

基于边缘几何特征的高性能模板匹配算法*

吴晓军^{1,2}, 邹广华¹

(1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院 深圳 518055; 2. 深圳先进运动控制技术与现代自动化装备重点实验室 深圳 518055)

摘要: 基于灰度相关的模板匹配算法在很多情况下难以得到准确的匹配结果,提出一种基于边缘几何特征的高精度模板匹配算法。利用曲面拟合方法获得边缘的梯度方向和亚像素坐标作为匹配信息,采用图像金字塔的搜索策略对算法加速,最后利用最小二乘平差理论得到亚像素级的定位精度和精确的旋转角度信息。实验表明,对于目标旋转、均匀或非均匀变化的光照、部分遮挡的情况下可以得到良好的匹配结果,而且在保证高精度的同时算法可以满足实时性要求,重复定位精度优于商业化软件包 MIL8.0 的 GMF 算法。

关键词: 模板匹配;边缘特征;曲面拟合;最小二乘平差

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

High performance template matching algorithm based on edge geometric features

Wu Xiaojun^{1,2}, Zou Guanghua¹

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China;

2. Shenzhen Key Laboratory for Advanced Motion Control and Modern Automation Equipment, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Gray-scale correlation based template matching algorithm can hardly obtain accurate matching results in some conditions, a fast and high precision template matching method based on edge geometric features is proposed. Surface fitting method is used to obtain the gradient directions and sub-pixel coordinates of the edge points, which are used as the matching information in calculating the similarity between template and target. In order to satisfy the real-time requirement, image pyramid searching strategy is employed to accelerate the algorithm. Furthermore, the least square adjustment theory is adopted to calculate the sub-pixel positioning precision and precise rotation angle information. Experiment results demonstrate that the algorithm introduced in this paper can obtain good matching results in the case of target rotation, uniform or non-uniform illumination disturbance, partial occlusion, and etc. Moreover, besides the stability, reliability and high precision, the proposed algorithm also can meet the real-time requirements. The repeat positioning precision of the algorithm is better than that of the GMF algorithm of the commercialized machine vision package of MIL8.0 from Matrox.

Keywords: template matching; edge feature; surface fitting; least-square adjustment

1 引言

模板匹配算法是机器视觉(machine vision)技术重要研究内容之一,在目标识别、工件精确定位、视频跟踪等领

域中得到广泛应用^[1-3]。基于灰度相关(gray-scale correlation)的模板匹配算法以图像灰度信息直接进行匹配,原理简单、实现容易,但其抗干扰性差,对于非均匀变化的光照和部分遮挡问题束手无策。基于几何特征的模板匹配算法通过提取模板的几何特征信息,如边缘、角点、模板重心

收稿日期:2012-04 Received Date: 2012-04

* 基金项目:广东省科技计划(2012B091000020)、深圳市科技计划(JC201104210015A, CXB201105100073A)资助项目

等作为匹配特征。由于提取的特征并不以灰度信息作为变量,因而,对于光照的影响较不敏感,在非均匀变化光照、部分遮挡情况下也可以得到良好的匹配结果。在机器视觉领域,基于几何特征的方法已成为模板匹配算法研究热点。目前在国外著名的商业化机器视觉软件包,如 Cognex 公司的 Patmax、Matron 公司的 MILGMF、MVtec 的 HALCON HMatchIt、EURESYS 的 eVision asyFind、Adept 的 AdeptSight 及 DALSA 的 Sapera 等已开发出性能良好的几何模板匹配算法,但由于商业保密的原因,其所有采用的技术核心鲜有报道。

已公开发表的几何特征模板匹配算法很少能达到商业化软件的性能,傅卫平等^[4]提出一种综合应用 SIFT 特征、马氏距离和放射变换方法的目标匹配定位算法,并将该方法应用到机器人的抓取定位中,该方法利用了立体匹配信息,计算效率并不高。文献^[5]提出了一种基于 Hausdorff 距离的模板匹配算法,其原理是先对模板和目标图像提取出边缘点作为 2 个点集,然后利用 Hausdorff 距离来度量模板边缘点集和目标子图像边缘点集的匹配程度。一些改进的算法有:文献^[6]先将目标图像二值化,生成 Voronoi 图^[7],考虑图像的旋转、平移变形,对模板进行刚体变换再计算 Hausdorff 距离来进行匹配。文献^[8]提出一种基于广义霍夫变换 (generalized Hough transform, GHT) 的几何模板匹配算法, GHT 方法容易扩展,可以很容易地应用于搜索存在旋转和缩放的目标物体,缺点是需要建立庞大的累加计数器数组,且初始化和统计过程也比较耗时。另一类几何匹配算法是基于几何基元的^[9-10],例如线段、圆弧、角点等特征。算法首先提取出图像中的几何基元特征,然后根据模板中的几何基元特征在目标图像中假设一个匹配位置,最后测试这些假定的匹配位置在图像中有没有足够的依据,这类算法的最大挑战是需要解决指数级的计算复杂度问题。

