

文章编号 1004-924X(2013)06-1613-08

基于图像求逆相位相关算法检测电机转子位置

赵吉文, 黄彪*, 王荔枝, 吴红标

(安徽大学 电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:提出了一种基于图像测量技术的电机转子位置检测方法。利用高速面阵 CCD 相机连续拍摄转动状态的电机转子的端面图像帧序列, 然后对采集的相邻两幅灰度图像进行极坐标变换和相位相关运算, 得出转子的旋转角度值。由于所拍摄端面图像的纹理信息与相位相关运算的准确性有关, 故对图像的纹理信息进行了逆行重构, 以得出可使运算准确的图像, 保证检测的准确性。为了提高检测效率, 采用自适应方法完成图像的极坐标变换, 即根据测量精度的要求确定图像的采样范围, 从而减少了运算量。实验结果显示, 运算结果的准确率为 100%, 并且测量可适应一定范围内的光照强弱变化。与直接进行极坐标变换的运算相比, 运算耗时降低了 50% 以上, 结果为电机转子的位置检测提供了可靠保障。

关键词:电机; 转子; 转角测量; 相位相关; 灰度梯度; 图像求逆; 自适应极坐标变换

中图分类号:TP391; TM306 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132106.1613

Detection of motor rotor position based on image reversible phase-correlation algorithm

ZHAO Ji-wen, HUANG Biao*, WANG Li-zhi, WU Hong-biao

(*Electrical Engineering and Automation College, Anhui University, Hefei 230601, China*)

* *Corresponding author, E-mail: huangahdx@163.com*

Abstract: A detecting method for motor rotor position was proposed based on image measurement technique. Firstly, the image of motor rotor was taken by a high-speed area CCD ceaselessly when the motor was rotating; then every two collected adjacent images were converted from a Descartes coordinate to a polar coordinate; finally, these images in the polar coordinate were calculated by phase-correlation algorithm, and the rotation angle was obtained according to the position of the phase-correlation peak. As the texture information of calculated image was related to the accuracy of phase-correlation, the calculated image was reconstructed to obtain an image to assure the right calculated result for implementing exact detection. Meanwhile, detection efficiency was required to increase, so the adaptive method was used in polar transformation, namely, only part of the pixels in the image was sampled according to the need of measurement precision. Experimental results show that the measurement accuracy of the proposed method is 100% and this measurement can be achieved in the environment with some different illumination intensities. Moreover, the calculating time can be reduced by over 50% as compared with that using polar transformation directly. The proposed method provides a reliable way

收稿日期:2013-01-26; **修订日期:**2013-02-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51277002); 安徽省自然科学基金资助项目(No. 11040606M123); 安徽高校省级自然科学基金重点项目(No. KJ2011A012); 安徽大学研究生智能创新项目

for the detection of motor rotors.

Key words: motor; rotor; rotating angle measurement; phase-correlation; gray gradient; inverse image; adaptive polar transformation

1 引言

在精密数控机床等设备上,伺服电机的转子位置检测对控制有很大的影响。电机转子位置检测大多采用编码器、霍尔元件或其他位置检测元件实现,其技术成熟,但是这些器件需要接触于电机进行检测,电机运行时的振动大大缩减了其使用寿命^[1],因此,解决恶劣工况下电机转子位置的检测问题具有重大的意义。

采用图像测量技术对目标物体进行测量是目前的研究热点^[2]。电机转子位置的检测是通过快速测量转子的旋转角度来实现的,引入上述技术可以实现非接触式测量,具体可以通过高速面阵 CCD 相机连续拍摄电机转子端面图像帧序列,再对其进行快速运算,最终实现旋转角度的快速测量。对于旋转角度的图像测量方法,文献[3]提出采用改进的尺度不变特征变换算法来计算物体旋转角度,物体在部分遮挡的情况下,也能较好地计算出旋转角度;文献[4]提出使用 CCD 相机采集辅助目标图像,通过图像处理和运算来获取被测物的旋转角度,实现基于数字图像的转角测量。不过采用上述图像空间域处理方法对电机旋转角度进行现场测量容易受到光照强度的偏移和 CCD 相机增益变化的影响,测量准确度不够高。

