文章编号:1001-1595(2002)S0-0061-05 中图分类号:P23 文献标识码:A

数字近景摄影测量在工业检测中的应用

贾盛举,于晶涛
(同济大学 遥感技术应用研究中心,上海 200092)

Application of Digital Close-range Photogrammetry to Inspection of Machine Parts

JIA Sheng-jiu, YU Jing-tao
(*The Research Center of Remote Sensing Application Technology, Tongji University, Shanghai* 200092, *China*)

Abstract: This paper has proposed a way based on the use of digital camera and real-time digital close-range photogrammetry to construct the system for inspection of machine parts. Using digital close-range photogrammetry the processing includes solution by Direct Linear Transformation to provide approximate original values and theoretic closed self-calibration bundle adjustment to fulfill high precise adjustment calculation, and after image processing, to fulfill automatic detecting of industrial objects. The system utilizes procedures of digitalized image automatic detecting, including the combination of approximate location of object points and least-square matching for precise registration of sub-pixel. This kind of non-contacted industrial detecting system takes more advantages in precise, intelligence, flexibility, automatic and real-time aspects over others. It is better to satisfy the demands of industrial detecting.

Key words: computer vision; real-time; image matching; bundle adjustment

摘 要:论述了利用数字相机与实时数字近景摄影测量技术相结合建立的工业零件检测系统的方法。该方法通过直接线性变换提供的概略初值,由理论严密的自检校光束法平差完成高精度的平差计算的数字近景摄影测量的处理的基本过程,并经后续处理,完成工业目标的自动检测。本系统利用目标点位的概略定位与最小二乘影像匹配相结合,达到目标点位的子像素级的精确配准和数字影像的自动量测技术。这种通过非接触方式建立的工业检测系统在精度、可靠性、灵活性、自动化程度、实时性等方面具有更大的优越性,能较好地满足高精度工业检测的要求。

关键词:计算机视觉;实时;影像匹配;光线束法平差

1 引 言

工业量测检测是在工业生产中不可缺少的一个环节。随着工业技术的进步和发展,市场竞争日趋激烈,把产品的外形、外观设计、内在质量等因素都归并到产品质量的范畴,对产品的质量控制相应提出了更高的要求。作为产品质量控制的主要部分的工业零件检测系统,其性能和作用发挥得好坏在一定程度上直接影响着产品质量的控制和生产效率的提高。

收稿日期:2001-12-07;修回日期:2002-01-22
作者简介:贾盛举(1967-),男,河南许昌人,在读博士生,主要从事数字近景摄影测量与影像GIS方面的研究。

万方数据

随着数字图像处理、计算机视觉及数字近景摄影测量等技术的发展，高精度影像匹配和相应的数字图像处理技术可达到子像素的精度，甚至达到1/10或1/100个像素的精度。数字近景摄影测量的数据处理所采用严密的自检校光线束平差，对于物方可达10 μm级的精度。随着实时与准实时的3维目标信息获取方面技术日臻完善，人们有可能通过实时地利用CCD摄像机作为图像传感器，通过非接触方式，综合运用数字图像处理、精密测量等技术对目标进行2维或者3维坐标的高精度量测。

本文阐述一种将数字相机与数字近景摄影测量技术、数字图像处理技术、计算机视觉相结合进行实时工业零件的检测方法。该法克服了以往产品抽样样本选择的标准、检测过程的时间滞差等问题。其具有精度高、效率高、自动化程度高的特点。以某厂加工的高精度钢板为例进行了检测试验，证明结果良好。

2 系统概述

实时或准实时数字近景摄影测量主要应用于从获取数字图像到确定所摄物体的形状、位置信息，必须在极短的时间内完成的工作中。实时或准实时数字近景摄影测量技术应用于工业零件的检测，为实时或准实时、全自动、高精度的完成检验过程提供了保证，且能满足工业方面的高标准的要求。利用实时或准实时数字近景摄影测量技术建立起一套这样的系统，其最终目的是使该系统能通过机器实时或准实时的一致性判断的结果，来替代人的非一致性判断，从而实现对工业零件的高精度、全自动检测。

