

基于网格点投影灰度相似性的三维重建新方法

徐 刚 张文明 楼凤伟 李海滨 刘 彬

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 基于双目立体视觉的三维重构是计算机视觉技术的主要内容之一,在机器人视觉导航、航空测绘、医学成像和工业检测等很多领域都有广泛的应用。提出一种基于网格点投影灰度相似性的双目立体视觉的三维重建新方法。首先将被测物体所在的世界坐标系划分成间距相等的矩形网格,将网格节点作为潜在的物点投影到左右图像坐标系上,然后根据不同深度的空间点在两幅图像上相应的灰度相似性来判断被测物体在三维空间中的深度信息。通过 Matlab 平台下的仿真实验证明了本方法的三维重建效果和计算效率都要优于传统方法。与传统的图像匹配方法相比,具有算法简单、速度快、精度高、且不受摄像装置非线性畸变影响的优点。

关键词 图像识别;机器视觉;三维重建;双目立体视觉;灰度相似性

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20082811.2175

A New 3D Reconstruction Method Based on Gray Similarity of The Projecting Grid Points

Xu Gang Zhang Wenming Lou Fengwei Li Haibin Liu Bin

(College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, He bei 066004, China)

Abstract The 3D reconstruction based on binocular stereo vision is a main part of the computer vision technology and it has a variety of applications such as robot navigation, aerial surveying and mapping, medical imaging, industrial inspection, etc.. A new binocular stereo vision method based on comparing gray value of the projection points is proposed to reconstruct 3D world. This method divides the world coordinate system into grids and the nodes are considered as candidates of the object coordinates. A group of points with varying depth information are projected on the two pictures. The difference of the gray values of the corresponding pairs implies the depth information of the object in 3D world. It is proved superior over traditional methods in the effectiveness and efficiency by simulatron experiments using Matlab. Compared with traditional method based on image matching, this algorithm has obvious superiority in simplicity, computation and accuracy. Also, it will not be affected by the nonlinear distortion from the camera.

Key words image discerning; machine vision; 3D reconstruction; binocular stereo vision; gray similarity

1 引 言

双目立体视觉测量技术是计算机视觉中的一个重要分支,一直是计算机视觉研究的重点和热点之一。由于其近似于人眼视觉系统,具有较高的测量精度和速度,并具有结构简单、便于使用等优点,被广泛应用于工业检测、物体识别、工件定位、机器人

自导引等诸多领域^[1,2]。双目立体视觉理论建立在对人类视觉系统研究的基础上,通过双目立体图像的处理,获取场景的三维信息,其结果表现为深度图,再经过进一步处理就可得到三维空间中的景物,实现二维图像到三维空间的重构。

传统的双目立体视觉主要涉及到摄像机标定、

收稿日期:2008-01-25;收到修改稿日期:2008-04-25

基金项目:河北省科技攻关项目(07212120D),河北省教育厅基金(2000327)资助课题。

作者简介:徐 刚(1979-),男,博士研究生,主要从事光电检测技术和计算机视觉方面的研究,E-mail: xg@ysu.edu.cn

导师简介:刘 彬(1953-),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测技术和信号处理方面的研究工作,

E-mail: xg@ysu.edu.cn

图像匹配和三维信息重建这三个方面的技术^[3~5]。摄像机标定是为了确定摄像机的位置、属性参数和建立成像模型,以确定空间坐标系中物体点同它在图像平面上像点之间的对应关系。图像匹配步骤通过各种约束条件建立两幅图像的一一对应关系来进行后续的三维重建^[6]。三维重建则是根据摄像机标定所得的内外参数和立体图像对的匹配结果,计算物体在三维世界坐标系中的位置,建立物体的三维立体信息。图像匹配是三维重建中最关键也是最复杂的一个步骤,由于非线性畸变所引起的图像变形会给匹配过程带来一定程度的难度,通常需要在匹配前对其进行校正。

本文提出一种基于投影灰度对比的双目立体视觉新方法。首先对摄像装置的参数进行标定,同时确定三维空间可以成像在左右摄像机上的空间范围。其次,将被测物所在的空间划分成间距相等的矩形网格,将网格节点作为潜在的物面坐标分别映射到摄像机的图像坐标系。最后,通过对比每组数据的灰度信息来判定该物点在 z 轴方向上的深度信息。与传统方法相比,本方法不需要图像匹配来重建三维信息,具有不受非线性畸变影响的优点。

