

基于广义点摄影测量的圆和圆角矩形三维重建

张永军^{1, 2}

(1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079, E-mail: zhangyj@whu.edu.cn;

2. 辽宁工程技术大学 地理空间信息技术与应用实验室, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了解决目前工业制造中圆和圆角矩形高精度误差检测方面所面临的难题, 采用广义点摄影测量理论进行高精度三维重建与误差检测. 论述了广义点摄影测量的数学模型, 建立二维影像与待测目标参数间的函数关系, 根据切线的斜率确定所需使用的数学关系式, 并基于已知的像片内外方位元素, 采用最小二乘模板匹配和物方直接解方法相结合进行圆和圆角矩形的三维重建和误差检测. 实际图像数据的实验结果表明, 由于采用了大量冗余观测值和相应约束条件按照最小二乘法求取整体最优解, 可以获得 0.03mm 左右的三维重建和误差检测精度.

关键词: 广义点摄影测量; 工业检测; 圆角矩形; 模板匹配; 三维重建

中图分类号: TP391; P23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0367-6234(2008)01-0136-05

Reconstruction of circles and round rectangles by generalized point photogrammetry

ZHANG Yong-Jun^{1, 2}

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China, E-mail: zhangyj@whu.edu.cn; 2. Geomatics and Applications Laboratory, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To resolve the faced problems of automatic inspection of circles and round rectangles in industrial applications, a new three-dimensional reconstruction technique is proposed based on generalized point photogrammetry and least squares template matching. A model of generalized point photogrammetry is addressed. Since coordinates of generalized image point are result of image template matching and also functions of circle and round rectangle, the parameters of circle and round rectangle are related with image coordinates directly. Thus parameters of circle and round rectangle can be obtained from several images by least squares template matching and immediate object space solution with known camera parameters. The proposed approach was tested with real image data. A large number of redundant observations and constraints were used during the least squares adjustment process, so 0.03 mm precision of three-dimensional reconstruction and visual inspection was obtained, which satisfies the industrial applications.

Key words: generalized point photogrammetry; industrial inspection; round rectangle; template matching; three-dimensional reconstruction

随着计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) 在现代制造业中的广泛应用, 如何

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^[1]. 目前工业检测领域应用最多的仍然是三维坐标量测机, 其理论与技术都已非常成熟^[2], 可以基于 CAD 数据自动进行路径规划及检测, 但硬件成本和检测速度制约了其广泛应用. 对于大量钣金类工业部件来说, 对其进行快速产品合格性检验除了点、线、面之间的距离、角度^[3]等检测内容外, 几乎都会涉及到圆 (圆

收稿日期: 2005-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40671157); 国家高技术
研究发展计划资助项目 (2006AA12Z136); 辽宁工程
技术大学地理空间信息技术与应用实验室开放基金
资助项目 (2005013).

作者简介: 张永军 (1975—), 男, 教授, 博士生导师.

弧)、相连的圆弧和直线段(如圆角矩形)等复杂形状的快速检测,但这些复杂形状的检测问题一直没有得到很好地解决^[4,5]。张永军^[6]等人曾经提出利用一维模板匹配技术进行基于物方直接解的圆、相连的圆弧和直线段等的三维重建。该算法具有较好的重建结果,但其缺陷在于要求空间点和像点是对应点,而圆(圆弧)和直线上并不存在严格的对应点,因而数学模型不严密。

数学意义上,直线、圆、任意曲线都可以看作是由一系列连续的“点”组成。将物理意义上的点扩展为数学意义上的点,仍以共线方程为基础,则可形成“广义点摄影测量”的数学模型。本文在系统论述广义点摄影测量原理的基础上,建立了影像与物体参数间的函数关系,利用最小二乘模板匹配^[6,7]方法直接获取圆和圆角矩形的物方参数,实际图像数据的实验取得了很好的结果。

