

文章编号 1004-924X(2011)09-2214-08

基于 CAD 技术实现工业零部件图像直线特征提取

张春森*, 胡平波

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘要:针对工业零部件序列图像量测与重建中的线特征提取问题,提出了一种以 CAD 设计数据为引导,高精度检测图像中直线的数学模型。以三维计算机辅助设计(CAD)数据为基础,通过求解 CAD 三维直角坐标系与图像坐标系间的参数转换关系,将物方线特征投影至图像上,得到图像线特征初值范围。利用自适应最小二乘模板匹配提取出边缘点序列,对生成的上述点序列采用最小二乘法进行拟合,得到图像线特征的直线方程。通过求解图像相交直线的交点,高精度地获得表达工业零部件轮廓的直线段。采用上述算法对真实工业零部件图像进行了线特征提取,重建的直线长度与游标卡尺量测的直线长度之差的中误差为 0.232 mm。实验结果表明,文中所给算法自动化程度高、稳定性强,可用于规则工业零部件高精度图像量测与重建。

关键词:计算机辅助设计(CAD);线特征提取;自适应模板;最小二乘法

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111909.2214

Line extraction from images of industrial components based on CAD

ZHANG Chun-sen, HU Ping-bo

(*Institute of Mapping Science and Technology, Xi'an University of
Science and Technology, Xi'an 710054, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zhchunsen@yahoo.com.cn*

Abstract: For feature extraction from image measurements and reconstruction from industrial component images, a mathematical model guided by Computer Aided Design(CAD) data is put forward to detect image lines with high accuracy. Firstly, using CAD data, the line initial values are obtained by projecting object line features through the conversion of 3D CAD coordinate and images. Then a sequence of edge points are extracted by adaptive least squares template matching (LSTM) and leads to image line equations from these points based on the principle of least squares fitting. Finally the contours of industrial components are obtained accurately by solving the intersections of image intersecting lines. By using the algorithm on real images of industrial components, we perform a line feature extraction experiment with an average standard deviation of 0.232 mm between the rebuilt line and the actual line length. This proves that the algorithm has high automation extraction and strong stability, and can be used to the image measurement and reconstruction of industrial components with high accuracy.

Key words: Computer Aided Design(CAD); line extraction; adaptive template; least squares method

收稿日期:2010-12-17;修订日期:2011-02-17.

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(No. 2010JM5009);陕西省教委专项基金资助项目(No. 09JK597)

1 引言

图像中的线特征是视觉感知的重要线索和解释图像的基本依据,它常对应于被摄物体的轮廓线或边界线,是图像中“有意义”的变化之处;同时线特征又是规则物体尤其是人造物体的基本要素之一。因此,在基于图像的几何量测量中,提取其线特征,并对其进行高精度定位,无论对于描述测量被摄物体还是解释图像,都是非常重要的。但是直线在图像中以离散的像素点存在的,从图像中的像素点到形成几何意义上的直线是一个图形学实现的逆过程,从而造成从图像上提取直线存在相当大的难度。目前国内外线特征提取的方法有多种,如 Hough 变换,边界跟踪,曲线拟合,松弛迭代等。其中一类方法是首先利用经典的边缘检测算子如 Canny 算子等提取边缘点序列,然后利用分裂合并的原则进行提取;但是由于受检测算子平滑核宽度的影响,边缘提取的结果可能会存在微小的系统偏差。直线提取的另外一种方法是以最小二乘匹配为代表的直接提取方法,该方法采用模板匹配技术,具有精度高,稳定性和灵活性强的特点,是目前最常用的直线提取方法之一,但是该直线提取方法需要较精确的初始值^[1-3]。

计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)是工业零部件设计、制造以及数据加工质量控制的有效手段,它强调人机交互设计、操作设置、图形显示等内容。与 CAD 技术不同,图像量测主要是采用计算机视觉的方法,对已存在的物体特征进行识别与量测。其中,高效、精确、自动地对图像数据进行识别是实现图像量测的关键。由于 CAD 技术可为建立物体的三维模型提供所需的几何描述,为视觉识别提供特征来源,利用 CAD 模型可综合处理物体图像。因此,利用基于 CAD 的表示方法,得出对 3D 物体识别和处理的策略,完成不同的视觉任务已成为众多研究者们研究的热点问题。