2 系统标定算法

CCD 摄像机或数码相机是利用双目立体视觉技术对物理世界进行重建的基本测量工具。对摄像装置的标定是实现立体视觉基本而又关键的一步。本系统采用相交光轴的结构形式,左右摄像装置的光轴成一定的角度布置,这样的结构保证了视场范围的最大化。摄像装置标定的过程采用张正友的标定方法^[7],对二维平面标定板从不同方位拍摄多幅图像,利用平面模板的空间点和图像点间的对应关系建立约束方程来实现摄像装置的标定。该方法简单易用,且能获得较高的精度。

本文方法依赖于灰度信息的比较来实现三维重建,因此要求两台摄像机对物点成像的颜色不能存在色差。由于环境光线可能会对摄像装置的成像产生影响,本系统选用两台同型号且相同参数设置的摄像机。同时,在摄像机标定的过程中加入对色差的校正,以保证三维重建结果的准确。标定过程中使用的标定板上的黑色方块用不同深度的灰度颜色代替,这样既不影响标定过程中角点的检测,又能对两台摄像机的色差校正。

在摄像机标定完成的同时,可以计算出两台摄像机所能成像的三维空间在 $X_w O_w Y_w$ 平面的范围,

以及用景深描述的三维空间深度范围。景深是指当把摄像机物镜调焦于某一摄影对象时,在 CCD 像面上能成清晰像的范围,它与焦距 f 、光圈大小和摄影距离有关系。对于特定应用下的系统,应尽量根据现场情况减少被测物所在三维空间的计算范围,以便提高系统的三维重建精度,同时避免计算大量数据造成的延时。

3 摄像机成像模型和三维重建方案

本方法通过对比深度范围内所有候选坐标点映射到两幅 CCD 图像上像点的灰度信息的相似度来判断物点的深度信息,因此世界坐标系到摄像机图像坐标系的坐标映射是本方法的基本步骤。

3.1 坐标系的定义

整个光学系统涉及到四个坐标系,各坐标系的定义如下:

(1) 世界坐标系(World coordinate system)。由于摄像机和物体可以安放在环境中的任何位置,因此还需要在环境中选择一个基准坐标系来描述摄像机的位置,并用它来描述环境中任何物体的位置。

(2) 摄像机坐标系(Camera coordinate system)。摄像机坐标系是固定在摄像机上的直角坐标系,其原点定义在摄像机的心光心。

(3) 成像平面坐标系(Retinal coordinate system)。成像平面坐标系是以物理单位表示图像坐标的坐标系,原点定义在摄像机光轴与图像平面的交点。

(4) 图像坐标系(Pixel coordinate system)。摄像机采集的图像以标准电视信号的形式输入计算机,经模/数转换器转换为数字图像。每幅数字图像在计算机内都可以存储为数组,数组中的每个元素的值即是图像点的亮度(或称灰度)。原点定义在图像平面的左上角。

3.2 坐标系的转换

从世界坐标系到图像坐标系的映射关系如图 1 所示,假设 $A(X_w, Y_w, Z_w)$ 是世界坐标系中的物点,则世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 与摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 之间的关系用齐次坐标描述如下:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 \mathbf{R} 为 3×3 旋转矩阵,它确定了摄像机相对于世界坐标系的方向,可由三个欧拉角 ψ 、 θ 和 φ 来表