1 广义点摄影测量的数学模型

基于“共线方程”的点摄影测量^[8,9]所涉及的点是物理点,如圆点、交点、角点等。基于“共面方程”的直线摄影测量(Line Photogrammetry)^[3,10-12]所涉及的则是物理直线,如建筑物的主框架线等。工业零件中大量的圆、圆弧以及曲线,飞机实体的外轮廓等,在制造和使用过程中都需要进行误差检测,但这些复杂形状既不是由物理点构成的,也不是由物理直线构成的,无法直接利用共线和共面条件进行三维重建与误差检测。更为重要的是,空间

特征和影像特征之间根本不存在严格对应关系。

数学上,所有的直线和曲线都可以看作是由一系列的离散点组成的,如果将物理意义上的点(圆点、交点、角点等)扩展到数学意义上的点(系列离散点,非严格对应点等),仍以传统的共线方程为基础,则可建立“广义点摄影测量(Generalized Point Photogrammetry, GPP)的数学模型^[8]。广义点摄影测量模型是传统的点摄影测量模型的扩充,但二者又存在着根本的差别,它不再要求空间点和像点间的严格对应关系,并且可以适用于任何形状物体的三维重建。对于物理点,广义点摄影测量模型与传统的点摄影测量模型(共线方程)相同,每个像点观测值可以列两个误差方程。对于直线段、圆、自由曲线等上的点,空间点与像点间不存在严格对应关系,每个像点只能根据切向量的方向列一个误差方程。

如图 1 所示, x 表示空间直线段、圆、自由曲线等上的点在像片上的投影, \cdot 表示影像上对应特征在 x (或 y) 方向上与投影点距离最近的像点,其数学模型就是平差后空间点的投影到像点的距离 dx (或 dy) 等于最小。当影像直线的方向(绝对值)大于等于 45° 时,采用 x 方向的误差方程;而当直线的方向小于 45° 时,采用 y 方向的误差方程。对于圆及其他自由曲线上的点,则根据每个点的切向量(例如图 2 中的 θ , 取绝对值)是否大于 45° 也只有一个误差方程。总体而言,广义点摄影测量的数学模型可以用下式表示:

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}, & \text{当 } | \theta | \geq 45^\circ \text{ 时;} \\ y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}, & \text{当 } | \theta | < 45^\circ \text{ 时.} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (X, Y, Z) 表示空间点坐标, (X_s, Y_s, Z_s) 表示相机所在的位置, $(a_i, b_i, c_i, i = 1, 2, 3)$ 表示旋转矩阵, f 为相机的焦距, (x, y) 为像点坐标。

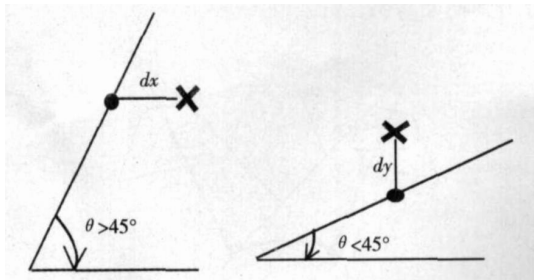


图 1 直线的广义点摄影测量模型

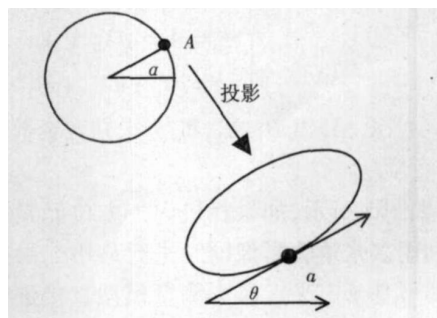


图 2 圆的广义点摄影测量模型

在数字摄影测量中,一般都采用最小二乘模板匹配^[7]方式获取影像特征的精确坐标。传统的直线模板匹配属于二维匹配,待匹配的影像窗口往往远大于 10 个像素。如图 3 所示,水平的实线表

示的长方形为标准模板,虚线表示的长方形为实际影像块,它们之间存在较小的角度偏差,因而模板匹配时需要引入 dy_1 和 dy_2 两个未知数. 一条直线段可以看作由一系列共线的“点”构成,圆及自由曲线也可以看作由大量数学上的“点”构成. 如图 4 所示,对于每个“点”(通常可取 1 ~ 3 个像素)而言,匹配时即可忽略影像块与模板间的角度偏差,此时匹配未知数只有 dr ,即影像块与模板间的垂直滑动,这就是一维点模板匹配的基本思想. 实际图像匹配时,通常在垂直于点的切向量的方向上进行影像重采样,并与标准模板进行一维匹配,利用最小二乘法获取精确匹配结果.