因而有人提出了频率域的旋转角度运算方法—相位相关算法。该方法多用于图像配准领域,通过精确计算图像间的相对运动量来实现图像配准,使用该算法能达到很高的图像匹配精度,结合极坐标变换还具有很高的旋转图像匹配精度^[5];而且该算法对图像的灰度依赖较小,对光照变化具有较强的鲁棒性^[6],符合实际的现场测量环境要求。因此,本文选用结合极坐标变换的图像相位相关算法来进行转角的测量。考虑直接运用会存在运算图像的不适宜、极坐标变换存在的不足^[7]等问题,本文对所选取的运算图像进行了逆行重构,找出适合算法运算的图像;对图像进行极坐标变换时采用自适应的方法,避免了极坐标

变换存在的不足,并且大大降低了运算量。这些改进可以得出准确、抗干扰性强、耗时优越的测量结果,为检测提供了保障。

2 检测原理

通过连续拍摄电机端面图像来实现检测,图 1 为检测方式示意图,拍摄面为转子的端面,选取一待测量的灰度图像附着于转子端面,当转子处于转动状态时,该图像随之一起转动,转子旋转一个角度后,拍摄到的 2 幅图像在坐标上有一个相对夹角,通过对 2 幅图像进行极坐标变换和相位相关运算,可以计算出夹角的大小,同时根据两幅图像的拍摄时间间隔计算出转动的角速度,进而实现电机转子的位置检测。在该方法中使用算法快速、准确地测量图像间的旋转角度是关键问题。

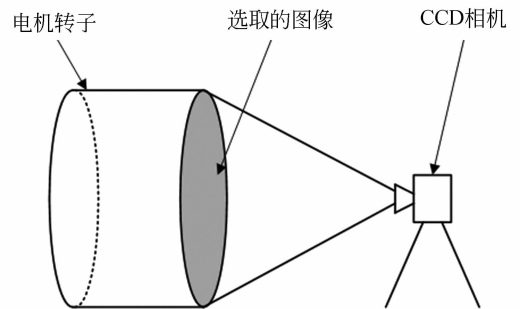


图 1 图像采集方式示意图

Fig. 1 Sketch of collecting images

3 基于图像相位相关算法的转角测量

3.1 算法原理

算法对采集的旋转前后灰度图像进行旋转角度的运算步骤是:先对 2 幅图像进行极坐标变换,把旋转角度转换为平移量,然后通过相位相关算法计算出该平移量,再把计算出的平移量反变换为旋转角度。算法具体原理如下:

3.1.1 相位相关算法理论

相位相关算法(PC)是通过图像间的互功率

谱相位得出它们的相似程度和空间域平移的。设图像 $p_1(x, y)$ 平移 $(\Delta x, \Delta y)$ 后转换为 $p_2(x, y)$ 。则:

$$p_2(x, y) = p_1(x - \Delta x, y - \Delta y), \quad (1)$$

根据傅里叶变换的移位特性,有:

$$P_2(u, v) = P_1(u, v) \exp[-2\pi j(u\Delta x + v\Delta y)], \quad (2)$$

则平移前后的2幅图像的互功率谱为:

$$\tilde{I} = \frac{P_1(u, v)P_2^*(u, v)}{|P_1(u, v)P_2^*(u, v)|} = \exp[-2\pi j(u\Delta x + v\Delta y)], \quad (3)$$

其中: P_1 和 P_2 分别为 p_1 和 p_2 的傅里叶变换, P_2^* 为 P_2 的共轭函数。再对式(3)进行傅里叶反变换:

$$\text{IFFT}(\exp(-2\pi j(u\Delta x + v\Delta y))) = \delta(x - \Delta x, y - \Delta y), \quad (4)$$

该求取互功率谱的傅里叶反变换运算即为相位相关法,所得二维脉冲函数会形成一个相关表面,表面上有一明显峰值,峰值表示2幅图像的相关性大小,峰值位置即为2幅图像的相对位移 $(\Delta x, \Delta y)$ ^[8]。

3.1.2 极坐标变换

设采集的转子旋转前后的2幅端面图像分别为: $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 。设图像 $f(x, y)$ 变换为极坐标表示的图像为 $f(\rho, \theta)$, 其中 ρ 为极径, θ 为极角, 则变换关系如下:

$$\rho = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad (5)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y - y_0}{x - x_0}\right), \quad (6)$$

