

高速公路收费道口自动车型识别系统中的车轮检测算法

宓为建^a, 薛润^b, 沈阳^c, 宓超^a

(上海海事大学 a. 集装箱供应链技术教育部工程研究中心;
b. 物流工程学院; c. 高等技术学院, 上海 201306)

摘要:为提高高速公路收费道口自动车型识别系统(Vehicle Recognition System, VRS)的识别准确率,针对基于三维成像的VRS中的车轮检测,提出一种优化算法,以精确检测出车轮的位置和大小.利用激光雷达检测到有疑似车轮的目标通过扫描平面时,控制摄像头抓拍图像;对抓拍到的图像进行灰度化、图像增强、边缘提取、背景分离等处理;利用霍夫变换进行车轮边缘拟合,检测图像中是否含有车轮,若有,可同时得到车轮的位置和大小;在MATLAB中实现该算法.结果表明,该车轮检测算法能够快速、精确地检测出车轮,效果良好.

关键词: 车轮检测; 激光雷达; 图像处理; 霍夫变换

中图分类号: U412.366; TN957.52

文献标志码: A

Wheel detection algorithm in automatic vehicle recognition system for highway toll lanes

MI Weijian^a, XUE Run^b, SHEN Yang^c, MI Chao^a

(a. Engineering Research Center of Container Supply Chain Technology, Ministry of Education; b. Logistics Engineering College; c. Higher Technical College, Shanghai Maritime Univ., Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to improve the recognition accuracy rate of automatic Vehicle Recognition System (VRS) for highway toll lanes, in view of the wheel detection in three-dimensional imaging-based VRS, an optimized wheel detection algorithm is proposed. This algorithm can accurately detect the position and size of a wheel. When an object suspected to be a wheel is detected passing the scanning plane by laser radar, a camera is controlled to capture the image. The image is processed by graying, image enhancing, edge extracting, and background separating. The wheel edge is fitted by Hough transform to detect whether there is a wheel in the image. If so, the position and size of the wheel can be obtained at the same time. The algorithm is implemented in MATLAB. The result shows that the algorithm can detect wheels quickly and accurately and is of good effect.

Key words: wheel detection; laser radar; image processing; Hough transform

收稿日期: 2013-11-21 修回日期: 2014-04-23

基金项目: 上海市教育委员会科研创新项目(14ZZ140);上海市教育委员会上海高校青年教师培养资助计划;上海市科学技术委员会部分地方院校能力建设专项计划(13510501800);上海海事大学研究生学术新人培育计划(GK2013071)

作者简介: 宓为建(1956—),男,浙江海宁人,教授,博导,博士,研究方向为港口机械电子,(E-mail)miweij@126.com

0 引言

智能化交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)的不断发展,使交通运输的效率不断提高,正常的交通秩序得以有效维持.路桥收费站不停车收费系统(简称ETC)作为ITS的重要组成部分,不仅可以节省收费时间,减缓交通拥堵,而且可以节约人力,降低运营成本.

自动车型识别是ETC的关键技术,而车轮检测在车型识别系统(Vehicle Recognition System, VRS)中具有重要的作用,通过车轮检测可以得到轴数和轴距这两个关键的特征量,作为高速公路收费分类的重要依据.

目前已有很多学者针对车型识别进行大量的研究,提出不同的参数特征提取、分类器设计等方法.王慧斌等^[1]和冯超等^[2]采用支持向量分类方法,根据“一对一”策略构造三类车型分类器,并采用KNN方法进一步提高支持向量机子分类器的分类准确率.周爱军等^[3]基于背景减法提取运动车辆目标,并提取轿车、客车和货车Harris角点作为标准样本,分别计算待识别车辆与3种标准样本Harris角点的Hausdorff距离,认定Hausdorff距离较小的两者具有相同的车型.马丽娜等^[4]提出在一定时间内根据实时阈值判定背景是否需要更新的算法,据此设计一个速度快、鲁棒性好的自动VRS. WANG等^[5]利用小波分析得到多尺度边缘图像,并将不变矩用于防倾斜、抗干扰,以修正车辆图像.

虽然上述几种车型识别的研究方法和重点有所不同,但都是基于视频图像的研究,即对拍摄到的车辆图像进行分析、处理、特征提取、分类等.^[6-8]基于图像的车型识别算法受背景、光线及车身颜色的干扰严重,而且上述几种识别方法只针对一般车型进行分类,提取的特征量少,对我国复杂的车型以及改装车很难进行正确分类,因此基于图像的车型识别很难真正用于环境复杂的道口.

