DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.038

基于双目视觉的复合肥颗粒检测系统*

唐启敬　赵铁石　边　辉　田行斌　耿明超　周　游
(燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

【摘要】 提出了一种针对高粉尘强腐蚀环境的复合肥颗粒双目视觉检测系统。首先分析检测系统使用需求,提出实现连续大样本快速检测、实时显示结果、防腐除尘等功能的设计要求;提出 3 种双目视觉检测方案并进行对比,确定双目线阵 CCD 检测为可行方案。接着对系统硬件进行配置,并进行防腐除尘设计。为提高检测精度对电磁振动给料机进行自适应伺服控制,采用双相机并行的图像处理程序。对检测系统进行粒度分布实验,结果表明,检测系统误差在 ±3% 范围内,满足实际应用要求。

关键词: 复合肥　检测系统　双目视觉　粒度分布
中图分类号: TP242.6; S126　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2012)07-0206-06

Compound Fertilizer Particle Inspection System Based on Binocular Vision

Tang Qijing　Zhao Tieshi　Bian Hui　Tian Xingbin　Geng Mingchao　Zhou You
(*College of Mechanical Engineering*, *Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066004, *China*)

Abstract

Aiming at the compound fertilizer particle inspection for strong corrosive and high dust environment, a kind of inspection system based on binocular vision was proposed. Firstly, using demand of the inspection system was analyzed, and the design requirements which can realize the continuous large sample testing, and result online showing and granulator closed-loop controlling were put forward. Then three binocular visual inspection plans were proposed and compared. Binocular linear CCD inspection was sure for the feasible plan. Hardware configuration, anti-corrosion and dust removal were designed. In order to improve the precision, electromagnetic vibration feeder was servo controlled, which was feedback by robot vision. Also, double cameras parallel image processing program was used. Finally, particle size distribution experiment was executed. The results show that the system error is within ±3%, facilitative for practical application.

Key words　Compound fertilizer, Inspection system, Binocular vision, Particle size distribution

引言

目前复合肥生产过程中,调节造粒工艺参数的方法仍然停留在人眼判断,依据个人经验调整阶段。这种调节方法虽然速度快,但是精度低,检测样本少、随机性大,造成大量原料和能源浪费,生产效率低、成本高、不易实现自动化。急需开发能连续、动态检测颗粒大小并快速计算各粒级颗粒质量分数的检测装置。

近几年,视觉检测技术应用越来越广泛,双目视觉的关键技术也逐渐被解决[1~8]。

激光衍射、散射技术已成为颗粒检测的主流,但一般的激光检测设备不适合在复合肥颗粒检测中应用[9~10]。首先,为使检测结果能真实反映造粒情况,需进行大样本检测,检测质量至少达到 40 kg/h,颗粒数每小时至少 40 万个并且需要实时计算 6 个

收稿日期: 2011-06-18　修回日期: 2011-08-14
*国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA04Z205)和国家自然科学基金资助项目(50975244)
作者简介: 唐启敬,博士生,主要从事智能机器人技术研究,E-mail: qjtang@ysu.edu.cn
通讯作者: 赵铁石,教授,博士生导师,主要从事智能机器人技术研究,E-mail: tszhao@ysu.edu.cn

粒级颗粒的质量分数；其次，被检测颗粒直径 0.5 ~ 25 mm不等，检测范围较大；再次，检测环境恶劣，不仅检测设备处于高粉尘强腐蚀环境中，而且被检测颗粒本身也具有较强腐蚀性，使用一般设备寿命短、成本高。所以，复合肥颗粒检测系统既要能实现连续大样本、动态大范围检测，又要能克服高粉尘强腐蚀环境才能稳定可靠运行。

本文基于双目视觉研制一种检测复合肥颗粒各粒级质量分数的检测系统。设计专用的除尘、冷却、通风系统，实现连续、动态、快速检测，并自动计算将颗粒直径 0.5 ~25 mm 所分成的 0 ~ 1 mm、1 ~ 2 mm、2 ~ 4 mm、4 ~ 4.75 mm、4.75 ~ 10 mm、大于 10 mm 共 6 个粒级的质量分数。

