

基于非量测 CCD 摄像机的钣金件误差检测

张永军¹, 刘经南², 张祖勋¹, 张剑清¹

(1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学, 湖北 武汉 430072)

Imprecision Inspection of Sheetmetal Parts with Non-metric CCD Camera

ZHANG Yong-jun¹, LIU Jing-nan², ZHANG Zu-xun¹, ZHANG Jian-qing¹

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A new approach of three-dimensional reconstruction and inspection of industrial sheetmetal parts with non-metric CCD camera is proposed. Principle of line segment least squares template matching to extract precise points and lines from imagery is discussed. Wire-frame model of the sheetmetal part can be accurately reconstructed with hybrid point-line photogrammetry. One-dimensional template matching and direct object space solution is used to reconstruct complex shapes such as circles and connected arcs and lines. Producing imprecision can be inspected automatically or interactively by the results of reconstruction. The proposed inspection technique has the advantages of low cost of hardware and can run automatically and fastly. Inspection results of several parts are very satisfying.

Key words: image sequence; non-metric camera; 3D reconstruction; imprecision inspection; least squares template matching; hybrid point-line photogrammetry

摘 要: 提出利用非量测 CCD 摄像机进行钣金件高精度 3 维重建与制造误差检测。介绍直线段最小二乘模板匹配的基本原理; 提出利用像面上的点、直线信息进行混合光束法平差, 对工业钣金件的线框模型进行高精度 3 维重建; 采用 1 维模板匹配技术直接获取复杂形状的物方参数; 重建结果可以用于检测零件的制造误差。所开发的误差检测系统具有硬件成本低、自动化程度高等特点, 实际图像数据的多次实验均取得很好的检测结果。

关键词: 序列图像; 非量测摄像机; 3 维重建; 误差检测; 最小二乘模板匹配; 点、线混合摄影测量

1 前 言

随着计算机辅助设计 (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。目前工业检测领域应用最多的仍然是 3 维坐标量测机, 其理论与技术也都已非常成熟^[1], 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。对于大量的板类工业部件来说, 对其进行产品合格性检测除了点、线、面之间的距离、角度等检测内容外, 几乎都会涉及到对圆 (圆弧)、相连的圆弧和直线段等复杂形状的检测问题。一个空间圆在像片上的投影是一个长半轴存在旋转的椭圆, 而经典的边缘检测

收稿日期: 2003-07-04; 修回日期: 2003-11-06

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, 内蒙古准格尔旗人, 讲师, 博士, 主要从事数字摄影测量与计算机视觉研究。

算子大多是利用边缘的梯度极值特性提取边缘点,抗噪声能力比较低。也有一些学者提出多步检测方法^[2],但参数空间中累加器的叠加及寻找局部最大值时的阈值选取都比较困难。视觉检测技术由于其非接触和快速等特点而受到了广泛重视,印刷电路板(PCB)和集成电路芯片的 2 维自动检测已广泛采用该技术^[3]。

尽管 2 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 3 维视觉检测系统。因而实际操作中往往依靠人工进行,费时又费力,且完全依赖于作业员的技能;圆弧等的检测则更加困难。因而成本低、速度快的 3 维检测手段是工业制造领域亟待解决的难题之一。

笔者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 3 维重建与误差检测的软件系统。文中在介绍检测系统的整体概况及最小二乘模板匹配后,详细阐述了点、线混合摄影测量模型及复杂形状基于物方直接解的直接重建技术,并利用 CAD 设计数据和实际图像进行了大量实验,取得了很好的结果,并得出相应的结论。

2 系统概述

为了降低系统成本,本文采用一台非量测 CCD 摄像机作为传感器。如图 1 所示,水平转盘上放置一张固定格网,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。待检测零件置于格网上,在转盘的旋转过程中利用 CCD 摄像机获取序列图像。

