

基于立体视觉的玉米植株三维骨架重建*

赵春江 杨亮 郭新宇 陆声链 肖伯祥

(国家农业信息化工程技术研究中心,北京 100097)

【摘要】 提出了一种基于立体视觉原理的玉米植株三维骨架提取和重构方法,从两幅由特定角度拍摄的图像提取植株二维骨架信息,通过极线约束算法和设定合理的匹配准则,实现骨架特征匹配,获得三维骨架的点云信息并降噪,最终通过样条曲线拟合产生三维骨架模型。在该骨架模型基础上,能够进行叶长、茎叶角等作物重要参数的计算。试验结果表明,该方法可以快捷地重建玉米植株的骨架模型,且误差不超过2%。

关键词: 玉米 立体视觉 骨架提取 三维模型

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)04-0157-06

Corn Skeleton Reconstruction Based on Stereo Vision

Zhao Chunjiang Yang Liang Guo Xinyu Lu Shenglian Xiao Boxiang

(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract

A method for extracting and reconstructing 3-D maize skeleton was presented based on stereo vision. Firstly, extracts the 2-D skeleton from two images taken from special angles, then uses epipolar constraint algorithm and appropriate matching criterions to match the feature points on the skeleton. The point cloud of the 3-D skeleton is then obtained. After de-noising operation, the final 3-D skeleton model of maize can be achieved by using B-spline curve fitting. Based on the skeleton model, some important agricultural geometric parameters, such as leaf length and the angle between stem and leaf, can be calculated easily. The experimental results show that the method can quickly reconstruct the 3-D skeleton of maize, with a deviation no more than 2%.

Key words Corn, Stereo vision, Skeleton extraction, 3-D model

引言

在生产和科研中,玉米的形态特征对于其选育种、长势监测、长相评价等均有重要的意义,而形态特征信息目前主要靠人工测量和目测等方式获取,存在速度慢、强度大、主观性强、误差大等缺陷。随着计算机图形图像处理技术的发展,通过计算机处理的途径实现实时或定时自动监测,会给农业科研和信息化带来很大的便利^[1]。当前,基于图像的建模技术因能快速有效地建立真实模型,已经成为计算机视觉和计算机图形学领域研究的热点^[2]。基

于图像的植物建模已有报道,Quan L等^[3]从多幅图像中重建出植物三维模型,首先通过叶片分割的方法来重建叶片模型,然后通过交互式编辑的方式重构植物的枝干结构。该方法重建的三维信息精度有限,且需要大量的人工交互。物体的骨架表征了物体几何以及拓扑结构,因此国内外学者开始通过提取植物骨架的方式研究植株的拓扑结构及形态特征,如 Shlyakhter等^[4]将重建的树木骨架作为L-系统的输入重建真实树木三维模型,但误差较大,难以应用到需要精确描述的作物上。部分研究者则通过激光扫描仪获得植株的三维数据,进而重建三维骨

收稿日期:2009-06-04 修回日期:2009-06-29

*国家自然科学基金资助项目(30700493)、国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA10Z224)和北京市自然科学基金资助项目(4081001)

作者简介:赵春江,研究员,博士生导师,主要从事农业信息技术、精准农业研究,E-mail:zhaocj@nercita.org.cn

架模型^[5-6],但这种方法成本较高,且运算量大,重建的植物树干模型的精度有限,还难以在实时测量和检测中应用。刘彦宏等人也基于双视点图像对树木进行了主干骨架的三维重建^[7],但该方法并不适用于农作物。刘洪见等利用图像处理技术提取了玉米图像的骨架^[8],但所提取的植物骨架基本上停留在二维层面上,难以准确反映作物植株的三维形态特征。文献[9]较好地测量了苗期玉米植株的叶长、茎叶夹角等参数,但该方法假定玉米的主要器官在获取的两幅图像中同时可见,对于叶子较多的植株由于遮挡的原因将导致部分骨架信息难以计算,因此只适用于苗期玉米。本文以玉米为例,研究基于两幅图像的植株三维骨架精确重建方法。

1 总体处理流程

玉米植株骨架提取方法的总体处理流程如图1所示。首先建立图像采集系统,该系统通过沿固定轴移动相机分两次拍摄获取玉米植株的两幅图像;然后利用图像处理技术分别对两幅图像进行分割和二维骨架提取,在此基础上,根据模板匹配算法并结合极线约束对骨架进行匹配,再利用相机标定参数,从而计算出玉米植株骨架的三维坐标,然后剔除误匹配点;最后通过曲线拟合算法形成玉米骨架的三维模型。