1　系统需求分析

图 1 所示为造粒机闭环控制系统原理图，检测系统的任务是对已经打散、干燥后的复合肥样品进行大批量连续检测，以真实反映造粒情况，并测量各个粒度等级的质量分数，为控制系统实时调整造粒工艺参数提供依据。

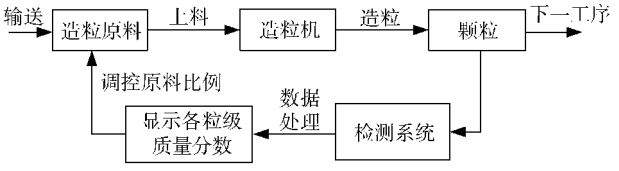


图 1　造粒机闭环控制原理图

Fig. 1　Principle diagram of granulator closed-loop control

目前使用的振动筛检测方案如图 2 所示，当送料器把复合肥颗粒放置在振动筛上之后，振动筛开始振动，由于每层筛网的网眼大小从上到下逐渐减小，逐渐形成各个粒级分布，筛分完成后称量各个筛网上的颗粒质量，再计算其所占的质量分数。然后，清理各个筛网中的颗粒，由送料器继续送料再循环筛分检测。这种方式虽然测量准确，但测量步骤繁杂，效率低，间歇性测量，不能实现动态检测；不易实现自动化；不能实时反馈使造粒机形成闭环控制。

由以上分析可知，设计检测系统时需实现连续大样本快速检测、实时在线显示结果、指导造粒机闭环控制、防腐除尘、连续工作等功能。

2　视觉检测方案设计

目前应用机器人视觉技术进行非接触式精确测量已经越来越广泛[11~12]。由于复合肥本身具有较强的腐蚀性、吸水性，系统拟采用非接触式视觉检测技术对复合肥颗粒进行连续动态检测。其原理为：

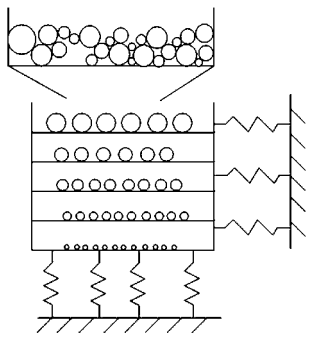


图 2　振动筛分检测方案示意图

Fig. 2　Diagram of vibration detection plan

通过 CCD 相机获得每个颗粒的直径大小，计算每个颗粒的体积和质量；统计每个颗粒隶属的级别，计算每个粒级的总质量和质量分数。

由于复合肥颗粒为不规则球体，准确得到颗粒的直径是重要步骤之一。三维检测方案如图 3 所示，拟采用 2 个相机分别从不同角度获取同一颗粒不同截面的方式反映颗粒的三维直径和外形特征。这种方案检测准确但是算法复杂，计算时间长，检测速度慢，不能满足快速大样本检测和实时反馈要求。双目面阵 CCD 检测方案如图 4 所示，由于每个 CCD 的检测范围有限，拟采用2 个 CCD相机平行布置进行大样本检测。颗粒沿水平方向传输，CCD 相机与面光源在同一侧平行布置，该方案实施较容易，能实现快速大样本检测，但是对传送带的颜色要求较高。图像处理时需要把颗粒从以传送带为背景的图片中