针对上述存在的问题,提出研究基于几何特征的模板匹配算法,期望算法性能可以达到或超过国外商业化软件包的性能,对于促进我国机器视觉的应用和发展具有重要意义。

本文利用边缘点的位置和梯度方向作为匹配信息进行相似度计算,根据曲面拟合原理,通过平移变换,推导出计算精确梯度方向和亚像素边缘坐标的快速方法,保证了匹配精度的同时,也加快了算法的处理速度。为了使匹配算法满足实时性要求,采用阈值判断和图像金字塔算法的搜索策略,最后算法利用最小二乘平差理论,获得亚像素级的坐标精度和精确的旋转角度。

2 相似度量函数

本文计算相似度量时以边缘点梯度向量作为匹配信

息。模板经边缘检测算法处理后,模板转换成由一系列点 $p_i = (x_i, y_i)^T, i = 1, 2, \dots, n$ 构成,对应于每个点有一个梯度方向向量 $d_i = (t_i, u_i)^T$ 。

目标图像经相同处理转换成由点 (x, y) 和与之对应的方向向量 $e_{x,y} = (v_{x,y}, w_{x,y})^T$ 来表示。匹配过程中,经变换的模板与目标图像某一位置的子图像计算相似度量值。模板中边缘点梯度向量经变换后为 $d'_i = R(\theta)d_i$,则在目标图像某位置 $q = [x, y]^T$ 子图像处,如图 1 所示,相似度量函数由式(1)描述^[9]:

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \langle d'_i, e_{q+p'} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t'_i v_{x+x', y+y'} + u'_i w_{x+x', y+y'} \quad (1)$$

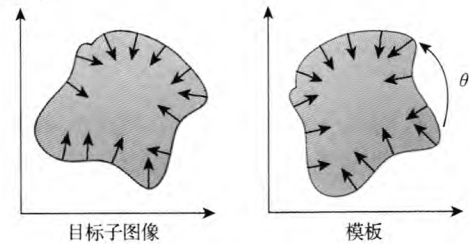


图 1 相似度量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of similarity measurement

式(1)计算的是模板与子图像对应边缘点的梯度向量点积平均值。当一对对应边缘点梯度方向相同时,点积取得最大值。梯度方向正交时点积为零。梯度方向相反时点积取得负的最大值。根据式(1)计算得到的相似度量值的取值范围为在理论上是整个实数域,不方便用于判断子图像是否为符合要求的结果,即很难确定一个阈值来筛选所需要的结果。因而对式(1)进行归一化处理^[11]:

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\langle d'_i, e_{q+p'} \rangle}{\|d'_i\| \cdot \|e_{q+p'}\|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t'_i v_{x+x', y+y'} + u'_i w_{x+x', y+y'}}{\sqrt{t'^2_i + u'^2_i} \cdot \sqrt{v^2_{x+x', y+y'} + w^2_{x+x', y+y'}}} \quad (2)$$

3 曲面拟合与特征提取

根据相似度量函数可知,要计算模板与目标图像子图像的相似度量值,需要获得模板和图像的边缘点坐标及其梯度方向。利用 Sobel 算子或 Canny 算子求取边缘点位置和梯度方向,方法计算简单、快速,但要获得亚像素级别的精度和精确的梯度方向需要作进一步处理,增加了处理的时间。基于 Sobel-Zernike 矩的方法具有旋转不变性^[12],且可以得到精确的亚像素边缘,但需要大的模板,计算比较耗时。一些其他算法通过建立边缘模型,虽然可以求得比较精确的亚像素边缘坐标和边缘梯度向

量,但计算过程复杂、耗时^[13]。本文根据曲面拟合原理导出快速获得边缘梯度方向和亚像素坐标的方法。

3.1 曲面拟合

3×3 邻域像素坐标信息, x, y 为坐标, $g(x, y)$ 为灰度或梯度值, 设拟合二阶曲面参数方程为:

$$G(x, y) = k_1 x^2 + k_2 y^2 + k_3 xy + k_4 x + k_5 y + k_6 \quad (3)$$

则拟合二阶曲面与真实曲面的残差平方和为:

$$D = \sum [G(x, y) - q(x, y)]^2$$

根据残差平方和最小原理, 要使残差最小则有:

$$\frac{\partial D}{\partial k_1} = \frac{\partial D}{\partial k_2} = \frac{\partial D}{\partial k_3} = \frac{\partial D}{\partial k_4} = \frac{\partial D}{\partial k_5} = \frac{\partial D}{\partial k_6} = 0$$

