

便携式作物生长监测诊断仪性能试验*

杨建宁¹ 张井超¹ 朱艳² 姚霞² 曹卫星² 倪军²

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 南京农业大学国家信息农业工程技术中心, 南京 210095)

摘要: 为了检验研制的便携式作物生长监测诊断仪的整体性能,在室内、室外、田间分别对作物生长监测诊断仪的性能进行了试验研究。结果表明,多光谱传感器具有较高的线性度与精度,线性决定系数均达到了0.95以上;传感器的重复性与稳定性好,其中波长720 nm探测镜头的回程误差为3.35%,波长810 nm探测镜头的回程误差为2.22%;仪器的动态稳定性良好,在测试环境下,太阳光源辐照度变化引起的测量误差较小,其中波长720 nm探测镜头平均误差为1.43%;波长810 nm探测镜头平均误差为1.38%;仪器对水稻叶层氮含量、叶层氮积累量、叶面积指数和叶干重的监测性能优良,线性拟合决定系数分别为0.879 5、0.883 0、0.859 6和0.839 3;平均测量误差分别为6.14%、8.29%、6.24%和6.19%。

关键词: 作物 生长指标 仪器 性能分析 试验

中图分类号: S237; TP73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0208-05

Experiments on Performance of Portable Plant Growth Monitoring Diagnostic Instrument

Yang Jianning¹ Zhang Jingchao¹ Zhu Yan² Yao Xia² Cao Weixing² Ni Jun²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. National Engineering and Technology Center for Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Experiments were carried out on the performance of the crop growth monitoring diagnostic instrument. The results showed that multi-spectral sensor had high linearity and precision, and linear correlation coefficient was over 0.95. Sensor with characteristics of good repeatability and stability, the hysteresis error of whose detection lens on 720 nm was 3.35%, and on 810 nm was 2.22%. And also the dynamic stability of the instrument was well. In the test environment, with the smaller measurement error caused by the solar light irradiation changes, the average error of 720 nm detection lens was 1.43% and of 810 nm detection lens was 1.38%. The instrument has excellent performance on monitoring leaf nitrogen content, leaf nitrogen accumulation, leaf area index and leaf dry weight, the linear regression correlation coefficient of which were 0.879 5, 0.883 0, 0.859 6 and 0.839 3 respectively and average measurement error of which were 6.14%, 8.29%, 6.24%, 6.19% respectively.

Key words: Crop Growth indicator Instrument Performance analysis Experiments

引言

作物生长监测诊断设备是构成作物精确管理系统的核心之一,其性能直接影响到作物氮肥调控的

精确性。作物冠层反射光谱因其获取便捷、受大气因子的影响小、分辨率高等优点而被广泛用于作物生长指标光谱监测机理的研究^[1~4]。在作物生长监测设备方面我国还处于实验室研究阶段^[5~6],至今

收稿日期: 2012-03-26 修回日期: 2012-05-29

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100703)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2010395、BE2011351)、江苏省省级现代服务业(软件产业)发展专项引导资金资助项目、江苏省工业和信息产业转型升级专项引导资金资助项目(物联网专项)、江苏省农业科技自主创新资助项目(SCX(12)3272)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PADA)

作者简介: 杨建宁,教授,主要从事农业信号检测研究, E-mail: yyyynnsn@sina.com

尚无性能稳定、功能完善的成熟产品。

为了突破作物生长信息田间实时、便捷、低成本获取的局限,南京农业大学国家信息农业工程技术中心研发了一种便携式作物生长监测诊断仪,可实现稻麦叶层氮含量、氮积累量、叶面积指数、叶干重快速无损感知^[7]。本文研究该仪器的性能,并进行田间试验。

