

文章编号:1000-8055(2016)07-1761-05

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2016.07.027

## 高精度测量燃气轮机叶片前缘的 三维轮廓

向志聪<sup>1</sup>, 胡 忠<sup>1</sup>, 白玉磊<sup>1</sup>, 鲍 鸿<sup>1</sup>, 申作春<sup>2</sup>, 周延周<sup>1</sup>

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广州 510006;

2. 哈尔滨工业大学 航天学院 光电技术研究所, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 为了解决高精度测量燃气轮机叶片前缘三维轮廓的难题, 提出了一种基于球阵列标定检验方法, 直接对金属表面的叶片前缘三维轮廓进行高精度测量的相位轮廓测量系统. 通过多角度数据融合算法和非线性最小二乘的递归算法, 最后高精度测量出叶片前缘三维轮廓, 对叶片前缘 16 个剖面进行拟合, 得出了叶片前缘半径和前缘圆心. 结果显示: 叶片前缘测量系统、方法和算法的综合误差为  $\pm 0.03$  mm. 此实验装置和方法测量效率高、精度高, 将叶片测量和模型化技术推进了一步.

**关 键 词:** 叶片; 相位轮廓测量; 数据融合; 前缘半径; 前缘圆心

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

## High-precision measurement for the three-dimensional profile of gas turbine blade's leading edge

XIANG Zhi-cong<sup>1</sup>, HU Zhong<sup>1</sup>, BAI Yu-lei<sup>1</sup>, BAO Hong<sup>1</sup>,  
SHEN Zuo-chun<sup>2</sup>, ZHOU Yan-zhou<sup>1</sup>

(1. School of Automation,

Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Opto-electric Institute, School of Astronautics,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In order to solve the bottleneck problem of high-precision measurement for the gas turbine blade's leading edge, a high-precision measuring device using phase measurement profilometry was designed for the three-dimensional measurement for the metal gas turbine blade's leading edge, based on the calibration accuracy improved by a kind of examining ball array. By the means of designing a multiple view data fusion algorithm and a recursive algorithm of nonlinear least squares, the three-dimensional profile of the blade's leading edge was measured with high precision, and the radii and centers of blade's leading edge from sixteen sections of blade's leading edge were fitted finally. The result shows that the comprehensive error of the blade's leading edge measuring system, methods and algorithms is  $\pm 0.03$  mm. The experimental device and methods are of high efficiency and accuracy, contributing to the progress for blades measurement and modeling techniques.

**Key words:** blade; phase measurement profilometry; data fusion;  
radii of blade's leading edge; center of blade's leading edge

收稿日期: 2014-11-01

作者简介: 向志聪 (1990—), 男, 广东清远人, 硕士生, 主要从事叶片三维轮廓和物体三维轮廓及变形测量.

燃气轮机叶片是燃气轮机动力系统中重要部件之一<sup>[1-2]</sup>,可将其分为前缘、后缘、叶盆和叶背4个部分,其中叶片前缘轮廓对整个叶片的气动性能具有非常大的影响.传统的叶片是将叶片前缘设计成一段圆弧,其圆心坐标和半径(也称前缘半径) $R$ 就是叶片前缘轮廓的关键参数.

实验中发现,在叶片表面涂上薄涂层,仅在叶片前端10%弦长区域内涂上涂层与整个叶片涂上涂层得到的叶型损失增加非常接近.这足以说明叶片前缘对叶片整体性能影响很大<sup>[3]</sup>.根据叶片前缘轮廓对叶片性能影响的研究,可发现叶片前缘半径、最大厚度的变化和公差大小有着直接的关系,而最大厚度和前缘半径的变化是导致实际叶型气动性能发生变化的最重要原因之一.这足以证明叶片前缘形状的检测对整个叶片保持高质量的重要性<sup>[4-5]</sup>.

