

# 基于序列图像的工业钣金件三维重建与视觉检测

张永军, 张祖勋, 张剑清

(武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079)

**摘要:** 针对目前工业制造领域面临的难题, 提出利用非量测数字摄像机进行工业钣金件高精度三维重建与视觉检测。采用二维直接线性变换分解摄像机参数初值并结合光束法平差进行高精度标定; 利用最小二乘模板匹配提取像面上的点、直线信息并进行混合光束法平差, 从而进行钣金件的高精度三维重建及其尺寸制造误差的检测。所开发的视觉检测系统硬件成本低、自动化程度较高, 实际数据的多次实验均取得了优于 1/8 000 的相对精度, 说明所论述的方法为工业零件的自动化三维检测提供了一条可行途径。

**关键词:** 图像识别; 序列图像; 三维重建; 视觉检测; 最小二乘模板匹配; 摄像机标定

中图分类号: TP 391.41; P 23

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2004)04-0534-04

## 3-D reconstruction and visual inspection of industrial sheetmetal parts with image sequence

ZHANG Yongjun, ZHANG Zuxun, ZHANG Jianqing

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** A three-dimensional reconstruction and visual inspection method was developed for industrial sheetmetal parts using a non-metric CCD camera. The initial values of the camera's internal and external parameters were decomposed by a 2-D direct linear transformation of several images. The non-metric CCD camera was precisely calibrated using bundle adjustment with a planar control grid. Hybrid point-line bundle adjustment with precise points and lines from images extracted by a line segment least squares template matching is used to accurately reconstruct the industrial part shapes. The reconstruction results can be used to automatically or interactively inspect production accuracy. The visual inspection software uses inexpensive hardware and runs automatically. The relative precision is better than 1/8 000 with image sequences of several parts. The approach is effective for automatic 3-D visual inspection of industrial parts which are mainly described by points and line segments such as sheet metal parts.

**Key words:** image recognition; 3-D reconstruction; visual inspection; least squares template matching; camera calibration; hybrid point-line bundle adjustment

CAD 在现代制造工业中应用已相当普遍, 因而利用 CAD 数据作为参考来评价产品的几何精度成为近年来的研究热点。工业检测领域应用最多的仍然是三维坐标量测机, 其理论与技术也都已非常成熟<sup>[1]</sup>, 但受硬件成本和检测速度所限, 还难以大规模应用。视觉检测技术由于其非接触和快速等特点受到了广泛重视, Kosmopoulos 等人利用立体视觉技术对轿车装配过程中的缝隙进行过实时检测研究, 取得了较好的结果<sup>[2]</sup>。电子工业是计算机视觉检测技术应用最为成功的行业, 印刷电路板和集成电路芯片的二维自动检测已广泛采用该技术<sup>[3]</sup>。

尽管二维检测系统已广泛使用, 但到目前为止, 还没有真正实用的工业零件三维视觉检测系统。成本低、速度快的三维检测手段是工业制造领域亟待解决的难题之一。为此, 本文提出并研制了一套利用非量测数字摄像机进行工业钣金件高精度三维重建与视觉检测的软件系统。

## 1 直线段最小二乘模板匹配

Ackemann 教授提出的最小二乘影像匹配方法, 是目前精度最高的匹配方法之一。Gruen 等人进行了扩展, 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方法<sup>[4]</sup>。假设以“灰度差平方和最小”作为判据, 影像匹配可写为  $\sum v = \min$ 。如果只考虑偶然误差, 则有  $v = g_1(x, y) - g_2(x, y)$ , 利用该式列误差方程式并按最小二乘法求解即为最小二乘模板匹配的基本思想。假设  $g_m(x, y)$  为给定模板,  $g(x, y)$  为实际影像块, 建立两者的匹配意味着  $g_m(x, y) = g(x, y)$ , 也即模板中

收稿日期: 2003-02-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40301041)

作者简介: 张永军(1975-), 男(汉), 内蒙古, 博士。

E-mail: yongjun\_zhang@sina.com

每个点的灰度值等于实际影像中相应点的灰度值。在实际图像中, 由于噪声的存在, 它们之间不可能完全相等, 因而影像匹配的误差方程式为:

$$v(x, y) = \frac{\partial g}{\partial x} dx + \frac{\partial g}{\partial y} dy - \Delta g,$$

$$\Delta g = g_m(x, y) - g(x, y), \quad (1)$$

其中  $\partial g/\partial x$ 、 $\partial g/\partial y$  分别为像点灰度在  $x$ 、 $y$  方向的导数, 一般以一阶差分代替。需要注意的是匹配时标准模板需要根据影像特征生成自适应模板<sup>[5]</sup>, 图 1 和图 2 所示分别为屋脊型和阶跃型边缘的模板匹配结果, 可以看出匹配结果与实际边缘完全吻合。