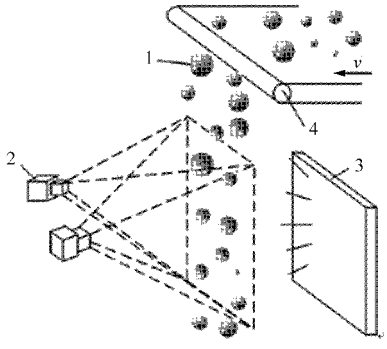


图 3　三维检测方案示意图

Fig. 3　Three-dimensional inspection plan

1. 颗粒　2. 面阵 CCD 相机　3. 面光源　4. 输送装置

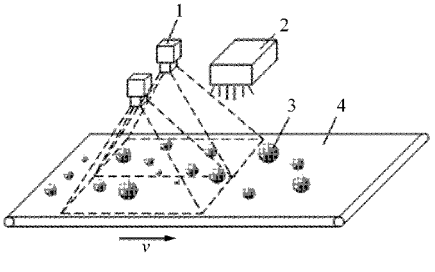


图 4　双目面阵 CCD 检测方案示意图

Fig. 4　Binocular array CCD inspection plan

1. 面阵 CCD 相机　2. 面光源　3. 颗粒　4. 传送带

分离出来,分离难度大;面光源照射在传送带上导致各区域光强不同,得到颗粒直径不准确,引起检测误差较大。

双目线阵 CCD 检测方案如图 5 所示,拟采用 2 个线阵 CCD 相机平行布置与面光源构成背光式光学检测系统。当颗粒连续通过扫描线时,整个颗粒的轮廓也以阴影的形式被采集。视觉检测系统中的电磁振动给料机宽度为 500 mm,输送速度最快为 0.14 m/s,选用的相机有效检测宽度为 225 mm,2 个相机同时检测能满足大样本快速检测的要求。线阵 CCD 相机采用逐行扫描方式进行检测,扫描频率只需大于最小颗粒的 v_{min}/D_{min} 即可,v_{min} 是最小颗粒通过扫描线时的速度,D_{min} 是最小颗粒的直径。选用线阵 CCD 相机的扫描频率最高能达到 28 kHz,能满足最小直径为 0.5 mm 的颗粒测量。

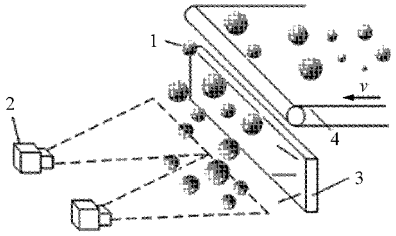


图 5 双目线阵 CCD 检测方案示意图

Fig. 5 Binocular linear CCD inspection plan

1. 颗粒 2. 线阵 CCD 相机 3. 面光源 4. 输送装置

这种方案利用颗粒的重力,在自由下落过程中进行检测,得到二维图像如图 6 所示,测得沿圆周方向均布的 8 个方向直径 $d_1 \sim d_8$,计算 8 个方向的平均值 D 作为颗粒的等效直径进行质量计算,这种方式虽然有误差存在,但是经过大样本统计可知误差较小,满足使用要求。

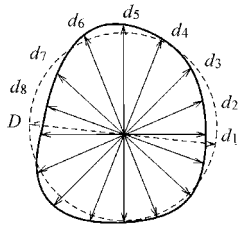


图 6 颗粒等效直径

Fig. 6 Particle equivalent diameter

经比较,双目线阵 CCD 检测方案测量速度快、精度高,能满足复合肥颗粒检测的需求,实现连续、动态、实时反馈等功能。

3 视觉检测系统硬件设计

3.1 系统硬件组成

在视觉检测技术中应用线阵 CCD 相机搭建的系统有很多组成方式。本视觉检测系统主要硬件设备有:1 个电磁振动给料机,2 个线阵 CCD 相机,1 个高亮光源,1 个多轴运动控制卡,1 个图像采集卡,1 个工控机。各部分连接如图 7 所示。