其中: (x_0, y_0) 为变换中心。

设 $f_2(x, y)$ 与 $f_1(x, y)$ 之间的相对旋转角度为 $\beta(0^\circ < \beta < 360^\circ)$, 则有:

$$f_2(x, y) = f_1(x \cos \beta + y \sin \beta, -x \sin \beta + y \cos \beta). \quad (7)$$

对 $f_2(x, y)$ 进行极坐标变换后的图像为: $f(\rho, \theta - \beta)$ 。

因此 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 间的旋转角度量转换为水平平移量, 且平移量随旋转角度的增大而线性增加。若通过相位相关算法确定了变换后图像(大小记为 $M \times N$) 间的水平平移量(大小记为 n), 便可通过平移量反变换为旋转角度 θ ^[7], 计算式如下:

$$\theta = n \times 360^\circ / N. \quad (8)$$

3.2 影响转角测量的因素分析

若直接运用上述算法进行旋转角度的现场测量, 会存在下述问题:

(1) 通过 CCD 采集的图像进行频域运算时难免受到频谱混叠的干扰^[6]。然而, 各种图像的抗干扰强弱不同, 若极坐标变换后的图像抗干扰性能差, 则相位相关运算时可能会出现虚假的相关峰值, 导致运算结果的错误。

(2) 极坐标变换会导致图像的信息分布不合理, 图2所示为极坐标变换示意图, 图像极坐标变换是对图像按照图2中 $\rho\theta$ 坐标系中的网格进行“划分”, 再对每个网格相邻几点的灰度值进行采样、插值运算得出变换后图像的灰度值, 将其按照变换对应关系赋值于图中 $x-y$ 坐标系中得出变换后的图像, 图中也用线段和灰色区域性地表示了该对应关系。按照等角度间隔方式进行的采样, 任一圆周上的采样点数均相等, 会致使靠近图像中心点的像素点会被“过采样”, 而远离中心点的像素点被“欠采样”^[9], 最终导致变换后的图像信息与原图像有所差别。运算时图像的相位信息因此受到了干扰。

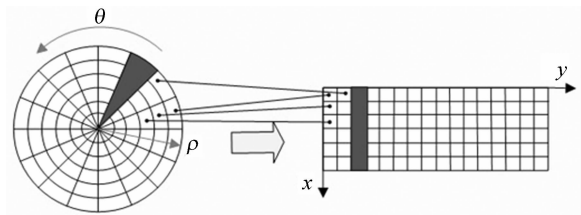


图2 极坐标变换示意图

Fig. 2 Sketch of polar transformation

(3) 若图像相邻像素点的灰度值相差较大, 则图像进行极坐标变换时, 对这些相邻几点进行插值运算得到的灰度值与原图像对应的灰度值存在较大偏差, 导致了变换前后的图像信息不一致, 可能会影响运算结果。

4 图像测量方法的改进

为了避免上述测量存在的问题, 并且降低测量耗时, 本文对测量图像进行逆行重构, 找出合适的运算图像; 同时, 对极坐标变换采用自适应采样的方式, 避免极坐标变换存在的不足, 亦可降低运算量。具体概述如下。

4.1 基于图像求逆的运算图像的选取

4.1.1 水平位移测量的图像选取原理

旋转角度的计算是由相位相关算法运算出的图像间的相对水平平移为前提的,因而需要先找出测量水平位移抗干扰性强的图像,再由极坐标变换原理反推出最终运算图像的选取。

图像进行相位相关运算的抗干扰强弱与运算图像的纹理信息有着很大关系^[10],为了描述图像的纹理信息,引入图像灰度梯度^[11],其可描述图像内的纹理差异,下式表示图像在位置 (x, y) 的灰度梯度:

$$\begin{cases} G_x = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \\ G_y = \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \end{cases} \quad (9)$$

当存在水平位移的两幅图像进行相位相关运算时,若图像列向量间的纹理信息差异明显,则两幅图像在频率域中的相移也较明显,有利于运算的抗干扰性。为此,采用图像(大小: $M \times N$)列向量灰度梯度和作为运算抗干扰强弱评价函数,记该值为 W ,计算方法:分别计算图像第 $n(n=2, 3 \dots N)$ 列的灰度梯度的绝对值,再进行求和,表达式如下:

$$W = \sum_{x=1}^M \sum_{y=2}^N |G_y|. \quad (10)$$

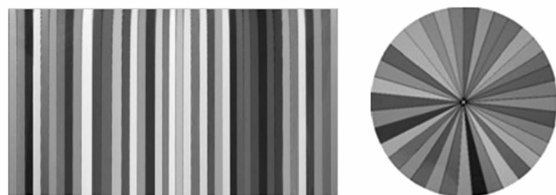
为了验证 W 的值与运算抗干扰性的关系,分别选取 3 组不同大小的图像: 400×100 、 100×400 、 360×360 ,每组 40 幅。先计算出每幅图像的 W 值,再在计算机中分别对 3 组所有图像水平平移 10 pixel,得到的所有平移后图像与平移前图像的对应点灰度值相同,若此时对所有平移前后的图像进行相位相关运算,得到的峰值为 1,峰值位置为 $(0, 10)$,这种情况为理想情况^[12];为了模拟出图像受到的相位信息干扰,对平移前后图像某一非对应点的灰度值增大或减少 180,图像的傅里叶变换是每点综合运算所得的结果,该处理可干扰图像傅里叶变换后的所有点值,并对平移后图像的 $1/3$ 区域的灰度值改为 0。最后,对每对处理后的平移前后图像进行相位相关运算,求得峰值 P ,若峰值所在位置可正确表示实际的平移量,则计算正确。实验得出:第一组图像中有 25 幅 W 值大于 59 680、第二组中有 29 幅 W 值大于 169 019、第三组图像中有 34 幅 W 值大于

306 965,这些图像的运算结果正确,3 组的其它图像的 W 值相对较小,只有少数图像计算结果正确。且每组运算结果正确的图像中,较多数 W 值大的图像所得的相关峰值高于 W 值较小的图像,其抗干扰性更好。

因此,相同大小的图像,若 W 值大,则其进行运算时抗干扰性强,为了找出 W 值大的图像,经多次比对,含有较多栅栏、且相邻栅栏间有明显灰度差的栅栏式图像的 W 值较大,可作为该测量的选取图像,如图 3(a)所示。经多次通过 CCD 采集图像进行测量实验得出,当图像大小大于 30×360 ,图像中栅栏的条数大于 30,相邻栅栏的灰度差较明显时,运算所得的最终结果均正确。

4.1.2 最终测量图像的选取

根据极坐标变换原理,可得选取的最终测量图像需符合轮廓为圆,圆内有 n 个扇形,每块扇形的角度大致相等, $n > 30$,相邻扇形间有着较为明显的灰度差等条件,如图 3(b)所示。采集图像大小的选择须根据测量精度进行确定,将在 4.2 节说明。该选取图像进行极坐标转换时,可转换为 4.1.1 节所述的栅栏式图像,其测量抗干扰性强,可避免 3.2 节所述的(1)的影响;对该图像进行采集,所得到的图像每块扇形内所有点的灰度值相近,图像进行极坐标变换对相邻的多点进行插值运算时,除扇形的边界区域外,所有点计算出的灰度值与对应值接近,这样可保证极坐标变换前后的图像信息基本相同,可避免 3.2 节所述的(3)影响。



(a)水平平移测量的选取图像 (b)最终测量的选取图像
(a)Selected image for measuring (b) Selected image for
horizontal translation final measurement

图 3 选取的测量图像

Fig. 3 Selected measuring image

4.2 自适应极坐标变换的优化测量

相位相关算法测量的精度是 1 pixel,由式(8)可得旋转角度的测量精度 α 为 $360^\circ/N$, N 为极坐标变换后图像的长度,其是由对变换前图像

沿各个圆周的采样点数(图 2 中 $\rho\theta$ 坐标系的每个圆环的网格数可表示)所决定;算法的耗时是由运算图像的大小决定,在 N 固定的情况下,影响运算耗时的主要因素是图像的宽度,其是由对图像的半径采样数(图 2 中 $\rho\theta$ 坐标系的每块圆扇的网格数可表示)决定。为此在保证所需测量精度的情况下,寻找合适的采样半径,可实现测量准确、耗时低,因而将采用自适应采样的极坐标变换实现优化测量,图 4 为示意图,图中所有网格为极坐标变换对图像的采样点,中间不同颜色区域的网格为自适应极坐标变换的采样点,为了确定该区域,需要确定关于 R 两个参数: R 的起点(即图中离中心点 r 处)和 R 的大小。具体确定原理与方法如下:

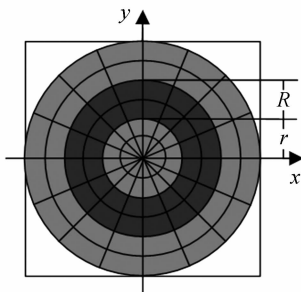


图 4 自适应极坐标变换采样示意图

Fig. 4 Sampled sketch of adaptive polar transformation

先根据需要的测量精度 α 确定沿圆周方向上的采样点数 N , N 即为 $360/\alpha$ 。图像沿圆周方向上的像素点数约为 $2\pi r_0$, r_0 为该圆周半径的像素点个数,为了保证充分采样到图像圆周方向上的每个像素点,避免“过采样”,需 $N < 2\pi r_0$,即在采样时采样半径需大于或等于 $N/2$,故设置采样半径的初始点 r 为 $360/(\alpha \times 2\pi)$ 。

因符合要求的不同选取图像的运算抗干扰强弱也不相同,故对于 R 大小的确定可对选取的图像进行标定实验予以确定。选取了一幅与图 3 (b)相同的图像进行实验予以说明,对图像进行人为旋转,使用 CCD 采集其旋转前后的图像,采集时须保证图像的中心点位于 CCD 拍摄画面的中心点位置。对采集的两幅图像按照测量算法进行运算实验,实验硬件配置:i5-2450M CPU 2.5 G,内存 4.0 GB, MATLAB2011b 编程环境。设置计算精度分别为:1, 0.5, 0.333°, 则可得对图像沿圆周方向的采样点数 N 分别为 360, 720,

1 080, 采样半径的起点 r 分别为 58, 115, 172;预先设置 R 为 20, 25, 30, 35, 40, 45 依次进行实验。运算后得到了相位相关峰值、运算耗时与 R 的对应关系如图 5 所示:

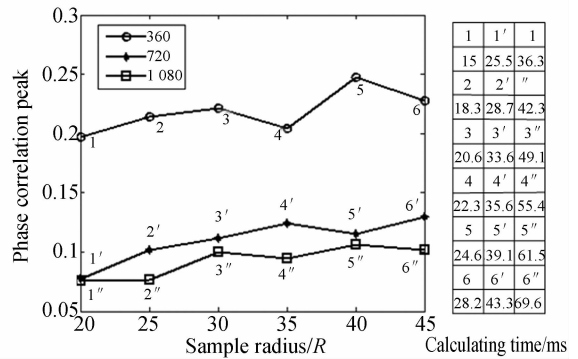


图 5 3 种不同测量精度下相关峰值、耗时与采样半径的对应关系

Fig. 5 Relationship between PC peak, elapsed time and sample radius under the three different precisions

结果中所有点的相关峰值所在位置均正确表示了转角,因此在 R 为 20 时就可以准确测量,为了保证测量抗干扰性强,选取相关峰值大于 0.1 的图像为宜,故对于本选取图像,要求计算精度为 0.5, 0.333° 的运算,选取 R 为 30, 要求计算精度为 1° 的运算,选取 R 为 20。若对于其它计算精度的 R 的确定,同样按照该实验进行。

该根据测量精度进行自适应极坐标变换的方法,采样时剔除了对运算结果不利和影响不大的点,可避免 3.2 节所述的(2)的负面影响。且在可保证测量准确的同时,采样点数目少,极坐标变换中插值运算和相位相关运算量较小,图中可以看出相同测量精度下, R 逐步增大,运算耗时也逐步增加。

为了保证极坐标变换能采集到所需要的点,采集的测量图像大小须大于 $2(R+r) \times 2(R+r)$ 。

5 实验结果与分析

按照图 1 的检测方式搭建硬件平台,选取符合要求的测量图像附着于电机转子端面,为了保证图像随转子旋转时能绕中心点进行旋转,其中心点须与转子的中心点重合。本次实验采用分辨率为 $1\ 024 \times 1\ 024$ 面阵 CCD 为图像采集装置,当

CCD 可清晰地拍摄到整幅图像并且图像的圆心位于 CCD 采集画面的中心点位置时,固定 CCD 位置即可。进行了两组采集实验:第一组:以 $5^\circ \sim 10^\circ$ 为步距,对电机转子进行旋转并拍摄其端面图像,在转子旋转一个圆周内拍摄了 40 幅图像;第二组:人为设置不同的光照强弱环境进行实验,以 $10^\circ \sim 20^\circ$ 为作为旋转步距,在转子旋转一个圆周内拍摄了 28 幅图像。