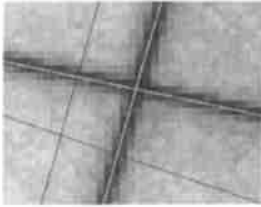


图 1 屋脊型边缘的匹配结果

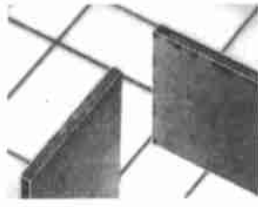


图 2 阶跃型边缘的匹配结果

## 2 二维DLT及摄像机标定

二维DLT表示的是空间平面和像平面间的映射关系<sup>[5]</sup>:

$$x = \frac{h_1X + h_2Y + h_3}{h_7X + h_8Y + 1},$$

$$y = \frac{h_4X + h_5Y + h_6}{h_7X + h_8Y + 1} \quad (2)$$

其中  $H = (h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, h_8)^T$  为二维DLT的 8 个变换参数,  $X$ 、 $Y$  为平面控制(格网)点空间坐标( $Z$  坐标为零),  $x$ 、 $y$  为相应的像坐标。当像片点数大于 4 个时, 可将式(2)进行适当变换, 通过解超定方程  $AH = 0$  求得二维DLT参数。

摄影测量中最常用的共线方程为<sup>[6]</sup>:

$$x - x_0 = f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)},$$

$$y - y_0 = f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \quad (3)$$

将共线方程进行适当变换即可得到类似于二维DLT的表达形式, 因而每一项都可由二维DLT参数表示。根据  $a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3 = 0$  即可得出

$$f = \frac{\sqrt{-(h_1 - h_7x_0) \cdot (h_2 - h_8y_0) - (h_4 - h_7y_0) \cdot (h_5 - h_8y_0)}}{h_7h_8} \quad (4)$$

如果已知主点坐标, 利用上式即可求解主距的值。根据  $a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1$  和  $b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 = 1$  可得:

$$F_h = (h_1h_8 - h_2h_7)(h_1h_7 - h_7^2x_0 + h_2h_8 - h_8^2x_0) + (h_4h_8 - h_5h_7)(h_4h_7 - h_7^2y_0 + h_5h_8 - h_8^2h_0) = 0 \quad (5)$$

式(5)即为像片坐标系下的主纵线方程式, 也可表示为  $(L_x \ L_y)(x_0 \ y_0)^T = L_c$  的形式, 简称为  $LX = c_0$ 。我们知道, 摄像机的主点必定位于主纵线上<sup>[7]</sup>, 也即主点  $(x_0, y_0)$  必然满足方程  $LX = c_0$ 。因此如果有两张以上像片, 就可以利用多条主纵线通过解超定方程  $LX = c$  求得主点  $(x_0, y_0)$  的坐标。

求出主点及主距的初值后, 即可进一步分解外方位元素的初值。在  $Y$  为主轴的转角系统下,  $\tan \kappa = \frac{b_1}{b_2} = \frac{h_2 - h_8x_0}{h_5 - h_8y_0}$ , 而  $b_1$ 、 $b_2$  可由二维DLT与共线方程的对应关系得出, 则  $\kappa$  角可以惟一确定。求解  $\omega$  角时, 根据  $b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 = 1$  可得  $b_3^2$ , 开平方后  $b_3$  的值首先取正号, 将已确定的  $\kappa$  角与通过  $b_3$  求得的  $b_1$ 、 $b_2$  算出的  $\kappa$  相比较, 若  $\kappa' = \kappa$  则说明  $b_3$  应取负号, 然后重新计算  $b_1$ 、 $b_2$  的值,  $\omega$  角可通过  $\sin \omega = -b_3$  计算。另外, 据旋转矩阵的正交性可得:  $\tan \varphi = \frac{a_3}{c_3} = \frac{a_3}{a_1b_2 - a_2b_1} = \left( \frac{a_1}{a_3}b_2 - \frac{a_2}{a_3}b_1 \right)^{-1}$ ,  $b_1$ 、 $b_2$  已在求  $\omega$  角时确定, 而  $a_1/a_3$  和  $a_2/a_3$  可由旋转矩阵的正交性确定<sup>[5]</sup>, 因而  $\varphi$  角也可惟一确定。