系统检验的简要工作流程如下：首先，将2个或2个以上经标定的CCD数字相机，对已布好控制的系统工作台的工业成品直接摄取数字影像，并构成立体像对，通过传输电缆将获取的数字影像传输到计算机中。通过自动的量测过程、数字图像处理、影像目标点的匹配和摄影测量计算等过程，在计算机中完成量测和处理分析。而计算机内部自动量测过程主要包括：影像增强、特征提取、目标识别，以及点的精确定位（达到子像元素的精度）等过程。处理分析过程主要包括：自动匹配和摄影测量处理以求得物体的3维空间坐标。接下来的工作是对所取得的目标物体信息作进一步的处理，在此是将计算的3维目标信息结果同设计数据信息或CAD数据模型相比较，并将获得的检验结果和相应的误差分析显示、输出，或与已存储的信息比较进行多时相分析等过程，这样整体实现了实时或准实时的应用数字近景摄影测量技术的工业零件检测过程。

本文重点介绍数字影像的自动量测、数字近景摄影测量的处理及基本特性。

3 数字影像坐标的自动量测

数字影像坐标的自动量测是获取被检测目标的像点坐标的过程。其量测的精度对匹配速度、匹配算法的适应性、检测结果的准确性具有决定性作用。一般被摄目标与光源特性、被摄物体的性质、形状等因素有较大的关系。为了使系统在没有人介入的情况下，自动完成处理影像信息的功能，针对我们所选择的检测目标的特性和被检目标的几何特征，对2台或2台以上CCD相机获取的数字立体影像，采用了目标点像素级的概略定位和子像素级的高精度定位。

3.1 目标点的概略定位

1. 噪声衰减与图像增强。由于外界环境光和CCD相机光电转换的不稳定在获取影像中含有噪声，可分别对高频和低频噪声进行处理。影像增强是为了强调一些重要的特征，如目标点或边缘线等。

2. 影像的二值化。经噪声衰减与图像增强的影像，采用先利用阈值 $T=$（最小灰度值+平均灰度值）/2 将搜索窗口中的影像二值化为 g_{ij} $(i=0,1,\cdots,n-1;j=0,1,\cdots,m-1)$。

3. 圆孔影像的圆心坐标点定位。在二值化影像基础上，可采用四连通或八连通域的方法对整个图像进行扫描，给每一连通区域进行惟一的标记，扫描完成后可得到具有不同标记的二值灰度影像。

本文应用Wong圆点定位算子提取了圆孔影像的圆心坐标。利用对称的几何影像的对称中心与其灰度重心一致的灰度重心法定位的原理。该算子是通过计算同一标记的圆形目标的灰度重心提取其圆心坐标。计算公式为

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{1}{M}\sum_{i=0}^{n-1}\sum_{j=0}^{m-1} i g_{ij} \\ y &= \frac{1}{M}\sum_{i=0}^{n-1}\sum_{j=0}^{m-1} j g_{ij} \\ M &= \sum_{i=0}^{n-1}\sum_{j=0}^{m-1} g_{ij} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

万方数据

4. 非检测目标的剔除。为了防止将其他灰度均匀的区域错误地搜索为圆形目标，可根据影像的特征先滤去这些区域。利用扫描标记的灰度的统计特性，将具有相同标记的像素进行统计，将远大于或小于某灰度范围的影像进行剔除。也要将同一标记的圆度 γ，作为剔除的标准。

求得灰度重心后按式(2)计算这个区域的圆度 γ

$$\left.\begin{aligned}\gamma &= M_x / M_y\\ M_x &= \frac{M_{20}+M_{02}}{2} + \sqrt{\left(\frac{M_{20}-M_{02}}{2}\right)^2 + M_{11}^2}\\ M_y &= \frac{M_{20}+M_{02}}{2} - \sqrt{\left(\frac{M_{20}-M_{02}}{2}\right)^2 + M_{11}^2}\\ M_{pq} &= \sum_{i=0}^{n-1}\sum_{j=0}^{m-1}(i-x)^p(j-y)^q g_{ij}(p,q=0,1,2)\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