经推导并写成矩阵形式可得:

$$AK = H$$

$$H = \begin{bmatrix} g(1,0) + g(1,1) + g(1,2) + 4[g(2,0) + g(2,1) + g(2,2)] \\ g(1,0) + g(1,1) + g(2,1) + 4[g(0,2) + g(1,2) + g(2,2)] \\ g(1,1) + 2[g(2,1) + g(1,2) + 4g(2,2)] \\ g(1,0) + g(1,1) + g(1,2) + 2[g(2,0) + g(2,1) + g(2,2)] \\ g(1,0) + g(1,1) + g(2,1) + 2[g(0,2) + g(1,2) + g(2,2)] \\ g(0,0) + g(1,0) + g(2,0) + g(0,1) + g(1,1) + g(2,1) + g(0,2) + g(1,2) + g(2,2) \end{bmatrix}$$

3.2 提取梯度方向

利用梯度算子的方法计算简单、快速, 但是其精度难以保证, 本文根据曲面拟合原理, 可以快速求得精确的边缘梯度方向, 具体推导过程如下:

对式(3)在 x 和 y 方向上求偏导得:

$$\begin{cases} \frac{\partial G(x, y)}{\partial x} = 2k_1 x + k_3 y + k_4 \\ \frac{\partial G(x, y)}{\partial y} = 2k_2 y + k_3 x + k_5 \end{cases}$$

则点 $(1, 1, G(1, 1))$ 处的梯度方向在图像坐标平面上的投影为:

$$p(1, 1) = \begin{bmatrix} 2k_1 + k_3 + k_4 \\ 2k_2 + k_3 + k_5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)即为边缘点的梯度方向, 由理论推导过程可知, 求得边缘点的精确梯度方向只需数次加法和乘法计算即可以得到, 采用拟合的方法的另一个好处是拟合的过程相当于进行了一次高斯滤波, 显然提高了算法的抗噪声和抗干扰能力。

3.3 提取亚像素边缘坐标

本文在求取亚像素边缘坐标时, 采用的方法与求边缘的梯度方法类似, 只是需要先对图像作一次求导, 即求图像的梯度图像。可以用 Sobel 算子或 Canny 算子计算图像的梯度图像, 再对图像进行阈值判断和极大值抑制得到像素级的边缘位置, 然后以像素级边缘点 3×3 邻域内的梯度值为拟合信息, 进行梯度曲面拟合, 根据 2.2 节

式中: A 为系数矩阵, K 为系数向量, H 为常数项向量, 具体推导过程见文献[14]。在二维空间中任何一个局部邻域只需经一次平移即可回到原点, 将坐标平移到原点可以简化大量计算, 极大地提高计算效率, 将 $x = 1, y = 1$ 代入矩阵 A 得:

$$A = \begin{bmatrix} 51 & 25 & 27 & 27 & 15 & 15 \\ 25 & 51 & 27 & 15 & 27 & 15 \\ 27 & 27 & 25 & 15 & 15 & 9 \\ 27 & 15 & 15 & 15 & 9 & 9 \\ 15 & 27 & 15 & 9 & 15 & 9 \\ 15 & 15 & 9 & 9 & 9 & 9 \end{bmatrix}$$

由 $g(x, y)$ 的值可求得 H , 再由 $K = A^{-1}H$ 计算得到二阶曲面方程的各项系数。

求得的梯度方向, 进行以下推导求解边缘点亚像素坐标。

在图像坐标平面上过点 $(1, 1)$, 沿梯度方向, 即斜率为:

$$k = \frac{2k_2 + k_3 + k_5}{2k_1 + k_3 + k_4}$$

的直线方程为: $y = kx - k + 1$

任意一条空间曲线可以表示成两个曲面的交线, 垂直于图像坐标平面且过该直线的平面方程为:

$$kx - y - k + 1 = 0 \quad (5)$$

由此, 曲面上沿梯度方向且过点 $(1, 1, G(1, 1))$ 的空间曲线为:

$$\begin{cases} G(x, y) = k_1 x^2 + k_2 y^2 + k_3 xy + k_4 x + k_5 y + k_6 \\ kx - y - k + 1 = 0 \end{cases}$$

消去变量 y 得曲线方程, 令其导数为零, 即求曲线方程的极大值, 解方程得:

$$x = \frac{2k_2 k^2 - 2k_2 k + k_3 k - k_5 k - k_4 - k_3}{2(k_1 + k_2 k^2 + k_3 k)}$$

上式即为空间曲线的极值点的 x 坐标, 代入直线方程(5)即可求得 y 坐标。

4 提高算法处理速度的措施

遍历搜索整幅目标图像是个极其耗时的过程, 为了加速算法处理速度, 满足实时性要求, 需要通过多种措施来提高算法的计算效率。本文主要采用终止非可能目标位置的相似度量值的计算结合图像金字塔算法来实现。

4.1 停止标准

在搜索整幅目标图像的过程中,在非可能目标位置相似度量值可以不必完全计算,即通过设定一定阈值,采用一定的终止条件,提前结束计算,从而快速地定位到真正的目标位置,加快整个算法的处理速度,根据第3节中给出的相似度量函数,可以得到相似度量的部分和公式:

$$s_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^j < \vec{d}'_i, \vec{e}_{q+p'} >$$