求解  $\varphi$ 、 $\omega$ 、 $\kappa$  角时, 并没有计算整个旋转矩阵中的所有 9 个元素, 因而在计算  $X_s$ 、 $Y_s$ 、 $Z_s$  的初值时, 需利用如上计算出的  $\varphi$ 、 $\omega$ 、 $\kappa$  角, 重新计算旋转矩阵的各元素, 通过解如下线性方程组获得:

$$\begin{cases} h_3 = x_0 - f(a_1X_s + b_1Y_s + c_1Z_s)/\lambda, \\ h_6 = y_0 - f(a_2X_s + b_2Y_s + c_2Z_s)/\lambda, \\ \lambda = (a_3X_s + b_3Y_s + c_3Z_s). \end{cases} \quad (6)$$

求得内外方位元素的初值后, 即可利用严密的光束法平差进行标定, 以获得摄像机内方位元素及畸变参数的精确值<sup>[5,6]</sup>。

## 3 钣金件三维重建的数学模型

为了降低系统成本, 本文采用一台 CCD 摄像机作为传感器。水平转盘上放置有一固定格网, 主要用作摄像机标定及提供外方位元素, 并将格网坐标系作为物方坐标系, 待检测工业零件放置于格网上, 在转盘的旋转过程中获取序列图像。

工业零件置于转盘上时, 物方坐标系与零件坐标系之间不可能完全重合, 存在旋转和平移变换。在

以下与直线观测值相关的公式中,  $(X^0, Y^0, Z^0)$  表示零件上某点在零件坐标系下的坐标,  $(X, Y, Z)$  表示该点在物方坐标系下的坐标,  $(\Delta X^0, \Delta Y^0, \Delta Z^0)$  为两坐标系间的平移向量,  $\Phi, w^0, k^0$  为旋转角,  $(X_P, Y_P, Z_P)$  和  $(X_Q, Y_Q, Z_Q)$  均表示经过变换后零件上某点在物方坐标系下的坐标。

如图 3 所示, 对于一条已知空间直线  $PQ$ , 影像上的直线段  $pq$  应与  $PQ$  以及摄影中心  $S$  共面, 但  $p$  与  $P$ ;  $q$  与  $Q$  并不要求是同名点, 这也是直线摄影测量的最大优点<sup>[8]</sup>。本文采用两个端点表达一条直线, 由此直线摄影测量的共面条件可以分解为两组, 每组为 4 个点间的共面方程。

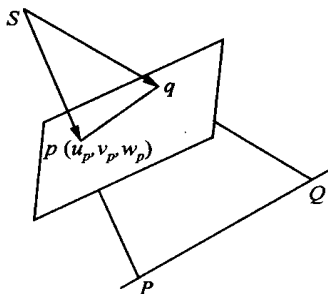


图 3 像面直线与空间直线间的共面条件

$S, p, P, Q$  的共面方程为:

$$\begin{vmatrix} u_p & v_p & w_p \\ X_P - X_S & Y_P - Y_S & Z_P - Z_S \\ X_Q - X_S & Y_Q - Y_S & Z_Q - Z_S \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

对上式求偏导数即可得到误差方程式:

$$\begin{aligned} &A_1 dx_p + A_2 dy_p + A_3 d\Phi + A_4 d\omega + A_5 d\kappa + \\ &A_6 dX_S + A_7 dY_S + A_8 dZ_S + A_9 d\Phi + A_{10} d\omega^0 + \\ &A_{11} d\kappa^0 + A_{12} d\Delta X^0 + A_{13} d\Delta Y^0 + A_{14} d\Delta Z^0 + \\ &A_{15} dX_P^0 + A_{16} dY_P^0 + A_{17} dZ_P^0 + A_{18} dX_Q^0 + \\ &A_{19} dY_Q^0 + A_{20} dZ_Q^0 + F_x = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