3.2 目标点的高精度定位

为进行子像素级的高精度定位，运用概略坐标一定范围的窗口，利用原始灰度影像，采取最小二乘法匹配以达到子像素级的目的。

最小二乘影像匹配法充分利用影像窗口内的信息进行平差计算，影像匹配可达到 1/10 像素甚至 1/100 像素的高精度。

最小二乘影像匹配以“灰度差的平方和为最小”作为影像匹配的测度。对于一个影像对 $g_1(x,y)$ 与 $g_2(x,y)$，如果我们认为影像灰度只存在偶然误差(随机噪声 n)，即

$$n_1 + g_1(x,y) = n_2 + g_2(x,y) \tag{3}$$

或

$$v = g_1(x,y) - g_2(x,y) \tag{4}$$

则最小二乘影像匹配可表示为

$$\sum vv = \min \tag{5}$$

一般最小二乘影像匹配同时考虑数字影像的线性辐射畸变与一次正形几何畸变，即设

$$\begin{aligned}x_2 &= a_0 + a_1 x + a_2 y\\ y_2 &= b_0 + b_1 x + b_2 y\\ g_2 &= h_0 + h_1 g_1\end{aligned}$$

其中，$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ 为数字影像的几何畸变参数；h_0, h_1 为辐射畸变参数。于是最小二乘影像匹配模型转化为

$$\begin{aligned}g_1(x,y) + n_1(x,y) = h_0 + h_1 g_2(&a_0 + a_1 x +\\ &a_2 y, b_0 + b_1 x + b_2 y) + n_2(x,y)\end{aligned} \tag{6}$$

将上式线性化后即得到最小二乘影像匹配的误差方程式

$$\begin{aligned}v = {} & c_1 \mathrm{d}h_0 + c_2 \mathrm{d}h_1 + c_3 \mathrm{d}a_0 + c_4 \mathrm{d}a_1 + c_5 \mathrm{d}a_2 +\\ & c_6 \mathrm{d}b_0 + c_7 \mathrm{d}b_1 + c_8 \mathrm{d}b_2 + g_2(x,y) -\\ & g_1(x,y)\end{aligned} \tag{7}$$

式中，$\mathrm{d}h_0, \mathrm{d}h_1, \mathrm{d}a_0, \mathrm{d}a_1, \mathrm{d}a_2, \mathrm{d}b_0, \mathrm{d}b_1, \mathrm{d}b_2$ 是变形参数改正值；$c_1, \cdots, c_8$ 是误差方程式系数。

列出所有点的误差方程后按迭代求解的方法解出各变形参数，再由变形参数计算出目标点在影像上的精确位置。这一过程是在 Wong 圆点定位算子求得的目标点周围的一个小范围内进行的。

4 数字摄影测量处理

数字摄影测量处理是在坐标自动量测基础之上的计算处理。为了进行高精度的计算，必须采用理论严密的自检校光线束法进行 3 维坐标的计算。由于光线束法采用迭代方法，需要较为精确的初始值，直接线性变换可提供较为准确的初值。所以，计算过程应主要包括直接线性变换和严密的自检校光束法平差计算过程。利用不同摄取方向构成立体像对的影像，其中影像要包含控制台内的控制点，以作为目标点坐标计算起算的基准。

4.1 直接线性变换

直接线性变换算法既不需要在影像上有框标，也不需要有摄影机内外方位参数的起始近似值。特别适合于对非量测相机摄取的影像的归化。

直接线性变换的基本公式为

$$\left.\begin{aligned}DI &= \frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1}\\ DJ &= \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1}\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

其中，x, y 为物方坐标；DI, DJ 为转换后的影像坐标；$L_1, \cdots, L_{11}$ 是数字化影像坐标和像片坐标之间的变换参数。式(8)没有考虑影像的畸变。内方位元素和外方位元素的值由 $L_1, \cdots, L_{11}$ 变换参数求得。

4.2 光线束法平差

为了获得高精度的近景摄影测量结果，平差系统应采用严密的数学模型

$$\left.\begin{aligned}x - x_0 = {} & -f\frac{a_1(X-X_S) + b_1(Y-Y_S) + c_1(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S) + b_3(Y-Y_S) + c_3(Z-Z_S)}\\ y - y_0 = {} & -f\frac{a_2(X-X_S) + b_2(Y-Y_S) + c_2(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S) + b_3(Y-Y_S) + c_3(Z-Z_S)}\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

万方数据

其中，内外方位元素的初值由直接线性变换结果参数进行计算获得。

4.3 系统误差的补偿

平差系统均使用附加参数来扩展平差的函数模型，以抵消部分系统误差的影响。对于附加参数组的选取，数字相机的误差来源主要有：数字化影像变形、镜头畸变和CCD阵列的线性位移。

