

一种基于单 CCD 与经纬仪的树木胸径测量方法^{*}

侯鑫新, 谭月胜, 钱 桦, 程朋乐

(北京林业大学, 北京 100083)

摘 要: 提出一种基于单 CCD 相机与经纬仪的树木图像的胸径测量方法, 利用单 CCD 相机采集的树木图像信息, 经过阈值分割、开运算、边缘提取等步骤提取树木胸径二维坐标; 利用经纬仪采集的角度信息转换经纬仪旋转坐标系、相机光心坐标系和图像坐标系, 得出胸径的三维坐标, 最终计算出胸径尺寸。采集了八组树木胸径, 平均绝对误差为 7.36 mm, 平均相对误差率为 2.46%, 完全满足精度要求, 验证了将单 CCD 相机与经纬仪应用于树木胸径测量的方法是可行的。

关键词: 单 CCD; 经纬仪; 胸径测量; 单目视觉; 图像处理

中图分类号: TP391; TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)04-1225-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.04.064

DBH measurement method based on tree images taken by single-CCD camera mounted on theodolite

HOU Xin-xin, TAN Yue-sheng, QIAN Hua, CHENG Peng-le

(Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper presented a kind of measurement method based on the tree images taken by a single CCD camera mounted on a theodolite. Based on the tree images, it employed some approaches, including threshold segmentation, open computing, and edge detection, to extract the two-dimensional coordinates of the DBH; using the theodolite gathered space angle information, coordinate transformation among the theodolite rotating coordinate system, the camera optical center coordinate system and the image coordinate system, was made to get the three-dimensional coordinates of the DBH, with which the diameter at the breast-height size could be figured out. It took the breast-height diameters of 8 trees in the experiment, and the mean absolute error was 7.36 mm, while the mean relative error was 2.46%, which could completely meet the accuracy requirements. The results of the experiments show that the single CCD camera and the theodolite use in DBH measurement method is feasible.

Key words: single CCD camera; theodolite; diameter at breast-height measurement; monocular vision; image processing

0 引言

胸径(DBH)又称干径,指乔木主干离地表面 1.3 m 处的直径,断面畸形时,测取最大值和最小值的平均值^[1]。胸径是立木测定的最基本因子之一,其测量是评价立地质量和林木生长状况的重要依据^[2]。目前,林业森林资源调查测量胸径主要采用测树胸径尺进行手工测量,劳动强度和时间成本大,人为干扰因素增多,有些复杂林地或者难以到达的林地甚至无法进行调查^[3]。

目前基于机器视觉技术测量林木系统参数大致有两个方向:a)基于三维重建技术,通过采集多幅二维图片,经过摄像机标定、立体匹配等步骤提取三维信息;b)通过双目视觉理论,利用双 CCD 相机或者运动的单 CCD 相机获取图片,并利用几何关系进行图像识别。美国的 Clark^[4]开发出一种自动树木测量系统(TMS)模型工具,将近景摄影技术用在森林精确调查中,它是一款可以快速采集立木三维信息的工具。新西兰的 Brownlie 等人^[5]提出了一套基于图像摄影测量的 TreeD 系统,用来提取单株立木信息,这些立木信息提取方法大都是对采集

的图像进行人为处理,如通过鼠标点击确认等。Nihon 大学在各种入口处安装两台摄像机,通过两台摄像机获取图像的处理和匹配,利用成像的三角法则对人体的身高作出了判断^[6]。2005 年,杨华等人^[7]采用数码相机获取立木的图像信息,对单株立木图像信息的提取分别运用近景摄影测量 DLT 模型和双目立体视觉技术进行解算,解决了立木图像信息与立木二维坐标之间的解算问题。2009 年,吴晓兰等人^[8]提出一种基于区域增长和边缘检测的立木图像信息提取方法。通过颜色分量对标定参照物进行提取,以主干基部区域为种子区域对立木主体进行增长,遇到边缘时停止,再利用数学形态学对其进行处理,得到需要的立木主体部分,根据标定参照物所得到的参数,由摄影测量学求得树干的胸径、侧枝粗细、枝下高等信息。

基于以上讨论,为了满足林木测量过程中对尺寸精度、易操作性、测量范围的要求,本文提出一种基于单 CCD 与经纬仪的树木测量方法。首先在单 CCD 的基础上结合经纬仪功能,在双目视觉基础上建立单 CCD 与经纬仪的数学模型,转换经纬仪旋转坐标系、相机光心坐标系和图像坐标系,减少了双目视觉中对基距的测量要求和计算;然后利用计算机图像处理技

