doi:10.6046/gtzyyg.2020.01.11
引用格式:陈啸,边大红,崔彦宏,等.基于图像的玉米植株叶倾角概率密度分布函数提取[J].国土资源遥感,2020,32(1):75-80.(Chen X,Bian D H,Cui Y H,et al. Extraction of probability density distribution function of corn plant[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2020,32(1):75-80.)

基于图像的玉米植株叶倾角概率密度分布函数提取

陈 啸[1,2,4],边大红[3],崔彦宏[3],刘鑫莉[1,2],孟祥磊[1,2],苏 伟[1,2]
(1.中国农业大学土地科学与技术学院,北京 100083;2.农业农村部农业灾害遥感重点实验室,北京 100083;3.河北农业大学农学院,保定 071001;4.北京大学遥感与地理信息系统研究所,北京 100871)

摘要:叶倾角是描述植被冠层结构的一种重要参数,叶倾角分布(leaf angle distribution,LAD)决定了植被冠层对辐射的截获量,也是遥感定量反演中的一个重要参数。目前实测叶倾角的方法费时、费力、主观性强、精度无法保证。提出了一种基于图像的玉米植株叶倾角概率密度函数提取方法,以求快速、精确、低成本地获取玉米植株叶倾角。首先,对图像提取骨架;然后,去除骨架图像中的毛刺、茎秆等信息,得到叶片骨架;最后,以2像素×20像素大小的搜索窗口搜索骨架提取出叶倾角。精度评价结果表明,乳熟期玉米叶倾角提取值与实测值的相关系数为0.821 4,拔节期玉米叶倾角提取值与实测值相关系数为0.908 7。结果表明该方法具有可行性,精度较高。

关键词:图像;玉米植株;叶倾角概率密度函数;骨架化;去毛刺
中图法分类号:TN 959.3;Q 948.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-070X(2020)01-0075-06

0 引言

植物相邻叶片形成的连续层,称为植被冠层,用于捕获光合有效辐射。植物反射、透射和吸收的辐射通量决定了冠层反照率,在植被遥感中有重要作用。叶倾角是叶片表面法线方向与天顶方向的夹角,叶倾角分布(leaf angle distribution,LAD)是描述大田作物的植被冠层结构的最重要参数之一,其直接决定了植被冠层对辐射的截获量,同时对入射太阳辐射的大小与走向也起着决定性作用[1]。LAD还可用于推算叶面积指数(leaf area index,LAI)等其他生物物理参数[2],是定量遥感的重要参数。国内外的学者对LAD已有了一定的研究[1-5]。

目前,传统的叶倾角提取方法是通过与叶面接触的机械倾斜仪进行测量,不仅费时费力,还有可能伤害叶片[5]。现代的叶倾角提取方法是使用专用仪器或激光雷达建立植物的3D模型[6-8]。苏伟等[9]利用3D数字转换器同时获取了叶子位置和方向的空间坐标;Sinoquet等[6]利用地基激光雷达结合遥感数据获取LAD;王绪鹏等[10]利用植物冠层分析仪结合LAI获取LAD。但这些方法的成本较高,不利于推广和普及。本文旨在从图像中直接提取玉米植株叶倾角概率密度分布函数。利用图像处理方法,从白色背景的玉米图像中提取出玉米叶片的骨架,以一定大小的搜索窗口搜索骨架,得到玉米植株的叶倾角概率密度分布函数,并以实测值为真值进行叶倾角提取结果的精度验证。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

本文选取了2个研究区:①黑龙江农垦总局852农场。该农场位于黑龙江省双鸭山市宝清县东南部,属于温带大陆性气候带,年平均温度为3.2 ℃,无霜期为145 d,年平均日照时数为2 491 h,年降水量为400~600 mm,气候温和,适合多种作物生长,全场耕地面积为69 833 hm^2,主要作物有玉米、水稻和大豆等;②河北省辛集市马庄乡保高丰农场。该农场属于季风暖温带半湿润大陆性气候带,年平均