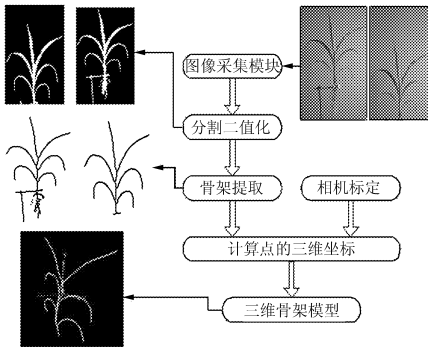


图1 系统处理流程图

Fig.1 Workflow of the system

2 图像采集

根据实际需要,设计了一个特定的图像采集系统,该系统的硬件包括数码相机、三角架和云台,云台安装在三角架顶部,用来放置和固定相机。系统的工作原理如图2所示,采集图像时首先利用文献[10]的方法对数码相机进行内参数标定,然后将数码相机放在三脚架的云台上,拍摄图像 p_1 (此时相机称为C1),进而缓慢旋转三角架的主轴使相机下降一定的距离 b ,拍下相同分辨率的图像 p_2 (此时相机称为C2)。系统要求相机C1和相机C2的光轴

平行, Y 轴相互重合, X 轴相互平行。由于是用同一个相机拍摄,可知两次拍摄的相机参数是完全相同的。图中取C1的坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 为世界坐标系,若任何空间点 P 的坐标在C1坐标系下为 (x, y, z) ,那么 P 在C2坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 的坐标为 $(x, y - b, z)$ 。由中心摄影的比例关系可得

$$u_1 - u_0 = \alpha_x \frac{x}{z} \quad (1)$$

$$v_1 - v_0 = \alpha_y \frac{y}{z} \quad (2)$$

$$u_2 - u_0 = \alpha_x \frac{x}{z} \quad (3)$$

$$v_2 - v_0 = \alpha_y \frac{y - b}{z} \quad (4)$$

式中 $u_0, v_0, \alpha_x, \alpha_y$ ——相机内部参数

$(u_1, v_1), (u_2, v_2)$ —— p_1, p_2 的图像坐标

解式(1)和式(2)可得

$$x = \frac{b\alpha_y(u_1 - u_0)}{\alpha_x(v_1 - v_2)} \quad (5)$$

$$y = \frac{b(v_1 - v_0)}{v_1 - v_2} \quad (6)$$

$$z = \frac{b\alpha_y}{v_1 - v_2} \quad (7)$$

具体试验中,所拍摄的玉米植株图像分辨率为 640×480 ,内参数标定计算值分别为: $u_0 = 312, v_0 = 230, \alpha_x = \alpha_y = 657.7$ 。

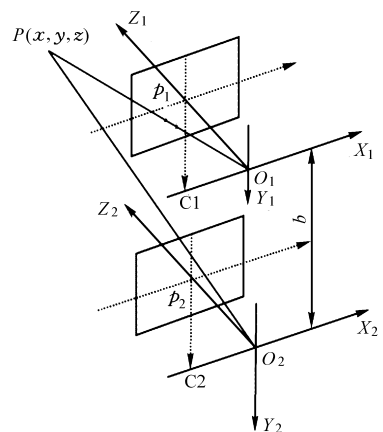


图2 图像采集原理图

Fig.2 Principle of the image acquisition system

3 图像的分割与二值化

为了进行玉米骨架提取,首先需要将玉米植株从背景中分离出来并进行二值化。由于目前对彩色图像的分割还没有比较统一的算法,尝试利用常规的灰度化结合灰度直方图的方法,但未取得满意的效果,因此结合实际应用,利用 R, G, B 之间的差异分割目标。由于所用的背景是蓝色的,而玉米植株