设置测量精度为 0.5° ,则对图像沿圆周方向的采样点数为 720 pixel,采样半径的起点为离中心点 115 pixel 处,在实验前已按照 4.2 所述的方式进行了采样半径确定实验,确定出半径为 30 pixel,则所得极坐标变换后图像大小为 30×720 。对采集的两组图像的第一幅图像与其它图像运用自适应极坐标变换和相位相关算法进行了验证(硬件配置同 4.2 节的标定实验)。结果如表 1 所示。

表 1 两组图像的测量结果

Tab. 1 Measurement results of two group images

运算图像	PC 峰值范围	测量准确率/(%)	计算平均耗时/ms
第一组图像	[0.16 0.28]	100	34.5
第二组图像	[0.12 0.23]	100	32.9

测量表明,运算结果的准确率为 100%,在一定的光照强弱变化范围内,准确率仍可达到 100%;若对采集的图像直接进行极坐标变换,运算图像的大小大于图 5 中 $6''$ 对应的图像,故计算耗时也大于该图像,即大于 69.6 ms,因此本方法的计算耗时可降低 50% 以上,从而验证了本方法的可靠性。图 6(a) 所示为第一组实验采集的第一幅图像,图 6(b) 是第一组实验转子旋转 22.5° 后采集的图像。图 7(a)、(b) 分别为图 6(a)、(b)

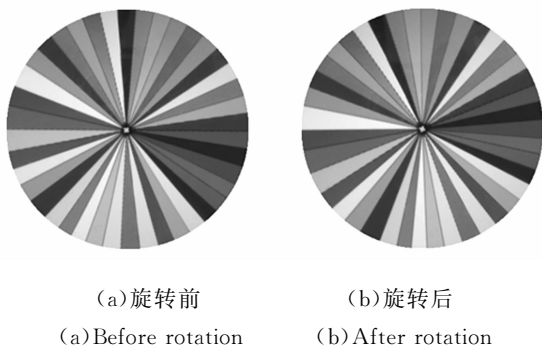


图 6 采集的旋转前后图像

Fig. 6 Collected images before and after rotations

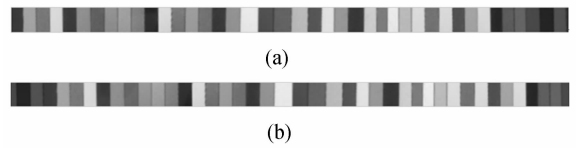


图 7 图 6(a)、(b) 的自适应极坐标变换后图像

Fig. 7 Adaptive polar transformation of Fig. 6(a), (b)

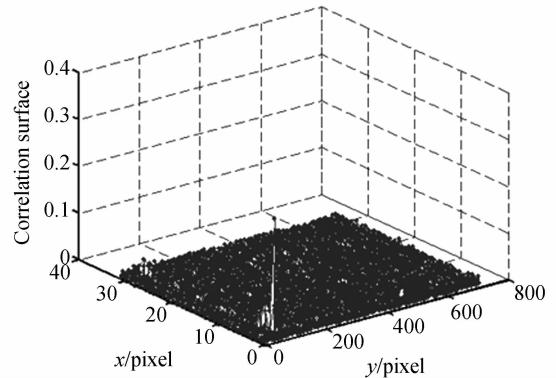


图 8 相位相关峰值图

Fig. 8 Peak of phase correlation

的自适应极坐标变换示意图。图 8 为图 7(a)、(b) 所示图像进行相位相关运算得出的峰值图,可以看出其有一明显峰值,其值为 0.26,峰值位置 $(0, 45)$,根据式(8)得出对应旋转角度为 22.5° ,与预设值相符。

6 结论

本文提出了一种基于图像求逆相位相关算法的电机转子位置检测方法,可以解决恶劣工况下的检测问题。本方法利用结合图像极坐标变换的相位相关算法进行电机转子转角的测量,因测量图像的纹理信息关系到检测算法的运算准确性,因而对图像的纹理信息进行了逆行重构,得出了可使运算结果准确的图像;在对采集的图像进行极坐标变换时采用自适应的方法,根据测量的精度要求采样图像部分点,从而使运算量降低了一半以上,同时避免了极坐标变换存在的不足。对符合要求的测量图像进行了旋转角度测量实验,实验表明,测量的准确率为 100%,并且对一定范围的光照强弱变化具有很好的鲁棒性,测量耗时较优化前降低了 50% 以上,为电机转子的位置检测提供了可靠方法。

