

# 近距离多目标(种子)检测中摄像机系统的标定方法

胡少兴<sup>1)</sup> 马成林<sup>1)</sup> 张爱武<sup>2)</sup> 郑元杰<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(吉林大学机械工程学院, 长春 130025) <sup>2)</sup>(吉林大学锻造研究所, 长春 130025)

**摘要** 在进行基于计算机视觉的排种器性能检测时,为了解决目标(种子)之间的遮挡、加快图象采集速度和节省计算机的存储空间,提出了一种近距离多目标(种子)检测中,摄像机系统的标定方法。建立了由摄像机和平面镜组成的摄像机系统标定的数学模型,并给出了恢复空间点的方法。同时在排种器实验台上进行了验证,结果表明该系统不仅能较好地检测出种子的重叠和丢失等情况,而且检测误差小于1mm,且完全可以不用粘胶带,即可检测出排种器性能。

**关键词** 摄像机标定 图象处理 多目标 平面镜 排种器

**中图分类号:** TP273.5 S223.203.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)02-0155-05

## A Calibration Method of Camera System for Detecting Multi Objects(Seeds) in Close Range

HU Shao-xing<sup>1)</sup>, MA Cheng-lin<sup>1)</sup>, ZHANG Ai-wu<sup>2)</sup>, ZHENG Yuan-jie<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Department of Machinery Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025)

<sup>2)</sup>(Roll forging Institute, Jilin University, Changchun 130025)

**Abstract** While detecting the property of seed metering device based on computer vision, adjacent objectives are possible to be covered each other, and faster detecting speed is required. In this paper, by analyzing the feature of camera and flat mirror, a calibration method of camera system that is only composed of a single camera and a flat mirror is proposed, and the calibration model of this camera system is expounded in detail. Therefore, the camera system that is only composed of a single camera and a flat mirror can not only raise speed of grabbing image but also spare memory of computer so that the detecting speed is raised. Meanwhile, applying the map relation between image points and special points, an algorithm of reconstructing special point is also given. The calibration method is testified on the experimental table of seed metering device, results show that not only this system can detect overlapping and lost of seeds, but also error is less than 1mm, and the adhesive tape that is used in detection is completely replaced.

**Keywords** Camera calibration, Image processing, Multi objects, Flat mirror, Seed metering device

## 0 引言

排种器是播种机的关键部件,其性能的优劣直接影响到播种的质量。目前,检测排种器性能以人工测量和光电检测为主。其中,人工测量是在黄油粘胶

带上检测排种器性能,方法比较直观(如图1),其原理是根据落在匀速运动粘胶带上的种子间距来检测排种器的性能。该法能在一定程度上反映种子的着落性能,但浪费种子、污染环境、效率低。光电检测必须辅以输种管,才能限制种子流在一定范围内下落,但因种子下落时,受管壁的碰撞、摩擦等因素的影

基金项目:国家“九五”重中之重科技攻关资助项目(95-001-03 招标 04);吉林省科技发展计划资助项目(970516);