收稿日期: 2013-06-22; 修回日期: 2013-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31200431)

作者简介: 侯鑫新(1990-),女,江西吉安人,硕士研究生,主要研究方向为双目视觉、图像处理(houxinxin_job@163.com);谭月胜(1971-),男,副教授,博士,主要研究方向为双目视觉、机器人的运动学、动力学;钱桦(1955-),女,教授,博士,主要研究方向为现代制造技术及自动化装备;程朋乐(1980-),男,讲师,博士,主要研究方向为视觉检测、控制工程、数字信号处理。

术,经阈值分割、开运算、边缘提取等步骤提取提取图片中树木轮廓,减少了标定尺检测;最后联合数学模型与图像匹配,用 VC++ 编程软件计算出胸径尺寸。

1 树木胸径测量系统组成与测量原理

测量系统包括被测对象、CCD 相机、经纬仪和计算机四部分,其中本系统的被测对象即树木胸径,如图 1 所示。

图像采集设备采用 POINT GREY 公司生产的 IEEE-I394 型 CCD 相机,其被固定于经纬仪的望远镜上,如图 2 所示。采集角度信息设备采用北京新北光大地仪器有限公司生产的 BTD-2L 中文激光电子经纬仪,用于测量水平角度和竖直角。水平角指从一点到两目标的方向线垂直投影在水平面上所成的角,竖直角即测站点到目标点的视线与水平线间的夹角。



图 1 软件界面



2 CCD 相机与经纬仪

2 图像处理

被测对象在森林调查中为较复杂背景的图像,依据这些特性^[9,10],主要采取阈值分割、数学形态学变换、边缘提取三个步骤。

2.1 阈值分割

在对图像的研究和应用过程中,往往仅对图像中的某些部分感兴趣,这些部分常称为目标或前景,其他部分称为背景^[11]。阈值分割利用图像中要提取的目标物与背景在灰度特性上的差异,把图像视为具有不同灰度级的两类区域的组合,选取一个合适的阈值,以确定图像中每个像素点应属于目标还是背景区域^[12]。选定的分割区域值应使前景区域的平均灰度、背景区域的平均灰度与整幅图像的平均灰度之间的差别最大,用区域的方差表示。

2.2 数学形态学变换

阈值分割得到的二值图像中可能存在断线、凹洞、毛刺等缺陷,可以采用形态学修补方法有效地去除噪声和缺陷^[13]。利用形态学各运算形式的不同特点,选取适当的结构元素对图像进行形态学变换,使图像在一定方向上增厚或减薄,从而达到修补缺陷、去除噪声的目的。

2.2.1 腐蚀

腐蚀运算是消除图像边界点的一种过程,使剩下的图像沿其边界比原来图像小若干像素。如果图像在某处像素很少,那么使用腐蚀运算后,图像将会在该处变为非连通的,即变成两个独立的图像区域,而像素足够少的图像可能被删除,从而达到去噪的目的。

2.2.2 膨胀

膨胀是将目标物体接触的所有背景点合并到物体中的过程,结果是目标增大、空洞缩小,填补目标物体的空洞,形成连通域。

2.2.3 开运算处理

图像的开运算是在腐蚀运算后再进行膨胀运算的组合运算,删除孤立点或细小物体,在平滑物体边界的情况下而不明显改变物体的体积。

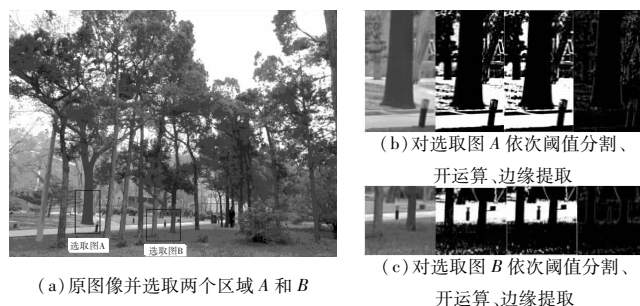
2.3 边缘提取

边缘是指图像周围像素灰度有阶跃变化的像素集合,它存在于目标与背景、目标与目标、区域与区域之间^[14]。图像中某物体边界上的像素点,其邻域将是一个灰度级变化带。衡量这种变化最有效的两个特征值就是灰度的变化率和变化方向,它们分别以梯度向量的幅值和方向来表示。对于连续图像 $f(x, y)$,即是求 $f(x, y)$ 梯度的局部最大值和方向。