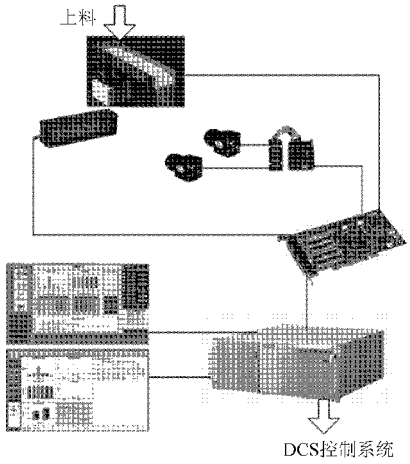


图 7 视觉检测系统硬件连接图

Fig. 7 Hardware connection diagram of visual inspection system

选用适马镜头焦距为 28 mm,光圈调至最小值使 CCD 感光元件上 1 个像素对应 0.125 mm。实际使用中以 4 个像素为最小分辨率,所以视觉检测系统最小分辨率为 0.5 mm。为使控制系统简单、经济,整个机器人控制系统采用工控机与板卡结构,通过组态王软件连接各硬件设备。工控机型号为西门子 RACK547B,控制卡型号为研华 1727U,具有 12 路的数字量输入、16 路的数字量输出和 12 路的模拟量输出,能满足本系统控制的需求。工控机作为主控制器,其上运行控制主程序、控制算法,提供用户操作界面,数据处理,实时监控检测状态,显示检测结果,并能把结果输送至 DCS 造粒控制系统中。

3.2 防腐除尘设计

检测系统在高粉尘强腐蚀环境中使用,如果没有进行特殊的防尘防腐处理,腐蚀性气体和粉尘不仅轻易进入设备内部,还能粘附在相机或光源的表面影响检测。所以防腐和除尘是系统能否长时间运行和高精度检测的关键问题。

首先,为了防腐、防尘,设计了密封结构和专用气路。通入洁净的空气使系统在正压环境中工作,能有效防止腐蚀性气体和粉尘进入。

其次,对光源和 CCD 相机等关键检测设备进行单独密封,设计风道、风帘、气唇。图 8 所示为相机防腐除尘系统,相机布置在正面为玻璃的密封结构中;进风口设置在背面底部;出风口设置在玻璃上方;出风口由气唇密封,气唇的材料为塑料弹性薄片;不通入压缩空气时,气唇与玻璃外表面紧密接触形成密封腔;通入压缩空气时,密封腔内处于正压状态,气唇由气体压力和自身弹性力作用达到动态平

衡，在玻璃表面形成风帘，能有效防止粉尘粘附在玻璃表面，实现自清洁功能；空气流动形成风道对设备进行冷却。

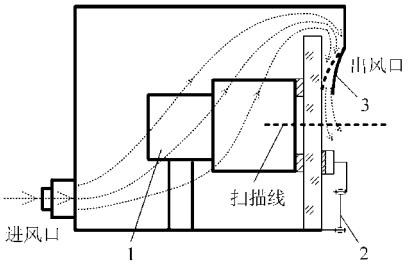


图 8　相机防腐除尘系统

Fig. 8　Anticorrosive and dust removal system of camera

1. 相机　2. 除尘机构　3. 气唇

针对粘附在玻璃表面的粉尘，设计了专用除尘机构(图 9)，由双四杆机构组成，电动机单向转动，控制简单。当粉尘过多时会降低检测结果的精度，需要除尘处理，提高环境光亮度。CCD 传感器检测图像的灰度低于 200 时，除尘机构开始工作，自动清洁玻璃表面，实现自动除尘功能。不工作时如图 9 中虚线所示，机构折叠在玻璃表面的下方，不影响正常检测。

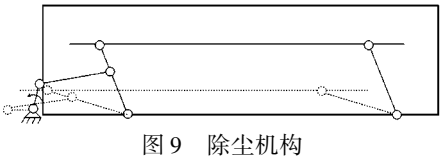


图 9　除尘机构

Fig. 9　Dust removal institutions

4　视觉检测控制系统关键算法设计

4.1　基于机器人视觉自适应伺服控制

复合肥样品连续传送至电磁振动给料机上，经电磁振动给料机的振动输送，复合肥样品颗粒均匀平铺在电磁振动给料机的表面，形成单层料幕从光源和相机之间下落。被检测颗粒下落时是否为单层料幕，对检测精度影响很大，所以需要对电磁振动给料机进行伺服控制[13~14]。依据被检测颗粒的大小、数量选择不同的电流调整方案，实时调整电磁振动给料机的电流从而改变振幅，使颗粒下落时为单层料幕。

当颗粒直径较小、数量较多、每帧图片的颗粒覆盖率较高时，选择迅速减小电流的方案降低振幅；当颗粒直径较大、数量较多、但每帧图片的颗粒覆盖率不高时，选择缓慢减小电流的方案降低振幅。图 10 为电磁振动给料机的伺服控制流程图。