1 作物生长监测诊断仪

作物生长监测诊断仪主要包括多光谱传感器、内置 DS18B20 型单片微型温度传感器与测量结果显示屏等部分,如图 1 所示。

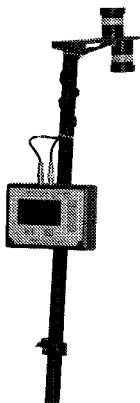


图 1 便携式作物生长监测诊断仪

Fig.1 Portable monitoring diagnostic instrument of crop growth

1.1 多光谱传感器

多光谱传感器采用波长 720 nm 和波长 810 nm 两种滤光片分光,用于测量作物冠层特征光谱反射率,在结构上分为上行光传感器和下行光传感器。上行光传感器用于接收太阳光 720 nm 和 810 nm 波长处辐射信息,并进行余弦纠正;下行光传感器用于接收对应波段作物冠层反射光辐射信息。传感器采用铝制机壳封装,孔径 38 mm,高 50 mm,质量轻、体积小、携带方便,适合田间应用。

1.2 监测器

监测器包括多光谱传感器信号调理电路、内置 DS18B20 型单片微型温度传感器、单片处理器及人机接口等。用于处理包含作物特征光谱信息和噪声干扰的光辐射信号,从中提取出特征光谱信息;计算作物冠层特征光谱反射率、测试环境温度,并耦合作物生长模型反演作物叶层氮含量、叶层氮积累量、叶面积指数、叶干重等生长信息,同时将结果存储、实时显示。

1.3 作物生长监测诊断仪工作原理

田间作业时,传感器垂直安装于水平支架上,并通过屏蔽电缆与固定在支撑杆上的监测器相连接,调节支撑杆使下行光传感器距离作物冠层 1 m 并垂

直,通过触摸监测器上的功能按键控制作物生长监测诊断仪 4 种工作方式的切换:测量、监测、诊断和复位。在测量方式下,仪器采集、处理作物冠层特征光谱信息,实时计算光谱反射率并显示;在监测方式下,仪器捕捉被测冠层光谱反射率;在诊断方式下,系统耦合作物冠层反射率与生长模型,反演作物生长信息并显示;在复位方式下,仪器返回初始状态,采集当前测试环境温度信息并显示。

2 试验与分析

2.1 线性度、灵敏度及回程误差

在室外利用多光谱传感器对标准白板反射光谱进行测量,使用光谱照度计分别记录上行光传感器辐照度与下行光传感器辐照度,并通过高精度电压表测量传感器输出,评价传感器性能指标。测量时,多光谱传感器位于标准白板垂直上方。测试在天气晴朗、无云、无风的稳定环境下进行。为了保证传感器足够宽的性能测试范围,测试时间定为 10:30 ~ 14:00。太阳光源不可调节,测量多光谱传感器迟滞性能时,在暗室里用卤钨灯光源(220 V/150 W)代替太阳光源进行试验。将卤钨灯光源固定于多光谱传感器正上方,垂直照射传感器 2 个探测镜头,可调稳压电源从 90 V 每间隔 5 V 增加至 220 V,改变卤钨灯光源强度,然后从 220 V 每间隔 5 V 递减至 90 V,光谱照度计感应面与探测镜头置于相同高度,记录辐照度,利用高精度数字万用表测量传感器输出电压。为了消除光源强度变化时光辐射波动对测试的影响,在电源电压稳定后 5 ~ 10 s 再进行测试。