收稿日期:2019-01-07;**修订日期:**2019-05-24
基金项目:十三五国家重点研发计划项目"黄淮海北部夏玉米超高产群个体发育规律与群体质量调控技术"(编号:2017YFD0300903)、国家自然科学基金项目"联合时序遥感影像和地基激光雷达的玉米生长过程监测方法研究"(编号:41671433)和中国农业大学2019年教师党支部书记"双带头人"科技创新培育专项"夏玉米封垄后生物量遥感反演方法研究"(编号:2019TC138)共同资助。
第一作者:陈 啸(1997-),男,本科,主要从事基于图像的农作物植株和冠层结构参数提取方法研究。Email:williamchen-x@foxmail.com。
通信作者:苏 伟(1979-),女,教授,博士生导师,主要从事农业遥感应用研究。Email:suwei@cau.edu.cn。

万方数据

降水量为488.2 mm,其中6—8月降水量占全年总降水量的67.9%。本文以玉米作为研究对象,选取场区内主要玉米种植区域进行实验。作为农场的主要种植作物,黑龙江农垦总局852农场内玉米品种为绥玉7、绿单2和德美亚3等,本文选取品种为绥玉7,其播种期一般为5月中旬,6月为玉米苗期,8月上旬为灌浆期,9月下旬成熟收割;河北省辛集市马庄乡保高丰农场内玉米品种为郑单958、先玉335和京农科728,本文选取品种为郑单958,其6月15日左右为出苗期,7月上旬是拔节期,8月中上旬进入抽雄吐丝期,8月下旬—9月上旬为灌浆乳熟期,9月中旬为成熟期。本文所用的图像数据为8月下旬在852农场拍摄的图像(该时期研究区内玉米生育期为乳熟期)和7月上旬在保高丰农场拍摄的图像(该时期研究区内玉米生育期为拔节期)。为保证结果具有代表性,图像均为随机选取。

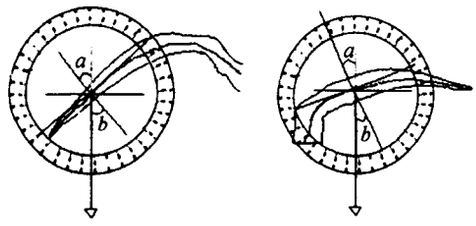
1.2 数据源及预处理

野外调查中获得的图像为白色背景的单株玉米图像,是以白色布为背景拍摄获得的。将原始图像进行二值化处理(图1(a)和(c))并对其进行填洞、去除孤立点等预处理(图1(b)和(d)),用于后续图像处理。野外实测数据主要用于对从图像提取LAD的精度验证,采用圆形量角器直接测量叶倾角,在量角器的圆心处穿一根细线固定,线的另一端拴一个重物,沿玉米叶片分段测量各段的叶倾角,当量角器0°~180°线与叶片平行时,读出下垂线所在刻度(图2),图中 a 为叶片倾角,b 为实测读数与90°之差的绝对值。

(a) 研究区1二值化结果 (b) 研究区1去噪结果 (c) 研究区2二值化结果 (d) 研究区2去噪结果

图1 图像预处理结果

Fig. 1 Image preprocessing results



(a) 叶片朝下 (b) 叶片朝上

图2 测量叶倾角示意图

Fig. 2 Schematic plot of measuring the leaf inclination angles

2 研究方法

本研究对二值化后的玉米图像进行骨架化、去毛刺处理、去除玉米茎杆和穗信息后提出叶片信息等一系列操作得到玉米叶片的骨架,并对骨架按规定的搜索半径计算叶倾角,从而得到LAD。

2.1 骨架化

图像骨架提取,实际上就是提取目标在图像上的中心像素轮廓,是以目标中心为准,对目标进行细化的过程。关于骨架提取,现存的算法有千种以上[11]。综合考虑时间效率和提取骨架的效果,本文采用了Zhang-Suen快速并行细化算法[12]。该算法每一次的迭代步骤是对符合特定条件的目标像素进行腐蚀,使目标变得越来越细。直至得到单像素的骨架图像。通过不断的迭代,直到在上一次腐蚀后的目标在该次操作中,没有新的像素点被腐蚀,则算法结束。算法具体描述如下:设 $p1$ 点的八邻域如图3所示。