参考文献:

- [1] 郝双晖,刘勇,刘杰,等. 基于查表原理的单对磁极编码器研制[J]. 中国电机工程学报,2006,26(19):165-168.
HAO SH H, LIU Y, LIU J. Design of single pair-pole magnetic encoder based on looking-up table [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(19): 165-168. (in Chinese)
- [2] HSU C C, LU M C, LU Y Y. Distance and angle measurement of objects on an oblique plane based on pixel number variation of CCD images [J]. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 2011, 60(5):1779-1794.
- [3] 朱齐丹,李科,蔡成涛,等. 采用改进的尺度不变特征变换算法计算物体旋转角度[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7):1669-1676.
ZHU Q D, LI K, CAI CH T, *et al.*. Calculation of object rotation angle by improved SIFT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1669-1676. (in Chinese)
- [4] 李立春,于起峰,雷志辉,等. 基于数字图像的高精度面内转角测量方法[J]. 光学学报,2005,25(4):491-496.
LI L CH, YU Q F, LEI ZH H, *et al.*. High-accuracy measurement of rotation angle based on image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(4): 491-496. (in Chinese)
- [5] TZIMIROPOULOS G, ARGYRIOU V, ZAFEIROU S, *et al.*. Robust FFT-based scale-invariant image registration with image gradients [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2010, 32(10):1899-1906.
- [6] 王运,颜昌翔. 光谱仪图像的亚像素配准[J]. 光学精密工程,2012,20(3):661-667.
WANG Y, YAN CH X. Sub-pixel image registration of spectrometer images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):661-667. (in Chinese)
- [7] 郭永彩,何卫华,高潮. 改进极坐标的频域图像配准算法[J]. 重庆大学学报,2012(2):98-104.
GUO Y C, HE W H, GAO CH. A frequency-domain image registration algorithm using the improved polar transform [J]. *Journal of Chongqing University*, 2012(2):98-104.
- [8] 陈治,朱洪程,胡晓东,等. 基于相位相关技术的MEMS旋转角度高分辨力测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8):1884-1889.
CHEN Z, ZHU H C, HU X D, *et al.*. High resolution measurement of EMES rotation angle by phase correlation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1884-1889. (in Chinese)
- [9] MATUNGKA R, ZHENG Y F, EWING R L. Image registration using adaptive polar transform[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(10):2340-2354.
- [10] 薛峰,张佑生,江巨浪,等. 基于最大梯度和灰度相关的两步全景图拼接算法[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(12):2965-2968.
XUE F, ZHANG Y S, JIANG J L, *et al.*. Two-pass mosaic algorithm of panoramic image using maximum grads and intensity correlation [J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(12): 2965-2968. (in Chinese)
- [11] 于起峰,陆宏伟,刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京:科学出版社,2002:153-154.
YU Q F, LU H W, LIU X L. *Precisely Measurement and Motion Metric Based on Image* [M]. Beijing: Science Press, 2002: 153-154. (in Chinese)
- [12] 冯宇平,戴明,孙立悦,等. 图像自动拼接融合的优化设计[J]. 光学精密工程,2010,18(2):470-476.
FENG Y P, DAI M, SUN L Y, *et al.*. Optimized design of automatic image mosaic[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 470-476. (in Chinese)

作者简介:



赵吉文(1973—),男,安徽砀山人,教授,2005年于中国科学技术大学获得工学博士学位,2007年于中国科学技术大学博士后出站,主要从事电机设计与控制、光电检测技术方面的研究。E-mail: ustczjw@ahu.edu.cn



王荔枝(1990—),女,安徽灵璧人,硕士研究生,2011年于安徽大学获得工学学士学位,主要从事图像测量技术的研究。E-mail: wanglizhiwater@126.com



黄 彪(1986—),男,安徽六安人,助理工程师,硕士研究生,主要从事图像测量技术的研究。E-mail: huangahdx@163.com



吴红标(1989—),男,安徽砀山人,硕士研究生,2010年于山东交通学院获得工学学士学位,主要从事电机设计与控制的研究。E-mail: dangshanxiande@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)