图 2 显示了上行光传感器 2 个探测镜头电压输出值与光谱照度计测量结果之间的相关关系,最小二乘拟合方程为

$$y_{U720} = 0.000\ 612\ 9x + 0.214\ 4 \quad (R^2 = 0.962\ 5)$$

$$y_{U810} = 0.000\ 711\ 9x + 0.286\ 5 \quad (R^2 = 0.983\ 9)$$

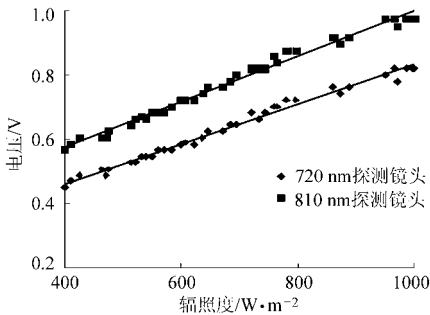


图 2 上行光传感器输出电压与光谱辐照度之间的关系

Fig.2 Relationship between upward sensor output voltage and spectral irradiance

从图 2 可见,上行光传感器 2 个探测镜头电压输出与辐照度拟合近似呈直线,线性决定系数均达到了

0.95 以上,最小二乘线性度 δ_{LU720} 为 8.14%, δ_{LU810} 为 7.18%,结果表明上行光传感器具有良好的线性度和较高的精度。

图 3 显示了下行光传感器 2 个探测镜头电压输出值与光谱照度计测量结果之间的相关关系,最小二乘拟合方程为

$$y_{D720}=0.001\,825x+0.064\,48\quad (R^2=0.985\,4)$$
$$y_{D810}=0.002\,331x+0.138\,2\quad (R^2=0.984\,3)$$

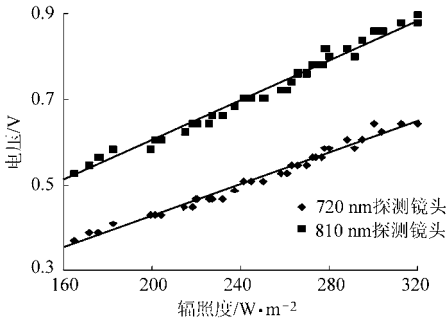


图 3 下行光传感器输出电压与光谱辐照度之间的关系
Fig. 3 Relationship between downward sensor output voltage and spectral irradiance

从图 3 可见,下行光传感器 2 个探测镜头电压输出与辐照度拟合近似呈直线,线性决定系数均达到了 0.95 以上,最小二乘线性度 δ_{LD720} 为 10.5%, δ_{LD810} 为 6.12%,结果表明下行光传感器具有良好的线性度和较高的精度。

图 4 为多光谱传感器 2 个探测镜头回程误差 γ_H 的测试散点图。根据回程误差的计算公式

$$\gamma_H=\pm\frac{\Delta H_{\max}}{2y_{FS}}\times100\%$$

(1)

式中 $\Delta H_{\max}$ ——正、反行程间输出的最大差值
 y_{FS} ——量程输出

测得 720 nm 探测镜头的回程误差为 3.35%,810 nm 探测镜头的回程误差为 2.22%,传感器具有良好的重复性与稳定性,可以满足实际使用要求。

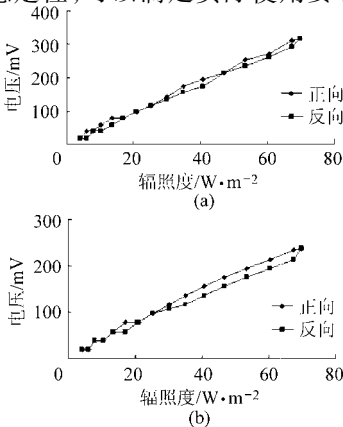


图 4 多光谱传感器回程误差
Fig. 4 Hysteresis error of multi-sensor
(a) 720 nm 探测镜头 (b) 810 nm 探测镜头

2.2 稳定性试验

文献[7]对作物生长监测诊断仪的标定试验是在尽可能短的测试时间下完成的,这样可以保证试验过程中,太阳光源辐照度近似不变,提高了标定精度及可靠性。在实际的田间测试过程中,需要根据测试时间长短,及时使用标准反射板对多光谱传感器标定,以保证多光谱传感器适应由于太阳高度角变化引起的不同辐射强度。这种方法在田间测试极其不便,而且还需要携带灰度板,很难体现出仪器“便携”特点。为此,需要对仪器的动态稳定性进行试验研究。以仪器的标定试验时间段为基准,结合田间测试实际需求,适度扩大测试时间范围,探求传感器测试精度与稳定性的变化。在室外利用多光谱传感器对标准白板进行测量,测试在天气晴朗、无云、无风的稳定环境下进行。测试时间 10:30 ~ 15:00,白板选用美国 Labsphere 公司生产的校正用标准反射板 SRT-99,在波长 720 nm 处,标准反射率为 0.993,在波长 810 nm 处,标准反射率为 0.994。测量时,多光谱传感器位于标准白板垂直上方,使用光谱照度计记录上行光传感器辐照度。图 5 显示了作物生长监测诊断仪测量的反射率与太阳辐照度变化关系。其测量误差如图 6 所示。

