

基于激光辅助的机器视觉汽车测距技术研究

孙斌

(杭州职业技术学院青年汽车学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 测距系统作为汽车防撞技术的核心组成部分,需要具备良好的实时性和高度的准确性。比较目前应用于汽车领域的测距方法,重点介绍了机器视觉技术,并针对它响应速度慢的缺点,引入了激光技术进行辅助测距。通过采用激光照射在前方障碍物上形成的激光光斑作为系统的特征点,达到了快速定位障碍物的目的,显著地提高了系统的反应速度以及恶劣天气下的适用性。实验结果显示在精度和反应速度两方面都满足了测距系统的实时性要求。相对于传统机器视觉技术在测量精确度上有 68% 的提升,在反应速度方面有 54% 的提升。

关键词 测量;机器视觉;激光;防撞

中图分类号 TP391.4 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.111204

Distance Measuring System Based on Laser-Aided Machine Vision

Sun Bin

(Youngman Automotive Institute, Hangzhou Vocational and Technical College,
Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract As a key component of car collision-avoidance system, distance measurement puts emphasis on response time and accuracy. Several ranging methods applied in automobile area are discussed. In particular, machine vision is introduced as a popular way in distance measurement. To improve its response time and usability under bad weather, laser is adopted to locate obstacles. Experimental results show that the system can meet the ranging requirement of collision avoidance. Compared to traditional machine vision, the combined way can reduce 54% response time and 68% deviation.

Key words measurement; machine vision; laser; collision avoidance

OCIS codes 120.3940; 150.3045; 110.2960

1 引言

近年来,随着汽车保有量的上涨,我国道路安全形势愈发严峻,公安部公布的数据显示,2010 年全国共发生道路交通事故 238351 起,其中汽车追尾事故占据的比例高达 23%。对公路事故的分析显示,80% 以上的事故起因为驾驶员反应不及时^[1]。德国奔驰汽车公司通过调查得出结论:若司机可以提前 0.5 s 采取措施,60% 的事故可以避免;若可以提前 1 s 采取措施,90% 的事故不会发生^[2]。汽车主动防追尾系统可以根据行车状态判断是否会发生事故,并且提前提醒驾驶员或是自动采取措施防止追尾发生^[3],是目前汽车安全研究领域的一个热点。

车辆测距是汽车防追尾系统的关键技术之一。常用的测距技术有毫米波雷达测距、激光测距以及机械视觉测距等多种方法。毫米波雷达测距^[4]利用目标反射的电磁波发现目标并测定位置,具有不受天气条件和障碍物形状限制等优点,然而目前毫米波雷达的成本较高,而且受限于功率,探测距离也不够理想。激光测距是利用窄光束对某一地区进行扫描,并根据反射光确定目标位置的方法,激光测距范围大,但易受天气、电磁等外界条件影响。机器视觉是一种模拟人眼的探测技术^[5,6],根据多个摄像头对同一目标图像的信息进行不同的计算,确定目标的位置^[7]。机器视觉测距技术的关键在于确定可以代表目标的特征点。这项技

收稿日期: 2012-06-09; 收到修改稿日期: 2012-07-08; 网络出版日期: 2012-10-15

基金项目: 浙江省教育厅科研项目(Y201222942)资助课题。

作者简介: 孙斌(1962—),男,讲师,主要从事汽车主动安全技术方面的研究。E-mail: jdxsb@163.com

术成本低,探测距离远,但计算量较大,响应速度较慢。

本文提出了一种以机器视觉为基础,利用激光进行辅助的测距方法,使用激光进行扫描确定障碍物,以激光照射形成的光斑作为机器视觉的特征点,由于激光光斑易于识别并且目标唯一,机器视觉技术反应速度慢的缺点得到了解决,同时在不良天气条件下的实用性也得到提升,成为一种适用于防追尾系统的测距技术。本文将详细阐述机器视觉测距技术的原理及此系统中激光技术的作用,并根据软件仿真的实验结果对系统的性能进行分析。

2 机器视觉工作原理及改进方法

机器视觉技术利用计算机来模拟人的视觉功能,从客观事物的图像中提取信息,进行处理并加以分析,最终用于实际检测、测量和控制。机器视觉技术最大的特点是信息量大、功能多和成本低。