圆弧型叶片的前缘半径 $R$ 是影响叶片质量的主要因素,对叶片疲劳强度、加速性有着直接影响,并与燃气轮机的安全性和可靠性密切相关,因此对燃气轮机叶片前缘曲面轮廓的检测显得尤为重要<sup>[6-8]</sup>.叶片前缘轮廓高精度测量是叶片加工过程中的质量检测的重要部分,人们对其重视程度越来越高,然而叶片前缘曲面复杂,曲率变化大,前缘曲面轮廓的测量十分困难.传统的三坐标测量机测量探头的曲率半径与叶片前缘半径相近,存在较大的测量误差.查阅国内外相关文献,对叶片前缘三维曲面轮廓的高精度测量很难做到,目前还没有比较具体的方案.供备选方案中光学干涉法、相位轮廓测量法等具有潜在的优势.

基于光栅条纹投影的相位轮廓测量法<sup>[9-11]</sup>源于光学干涉测量方法,该方法在测量叶片前缘三维轮廓时,被测表面上任何一点的相位值不受相邻点光强值的影响,从而大幅度减小被测物面反射率不均匀引起的误差.针对叶片前缘复杂的曲面结构,相位轮廓测量法主要优点是三维测量精度高,测量点阵密度大,对于事先不知数学模型的复杂曲面测绘,数据模型化精度高,可靠性能超过三坐标测量机.

随着对叶片前缘三维曲面轮廓高精度测量的重视程度不断提高,相位轮廓测量法是有潜力的叶片前缘高精度测量方法之一,也是国内外研究的重点.但是,相位轮廓测量法应用于叶片前缘轮廓测量有以下3个问题有待解决:①对叶片进行360°的三维轮廓测量,旋转不同测量角度测量结果的点云数据需要高精度融合;②由于CCD

(charge coupled device)相机的光学动态量程有限,目前国内外商用相位轮廓测量系统不适合直接进行高精度的半黑和半反光金属表面三维轮廓的测量;③叶片大量的三维点云数据如何进行轮廓拟合和数学模型化,并指导叶片制造的参数设计和修正.只有解决上述3个问题以后,相位轮廓测量系统测量叶片前缘表面三维轮廓才能实际得到应用.

2009年,广东工业大学周延周、鲍鸿和哈尔滨工业大学申作春等人开始高精度测量燃气轮机叶片三维轮廓的研究.2012年,李华伟等利用相位轮廓测量系统对燃气轮机叶片表面的三维轮廓进行了360°测量<sup>[12]</sup>.2014年,周延周等设计了高精度三维点云数据融合的新结构和算法,攻克了相位轮廓测量法叶片测量实用化道路上的又一个难关,完成了旋转多角度叶片三维轮廓点云数据高精度的自动融合,从而实现无死角高精度测量叶片三维表面轮廓.

在上述研究的基础上,本文提出了相位轮廓测量的球阵列检验方法,在两个角度下对燃气轮机叶片前缘的三维轮廓进行了高精度测量和数据融合<sup>[13-14]</sup>.

## 1 相位轮廓测量原理及系统

### 1.1 相位轮廓测量原理

本文采用的相位轮廓测量方法是利用正弦变化的光栅条纹投影到被测物体表面时,投影条纹受到物体表面轮廓的高度信息调制而发生形变,通过对投影条纹的相位和振幅进行解调计算后,最终可获得被测物体表面三维轮廓<sup>[15]</sup>.以铝盘表面三维轮廓测量为例,如图1所示.首先将呈正弦变化的光栅条纹投影到被测铝盘上,如图1(b)所示;然后进行高度信息解调计算,如图1(c)所示;最终获得铝盘表面三维轮廓,如图1(d)所示.

### 1.2 相位轮廓测量实验系统

本文所用相位轮廓测量系统构成如下<sup>[12,16]</sup>: Plus V1100 数字投影仪1台、MegaPlus ES 1.0 CCD相机1台、铝合金多维度调整桁架、二维手动导轨平台(行程为0~180 mm,精度为 $\pm 0.01$  mm)、若干标定板,如图2所示.通过测量4个(包括参考平面)不同深度值 $x$ 进行深度方向标定.三维测量系统的 $y, z$ 方向标定则采用ZHANG Zhengyou等<sup>[17]</sup>和张裕等<sup>[18]</sup>平面标定方法,从而完成对实验系统的 $x, y, z$ 标定.