本文研究了规则工业零部件图像量测与重建中的直线特征提取问题。首先根据工业零部件的 CAD 三维设计图建立物方 CAD 直角坐标系,通过选取一定数量(至少 6 组)二维、三维点对,采用最小二乘原理建立二维图像坐标系与三维物方坐

标系之间的转换关系。然后通过分析 CAD 数据的 DXF 文件结构,将直线实体投影至图像坐标系中(当零件上的直线段存在前景挡后景时,需要进行消隐处理),以此投影值为初值范围,在给定的初值范围内采用自适应方法生成的线特征模板沿着搜索窗口进行最小二乘模板匹配,以获取直线边缘点序列。通过剔除粗差和设定阈值,对生成的上述点序列采用最小二乘方法进行拟合,得到图像线特征的直线方程。通过求解图像相交直线的交点,高精度地获得表达工业零部件轮廓的直线段。

2 初始值的获取

2.1 坐标系统及其转换关系

图像坐标系是指存储在计算机中的数字图像的坐标系,可用如图 1 所示的两种方法来表示^[4]:(1)用像素单位来表示,图像坐标系的原点在图像的左上角, u 轴的正方向水平向右, v 轴的正方向垂直向下, u 轴和 v 轴的单位都是像素,用 (u, v) 来表示图像坐标系中的某点坐标;(2)用长度单位(毫米、微米等)来表示,该坐标系的原点位于图像几何中心 (u_0, v_0) 处, x 轴的正方向水平向右, y 轴的正方向垂直向下,用 (x, y) 来表示图像坐标系中的某点坐标。

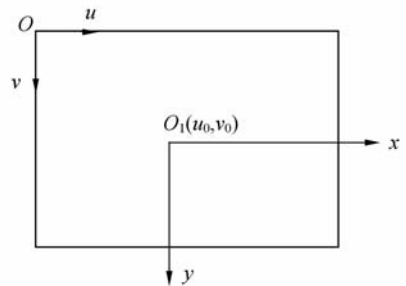


图 1 图像坐标系示意图

Fig. 1 Framework of image coordinate system

任意一点的图像坐标与其物理坐标转换关系如下:

$$\begin{cases} u \\ v \\ 1 \end{cases} = \begin{bmatrix} 1/k & 0 & u_0 \\ 0 & 1/l & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} x \\ y \\ z \end{cases}, \quad (1)$$

其中, k, l 分别为像素点的长宽,单位为毫米。

相机坐标系 (X_c, Y_c, Z_c) 是指以相机镜头的

光心为原点, X_c 轴和 Y_c 轴与图像坐标系的 x 轴和 y 轴平行, 并且 Z_c 轴垂直于图像平面的三维直角坐标系。

$$\begin{cases} x \\ y \\ 1 \end{cases} = \frac{1}{Z_c} \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{cases} X_c \\ Y_c \\ z_c \\ 1 \end{cases}, \quad (2)$$

其中, f 为相机焦距。

综合式(1)(2), 可以得到式(3), 其中矩阵 A 含 5 个相机内参数(f k l u_0 v_0)。

$$\begin{cases} u \\ v \\ 1 \end{cases} = \frac{1}{Z_c} \begin{pmatrix} \frac{f}{k} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{l} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{cases} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{cases} = \frac{1}{Z_c} A \begin{cases} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{cases}, \quad (3)$$

物方坐标系即根据 CAD 三维设计图建立的物方 CAD 直角坐标系。相机坐标系和物方坐标系的转换关系为:

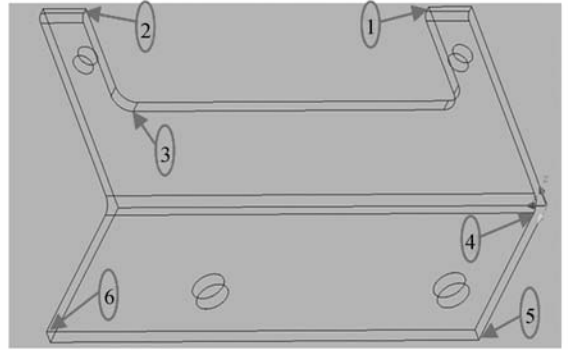
$$\begin{cases} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{cases} = \begin{cases} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{t}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{cases} \begin{cases} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{cases}, \quad (4)$$