CCD阵列的镜头畸变(δ_i,δ_j)可写为

$$\left.\begin{aligned}\delta_i &= \delta_{ri}+\delta_{di}+\delta_m\\ \delta_j &= \delta_{rj}+\delta_{dj}\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

这里，δ_{ri}，δ_{rj}表示镜头x，y方向的径向畸变；δ_{di}，δ_{dj}表示离心畸变；δ_m是扫描方向的线性位移。

一般镜头的径向畸变可以写为

$$\left.\begin{aligned}\delta_r &= k_1r^3+k_2r^5+k_3r^7\\ r &= \sqrt{(I-I_0)^2+(J-J_0)^2}\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

式中，k_1,k_2,k_3是径向畸变系数；r是像点辐射距。于是，x，y方向的径向畸变可以表示为

$$\left.\begin{aligned}\delta_{ri} &= \frac{DI}{r}\delta_r = DI(k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6)\\ \delta_{rj} &= \frac{DJ}{r}\delta_r = DJ(k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6)\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

离心畸变可以表示为

$$\left.\begin{aligned}\delta_{di} &= [1+p_3r^2][p_1(r^2+2DI^2)+2p_2DIDJ]\\ \delta_{dj} &= [1+p_3r^2][p_2(r^2+2DJ^2)+2p_1DIDJ]\end{aligned}\right\} \tag{13}$$

其中，p_1,p_2,p_3表示离心畸变的改正系数。

对于CCD阵列的线性变形一般用一个多项式逼近

$$\delta_m = m_1l+m_2l^3+m_3l^5+m_4l^7 \tag{14}$$

这样就得到了与式(9)相对应的考虑畸变的严密的自检校光束法平差数学模型

$$\left.\begin{aligned}x-x_0+\delta_i &= -f\frac{a_1(X-X_S)+b_1(Y-Y_S)+c_1(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S)+b_3(Y-Y_S)+c_3(Z-Z_S)}\\ y-y_0+\delta_j &= -f\frac{a_2(X-X_S)+b_2(Y-Y_S)+c_2(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S)+b_3(Y-Y_S)+c_3(Z-Z_S)}\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

4.4 联合平差

在控制网中，做一些相对控制，对精度的提高会有很大的帮助，相对控制的信息纳入到整体平差可分为2种类型：

1. 视量测数据为观测值，相对控制中含有观测值时，由条件方程建立观测值的误差方程式

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{BX}-\boldsymbol{D} \tag{16}$$

连同共线条件方程的线性化式

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{AX}-\boldsymbol{L} \tag{17}$$

按间接平差方法整体解算。

2. 相对控制中，不含观测值时，相对控制为共线方程式提供一种制约条件，从而构成附有条件的间接平差模型

$$\boldsymbol{CX}+\boldsymbol{W}=0 \tag{18}$$

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{AX}-\boldsymbol{L} \tag{19}$$

按附有条件的间接平差方法求解。

5 实验与结论

5.1 实 验

我们使用1架CCD数码相机从2个不同的视点对已知设计坐标的标准样板拍摄图像，进行了实际检测试验。图1是用数字相机拍摄的钢板的数字影像。钢板规格：600 mm×400 mm，其中圆孔106个，半径分别为4.5 mm和3.6 mm，矩形孔76个，板厚为1 mm，加工误差$|\Delta|\leqslant 0.1$ mm。数字影像幅面为1 280像素×1 024像素。检测圆孔的位置与大小是否符合设计要求。