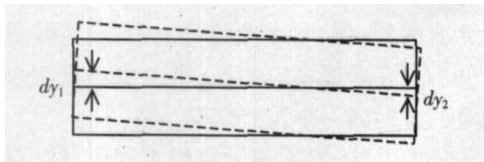


图 3 二维直线模板匹配

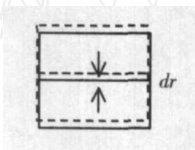


图 4 一维点模板匹配

$$\begin{cases} x = - \frac{a_1 X_0 + b_1 Y_0 + (a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta) R + [c_1 (Z - Z_s) - a_1 X_s - b_1 Y_s]}{a_3 X_0 + b_3 Y_0 + (a_3 \cos \theta + b_3 \sin \theta) R + [c_3 (Z - Z_s) - a_3 X_s - b_3 Y_s]} & \text{当 } \theta \geq 45^\circ \text{ 时;} \\ y = - \frac{a_2 X_0 + b_2 Y_0 + (a_2 \cos \theta + b_2 \sin \theta) R + [c_2 (Z - Z_s) - a_2 X_s - b_2 Y_s]}{a_3 X_0 + b_3 Y_0 + (a_3 \cos \theta + b_3 \sin \theta) R + [c_3 (Z - Z_s) - a_3 X_s - b_3 Y_s]} & \text{当 } \theta < 45^\circ \text{ 时.} \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_0, Y_0 和 R 分别为圆心坐标和半径, θ 为整圆或圆弧离散化时的角度值, (X_s, Y_s, Z_s) 表示相机位置, Z 为圆所在平面的高度, $(a_i, b_i, c_i, i = 1, 2, 3)$ 表示旋转矩阵, f 为相机的焦距, (x, y) 为像点坐标.

由式 (3) 可知, 像点坐标是空间圆参数的函数

$$\begin{cases} v_x = A_1 \cdot dX_0 + A_2 \cdot dY_0 + A_3 \cdot dR - dx, & \text{当 } \theta \geq 45^\circ \text{ 时;} \\ v_y = B_1 \cdot dX_0 + B_2 \cdot dY_0 + B_3 \cdot dR - dy & \text{当 } \theta < 45^\circ \text{ 时.} \end{cases} \quad (4)$$

式中: A_1, A_2, A_3 及 B_1, B_2, B_3 为未知数系数, dx, dy 为常数项.

如图 5 所示, 如果相机内外方位元素视为已知, 利用多张重叠影像同时进行最小二乘模板匹配, 即可基于广义点摄影测量模型直接进行空间圆的三维重建. 在进行匹配与重建时, 参与平差的空间点和像点并不是严格对应点, 只有当重建完成后, 空间点和像点才一一对应起来. 由于采用最小二乘法迭代解算, 需要圆的初始参数, 对于有 CAD 数据的工业部件来说, 其参数可直接从 CAD

2 圆的三维重建

工业零件如钣金件等的整体线框模型可以用点、线混合摄影测量方法进行三维重建^[3]. 零件上一般会存在一些复杂形状, 如圆、圆台、相连的圆弧和直线段 (如圆角矩形) 等, 这些部分往往是套装的关键部位, 因而其误差检测同样非常重要. 本文将以圆及圆角矩形为例说明基于广义点摄影测量和物方直接解的重建方法. 像片的方位参数及复杂形状所在的平面均可通过其它方式获得, 视为已知. 在进行重建前, 将平面及方位参数进行旋转, 使圆所在平面成为高度为 Z (Z 可以等于零) 的水平面, 从而简化模型并保证结果的稳定性, 此时水平面内的圆及圆弧可表示为:

$$\begin{cases} X = X_0 + R \cdot \cos \theta \\ Y = Y_0 + R \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: X_0, Y_0 和 R 分别为圆心坐标和半径, θ 从 0° 到 360° (圆) 或从起始角到终止角 (圆弧). 如图 2 所示, 对于由不同的 θ 角确定的点 A , 根据投影后点 a 处圆的切向量 来确定误差方程, 切向量的方向 (绝对值) 大于等于 45° 时, 采用 x 方向的误差方程; 而切向量的方向 (绝对值) 小于 45° 时, 则采用 y 方向的误差方程. 空间点 A 和像点 a 并不要求是严格的对应点, 其构像方程式为:

数, 空间圆上任一点的误差都会引起相应像点的误差. 而模板匹配的结果也是像点坐标, 因而将模板匹配与空间圆的参数通过广义点摄影测量模型关联起来, 在模板匹配的同时求取物方参数 X_0, Y_0 和 R . 根据不同的 θ 角将圆分成一系列“点”, 根据下式做一维匹配即可直接获得圆的物方参数:

数据中获取; 无设计数据时可由人机交互半自动给出其初始参数.

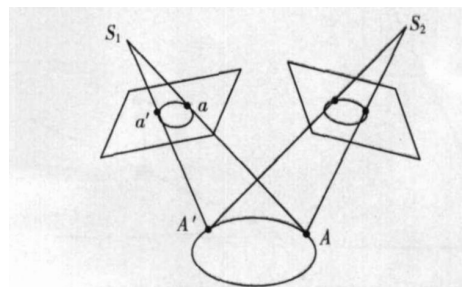


图 5 空间圆三维重建的基本原理

3 圆角矩形的三维重建

零件上的圆弧一般不会独立存在, 大多与直线段相连, 如图 6 所示, 两段圆弧 C_1 , C_2 分别与直线段 L_1 , L_2 及 L_3 相连. 而圆角矩形 (图 7) 则可以看作由四条直线段 L_1 , L_2 , L_3 , L_4 及四个圆弧 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 顺序相连而构成.

重建圆角矩形 (包括相连的圆弧和直线段) 时, 同样假设所在平面的参数和方位参数均为已知. 为了便于计算, 用一组共线的“点” (一般取长度为 1~3 像素的短线段) 表示一条直线段:

$$\begin{cases} X = X_0 + i \cdot L \cdot \cos \alpha_i \\ Y = Y_0 + i \cdot L \cdot \sin \alpha_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: X_0, Y_0 为线段的起点, α_i 为线段的方向角, L 为点 (短线段) 的长度, 一般取 3~5 像素. 依广义点摄影测量原理, 根据直线的方向, 选择 x 或 y 方向的误差方程.

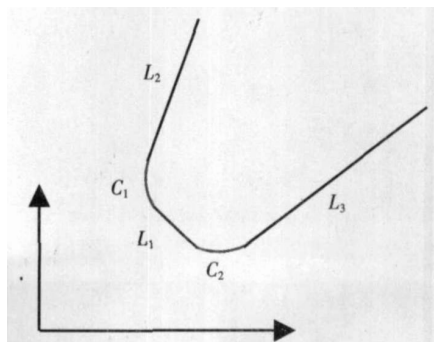


图 6 相连的圆弧和直线段

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(X_0 + i \cdot L \cdot \cos \alpha_i - X_S) + b_1(Y_0 + i \cdot L \cdot \sin \alpha_i - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X_0 + i \cdot L \cdot \cos \alpha_i - X_S) + b_3(Y_0 + i \cdot L \cdot \sin \alpha_i - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, & \text{当 } \alpha_i / \alpha_j > 45^\circ \text{ 时;} \\ y = -f \frac{a_2(X_0 + i \cdot L \cdot \cos \alpha_i - X_S) + b_2(Y_0 + i \cdot L \cdot \sin \alpha_i - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X_0 + i \cdot L \cdot \cos \alpha_i - X_S) + b_3(Y_0 + i \cdot L \cdot \sin \alpha_i - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, & \text{当 } \alpha_i / \alpha_j < 45^\circ \text{ 时.} \end{cases} \quad (6)$$