2.1 机器视觉测距技术

机器视觉测距技术利用多个摄像头对同一特征点所拍摄的图像信息进行距离测算。整个测距过程分为两步:1)计算目标空间坐标,2)计算距离。

2.1.1 坐标计算

使用3个摄像头采集到的图像对物理场景建模,将3个摄像头分为匹配的两组,分两次对图像进行处理,实现对物理场景的建模。3个摄像头的编号分别为1号摄像头,2号摄像头和3号摄像头。在对物理场景进行建模时,先使用1号摄像头和2号摄像头对物理场景进行视频采集,然后使用1号摄像头和3号摄像头来对物理场景进行视频采集,将两组摄像头采集而来的图像信息进行处理进而得到对于物理场景的建模。

计算真实物理空间 P 点位置的原理如下:如图1所示,世界坐标系 (X, Y, Z) 中的空间任意点 P ,分别由1号摄像头及2号摄像头来拍摄。图1中1号摄像头位于图像左边,2号摄像头位于图像右边,如果 P 点是一个真实存在的点,则必定在两个摄像头成像平面上成像,若 P 在两个成像平面上分别成像于 P_1 和 P_2 ,在各自摄像头坐标系 XOY 平面中的坐标分别为 (u_1, v_1) 及 (u_2, v_2) 。由典型摄像头针孔成像模型可知, P, P_1 必在一条直线上, P, P_2 也必在一条直线上,摄像头与成像平面的距离为焦距 f ,真实空间中的 P 点与在1号摄像头以及2号摄像头成像平面中成的像 P_1 点及 P_2 点的射线正好交于一点,这点即为空间物理点 P 的位置。

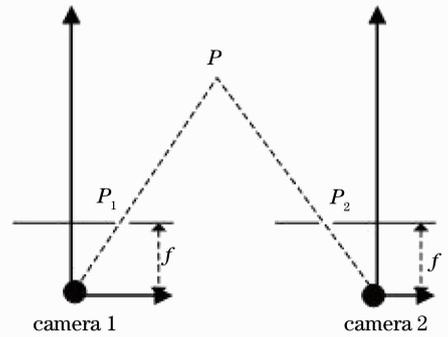


图1 双目成像原理
Fig.1 Binocular imaging

除此之外,还需要考虑两个摄像头成像平面的坐标系与世界坐标系的关系,通过摄像头拍摄单幅图片来确定摄像头与世界坐标系中原点的偏差 (C_{x_1}, C_{y_1}) 以及 (C_{x_2}, C_{y_2}) ,可以得到两个摄像头成像平面坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R}_1 和 \mathbf{R}_2 以及它们相对于世界坐标系的位移矩阵 \mathbf{T}_1 和 \mathbf{T}_2 。 \mathbf{R}_1 和 \mathbf{R}_2 都是 3×3 的矩阵, \mathbf{T}_1 和 \mathbf{T}_2 是一个 3×1 的矩阵。

假设拍摄两幅图像的1号摄像头以及2号摄像头的旋转矩阵分别为 \mathbf{R}_1 和 \mathbf{R}_2 ,位移矩阵分别为 \mathbf{T}_1 和 \mathbf{T}_2 ,通过投影变换可以将同一物理坐标转换在不同摄像头坐标系下, P 点在1号摄像头和2号摄像头上成像于 P_1 和 P_2 点,根据摄像头成像的线性理论,有

$$Zc_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}^1 & r_{12}^1 & r_{13}^1 \\ r_{21}^1 & r_{22}^1 & r_{23}^1 \\ r_{31}^1 & r_{32}^1 & r_{33}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1^1 \\ t_2^1 \\ t_3^1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$Zc_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}^2 & r_{12}^2 & r_{13}^2 \\ r_{21}^2 & r_{22}^2 & r_{23}^2 \\ r_{31}^2 & r_{32}^2 & r_{33}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1^2 \\ t_2^2 \\ t_3^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 (u_1, v_1) 与 (u_2, v_2) 分别为 P 点在摄像头平面坐标系中的坐标, (X, Y, Z) 为 P 点在世界坐标系下的坐标, $r_{i,j}^k$ 分别为旋转矩阵 R_k 的第 i 行第 j 列元素, 为 P 点在 1 号摄像头和 2 号摄像头平面坐标系中 Z 轴上的值。 t_i^k 为位移矩阵 T^k 第 i 行的元素, (1), (2) 式联立后可用最小二乘法求出 X, Y, Z 。