由归一化相似度量公式可知,剩余 $n-j$ 项的和小于 $(n-j)/n = 1-j/n$,所以当部分和满足 $s_j < s_{\min} - 1 + j/n$ (s_{\min} 为设定的阈值),即可终止相似度量的计算。

考虑到目标图像可能存在部分遮挡和隐藏的问题,在文献[9]中提出了一个改进的终止条件。第1部分采用宽松的阈值判断,剩下的部分采用严格阈值判断,通过预设设定一个系数 g 来实现。

$$s_j < \min(s_{\min} - 1 + fg/n, s_{\min}j/n)$$

式中: $f = (1 - gs_{\min})/(1 - s_{\min})$,当 $g = 1$ 时,所有的点都使用严格的终止条件;当 $g = 0$ 时,所有的点都使用宽松的终止条件来判断。一般情况下,为了保证不产生误判,参数 g 通常设置为 0.9。

上述终止条件的不足之处在于:其一,当目标图像存在部分遮挡情况时,可能会导致误判;其二,在计算相似度量值时,每求一次和都要与阈值进行一次判断,判断的过程使得处理器没有充分发挥流水线功能,而降低了处理器的效率。

针对以上不足,提出一种改进的计算相似度量值终止条件的策略:将模板图像提取出边缘信息后,将边缘点分为2部分。设模板边缘点为 n, n_1, n_2 分别为两部分的边缘点个数,且 $n_1 + n_2 = n, n \geq n_1, n \geq n_2$,第1部分为最零散的点,可以通过以下措施得到,即先选择离模板左上角距离最远的边缘点作为第1点,再在剩余的边缘点中挑选出第2点,使得第2点到第1点的距离最远;在剩余的边缘点中,选择到前面两点距离和最大的点作为第2点,依次而得到 n_1 个点作为第1部分的点,剩余的边缘点作为第2部分,分2次计算相似度量值,先计算第1部分 n_1 个点的部分相似度量值,计算完后与设定的阈值判断若 $s_{n1} < s_{\min}$,则停止计算本次相似度量值,否则在 s_{n1} 的基础上,继续计算第2部分 n_2 个点的部分相似度量值,从而得到完整的相似度量值。

4.2 图像金字塔

要达到实时性要求,必需采用更加快速有效的搜索策略。由复杂度 $O(whNn)$ 可知,计算相似度量的运行时间取决于目标图像大小、模板边缘点个数以及模板旋转的次数。由粗到精的搜索策略可以有效降低算法的复杂度,即通过降低图像的分辨率得到一个大概的位置,再在高分辨率下得到精确位置。实现这一过程行之有效的办法是构建图像金字塔^[15],考虑到耗时和构建效果问题,

一种好的策略是使用 2×2 的均值滤波器来创建图像金字塔^[16]。其过程就是求 2×2 区域中的所有像素的平均灰度作为低分辨率那一层对应点的灰度值。

5 提高算法精度

采用图像金字塔逐步求精得到的精度为像素级,在很多高精度要求的场合,像素级的精度并不能很好地满足要求。考虑到硬件成本的问题,很有必要通过算法处理来提高精度。可以通过在像素级求得的局部最大值 $3 \times 3 \times 3$ 的邻域内拟合出一个连续密度函数。根据精度需要进行重采用即可得到亚像素的匹配位置和高精度的旋转角度信息,为了获得更高的精度,本文采用最小二乘平差 (least squares adjustment) 理论^[17]来计算得到更高精度的匹配位置和旋转角度信息。

5.1 问题转换

显然,边缘点梯度方向的切线方向即为边缘在该点处的切线方向,将模板的边缘点作为特征点,将目标图像边缘点梯的切线方向表示成过边缘点的直线作为线特征。通过图像金字塔算法逐步求精的过程特征点和特征线的对应关系已基本确定,则模板匹配求亚像素精度和高精度旋转的问题可以转换为最小二乘平差问题来求得。

5.2 最小二乘平差调整

给定点 $p(X, Y)$ 齐次坐标为 $(X, Y, 1)$ 和对应的特征线 $v = (a, b, c)$,满足 $ax + by = c$ 且 $a^2 + b^2 = 1$,则 p 点到特征线 v 的最小距离为:

$$d_{\min} = aX + bY - c = (a, b, -c) \cdot (X, Y, 1)$$

设对特征点进行旋转平移变换的矩阵齐次坐标表达式为:

$$T(x, y, \theta) \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & x \\ \sin \theta & \cos \theta & y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则所有点到与之对应的特征线最小距离的平方和为:

$$E(x, y, \theta) = \sum_{i=1}^n \| v_i^T \cdot [T(x, y, \theta) x_i^T] \|^2 \quad (6)$$