边缘检测方法即是利用图像一阶导数的极值或二阶导数的过零点信息来提供判断边缘点的基本依据^[15]。构造对图像灰度阶跃变化敏感的差分算子来进行检测。由于树木主要是直立生长,故主要进行竖直方向上的边缘提取。

2.4 交互式测量

林业森林调查对象的图片均为复杂背景,同时拍摄了多棵树木,边缘提取后内容杂而多,计算时间长。为了减小数据处理量增加测量精度,采用人机交互式测量。用户可选择待测树木进行处理,如图 3(a) 所示,在原图中选取两个小区域 A 和 B,再依次进行图像处理(图 3(b)(c))。



(a) 原图像并选取两个区域 A 和 B

(b) 对选取图 A 依次阈值分割、

开运算、边缘提取

(c) 对选取图 B 依次阈值分割、

开运算、边缘提取

图 3 选取图像 A 和 B 分别进行图像处理

3 基于单 CCD 与经纬仪测量的数学模型建立

测量时用水准器将仪器定平,瞄准测量目标 Q_c ,如图 4 所示, O_1 为相机光心, Q_1 为图像平面,记录目标点的水平角度 ω_1 与竖直角 ψ_1 ;再旋转一定水平角和竖直角,再次瞄准测量目标 Q_c , O_2 为相机光心, Q_2 为图像平面,并记录目标点在该位置的水平角度 ω_2 与竖直角 ψ_2 。其中 OO_1 、 OO_2 为相机光心到经纬仪旋转中心的距离,记为 l ; O_1O_3 、 O_2O_4 为相机的有效焦距,记为 f 。

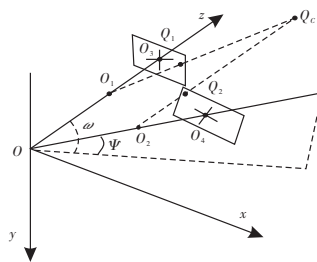


图 4 数学模型简图

依据两次记录角度信息关系可知,相机光心坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 水平旋转 $\omega = \omega_2 - \omega_1$ 和竖直旋转 $\psi = \psi_2 - \psi_1$ 到相机光心坐标系 $O_2-x_2y_2z_2$,由此空间坐标系转换关系^[16]是:

经纬仪旋转中心坐标系 $O-xyz$ 到相机光心坐标系 O_1-

$x_1y_1z_1$ 的旋转矩阵和平移矩阵分别为

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$N = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{bmatrix} \quad (2)$$

经纬仪旋转中心坐标系 $O-xyz$ 到相机光心坐标系 $O_2-x_2y_2z_2$ 的旋转矩阵和平移矩阵分别为

$$U = \begin{bmatrix} \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 \\ \mu_4 & \mu_5 & \mu_6 \\ \mu_7 & \mu_8 & \mu_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega & 0 & \sin \omega \\ \sin \varphi \cdot \sin \omega & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ -\cos \varphi \cdot \sin \omega & \sin \varphi & \cos \varphi \cdot \cos \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega \cdot \sin \omega \cdot l \\ -\sin \varphi \cdot \cos \omega \cdot l \\ \cos \varphi \cdot \cos \omega \cdot l \end{bmatrix} \quad (4)$$

经纬仪旋转中心坐标系 $O-xyz$ 空间中一点 (x, y, z) 与第一次测量时相机光心坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 中位置 (X_1, Y_1) 的对应关系^[17] 为

$$s_1 \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fa_1 & fa_2 & fa_3 & fn_x \\ fa_4 & fa_5 & fa_6 & fn_y \\ a_7 & a_8 & a_9 & n_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

经纬仪旋转中心坐标系 $O-xyz$ 空间中一点 (x, y, z) 与第二次测量时摄像机坐标系 $O_2-x_2y_2z_2$ 中位置 (X_2, Y_2) 的对应关系为

$$s_2 \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f\mu_1 & f\mu_2 & f\mu_3 & ft_x \\ f\mu_4 & f\mu_5 & f\mu_6 & ft_y \\ \mu_7 & \mu_8 & \mu_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \cos \omega & 0 & f \sin \omega & f \cos \omega \cdot \sin \omega \cdot l \\ f \sin \varphi \cdot \sin \omega & f \cos \varphi & -f \sin \varphi & -f \sin \varphi \cdot \cos \omega \cdot l \\ -\cos \varphi \cdot \sin \omega & \sin \varphi & f \cos \varphi \cdot \cos \omega & \cos \varphi \cdot \cos \omega \cdot l \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(1)~(6)计算空间点 (x, y, z) 的坐标,可表示为

