

文章编号: 1006-2467(2003)09-1447-05

基于序列图像的工业零件尺寸检测技术

张永军^{1,2}, 张祖勋², 张剑清²

(1. 华中科技大学 水电与数字化工程学院, 武汉 430074;

2. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079)

摘要: 提出利用像面上的点、直线信息进行混合光束法平差, 对工业零件进行高精度三维重建并检测其尺寸误差. 介绍了零件坐标系与物方坐标系之间的变换方法, 讨论了直线摄影测量误差方程的基本形式、基于距离的改进形式以及点线混合光束法平差的数学模型, 提出在适当选取直线观测值的权值时, 可以按间接平差模型解算直线空间前方交会. 所开发的工业零件视觉检测系统可全自动运行, 取得了约 0.1 mm 的实验精度, 为工业领域中广泛存在的以直线段为主要特征的工业零件如钣金件的自动化三维检测提供了一条有效途径.

关键词: 直线摄影测量; 点、线混合光束法平差; 三维重建; 尺寸检测

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A

Dimensional Inspection of Industrial Parts with Image Sequence

ZHANG Yong-jun^{1,2}, ZHANG Zu-xun², ZHANG Jian-qing²

(1. College of Hydropower & Information Eng., Huazhong Univ. of Science & Technology,

Wuhan 430074, China; 2. School of Remote Sensing and Information Eng.,

Wuhan Univ., Wuhan 430079)

Abstract: A novel dimensional inspection approach for industrial parts based on hybrid point-line bundle adjustment with point and line observations extracted precisely from digital image sequence was proposed. A coordinate transformation between the part coordinate system and the world one was introduced. The basic error equation of line photogrammetry and its modified form were addressed. The model of hybrid point-line bundle adjustment was also discussed. It is shown that when certain proper weight is selected, the adjustment by observation equations can be used for line photogrammetry. The developed inspection system runs automatically. Precision of 0.1mm is obtained with true image data. It shows a promising potential in the automatic dimensional inspection of the widely existed industrial parts mainly composed of line segments such as sheetmetal parts.

Key words: line photogrammetry; hybrid point-line bundle adjustment; three dimensional reconstruction; dimensional inspection

利用被摄对象的多幅图像获取其三维几何模型是摄影测量和计算机视觉最重要的目的之一. 在针

孔模型下, 基于点的摄影测量实质上是三点(摄影中心、像点、物点)的共线方程, 此时对应的像点与物点

收稿日期: 2002-09-27

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (20010486011)

作者简介: 张永军(1975-), 男, 内蒙古准旗人, 2002 年于武汉大学测绘学院获工学博士学位, 现主要从事数字摄影测量与计算机视觉方面的研究. 电话(Tel.): 027-62158769; E-mail: yjzhang@supresoft.com.cn

必须是同名点,这一理论已经非常完善,也获得了极大的社会和经济效益.自然界的物体,尤其是人造物体(如房屋、工业零件等)大多具有较为规则的形状,一般可看作若干点、线、面的组合构成.在实际图像中,由于噪声和遮盖等的影响,所需要的同名点可能无法精确提取甚至根本不存在,而在大部分情况下,一条直线段往往可以相对容易地提取出来.因此,摄影测量界和计算机视觉界最近提出了许多利用图像直线信息进行摄像机标定和三维重建的方法^[1~3].

Heuvel^[2]提出一种利用直线摄影测量进行多面体重建及纹理映射的方法,通过解译面(Interpretation Plane)及物体上的点、线、面间的约束条件(如共面、垂直、平行、对称等)进行建筑物的三维重建.重建工作需要人机交互进行,且空间直线与像面直线之间的对应关系由人工给定.Debevec^[3]利用初始几何模型及核线几何关系,基于直线观测值和像方、物方的混合模型进行了建筑物的半自动三维重建及纹理映射.该方法的重建过程与 Heuvel 的方法类似,也需要人机交互进行,且耗时较长.

误差检测是工业领域广泛关注的研究方向.目前应用最多的是三维坐标量测机,但其量测速度仍有待提高^[4].电子工业是计算机视觉检测(Automated Visual Inspection)技术应用最为活跃、也最为成功的行业,印刷电路板和集成电路芯片的自动检测已广泛采用视觉检测技术^[5].Kosmopoulos 等^[6]采用两台 CCD 摄像机和两台红外光照明灯,利用立体视觉技术对轿车装配过程中的缝隙进行实时检测方面的研究,在 80 mm×80 mm 的平面范围内取得了约 0.1 mm 的实验精度.