式中: v_i^T 为特征线的向量表示, x_i^T 为特征点的齐次坐标表示。

由图像金字塔逐步求精的过程,可以得到像素级的位置坐标和 0.5° 或更高的旋转角度精度,所以当 $-0.5^\circ < \theta < 0.5^\circ$, 即 $|\theta| < 0.00873$ 时,根据 $\sin \theta, \cos \theta$ 的泰勒展开式,可做如下近似: $\sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1$ 。设 $\alpha_i = b_i X_i - a_i Y_i$, $\beta_i = a_i X_i + b_i Y_i$, 将式(6)展开得:

$$E(x, y, \theta) = \sum_{i=1}^n (a_i x + b_i y + \alpha_i \theta + \beta_i - c_i)^2 \quad (7)$$

式(7)在关于 x, y, θ 各偏导数同时为零的情况下得到极值,因而对 E 分别求关于 x, y, θ 的偏导,并令其等于零得:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [a_i^2 x + a_i b_i y + a_i \alpha_i \theta + a_i (\beta_i - c_i)] = 0 \\ \sum_{i=1}^n [a_i^2 b_i x + b_i^2 y + b_i \alpha_i \theta + b_i (\beta_i - c_i)] = 0 \\ \sum_{i=1}^n [a_i \alpha_i x + b_i \alpha_i y + \alpha_i^2 \theta + \alpha_i (\beta_i - c_i)] = 0 \end{cases}$$

将上式写成矩阵的形式,即为:

$$Wp = B \quad (8)$$

式中:

$$W = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} a_i^2 & a_i b_i & a_i \alpha_i \\ a_i b_i & b_i^2 & b_i \alpha_i \\ a_i \alpha_i & b_i \alpha_i & \alpha_i^2 \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}$$

$$B = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} a_i (c_i - \beta_i) \\ b_i (c_i - \beta_i) \\ \alpha_i (c_i - \beta_i) \end{bmatrix}$$

由最小二乘理论可得:

$$p = W^+ B \quad (9)$$

式中: W^+ 为 W 的广义逆矩阵 (generalized inverse matrix)。

当 W 可逆时,所得到的解是唯一的,即 $E(x, y, \theta)$ 仅在该点处取得最小值,结合最小二乘方法与实际情况,对式(8)和(9)作如下补充说明:

1) 当 W 可逆时, p 有唯一解,此时 $W^+ = W^{-1}$, $p = W^{-1} B$ 。

2) 当 W 不可逆时,且 $\text{rank}(W) = \text{rank}(W|B) < 3$, 此时 p 有无穷多解,可以通过求 W 的广义逆 W^+ 求得 $p = W^+ B$, 所得的 p 是所有解中范数最小的解,即在保证 $E(x, y, \theta)$ 取得最小值情况下的一个最小姿态调整。

3) 当 W 不可逆,且 $\text{rank}(W) \neq \text{rank}(W|B)$ 时,式(8)无解,此时,通过广义逆求出来的解是最小二乘解。

为了达到比多项式拟合更高的精度,在提取模板边缘点与图像中特征线的参数方程时必须达到亚像素精度。通过图像金字塔算法逐步求精的过程,所得到的定位精度为像素级,旋转精度可以达到至少 0.5° ,且此时特征点和特征线的基本对应关系已确定,通过求出目标图像中与变换后模板边缘点之间欧几里德距离最小的特征点作为潜在对应特征线(特征点加上其梯度向量即构成特征线)。最后,根据最小二乘平差理论求得一个微小的位姿调整。

经过最小二乘平差位姿调整之后,很可能存在部分特征点和特征线的对应关系改变的情况。因而,一次最小二乘平差调整不能保证足够高的精度,实验表明迭代 2~3 次即可获得稳定可靠的亚像素平移精度和精确度更高的旋转角度值。

6 实验结果和性能评估

为了实际评估算法各方面的性能,通过在各种条件

下实际采集大量图像,包括均匀变化光照、非均匀光照、噪声干扰、部分遮挡条件下的图像各 100 张。分组进行匹配,从稳定性、匹配精度、算法耗时 3 个方面检测算法性能。

6.1 算法稳定性

稳定性考虑的主要是当目标图像出现均匀、非均匀光照、噪声和干扰、部分遮挡等条件时,匹配算法找到目标的能力,图 2 为 2 种识别对象的模板及二值边缘图像,图 3 中给出了典型的 4 种条件下的匹配结果。图 3 所示为边缘几何特征比较明显的模板,典型的匹配结果如图 4 所示。从图中可以看出对于严重的遮挡条件下,也可以准确地找到目标;如图 4 所示,即使在非均匀光照、干扰、遮挡同时出现的恶劣条件下,仍然可以得到良好的匹配结果。