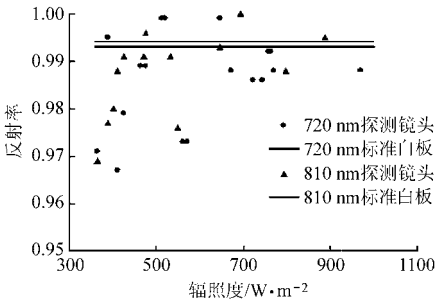


图 5 白板反射率与辐照度变化关系
Fig. 5 Relationship between whiteboard reflectance and irradiance

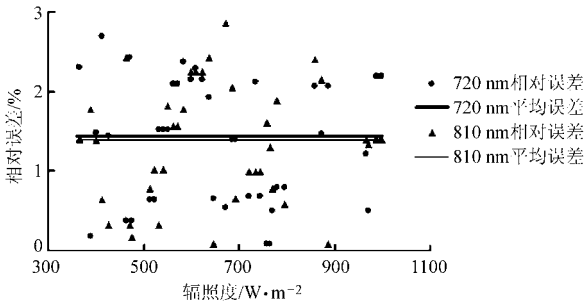


图 6 测量误差分布
Fig. 6 Distribution of measurement error

从图 5 ~ 6 可见,测试时间 10:30 ~ 15:00,太阳辐射强度由于高度角的变化在不断变化,上行光传感器的辐照度最大值为 1 000 W/m²,最小值为 365.5 W/m²,而监测仪测量到的标准白板反射率变化不大,其中 720 nm 探测镜头的最大相对误差为

2.69%,平均误差为 1.43%;810 nm 探测镜头的最大相对误差为 2.86%,平均误差为 1.38%;说明作物生长监测诊断仪动态稳定性较好。因此,在保证一定测量精度的前提下,利用监测仪在 10:30 ~ 15:00 进行田间测试,可以忽略太阳高度角引起辐射强度变化的影响,使用统一的校正模型。这样测试省时省力,真正达到“便携”。

3 田间测试

2011 年 8 月在扬州市仪征新集试验站(东经 119°18',北纬 32°19')进行了水稻田间测试。

3.1 试验设计

试验采用裂区设计,主区为氮肥处理,副区为品种,共设 2 个品种和 5 个施氮水平:供试水稻品种为陵香优 18 和武香粳 14;5 个氮肥水平分别为 N0 (0 kg/hm²)、N1 (90 kg/hm²)、N2 (180 kg/hm²)、N3 (270 kg/hm²) 和 N4 (360 kg/hm²),按基肥、蘖肥、促花肥、保花肥质量分数分别为 50%、10%、20% 和 20% 施入;各处理配施 135 kg/hm² P₂O₅ 和 190 kg/hm² K₂O,作基肥时一次性施入。试验小区随机区组排列,重复 3 次,共 30 个小区,每个小区面积为 5 m × 7 m = 35 m²;小区之间以埂相隔,埂上覆膜,独立排灌。移栽株行距为 15 cm × 30 cm,南北行向。5 月

15 日播种,6 月 21 日移栽,其他管理同常规高产田。

3.2 数据获取方法

(1)光谱数据测定

光谱测量主要采用便携式作物生长监测诊断仪,光谱测量选择在晴朗无云或少云的天气进行,测量时间为 10:00 ~ 14:00(太阳高度角大于 45°)。作物生长监测诊断仪测量时其传感器距冠层垂直高度为 1 m 左右,每个小区测量 3 个点,每个点重复 5 次取平均值,记录测量值。

(2)农学参数测定

与光谱测量同步,每个小区取 3 穴植株,在室内按器官分离,利用美国 LAI3000C 型叶面积仪测定叶面积,计算得到整个小区的叶面积指数(I_{LA});将样品置于 105℃ 下杀青 30 min 后,再于 80℃ 干燥至恒质量,称量获得叶干重(W_{LD});样品粉碎后,采用凯氏定氮法测定叶片氮含量(C_{LN})。叶片氮积累量计算式为

$$A_{LN} = C_{LN} W_{LD} \tag{2}$$

(3)结果分析

用便携式作物生长信息监测诊断仪测得的陵香优 18 冠层反射光谱数据构建差值植被指数(I_{DV}),与水稻生长指标 C_{LN} 、 A_{LN} 、 I_{LA} 、 W_{LD} 进行最小二乘线性拟合,分析相关性,结果如图 7 所示。