2.1.2 距离计算

在计算距离之前首先要判断特征点。一般来说, 特征点位于图像轮廓线急剧锐转的两侧(及拐角两侧), 以及较平直曲线与大曲率弧线的交接部位, 另外也包括拐点, 即凹凸向相反的曲线结合处^[8]。

确定特征点之后需要对其进行匹配, 去除干扰点^[9]。匹配判定方法如下: 假设两个强特征点的空间坐标分别为 $Q_1(x_1, y_1, z_1)$ 及 $Q_2(x_2, y_2, z_2)$, 那么 Q_1 与 Q_2 两点间距离 d 为

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}. \quad (3)$$

如果两个匹配点间的空间距离远远大于摄像头的解析精度, 那么可以认为这两个强特征点之间是不匹配的^[10]。不匹配的特征点被称作干扰点, 需要在计算距离之前消去。

此外, 两个摄像头对真实物理空间的 P 点进行计算之后, 可能会出现一些虚交的交点^[11]。如图 2 所示, 处于同一直线上的点 P_1 和 P_2 , 分别被 1 号摄像头和 2 号摄像头拍摄, 因为计算真实物理空间 P 点位置的时候是通过其在 1 号摄像头以及 2 号摄像头拍摄的成像点位置来计算的, 因此就可能出现在两个成像点与摄像头虚交的位置 P' 。虚交的 P' 点是系统的一种干扰点。这种干扰点不会在第 3 个摄像头中出现。因此为保证测量精度, 通常借助 3 号摄像头与 1 号(或 2 号)摄像头另立一组方程, 对于真实物理空间存在的 P 点, 必定在两个方程组里同样有解, 通过两次计算来实现对与真实物理空间点 P 的计算^[12]。

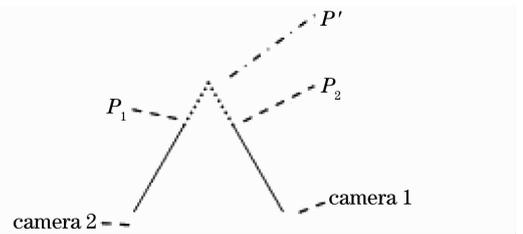


图 2 虚交点

Fig. 2 Virtual intersection point

消去干扰点之后即可根据两点间距离(3)式计算距离。

2.2 激光辅助的机器视觉测距技术

2.1 节介绍了机器视觉测距技术的基本原理, 在汽车主动防追尾系统的应用中仍有以下不足:

- 1) 受天气和光线限制: 一旦遭遇雨雪、大雾等恶劣天气或是夜晚等光线不足的环境, 常规的机器视觉测距系统会失效;
- 2) 响应速度较慢: 由于常规机器视觉测距技术选定的特征点数目较大(平均每次判定 20~30 个特征点), 根据坐标计算方法每个特征点至少需要解两组方程, 导致了巨大的计算量, 从而影响了响应速度;
- 3) 误差较大: 传统的机器视觉测距技术受图像质量和背景环境的影响较大, 存在较大的误差。

针对以上 3 个问题, 提出了借助激光辅助机器视觉进行测距的方案。具体方法为在车头安装激光发射器向前发射激光束, 并使用激光在前方障碍物上形成的光斑中心作为系统的特征点, 降低了特征点数目, 从而降低了计算量, 实时性大大提高。采用重心算法计算光斑中心, 并且采用图像灰度化、颜色匹配等方法对图像数据进行预处理, 减少误差。受益于激光的穿透性, 这种测距方案在光线不足或是气象条件恶劣的情况下依然可以发挥作用。

3 激光辅助测距

激光辅助模块的主要任务是为机器视觉系统提供测距特征点。将激光光斑中心视为特征点, 对光斑中心的计算越精确, 则系统的误差越小。常用的计算光标中心的方法有 Zernike 多项式拟合法^[13]、对称法和重心法等。Zernike 多项式法通过读取像素点信息, 带入多项式进行拟合以确定多项式系数; 这种方法分辨率高, 较为精确, 然而计算量过大, 不适应防撞系统的实时性要求。对称法利用光强分布的圆对称特性求取中心, 计算量较小。然而对图像要求极高, 在光斑图像非标准圆形的情况下精确度低, 存在较大的原理性误差。灰度重心法读取像素点的灰度(亮度)值, 通过加权平均求出中心; 这种方法计算量适中, 结果较准确, 但受图像噪声影响较大。本文采用灰度重心法计算光斑中心。为了提高准确性, 减少误差, 在计算光标重心之前,