国家高校“211工程”重点建设项目

收稿日期:2000-06-13;改回日期:2001-04-11

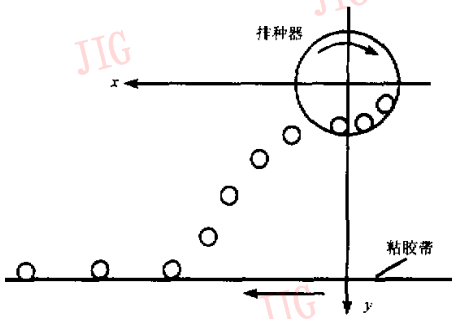


图1 排种器性能试验台简图

响,不能完全反映排种器的性能,且仅适合于检测漏播,对于重播准确性差,因此寻找一种快速准确地检测排种器性能的方法尤为重要.利用计算机视觉技术<sup>[1~2]</sup>,即可通过分析序列图象求出种子运动规律,但排种器每次不一定都排出一粒种子,有时双粒或多粒一起排出,这时若只用一台摄像机抓拍图象,则无法正确检测种子之间的重叠.虽然采用双摄像机或多摄像机,可从不同角度检测种子下落情况,解决遮挡问题,但当采用双摄像机或多摄像机抓拍运动多目标时,受图象采集和目标运动速度等因素制约,有的目标抓拍不到,导致信息丢失,得不到多目标的运动规律,且图象占用较大的空间.为了解决目标(种子)之间的遮挡、加快图象采集速度和节省计算机的存储空间,提出了一种近距离多目标(种子)检测中摄像机系统的标定方法.

### 1 系统标定模型

为了采用单摄像机就能实现近距离(<500mm)多目标位置检测,根据摄像机和平面镜成像的特点,建立了如图2所示的成像简图,利用摄像机与平面镜组成的系统求出空间点实际坐标<sup>[3]</sup>.

设世界坐标系为  $O_w X_w Y_w Z_w$ , 摄像机坐标系为  $O_c X_c Z_c Y_c$ . 其中,  $o$  点位于图象中心,  $O_c$  点为摄像机光心,  $Z_c$  为摄像机光轴, 且与图象平面  $xy$  垂直,  $X_c, Y_c$  轴分别平行于  $x, y$  轴,  $oO_c$  为摄像机有效焦距. 由于平面镜的加入, 使得一个摄像机每采一帧可同时获得两幅图象, 一幅是物体本身, 另一幅是物体的

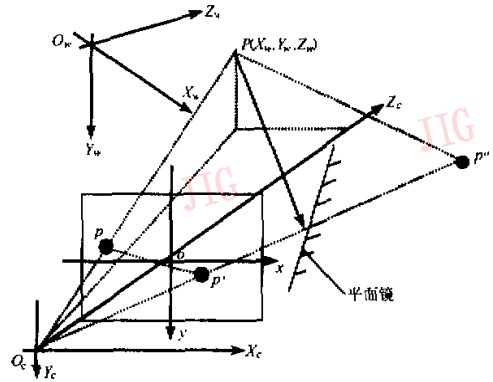


图2 摄像机与平面镜成像之间的关系

像. 这样就可根据一帧中的两幅图象求出空间点的实际位置.

设空间某点  $P$  在世界坐标系与摄像机坐标系的齐次坐标分别是  $(X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$  与  $(X_c, Y_c, Z_c, 1)^T$ , 点  $P$  在平面镜中所成的像  $p'$ , 在世界坐标系的坐标为  $(X'_w, Y'_w, Z'_w, 1)^T$ , 镜面与世界坐标  $X_w, Y_w, Z_w$  的夹角分别为  $\alpha, \beta, \gamma$ , 世界坐标系到镜面的距离为  $D$ , 则存在下列各式

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $R$  为  $3 \times 3$  正交单位矩阵;  $t$  为三维平移向量;  $\mathbf{0} = (0, 0, 0)^T$ ;  $M$  为  $4 \times 4$  矩阵. 又根据平面镜成像原理,  $P$  与  $p'$  的连线与镜面的法线平行, 则有

$$\frac{X_w - X'_w}{\cos \alpha} = \frac{Y_w - Y'_w}{\cos \beta} \quad (2)$$

$$\frac{X_w - X'_w}{\cos \alpha} = \frac{Z_w - Z'_w}{\cos \gamma} \quad (3)$$

由立体几何知, 点  $P$  与  $p'$  立差相反, 故有:

$$\frac{X_w \cos \alpha + Y_w \cos \beta + Z_w \cos \gamma - D}{\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma}} = \frac{X'_w \cos \alpha + Y'_w \cos \beta + Z'_w \cos \gamma - D}{\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma}} \quad (4)$$