$p9$	$p2$	$p3$
$p8$	$p1$	$p4$
$p7$	$p6$	$p5$

图3 $p1$ 点八领域示意图

Fig. 3 Point $p1$ eight field schematic

图中 $p1$ 为前景点,如果以下4个条件同时满足,则删除 $p1$,即将 $p1$ 转化为背景点,其迭代分为2个子过程:

过程1细化删除条件为:①$2 \leqslant N(p1) \leqslant 6$,$N(x)$ 为 x 的8邻域中前景点的数目;②$A(p1)=1$,$A(x)$ 指的是将 $p2$—$p8$ 之间按序排列前后分别为背景点、前景点的对数,即 $p2$—$p8$ 间存在一对连续的分别为背景点和前景点的两个点;③$p2 \times p4 \times p6 = 0$,

万方数据

即 $p2$,$p4$ 和 $p6$ 中至少有一点为前景点; ④$p4 \times p6 \times p8 = 0$,即 $p4$,$p6$ 和 $p8$ 中至少有一点为前景点。如果同时满足以上 4 个条件则该点可以删除。

过程 2 细化删除条件为: ①$2 \leqslant N(p1) \leqslant 6$; ②$A(p1) = 1$; ③$p2 \times p4 \times p8 = 0$,即 $p2$,$p4$ 和 $p8$ 中至少有一点为前景点; ④$p2 \times p6 \times p8 = 0$,即 $p2$,$p6$ 和 $p8$ 中至少有一点为前景点。如果同时满足以上 4 个条件则该点可以删除。其迭代具体流程如 4 所示。

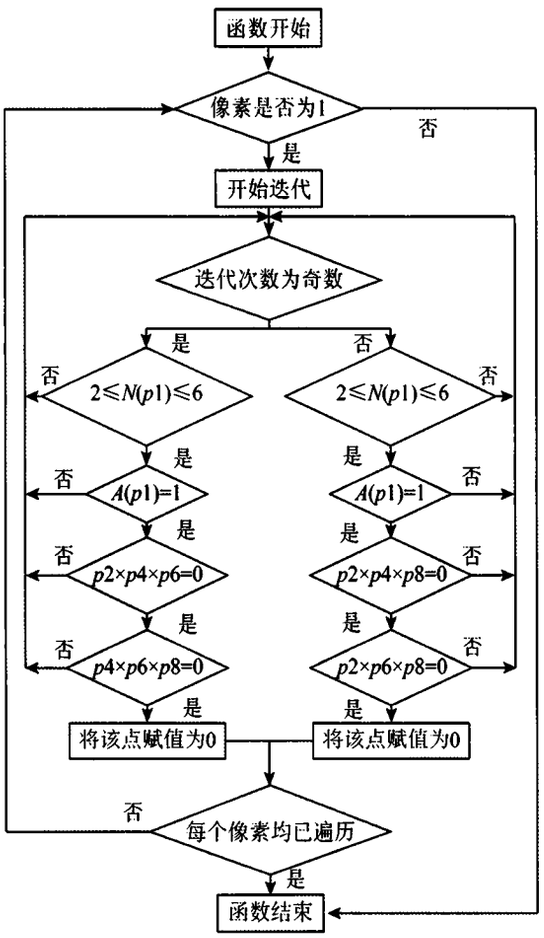


图 4　骨架化处理流程

Fig. 4　Skeletonization process flow chart

2.2　去毛刺

在现有的骨架提取方法中,无论哪种方法都无法避免对边缘敏感的问题,即会产生毛刺[13]。在去毛刺这个问题上,已经有很多学者进行了研究。郭斯羽等[14]提出区域重构法去毛刺,王要峰等[15]提出了方向链码法,秦筱槭等[16]则提出了分级去除毛刺的方法。然而现有去毛刺方法都没有考虑到玉米图像本身的特性,在效率和图像细节保存等方面不尽如人意。本文在其基础上提出一种新的去毛刺方法,即基于节点长度阈值的去毛刺法。