其中, $\mathbf{R}_{3 \times 3} = (r_x \ r_y \ r_z)$ 和 $\mathbf{t}_{3 \times 1} = (t_x \ t_y \ t_z)^T$ 分别为物方坐标系与相机坐标系间的 3 个待定旋转矩阵及 3 个待定平移向量, $\mathbf{0} = (0 \ 0 \ 0)^T$ 。由式(3)(4)可以得到物方坐标系与图像坐标系的映射关系 $k\tilde{m} = \mathbf{A}(\mathbf{R} \ \mathbf{t})\tilde{M}$, 其中 $\tilde{m} = (u \ v \ 1)^T$ 为图像齐次坐标, $\tilde{M} = (X \ Y \ Z \ 1)^T$ 为 CAD 设计的物方齐次坐标, k 为比例系数。为解得上述 11 个参数, 选取至少 6 组二维、三维点对(已知其物方坐标和图像坐标), 依照公式(3)和(4)列出 11 个方程求解上述 11 个未知内外参数, 从而确定物方坐标系与相机坐标系间的转换关系。当有多余观测值时可以通过最小二乘法求解未知参数^[1,4]。

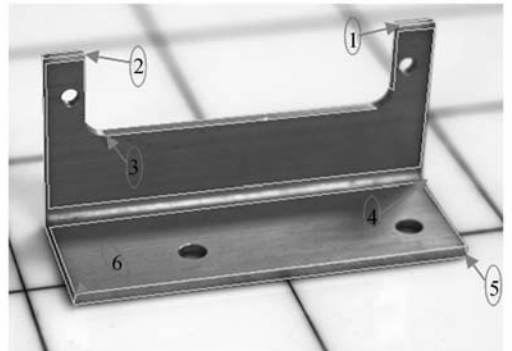
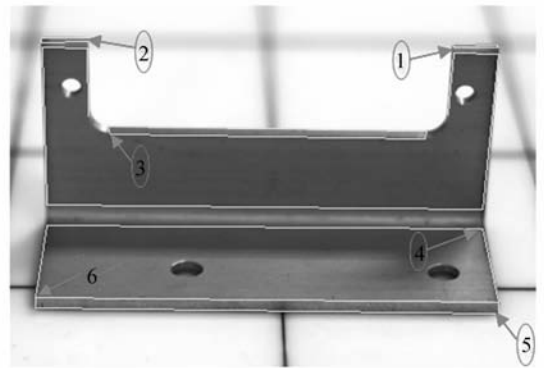
2.2 初值获取

如图 2 所示: 建立如图(a)所示的三维坐标系, 手动选择①-⑥ 6 个点, 并采集其三维坐标; 在图(b)中以图像左上角为原点建立坐标系并采集①-⑥对应的二维图像坐标; 由图像坐标与物方坐标(CAD 设计坐标)之间的映射关系 $k\tilde{m} = \mathbf{A}(\mathbf{R} \ \mathbf{t})\tilde{M}$, 可获取二维图像坐标系与三维物方坐标系

之间的转换参数。



(a) CAD 设计图
(a) Designed CAD



(b) 投影初值

(b) Initial values from projection

图 2 CAD 设计图及初值范围投影

Fig. 2 Designed CAD and initial values by projecting

通过分析 CAD 图形的 DXF 文件结构, 可提取出相应的直线实体信息。在直线实体数据中, 直线的起点坐标是组码 10, 20, 30 后的相应跟随值, 终点坐标是组码 11, 21, 31 后的相应跟随值。在直线实体提取流程中, 首先判断组码是否为 10, 若是, 表明其后的组值是直线起点的坐标 X_s , 同理读出该点的坐标 Y_s 及 Z_s 和终点的坐标 X_e ,

Y_e 及 Z_e [5]。根据转换参数将提取出来的直线实体投影(转换)到图像上,将此投影值作为最小二乘模板匹配的初值。由于零部件上的直线可能会出现相互遮挡的问题,因此需要剔除相互遮挡的直线即消隐处理。直线实体具体步骤如流程图3所示 [5-7]。