$$\begin{cases} x = (z + l) \cdot X_1 / f \\ y = (z + l) \cdot Y_1 / f \\ z = \frac{f(\mu_1 \cdot l \cdot X_1 + \mu_2 \cdot l \cdot Y_1 + ft_x) - X_2(\mu_7 \cdot l \cdot X_1 + \mu_8 \cdot l \cdot Y_1 + ft_z)}{X_2(\mu_7 \cdot X_1 + \mu_8 \cdot Y_1 + \mu_9 \cdot f) - f(\mu_1 \cdot X_1 + \mu_2 \cdot Y_1 + \mu_3 \cdot f)} \\ \quad \frac{f(\mu_4 \cdot l \cdot X_1 + \mu_5 \cdot l \cdot Y_1 + ft_y) - Y_2(\mu_7 \cdot l \cdot X_1 + \mu_8 \cdot l \cdot Y_1 + ft_z)}{Y_2(\mu_7 \cdot X_1 + \mu_8 \cdot Y_1 + \mu_9 \cdot f) - f(\mu_4 \cdot X_1 + \mu_5 \cdot Y_1 + \mu_6 \cdot f)} \end{cases} \quad (7)$$

4 基于单 CCD 与经纬仪的树木胸径计算

由式(7)可知,已知空间一点在两个图像坐标系的二维坐标值,并结合经纬仪所测角度数据,能计算出该点的三维坐标值。利用 CCD 相机和经纬仪采集一组数据,如图 5 所示,进行图像处理和对图片中各像素点特征匹配^[18],提取胸径位置并求出胸径两端的坐标值,最后计算胸径尺寸。其流程如图 6 所示。



(a) 第一幅图

(b) 第二幅图

图 5 采集的一组图片数据

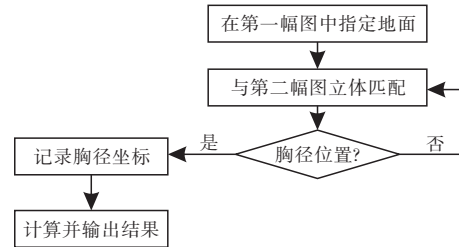


图 6 胸径计算算法流程

5 实验验证

本实验在北京林业大学树林中进行,共测量八组树木胸径。

5.1 系统结构参数

连续拍摄九幅方格靶标图对 CCD 相机进行标定,得到相机有效焦距 $f = 27.15836 \text{ mm}$, CCD 相机光心到经纬仪旋转中心距离 $l = 72.52462 \text{ mm}$ 。

5.2 数据采集

原始数据采集包括经纬仪采集的角度信息、CCD 相机采集的图片信息和人工测量胸径数据,其中图片信息指树木胸径位置两端点(从左到右分别称为起点和终点)在图像上的坐标。数据如表 1、2 所示。

表 1 实测胸径和拍摄两幅图时经纬仪测量的角度信息

树号	实测胸径/mm	ω_1	ψ_1	ω_2	ψ_2
1	219.0	19°38'24"	261°17'49"	49°9'11"	261°18'1"
2	211.4	12°52'19"	261°19'1"	40°49'2"	261°19'19"
3	233.3	20°18'35"	261°17'34"	49°46'38"	261°17'48"
4	186.5	25°50'9"	261°17'52"	55°19'59"	261°18'10"
5	275.7	49°32'13"	261°18'22"	78°19'25"	261°18'38"
6	208.2	50°14'29"	261°17'54"	80°1'21"	261°18'11"
7	244.5	76°42'30"	261°18'55"	104°13'23"	261°19'10"
8	661.1	37°43'36"	261°10'23"	66°11'39"	261°10'41"

表 2 图像处理采集胸径位置信息

树号	胸径起点坐标				胸径终点坐标			
	X_{11}	Y_{11}	X_{12}	Y_{12}	X_{21}	Y_{21}	X_{22}	Y_{22}
1	1 172	595	174	576	1 255	595	268	575
2	192	491	1 236	561	268	491	1 312	561
3	1 223	571	245	528	1 309	571	329	528
4	778	478	1 310	488	845	478	1 379	488
5	247	592	1 225	550	331	592	1 308	550
6	192	489	1 177	498	268	489	1 251	498
7	178	563	712	589	267	563	792	589
8	1 146	584	333	530	1 385	584	582	530