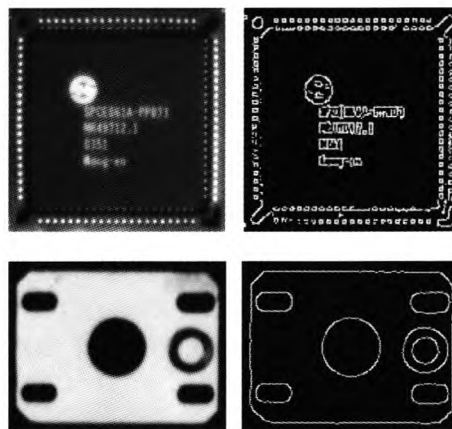


图2 模板及其边缘图像

Fig. 2 Template image and its edge image

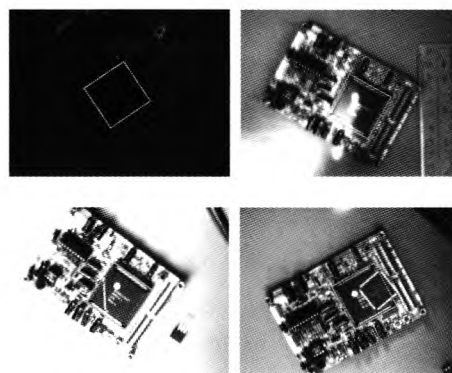


图3 匹配算法稳定性测试,目标在光照极弱、不均匀光照、外部光线干扰及部分遮挡条件下匹配结果

Fig. 3 The stability test of the matching algorithm under extremely weak, non-uniform illumination, external light disturbance and partial occlusion conditions

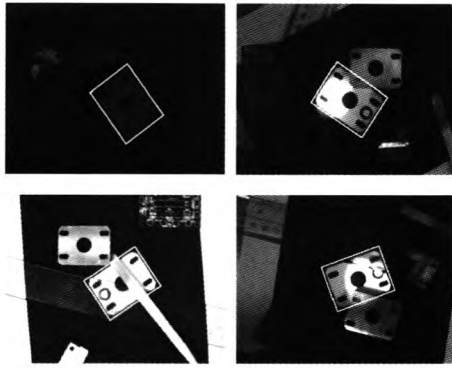


图4 匹配算法稳定性测试,目标在光照极弱、不均匀光照、严重遮挡及各种干扰同时存在的条件下匹配结果

Fig. 4 The stability test of the matching algorithm under extremely weak and non-uniform illumination, severe occlusion and various combined disturbances

6.2 算法定位精度

通过采集大量真实图像,在同等条件下进行匹配实验,并于与加拿大 Matrox 公司的 MIL8.0 中几何模板匹配(geometry model finder, GMF)算法匹配的结果进行对比实验,将 MIL8.0 GMF 计算的目标位置 (x, y) 及旋转角度 θ 与本文提出的算法计算的结果对比,位置误差和角度误差用 $|\Delta x|$ 、 $|\Delta y|$ 和 $|\Delta \theta|$ 表示,其误差分布如图 5 所示,从图中可以看出,本文算法与 MIL 得到的匹配结果差的绝对值 x 坐标小于 0.1 像素, y 坐标小于 0.2 像素,角度差的绝对值小于 0.1° 。

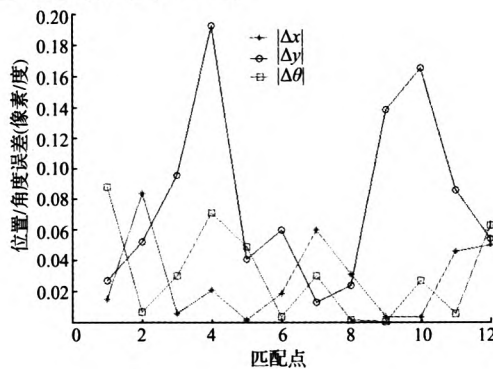


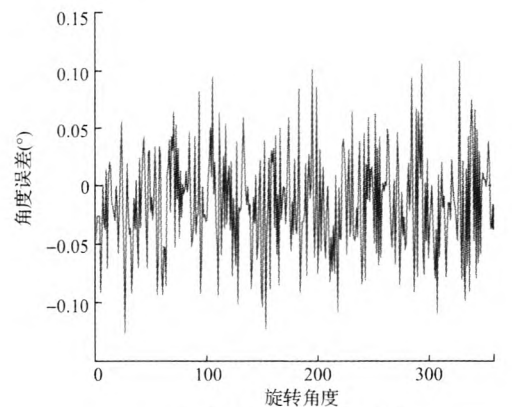
图5 MIL GMF 计算结果与本文计算结果的误差
Fig. 5 Computation errors for MIL GMF and the proposed algorithms

图 6 左图为模板的源图像,在源图像坐标位置为 $(230, 168)$ 处,截取大小为 187×142 的区域子图像作为模板图像。利用双线性变换理论对源图像进行旋转,旋转 135° 后的图像为图 6 右图,使用 MIL8.0 的几何模板匹配算法和本文算法分别对旋转后的图像进行角度检测,并与实际旋转角度进行比较,所得误差结果如图 7 所示。图中横坐标为旋转的角度,纵坐标为匹配算法检测的角