本文算法涉及到的基于三维成像的VRS利用激光雷达对通过车辆进行实时扫描获取车辆轮廓信息,同时利用辅助摄像头获取车辆的速度信息并检测车轮.当车辆完全通过激光雷达扫描区域后,根据每个截面的速度信息将所有的截面数据进行空间重组;然后对截面做插值处理去除多余的截面数据,还原出车辆的真实轮廓;再将三维轮廓转化成二维平面灰度图,提取车长、车高、底盘高、轴数、轴距、车窗等车型特征;最后把提取出的特征量放入车型分类器中分类.该VRS不受光线、环境、车辆颜色影响,

抗干扰性强,可以很好地应用于收费站道口.

1 系统描述

1.1 整体架构

基于三维成像的VRS使用激光雷达和摄像头作为传感器,系统的结构示意图见图1.整套系统安装在车道两侧,见图2.激光雷达对通过的车辆进行垂直平面内的扫描,得到雷达至车辆侧面的距离信息;摄像头抓拍车辆的侧面图像,用于获取车速和进行车轮检测.



图1 系统结构示意图

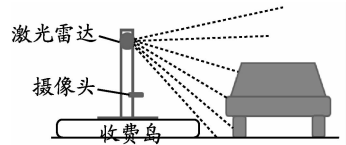


图2 系统安装位置

1.2 截面特征

激光雷达对车辆进行的是垂直平面内的扫描,扫描平面垂直于车辆行驶方向,返回的数据是雷达到车辆侧面的距离,经过笛卡尔坐标转换得到车辆截面轮廓点的坐标.图3中轿车的截面A和B的轮廓点坐标分别见图4和5.

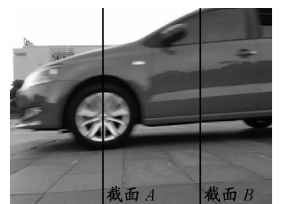


图3 轿车侧面图像

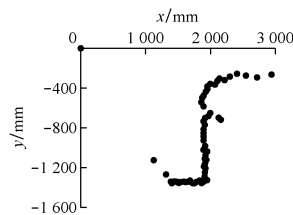


图4 截面A轮廓

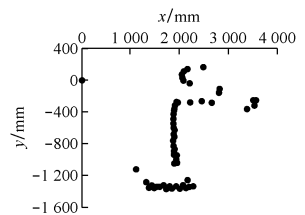


图5 截面B轮廓

坐标原点(0,0)是激光雷达所在位置.有很多点集中在 $y = -1350$ mm附近,这些点是激光雷达扫描光线从地面返回的点,说明激光雷达距离地面大约1.35 m;有很多点集中在 $x = 1800$ mm附近,这些点是激光雷达扫描光线从车身返回的点,说明激光雷达与车身侧面的水平距离大约是1.8 m.

图3中的截面A通过车轮圆心,也即通过车轮与地面的切点,因此该截面的车身轮廓点一直延伸到地面(图4),此时雷达只可以扫描到车身轮廓左侧的地面.截面B不通过车轮,因此该截面的车身轮廓点与地面有一段距离(图5),雷达可以扫描到

车身轮廓右侧的地面.根据这点,可以利用激光雷达检测是否有疑似车轮的目标经过扫描平面.

设激光雷达离车身侧面的水平距离为 D , 偏差为 ΔD , 雷达距地面高度为 H , 偏差为 ΔH , 车轮检测距离为 Y , 则车轮圆心所在截面的轮廓点 (x, y) 满足

$$\begin{cases} D - \Delta D \leq x \leq D + \Delta D \\ y \leq -H \pm \Delta H + Y \end{cases}$$

又设满足上述条件的轮廓点的个数为 N , 阈值为 M . 当满足条件 $N > M$ 时, 可认为该截面具备上述截面 A 的特征, 即该截面可能为车辆截面且通过车轮圆心.

1.3 图像抓拍

当激光雷达扫描到的截面轮廓点具备第 1.2 节中的两个条件时, 控制摄像头抓拍车辆图像, 即抓拍图像的时刻为车轮圆心刚好经过雷达扫描平面的时刻, 这是该车轮检测算法的关键.

