

# 基于视觉和工业机器人的动态抓取技术

黄金梭<sup>1,2</sup>, 沈正华<sup>2</sup>

(1.浙江省轻工机械科技创新服务平台, 温州 325035; 2.温州职业技术学院, 温州 325035)

**摘要:** **目的** 针对传送带输送产品过程中, 机器人动态抓取产品的位姿数据计算问题, 提出一整套基于智能相机和编码器检测的位姿数据计算方法。**方法** 首先搭建一套相机检测和机器人动态抓取系统模型, 介绍抓取系统的构成及其工作过程; 其次, 为抓取系统创建各个坐标系, 详细介绍各个坐标系间的变换关系、矩阵模型及需要标定的量; 再次, 设计标定量的测算过程和计算公式; 最后, 搭建以三菱工业机器人、欧姆龙智能相机及编码器等核心部件为主的实验样机, 对上述位姿数据计算方法进行测试和验证。**结果** 实验结果表明, 产品位姿数据的计算值与实测值之间的误差低于 0.4 mm。**结论** 基于视觉和编码器检测的机器人动态抓取精度符合工程应用要求。

**关键词:** 视觉; 机器人; 动态抓取; 坐标系

中图分类号: TB486.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)11-0177-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.11.027

## Dynamically Grasping Technology Based on Vision and Industrial Robot

HUANG Jin-suo<sup>1,2</sup>, SHEN Zheng-hua<sup>2</sup>

(1.Provincial Technology Innovation and Service Center of Machine in Light Industry, Wenzhou 325035, China;  
2.Wenzhou Vocational & Technical College, Wenzhou 325035, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose a set of pose data calculation method based on intelligent camera and encoder test to solve the problem of calculating position and orientation data when the robot dynamically grasps the product during conveying. Firstly, a dynamically grasping system model of intelligent camera and encoder was built to introduce the composition and working principle of the grasping system. Secondly, each coordinate system of the grasping system was created to describe the transformation relationship, matrix model and data needing calibration among each coordinate system. Thirdly, the calculating process and formula for the calibration were designed. At last, the experimental prototype consists of the MITSUBISHI industrial robot, OMORON intelligent camera and encoder was developed, on which the above calculation method for the position and orientation data were tested and proved. The result shows that, the error between the calculated value and the measured value of the product's position was less than 0.4 mm. The dynamic grasping precision based on vision and encoder test satisfies the requirements on engineering application.

**KEY WORDS:** vision; robot; dynamically grasping; coordinate system

在用工成本增加、招工难、生产多样化需求不断增加以及自动化技术稳定发展的背景下,越来越多的工业机器人参与到了工业生产活动中,其中解决产品

的定位与抓取问题是工业机器人在实际应用中必然遇到的重要问题<sup>[1-2]</sup>。过去,最常见的解决方式是固定产品的位置与姿态,再通过预先手动示教和后期动

收稿日期: 2019-03-03

作者简介: 黄金梭(1985—), 男, 温州职业技术学院讲师, 主要研究方向为机电系统控制策略优化、机器视觉与工业机器人综合应用。

作重现的方式来控制工业机器人抓取产品<sup>[3]</sup>。当产品实际位置与示教位置产生偏差时,传统方式就难以满足要求。机器视觉技术的出现和发展为工业机器人的定位提供了新的解决方案<sup>[4]</sup>。

刘正琼等人重点介绍了如何根据局部特征匹配,实现识别整体尺寸大于相机视野的零件<sup>[5]</sup>;倪鹤鹏等人重点介绍了图像去重复算法以及机器人追踪过程中的加减速控制算法<sup>[6]</sup>;陈海永等人重点介绍了视觉引导机器人定位焊枪和焊缝位置时的图像处理方法<sup>[7]</sup>;季旭等人重点介绍了视觉引导机器人装配星载设备时,视觉检测原理和位姿数据的计算模型<sup>[8]</sup>;王吉岱等人重点对机器视觉引导机器人定位的系统构成与工作原理作了分析介绍<sup>[9]</sup>;邱素贞等人重点对图像识别的处理方法以及控制系统构成作了一定介绍<sup>[10]</sup>;王诗宇等人重点介绍了图像去重复方法、改进经典的 Canny 算子实现稳定的图像提取与识别等工作<sup>[11]</sup>;郑华等人主要研究了 CSARA 机器人运行学模型以及视觉图像特征提取及处理的方法<sup>[12]</sup>;陈志伟等人重点介绍了视觉引导并联机器人系统中的图像处理、控制算法和控制程序<sup>[13]</sup>。