5.3 计算树木胸径

由原始数据记录经纬仪两次位置的角度信息和图片提取的胸径起点、终点二维坐标,依据式(1)~(7),计算胸径起点、终点的三维坐标,如表 3~5 所示,并与实测胸径值进行比较,如表 6 所示。

表 3 经纬仪采集两次拍摄位置的角度信息

树号	ω_1	ψ_1	ω_2	ψ_2	ω	ψ
1	19°38'24"	261°17'49"	49°9'11"	261°18'1"	29°30'47"	12"
2	12°52'19"	261°19'1"	40°49'2"	261°19'19"	27°56'43"	18"
3	20°18'35"	261°17'34"	49°46'38"	261°17'48"	29°28'3"	14"
4	25°50'9"	261°17'52"	55°19'59"	261°18'10"	29°29'50"	18"
5	49°32'13"	261°18'22"	78°19'25"	261°18'38"	28°47'12"	16"
6	50°14'29"	261°17'54"	80°1'21"	261°18'11"	29°46'52"	17"
7	76°42'30"	261°18'55"	104°13'23"	261°19'10"	27°30'53"	15"
8	37°43'36"	261°10'23"	66°11'39"	261°10'41"	28°28'3"	18"

表4 胸径起点坐标值

树号	胸径起点坐标						
	X_{11}	Y_{11}	X_{12}	Y_{12}	x_1	y_1	z_1
1	1 172	595	174	576	3 166.5	1 607.5	0.4
2	192	491	1 236	561	519.8	1 329.3	0.6
3	1 223	571	245	528	3 299.0	1 540.3	0.3
4	778	478	1 310	488	2 087.8	1 282.7	0.1
5	247	592	1 225	550	667.3	1 599.3	0.4
6	192	489	1 177	498	520.0	1 324.3	0.6
7	178	563	712	589	485.1	1 534.2	1.1
8	1 146	584	333	530	3 089.0	1 574.2	0.3

表5 胸径终点坐标值

树号	胸径终点坐标						
	X_{21}	Y_{21}	X_{22}	Y_{22}	x_2	y_2	z_2
1	1 255	595	268	575	3 383.9	1 604.3	0.3
2	268	491	1 312	561	723.4	1 325.3	0.4
3	1 309	571	329	528	3 527.0	1 538.5	0.2
4	845	478	1 379	488	2 267.9	1 282.9	0.0
5	331	592	1 308	550	892.5	1 434.5	0.3
6	268	489	1 251	498	723.6	1 320.2	0.4
7	267	563	792	589	722.8	1 524.2	0.6
8	1 385	584	582	530	3 726.7	1 571.4	0.1

表6 实际测量胸径与计算胸径数据比较

树号	实测胸径/ mm	胸径计算 尺寸/mm	绝对误差 /mm	相对误差率/ %
1	219.0	217.6	1.4	0.6
2	211.4	203.6	7.8	3.7
3	233.3	227.9	5.4	2.3
4	186.5	180.1	6.4	3.4
5	275.7	279.1	3.4	1.2
6	208.2	203.6	4.6	2.2
7	244.5	238.0	6.5	2.7
8	661.1	637.7	23.4	3.5
平均值			7.4	2.5

最后计算结果显示如表6所示,胸径平均绝对误差为7.4 mm,平均相对误差率为2.5%,完全满足低于5%的精度要求,验证了将单 CCD 相机与经纬仪应用于树木胸径测量的方法是可行的。树木胸径的横截面可能是非规则的圆形和 CCD 相机非线性畸变时造成误差的主要因素,可再优化数学模型和图像处理算法,提高计算精度。

6 结束语

本文研究一种基于单 CCD 相机与经纬仪的树木胸径测量方法,通过建立数学模型、采集经纬仪数据和对 CCD 相机采集的图像进行处理,计算树木胸径尺寸,并利用北京林业大学校园内树木采集数据进行胸径测量实验,验证了结果。这种方法

利用单 CCD 相机结合经纬仪测角功能代替双 CCD,减少了在基距上的测量要求和计算,并且不需使用标定尺,对图像的提取效率和精度有一定的提高。使用 VC++ 编写软件界面,运算速度快,可进行实地实时性测量,也可实地测量保存原始数据后再计算结果。本软件的测量部分目前只涉及胸径计算,后续可扩展到对树木其他因子的测量或对其他物体的尺寸测量。测量范围主要取决于 CCD 相机的性能,可依据测量范围要求选择合适的 CCD 型号。