2.2.1　相关概念

1)节点。本身为白点且周围八邻域有 3 个以上白色像素的点。

2)连通区域。本文采用八连通区域,即所分析对象的上、下、左、右、左上、右上、左下、右下窗口位置。

3)连通区域面积。连通区域中像元个数。

2.2.2　算法原理

理想情况下,细化后的骨架应是单像素宽度的骨架,即连通区域的面积可以代表分支长度。同时,由于玉米图像本身的特性导致其骨架应为单连通区域即整张图像只有一个连通区域。基于此,考虑在算法中逐个删除节点将图像打散为多个连通区域,根据毛刺长度远小于骨架分支长度的条件将毛刺所在连通区域与骨架所在连通区域分离并删除。在删除毛刺之后再恢复之前删除的节点,保持原图像的连通性不变。其中阈值的选取可采用"试凑法",本文以 50 为步长逐步加大阈值,当去毛刺效果变差或无明显变化时停止,则选择该步长为相应阈值。

2.2.3　算法描述

算法伪代码描述如下:

```
DeleteDot(Isolated dots);
while(Seek(dot) = = True)
{tempDelete(dot);
if(Find(Zone) < ThresholdValue)
DeleteZone(Zone);
RestoreDelete(dot); }
```

即如果满足该点为孤立点或该点在删除节点后连通区域面积小于阈值的连通区域上,则删除该点,具体实现流程如图 5 所示。

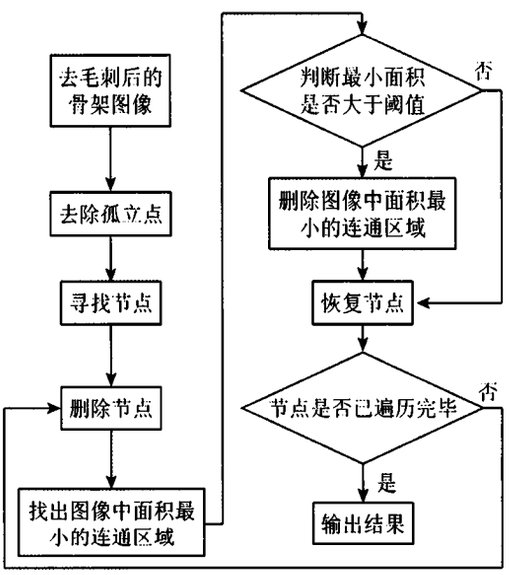


图 5　去毛刺流程

Fig. 5　Deburring flowchart

2.3　玉米茎秆和穗的去除

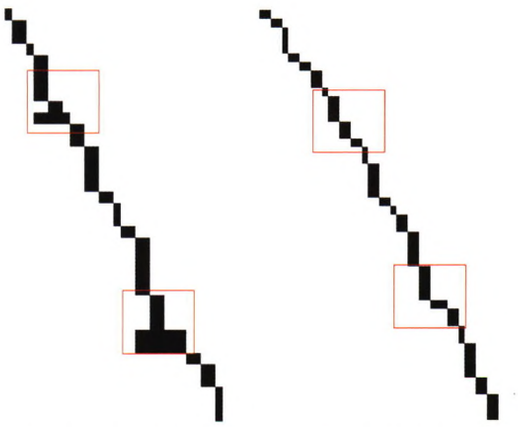
经过去毛刺处理后的骨架除了叶片信息之外还有玉米的茎秆和穗等信息,这都会影响到提取叶倾角的精度。本文在此提出一种新的算法去除玉米茎秆和穗。

2.3.1　去伪节点

理想情况下,经过去毛刺处理后的骨架图像的

万方数据

节点应为叶片、穗和茎秆之间的连接点。删除所有节点后,图像被打散成完整的叶子、完整的穗和分段的茎秆。由于穗、分段的茎秆与完整的叶子间长度差距明显,可以仿照本文中去毛刺的算法,利用阈值法去除图像中的茎秆和穗。实际情况中,经过去毛刺处理的骨架图像存在如图 6(a)所示的伪节点(即邻域中有 3 个白点但并不是茎秆/穗与叶的交点)。这种伪节点会影响去茎秆和穗的效果,经过观察发现这种现象主要是由于拐弯处的直角连接所致,故考虑先对经过去毛刺处理后的骨架图像进行迭代去噪的操作,去除图像中的伪节点现象。