对于工业领域中大量存在的以直线为主要特征的零件如钣金件的尺寸检测问题,目前还没有实用的三维自动检测系统.为此,本文充分利用序列图像重叠度高、同名特征的冗余观测值多等优点,以序列图像中精确提取的点、直线信息作为观测值进行混合光束法平差,结合 CAD 设计数据,对工业零件进行高精度三维重建以检测其尺寸误差.

1 两类观测值的误差方程式

为了降低系统成本,采用一台 CCD 摄像机作为图像传感器.如图 1 所示,水平转盘上放置一格网,主要用作相机检校并在三维重建时提供摄像机外方位元素的初值;待检测工业零件放置于格网上,照明设备为两根普通的日光灯管.所采用的物方坐标系与格网坐标系相同,坐标原点位于格网中心, X 、 Y 轴在格网平面内, Z 轴向上为正.

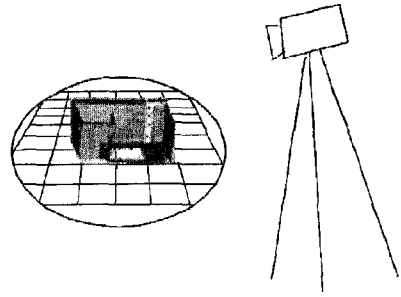


图 1 工业零件检测系统示意图

Fig. 1 Sketch of the inspection system

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,必须进行旋转和平移变换,本文采用摄影测量中以 Y 为主轴时的旋转矩阵,推导公式时采用先旋转后平移的方式^[7].在以下公式中, (X^0, Y^0, Z^0) 和 (X, Y, Z) 分别表示零件上某点在零件坐标和物方坐标系下的坐标; $(\Delta X^0, \Delta Y^0, \Delta Z^0)$ 和 $(\Delta \varphi^0, \Delta \omega^0, \Delta \kappa^0)$ 分别为两坐标系间的平移和旋转参数; (X_P, Y_P, Z_P) 、 (X_Q, Y_Q, Z_Q) 均表示经过旋转平移变换后零件上某点在物方坐标系下的坐标.

如图 2 所示,对于一条已知空间直线 PQ ,影像上直线 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.本文采用两个端点表示一条直线,因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(p 或 q 、 S 、 P 、 Q)间的共面方程.

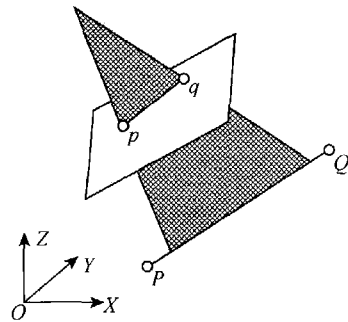


图 2 像面直线与空间直线间的共面条件

Fig. 2 Coplanarity between space and image lines

p 、 S 、 P 、 Q 四点间的共面方程为

$$\begin{vmatrix} u_p & v_p & w_p \\ X_P - X_S & Y_P - Y_S & Z_P - Z_S \\ X_Q - X_S & Y_Q - Y_S & Z_Q - Z_S \end{vmatrix} = 0 \quad (1)$$

式中: (u_p, v_p, w_p) 为像点 p 的模型坐标; (X_S, Y_S, Z_S) 为摄影中心 S 的空间坐标.对式(1)中各项求偏导数后,直线摄影测量误差方程的基本形式可表示为^[7]

$$\begin{aligned}
 &A_1 dx_p + A_2 dy_p + A_3 d\varphi + A_4 d\omega + A_5 d\kappa + A_6 dX_S + \\
 &A_7 dY_S + A_8 dZ_S + A_9 d\varphi^0 + A_{10} d\omega^0 + A_{11} d\kappa^0 + \\
 &A_{12} d\Delta X^0 + A_{13} d\Delta Y^0 + A_{14} d\Delta Z^0 + A_{15} dX_P^0 + \\
 &A_{16} dY_P^0 + A_{17} dZ_P^0 + A_{18} dX_Q^0 + A_{19} dY_Q^0 + \\
 &A_{20} dZ_Q^0 + F_x = 0 \tag{2}
 \end{aligned}$$