系统采用了图像灰度化、色彩识别和背景过滤等多种方法对图像进行预处理,减少噪声的影响。

3.1 图像预处理

图像预处理的目的是提取激光光斑,减少图像噪声的干扰。其步骤如下:

1) 颜色匹配。颜色匹配的目的在于去除代表其他光源的干扰,仅保留代表激光的像素点。一般情况下图像每像素由3个字节表示,这3个字节分别代表着此像素红色(R)、绿色(G)和蓝色(B)的亮度。这3个字节的比值决定了此像素的颜色。这一步将每个像素与已知的激光颜色信息进行对比,滤去色彩比值不符的像素点。为了简化计算,可以采用颜色为单色或双色组合的激光。比如若采用绿色激光,则在除去背景颜色的影响后,符合条件的像素点的G分量应远大于R或B分量。其数学表示为

$$G(i,j)/[R(i,j) - C_R] > p, \quad (4)$$

$$G(i,j)/[B(i,j) - C_B] > q, \quad (5)$$

式中 $R(i,j)$ 、 $B(i,j)$ 和 $G(i,j)$ 分别代表此像素的红、蓝和绿色分量。 p 和 q 为预设的比例系数。 C_R 和 C_B 为修正系数,作用是削弱背景反光的影响,它们与像素点 (i,j) 临近像素点的R、B分量相关,相关系数根据实践进行调整以求最佳匹配效果。

2) 图像灰度化。图像灰度化指将彩色图像按一定的变换关系转换为黑白两色,目的是改善画质,增强清晰度。在转换后的图像中,每一个像素的灰度(亮度)采用一个字节表示,此字节表示的数字越大,则该点越白,即越亮。灰度转换公式为

$$H(i,j) = 0.11R(i,j) + 0.59G(i,j) + 0.3B(i,j), \quad (6)$$

式中 $H(i,j)$ 为像素灰度。

预处理的最后一步为灰度阈值过滤。具体方法为预设阈值 k ,将各个像素点的灰度与阈值对比,滤去灰度小于阈值的像素点。阈值 k 为可调数值,通过改变 k 的数值可以调整过滤条件,以达到最优的预处理效果。阈值过滤可以有效的减少因为虚化等原因引起的图像模糊问题。

3.2 重心法确定光斑中心

经过预处理后的图像代表着激光光斑的范围,可以视为一个二维稀疏矩阵。将矩阵的各个点带入(7),(8)式可得光斑中心的坐标。

$$X = \frac{\sum [H(i,j)i]}{\sum [H(i,j) - X_{\max}]} \cdot e_x, \quad (7)$$

$$Y = \frac{\sum [H(i,j)j]}{\sum [H(i,j) - Y_{\max}]} \cdot e_y, \quad (8)$$

式中 X 、 Y 为所求的坐标。 i 和 j 为坐标值, $H(i,j)$ 为各点的灰度值, X_{\max} 和 Y_{\max} 为 X 轴和 Y 轴的最大值, e_x 和 e_y 为单位像素在 X 轴和 Y 轴上的长度当量。

3节描述了激光辅助测距的基本原理。输入图像信息,输出特征点,即光斑中心的坐标。采用了重心法求取光斑中心,并应用了多种图像预处理方法来减少误差,提高测量精度。

4 实验结果及分析

为了验证本文提出的方法的有效性和可靠性,使用激光辅助的机器视觉技术进行测距实验,并与传统的机器视觉测距技术进行比较,说明激光辅助机器视觉汽车测距系统相对于传统的机器视觉测距系统在如下两方面有显著的提升:

1) 测量精度。测量精度标志着系统测量的准确性,越高的测量精度意味着系统的测距结果越接近真实值。通过对距离一定的障碍物进行模拟测量,比较两种测量所得的结果与目标结果的差异。