(a) 伪节点示意图 (b) 伪节点去除后结果

图 6 伪节点示意图及其去除后结果

Fig. 6 Schematic and result graph after pseudo node removal

算法具体描述如下:该算法每一次的迭代步骤是对符合特定条件的目标像素进行腐蚀,通过不断迭代,直到在上一次腐蚀后的目标在该次操作中,没有新的像素点被腐蚀,则算法结束。具体迭代过程为:同样设 $p1$ 点的八邻域如图 3 所示,其中 $p1$ 为前景点,如果同时满足以下 2 个条件①$N(p1)=2$;②只存在一组"前景点 - 前景点"或"前景点 - 背景点 - 前景点"的点(直角连接),则删除 $p1$,即将 $p1$ 转化为背景点。算法完成后,所有伪节点均被去除,如图 6(b)所示。

2.3.2 去除茎秆和穗

经过上一步对骨架图像中伪节点的处理后的节点就是叶片、穗和茎秆之间的连接点。删除所有节点,图像被打散成完整的叶子、完整的穗和分段的茎秆。由于穗、分段的茎秆与完整的叶子间长度差距明显,可以仿照本文中去毛刺的算法,利用阈值法去除图像中的茎秆和穗。算法伪代码描述如下:

```
DeleteDot(Pseudo dot);
DeleteDot(Pseudo dot);
while(Seek(Zone) == True)
{if(Find(Zone) < ThresholdValue)
DeleteZone(Zone); }
```

2.4 叶倾角概率密度函数提取

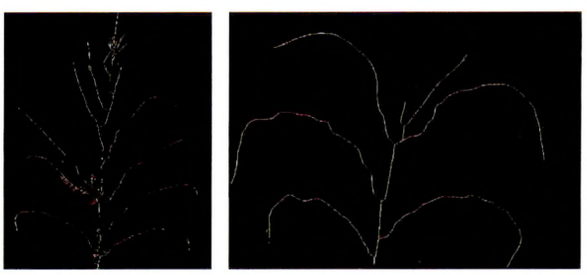
经过之前的处理,图像中只保留了叶片的骨架信息,根据叶倾角定义,选择合适大小的窗口追踪图中骨架,计算出叶倾角数组。由于骨架图像本身特点,提取的叶倾角对窗口大小较为敏感,经过多次实验比较,行方向长度取 2,列方向长度取 20 时效果较好,故将搜索窗口设为 2 像素 ×20 像素。

3 结果与分析

3.1 算法分析

3.1.1 骨架化结果分析

经过骨架化处理后的图像如图 7 所示,对骨架的总体信息保存较好,没有出现细节丢失的现象,拔节期的玉米提取效果尤其好。对于乳熟期玉米叶片稀疏的区域提取骨架效果良好,但对于玉米叶片密集的区域,提取的骨架上毛刺较多,需要作进一步的去毛刺处理。



(a) 乳熟期 (b) 拔节期

图 7 乳熟期和拔节期玉米植株骨架化处理结果

Fig. 7 Maize plant skeleton treatment results in milky maturityand jointing stage

3.1.2 去毛刺结果分析

去毛刺结果如图 8 所示。

(a) 未经处理的骨架 (b) 经过去毛刺的骨架

图 8 去毛刺处理前后的玉米叶片骨架

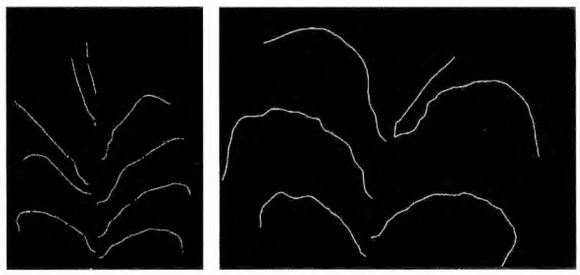
Fig. 8 Corn leaf skeleton before and after deburring treatment

万方数据

最终骨架对玉米的叶片、茎等结构均能够正确反映,同时基本去除了由细节和噪声产生的细小分支,去毛刺结果有效。但骨架与理想骨架相比仍存在“伪节点”的现象(图 6),仍需要进一步处理。