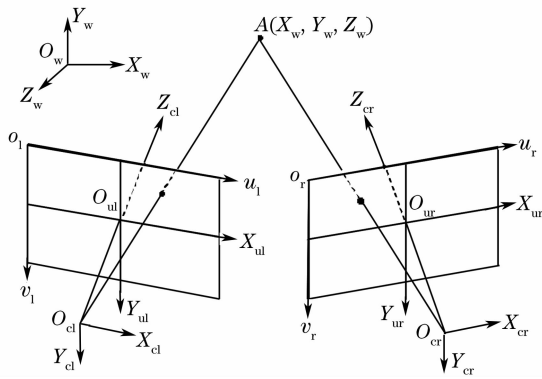


图 1 双目立体视觉系统模型

Fig. 1 Binocular stereo vision system model

示。 T 为 3×1 平移矢量, 表示摄像机相对于世界坐标系的位置关系, 0^T 表示 3×1 的零矩阵的转置。

摄像机坐标系下空间点坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 在小孔成像模型下经投影变换至理想成像平面坐标系下的坐标 (X_u, Y_u) :

$$\begin{cases} X_u = f \frac{X_c}{Z_c}, \\ Y_u = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases}, \quad (2)$$

用齐次坐标和矩阵表示为

$$Z_c \begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由于系统采用的针孔模型与理想模型之间存在着误差^[8], 这种误差在所拍摄的二维图像中表现为非线性畸变。考虑到摄像机透镜的径向畸变因素,

将理想图像坐标 (X_u, Y_u) 转换成实际图像坐标 (X_d, Y_d)

$$X_d = X_u + X_u [k_1 (X_u^2 + Y_u^2) + k_2 (X_u^2 + Y_u^2)^2], \quad (4)$$

$$Y_d = Y_u + Y_u [k_1 (X_u^2 + Y_u^2) + k_2 (X_u^2 + Y_u^2)^2], \quad (5)$$

其中 k_1 和 k_2 表示透镜径向畸变系数。摄像机镜头的非线性畸变包括径向畸变、离心畸变和薄棱镜畸变。实验表明^[9], 在一般情况下, 非线性摄像机模型只需采用径向畸变就足以描述非线性畸变因素的影响。如果考虑更多的非线性畸变参数, 则摄像机标定问题的求解需要使用非线性优化算法, 而过多非线性参数的引入不但不能提高精度, 反而会引起求解过程的不稳定。

相应的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ 1 \end{bmatrix} = A' \begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

成像平面坐标系到图像坐标系的转换用齐次坐标表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & \gamma & u_0 \\ 0 & s_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 (u_0, v_0) 为图像中心的像素坐标, s_x 和 s_y 为图像平面上沿 x 轴、 y 轴方向单位距离上的像素点数, $s = s_x/s_y$ 称为尺度因子。 γ 为两坐标轴之间的倾斜因子, 当两坐标轴垂直时, $\gamma = 0$ 。

综合以上各式得到

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & \gamma & u_0 \\ 0 & s_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} A' \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

(8) 式为摄像机投影的基本公式, 式中 M 为一 3×4 矩阵, 称为投影矩阵, M_1 由 $s_x, s_y, u_0, v_0, f, k_1$ 和 k_2 等确定, 这些参数只与摄像机本身性质有关, 称为摄像机内部参数 (Intrinsic parameters); M_2 由 R, T 给出, 完全由摄像机相对于世界坐标系的方位决定, 称为摄像机的外部参数 (Extrinsic parameters)。

3.3 三维重建的步骤

3.3.1 对被测物体所在的世界坐标系进行网格划分
在确定了摄像机能够清晰成像的世界坐标系范

围之后, 将此空间按照坐标轴的方向划分为相同尺寸的矩形网格, 网格节点可以被认为是候选的物面坐标点。网格节点之间的距离间隔与摄像机成像的分辨率有关, 如果该距离过大, 则不能保证某一深度的网格节点与物面重合; 如果该距离太小, 则会大大增加系统的计算量, 同时也无助于重建精度的提高。参照摄像机标定的结果, 将此距离间隔取为 $2/(s_x + s_y)$ 。设整个空间被分为矩阵网格后, 包含 $m \times n \times l$ 个网格节点, 其中 m, n 和 l 分别为沿 x, y, z 轴方向上网格节点的数量。

既然三维重建主要是要恢复物体在三维空间中的深度信息,那么对每一组 x 轴、 y 轴坐标确定而 z 轴坐标值顺序变化的网格节点进行比较,通过灰度信息的对比可以判断哪一个点代表了物点在空间中的深度信息。整个三维重建的过程可以看作是对 X_w