式中: (X_S, Y_S, Z_S) 表示相机所在的位置, Z 为直线段所在平面的高度, $(a_i, b_i, c_i, i = 1, 2, 3)$ 表示

旋转矩阵, f 为相机的焦距, (x, y) 为像点坐标. 同圆重建时类似, 直线段重建的误差方程式为:

$$\begin{cases} v_x = M_1 \cdot dX_S + M_2 \cdot dY_S + M_3 \cdot dZ_S - dx & \text{当 } \alpha_i / \alpha_j > 45^\circ \text{ 时,} \\ v_y = N_1 \cdot dX_S + N_2 \cdot dY_S + N_3 \cdot dZ_S - dy & \text{当 } \alpha_i / \alpha_j < 45^\circ \text{ 时} \end{cases} \quad (7)$$

式中: M_1, M_2, M_3 及 N_1, N_2, N_3 为未知数系数, dx, dy 为常数项. 联立直线段重建的误差方程式 (7) 及圆和圆弧重建的误差方程式 (4) 并进行整体平差, 即可进行圆角矩形的三维重建. 为了保证平差结果的稳定性, 通常需要增加一些约束条件, 例如图 7 中四个圆弧的圆心应该分别位于与之相连的两条直线段的平分线上; 相邻的两条直线段应该与圆弧相切等, 则最终的平差模型是附有条件的间接平差模型, 可以按照最小二乘理论获取整体最优解. 其他一些复杂形状的重建也可采用类似的方式进行.

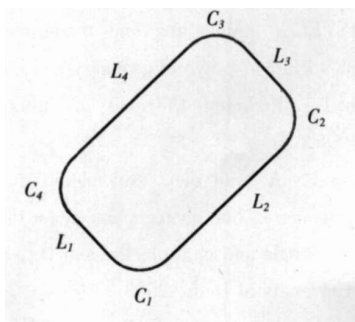


图 7 圆角矩形的构成

4 实验与分析

本文利用具有 CAD 设计数据的多个钣金件中存在的圆孔和圆角矩形进行了大量实验, 均取得了很好的结果, 现举其中一个实验进行说明. 实验中采用 5 张像片, 各像片的内外方位元素均由文献^[3]中所述的方法获取, 本文作为已知值. 每个圆有 3 个未知参数: 圆心坐标 X_0, Y_0 和圆的半径 R . 各参数的初值均从 CAD 设计数据中获取, 图 8 左侧为其中一个圆的设计参数在两张像片上的投影椭圆, 圆孔上存在很多锈斑. 原理上只要有三个点即可确定一个圆, 但其精度无法保证, 因而实际工作中一般都需要较多的冗余观测值. 实验中将圆根据不同的角度离散为 100 个点, 则冗余观测数为 $(100 - 3) \cdot 5 = 485$. 利用上述数学模型进行三维重建后得到的直径为 9.965 mm, 相应的投影椭圆见图 8 右侧. 该圆的设计直径为 10.000 mm, 实测直径也为 10.000 mm, 可见其重建误差为 0.03 mm 左右. 尽管圆孔上存在很多锈斑, 由于采用了大量冗余观测值求取最小二乘整体最优解, 仍然能够得到非常精确的三维重建结果.

零件上存在的圆角矩形也采用相同的策略进行了重建实验,图 9 左侧为一个圆角矩形的初始参数在两张像片上的投影.进行三维重建时仍然

采用了大量冗余观测值,以获取其整体最优解.如图 9 右侧所示,经过重建后的投影边缘与实际边缘完全吻合,其重建精度也为 0.03 mm 左右.