3.1.3　茎秆和穗去除结果分析

茎秆和穗等非叶片骨架的去除结果如图 9 所示。经过处理过后,茎秆点被完全删除。经过分析比较,骨架构成简单的拔节期玉米效果极佳,叶片信息完全得到保留。乳熟期的玉米叶片大部分信息得到保留。但本文方法很难区分长度较短的新叶和穗之间的差别,完整保留骨架构成复杂的玉米生育期的叶片信息还有待进一步研究。



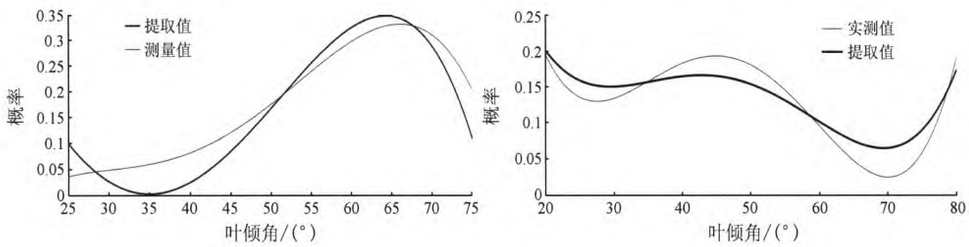
(a) 乳熟期　　(b) 拔节期

图 9　玉米植株茎秆和穗去除结果

Fig. 9　Corn plant stem and ear removal results

3.2　结果分析

经过本文所提出方法的处理,提取的玉米叶倾角与实测值的对比如图 10 所示。



(a) 乳熟期　　(b) 拔节期

图 10　乳熟期和拔节期玉米植株 LAD 提取与实测结果的对比分析

Fig. 10　Comparative analysis of LAD extraction and measured results of maize plants in milky maturity and jointing stage

图 10 中乳熟期玉米叶倾角实测值与提取值的相关系数为 0.821 4,拔节期玉米叶倾角实测值与提取值相关系数为 0.908 7。

4　结论

针对玉米叶倾角分布(LAD)的提取研究,本文提出了一种基于玉米照片的 LAD 提取方法。该方法通过骨架化得到单株玉米的整体骨架;使用阈值区分玉米整体骨架上的毛刺、茎秆和叶片,从而得到只有玉米叶片信息的骨架;再通过搜索骨架获取玉米叶倾角。通过与实测值的对比表明,此方法获取的玉米 LAD 精度较高,尤其是玉米整体骨架化和去毛刺算法的效果较好。

与现有的叶倾角提取方法比较,本文方法不会对玉米造成损伤,也不需要一些特定的仪器,可以显著降低叶倾角提取的难度和成本,并且本文方法具有一定的普适性,经过进一步研究可以应用到除玉米之外的其他大田作物上,对于农业应用,尤其是对植株的冠层分析有重大意义。

但是,本文方法仍然存在一些不足之处:①算法依赖于阈值的选取,如何快速获取适合的阈值有待于进一步研究;②玉米植株上部的新叶和穗的区分度较低,容易误删长度较短的叶片;③在通过叶片骨架提取叶倾角时,叶倾角对搜索窗口的大小敏感。这些问题的解决还有待于进一步研究。

参考文献(References):

[1] 王绪鹏,范文义,温一博. 基于 Campbell 椭球分布函数的大兴安岭地区主要树种叶倾角分布模拟[J]. 应用生态学报,2013,24(11):3199 - 3206.
Wang X P, Fang W Y, Wen Y B. Simulation of leaf inclination angle distribution of main tree species in Daxing' an Mountains of China based on the Campbell ellipsoid distribution function[J] Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11): 3199 - 3206.

[2] 苏 伟,郭 皓,赵冬玲,等. 基于优化 PROSAIL 叶倾角分布函数的玉米 LAI 反演方法[J]. 农业机械学报,2016,47(3):234 - 241.
Su W, Guo H, Zhao D L, et al. Corn LAI inversion method based on optimized PROSAIL leaf dip distribution function[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 234 - 241.

[3] Campbell G S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986, 36(4): 317 - 321.

[4] Goel N S, Strebel D E. Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies 1[J]. Agronomy Journal, 1984, 76(5): 800 - 802.

[5] Lang A R G, Xiang Y Q, Norman J M. Crop structure and the penetration of direct sunlight[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1985, 35(1 - 4): 83 - 101.