$O_w Y_w$ 平面上的 $m \times n$ 个网格节点分别计算,确定在 z 轴方向上 l 个点中哪一点与真正的物面重合。图 2 给出了空间中矩形网格的其中一部分,根据公式 (8),将每一组数据点分别映射到两台摄像机的图像坐标系,并找到两幅图像上对应的像素点。

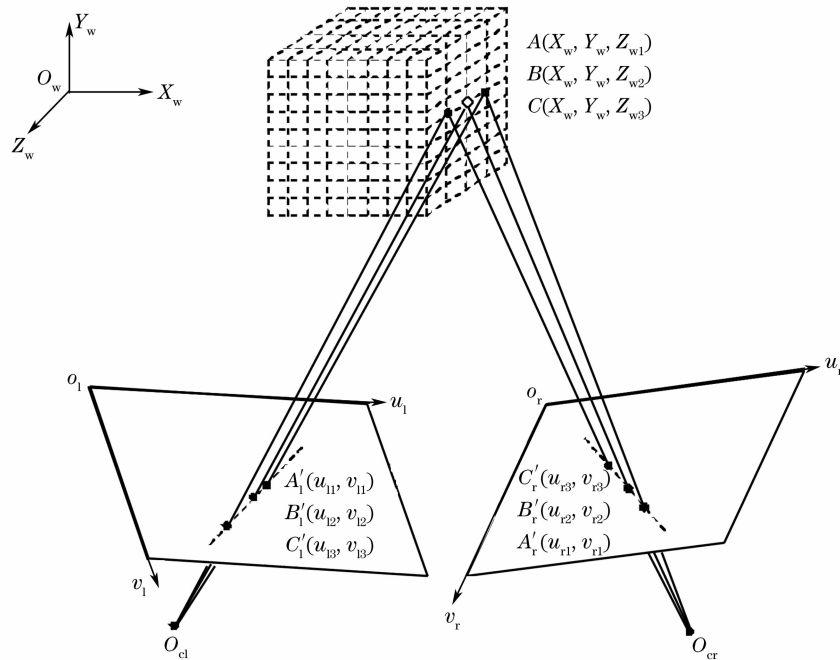


图 2 不同深度的离散点在像面上的映射关系

Fig. 2 Projection of the discrete points with different depth information in world coordinate system

3.3.2 空间点向图像坐标系的映射

如图 2 所示,假设世界坐标系中心点 $B(X_w, Y_w, Z_{w2})$ 与实际物面重合,那么两台摄像机的图像坐标系上相应映射点 $B'_1(u_{12}, v_{12})$ 和 $B'_r(u_{r2}, v_{r2})$ 的灰度信息一定相同,即为物面上该点的灰度值。而 B 点前后的其它网格节点,如点 $A(X_w, Y_w, Z_{w1})$,映射到左摄像机图像坐标系上的点 $A'_1(u_{11}, v_{11})$ 显示的灰度信息则是物面与空间直线 $O_{c1}A$ 相交物点的灰度值。同理可知该点 $A(X_w, Y_w, Z_{w1})$ 投影到右摄像机像面上的坐标点 $A'_r(u_{r1}, v_{r1})$ 的灰度是物面与空间直线 $O_{c2}A$ 相交的物点的灰度值。很明显这两个 CCD 像面上的映射点反映出的灰度信息并不是来自同一物点,因此 A 点投影到摄像机像面上的两点 $A'_1(u_{11}, v_{11})$ 和 $A'_r(u_{r1}, v_{r1})$ 灰度值并不相同。通过对比每一组数据的投影点灰度信息,可以判定出灰度值相差最小的一对点所对应的空间点就是所求的深度信息。

3.3.3 左右图像中映射点的灰度对比

整个三维重建的过程可以看作是将 XOY 平面的二维图像恢复出其深度信息。那么对于该平面上

的 $m \times n$ 个网格节点分别进行计算,就能够确定每一点在 z 轴方向上 l 个不同深度的候选点中哪一点与物面重合,最终得到物体在整个世界坐标系中的三维坐标。