采用上述流程并剔除相互遮挡直线的效果如图2(b)所示,图中的白色线条是投影初值范围。

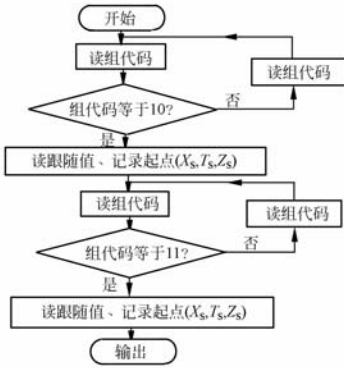


图3 直线实体提取流程图

Fig. 3 Flowchart of line extraction

3 直线段最小二乘模板匹配

最小二乘影像匹配 (Least Squares Image Matching, LSM) 是由德国 Ackermann [8] 教授提出的,LSM 充分利用了影像窗口内的信息进行平差计算,使影像匹配可以达到 0.1 甚至 0.01 像素的精度。Gruen [9] 等对 LSM 进行了扩展,以给定的特征模式作为参考模板与实际影像做最小二乘影像匹配,从而高精度地提取目标,称为最小二乘模板匹配 (Least Squares Template Matching, LSTM) 法。

3.1 最小二乘直线匹配原理

设给定目标模板的灰度为 $g_m(x, y)$, 实际影像灰度为 $g(x, y)$, 建立两者的匹配意味着 $g_m(x, y) = g(x, y)$, 即目标模板中每个点的灰度值等于实际影像中相应点的灰度值。由于噪声的存在,在实际图像中,它们之间不可能完全相等。则模板与影像之间存在差异:

$$g_m(x, y) - v(x, y) = g(x, y), \quad (5)$$

影像匹配的误差方程式为:

$$-v(x, y) = g_x(x, y)d_x + g_y(x, y)d_y + [g(x, y) - g_m(x, y)]. \quad (6)$$

解算初始位置和边缘点之间的 d_x 和 d_y , 就可得到直线边缘的精确定位 [10-11]。

本文子像素级直线提取的基本思想是:在图像预处理后,首先将 CAD 设计数据通过转换参数(投影)得到影像直线段的初值,以此初值生成自适应直线边缘模板,采用基于最小二乘的原理进行模板匹配,最后通过最小二乘方法进行拟合,得到直线方程的最或是参数 \hat{k} 和 \hat{b} 。直线边缘模板可以根据所提取边缘的不同类型,设置成不同的模板。本实验中以阶跃型线特征提取为例,其具体算法步骤为:

(1)初值范围的确定。假设投影得到的影像直线段初值范围的起点和终点坐标分别为 $(x_1^0, y_1^0), (x_2^0, y_2^0)$ 。

(2)生成自适应直线边缘模板。设已知目标线特征模板为一小块(Patch)影像,其大小为 5×5 。过影像中点(3×3)由上述确定的端点给出其直线的斜率 k , 模板灰度值在 $0 \sim 255$, 根据 k 值按 5 个灰度等级渐变生成模板,如图4所示。

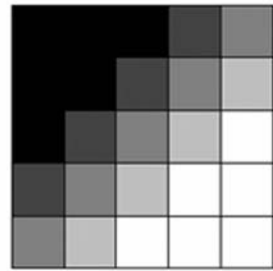


图4 直线边缘模板

Fig. 4 Line edge template

(3)设初值直线的斜率为 $k, (x_1^0 + \Delta x, y_1^0 + \Delta y)$ 为匹配初始位置,其中 $\Delta x = 1, \Delta y = k$, 在 $(x_1^0 + \Delta x, y_1^0 + \Delta y - M)$ 与 $(x_1^0 + \Delta x, y_1^0 + \Delta y + M)$ 之间(M 为模板高度 $1/2$)生成的目标模板与实际影像以 $\sum v = \min$ 为判据,进行最小二乘模板匹配,确定出 d_y 。记最吻合点为 (x_1, y_1) , 其中 $x_1 = x_1^0 + \Delta x, (d_x = \Delta x), y_1 \in (y_1^0 + \Delta y - M, y_1^0 + \Delta y + M)$ 。