4.2　双 CCD 相机并行检测算法

为了保证检测结果的准确性，检测的样品越多越好，所以在检测系统中采用了 2 个 CCD 相机，但

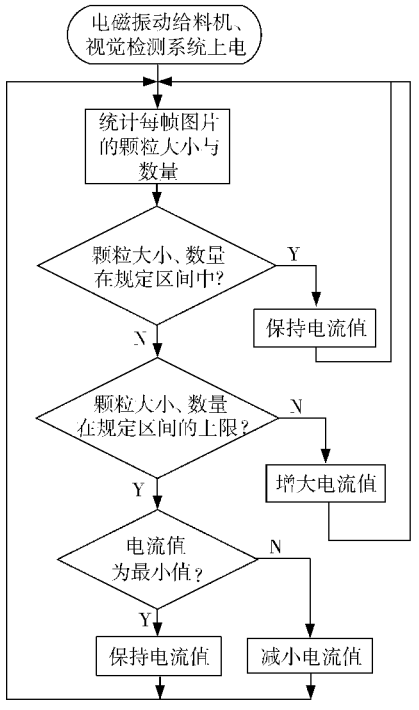


图 10　电磁振动给料机自适应控制流程图

Fig. 10　Flow chart of electromagnetic vibrating feeder adaptive control

2 个 CCD同时采集在程序调用上可能会产生冲突、丢失数据，影响检测精度。为了能实现 2 个 CCD 相机并行采集，采用了基于双相机并行采集的图像处理程序，如图 11 所示。

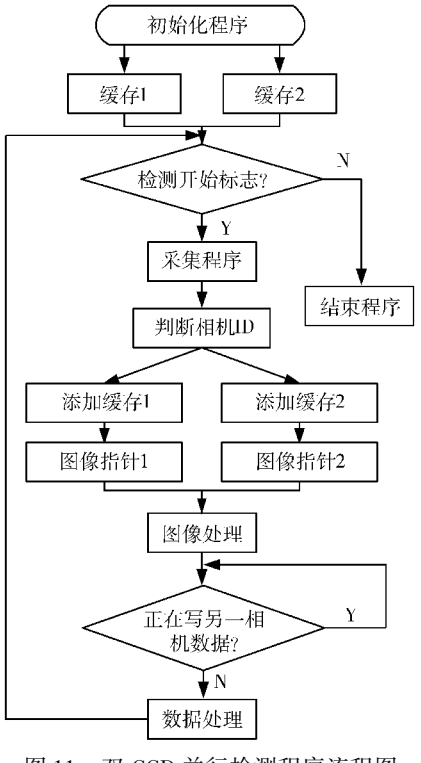


图 11　双 CCD 并行检测程序流程图

Fig. 11　Flow chart of double CCD parallel detection program

在对图像进行采集前先在内存中开辟 2 个独立的缓存序列分别作为 2 个相机的内存资源,设计 2 个基本一致的图像处理程序,分别处理各自 CCD 相机采集的信号。在图像处理时通过判断相机的识别号分别调用 2 个独立的图像处理函数,图像处理结束后在写数据库之前先判断当前数据库是否正在写入,只有写数据库变量处于空闲状态时才能继续进行写操作,否则程序处于等待状态,这样就保证了数据在存入数据库时不出现丢数、复写等现象,同时也保证了双 CCD 相机的并行性和数据的实时性。

5 检测系统粒度分布误差实验

检测系统的作用是检测颗粒的大小,得到粒度质量分数分布情况,指导造粒参数实时调整。系统中检测的复合肥颗粒直径范围是 0.5 ~25 mm,要求检测误差在 ±3% 范围内。

通过标定可由颗粒的像素直径得到颗粒的实际直径,再通过球的体积公式和颗粒密度计算得到每个颗粒的质量。根据图 7 中所示的 DCS 控制系统的需求,需要把被检测样品颗粒定义成 6 个粒级,分别统计 6 个粒级的颗粒质量分数作为参考数据,输送至 DCS 控制系统中控制电流大小调控原料比例。