对于共面条件式(1),若记

$$(X'_P, Y'_P, Z'_P) = (X_P - X_S, Y_P - Y_S, Z_P - Z_S)$$

$$(X'_Q, Y'_Q, Z'_Q) = (X_Q - X_S, Y_Q - Y_S, Z_Q - Z_S)$$

则

$$F_x = Au_p + Bv_p + Cw_p$$

其中: $A = Y'_P Z'_Q - Y'_Q Z'_P$, $B = Z'_P X'_Q - Z'_Q X'_P$, $C = X'_P Y'_Q - X'_Q Y'_P$. 事实上, F_x 即为共面条件式(1)行列式的值. q, S, P, Q 间的共面方程与式(1)类似, 只需用 (u_q, v_q, w_q) 替换式(1)中的 (u_p, v_p, w_p) 即可, 其线性化后的误差方程与式(2)类似.

当零件较简单或像片中直线特征较少时, 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. 格网点不涉及坐标系变换问题, 其误差方程式为^[7]

$$\left. \begin{aligned}
 v_x &= B_1 d\varphi + B_2 d\omega + B_3 d\kappa + B_4 dX_S + B_5 dY_S + \\
 &B_6 dZ_S + B_7 dX + B_8 dY + B_9 dZ - l_x \\
 v_y &= C_1 d\varphi + C_2 d\omega + C_3 d\kappa + C_4 dX_S + C_5 dY_S + \\
 &C_6 dZ_S + C_7 dX + C_8 dY + C_9 dZ - l_y
 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

限于篇幅, 误差方程式的各项系数从略. 若格网点已知, 则在式(3)中去掉 (dX, dY, dZ) 项, 以减少未知数个数并提高运算速度. 本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, 在式(3)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, 将式(2)中的旋转平移项去掉即可.

式(2)的常数项 F_x 的单位并不是像素, 粗差检测时阈值的确定比较困难. 例如, 达到多大, 该点不位于平面上. 为此, 可利用点(像点 p, q)到平面(摄影中心 S 、物点 P, Q 所决定的平面)的距离作为误差方程式的常数项, 将单位化算为像素.

由摄影中心 S 及两点 P, Q 构成的平面方程为

$$\begin{vmatrix} X & Y & Z & 1 \\ X_S & Y_S & Z_S & 1 \\ X_P & Y_P & Z_P & 1 \\ X_Q & Y_Q & Z_Q & 1 \end{vmatrix} = 0 \tag{4}$$

展开式(4)即可得到平面的一般方程为

$$AX + BY + CZ = 0 \tag{5}$$

式中, A, B, C 的定义同前所述. 若像点 p 与“平面 SPQ ”共面, 则

$$d = \frac{Au_p + Bv_p + Cw_p}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = 0 \tag{6}$$

对式(6)微分, 即可得到基于距离的误差方程式. 由式(6)可知, 其分子即为共面条件的行列式的值. 因此, 基于共面条件的误差方程式(2)的各项除以分母 $\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$, 即可得到基于距离的误差方程式.

2 直线摄影测量的间接平差模型

由误差方程式(2)可知, 直线摄影测量要按附有未知数的条件平差进行解算, 而误差方程式(3)却要求按间接平差进行解算. 为此, 必须寻求统一的平差模型才能将两类观测值进行联合平差. 条件平差的基础方程及其解向量分别为^[8]

$$\left. \begin{aligned} AV + A_x \delta_x + W &= 0 \\ A_x^T K &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

$$\delta_x = - (A_x^T N^{-1} A_x)^{-1} A_x^T N^{-1} W \tag{8}$$

式中: V 为直线起点和终点的改正数向量 $(dx_p, dy_p, dx_q, dy_q, \dots)$; A, A_x 分别为改正数向量 V 和未知数向量 δ_x 的系数矩阵; $N = AP^{-1}A^T$; P 为直线观测值的权矩阵.

间接平差的误差方程、法方程及其解向量分别为^[8]

$$\left. \begin{aligned} V &= B\delta_x + l \\ B^T P' B \delta_x + B^T P' l &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

$$\delta_x = - (B^T P' B)^{-1} B^T P' l \tag{10}$$

若令 $B = A_x, W = l$, 比较式(8)、(10)可知, 两者计算未知数改正数 δ_x 的唯一差别就在于 N^{-1} 和 P' 的不同.