2) 反应时间。反应时间标志着系统完成一次测距所需要的时间,越短的反应时间意味着系统越早在危险情况下提出警告,从而避免事故的发生或减少事故的损失。实验通过记录每次测量过程所花费的时间,对两种测量技术的反应时间做出比较。

4.1 实验环境

实验的软硬件环境如下:

1) 摄像头:采用3个罗技(Logitech)C250摄像头,800 pixel×600 pixel。其中两个摄像头距离地面高度为30 cm,相距1 m,并以这两个摄像头的中心点作为系统坐标原点;另一摄像头位于原地后1 m,离地高度1.5 m(模拟车顶位置)。

2) 激光器:选用 vesine vp800 激光器,安置于系统坐标原点以提供激光光斑。

3) 计算单元:使用笔记本电脑模拟行车电脑。处理器选用 intel core 2 双核 2.0 g CPU, 2 g 内存。操作系统为 Windows7,控制软件采用 ASP.net 设计界面,使用 VC++ 语言编写功能。

4.2 实验数据

如图3所示,软件中的3个图像为3个摄像头拍摄的内容,图中的方框中显示各个特征点(已消除干扰点)的位置信息及花费的时间。图中左下方下划线标注的数据为本次实验的输出结果,即测距距离与花费时间。

实验对40、60、80、100 m的目标进行测距测试,每次测试5组数据,最终得到的结果如下表1~4所示。表中距离单位为m,时间单位为s,同时给出了与参考距离之间的相对误差(Dev.)。表中M、V代表传统的机器视觉技术的结果,L、A代表使用激光辅助的系统的结果。

表1 参考距离:40 m

Table 1 Reference distance: 40 m

M	Dis. /m	41.32	42.35	40.93	42.64	41.25
•	Dev. /%	3.3	5.9	2.3	6.6	3.1
V	Time /s	0.54	0.47	0.42	0.38	0.46
L	Dis. /m	40.62	40.49	40.81	40.70	40.56
•	Dev. /%	1.5	1.0	2.0	1.8	1.4
A	Time /s	0.17	0.21	0.23	0.19	0.24

表2 参考距离:60 m

Table 2 Reference distance: 60 m

M	Dis. /m	62.55	63.61	62.22	63.57	61.95
•	Dev. /%	4.3	6.0	5.6	6.0	3.3
V	Time /s	0.45	0.48	0.43	0.47	0.50
L	Dis. /m	61.04	61.19	60.70	61.13	60.93
•	Dev. /%	1.7	2.0	1.2	1.9	1.6
A	Time /s	0.19	0.21	0.24	0.14	0.27

图3 实验软件截图

Fig. 3 Software UI in experiment

表3 参考距离:80 m

Table 3 Reference distance: 80 m

M	Dis. /m	83.31	84.52	84.91	86.68	85.21
•	Dev. /%	4.1	5.6	6.1	8.4	6.5
V	Time /s	0.34	0.47	0.42	0.38	0.46
L	Dis. /m	81.32	81.18	80.79	81.62	80.90
•	Dev. /%	1.7	1.5	1.0	2.0	1.1
A	Time /s	0.17	0.21	0.23	0.19	0.24

表4 参考距离:100 m

Table 4 Reference distance: 100 m

M	Dis. /m	104.3	105.5	104.9	106.6	105.2
•	Dev. /%	4.3	5.4	4.9	6.6	5.1
V	Time /s	0.34	0.47	0.42	0.38	0.46
L	Dis. /m	101.6	101.4	101.7	101.6	102.0
•	Dev. /%	1.6	1.4	1.7	1.6	2.0
A	Time /s	0.17	0.21	0.23	0.19	0.24

从表中数据可以看出,在每个参考距离的实验中,经过激光辅助后,系统的反应时间和误差得到了降低。总体来说系统误差减少了68%,反应时间减少了54%。

5 结论

机器视觉技术是近年来工程领域的一个研究热点,本质上是一种仿生学研究,模拟人的双眼根据视觉差判断物体距离的远近,被广泛应用于汽车、航天和自动化装配等各项领域。随着多传感器融合技术的发展,机器视觉技术发展的一大趋势是与其他技术相融合,各种技术有不同的特征:实时的或非实时的,模糊的或确定的,受天气影响大或小等。通过融合不同的技术,进行取长补短使系统的可靠性大大提高。