除了  $S, p, P, Q$  的共面方程外, 还有  $S, q, P, Q$  的共面方程, 其误差方程式与式 (8) 类似。

当零件较简单或直线特征较少时, 像片的图形条件通常很差, 此时需结合格网点进行整体平差, 以保证平差结果的精度和可靠性。格网点不涉及坐标系变换问题, 其误差方程式为:

$$\begin{aligned} v_x &= B_1 d\Phi + B_2 d\omega + B_3 d\kappa + B_4 dX_S + B_5 dY_S + \\ &B_6 dZ_S + B_7 dX + B_8 dY + B_9 dZ - l_x, \\ v_y &= C_1 d\Phi + C_2 d\omega + C_3 d\kappa + C_4 dX_S + C_5 dY_S + \\ &C_6 dZ_S + C_7 dX + C_8 dY + C_9 dZ - l_y, \end{aligned} \quad (9)$$

限于篇幅, 误差方程式的各项系数从略。若格网点坐标已知, 则式 (9) 中去掉  $(dX, dY, dZ)$  项。

上述算法很容易扩展为完全点线混合平差模型, 若零件上有点观测值, 则只需在式 (9) 中加入线

性化后的旋转平移项即可; 对于格网中的直线观测值, 只需去掉式 (8) 中的旋转平移项即可。

### 4 实验与分析

基于本文提出的算法, 开发了相应的软件系统。首先利用一组实际图像对摄像机标定算法进行了实验。平面标定格网大小约为  $450\text{mm} \times 450\text{mm}$ , 共有 900 个设计格网点, 其空间坐标由人工量测确定, 量测精度为  $0.1\text{mm}$  左右, 因而整体平差时仍将其坐标作为未知数。实际上对于光束法平差而言, 格网点完全不需要如此高的精度, 精确到  $0.5\text{mm}$  已经足够, 对于工业制造等领域来说很容易做到。CCD 摄像机的像幅为  $1300 \times 1030$  像素, 标定格网置于水平转盘上, 每次都采用不同的角度拍摄, 共拍摄了 8 张像片, 每张像片的可见格网点数约为 500 个。

每个可见格网点的像坐标都通过直线匹配后求交点得到, 精度高于  $0.1$  像素。利用严密的光束法平差模型进行标定后的单位权中误差为  $0.08$  像素, 内方位元素的标定值及其精度见表 1。

表 1 实际图像标定结果统计表 (单位: 像素)

统计项目	$f_x$	$f_y$	$x_0$	$y_0$
标定值	4 426.135	4 418.137	652.120	514.730
中误差	0.201	0.228	0.085	0.087
统计项目	$K_1$	$K_2$	$P_1$	$P_2$
标定值	$-7.416 \times 10^{-9}$	$-4.522 \times 10^{-15}$	$6.489 \times 10^{-7}$	$6.684 \times 10^{-7}$
中误差	$1.162 \times 10^{-10}$	$1.828 \times 10^{-16}$	$4.654 \times 10^{-8}$	$1.251 \times 10^{-8}$

由表 1 可见, 该 CCD 摄像机的主点接近像片中心, 且标定精度在  $0.1$  像素以内, 焦距的标定精度在  $0.2$  像素左右, 相对标定精度约为  $1/20\,000$ , 完全可以满足高精度三维量测的要求。

对于所述的钣金件三维重建与视觉检测方法, 利用多个零件的实际图像数据进行了实验。CCD 摄像机距离格网中心为  $600\text{mm}$  并保持固定, 待检测工业零件置于格网上, 在转盘进行旋转时, 按等间隔拍摄了 25 张照片, 从而构成序列图像, 图 4 和图 6 所示分别为两个零件的其中一张像片。所开发的