(4)重复上述步骤,在范围 $(x_1^0 + 2 \times \Delta x, y_1^0 + 2 \times \Delta y - M)$ 与 $(x_1^0 + 2 \times \Delta x, y_1^0 + 2 \times \Delta y + M)$ 内再次采用基于最小二乘原理的方法进行模板匹配,得到下一个最吻合点 (x_2, y_2) , 直到 $x_1^0 + n \times \Delta x \geq x_2^0$ 。如此得到点序列 $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots$

(x_n, y_n) 。

应当注意的是,当 $|k| \leq 1, \Delta x = 1$ 时, $\Delta y = |k| \leq 1$; 当 $|k| > 1, \Delta x = 1$ 时, $\Delta y = |k| > 1$ 。为使匹配的点序列更密,采取在当 $|k| \leq 1$ 时,沿 x 方向进行匹配($\Delta x = 1, \Delta y = k$); 当 $|k| > 1$ 时,沿 y 方向进行匹配($\Delta x = 1/k, \Delta y = 1$)的策略。

(5)最小二乘直线拟合。对上述方法生成的点序列采用最小二乘法进行拟合,求解其直线方程的最或是参数 \hat{k} 和 \hat{b} 。

设直线方程为:

$$\hat{y} = \hat{k}x + \hat{b} \quad (7)$$

根据最小二乘原理,依据 y_i 与 $b + kx_i$ 偏差的平方和最小原则,可求得:

$$\hat{k} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \hat{b} = \bar{y} - \hat{k}\bar{x} \quad (8)$$

其中: $\bar{y} = \frac{1}{n}(y_1 + y_2 + \dots + y_n)$; $\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n)$ 。

为抑制图像噪声,提高直线定位精度,可对拟合直线进行第二次拟合,即第一次拟合后,将匹配后的点序列带入拟合结果公式,计算每个点的残差。然后将残差较大的一部分点除掉,再对剩余点进行第二次拟合,该过程可重复若干次,直至均方差小于某一阈值时得到新直线方程参数为 \hat{k}_1, \hat{b}_1 。

(6)将初值 x_1^0, x_2^0 分别代入新直线方程,得到新端点 (x_1^1, y_1^1) 和 (x_2^1, y_2^1) 。以此新端点作为新的初值,重复上述步骤(2)~(5),直到邻近两次 \hat{k}, \hat{b} 的差值小于某一阈值为止。获得所提取直线

参数的最或是值 \hat{k} 和 \hat{b} ,算法流程如图 5 所示。

3.2 匹配直线交点求取

设提取出的第 i, j 条直线的方程分别为:

$$y = k_i x + b_i, y = k_j x + b_j.$$

由公式(9)可解算直线最终交点坐标 (x, y) ,

$$x = \frac{b_i + b_j}{k_i - k_j}, y = \frac{b_i k_j + b_j k_i}{k_i - k_j} \quad (9)$$

4 实验分析及精度评定

为检测本文算法提取直线的精度,对某规则工业零部件的真实图像进行了高精度线特征提取。规则工业零部件的 CAD 数据由设计单位提供,手工获取 6 组二维、三维点对(图 2 所示),采用最小二乘原理求解 11 个投影转换参数;根据投影转换参数给定的初值范围,采用自适应最小二乘模板匹配的方法精确地提取出直线段。

采用手工选择二维、三维点对时,不可避免地会带来误差,从而使得投影得到的直线存在一定的投影误差,但此投影值仅作为高精度提取的初值。采用投影转换得到的直线初值如图 2(b)中所示的白色线条,投影点位的最大误差分别为 2.9 pixel 和 3.3 pixel。应当注意的是:为防止投影误差过大,在保证人工测量精度的同时,选择的二维、三维点对应较均匀地分布在物体周围,同时避免所选择点在同一个物方平面上。