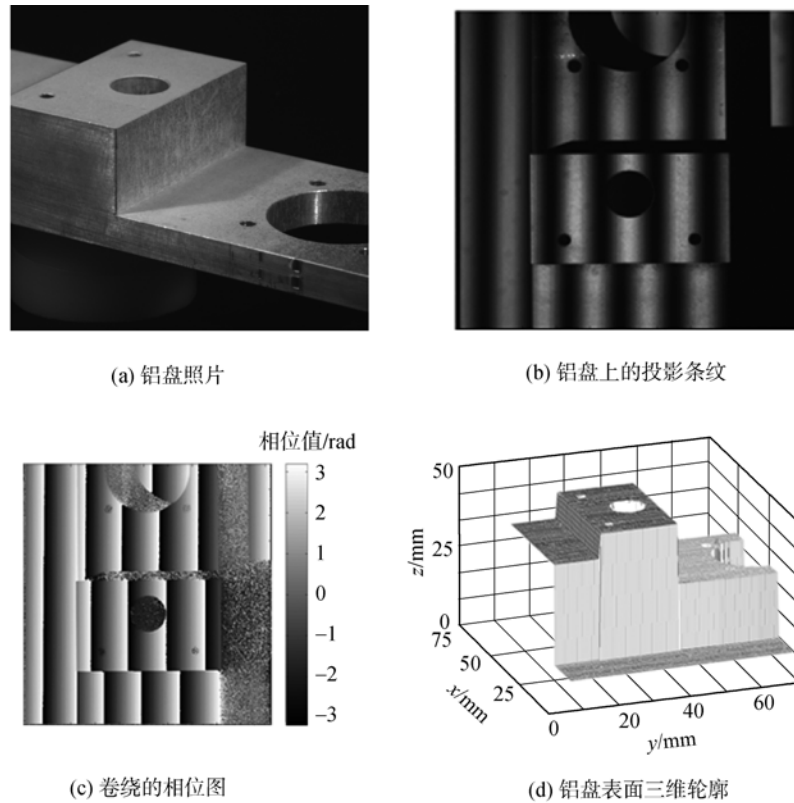


图 1 相位轮廓测量法应用于铝盘表面三维轮廓测量

Fig. 1 Phase measurement profilometry for three-dimensional profile measurement of aluminum disk surface

本文采用的球阵列标定检验方法则是通过使用本文的相位轮廓测量系统对一个直径为 $(10 \pm 0.01)$  mm 的基准球阵列模型进行三维测量,基准球阵列模型表面曲率变化大、球模型直径小,与叶片前缘曲面结构相似性大,如图 2(c)所示,并对

其进行球 Hough 变换,最后把拟合所得半径数据跟已知基准半径数据进行对比来检验系统测量精度。

多次标定检验实验中的测量数据利用率都达 99.9%,对比基准半径的测量误差为 $\pm 0.02$  mm,表明本文的相位轮廓测量系统能适用于表面曲率变化大、曲面形态复杂的叶片前缘高精度测量。

## 2 测量结果与分析

### 2.1 燃气轮机叶片前缘测量结果

安装调试上述相位轮廓测量系统,如图 2(a)所示,将被测叶片被安装在一个厚度为 40 mm 的钢板平台,叶片水平宽度约为 50 mm,垂直高度约为 210 mm,如图 2(b)所示。将叶片水平旋转,并选取两个角度测量叶片前缘轮廓,旋转两个角度后的 CCD 相机视场能覆盖完整的叶片前缘轮廓,并且两次视场都含有局部相同叶片轮廓,将两次测量数据进行融合,得到完整的叶片前缘轮廓数据。沿  $z$  方向测量约 210 mm 叶片三维轮廓,等间距提取 16 个三维轮廓剖面,如图 3 所示。此 16 个剖面遵循了燃气轮机叶片的一般设计规律,即叶片根部剖面前缘半径大,顶部剖面前缘半径小,与