的主色是绿色,经分析得知,目标的 RGB 三色分量中 G 分量总是比 B 分量大,而背景的 G 分量恰好比 B 分量小,于是采用 GDI+ 技术直接读取 24 位真彩 JPEG 图像的三色分量,然后通过比较其大小,对彩色图像进行初步分割和二值化处理,并进行中值滤波,处理结果如图 3 所示。用 GDI+ 编写的代码如下:

```
Image image(L" Corn. JPG")
INT Width = image. GetWidth();
INT Height = image. GetHeight();
Bitmap * image2 = image. Clone(0,0, Width, Height,
PixelFormatDontCare);
Color colorTemp, color2;
for (int i = 0; i < Width - 1; i++) {
    for (int j = 0; j < Height - 1; j++) {
        image. GetPixel(i, j, &color2);
        if (color2. GetBlue() > color2. GetGreen())
            colorTemp. SetValue(color2. MakeARGB(255, 0, 0, 0));
        else if (color2. GetBlue() < color2. GetGreen())
            colorTemp. SetValue(color2. MakeARGB(255, 255, 255, 255));
        image. SetPixel(i, j, colorTemp); //像素点重新赋值
    }
}
graphics. DrawImage (&image, Rect(0, 0, Width, Height));
```

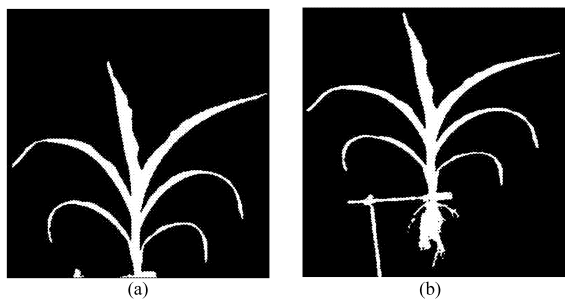


图3 初步分割的二值图

Fig.3 Initial segmentation binary image

(a) C1 相机拍摄的图像 (b) C2 相机拍摄的图像

4 二维骨架提取

骨架提取算法大致可以分为 2 类。一类是基于细化的方法^[11-12],这种方法在保持拓扑不变性的条件约束下,依据像素邻域信息设定准则,采用迭代的方法逐步剔除普通点,直到最后剩下骨架点;另一类是基于距离变换的算法^[13-14],这类方法先对物体进行距离变换,据此来寻找骨架点。一般来说,基于距离变换的骨架提取算法获得的骨架点位置比较准

确,但难以保证整个骨架的连通性。为了保证骨架的连通性,采用基于细化的骨架提取算法,在 Hilditch 算法^[15]的基础上进行改进。首先对二值图像进行标记,将需要细化的部分标记为 1,背景标记为 0,如图 4 所示。该方法在考虑每个点 8 邻域的同时,还考虑了 8 邻域周围点的情况,并根据点与点之间的关联情况对 Hilditch 算法的限制条件进行了重新设定。

P_{12}	P_{11}	P_{10}	P_9	P_{24}
P_{13}	P_2	P_1	P_8	P_{23}
P_{14}	P_3	P_0	P_7	P_{22}
P_{15}	P_4	P_5	P_6	P_{21}
P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}

图4 P_0 的 8 邻域及这 8 个点相关联的点

Fig.4 Eight points around P_0 and points around the 8 points

考虑 25 个点的区域,就可以在研究 P_0 周围 8 个点情况的同时,研究这 8 个点各自周围点的关联情况。例如当只考虑 P_0 周围 8 个点时, P_0 、 P_2 、 P_3 、 P_4 为白点,其余点为黑点,这时, P_0 是不能去除的,因为从 P_0 环绕的 8 个点的情况来分析, P_0 为横向拓扑点。而当考虑 25 个点的区域时可以发现 P_{11} 、 P_{12} 、 P_{13} 、 P_{14} 、 P_{15} 、 P_{16} 、 P_{17} 点也为白点,那么可以认为 P_0 是纵向结构上的多余像素,可以去除。基于以上考虑,具体的限制条件为:

(1) P_0 为白点,即 $P_0 = 1$ 。

(2) 环绕 P_0 周围的 8 个点当中,黑点个数介于 2 到 6 之间,即 $2 \leq N(P_0) \leq 6$,其中 $N(P_0) = \sum_{i=1}^8 P_i$ 。

(3) $S(P_0) = 1$,其中 $S(P_0)$ 表示 P_0 周围的 8 个点以 P_2 、 P_3 、 P_4 、 \dots 、 P_8 、 P_1 、 P_2 为序时这些点的值从 0 到 1 变化的次数。