图 6(a), (b) 为从不同角度获取的工业零部件一个立体像对。图 7、图 8 为采用本文的方法,分别提取出立体像对的图像直线特征效果图。

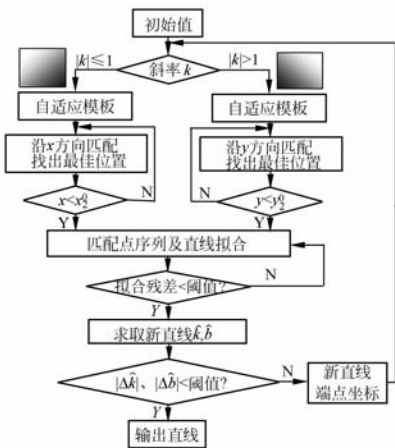
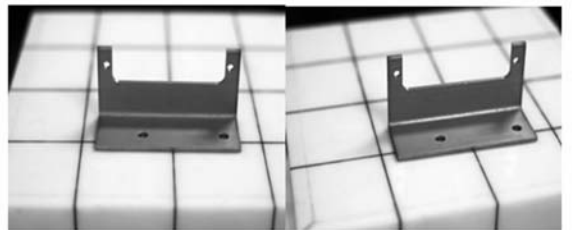


图 5 直线段最小二乘模板匹配流程图

Fig. 5 Flowchart of LSTM of line



(a) (b)

图 6 不同角度工业零部件立体像对

Fig. 6 A stereopair in different angles

为检验所提取的直线精度,本文从理论精度和实际精度两方面对其进行评定。

(1)理论精度:拟合直线的标准偏差 S 是检验拟合结果是否有效的重要标志。根据最小二乘

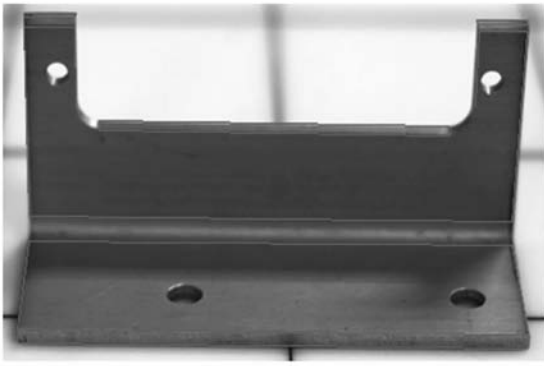


图 7 图 6(a)最小二乘特征提取效果图

Fig. 7 Extracting result of Fig. 6(a) by least squares

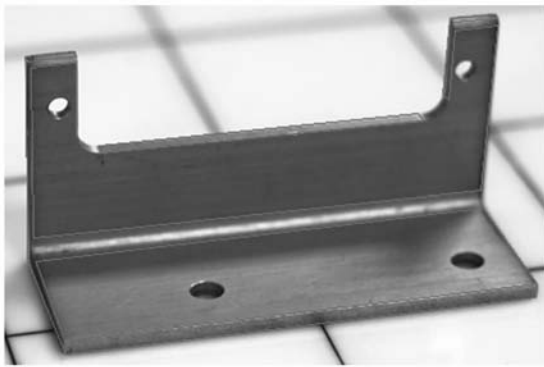


图 8 图 6(b)最小二乘特征提取效果图

Fig. 8 Extracting result of Fig. 6(b) by least squares

拟合的偏差估计,按公式(10)计算拟合直线的标准偏差。

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N [y_i - (\hat{b} + \hat{k}x_i)]^2}, \quad (10)$$