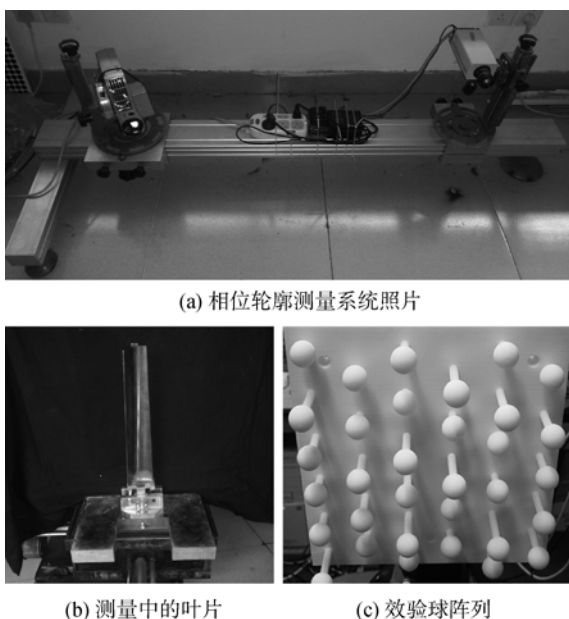


图 2 相位轮廓测量系统

Fig. 2 Phase measurement profilometry system

设计的线形一致. 在本文测量中, 叶片前缘数据点自动分类, 不在叶片前缘圆弧上的数据点自动去除, 因此对叶片前缘真实轮廓无影响.

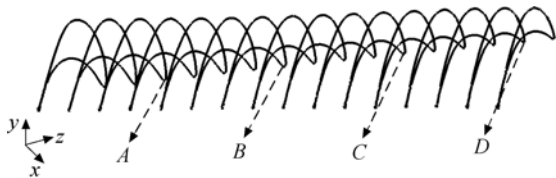


图3 叶片三维轮廓剖面

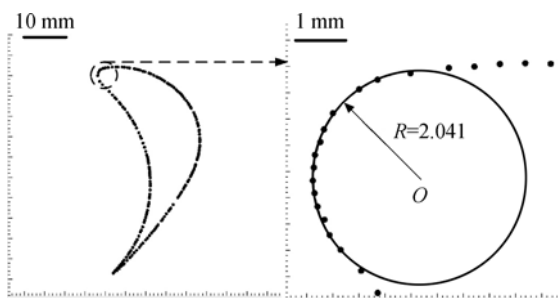
Fig. 3 Three-dimensional profile of a blade sections

## 2.2 燃气轮机叶片前缘测量结果分析

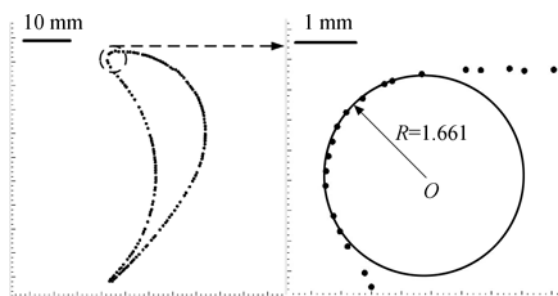
以叶片根部为基准平面  $z=0$  mm, 随机提取4个剖面, 剖面A:  $z=36.33$  mm; 剖面B:  $z=86.80$  mm; 剖面C:  $z=137.28$  mm; 剖面D:  $z=187.76$  mm, 如图3所示.

对图3所述中4个剖面的前缘部分进行局部放大, 如图4所示. 采用三次样条函数对叶片前缘点云数据进行圆弧曲线拟合, 当拟合误差达到最小值时, 停止圆弧曲线拟合, 此时得到叶片前缘圆心坐标  $O$  和前缘半径  $R$ , 如图4所示. 拟合后的叶片前缘半径结果分别为剖面A:  $R=2.041$  mm; 剖面B:  $R=1.661$  mm; 剖面C:  $R=1.501$  mm; 剖面D:  $R=1.201$  mm. 叶片前缘点云数据的圆弧半径拟合误差小于  $\pm 0.01$  mm.