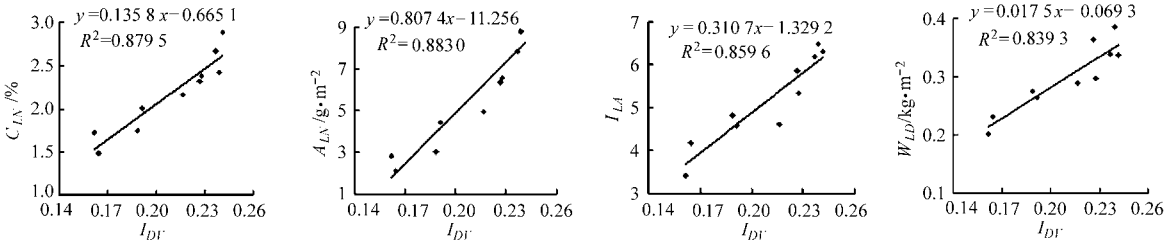


图 7 水稻生长信息监测模型

Fig. 7 Rice growth information monitoring model

从图 7 可知,由作物生长监测诊断仪测得的 I_{DV} 值与水稻冠层叶片氮含量、氮积累量、叶面积指数、叶干重具有很好的线性相关性,决定系数 R^2 分别为 0.879 5、0.883 0、0.859 6 和 0.839 3,建立的拟合方程可用于水稻生长信息的快速无损定量分析。用试验测得的武香粳 14 数据对建立的水稻生长信息监

测模型进行检验,结果如表 1、表 2 所示。
从表中数据分析可知,作物生长监测诊断仪能够较好地实现作物生长信息的在线监测,其中,叶层氮含量平均测量误差为 6.14%,叶层氮积累量平均测量误差为 8.29%,叶面积指数检测平均测量误差为 6.24%,叶干重平均测量误差为 6.19%。

表 1 作物生长监测诊断仪光谱数据

Tab.1 Spectral data of crop growth monitoring diagnostic instrument

光谱反射率		I_{DV}	光谱反射率		I_{DV}
810 nm	720 nm		810 nm	720 nm	
0.381	0.219	0.16	0.370	0.206	0.16
0.414	0.223	0.19	0.403	0.214	0.19
0.480	0.252	0.23	0.439	0.222	0.22
0.499	0.262	0.24	0.466	0.239	0.23
0.501	0.259	0.24	0.479	0.240	0.24

表 2 作物生长监测诊断仪验证数据

Tab.2 Verification data of crop growth monitoring diagnostic instrument

C_{LN}			A_{LN}			$I_{LA}/\%$			W_{LD}		
实际值	测量值	相对	实际值	测量值	相对	实际值	测量值	相对	实际值/	测量值/	相对
/%	/%	误差/%	$/\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	$/\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	误差/%	/%	/%	误差/%	$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	误差/%
1.725	1.530	11.28	2.033	1.796	11.65	3.417	3.693	8.10	0.202	0.214	6.00
2.008	1.934	3.66	4.412	4.199	4.82	4.581	4.618	0.81	0.263	0.266	0.91
2.376	2.427	2.17	6.578	7.131	8.40	5.336	5.746	7.70	0.296	0.329	11.10
2.669	2.552	4.36	7.858	7.873	0.19	6.197	6.032	2.67	0.339	0.345	1.88
2.886	2.614	9.44	9.730	8.239	15.32	6.316	6.173	2.26	0.337	0.353	4.78
1.484	1.566	5.55	2.106	2.011	4.48	4.177	3.776	9.59	0.231	0.218	5.61
1.744	1.900	8.94	3.502	3.995	14.08	4.818	4.539	5.78	0.275	0.261	5.10
2.163	2.276	5.23	5.962	6.229	4.47	4.607	5.399	17.20	0.290	0.310	6.96
2.320	2.415	4.09	6.342	7.055	11.25	5.856	5.717	2.37	0.364	0.328	9.98
2.422	2.584	6.69	8.781	8.062	8.19	6.490	6.105	5.94	0.386	0.349	9.55
平均误差/%		6.14			8.29			6.24			6.19