图 4 第 1 个零件用于三维重建的一张像片

钣金件视觉检测系统的计算过程可全自动运行且速度较快,并将精确三维重建结果用OpenGL进行显示,以进行交互式尺寸制造误差检测。

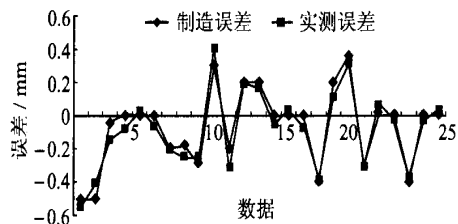


图5 第1个零件制造误差与实测误差的比较

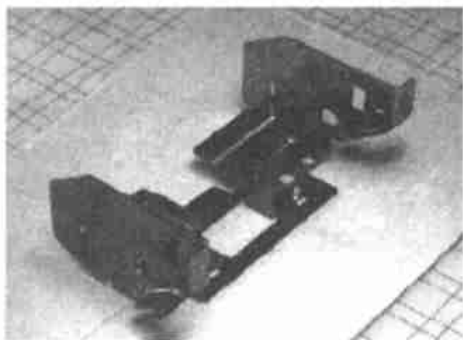


图6 第2个零件用于三维重建的一张像片

实验时通过直线匹配后求交点得到格网点的像坐标,以摄像机参数和CAD设计坐标进行投影后得到的像面直线作为初值,通过最小二乘直线模板匹配得到零件上的直线观测值。需要指出的是,图像匹配前要进行消隐分析,以便尽可能减少误匹配。以格网点量测坐标和零件的设计坐标为初值,进行混合光束法整体平差,即可得出精确的工业零件三维模型。

为了检验平差结果的精度,将人工量测的线、面之间的距离与由平差结果求出的距离进行了比较,结果见图5及图7。其中“制造误差”表示利用游标卡尺量测的距离(视为无误差)与CAD数据的设计距离之差,“实测误差”为根据平差结果计算得到的相应距离与设计距离之差,“实测误差”与“制造误差”之差的中误差分别为0.073mm和0.067mm,其相对精度均高于1/8000(0.073/600=1/8219)。试验中均利用普通日光灯管进行照明,其他多个零件的检测实验也取得了类似的精度,光线强弱对误差检测结果几乎没有影响。目前软件系统中还未考

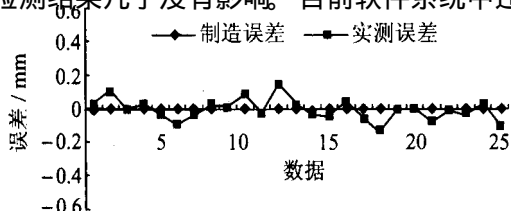


图7 第2个零件制造误差与实测误差的比较

虑CCD摄像机电子畸变对检测结果的影响,这将是作者近期的研究重点。

## 5 结束语

本文提出利用非量测数字摄像机进行工业钣金件高精度三维重建与视觉检测。导出了像片坐标系下的主纵线方程式,提出利用多张像片的主纵线方程求解主点初值,给出了利用二维DLT参数分解摄像机外方位元素初值的实用算法。该算法可移动标定平面或摄像机,且不需要摄像机参数的任何初值。提出利用点信息和直线信息进行混合光束法平差,并对工业零件进行高精度三维重建,以检测其尺寸制造误差或使用尺寸变形。所开发的工业零件视觉检测系统可自动运行,精度水平高于1/8000,为工业领域中广泛存在的钣金件及其他以点和直线段为主要特征的工业零件的自动化三维检测提供了一条有效途径。

## 参考文献 (References)

- [1] Spitz S. Dimensional Inspection Planning for Coordinate Measuring Machines [D]. California: University of Southern California, 1999.
- [2] Kosmopoulos D, Varvarigou T. Automated inspection of gaps on the automobile production line through stereo vision and specular reflection [J]. *Computer in Industry*, 2001, 46: 49-63.
- [3] 张文景, 张文渊, 苏键锋. 计算机视觉检测技术及其在机械零件检测中的应用 [J]. *上海交通大学学报*, 1999, 33(5): 635-638.  
ZHANG Wenjing, ZHANG Wenyuan, SU Jianfeng. Automated visual inspection and its application on inspection of machined parts [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1999, 33(5): 635-638.
- [4] Gruen A. Adaptive least square correlation: A powerful image matching technique [J]. *South African Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1985, 14(3): 175-187.
- [5] 张永军. 基于序列图像的工业钣金件三维重建与视觉检测 [D]. 武汉: 武汉大学, 2002.  
ZHANG Yongjun. Three Dimensional Reconstruction and Visual Inspection of Industrial Sheetmetal Parts with Image Sequences [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002.
- [6] WANG Zhizhuo. Principles of Photogrammetry [M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 1990.
- [7] 朱肇光, 孙护, 崔炳光. 摄影测量学 [M]. 北京: 测绘出版社, 1995.  
ZHU Zhaoguang, SUN Hu, CUI Bingguang. Photogrammetry [M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 1995.
- [8] Debevec P. Modelling and Rendering Architecture from Photographs: A Hybrid Geometry- and Image-Based Approach [R]. CSD-96-893, University of California at Berkeley, 1996.