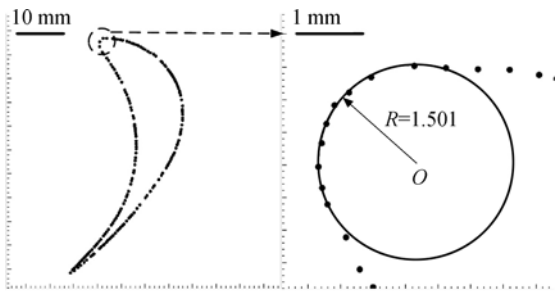
采用上述方法依次对图3所示16个剖面的前缘进行曲线拟合, 计算出叶片前缘各个剖面的



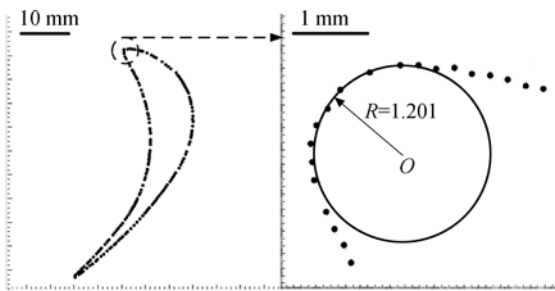
(a) 叶片前缘剖面A半径拟合图



(b) 叶片前缘剖面B半径拟合图



(c) 叶片前缘剖面C半径拟合图



(d) 叶片前缘剖面D半径拟合图

图4 叶片前缘剖面(单位:mm)

Fig. 4 Sections of blade leading edge (unit:mm)

圆心坐标和半径值. 分析其变化规律后, 发现叶片高度  $z$  与前缘半径  $R$  有一种线性关系, 采用最小二乘法对叶片剖面高度与前缘半径进行直线拟合. 结果发现, 拟合直线与叶片前缘半径的设计值一致, 如图5(a)所示, 得到直线方程为

$$R = 2.190 - 0.00538z \quad (1)$$

分析各采样剖面的半径  $R$  与拟合直线之间的偏差, 如图5(b)所示. 叶片前缘16个剖面中, 半径值与回归直线最大误差为  $-0.063$  mm 和  $0.051$  mm. 其主要原因是广州的盐雾天气很重, 这两个点的金属表面有一点锈蚀.

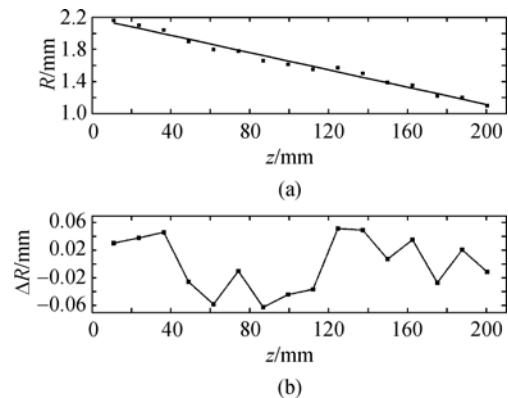


图5 叶片高度与前缘半径之间的关系

Fig. 5 Relationship between the blade height and the radii of blade's leading edge

### 3 结 论

从实验结果和分析可以看出燃气轮机叶片前缘的剖面呈圆形,叶片根部前缘半径大,顶部前缘半径小,叶片高度与前缘半径存在一定的线性关系,叶片前缘轮廓基本保持相同。

本文提出的测量方法可以高精度测量叶片的前缘半径和圆心坐标,实验系统中新型球阵列标定方法误差小于 $\pm 0.02\text{ mm}$ ,后期圆弧拟合误差小于 $\pm 0.01\text{ mm}$ ,所以本文综合误差为 $\pm 0.03\text{ mm}$ 。实验结果表明,该高精度测量方法的数据采样密度大,超过香农采样定理的要求,曲面还原精度远远高于单点测量精度。实验测量装置和方法具有三维表面轮廓数据测量精度高,机械装置结构简单,数据融合稳定性好,自动化程度高,可以同时检测多个叶片等优点。本文的研究将燃气轮机叶片测量和模型化技术推进了一步。