首先, 由于激光雷达的扫描平面在摄像头的视角范围内, 可保证抓拍到的图像中含有疑似车轮信息. 一旦有车轮经过扫描平面, 摄像头就会抓拍, 不会发生车轮遗漏的情况. 其次, 由于截面的特殊性, 车轮圆心所在直线就是激光雷达扫描平面在图像中对应的直线, 如图 6 中直线 $y = y_0$. 而激光雷达和摄像头都已固定, 所以这条直线在图像中的位置不变, 因此车轮圆心所在直线在图像中的位置随之确定. 这也是该算法的一大优点, 通过硬件标定的方法确定车轮圆心坐标 (x_0, y_0) 中的 y_0 , 可以减少车轮圆方程的参数个数, 提高求解速度.

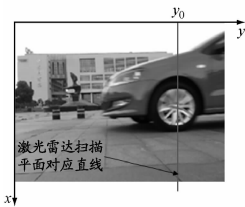


图 6 车轮圆心所在直线标定

然而, 轮胎与地面是软接触, 而且由于车辆自身及装载货物的重量会导致轮胎被压扁, 轮胎与地面的接触不再是理论上的一个点, 而变成一小段线段, 尤其是大型货车, 见图 7.



图 7 车轮与地面接触

我国对驶入道口的车辆限速 $v = 5 \text{ km/h}$, 激光雷达的工作频率 $f = 50 \text{ Hz}$, 此时相邻两个扫描截面的间距

$$S = v \times \frac{1}{f} \approx 2.8 \text{ cm} \quad (1)$$

图 7 中选取的轮胎与地面接触的长度 $L \approx 15 \text{ cm}$, 当这个车轮通过扫描平面时, 激光雷达会检

测到大约 5 个连续的特殊截面, 此时摄像头连续抓拍得到一图像序列, 而不再是理想状态下的单幅图像. 因此, 在进行图像预处理前, 要先从图像序列中提取一幅合适的图像. 若序列中有奇数张图像, 取其中间的一幅进行车轮检测; 若序列中有偶数张图像, 约定取其中间两幅中的前一幅.

2 图像预处理

2.1 灰度化

摄像头抓拍到的图像是彩色图像, 包含大量的数据, 如果直接进行处理, 计算量太大, 影响车轮检测的速度. 另一方面, 彩色图像对于光线很敏感, 而道口的光线变化又很大, 这也导致直接处理彩色图像会很麻烦. 因此, 首先将抓拍到的彩色图像进行灰度化处理, 以减小光线的干扰. 一般的摄像机获取的大多是 RGB 彩色图像, 则该类图像的灰度值计算公式为

$$\text{灰度值} = R \times 0.3 + G \times 0.59 + B \times 0.1 \quad (2)$$

式中: R, G, B 分别表示彩色图像的红、绿、蓝三基色分量.

2.2 图像增强

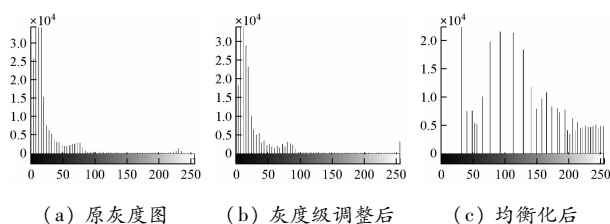
当光线不足时, 抓拍到的图像的灰度值会过于集中, 导致图像变得灰暗, 对比度不足, 视觉效果差. 直方图包含图像的丰富信息, 主要用在图像分割、图像灰度变换等处理过程中, 对增强轮廓线清晰度效果较佳, 算法简单. 本算法利用灰度级调整和直方图均衡化增强图像的对比度, 提高图像的视觉效果.

图 8 显示灰暗图像经灰度级调整和直方图均衡化后的效果, 图像的对比度得到明显的增强, 轮廓信息更为突出. 图 9 是这 3 幅图对应的直方图.



(a) 原始灰度图 (b) 灰度级调整 (c) 直方图均衡化

图 8 灰度值调整



(a) 原灰度图 (b) 灰度级调整后 (c) 均衡化后

图 9 直方图对比

另外, 由于车速过快、尾气热浪(有些大货车的尾气排放口位于车头与车厢连接处)等, 摄像头抓拍到的图像会变得模糊, 边缘轮廓信息被减弱, 因此

在提取边缘之前还需进行锐化滤波,突出图像中的边缘信息.

图10是对模糊图像进行锐化处理后的效果图.图10(b)是未经锐化处理而直接进行边缘提取的结果,轮廓信息被大大减弱,尤其是车轮部分,完全无法辨认车轮边缘信息.图10(c)是经锐化处理后的边缘,通过对比可以发现,边缘轮廓信息得到明显的加强.