在对比每组 l 个网格节点向左右图像坐标系投影的像点灰度值时,即使该网格节点不是像面上的一点,所投影在像面上的灰度值也有可能恰好相等。也就是说,来自于不同物点的灰度也有一定几率是相等的,这样就有可能造成两个或多个候选点对应的像点灰度差同为最小值。为了解决这个问题,我们引入了物面连续性约束,通过对比相邻物点的深度信息来对多个候选深度做出准确判断。同时,连续性约束使得候选离散点的选取不用取到所有深度范围,只要在相邻物点平均深度的一定范围内进行计算即可,这样不但在很大程度上降低了重建误差,也大大减少了系统的计算时间。

4 实验结果

通过 Matlab 环境下的仿真实验,对图像匹配方法和本方法分别验证。图像匹配的过程引入极线约

束来减少匹配时的搜索范围,使匹配点的搜索限制在一条直线上。图 3 中(a)和(b)分别是左右摄像机

获得的图像,两幅图像的分辨率均为 300×300 ,图 4 是使用本文方法的三维重建结果。

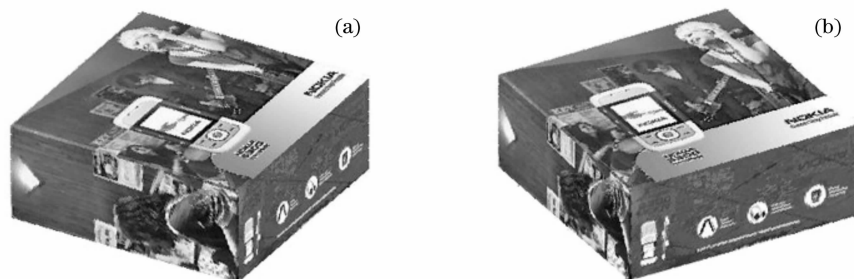


图 3 两台摄像机获取的原始图像

Fig. 3 Two pictures from cameras

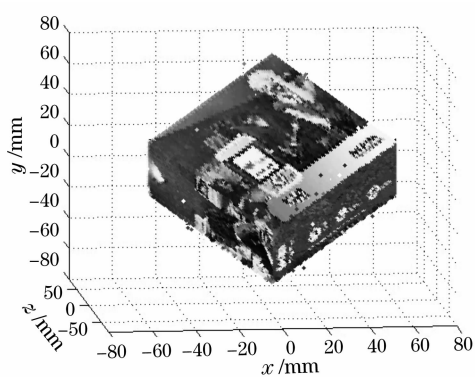


图 4 三维重建结果

Fig. 4 Result of the 3D reconstruction

表 1 是对三维空间中的方形盒子在不同摆放角度下的多次实验结果,通过仿真建模和三维重建得到的世界坐标系中三维坐标的比较,验证恢复深度信息的正确性。从结果可以看出,本算法每次均能正确还原出物体的轮廓。在误差允许的范围内,本方法的准确率达到 91.7%,而图像匹配方法的准确率为 88.2%。

表 1 物体不同摆放角度下的多次实验结果

Table 1 Experiment results with object positioned in different angles

No.	1	2	3	4	5	6
Accuracy	90.1%	92.3%	92.6%	91.4%	89.3%	92.5%

由于图像匹配算法中引入了极线约束,导致计算量增大,重建过程所用的时间也要高于本方法。因此,本方法不论是三维重建精度还是系统运行时间都要优于使用图像匹配的方法。

5 结 论

本文提出了一种基于投影灰度对比的三维重建新方法。与传统方法不同的是,无需进行复杂的图

像匹配过程实现三维重建,而是将三维空间划分成矩形网格,每个网格节点作为潜在物点投影到两幅图像,通过对比每对像点的灰度差值来判定物体的深度信息。与基于图像匹配算法的传统三维重建技术相比,具有算法简单、精度高,运算速度快的特点^[10,11]。同时,光学系统的非线性畸变会使图像发生不同程度的变形^[12],这给传统方法的图像匹配过程带来一定困难,通常会引入某种方法对它进行校正,来保证匹配的准确。而本文方法中,由于对潜在物点的投影过程实际上就是摄像装置成像的过程,在这个过程中已经把非线性参数考虑在内,因此本方法的重建精度不受非线性畸变的影响。