上述文献偏重视觉图像提取与处理的方法研究,或机器人本身的动力学控制问题,未涉及视觉、传送带和工业机器人三者之间的坐标系位姿数据变换以及标定方法。而在实际应用过程中,由于视觉相机、传送带等相对于机器人的物理空间位置无法直接测量,即使视觉检测出产品的位置与姿态,也需要通过空间坐标系间的一系列变换运算,转换成机器人世界坐标系下的位姿数据,机器人才能最终定位并抓取产品。

文中以传送带、智能相机和工业机器人为研究对象,提出一整套基于智能相机和编码器检测的产品位姿数据计算方法。通过创建的坐标系矩阵变换公式,只需要读取视觉检测结果和编码器数据,就可以自动计算出产品坐标系在机器人世界坐标系中的位姿数据。

## 1 相机检测与机器人动态抓取系统的搭建

动态追踪与抓取系统的核心部件包括传送带、传送带编码器、智能相机、水平关节工业机器人等,见图 1。其中,编码器安装在传送带的转轴上,用于检测传送带位置;智能相机架设在传送带上方,用于获取产品照片并检测其位置;在传送带运行方向前方,固定工业机器人,用于跟踪并抓取产品。具体工作过程如下:当传送带上的产品进入视觉相机的视野范围内时,相机拍摄该产品的完整图片,并检测出该产品在视觉坐标系下的位姿信息  $P_V$  (即基准点的位移坐

标 $(X_V, Y_V)$ 以及产品的角度值  $C_V$ ),并转化成在机器人世界坐标系下的位姿信息  $P_U(X_U, Y_U, C_U)$ 。此时,读取传送带编码器的角度位置数据  $MEnc$ 。随着传送带的继续前进,编码器数值在不断地变化,该产品的 $(X, Y)$ 坐标也不断地变化。通过实时采集传送带编码器数据,机器人不断地逼近产品,抓取产品后结束产品追踪状态。其中,任意时刻产品的高度坐标  $z$  认为是

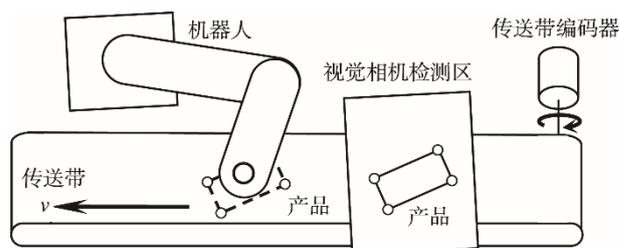


图1 工业机器人动态追踪与抓取系统  
Fig.1 Dynamic following and grasping system of industrial robot

## 2 若干坐标系的创建与变换关系分析

为了清楚描述传送带、智能相机和工业机器人之间的空间位置关系,为各个系统创建坐标系如下:工业机器人世界坐标系 $\{U\}$ 、智能相机坐标系 $\{V\}$ 、产品坐标系 $\{W\}$ 、传送带坐标系 $\{C\}$ ,见图 2。在俯视图平面内,每个坐标系只有 3 个成分: $X$ 轴、 $Y$ 轴和角度  $C$ 。