(a) 模糊图像灰度图 (b) 直接提取边缘 (c) 锐化后提取边缘

图10 锐化处理效果

2.3 边缘提取

由于车轮内部的灰度变化小,且车型到车轮的灰度变化一般是一个突变的过程,所以本算法中设定车轮的边缘为阶梯型边缘,所用到的边缘检测算法是实现简单、运算快速的基于一阶偏微分的梯度算法,该算法基本能够保证获取车轮位置的实时性和精确性.

常用的梯度边缘检测算子有 Roberts 算子、Prewitt 算子和 Sobel 算子等.^[9] Roberts 算子采用 2×2 模板作为卷积核, Sobel 算子和 Prewitt 算子采用 3×3 模板作为卷积核. Roberts 算子虽然定位精度较高,但对噪声较为敏感; Sobel 算子结合 Gaussian 平滑和微分,对噪声有一定的鲁棒性. Sobel 算子对像素位置的影响进行加权处理,可以降低边缘模糊程度,比 Prewitt 算子效果更好.另外,由于 Sobel 算子是滤波算子的形式,可以利用快速卷积函数进行边缘提取,简单有效且速度快,具有良好的实时性.^[10-12] 因此,本算法采用 Sobel 算子进行边缘提取,其效果见图10.

2.4 背景剔除

边缘检测算法可以将车辆边缘和环境的边缘同时检测出来,为得到无污染的车辆边缘,还需剔除环境背景.背景剔除采用帧差法,该算法的实质是图像间的减法运算,两幅图像中灰度相同的像素点作差为零即为黑点.由于相邻两帧间的时间间隔非常短,用前一帧图像作为当前帧的背景模型具有较好的实时性,其背景不积累,且更新速度快、算法简单、计算量小.

假定前一帧的灰度图像为 $P_{n-1}(x, y)$, 当前帧的灰度图像为 $P_n(x, y)$, 那么环境剔除后的输出图像为

$$C(x, y) = |P_n(x, y) - P_{n-1}(x, y)| \quad (3)$$

$$\text{其中, } C(x, y) = \begin{cases} 0, & (x, y) \in \text{车辆} \\ 1, & (x, y) \in \text{背景} \end{cases}$$

3 检测算法

3.1 霍夫变换

霍夫变换是从图像中识别几何形状的基本方法之一,应用很广泛,也有很多改进算法.其核心思想是把图像中属于某种图形的点集(二维)映射到一个点(可以是高维)上,这个点就是图形的参数.霍夫变换不仅能够识别图像中有无需要检测的图形,而且能够定位到该图像(包括位置、角度等).^[13]

最基本的霍夫变换是从黑白图像中检测直线,见图11.直线 $y = k_0x + b_0$ 上的点集由图像空间映射到霍夫空间的位置都相同,这是因为其参数 k_0 和 b_0 固定不变.

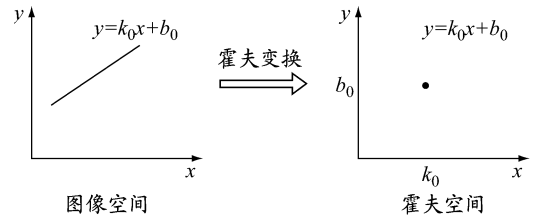


图11 检测直线的霍夫变换

3.2 车轮检测

车轮圆心通过的截面具有第1.2节中截面A的特征,然而并非具备该特征的截面就一定通过车轮圆心的.有些货车的货物挂到地面,与地面也有切点,通过该切点的截面轮廓点也有可能满足第1.2节中的两个条件.因此,激光雷达经过扫描截面只能检测到有疑似车轮的目标,为准确地检测车轮,还需进一步处理.

车轮边缘是圆形,因此利用霍夫变换进行车轮检测就是要寻找图像的某个特定位置是否含有圆.当然,也有可能只是一段圆弧,因为当车辆离VRS比较近时,摄像头不能抓拍到整个车轮,仅能抓拍到车轮的一部分.如果可以找到圆或者圆弧,说明该图像中确实含有车轮,同时也得到车轮的位置和大小.^[14-16]

圆方程用标准式表示为

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R_0 \quad (4)$$

圆方程比直线方程多一个参数,霍夫空间将变成一个三维空间,这无疑会增加搜索的范围.如果图像比较大,那么这样的遍历搜索相当耗时,不满足车型识别的快速响应性.