本方法同时也存在着一定的局限性。由于灰度值对比所引起的误差与图像的灰度分布有关,这就要求摄像装置获得的二维图像的灰度直方图均匀分布,才能使在对比所有深度范围内候选物点的投影灰度时不存在过多的干扰,保证系统的可用性。

参 考 文 献

- David A. Forsyth, Jean Ponce. *Computer Vision: A Modern Approach* [M]. Lin Xueyin *et al.*. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004, 199~213
David A. Forsyth, Jean Ponce *et al.*. 计算机视觉一种现代方法 [M]. 林学刚等译. 北京: 电子工业出版社, 2004, 199~213
- Ni Guoqiang, Xiao Manjun, Hu Hongqing *et al.*. New progress and prospect of realistic image rendition based on visual characteristics[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(4): 451~460
倪国强, 肖蔓君, 胡宏清等. 基于视觉特性的真实影像再现技术进展及展望[J]. 中国激光, 2007, **34**(4): 451~460
- Lin Jiaming, Yang longrong. Application of CCD and camera technique in industry[J]. *Physics*, 2000, **29**(12): 732~735
林家明, 杨隆荣. CCD 及摄像机技术在工业中的应用[J]. 物理, 2000, **29**(12): 732~735
- Zhu Xiaoming, Gao Zhiyun. Theoretic research on double-CCD stereoscopic system[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(3): 298~300
朱效明, 高稚允. 双 CCD 立体视觉系统的理论研究[J]. 光学技术, 2003, **29**(3): 298~300

- 5 Qiu Zhiqiang, Liang Yonghui, Yu Qifeng. Three-dimensional structure reconstruction from image sequence based on affine approximation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1004~1010
邱志强, 梁永辉, 于起峰. 基于仿射近似从序列图像重建目标三维结构[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1004~1010
- 6 D Marr, T Poggio. Cooperative computation of stereo disparity [J]. *Science*, 1976, **194**(4262): 283~287
- 7 Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 8 Jiang Dazhi, Yu Qian, Wang Bingyang *et al.*. Reserch and overview of imaging nonlinear distortion in computer vision[J]. *Computer Engineering*, 2001, **12**(27): 108~110
姜大志, 郁倩, 王冰洋等. 计算机视觉成象的非线性畸变研究与综述[J]. *计算机工程*, 2001, **12**(27): 108~110
- 9 Li Haibin, Zhang Qiang. A new stereo matching algorithm based on sub-line segment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 907~912
李海滨, 张强. 一种新的基于子线段的立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 907~912
- 10 J. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(10): 965~980
- 11 Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lens[J]. *IEEE Journal of Robotics Automation*, 1987, **RA-3**(4): 323~344
- 12 Liu Jiayin, Wang Zhongli, Jia Yunde. Error analysis of binocular stereo vision system[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(3): 354~358
刘佳音, 王忠立, 贾云得. 一种双目立体视觉系统的误差分析方法[J]. *光学技术*, 2003, **29**(3): 354~360

光学前沿——首届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动的通知

为了进一步提高我国光学期刊的学术水平和论文质量,吸引和催生优秀稿件,鼓励和培育优秀作者,促进我国光学、激光科技事业发展,《光学学报》、《中国激光》、*Chinese Optics Letters* 特发起“光学期刊优秀论文评选活动”,在光学泰斗王大珩先生的支持下,本活动特命名为光学前沿——首届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动。自2008年起,期刊编辑部将每年举办优秀论文评选活动。

主办单位: 中国科学院上海光学精密机械研究所

联合主办单位: 相干(北京)商业有限公司

协办单位: 江西连胜实验装备有限公司

重庆师范大学光学工程重点实验室

时间安排:

参评论文统计截止时间: 2008年8月30日。

论文作者提交申请材料时间: 2008年7月1日~9月30日(论文被引的材料和论文所在项目或课题获奖的证明),请在
中国光学期刊网上提交。

审核时间: 2008年10月8日~10月30日。

编辑部将在2008年年底对获奖作者进行公开表彰,并颁发证书和奖金。

希望作者踊跃参加。

详情请浏览: <http://www.opticsjournal.net/Daheng.htm>

咨询电话: 021-69918427 胡冰 E-mail: hubing@siom.ac.cn

光学期刊联合编辑部

2008-06-16