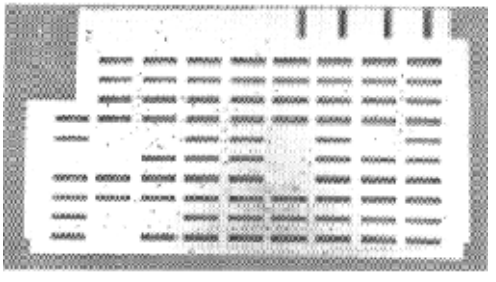


图1 检测的钢板影像

Fig.1 Image of the inspected steel plate

在该试验中，只考虑x，y 2维坐标，但在实际工业零件检测中一般需要考虑3维坐标。试验所得数据如下。

表1列出了利用Wong圆点定位算子与直接线性变换求得的圆心位置与设计坐标相比较的精度结果。

点位中误差：±0.671 383 mm；最大点位误差：±2.405 444 mm

表2列出了利用最小二乘影像匹配法提取的圆心位置与直接线性变换和光线束法平差结果与

万方数据

设计坐标相比较的精度结果。

表 1

Tab.1　　mm

点号	X_0	Y_0	X
1	205.000	35.000	205.145 11
2	275.000	135.000	275.549 76
3	140.000	210.000	140.689 60
4	220.000	210.000	220.405 42
5	266.000	34.500	266.765 83
6	346.000	134.500	346.216 76
点号	Y	SQRT($dx \times dx + dy \times dy$)	
1	34.207 87	0.805 31	
2	135.055 28	0.552 53	
3	210.401 31	0.797 87	
4	209.929 40	0.411 52	
5	34.274 00	0.798 48	
6	134.636 94	0.256 39	

表 2

Tab.2　　mm

点号	X_0	Y_0	X
1	205.000	35.000	205.189 33
2	275.000	135.000	275.101 61
3	140.000	210.000	140.359 00
4	220.000	210.000	220.347 14
5	266.000	34.500	266.243 60
6	346.000	134.500	346.120 18
点号	Y	SQRT($dx \times dx + dy \times dy$)	
1	34.224 15	0.047 4	
2	134.987 65	0.083 0	
3	210.281 60	0.169 9	
4	209.901 31	0.064 7	
5	34.208 14	0.069 2	
6	134.550 72	0.129 5	

点位中误差：±0.136 5 mm；最大点位误差：±0.358 8 mm

孔心距测量：选择样板上指定的孔，分别对其孔心距进行测量，每一对孔测量 5 次。对 4 对孔心距测量的平均值偏差分别为 0.11 mm，−0.27 mm，0.35 mm，0.38 mm，达到设计要求。

5.2 结　论

1. 尽管试验用的数字相机为非量测用相机，但已达到了相当的精度。利用 Wong 圆点定位算子求得的概略圆心位置基础之上，进行最小二乘匹配法求得的精确圆心位置，利用直接线性变换提供的初值，带自检校光线束法平差法最终平差结果，通过求得的位置与设计目标比较，点位中误差只有 ± 0.136 5 mm，最大点位误差仅为 ±0.358 8 mm。相对精度达到 1/4 400，若采用经过标定后量测相机进行摄影和相应处理技术进行工业零件高精度检测是可行的。

2. 利用 Wong 圆点定位算子求得的圆心位置和直接线性变换直接求解，不能满足高精度的要求，必须采用严密的计算方法和定位方法。

3. 利用 Wong 圆点定位算子求得的圆心位置基础之上实际应用中匹配过程包括：对控制点的匹配和对目标点的匹配。为选定影像匹配的基准，必须提供高精度的控制点。

4. 应用在线数据（图像）获取和实时图像处理技术可以大大提高生产效率，降低生产成本，满足实时工业零件检测的要求。

5. 要建立合理的相机镜头畸变改正模型，对控制点控制网做优化设计。

6. 实际应用中工业零件有各种各样的形状和类型，为了进行全自动高精度检测，对各种形状和类型大都采用边缘特征、灰度特征、区域特征提取等方法，进行信号的处理和统计检验的方法来解决。不但对目标对象进行分类和描述，而且对目标进行定量分析并完成对目标的精确定位。其前期的数字影像坐标的自动量测则是关键，后期的数据处理基本相同。

参考文献：

[1] WANG Zhi-zhuo. Principles of Photogrammetry (with Remote Sensing) [M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 1990.

[2] ZHANG Zhu-xun, ZHANG Jian-qing. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: Press of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1996. (*in* Chinese)

[3] CLIVE S F. Developments in Automated Digital Close-range Photogrammetry [A]. Proceedings of the ASPRS 2000 [C]. Washington DC: [s. n.], 2000.

[4] PAUL G B. Uses of Softcopy Close Range Photogrammetry for English Heritage Conservation Projects [A]. ASPRS 2000 Proceedings [C]. Washington DC: [s.n.], 2000.

[5] CHENG Ying, SENK A F. A Rigorous Calibration Method for Digital Cameras [A]. ISPRS 17th Congress [C]. [s.l.]: [s.n.], 1992.

[6] MA Song-de, ZHANG Zheng-you. Computer Vision [M]. Beijing: Science Press, 1999.

万方数据