(4) P_1 、 P_3 、 P_7 任意一点的值为 0,或者以 P_1 为中心的 8 个点的 $S(P_1)$ 不等于 1,即

$$P_1 P_3 P_7 = 0 \text{ or } S(P_1) \neq 1$$

(5) P_1 、 P_3 、 P_5 任意一点的值为 0,或者以 P_3 为中心的 8 个点的 $S(P_3)$ 不等于 1,即

$$P_1 P_3 P_5 = 0 \text{ or } S(P_3) \neq 1$$

利用上面的限制条件,对图 3 所示的两幅图像提取骨架,结果如图 5 所示。

5 骨架特征匹配

为了得到三维的玉米植株骨架,需要匹配两幅图像上的同名点,即空间同一点在两幅图像上的成像点。匹配的准确度将影响后面测量的精度和重建

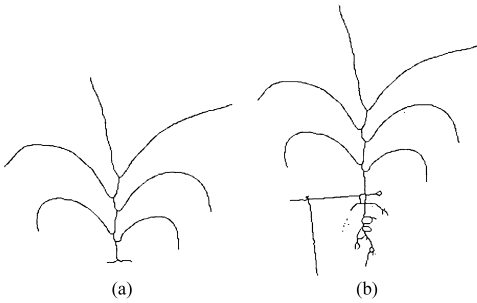


图5 提取的二维骨架

Fig. 5 Extracted two dimensional skeleton

的真实感。因此骨架特征的匹配是整个三维骨架造型的关键步骤。利用极线约束和定义的匹配准则，取得了很好的匹配效果。

5.1 极线约束

为了进一步减少误匹配和搜索空间，立体视觉理论提出了一些约束，如唯一性约束、相容性约束、极线约束等^[16]，为缩小搜索的范围，采用了极线约束。图6给出了基于立体视觉的双目传感器模型， I_1 和 I_2 是两个摄像机摄取图像，对于空间物体表面任意一点 P ， P_1 和 P_2 是 P 点在两个图像上的投影点，称 P_2 为 P_1 的匹配点，反过来， P_1 为 P_2 的匹配点。根据极线约束理论， P_1 点对应点不需要在 I_2 整幅图像中搜索，它必然位于 I_2 上由 P_1 与两个摄像机的相对几何位置决定的直线 L_2 上，直线 L_2 就称为图像 I_2 上对应点 P_1 点的极线。同理， P_2 的对应点必然位于 I_1 上由 P_2 与两个摄像机的相对位置决定的直线 L_1 上，直线 L_1 就称为图像 I_1 上对应 P_2 点的极线。根据极线约束，就能够极大地缩小搜索范围，减少误匹配概率。

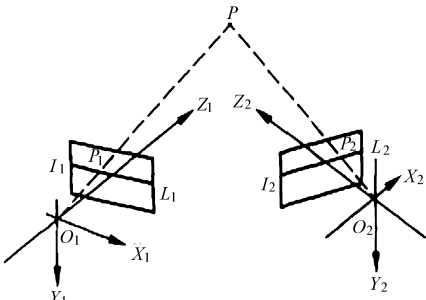


图6 立体图对的极线示意图

Fig. 6 Stereo images epipolar

5.2 匹配准则

利用提取的骨架特征和极线约束，提出了一种简便的匹配方法，如图7所示。

(1) 分别提取两幅图像中的特征点 t_1, t_2, \dots, t_n ；其中 t_2, \dots, t_n 是 t_1 所对应的极线上的特征点。

(2) 以 t_1 点为中心，取一个大小为 $(2n + 1) \cdot (2m + 1)$ 的相关窗口 w_1 ，然后读取图像1中该相关窗口对应的图像灰度值；在图像2中，在 t_2, \dots, t_n 分

别取同样的窗口 w_2, \dots, w_n 。

(3) 计算 t_1 所对应的相关窗口 w_1 与图像2中 t_2, \dots, t_n 所对应的相关窗口 w_2, \dots, w_n 的相关性。

(4) 取相关性最大的对应点 t_i ，若该相关性大于一定的阈值，就认为 t_1 与 t_i 是同名点。

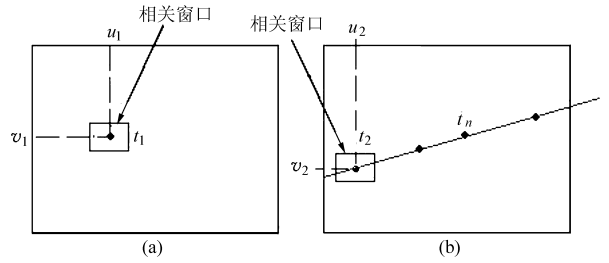


图7 特征点相关性

Fig. 7 Relevance of feature points

(a) 图像1 (b) 图像2

利用如下相关性计算准则

$$R(t_1, t_2) = \frac{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m I_1(u_1 + i, v_1 + j) I_2(u_2 + i, v_2 + j)}{\sqrt{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m I_1(u_1 + i, v_1 + j)^2} \sqrt{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m I_2(u_2 + i, v_2 + j)^2}} \quad (8)$$