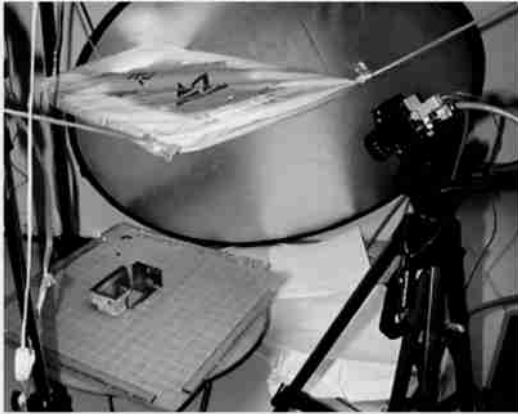


图 1 工业零件误差检测系统硬件构成图

Fig. 1 Hardware of the visual inspection system

由于采用的是非量测 CCD 摄像机,因而进行钣金件的制造误差检测前必须进行标定。系统中采用的是基于 2 维直接线性变换(DLT)和光束法

平差的标定模型^[4],其主要思想是通过 2 维 DLT 和共线方程间的对应关系导出摄像机参数的初值,再利用光束法平差进行精确标定。

进行工业零件的误差检测时,整体工作流程为首先获取序列图像;利用最小二乘模板匹配进行特征提取后通过混合光束法平差获取零件的整体线框模型;而后采用 1 维模板匹配技术直接获取圆及其他复杂形状的物方参数;并将重建后的精确 CAD 模型用于误差检测。

3 最小二乘模板匹配

最小二乘影像匹配方法是由 Ackermann 教授提出的目前精度最高的匹配方法之一。假设以“灰度差平方和最小”作为判据,则影像匹配可以写为 $v = \min$ 。如果只考虑影像灰度的偶然误差,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,他们之间不可能完全相等,因而影像匹配的误差方程式为

$$v(x, y) = \frac{\partial g}{\partial x} dx + \frac{\partial g}{\partial y} dy - g \quad (1)$$

式中, $g = g_m(x, y) - g(x, y)$, $\partial g / \partial x$, $\partial g / \partial y$ 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,详见文献[5]。图 2 所示为放大 4 倍的屋脊型模板匹配结果,可以看出匹配结果与实际边缘完全吻合。

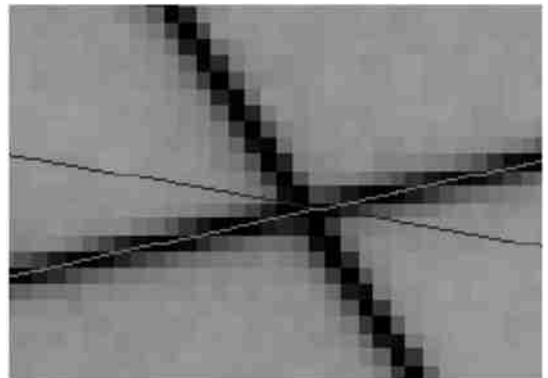


图 2 屋脊型边缘的匹配结果

Fig. 2 Image matching results of ridging edge

一条直线段通常可以用一组共线的短线段(例如 2~5 个像素)来表示,则模板匹配时的旋转角可以忽略,模板只需在影像块的断面上进行 1 维滑动,从而形成 1 维匹配,即式(1)中去掉 dx 项,只保留 dy 项。该方法在重建圆及相连的圆弧与直线段等复杂形状时非常有效。

4 点、线混合摄影测量模型

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, (X^0, Y^0, Z^0) 为两坐标系间的平移向量, $\alpha^0, \beta^0, \gamma^0$ 为旋转角,而 (X_P, Y_P, Z_P) 和 (X_Q, Y_Q, Z_Q) 均表示经过坐标变换后的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^[6,7]。本文采用两个端点表达一条直线,由此基于直线摄影测量的共面条件可以分解为 2 组,每组为 4 个点间的共面方程。