4 结论

(1) 多光谱传感器具有较高的线性度与精度,线性决定系数均达到了 0.95 以上;传感器的重复性与稳定性好,其中 720 nm 探测镜头的回程误差为 3.35%,810 nm 探测镜头的回程误差为 2.22%。

(2) 作物生长监测诊断仪具有良好的动态稳定性。在晴朗无云的测试环境下,仪器作业时间可扩宽为 10:30~15:00,太阳光源辐照度变化引起的测量误差较小,其中 720 nm 探测镜头平均误差为

1.43%;810 nm 探测镜头平均误差为 1.38%;在保证一定精度的前提下,可以忽略太阳高度角变化对仪器田间作业时的影响。

(3) 作物生长监测诊断仪对水稻叶层氮含量、叶层氮积累量、叶面积指数、叶干重的监测性能优良,线性拟合决定系数 R^2 分别为 0.879 5,0.883 0,0.859 6 和 0.839 3;其中叶层氮含量平均测量误差为 6.14%,叶层氮积累量平均测量误差为 8.29%,叶面积指数检测平均测量误差为 6.24%,叶干重平均测量误差为 6.19%。

参 考 文 献

1 Ni Jun, Tian Yongchao, Yao Xia, et al. Application of monitoring system about plant growth information based on spectroscopy technique[C]//PIAENG2010: Photonics and Imaging for Agricultural Engineering, 2010,77521:1~6.

2 田永超,朱艳,姚霞,等. 基于光谱信息的作物氮素营养无损监测技术[J]. 生态学杂志,2007,26(9):1454~1463.

Tian Yongchao, Zhu Yan, Yao Xia, et al. Non-destructive monitoring of crop nitrogen nutrition based on spectral information [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9):1454~1463. (in Chinese)

3 Stone M L, Solie J B,Raun W R, et al. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat [J]. Transactions of the ASAE, 1996,39(5):1623~1631.

4 Yuh Jyuan Lee, Chwen Ming Yang, Kuo Wei Chang, et al. A simple spectral index using reflectance of 735 nm to assess nitrogen status of rice canopy [J]. Agronomy Journal, 2008, 100(1): 205~212.

5 蒋焕煜,应义斌,谢丽娟. 光谱分析技术在作物生长信息检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(6):1300~1304.

Jiang Huanyu, Ying Yibin, Xie Lijuan. Application of spectroscopy technique to obtain plant growth information [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008,28(6):1300~1304. (in Chinese)

6 徐志刚,朱艳,焦学磊,等. 作物氮素营养无损监测仪的光学系统设计[J]. 农业机械学报,2008,39(3):120~122.

Xu Zhigang, Zhu Yan, Jiao Xuelei, et al. Design of optic system for crop nitrogen non-destructive monitoring instrument [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):120~122. (in Chinese)

7 郝晓剑,郝丽娜,刘良云,等. 智能便携式 NDVI 测量仪[J]. 仪器仪表学报,2005,26(3):246~248.

Hao Xiaojian, Hao Li'na, Liu Liangyun, et al. A intelligent portable instrument for measuring NDVI [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(3):246~248. (in Chinese)

8 李修华,李民赞,崔笛. 基于光谱学原理的无损式作物冠层分析仪[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):252~255.