[6] 苏 伟,展郡鸽,李 静,等. 基于地基激光雷达的叶倾角分布升尺度方法研究[J]. 农业机械学报,2016,47(9):180 - 185.

万方数据

Su W, Zhan J G, Li J, et al. Research on upscaling method of leaf dip angle distribution based on ground - based LiDAR[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 180 - 185.

[7] Zheng G, Moskal L M. Leaf orientation retrieval from terrestrial laser scanning (TLS) data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(10): 3970 - 3979.

[8] Zou X, Mõttus M, Tammeorg P, et al. Photographic measurement of leaf angles in field crops[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 184: 137 - 146..

[9] Sinoquet H, Thanisawanyangkura S, Mabrouk H, et al. Characterization of the light environment in canopies using 3D digitising and image processing[J]. Annals of Botany, 1998, 82(2): 203 - 212.

[10] 王绪鹏,范文义,曲 迪. 基于植物冠层分析仪单线多角度测量的叶面积指数与叶倾角分布关系[J]. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3209 - 3215.
Wang X B, Fan W Y, Qu D. The relationship between leaf area index and leaf dip angle distribution based on single - line multi - angle measurement of plant canopy analyzer[J]. Journal of ecology, 2014, 33(12): 3209 - 3215.

[11] Saeed K, Tabędzki M, Rybnik M, et al. K3M: A universal algorithm for image skeletonization and a review of thinning techniques[J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2010, 20(2): 317 - 335.

[12] Zhang T Y, Suen C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. Communications of the ACM, 1984, 27(3): 236 - 239.

[13] 王婉心,贾立锋. 骨架提取中的毛刺去除方法[J]. 广东工业大学学报, 2014, 31(4): 90 - 94.
Wang W X, Jia L F. Burr removal method in skeleton extraction [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2014, 31(4): 90 - 94.

[14] 郭斯羽,董红霞,张 翌. 一种用于植物叶片图像骨架提取的去毛刺方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(1): 52 - 56.
Guo S Y, Dong H X, Zhang L. Deburring method for plant leaf image skeleton extraction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(1): 52 - 56.

[15] 王要峰,崔 艳. 基于方向链码去除骨架图像毛刺算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(s1): 193 - 194.
Wang Y F, Cui Y Skeleton image glitch algorithm based on direction chain code[J]. Computer Application, 2013, 33(s1): 193 - 194.

[16] 秦筱械,蔡 超,周成平. 一种有效的骨架毛刺去除算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 28 - 31.
Qin X W, Cai C, Zhou C P. An effective skeleton burr removal algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(12): 28 - 31.

Extraction of probability density distribution function of corn plant

CHEN Xiao[1,2,4], BIAN Dahong[3], CUI Yanhong[3], LIU Xinli[1,2], MENG Xianglei[1,2], SU Wei[1,2]

(1. *College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*; 2. *Key Laboratory of Remote Sensing for Agri - Hazards, Ministry of Agriculture, Beijing* 100083, *China*; 3. *College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding* 071001, *China*; 4. *Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing* 100871, *China*)

Abstract: Leaf angle is an important parameter to describe the canopy structure of vegetation. The leaf angle distribution (LAD) determines the interception of vegetation canopy and is an important parameter in quantitative inversion of remote sensing. The current method of measuring the leaf angle is time - consuming, labor - intensive and subjective, with no accuracy guarantee. In this paper, image - based probability density function extraction for LAD of corn plant is proposed, which can extract LAD of corn plant quickly and accurately with low cost. Firstly, the skeleton is extracted from the image. Secondly, the information such as burrs and stems in the skeleton image is removed to obtain the leaf skeleton. Finally, the leaf angle is extracted by searching the skeleton with a search window of size 2 × 20. The results of precision evaluation show that the correlation coefficient between the measured value of the corn dip angle and the extracted value is 0.821 4, and the correlation coefficient between measured and extracted values of the corn leaf angle at jointing stage is 0.908 7, which suggests that the method is feasible and accurate with low cost.

Keywords: image; corn plant; leaf angle distribution function; skeletonization; deburring

(责任编辑: 李 瑜)

万方数据