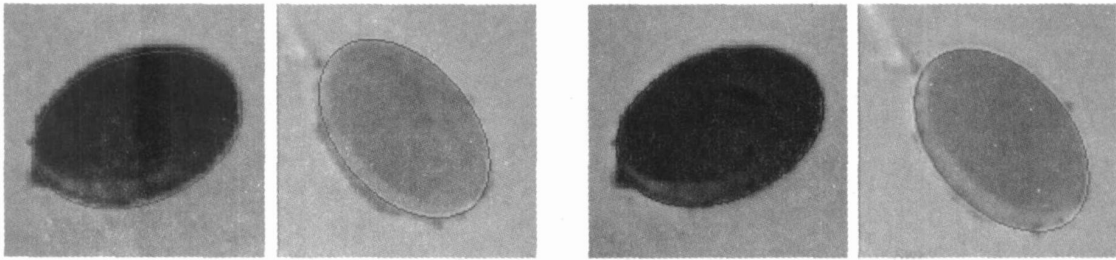


图 8 圆初始参数及重建参数的投影

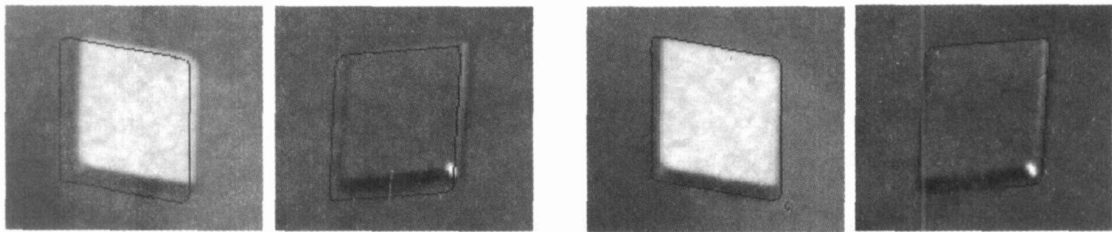


图 9 圆角矩形初始参数及重建参数的投影

5 结 论

1)深入讨论了广义点摄影测量的数学模型,阐述了通过建立影像与物方参数间的函数关系并结合最小二乘高精度影像匹配技术,直接从多张影像获取空间圆和圆角矩形物方参数的具体方法.利用实际图像数据进行的多次重建实验取得了 0.03 mm 左右的精度,说明所提出的三维重建算法切实可行且具有很好的重建精度.

2)对于有 CAD 设计数据的工业零件,可以从 CAD 数据中获取圆和圆角矩形的初值,并通过自动三维重建替代人工进行零件的制造误差检测;因而三维重建算法为工业领域中管类、板类部件中圆和圆角矩形的高精度自动三维重建与误差检测提供了一条可行途径.

参考文献:

[1] 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

[2] SPIITZ S. Dimensional inspection planning for coordinate measuring machines [D]. California: University of Southern California, 1999.

[3] 张永军, 张祖勋, 张剑清. 基于序列图像的工业钣金件三维重建与视觉检测 [J]. 清华大学学报, 2004, 44(4): 534 - 537.

[4] 陈燕新, 戚飞虎. 基于随机 Hough 变换的快速圆检测方法 [J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(10): 17 - 20.

[5] 彭扬, 胡福乔, 李介谷. 椭圆特征的快速提取 [J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(9): 61 - 63.

[6] ZHANG Y, ZHANG Z, ZHANG J. Photogrammetric reconstruction of arcs and lines based on one dimensional point template matching [C]//Proceedings of the 6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques. ETH Zurich: Gruen and Kahmen, 2003: 315 - 321.

[7] 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.

[8] 张祖勋, 张剑清. 广义点摄影测量及其应用 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2005, 30(1): 1 - 5.

[9] WANG Z. Principles of photogrammetry[M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 1990.

[10] GUELCH E. Line photogrammetry: a tool for precise localization of 3D points and lines in automated object reconstruction [C]//Proceedings of SPIE Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision II, Florida: SPIE, 1995: 2 - 12.

[11] DEBEVEC P. Modelling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry-and image-based approach[R]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1996.

[12] Heuvel F. A. van den. Automation in architectural photogrammetry, line photogrammetry for the reconstruction from single and multiple images[D]. Delft: Technical University of Delft, 2003.

(编辑 赵丽莹)