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (5)$$

由式(2)~式(4)得点  $p'$  在世界坐标系中的坐标为

$$\begin{bmatrix} X'_w \\ Y'_w \\ Z'_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 2\cos^2 \alpha & -2\cos \alpha \cos \beta & -2\cos \alpha \cos \gamma & 2D \cos \alpha \\ -2\cos \alpha \cos \beta & 1 - 2\cos^2 \beta & -2\cos \beta \cos \gamma & 2D \cos \beta \\ -2\cos \alpha \cos \gamma & -2\cos \beta \cos \gamma & 1 - 2\cos^2 \gamma & 2D \cos \gamma \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

令

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 - 2\cos^2\alpha & -2\cos\alpha\cos\beta & -2\cos\alpha\cos\gamma & 2D\cos\alpha \\ -2\cos\alpha\cos\beta & 1 - 2\cos^2\beta & -2\cos\beta\cos\gamma & 2D\cos\beta \\ -2\cos\alpha\cos\gamma & -2\cos\beta\cos\gamma & 1 - 2\cos^2\gamma & 2D\cos\gamma \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

则式(6)简化为

$$\begin{bmatrix} X'_w \\ Y'_w \\ Z'_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(6)和式(8)得出了物点世界坐标与像点世界坐标的关系,即由 3 个独立参数即可求出它们之间的对应关系,但从式(1)得出,实际物点的世界坐标还没有求得,所以通过下述公式找出它们之间的相互关系。

因空间上任何一点  $P$  在图象上的成像位置可用小孔模型近似表示,即任何点  $P$  在图象上的成像位置  $p(u, v)$  为光心  $O_c$  与点  $P$  的连线  $O_cP$  与图象平面的交点,其中,  $(u, v)$  为是以象素为单位的图象坐标。由比例关系得如下公式

$$x = \frac{fX_c}{Z_c} \quad y = \frac{fY_c}{Z_c} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= M_3 M_1 X_w = M X_w \quad (10) \end{aligned}$$

式中,  $M_3 = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\alpha_x = \frac{1}{dx}$ ,  $\alpha_y = \frac{1}{dy}$ ,

$M = M_3 M_1$ ,

令点  $p'$  在摄像机中的坐标为  $(X'_w, Y'_w, Z'_w)$ , 在图象平面中的帧存坐标为  $p'(u', v')$ 。由于  $M$  是确定摄像机内外参数的关系矩阵, 摄像机摆放位置不动, 则  $M$  矩阵不变, 故

$$Z'_c \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = M X'_w = M M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M' X_w \quad (11)$$

式中,  $M' = M M_2$ 。

综上所述, 由不同高度的 6 个以上的特征点以及它们本身和镜像点的图象点坐标, 可求出  $M$  和  $M'$  矩阵。

## 2 空间点重建方法

用上述平面镜与单摄像机组成的系统可以实现三维重建。在图 2 中, 如果用摄像机 CCD 观察空间任意点  $P$  和在平面镜中的虚像  $p''$ , 那么在象平面上就会分别得到两个像点  $p$  和  $p'$ 。根据式(10)和式(11)即可求出空间点  $P$ 。

事实上, 根据式(10)和(11)求取空间点时, 仍存在像点  $p$  和  $p'$  匹配的问题。令  $P, p''$  和  $O_c$  组成的平面与像平面的交线为  $l$ , 因像点  $p$  和  $p'$  在交线  $l$  上, 故称  $l$  为对应线,  $p$  和  $p'$  为对应点。根据已知的投影矩阵  $M$  和  $M'$  可求出对应线方程, 方法如下:

首先, 将两个投影方程(10)和(11)写成

$$Z_u u = M x_p = (M_0 \quad m) x_p \quad (12)$$

$$Z'_c u' = M' x_p = (M'_0 \quad m') x'_p \quad (13)$$

其中,  $x_p$  和  $x'_p$  分别为空间点  $P$  与其在平面镜中的像点  $p''$  在世界坐标系下的齐次坐标,  $u, u'$  分别是点  $p$  和  $p'$  的图象齐次坐标, 并将  $M$  和  $M'$  矩阵中左面的  $3 \times 3$  部分记作  $M_0$  和  $M'_0$ , 右边的  $3 \times 1$  部分记作  $m$  和  $m'$ , 然后将  $x_p = (X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$  记作  $x_p = (x^T \quad 1)^T$ , 其中,  $x = (X_w, Y_w, Z_w)^T$ , 则式(12)和式(13)可展为