参考文献:

- [1] 南京林业大学. 中国林业辞典[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1994:227.
- [2] 冯仲科,赵春江,聂玉藻,等. 精准林业[M]. 北京:中国林业出版社,2002:10-30.
- [3] 阙江明,李文彬,孙仁山. 基于计算机视觉的立木枝干直径自动测量方法[J]. 北京林业大学学报,2007,29(4):5-9.
- [4] CLARK N. Applications of an automated stem measurer for precision forestry [C]//Proc of the 1st International Precision Forestry Cooperative Symposium. 2001:93-98.
- [5] BROWNLIE R K, CARSON W W, FIRTH J G, et al. Image-based dendrometry system for standing trees [J]. New Zealand Journal of Forestry Science,2007,37(2):153-168.
- [6] IZUMI T,UEKI Y. Improvement of precision by introducing vitality degree to the height measurement system using stereo vision [C]//Proc of SICE Annual Conference. Japan:Hokkaido Institute of Technology,2004.
- [7] 杨华,孟宪宇,刘燕,等. 单株立木图像信息的提取与解算[J]. 北京林业大学学报,2005,27(1):51-54.
- [8] 吴晓兰,高林,阙江明,等. 基于区域增长与边缘检测的立木图像信息提取[J]. 科技导报,2009,27(22):44-47.
- [9] 陶司光. 基于数码相机单木图像分割及测树因子提取方法的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2011:12-29.
- [10] AL-AMEI S S, KALYANKAR N V, KHAMITKAR S D A. Comparative study of removal noise from remote sensing image [J]. IJCSI International Journal of Computer Science Issues,2010,7(1):32-36.
- [11] 阙江明. 基于计算机视觉的活立木三维重建方法[D]. 北京:北京林业大学,2008:23-27.
- [12] 孙仁山. 立木枝干机器视觉识别技术研究[D]. 北京:北京林业大学,2006:57-74.
- [13] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,阮宇智,译. 2版. 北京:电子工业出版社,2007:423-431.
- [14] 康牧. 图像处理中几个关键算法的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2009:55-72.
- [15] 龙辉,何坤,黎思敏,等. 方向邻域全变分图像去噪[J]. 计算机应用研究,2013,30(7):2219-2222.
- [16] 熊志. 基于双目立体视觉的大尺寸测量系统的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2006:41-45.
- [17] 张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社,2005:99-102.
- [18] 孙仁山,李文彬,田勇臣,等. 基于整枝抚育目的的立木枝干自动识别研究[J]. 北京林业大学学报,2005,27(4):86-89.

(上接第1219页)针对本文提出的对 SURF 算法的改进也能够一定程度上提高人脸识别率。通过实验表明,改进的 SURF 算法中的描述矢量具有更强的描述性,而且匹配时间减少了23%左右,在一定程度上降低了时间消耗。

参考文献:

- [1] 龚卫国,黄潇莹,李伟红. 基于正弦变换的人脸姿态矫正及识别研究[J]. 计算机工程与应用,2010,46(22):213-216.
- [2] 周激流,张晔. 人脸识别理论研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,1999,11(2):180-184.
- [3] LEE H S, KIM D J. Generating frontal view face image for pose invariant face recognition[J]. Pattern Recognition, 2006,27(7):747-754.
- [4] 孙忠远,吴小俊,王士同,等. 基于多姿态人脸图像合成的识别方法研究[J]. 计算机工程与应用,2008,44(23):197-200.

- [5] GONZALEZ-JIMENEZ D, ALBA-CASTRO J L. Toward pose invariant 2-D face recognition through point distribution models and facial symmetry [J]. IEEE Trans on Information Forensics and Security, 2007,2(3):413-429.
- [6] 王跃明,潘刚,吴朝晖. 三维人脸识别研究综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2008,20(7):819-829.
- [7] BLANZ V. Face recognition based on a 3D morphable model [C]//Proc of the 7th International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition. 2006:617-624.
- [8] 胡茂林. 空间和变换[M]. 北京:科学出版社,2007:145-180.
- [9] 乔勇军,谢晓方,李德栋,等. SURF 特征匹配中的分块加速方法研究[J]. 激光与红外,2011,41(6):691-696.
- [10] 周志铭,余松煜,张瑞,等. 一种基于 SIFT 算子的人脸识别方法[J]. 中国图象图形学报,2008,13(10):1882-1885.