其中 N 为拟合点的个数, (x_i, y_i) 为拟合点坐标。直线提取的理论精度如图 9 和图 10 所示。

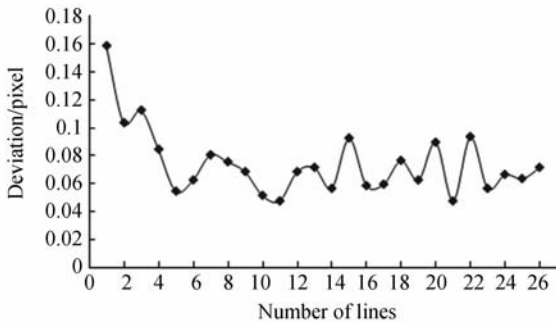


图 9 图 7 中直线提取标准偏差

Fig. 9 Standard deviation of line extraction in Fig. 7

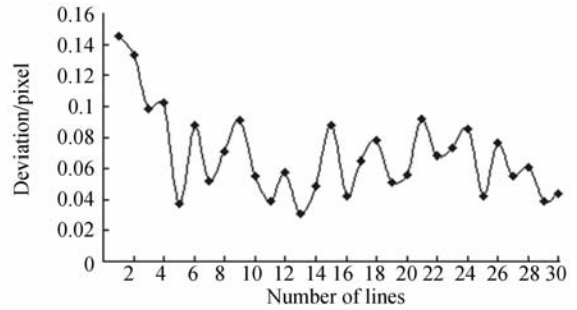


图 10 图 8 中直线提取标准偏差

Fig. 10 Standard deviation of line extraction in Fig. 8

建)出工业零部件物方坐标,以此物方坐标为基础计算出物体直线的长度(计算长度);并量测实际工业零部件对应的直线长度(量测长度),人工量测与平差计算的结果示于表 1。其中“量测长度”为利用游标卡尺量测的直线长度,“计算长度”为以物方坐标计算得到的相应直线长度。表中“计算误差”表示计算长度与量测长度之差。

表 1 人工量测与平差计算结果比较表

Tab. 1 Comparison results between micrometer and adjustment (mm)

统计编号	量测长度	计算长度	计算误差
1	8.000	8.085	0.085
2	1.100	1.292	0.192
3	8.000	8.042	0.042
4	1.100	1.492	0.392
5	14.020	13.901	-0.119
6	8.200	8.348	0.148
7	32.800	32.453	-0.347
8	80.000	80.144	0.144
9	2.200	2.467	0.267
10	58.010	58.104	0.094
11	2.200	2.108	-0.092
12	58.010	58.374	0.364
13	2.000	2.397	0.397
14	80.000	79.644	-0.356
15	2.010	2.283	0.273
16	80.000	79.889	-0.111
17	0.960	0.768	-0.192
18	7.960	7.859	-0.101
19	0.960	1.418	0.458
20	8.100	7.896	-0.204
21	32.900	32.925	0.025
22	8.100	7.846	-0.254
23	14.020	14.251	0.231
24	26.000	25.876	-0.124
25	79.960	79.889	-0.071
26	26.020	26.150	0.130

(2) 根据提取出的立体像对同名直线特征,利用已检校好的摄影相机内外参数,平差计算(重

实验结果(表 1)统计分析显示,计算长度与量测长度之差的中误差为 0.232 mm。通过零件的设计长度与量测长度计算出“加工误差”;图 11 为加工误差与计算误差的图像统计表示。

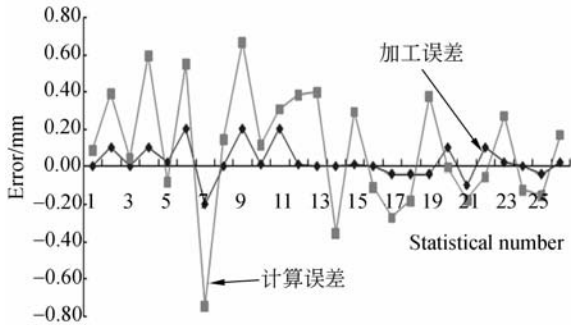


图 11 加工误差与计算误差统计图

Fig. 11 Statistical errors from processing and calculation

5 结 论

为高精度地提取图像线特征,实现基于视觉的图像量测,本文采用自适应最小二乘线模板匹配方法,通过建立图像坐标系与物方 CAD 坐标系之间的转换关系,将 CAD 设计坐标投影至图像上,并以此为初值进行最小二乘模板匹配及拟合,从而高精度地获取图像线特征,重建的直线长度与游标卡尺量测直线长度之差的中误差为 0.232 mm。真实图像的线特征提取实验表明,该方法较好地解决了高精度图像特征提取初值问题,以及图像光照不均引起的图像特征提取不稳定性问题。同时采用自适应方法生成匹配模板又为该方法的自动化提供了保证。本研究结果可应用于规则工业零部件的高精度图像量测及逆向工程技术中,可辅助提高工业生产的自动化水平。对于工业零部件影像中圆及规则曲线的高精度提取研究,将是本项研究下一步的工作重点。