$$Z_u u = M_0 x + m \quad (14)$$

$$Z'_c u' = M'_0 x + m' \quad (15)$$

消去  $x$ , 得

$$Z'_c u' - Z_c M'_0 M_0^{-1} u = m' - M'_0 M_0^{-1} m \quad (16)$$

由于上式两边是三维向量, 包含了 3 个等式, 可以消去  $Z_c$  和  $Z'_c$ , 从而得到一个与  $Z_c$  和  $Z'_c$  无关的  $u$  和  $u'$  的关系式, 即对应线方程。

这样可以利用对应线方程实现物体像点与平面镜中虚像点的对应匹配, 并利用式(10)和式(11)求得空间点坐标<sup>[4-5]</sup>。

## 3 试验及结果分析

试验装置是为检测近距离 ( $< 500\text{mm}$ ) 多目标小物体而设计的 (见图 3)。一台 MTV1802CBCCD 面阵摄像机, 配接一个手动光圈  $3.5 \sim 8\text{mm}$  镜头,

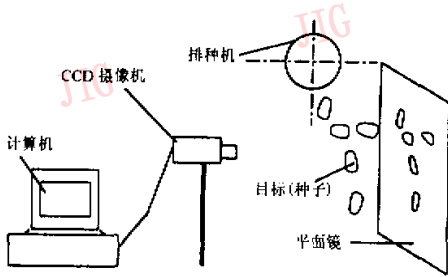


图3 试验装置

图象采集卡为 METEOR/RGB 普及型彩色图象采集卡,并用 9 支 220V/100W 的长寿灯从四周打光,平面镜位于 CCD 前方,且距 CCD 约 320mm,构成近距离多目标位置检测系统。

首先,将标定模板放于排种口正下方,其形状为栅格如图4。调节平面镜、摄像机和模板,使摄像机

能够清楚地观察到模板实体和模板在平面镜中的虚像。抓拍此位置的模板图象,然后将模板前后移动两次,移动距离为 15mm,再抓拍图象,获取不同高度的特征点,利用式(10)和式(11),求出投影矩阵  $M$  和  $M'$ ,移走模板,待排种器正常工作时,采集序列图象。