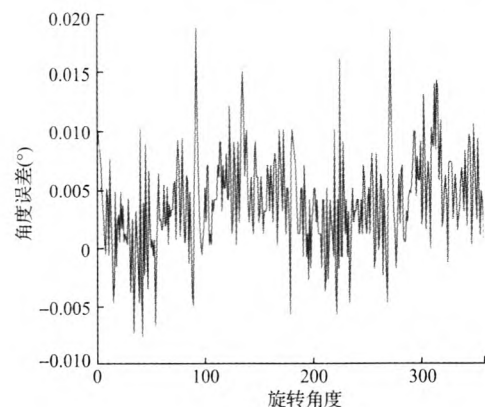
度与实际值的差。从图中可以看出, MIL8.0 的几何模板匹配算法的误差小于 0.15° , 本文算法的误差小于 0.02° 。



图6 模板源及旋转 135° 图像
Fig. 6 Source image of the template and the image after being rotated 135°



(a) MIL8.0 的几何匹配算法结果
(a) Results of MIL8.0 GMF geometric matching algorithm

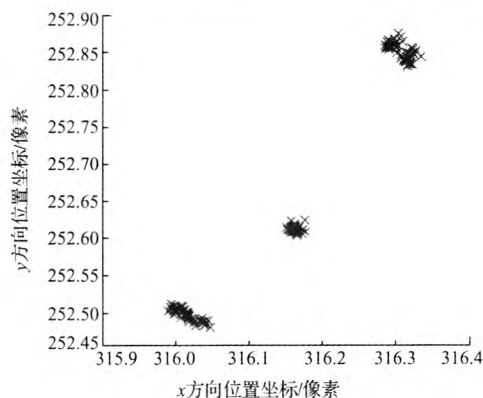


(b) 本文算法结果
(b) Results of the proposed algorithm

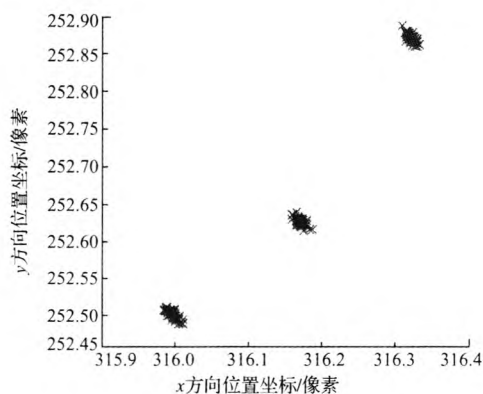
图7 旋转角度检测与精度比较

Fig. 7 Rotating angle test and precision comparison

将目标移动 2 次,在原始位置和移动后的位置连续拍摄 50 张图像。分别使用 MIL8.0 的 GMF 算法和本文算法检测所有目标图像中目标所在位置。如图 8 所示,将每一次匹配得到的坐标位置在图坐标系中用“ \times ”标记之。由图 8 可看出,本文算法所得到的 3 个位置的坐标点比较集中,因此,在重复性匹配性能上要优于 MIL8.0 的几何模板匹配方法。



(a) MIL8.0的几何匹配算法结果
(a) Results of MIL8.0 GMF geometric matching algorithm



(b) 本文算法结果
(b) Results of the proposed algorithm

图 8 重复性匹配精度比较

Fig. 8 Comparison of the repeatability matching precisions

6.3 算法计算效率

表 1 是对不同模板进行匹配测出的算法耗时情况,所测得的数据是在双核 1.6 GHz CPU,内存 1 G,目标图像分辨率均为 640×480 像素。由表 1 可以看出,随着模板图像尺寸和边缘个数的减小,算法耗时同样缩短,预设的角度检测范围同样对算法的耗时影响比较大,同样模板和同样目标图像大小条件下,当检测的角度范围为 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 时,其所需耗时大约为全角度检测的 1/2。文献[18]采用了 DSP 硬件实现 NCC 模板匹配,计算效率也比本文低。由于 MIL8.0 中的几何模板匹配算法为商用软件开发包,具体采用的算法理论、特征提取方法、金字塔如何分层、分层数等技术细节均无法得知,且该商用开发包采用了硬件并行加速指令对算法进行加速处理,因此,在匹配耗时上本文算法与 MIL8.0 中的算法比较意义不大,此处未给出两者间匹配耗时的比较情况。

表 1 不同模板下本文算法的计算时间

Table 1 Calculation time of the proposed matching algorithm under different templates

模板	$[-30^\circ, 30^\circ]$ 耗时/ms	$[-60^\circ, 60^\circ]$ 耗时/ms	$[-180^\circ, 180^\circ]$ 耗时/ms	模板大小
1	16.8	21.7	43.7	139×139
2	18.3	25.2	49.6	178×136
3	14.2	19.5	37.6	99×103
4	10.7	14.9	26.8	66×78