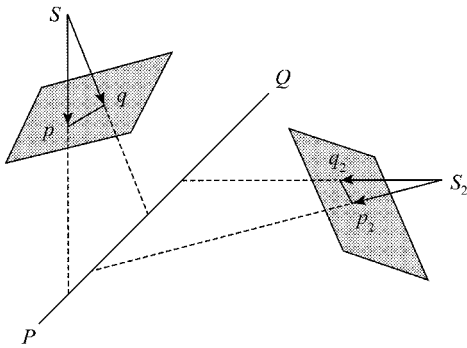


图 3 像面直线与空间直线间的共面条件
Fig.3 Coplanarity between space and image lines

4 点 p, S, P, Q 间的共面方程为

$$\begin{vmatrix} u_p & v_p & w_p \\ X_P - X_S & Y_P - Y_S & Z_P - Z_S \\ X_Q - X_S & Y_Q - Y_S & Z_Q - Z_S \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

对式(2)求偏导数即可得到误差方程式

$$\begin{aligned} &A_1 dx_p + A_2 dy_p + A_3 d\alpha^0 + A_4 d\beta^0 + A_5 d\gamma^0 + A_6 dX_S + \\ &A_7 dY_S + A_8 dZ_S + A_9 d\alpha^0 + A_{10} d\beta^0 + A_{11} d\gamma^0 + \\ &A_{12} dX^0 + A_{13} dY^0 + A_{14} dZ^0 + A_{15} dX_P^0 + \\ &A_{16} dY_P^0 + A_{17} dZ_P^0 + A_{18} dX_Q^0 + A_{19} dY_Q^0 + \end{aligned}$$

$$A_{20} dZ_Q^0 + F_x = 0 \quad (3)$$

除了 4 点 p, S, P, Q 间的共面方程外,还有 4 点 q, S, P, Q 间的共面方程,其误差方程式与式(3)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^[5,8]

$$\left. \begin{aligned} v_x &= B_1 d\alpha + B_2 d\beta + B_3 d\gamma + B_4 dX_S + B_5 dY_S + \\ &B_6 dZ_S + B_7 dX + B_8 dY + B_8 dZ - l_x \\ v_y &= C_1 d\alpha + C_2 d\beta + C_3 d\gamma + C_4 dX_S + C_5 dY_S + \\ &C_6 dZ_S + C_7 dX + C_8 dY + C_9 dZ - l_y \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

误差方程式的各项系数从略。若格网点坐标已知,式(4)中去掉 (dX, dY, dZ) 项即可。式(3)和式(4)即构成了点、线混合摄影测量模型,可以由于零件线框模型的精确重建。

5 复杂形状的直接重建

钣金件等工业零件除了整体的线框模型外,一般还存在一些复杂形状,如圆、圆台、相连的圆弧和直线段等。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。本文将以圆及相连的圆弧和直线段为例说明基于物方直接解的重建方法。像片的摄像机参数及复杂形状所在的平面均可以通过上节的混合摄影测量结果得到,本节视为已知,从而简化模型并保证结果的稳定性。

对于圆和圆弧,重建时首先利用所在平面的参数旋转摄像机参数,使圆所在平面变为水平,因而圆及圆弧可表示为

$$\left. \begin{aligned} X &= X_0 + R \cos \theta \\ Y &= Y_0 + R \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中, X_0, Y_0 和 R 分别为圆心坐标和半径,从 0 到 360°(圆)或从起始角到终止角(圆弧)。空间圆上任一点的误差都会引起相应像点的误差,而模板匹配的结果是像点坐标,因而可以直接将模板匹配与空间圆的参数通过共线方程关联起来,获取物方直接解^[9],其总的误差方程式为

$$\left. \begin{aligned} v_x &= A_1 dX_0 + A_2 dY_0 + A_3 dR - dx \\ v_y &= B_1 dX_0 + B_2 dY_0 + B_3 dR - dy \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中, 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。重建时根据不同的角将圆