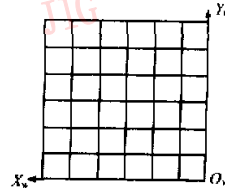


图4 标定模板

本文对相邻的 3 帧图象,进行图象预处理,提取目标,计算目标质心,并根据序列图象和式(16)寻找对应点,见图 5。

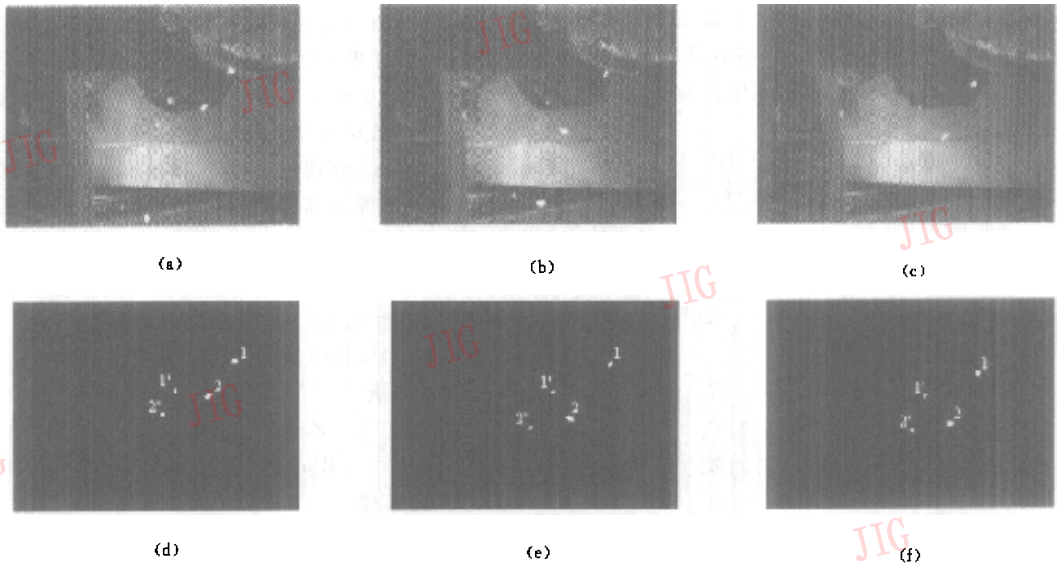


图5 (a),(b),(c)是连续采集的原始图象,(d),(e),(f)是(a),(b),(c)经去背景和特征提取后的对应图象

利用式(10)和式(11)计算目标实际位置,再由图象采集卡的采集速度(25 帧/s)和种子的运动形式,找到相邻两帧中的同一目标,从而实现帧间拼接,并结合求出的目标位置,即可得出种子落在匀速运动胶带上的种子间距<sup>[6~7]</sup>。时间共需 0.5s,对应于图 5 的求解结果见表 1。

表1 种子间距检测结果

序号	实际间距(mm)	检测间距(mm)	绝对误差(mm)
1	160.8	160.7	0.1
2	155.3	155.6	0.3
3	202.7	202.9	0.2
4	159.4	159.2	0.2

从表 1 可以看出:间距误差小于 1mm,完全可以不用粘胶带,即可检测排种器性能。

## 4 结论

(1) 建立了近距离多目标(种子)检测摄像系统,可满足近距离(<500mm)快速多目标检测的需要。

(2) 根据平面镜和单摄像机成像的特点,建立了该系统标定的数学模型,并给出了恢复空间点的

方法和提出了对应线方程的数学方法。

(3) 由于平面镜的引入,避开了多个摄像机同时抓拍物体出现的目标丢失现象,因此节省了计算机的存储空间,提高了运算速度。

(4) 将该方法用于排种器性能检测中,能准确地计算出目标位置,并通过帧间拼接,测得间距误差小于 1mm,因而完全可以不用粘胶带,即可检测排种器性能。

#### 参考文献

- 1 Todd J D. Advanced vision system for computer integrated manufacturing: part I [J]. CIMS, 1998,1(3):143~154.
- 2 Todd J D. Advanced vision system for computer integrated manufacturing: part I [J]. CIMS, 1998,1(4):235~246.
- 3 马颂德,张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,1998:52~71.
- 4 Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off the shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, RA-3(4):323~344.
- 5 Shakunage T. An object pose estimation system using a single camera[A]. In: IEEE Int Conf Intelligent Robots and Systems [C], 1992:1053~1060.
- 6 沈为民. 线阵 CCD 应用于多个目标测量时的图象拼接技术[J]. 光电工程, 1997, 24(5):63~66.
- 7 冯钟葵,刘建波. TM 数字图象数字镶嵌的几何精度分析及镶嵌方法的探讨[J]. 环境遥感, 1996, 11(4):295~301.



胡少兴 1972 年生,现为吉林大学机械科学与工程学院博士研究生。主要研究方向为计算机视觉、智能控制与图象识别、工业物理量测量及其信号处理等。发表论文 15 篇。



马成林 1935 年生,吉林大学机械科学与工程学院,教授,博士生导师,国务院学位委员会学科评议组成员。主要研究方向为精确农业和智能机械。



张彦武 1972 年生,现为吉林大学机械研究所博士研究生。主要研究方向为计算机视觉、三维测量、神经网络及人工智能等。发表论文 15 篇。



郑元杰 1975 年生,1998 年获吉林大学机械专业工学学士学位,现为吉林大学机械专业硕士研究生。主要研究领域为计算机图象处理和模式识别。