在造粒机出口处取得的复合肥颗粒作为样品。首先用标准筛手工筛分出 6 个粒级的颗粒,然后用天平分别称量 4 ~4.75 mm 和大于 10 mm 的颗粒各 100 g,其余粒级各 200 g 作为第 1 组实验样品。用同样的方法得到第 2 组实验样品。分别对两组样品各进行 10 次检测实验,统计 10 次实验各个粒级颗粒的质量分数的平均值,其实验结果如表 1 所示。

由表 1 可知检测系统的粒度分布质量分数误差最大为 2.46%,在 ±3% 范围内。误差产生的原因可能是:复合肥颗粒不是标准的球形,利用球的体积公式求复合肥颗粒的体积和质量存在一定的误差;实验过程中样品颗粒不断的振动、掉落,回收过程中部分颗粒的遗失造成样品的质量变化。

表 1 粒度分布实验结果

Tab. 1 Experimental results of particle size distribution

粒级分布/mm	标准样品		第 1 组检测平均值			第 2 组检测平均值		
	质量/g	质量分数/%	质量/g	质量分数/%	误差/%	质量/g	质量分数/%	误差/%
(0,1]	200.0	20.00	200.284	19.94	-0.30	200.683	19.91	-0.44
(1,2]	200.0	20.00	202.409	20.15	0.77	203.899	20.23	1.16
(2,4]	200.0	20.00	198.511	19.77	-1.18	200.190	19.86	-0.69
(4,4.75]	100.0	10.00	101.602	10.12	1.16	100.647	9.99	-0.14
(4.75,10]	200.0	20.00	201.325	20.05	0.23	199.156	19.76	-1.20
(10,∞)	100.0	10.00	100.228	9.98	-0.21	103.265	10.25	2.46

6 结论

(1)针对高粉尘强腐蚀环境,研制了一种基于双目视觉的复合肥颗粒检测系统,能连续大样本检测颗粒的大小、粒度分布。通过实验验证,其检测误差在 ±3% 范围内。

(2)采用双线阵 CCD 相机采集颗粒二维信息,通过大样本动态检测、统计,能快速、准确地得到颗粒各粒级的质量分数分布。

(3)设计的风道、风帘、气唇和除尘机构能有效防止高粉尘强腐蚀环境对精密设备的破坏。

(4)视觉检测系统中采用基于 CCD 的自适应控制方案,能智能控制电磁振动给料机振幅形成单层料幕,为精确检测提供了前提条件。

参 考 文 献

1 周俊,刘锐,张高阳. 基于立体视觉的水果采摘机器人系统设计[J]. 农业机械学报,2010,41(6):158 ~162.
Zhou Jun, Liu Rui, Zhang Gaoyang. Design of fruit harvesting robot based on stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6):158 ~162. (in Chinese)

2 李慨,张庭. 基于视觉传感器的移动焊接机器人测控系统[J]. 中南大学学报: 自然科学版,2011,42(4):1 050 ~1 055.
Li Kai, Zhang Ting. A measurement and control system of welding mobile robot based on vision sensor [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(4): 1 050 ~1 055. (in Chinese)

3 Feng Hsuanming, Chen Chihyung, Horng Jihwei. Intelligent omni-directional vision-based mobile robot fuzzy systems design and implementation [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(5): 4 009 ~4 019.

4 宋健,孙学岩,张铁中,等. 开放式茄子采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(1):143 ~147.

Song Jian, Sun Xueyan, Zhang Tiezhong, et al. Design and experiment of opening picking robot for eggplant [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 143 ~ 147. (in Chinese)

5 Zhu Chi. In-pipe robot for inspection and sampling tasks [J]. Industrial Robot, 2007, 34(1): 39 ~ 45.

6 马孜,张旭,黄进,等. 大孔径管道 4 自由度内部检测机器人系统[J]. 机械工程学报,2009,45(6):267 ~ 273.
Ma Zi, Zhang Xu, Huang Jin, et al. Inner inspection robot system with 4 degrees of freedom for large size pipes [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6):267 ~ 273. (in Chinese)