(圆弧) 分成小段做 1 维匹配即可获得其物方参数, 将获得的物方参数再根据圆所在平面的参数进行反旋转即可得到原始零件坐标系下的物方解。

零件上的圆弧一般不会独立存在, 大多与直线段相连, 如图 4 所示, 2 段圆弧 C_1 , C_2 分别与直线段 L_1 , L_2 及 L_3 相连。

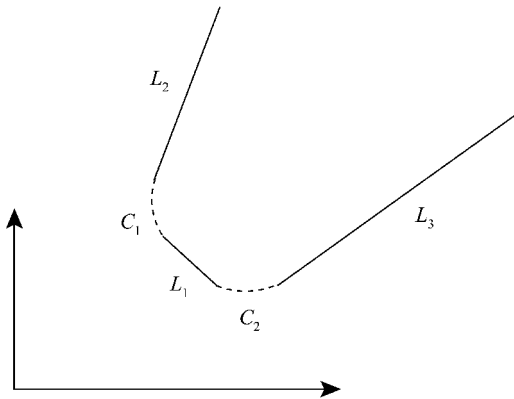


图 4 相连的圆弧和直线段
Fig. 4 Connected arcs and lines

对于相连圆弧和直线段重建时, 同样需要利用所在平面的参数旋转摄像机参数, 使所在平面变为水平。为了便于计算, 用一组共线的短线段来表示一条直线段

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s + i L \cos \\ Y &= Y_s + i L \sin \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中, X_s , Y_s 为线段的起点, i 为线段的方向角, L 为短线段的长度, 为了便于做 1 维匹配, 一般取 2~5 个像素。同圆重建时类似, 直线段重建的误差方程式为

$$\left. \begin{aligned} v_x &= M_1 d X_s + M_2 d Y_s + M_3 d - d x \\ v_y &= N_1 d X_s + N_2 d Y_s + N_3 d - d y \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中, M_1, M_2, M_3 及 N_1, N_2, N_3 为未知数系数, $d x, d y$ 为常数项。联立式 (8) 及圆重建的误差方程式 (7) 即可重建相连的圆弧和直线段。

为了保证平差结果的稳定性, 通常需要增加一些约束条件, 如圆弧 C_1 的圆心应该位于直线段 L_1 和 L_2 的平分线上; 圆弧 C_2 的圆心应该位于直线段 L_1 和 L_3 的平分线上; 3 条直线段应该与 2 个圆弧相切等, 则最终的平差模型是附有条件的间接平差。其他一些形状的重建也可采用类似的方式进行。

6 实验与分析

基于所述的钣金件 3 维重建与误差检测方法, 开发了相应的软件系统, 并利用多个零件的实际图像数据进行了实验。CCD 摄像机的像幅为 1 300 像素 \times 1 030 像素, 距离格网中心为 600 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 张像片, 从而构成序列图像, 图 5 所示为一个零件的其中一张像片。所开发的钣金件检测系统的计算过程可全自动运行且速度较快, 并将精确 3 维重建结果用 OpenGL 进行显示, 以进行交互式制造误差检测。

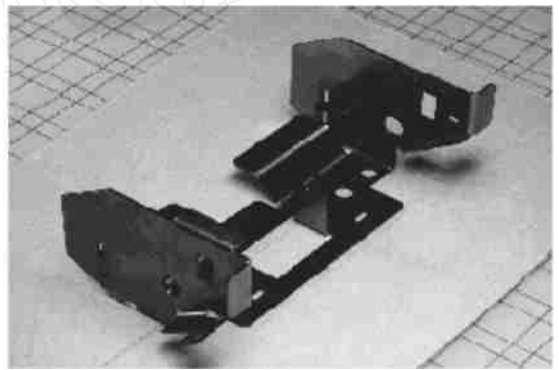


图 5 用于 3 维重建的其中一张像片
Fig. 5 One of the images used for 3D reconstruction

实验时格网点的像坐标通过直线模板匹配后求交点得到, 零件上的直线观测值则以摄像机参数和 CAD 设计坐标进行投影后得到的像面直线作为初值, 在一定宽度的影像窗口内通过模板匹配获取。需要指出的是, 图像匹配前需要进行消隐分析, 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, 即可得出平差后的格网点和零件点的坐标。零件的拓扑结构可以由 CAD 设计数据提供, 将平差后的各坐标替换设计坐标即可获得精确重建后的 3 维模型, 如图 6 所示。

