-103. [doi:10.7652/xjtuxb201006019]

马加庆,韩崇昭. 一种多线索融合的均值偏移跟踪算法. 2009,43(10):42-46. [doi:10.7652/xjtuxb200910009]

张国亮,谢宗武,蒋再男,等. 模糊化多视觉信息融合的视觉跟踪策略. 2009,43(8):33-37. [doi:10.7652/xjtuxb200908007]

欧阳诚苏,袁军,田军委,等. 人眼视觉特性与粗糙集结合的X射线图像增强算法. 2009,43(6):48-51. [doi:10.7652/xjtuxb200906011]

张国亮,王捷,刘宏. 大范围视觉伺服方法在空间机器人上的应用. 2009,43(1):85-89. [doi:10.7652/xjtuxb200901019]

(编辑 武红江)