Li Xiuhua, Li Minzan, Cui Di. Non-destructive crop canopy analyzer based on spectral principle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009(Supp.):252~255. (in Chinese)

6 结束语

采用 D2H 坐标系,通过齐次变换法求解串联机器人机械臂的运动学方程,获得了姿态向量和位置向量。用蒙特卡洛法分析了该机械臂末端的工作空

间,提出并采用自适应划分网格方法求取了该工作空间的体积。最后,在前述方法的基础上,对机器人的结构参数对工作空间体积的影响进行了分析,为机器人的参数优化提供了理论依据。

参 考 文 献

1 张洁,李艳文. 果蔬采摘机器人的研究现状、问题及对策[J]. 机械设计,2010,27(6):1~5.
Zhang Jie, Li Yanwen. Research situation, problems and solutions of fruit-vegetable picking robots [J]. Journal of Machine Design, 2010,27(6):1~5. (in Chinese)

2 曹毅,王树新,邱燕,等. 面向灵活工作空间的显微外科手术机器人设计[J]. 机器人,2005,27(5):220~225.
Cao Yi, Wang Shuxin, Qiu Yan, et al. Dexterous workspace oriented design of robotic manipulators for microsurgery [J]. Robot, 2005,27(5):220~225. (in Chinese)

3 Abdel-Malek K, Yeh H J. Analytical boundary of the workspace for general 3-DOF mechanisms [J]. The International Journal of Robotics Research,1997,16(2):198~213.

4 Botturi D, Martelli S, Fiorini P. A geometric method for robot workspace computation [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Robots and System, Verona: Verona University Publications, 2003.

5 Rastegar J, Fardanesh B. Manipulator workspace analysis using the Monte Carlo method [J]. Mechanism and Machine Theory, 1990,25(2):233~239.

6 赵杰,王卫忠,蔡鹤皋. 可重构机器人工作空间的自动计算方法[J]. 天津大学学报,2006,39(9):1082~1087.
Zhao Jie, Wang Weizhong, Cai Hegao. Algorithms for automatically determining workspace of reconfigurable robots [J]. Journal of Tianjin University, 2006,39(9):1082~1087. (in Chinese)

7 Cao Yi, Qi Suiping, Lu Ke, et al. Shape and size computation of planar robot workspace [C]//2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, Los Angeles, USA: IEEE, 2009,2:126~130.

8 Prince C. Progressive meshes for large models of arbitrary topology [D]. Seattle: University of Washington, 2000.

9 钱归平,童若锋,彭文,等. 保持特征的点云自适应网格重建[J]. 中国图像图形学报,2009,14(1):148~154.
Qian Guiping, Tong Ruofeng, Peng Wen, et al. Adaptive mesh reconstruction of point cloud with feature preserved[J]. Journal of Image and Graphics, 2009,14(1):148~154. (in Chinese)

10 梁喜凤,王永维,苗香雯,等. 番茄收获机械手工作空间分析与仿真[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2005,31(6):807~811.
Liang Xifeng, Wang Yongwei, Miao Xiangwen, et al. Analysis and simulation of the workspace of a tomato harvesting manipulator [J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2005,31(6):807~811. (in Chinese)

11 赵大兴,周小明,李九灵. 集装箱喷漆机械手工作空间分析与仿真[J]. 机械设计,2008,25(2):15~17.
Zhao Daxing, Zhou Xiaoming, Li Jiuling. Working space analysis and simulation of container spray-painting manipulator [J]. Journal of Machine Design,2008,25(2):15~17. (in Chinese)

(上接第 212 页)

9 郑文刚,孙纲,申长军,等. 可见-近红外作物氮素光电测量仪开发[J]. 农业工程学报,2010,26(3):178~182.
Zheng Wengang, Sun Gang, Shen Changjun, et al. Development of a visible-infrared photoelectric instrument for measuring crop nitrogen [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(3):178~182. (in Chinese)

10 Zhang Xijie, Li Minzan, Liu Gang, et al. Development of a multi-spectral detector determining leaf chlorophyll content of the cucumber in a greenhouse[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008,24(6):869~876.

11 孙刚,刘良云,郑文刚,等. 基于夫琅和费暗线原理的太阳诱导叶绿素荧光仪[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):248~251.
Sun Gang, Liu Liangyun, Zheng Wengang, et al. Development of a solar induced chlorophyll fluorescence monitor based on Fraunhofer line principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):248~251. (in Chinese)

12 倪军. 作物生长信息采集系统研究与开发[D]. 南京:南京农业大学,2011.
Ni Jun. Research and development of crop growth information collection system [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)