该相关性的取值范围为 $[0, 1]$ ， R 越大，说明这两点的相关性越大。

6 三维重建

6.1 点云获取和噪声点剔除

根据上述的匹配方法和式(5)~(7)，能够得到骨架的点云模型，但由于存在一定的误匹配，重建的点云中可能带有噪声点(图8a)。由于噪声点比较孤立，因此提出了一种有效的去噪算法，即以每个三维点为球心，通过设定球的半径和球内点云的个数，不满足相应的阈值，便认为该点为噪声点并将其剔除。图8b是用该方法剔除噪声后的效果。

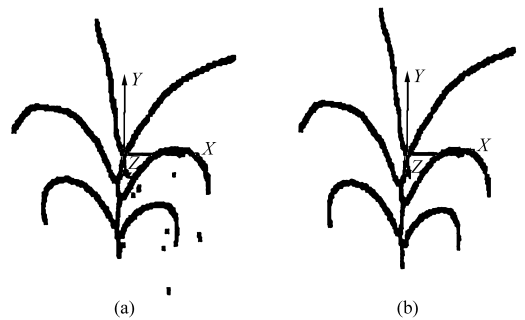


图8 三维点云模型

Fig. 8 3-D point cloud model

(a) 去噪前 (b) 去噪后

6.2 曲线拟合

根据恢复的点云数据，设计一个交互界面，通过

简单的人工交互并利用 B 样条曲线拟合,能够重建出玉米骨架的曲线模型,如图 9 所示。具体的拟合过程如下:用户可以在任意 2 个三维点之间画样条曲线,根据图 8b 的三维点云,用户首先将玉米的主干和各个叶片的骨架用曲线表示,在鼠标拖动过程中,曲线会根据已知点的坐标自动调整曲线的走向和弯曲程度。这样,产生的骨架曲线模型就能够比较真实地反映作物的拓扑结构。

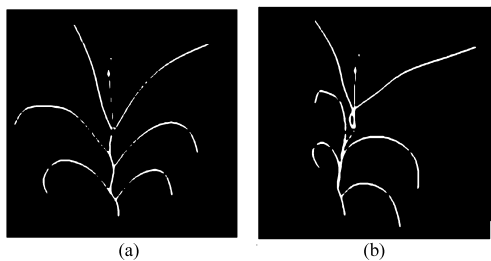


图 9 不同视角的骨架曲线模型

Fig. 9 Different perspective skeleton curve model

6.3 数据验证

根据提取的三维骨架,对玉米植株的株型参数进行了验证试验。在田间随机选取拔节期的两株玉米,共着生 14 片叶,分别用仪器测出这 14 片叶的叶长、茎叶夹角和方位角,随后利用本文方法计算出这些数据,并验证分析。图 10 给出了叶长、茎叶角和方位角实测值与计算值的相关比较,由图可以看出程序计算值与用仪器测量值趋势一致,且误差在 2% 之内,这样的精度足以满足农学研究的需要。