7 结 论

本文以边缘点亚像素坐标及梯度向量作为匹配信息,提出了一种基于几何特征的快速模板匹配算法。实验证明算法对于目标图像出现均匀、非均匀光照、噪声和干扰及部分遮挡的条件下,可以得到非常好的结果,算法在满足稳定、可靠、高精度的前提下,可实现实时处理,能够满足复杂环境中对机器视觉系统的要求。

将来进一步的研究内容为:完善算法在尺度变换上的目标查找能力;为了进一步提高算法的处理速度,可以利用 MMX、SSE、SSE2 等指令实现匹配算法加速。

参考文献

- [1] 李洋,张晓冬,鲍远律. 基于特征模板匹配识别地图中的特殊突变的方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(7): 605-609.
LI Y, ZHANG X D, BAO Y L. Method based on feature template matching to identify special icons in map[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(7): 605-609.
- [2] 王静,王海亮,向茂生,等. 基于非极大值抑制的圆目标亚像素中心定位[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1460-1468.
WANG J, WANG H L, XIANG M SH, et al. Subpixel accuracy central location of circle target based on nonmaximum suppression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(7): 1460-1468.
- [3] 张浩鹏,王宗义. 基于灰度方差和边缘密度的车牌定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1095-1102.
ZHANG H P, WANG Z Y. Car license plate location algorithm based on intensity variance and edge density[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1095-1102.
- [4] 傅卫平,秦川,刘佳,等. 基于 SIFT 算法的图像目标匹配与定位[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(1): 163-169.
FU W P, QIN CH, LIU J, et al. Matching and Location of Image Object Based on SIFT Algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(1): 163-169.

- [5] HUTTENLOCHER D P, KLANDERMAN G A, RUCKLIDGE J. Comparing images using the Hausdorff distance [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(9): 850-863.
- [6] WILLIAM J R. Efficiently locating objects using the Hausdorff distance [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 24(3): 251-270.
- [7] 柏长冰, 齐春, 杨莹, 等. Hausdorff 匹配快速检测 PCB 基准标记 [J]. 光电子·激光, 2006, 4(17): 498-501.
BAI CH B, QI CH, YANG Y, et al. Fast detection of PCB marker using Hausdorff matching [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 4(17): 498-501.
- [8] ULRICH M, STEGER C, BAUMGARTNER A. Realtime object recognition using a modified generalized hough transform [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(11): 2557-2570.
- [9] SHARK L K, KUREKIN A A, MATUSZEWSKI B J. Development and evaluation of fast branch-and-bound algorithm for feature matching based on line segments [J]. Pattern Recognition, 2007, 40: 1432-1450.
- [10] PARAMANAND C, RAJAGOPALAN A N. Efficient geometric matching with higher-order features [J]. Optical Society of America, 2010, 27(4): 739-748.
- [11] OCCLUSION S C, CLUTTER, and Illumination invariant object recognition [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, XXXIV(3A): 345-350.
- [12] QU Y D, CUI C S, CHEN S B, et al. A fast subpixel edge detection method using sobelzernike moments operator [J]. Image and Vision Computing, 2005, 23: 11-17.
- [13] SINGH C, WALIA E. Fast and numerically stable methods for the computation of Zernike moments [J]. Pattern Recognition, 2010, 43: 2497-2506.
- [14] 王峰, 王光华, 刘文涛. 一种基于高阶曲面拟合的图像边缘检测方法 [J]. 导弹与制导学报, 2009, 29(3): 276-278.
WANG F, WANG G H, LIU W T. A method of edge image detection based on higher order surface fitting [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(3): 276-278.
- [15] STEVEN L T. Template matching in pyramids [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 16: 356-369.
- [16] STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. Machine vision algorithms and applications [M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- [17] WALLACK A S, MANOCHA D. Robust algorithms for object localization [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 27(3): 243-262.
- [18] 吴强, 任琳, 张杰, 等. 快速归一化互相关算法及 DSP 优化实现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(6): 495-499.
WU Q, REN L, ZHANG J, et al. Fast algorithm of normalized cross correlation and optimized implementation on DSP [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(6): 495-499.

作者简介



吴晓军, 2001 年于吉林大学获得硕士学位, 2004 年于中科院沈阳自动化研究所获得博士学位, 现为哈尔滨工业大学副教授, 主要研究方向为三维重建、计算机视觉、CAD 技术等。

E-mail: wuxj@hitsz.edu.cn

Wu Xiaojun received M. Sc. degree from Jilin University in 2001 and Ph. D. from Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2004. Now he is an associate professor in HIT. His main research interests include 3D surface reconstruction, computer vision, and heterogeneous object modeling.



邹广华, 2006 年于华南理工大学获得学士, 2008 年获得哈尔滨工业大学硕士学位, 主要研究方向为机器视觉、图像处理。

E-mail: ghzhou@hitsz.edu.cn

Zou Guanghua received his bachelor from South China University of Technology in 2006 and master degree from HIT in 2008. His main research interests include machine vision and image processing.