本文将激光技术与机器视觉技术结合起来,提出了一种基于激光辅助的机器视觉测距技术,以激光击中障碍物形成的光斑作为机器视觉技术的特征点,借助激光光斑的特殊性进行障碍物快速定位,同时减少了需要计算的特征点数目,降低了计算量。该系统相对于传统的机器视觉测距系统有如下3点的提升:

1) 反应速度大大加快:受益于计算量的减少以及光斑特征点的快速定位,可以快速的确定障碍物的位置,从而缩短了防撞系统的扫描间隔,提高了系统的可靠性。

2) 可工作于恶劣天气:不借助于自然可见光,可工作于光线条件不好的情况。另外由于激光技术具有很强的穿透性,在雨雪或者大雾的情况下系统也具有工作能力。

3) 测量精度提高:为了减少系统的误差,采用了多种图像预处理技术提高测量精度。实验数据表明,通过激光测距辅助,系统精度提高了68%,反应速度提高了54%,系统的可靠性有了显著提升。

下一步的工作将在现有的基础上,完善障碍物坐标定位系统,从而进一步提高系统的反应时间以及有效测量范围。另外将测距系统与防追尾系统的其他部分相整合,应用于汽车之上。

参 考 文 献

- 1 H. Teimoori, A. V. Savkin. A biologically inspired method for robot navigation in a cluttered environment [J]. *Robotica*, 2010, **28**(5): 637~648
- 2 M. G. Perhinsch, M. R. Napolitano, S. Tamayo. Integrated simulation environment for unmanned autonomous systems—towards a conceptual framework [J]. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2010
- 3 R. Bloss. Live demonstrations highlight unmanned vehicle show [J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2008, **35**(2): 103~107
- 4 T. M. Mitchell, Zeng Huajun, Zhang Yinkui. Machine Learning [M]. Beijing: China Machine Press, 2003
T. M. Mitchell, 曾华军, 张银奎. 机器学习[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
- 5 Shi Xiaojun, Zhang Xiaohui, Hu Zhongxiang *et al.*. Measurement of plane grinding surface roughness based on machine vision[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 320~323
时小军, 张小辉, 胡仲翔 等. 基于机器视觉的平磨表面粗糙度检测[J]. 中国激光, 2008, **35**(s2): 320~323
- 6 Tian Yuanyuan, Huang Hecheng, Tan Qingchang *et al.*. Size measurement of parts based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011501
田原媛, 黄合成, 谭庆昌 等. 基于机器视觉的零件尺寸测量[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(1): 011501
- 7 Chen Jiang. Dual-eye 3D Measuring Techniques [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006
陈江. 二目立体测量系统关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006
- 8 Hu Lingshan. Dual-eye 3D Machine Vision of Dynamic Robot [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005
胡凌山. 移动机器人双目立体视觉技术研究[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005
- 9 Gao Xiaoliang, Wang Zhiliang, Liu Jiwei *et al.*. Variable domain algorithm for image segmentation using statistical models based on intensity features[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0115003
高晓亮, 王志良, 刘冀伟 等. 基于灰度特征统计的可变区域图像分割算法[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0115003
- 10 Wen Qingchuan, Da Feipeng, Fang Xu. Calibration for gaze tracking system based on binocular stereo vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1015002
温晴川, 达飞鹏, 方旭. 基于双目立体视觉的视线跟踪系统标定[J]. 光学学报, 2012, **32**(10): 1015002
- 11 Zhu Jigui, Zou Jian, Lin Jiarui *et al.*. Error-compensation algorithm with high-accuracy for photographic image processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0912004
郝继贵, 邹剑, 林嘉睿 等. 摄影测量图像处理的高精度误差补偿法[J]. 光学学报, 2012, **32**(9): 0912004
- 12 Wang Wenfeng, Zhu Shuhua, Feng Yihao *et al.*. Parallel edges detection from remote sensing image using local orientation coding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0315001
王文锋, 朱书华, 冯以浩 等. 基于局部方向编码的遥感影像平行边缘识别[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0315001
- 13 Shan Baozhong, Wang Shuyan, Niu Hanben *et al.*. Zernike polynomial fitting algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(3): 318~323
单宝忠, 王淑岩, 牛憨笨 等. Zernike 多项式拟合方法及应用 [J]. 光学精密工程, 2002, **10**(3): 318~323