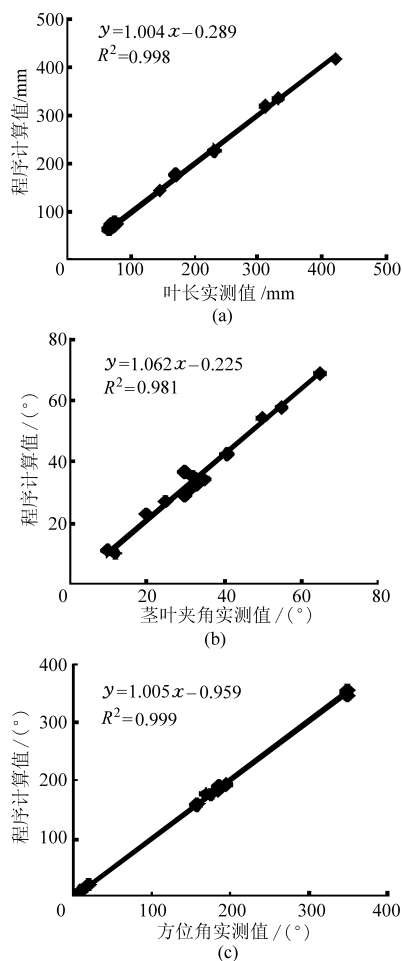


图 10 试验结果对比图

Fig. 10 Experimental comparison chart

(a) 叶长 (b) 茎叶夹角 (c) 方位角

7 结束语

以玉米为代表性研究作物,提出了基于两幅图像的作物植株三维骨架的提取和重建方法,该方法在二维骨架的基础上进行三维骨架重建。在图像采集方面,为了减少误匹配,设计了垂直运动的采集方式;在二维骨架提取方面,给出一种有效的提取算

法,该算法不仅能够保持骨架点的连续,而且能够很好地反映玉米的骨架特征;同时,给出一种有效的噪声剔除方法。利用重建的玉米植株三维骨架模型,能够进行叶长、茎叶角等作物株型参数的计算。试验结果表明,本文提出的方法可以精确、快捷地重建玉米植株的骨架模型,为作物株型特征提取和长势监测提供了技术支持。

参 考 文 献

- 1 陈廉清,崔治,王龙山. 基于计算机视觉的微小轴承表面缺陷在线识别[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 132 ~ 134.
Chen Lianqing, Cui Zhi, Wang Longshan. On-line inspection of surface defect of micro bearing based on computer vision technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 132 ~ 134. (in Chinese)
- 2 刘钢,彭群生,鲍虎军. 基于图像建模技术研究综述与展望[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(1): 18 ~ 27.
Liu Gang, Peng Qunsheng, Bao Hujun. Review and prospect of image-based modeling techniques[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(1): 18 ~ 27. (in Chinese)
- 3 Quan L, Ping T, Gang Z, et al. Image-based plant modeling [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(4): 599 ~ 604.
- 4 Shlyakhter I, Rozenoer M, Dorsey J, et al. Reconstructing 3D tree models from instrumented photographs [J]. IEEE Computer Graphics and Application, 2001, 21(3): 53 ~ 61.
- 5 Zhang C L, Zhang X P, Chen B Q. Simple reconstruction of tree branches from a single range image [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2007, 22(6): 846 ~ 858.

- 6 Xu H, Gossett N, Chen B. Knowledge and heuristic-based modeling of laser-scanned trees [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(4):19.
- 7 刘彦宏,王洪斌,杜威,等. 基于图像的树类物体的三维重建[J]. *计算机学报*,2002,25(9):930~935.
Liu Yanhong, Wang Hongbin, Du Wei, et al. Image-based 3D reconstruction of tree-like objects[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2002, 25(9): 930~935. (in Chinese)
- 8 刘洪见,郑丽敏,曾爱平. 图像处理技术在提取玉米图像骨架上的应用[J]. *农业网络信息*,2007(1):18~20.
Liu Hongjian, Zheng Limin, Zeng Aiping. Application of image processing in extracting framework of maize image[J]. *Agriculture Network Information*, 2007(1):18~20. (in Chinese)
- 9 王传宇,赵明,阎建河. 基于双目立体视觉的苗期玉米株形测量[J]. *农业机械学报*,2009,40(5):145~148,144.
Wang Chuanyu,Zhao Ming,Yan Jianhe. Measurement of maize seedling morphological traits based on binocular stereovision [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(5):145~148,144. (in Chinese)
- 10 Zhang Z Y. A Flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1 330~1 334.
- 11 Ma C, Wan S. Parallel thinning algorithms on 3D binary image [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, 80(3):364~378.
- 12 Xie W, Thompson R P, Perucchio R. A topology-preserving parallel 3D thinning algorithm for extracting the curve skeleton [J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36(7):1 529~1 544.
- 13 Choi W, Lam K, Siu W. Extraction of the euclidean skeleton based on a connectivity criterion [J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36(3):721~729.
- 14 Ahuja N, Chuang J. Shape representation using a generalized potential field model [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(2):169~176.
- 15 Agrawal R, Srikant R. Mining sequential patterns[C]//*Proceeding of 11th International Conference on Data Engineering*, Taipei Taiwan, IEEE Computer Society Press, Silver Spring,1995,12(3):807~819.
- 16 马颂德,张正友. *计算机视觉*[M]. 北京:科学出版社,2003.