7 英红,谈至明. 基于双目视觉的水泥混凝土路面错台检测方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2011,39(2):247 ~ 252.
Ying Hong, Tan Zhiming. Cement concrete pavement faulting detection and recognization based on binocular vision [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(2): 247 ~ 252. (in Chinese)

8 胡天翔,郑加强,周宏平. 基于双目视觉的树木图像测距方法[J]. 农业机械学报,2010,41(11):158 ~ 162.
Hu Tianxiang, Zheng Jiaqiang, Zhou Hongping. Measurement method of depth information of tree images based on binocular vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 158 ~ 162. (in Chinese)

9 浦世亮. 基于激光干涉原理的颗粒场测量技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
Pu Shiliang. The study on particle field measurement based on laser interferometric [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)

10 Jure Rejc, Justin Činkelj, Marko Munih. Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(1): 155 ~ 167.

11 Pham A M, Descantes Y, de Larrard F. Determination of sieve grading curves using an optical device [J]. Mechatronics, 2011, 21(1): 298 ~ 309.

12 Liao C W, Tarng Y S. On-line automatic optical inspection system for coarse particle size distribution [J]. Powder Technology, 2009, 189(3): 508 ~ 513.

13 黄凤,汤炳新. 振动给料机的模型参考自适应控制[J]. 河海大学常州分校学报,2007,21(1):33 ~ 36.
Huang Feng, Tang Bingxin. The model reference adaptive control of vibration feeder [J]. Journal of Hohai University Changzhou, 2007, 21(1): 33 ~ 36. (in Chinese)

14 Paulo Menezes, Frédéric Lerasle, Jorge Dias. Towards human motion capture from a camera mounted on a mobile robot[J]. Image and Vision Computing, 2011, 29(6): 382 ~ 393.

(上接第 193 页)

2 久冨茂樹,光井輝彰,飯田佳弘,et al. 並列リンク型力覚ディスプレイの研究[R]. 岐阜県生産情報技術研究所研究報告, 1999.

3 Kudomi S, Yamada H, Muto T. Development of a hydraulic parallel link type of force display[C]// Proc. 5nd JHPS Inter. Symp. on Fluid Power,2002:471 ~ 476.

4 倪涛,赵丁选,张红彦. 电液手控器型遥操作机器人力反馈控制策略[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 190 ~ 194.
Ni Tao, Zhao Dingxuan, Zhang Hongyan. Bilateral servo control of tele-robot based on electro hydraulic manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(12): 190 ~ 194. (in Chinese)

5 张祝新,赵丁选,陈铁华. 具有力觉临场感的主从机器手双向控制策略[J]. 农业机械学报, 2008,39(10): 164 ~ 167.
Zhang Zhuxin, Zhao Dingxuan, Chen Tiehua. Bilateral control strategy of master - slave manipulators with force tele-presence [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(10): 164 ~ 167. (in Chinese)

6 侯敬巍,赵丁选,倪涛. 液压二自由度力反馈操纵杆设计[J]. 工程设计学报, 2008,15(2):90 ~ 93.
Hou Jingwei, Zhao Dingxuan, Ni Tao. Design of hydraulic two-DOF force feedback joystick[J]. Journal of Engineering Design, 2008,15(2):90 ~ 93. (in Chinese)

7 陈铁华,赵丁选,张祝新. 主/从机器人系统设计与双向伺服控制[J]. 农业机械学报, 2008,39(12): 141 ~ 145.
Chen Tiehua, Zhao Dingxuan, Zhang Zhuxin. Design of master - slave manipulators system and bilateral servo control strategy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 141 ~ 145. (in Chinese)

8 Niksefatz N, Sepehri N Y, Wu Q. Design and experimental evaluation of a QFT contact task controller for electro-hydraulic actuators[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2007, 17(2 ~ 3): 225 ~ 250.

9 Sekhavat P, Sepehri N, Wu Q. Impact stabilizing controller for hydraulic actuators with friction: theory and experiments[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(12): 1 423 ~ 1 433.

10 Lee S H, Lim J T. Switching control of H_∞ gain scheduled controllers in uncertain nonlinear system[J]. Automatica, 2000, 36(7): 1 067 ~ 1 074.