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 7。其中“量测误差”表示利用游标卡尺量测的距离 (卡尺的量测精度高于 0.02 mm, 因而此处视为无误差) 与 CAD 数据的设计距离之差, “检测误差”为根据平差结果计算得到的相应距离与设计距离之差。可以看出, 该零件的最大制造误差达 0.5 mm, 且利用本系统可以检测出大于 0.1 mm 的制造误差。另外, “检测误差”和

“量测误差”之差的中误差为 0.073 mm。

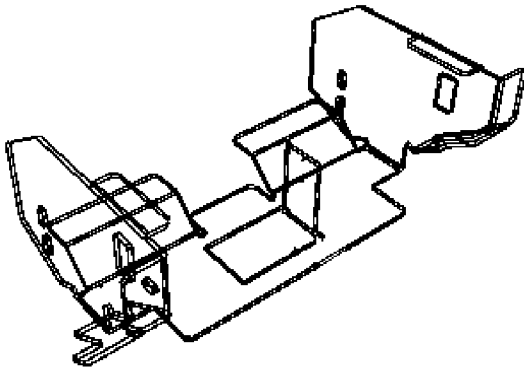


图 6 3 维重建后的 CAD 模型

Fig. 6 3D CAD model after reconstruction

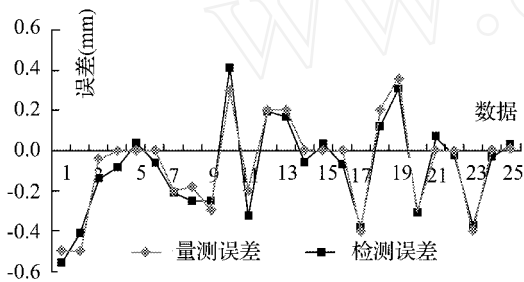


图 7 零件量测误差与检测误差的比较

Fig. 7 Comparison of measured and computed imprecision

零件上存在的圆孔和圆角矩形也进行了相应的检测,图 8 左边为其中一个圆的设计参数在像片上的投影椭圆。该圆的设计直径为 10.000 mm,实测直径也为 10.000 mm,采用序列图像中的 5 张像片进行重建后得到的直径为 9.952 mm,相应的投影椭圆见图 8 右边,可见其重建误差为 0.05 mm 左右。图 9 所示分别为一个圆角矩形的初始参数及重建参数的在像片上的投影,可以看出经过重建后投影边缘与实际边缘完全吻合。其他多个零件的检测实验也取得了类似的精度。利用游标卡尺量测的距离不可能没有任何误差,因而检测系统的实际精度应该更高。

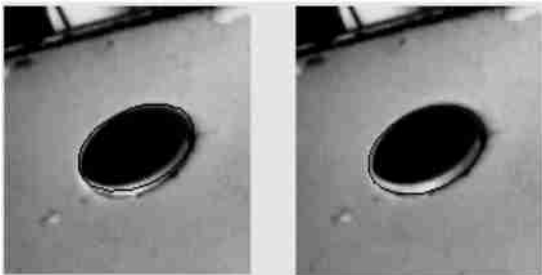


图 8 圆初始参数及重建参数的投影

Fig. 8 Initial and reconstructed projection of a circle

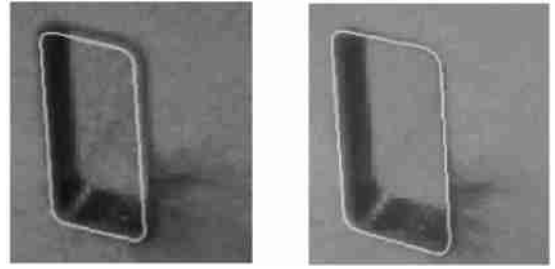


图 9 圆角矩形初始参数及重建参数的投影

Fig. 9 Initial and reconstructed projection of arcs and lines

7 结论

本文提出利用非量测数字摄像机进行工业钣金件高精度 3 维重建与误差检测。利用点和直线信息进行混合光束法平差,对工业零件的线框模型进行高精度 3 维重建,并在此基础上采用 1 维模板匹配技术直接获取圆及圆角矩形等复杂形状的物方参数。所开发的工业零件误差检测系统可自动运行,精度水平优于 0.1 mm,为工业领域中广泛存在的钣金件及其他类似工业零件的自动化 3 维制造误差检测探索出一条可行途径。