正如第1.3节所提到的,本算法根据截面特征控制图像抓拍时刻,使得车轮圆心所在直线与激光雷达扫描平面所对应的直线一致,从而直接确定车轮圆心坐标 (x_0, y_0) 中的 y_0 ,进而减少圆方程的参数个数,巧妙地降低霍夫空间的维度,减小搜索范围,缩短检测时间。

然而,当车辆以一定的角度进入摄像头或车速过快时,图像中的车轮会发生扭曲且其边缘变得模糊,所以车轮边缘并非理想状态下规则的圆,这些边缘点经霍夫变换后并不能集中在 (x, R) 空间中的某一精确的点 (x_0, R_0) 上,即同一个车轮边缘上的点映射到霍夫空间存在一定的偏差 $(\Delta x$ 和 $\Delta R)$ 。对于这种情况,可以将霍夫空间网格化,使得边缘点映射到霍夫空间后落在某一格子内(图12),然后搜索每个格子内的点数,再取峰值所在的格子左下角的坐标作为车轮圆方程的解。通过网格化,可以有效地减少边缘不规则带来的影响。

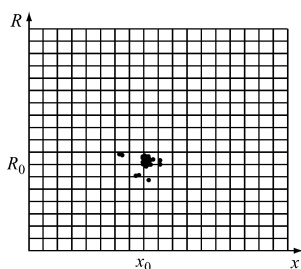


图12 网格化霍夫空间

本算法利用MATLAB实现对车轮的检测,图13显示在MATLAB中利用霍夫变换对图6中的轿车进行车轮检测的效果。该算法可以精确地定位车轮位置及大小。



图13 霍夫变换检测结果

4 实例验证

表1为8种不同类型车辆的车轮检测结果以及检测速度。实验表明,本文提出的算法可以有效、快速地检测出各种类型车辆的轴数和轴距信息。

为验证本算法的抗干扰能力,在不同的天气、光线、清晰度条件下,在真实收费道口对本算法进行全天候测试。对算法的轴数准确率、轴距误差、轴型识别率和识别速度进行统计,见表2。

统计结果表明,在不同的天气、光线、清晰度条件下,各指标基本稳定且达到预期效果,该算法可以有效地处理不同天气、光线、清晰度等条件下的不同质量的图像,抗干扰能力强。

表1 不同类型车辆的实验结果

序号	车辆	实际轴数	检测结果	实际轴距/m	检测结果/m	误差/%	检测时间/s
1	轿车	2	2	2.74	2.68	2.2	0.656
2	面包车	2	2	3.11	3.02	2.9	0.824
3	中型客车	2	2	3.67	3.78	3.0	0.742
4	大型客车	2	2	3.94	3.84	2.5	0.856
5	皮卡	2	2	2.95	2.85	3.4	0.912
6	搅拌车	3	3	3.85	3.68	4.4	0.814
7	中型卡车	3	4	5.00	5.20	4.0	0.684
8	大型卡车	4	4	7.78	7.92	1.8	0.745

表2 不同条件下的检测效果

干扰因素		轴数准确率/%	轴距误差/%	轴型识别率/%	识别时间/s
天气	晴朗	98.5	3.6	96.8	0.746
	多云	97.7	3.4	96.3	0.684
	阴雨	98.3	3.5	96.5	0.821
光线	白天	98.6	3.4	97.2	0.665
	傍晚	97.8	3.4	95.7	0.774
	夜晚	97.4	3.2	95.6	0.786
清晰度	清晰	98.2	3.6	96.8	0.744
	一般	97.7	3.5	96.6	0.752
	模糊	96.4	3.6	95.2	0.766

通过与其他VRS的轴型识别率和识别速度的对比,再一次验证本算法的精确和高效,见表3。

表3 不同VRS的车轮检测对比

VRS	轴型识别率/%	识别时间/s
基于三维成像	>96.0	<0.8
基于视频图像	<90.0	<1.0
基于红外光幕	<95.0	<0.9

5 结束语

本文提出一种利用霍夫变换检测车轮的算法,主要用于基于三维成像的VRS中,可有效解决对轴数和轴距特征的提取。该算法最大的优点是激光雷达扫描平面映射在图像中的直线位置固定,而车轮圆心就在这条直线附近,这样就能降低霍夫空间的维度,提高算法的速度和精度。对实验和路测数据的统计与分析表明,该车轮检测算法准确率可达96%以上。

参考文献:

- [1] 王慧斌, 芦荟. 基于视频的车型特征提取及识别方法研究[J]. 微型电脑应用, 2010, 26(10): 50-53.
- [2] 冯超, 贺俊吉, 史立. 基于支持向量机的轿车车型识别[J]. 上海海事大学学报, 2011, 32(3): 85-89.
- [3] 周爱军, 杜宇人. 基于视频图像 Harris 角点检测的车型识别[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2008, 11(1): 67-70.
- [4] 马丽娜, 曹新德. 基于图像处理技术的车型自动识别系统设计[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2011, 26(3): 42-44.
- [5] WANG Shuaizong, LI Xiaoping, YU Xiaoxing, *et al.* Research on the vehicle recognition based on invariant moment[C]// New Trends in Information Science and Service Science, IEEE 2010 4th Int Conf, 2010: 329-332.
- [6] 季晨光, 张晓宇, 白相宇. 基于视频图像中的车型识别[J]. 辽宁工业大学学报: 自然科学版, 2010, 30(1): 5-7.
- [7] ZHENG Mingxie, GOTOH T, SHIOHARA M. A hierarchical algorithm for vehicle model type recognition on time-sequence road images[C]// IEEE Intelligent Transportation Systems Conf, 2006: 542-547.
- [8] ZHAN Wei, YANG Junkai. Real time and automatic vehicle type recognition system design and its application[C]// Advances in Biomedical Engineering, Int Conf Mechanical Engineering and Automation, 2012, 10: 252-258.
- [9] 赵娟娟. 数字图像边缘检测方法的对比分析及优化[J]. 甘肃科学学报, 2012, 24(3): 143-146.
- [10] 袁春兰. 基于 Sobel 算子的图像边缘检测研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 85-87.
- [11] ZHAO Zhenbing, WANG Rui. A method of infrared/visible image matching based on edge extraction[C]// Image & Signal Processing, IEEE 2010 3rd Int Congress, 2010: 871-874.
- [12] WANG Kefei. Edge detection of inner crack defects based on improved Sobel operator and clustering algorithm[J]. Appl Mech & Mat, 2011(55/56/57): 467-471.
- [13] 杨治明, 周齐国. 基于霍夫变换理论的图形识别[J]. 重庆工业高等专科学校学报, 2002, 17(4): 16-17.
- [14] CHEN Xing, LU Ling, GAO Yang. A new concentric circle detection method based on Hough transform[C]//Comput Sci & Education, IEEE Proc 7th Int Conf, 2012: 753-758.
- [15] 秦开怀, 王海颖, 郑辑涛. 一种基于 Hough 变换的圆和矩形的快速检测方法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(1): 109-115.
- [16] 才秀凤, 马立肖, 赵占芳. 基于改进 Hough 变换的圆形物体检测[J]. 电脑开发与应用, 2007, 20(3): 40-42.

(编辑 贾裙平)

(上接第 54 页)

- [3] 安明, 陈善广, 刘玉庆. 基于数据手套的虚拟手精确建模的研究与实现[J]. 计算机仿真, 2010, 27(1): 241-244.
- [4] LEE J, KUNII T L. Constraint-based hand animation[J]. Models & Techniques in Comput Animation World, 1993: 110-127.
- [5] LEE J, KUNII T L. Model-based analysis of hand posture[J]. Comput Graphics & Applications, 1995, 15(5): 77-86.
- [6] 杨志祥. 面向虚拟维修的虚拟人上肢运动控制关键技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2009.
- [7] 王乘, 周均清, 李利军. Creator 可视化仿真建模技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005: 6-8.
- [8] KAHLESZ F, ZACHMANN G, KLEIN R. Visual-fidelity dataglove calibration[C]//IEEE Proc Computer Graphics Int, 2004: 403-410.
- [9] Fifth Dimension Technologies Corporation. 5DT Data Glove Ultra Series User's Manual[Z/OL]. [2013-11-20] http://www.5dt.com/?page_id=34.
- [10] Ascension Technology Corporation. The Flock of Birds Manual[Z/OL]. [2013-11-20] <http://www.ascension-tech.com/products/articles.php>.
- [11] 殷磊, 韩静, 王焯, 等. 虚拟现实环境下虚拟手控制技术研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(2): 448-452.
- [12] 王锐, 钱学雷. OpenSceneGraph 三维渲染引擎设计与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 3-8.
- [13] 陈宁, 吕庆伦, 孙玉科. 基于 OSg 的视点跟随技术在船舶驾驶仿真系统中的应用[J]. 船舶工程, 2011, 33(6): 53-57.
- [14] 刘炜, 陈宁. 基于碰撞检测的坦克运动与地形匹配性研究[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2012, 26(4): 356-360.

(编辑 赵勉)