参考文献:

- [1] 于起峰,尚洋. 摄影测量学原理与应用研究[M]. 北京:科学出版社,2009.
YU Q F, SH Y. *Videometrics: Principles and Researches* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [2] 管海燕,郭建星. 一种高精度的工业钣金件图像直线提取算法[J]. 地理空间信息, 2005, 3(2):54-56.
GUAN H Y, GUO J X. Lines extraction of industrial sheetmetal parts [J]. *Geospatial Information*, 2005, 3(2):54-56. (in Chinese)
- [3] 张春森,姜楠. 一种子像素级图像测量直线提取算法[J]. 中国矿业大学学报(自然科学版), 2009, 38(6):903-908.
ZHANG CH S, JIANG N. Image lines feature extraction with sub-pixel [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2009, 38(6): 903-908. (in Chinese)
- [4] 陈胜勇,刘盛. 基于 OpenCV 的计算机视觉技术实现[M]. 北京:科学出版社,2002.
CHEN SH Y, LIU SH. *Computer Vision Technology Based on the OpenCV* [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [5] 伍济钢,宾鸿赞. 机器视觉的薄片零件尺寸检测系
统[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(1):124-128.
WU J G, BIN H Z. Dimensional inspecting system of thin sheet parts based on machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 124-128. (in Chinese)
- [6] 吴敬文. 基于 DXF 的数字地图投影与坐标系转换方法研究[J]. 海洋测绘, 2009, 29(1):28-30.
WU J W. The research of the transformation among different coordinate systems and projections of digital map based on DXF file [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2009, 29(1): 28-30. (in Chinese)
- [7] 张磊,车仁生,黄庆成. 无图纸检测中的 CAD/CMM 软件接口技术 [J]. 光学 精密工程, 2002, 29(4): 370-373.
ZHANG L, CHE R SH, HUANG Q CH. Software interface technology of the CAD/CMM system in paperless inspection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 29(4):370-373. (In Chinese)
- [8] ACKEMANN F. *High Precision Digital Image Correlation* [M]. German: University of Stuttgart Press, 1983.
- [9] GRUEN A. Adaptive least square correlation: a powerful image matching technique [J]. *South African Journal of Photogrammetry and Remote*

Sensing, 1985, 3(14):175-187.

- [10] 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997.

ZHANG Z X, ZHANG J Q. *Digital Photogrammetry* [M]. Wuhan: Wuhan University Science Press, 1997. (in Chinese)

- [11] 高春甫,唐可洪,胡庆玉,等. 机械手姿态识别的立

体视觉匹配[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2):465-469.

GAO CH F, TANG K H, HU Q Y, *et al.*. Stereo vision matching for posture recognition of manipulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2):465-469. (in Chinese)

作者简介:



张春森(1963—),男,陕西西安人,博士,教授,2004年于武汉大学获得博士学位。主要从事摄影测量计算机视觉及遥感应用方面的研究。E-mail: zhchunsen@yahoo.com.cn



胡平波(1985—),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要从事摄影测量计算机视觉方面的研究。E-mail: hulu1528@163.com

●下期预告

双经纬仪交会测量火炮调炮精度的误差分析与抑制

孙泽林^{1,2},王 昭¹,翟唤春²

(1. 西安交通大学 制造系统与质量工程研究所,陕西 西安 710049;

2. 中国人民解放军 63870 部队,陕西 华阴 714200)

为了保证自行火炮控系统的调炮精度,对双经纬仪交会测量火炮调炮精度的测量误差和抑制该误差的方法进行了研究。首先,根据双经纬仪交会测量原理,建立了测量调炮精度的空间解算模型。接着,以DT202C电子经纬仪为例,对影响其测量精度的各项因素进行了系统的定量分析,并建立了测量误差模型。最后,在研究了预先确定炮管上两标记点的前提下,寻求经纬仪最佳布站方式以抑制其测量误差的具体实现方法,并采用遗传算法进行了寻优解算。理论计算和试验结果表明,通过经纬仪合理布站,可以使调炮精度的测量误差控制在0.20 nmile以内。满足了试验需求,消除了经纬仪随机布站引起的测量结果的不确定性。