参考文献:

- [1] SPITZ S. Dimensional Inspection Planning for Coordinate Measuring Machines[D]. California: University of Southern California, 1999.
- [2] MUAMMAR H K, NIXON M. Tristage Hough Transform for Multiple Ellipse Extraction[A]. Computers and Digital Techniques, IEE Proceedings Part E[C]. [s.l.]:[s.n.], 1991. 27-35.
- [3] ZHANG Wen-jing, ZHANG Wen-yuan, SU Jian-feng. Automated Visual Inspection and Its Application on Inspection of Machined Parts[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(5): 635-638. (In Chinese)
- [4] ZHANG Yong-jun, ZHANG Zu-xun, ZHANG Jiar-qing. Camera Calibration Using 2D-DLT and Bundle Adjustment[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(6): 566-571. (In Chinese)
- [5] ZHANG Yong-jun. Three Dimensional Reconstruction and Visual Inspection of Industrial Sheetmetal Parts with Image Sequences[D]. Wuhan: Wuhan University, 2002. (In Chinese)
- [6] DEBEVEC P. Modelling and Rendering Architecture

- from Photographs: A Hybrid Geometry- and Image-based Approach[R]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1996.
- [7] HEUVEL F A. A Line-photogrammetry Mathematical Model for the Reconstruction of Polyhedral Objects [A]. Proceedings of SPIE[C]. [s. l.]:[s. n.],1999, 3641: 60-71.
- [8] WANG Zhi-zhuo. Principles of Photogrammetry[M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 1990.
- [9] ZHANG Yong-jun, ZHANG Zhi-xun, ZHANG Jiar-qing, et al. Photogrammetric Reconstruction of Arcs and Lines Based on One Dimensional Point Template Matching[A]. 6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques[C]. Zurich:[s. n.],2003. 315-321.

《测绘通报》2004 年第 5 期要目

数字化曲线的最小二乘配置	蓝悦明,等
用伪距法测定 PZ-90 与 WGS-84 坐标转换参数	李建文,等
遗传算法在控制网点位优化中的应用研究	杨泽运,等
非线性静态滤波与推估	赵长胜
数字高程模型产品的质量控制和质量模糊综合评价	王庆国,等
河流中轴线提取方法研究	乔庆华,等
基于小波的 GPS 基线解算精化处理技术及其应用	石杏喜,等
基于 CAD 数据建立 GIS 文本数据库方法探讨	韩 勇,等
数字图像处理的技术及其在 GIS 中的应用	胡圣武,等
油田生产实时监控系统设计方案的探讨	张培宏,等
天津数字城建研究	俞 斌,等
基于 Voronoi 图的配电变压器定位和供电区域划分	杨丽徙,等
在勘界数据生产中 MAPGIS 的应用技巧	吴秀丽,等
在 Web 地图发布中使用可伸缩矢量图形	翟 亮,等
地理信息水印系统的开发	张海涛,等
测绘资料成果档案管理平台设计实践	高允福
道路横断面成图及土石方计算软件系统的关键技术	范东明
地形图扫描数字化图纸定向精度探讨	曾衍伟
地貌晕渲的几种制作方法及比较	王建武,等
加强“误差理论与测量平差基础”课程教学的探讨	张书毕
非测绘专业测量学教学改革方案的研究	段贻民,等
关于导线测量中的独立量与相关量	倪 诚
坐标方位角计算新方法	罗来恩
烟花高度的测量方法	张 伟