### 参考文献:

- [1] Herzog R, Warnken N, Steinbach I, et al. Integrated approach for the development of advanced, coated gas turbine blades[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2006, 8(6): 535-562.
- [2] Vale T O, Villar G C, Menezes J C. Methodology for structural integrity analysis of gas turbine blades[J]. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2012, 4(1): 51-59.
- [3] 张耀光,徐朋飞,刘太秋,等. 前缘对压气机叶片性能影响因素探究[C]//中国航空学会第八届动力年会论文集. 沈阳:中国航空学会,2014:481-489.
- [4] 朱家友,宁方飞. 加工误差对叶片气动性能影响的数值模拟研究[C]//中国航空学会第八届动力年会论文集. 沈阳:中国航空学会,2014:594-600.
- [5] 陆佳艳,熊昌友,何小妹,等. 航空发动机叶片型面测量方法评述[J]. *计测技术*, 2009, 29(3): 1-3.  
LU Jiayan, XIONG Changyou, HE Xiaomei, et al. Survey of measurement method of aeroengine blade[J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2009, 29(3): 1-3. (in Chinese)
- [6] 张力宁,张定华. 叶片前缘高精度重建方法研究[J]. *航空动力学报*, 2006, 21(4): 722-726.  
ZHANG Lining, ZHANG Dinghua. High-precision reconstruction of blade leading edge[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2006, 21(4): 722-726. (in Chinese)
- [7] 刘建伟,梁晋,梁新合,等. 大型水轮机叶片快速检测的新方法[J]. *光电工程*, 2009, 36(8): 50-56.  
LIU Jianwei, LIANG Jin, LIANG Xinhe, et al. A novel rapid measurement approach for blade of large water turbine[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(8): 50-56. (in Chinese)
- [8] FU Yanjun, WANG Yonglong, WAN Meiting, et al. Three-dimensional profile measurement of the blade based on surface structured light[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(18): 3225-3229.
- [9] Huntley J M. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [10] 刘玉凤. 新改进型三步非等步相位轮廓测量术算法[J]. *光电子:激光*, 2010, 21(1): 83-86.  
LIU Yufeng. An improved algorithm to three-unequal step length for PMP [J]. *Journal of Optoelectronics: Laser*, 2010, 21(1): 83-86. (in Chinese)
- [11] 武迎春,曹益平,钟立俊. 一种改进型 Stoilov 算法相位轮廓测量术[J]. *光子学报*, 2010, 39(2): 307-310.  
WU Yingchun, CAO Yiping, ZHONG Lijun. An improved method of Stoilov algorithm adapting to phase measuring profilometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(2): 307-310. (in Chinese)
- [12] 李华伟,申作春,覃银红,等. 相位轮廓测量术应用于叶片测量[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(2): 275-281.  
LI Huawei, SHEN Zuochun, QIN Yinhong, et al. Application of phase-measurement-profilometry in blade measurement[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(2): 275-281. (in Chinese)
- [13] Correa N M, Adali T, Li Y, et al. Canonical correlation analysis for data fusion and group inferences[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(4): 39-50.
- [14] Lasaruk A, Tatschke T. Calibration and low-level data fusion algorithms for a parallel 2D/3D-camera[J]. *Information Fusion*, 2011, 12(1): 37-47.
- [15] 何宇航,曹益平,钟立俊,等. 采用频域滤波提高数字相位轮廓测量术的测量精度[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 220-224.  
HE Yuhang, CAO Yiping, ZHONG Lijun, et al. Improvement on measuring accuracy of digital phase measuring profilometry by frequency filtering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 220-224. (in Chinese)
- [16] 覃银红,鲍鸿,周延周,等. 变曲率高聚物材料表面三维轮廓和变形场分布的同时测量[J]. *广东工业大学学报*, 2012, 29(4): 39-42.  
QIN Yinhong, BAO Hong, ZHOU Yanzhou, et al. Surface profile and deformation measurement of polymer materials with variable[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2012, 29(4): 39-42. (in Chinese)
- [17] ZHANG Zhengyong. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [18] 张裕,方康玲,刘永祥. 基于 Harris 算法的黑白棋盘格角点检测[J]. *计算机应用与软件*, 2010, 27(8): 251-254.  
ZHANG Yu, FANG Kangling, LIU Yongxiang. Harris algorithm-based corner detection on black white checkerboard[J]. *Computer Applications and Software*, 2010, 27(8): 251-254. (in Chinese)

(编辑:陈 越)