综上所述可知, 误差方程式(2)的每一项除以 $\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$, 即可将常数项的单位划算为像素. 若按条件平差, 则每个误差方程式仅包含两项观测值改正数, 且方程式之间互不相关, 观测值改正数向量的系数矩阵为(以一条像面直线为例)

$$A = \begin{pmatrix} \frac{A_{11}}{D} & \frac{A_{12}}{D} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_{21}}{D} & \frac{A_{22}}{D} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \tag{11}$$

式中: $D = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$; (A_{11}, A_{12}) 和 (A_{21}, A_{22}) 分别为像面直线起点和终点改正数 (dx_p, dy_p) 和 (dx_q, dy_q) 的系数; $p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}$ 为相应的权值. 法方程矩阵 $N = AP^{-1}A^T$ 及其逆 N^{-1} 都只有主对角线元素非零. 由此可见, 若式(10)采用权矩阵 $P' = N^{-1}$, 则

式(2)按条件平差式(7)、(8)完全可以用间接平差式(9)、(10)代替,因而可以联合格网点和零件直线观测值进行间接平差,对工业零件进行三维重建。

3 实验结果与分析

基于上述三维重建与尺寸检测算法,作者开发了相应的工业零件自动检测系统,并利用实际图像数据进行了实验。实验所用的 CCD 摄像机像幅为 $1300 \text{ 像素} \times 1030 \text{ 像素}$,镜头为 16 mm ,已利用转盘上的平面格网进行过标定^[7]。摄像机距离格网中心约 600 mm 并保持固定,主光线斜向下约 45° 并对准待检测钣金件的重心,钣金件的长宽高约为 $150 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ 。在 500 线/r 的转盘进行旋转时,利用图形采集卡按 20 线/像片 的相等间隔抓取了 25 幅像片,构成序列图像,图 3 所示为其中一幅。

格网点的像坐标通过直线特征匹配后求交点得到。零件上的直线观测值则以格网提供的摄像机参数初值和 CAD 设计坐标进行投影后得到的像面直线作为初值,在一定宽度的图像窗口内通过最小二乘直线模板匹配得到,图 3 中的白色线段即为匹配后的图像直线段。利用所提取的点、线观测值进行混合光束法平差,并参考 CAD 设计数据提供的拓扑

关系,即可获得零件重建后的 CAD 模型。

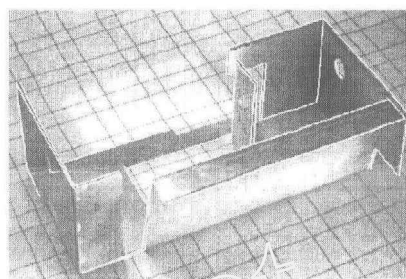


图 3 一幅实验图像

Fig. 3 One of the experimental images

为了检验三维重建后 CAD 模型的精度,本文将人工量测的钣金件上的线、面之间的距离与由重建后的 CAD 模型求出的相应距离进行了比较(见表 1)。其中:“设计值”为利用初始 CAD 模型求得的线与线、线与面以及面与面间的距离;“实测值”为利用游标卡尺量测的相应距离;“计算值”为根据重建后的 CAD 模型计算得到的相应距离;“实测误差”为实测值与设计值之差;“计算误差”为计算值与设计值之差。“偏差”即为计算值与实测值之差,反映了人工量测距离视为无误差时检测系统的精度水平。

表 1 实际量测结果与计算结果比较

Tab. 1 Comparison between the manual measurements and computations

mm

序号	设计值	实测值	计算值	实测误差	计算误差	偏差	序号	设计值	实测值	计算值	实测误差	计算误差	偏差
1	50.20	49.70	49.65	-0.50	-0.55	-0.05	11	49.40	49.20	49.15	-0.20	-0.25	-0.05
2	50.20	49.70	49.73	-0.50	-0.47	0.03	12	153.00	153.20	153.19	0.20	0.19	-0.01
3	20.00	19.96	19.85	-0.04	-0.15	-0.11	13	149.80	150.00	150.00	0.20	0.20	0.00
4	36.00	36.00	35.93	0.00	-0.07	-0.07	14	14.50	14.50	14.55	0.00	0.05	0.05
5	60.00	60.00	60.09	0.00	0.09	0.09	15	9.60	9.60	9.67	0.00	0.07	0.07
6	60.00	60.00	60.03	0.00	0.03	0.03	16	15.00	15.00	14.88	0.00	-0.12	-0.12
7	51.60	51.40	51.36	-0.20	-0.24	-0.04	17	34.40	34.00	34.09	-0.40	-0.31	0.09
8	53.20	53.02	52.95	-0.18	-0.25	-0.07	18	33.20	33.40	33.25	0.20	0.05	-0.15
9	54.80	54.50	54.55	-0.30	-0.25	0.05	19	22.00	22.36	22.35	0.36	0.35	-0.01
10	99.80	100.10	100.23	0.30	0.43	0.13	20	76.40	76.10	76.13	-0.30	-0.27	0.03

由表可知,该零件的最大“实测误差”约为 0.5 mm ,即该零件的 CAD 设计数据或制造精度较差,而三维重建结果则可以准确地反映出大于 0.1 mm 的误差。另外,偏差的中误差为 $76 \mu\text{m}$,而游标卡尺的量测精度一般在 $20 \mu\text{m}$ 以内,因此检测系统的整体精度为 0.1 mm 左右。

4 结 语

本文利用点、直线信息混合进行混合光束法平差,对工业零件进行高精度三维重建以检测其尺寸误差。讨论了基于直线摄影测量误差方程式的基本形式以及基于距离的改化形式,推导了在适当选取权值时直线摄影测量按间接平差的数学模型。所开

发的工业零件尺寸检测系统的计算过程可全自动运行,取得了0.1 mm的实验精度。

实测时采用多少幅像片,图像的拍摄角度以及外界光照对检测结果的影响,检测精度的提高以及检测系统的在线化等将是作者进一步研究的内容。

参考文献:

- [1] Baillard C, Schmid C, Zisserman A, *et al.* Automatic line matching and 3D reconstruction of buildings from multiple views [J]. **IAPRS**, 1999, 32 (3-2): 69-80.
- [2] Heuvel F A. A line-photogrammetry mathematical model for the reconstruction of polyhedral objects [A]. **Proceedings of SPIE** [C]. Belling Ham WA: SPIE, 1999.
- [3] Debevec P E. Modelling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry-and image-based approach [R]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1996.
- [4] Spitz S. Dimensional inspection planning for coordinate measuring machines [D]. California: University of Southern California, Department of Computer Science, 1999.
- [5] 张文景, 张文渊, 苏键锋, 等. 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 Wen-jing, ZHANG Wen-yuan, SU Jian-feng, *et al.* Automated visual inspection and its application on inspection of machined parts [J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 1999, 33(5): 635-638.
- [6] Kosmopoulos D, Varvarigou T. Automated inspection of gaps on the automobile production line through stereo vision and specular reflection [J]. **Computers in Industry**, 2001, 46: 49-63.
- [7] 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.
- [8] 於宗涛, 鲁林成. 测量平差基础[M]. 北京: 测绘出版社, 1983. 100-342.

(上接第 1446 页)

参考文献:

- [1] Brunelli R, Poggio T. Feature recognition: features versus templates [J]. **IEEE Trans on PAMI**, 1993, 15(10): 1042-1052.
- [2] Turk M, Pentland A. Eigenfaces for recognition [J]. **J Cognitive Neuroscience**, 1991, 3(1): 71-86.
- [3] Belhumeur P N, Hespanha J P, Kriegman D J. Eigenfaces vs. fisherfaces: recognition using class specific linear projection [J]. **IEEE Trans on PAMI**, 1997, 19(7): 711-720.
- [4] Cottrell G W, Fleming M. Categorization of faces using unsupervised feature extraction [A]. **Proc Int'l Neural Networks Conf** [C]. Paris: IEEE Neural Networks Council, 1990. 65-70.
- [5] Chellappa R, Wilson C L, Sirohey S. Human and machine recognition of faces: a survey [J]. **Proceedings of the IEEE**, 1995, 83(5): 705-741.
- [6] Liu C, Wechsler H. A gabor feature classifier for face recognition [A]. **The Eighth IEEE International Conference on Computer Vision** [C]. Vancouver, Canada: [s. n.], 2001. 9-12.
- [7] Liu C, Wechsler H. Robust coding schemes for indexing and retrieval from large face database [J]. **IEEE Trans Image Processing**, 2000, 9(1): 132-137.
- [8] 边肇祺, 张学工. 模式识别 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.