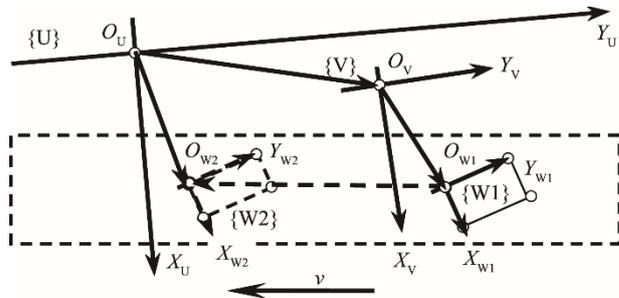


图2 工业机器人动态追踪与抓取系统坐标系  
Fig.2 Coordinate system for dynamic following and grasping system of industrial robot

### 2.1 机器人世界坐标系与智能相机坐标系变换

智能相机坐标系 $\{V\}$ 在机器人世界坐标系 $\{U\}$ 的位姿数据用 ${}^U_P$ 表示,其表达式描述如下:

$${}^U_P = \begin{bmatrix} \text{rot}(Z, c_{uv}) & \text{Tran}(x_{uv}, y_{uv}) \\ 0 & k \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:矩阵  $\text{rot}(Z, c_{uv})$ 表示绕机器人世界坐标系  $Z$  轴旋转角度  $c_{uv}$  得到智能相机坐标系的姿态,矩阵  $\text{Tran}(x_{uv}, y_{uv})$ 表示沿机器人世界坐标系  $X$  和  $Y$  轴平移距离  $x_{uv}$  和  $y_{uv}$  得到的智能相机坐标系的位置<sup>[14-15]</sup>。

矩阵  $\text{rot}(Z, c_{uv})$  的表达式描述如下：

$$\text{rot}(Z, c_{uv}) = \begin{bmatrix} \cos c_{uv} & -\sin c_{uv} \\ \sin c_{uv} & \cos c_{uv} \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵  $\text{Tran}(x_{uv}, y_{uv})$  的表达式描述如下：

$$\text{Tran}(x_{uv}, y_{uv}) = \begin{bmatrix} x_{uv} \\ y_{uv} \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 2.2 智能相机坐标系与产品坐标系变换

产品坐标系  $\{W1\}$  在智能相机坐标系  $\{V\}$  的位姿数据用  ${}^V W1 P$  表示。假设智能相机识别出产品坐标系  $\{W1\}$  的位姿数据为  $(x_{vw1}, y_{vw1}, c_{vw1})$ ，成像比例为  $k$ ，则矩阵  ${}^V W1 P$  的表达式描述如下：

$${}^V W1 P = \begin{bmatrix} \text{Rot}(Z, c_{vw1}) & k \cdot \text{Tran}(x_{vw1}, y_{vw1}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

此刻该产品在机器人世界坐标系下的位姿数据  ${}^U W1 P$  可用矩阵右乘矩阵计算如下：

$${}^U W1 P = {}^U V P \times {}^V W1 P \quad (5)$$

### 2.3 传送带编码器坐标系与机器人世界坐标系

假设智能相机获取产品位姿数据信息时刻，编码器的脉冲数为  $M1$ ，传送带将产品往前移送一定距离后，其在机器人世界坐标系下的位姿数据记为  ${}^U W2 P$ ，此刻获取的编码器脉冲数记为  $M2$ 。相当于将坐标系  $\{W1\}$  沿着机器人世界坐标系  $\{U\}$  平移至坐标系  $\{W2\}$ ，其变换矩阵记为  ${}^{W1} W2 P$ ，则产品在机器人世界坐标系下的新位姿数据  ${}^U W2 P$  可用左乘矩阵计算如下：

$${}^U W2 P = {}^{W1} W2 P \times {}^U W1 P \quad (6)$$

由于从  $\{W1\}$  到  $\{W2\}$  的变换过程只有平移，没有旋转，因此  ${}^{W1} W2 P$  的矩阵表达式定义如下：

$${}^{W1} W2 P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_{w1w2} \\ 0 & 1 & y_{w1w2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中  $x_{w1w2}$  和  $y_{w1w2}$  分别表示从  $\{W1\}$  平移到  $\{W2\}$  时，沿机器人世界坐标系  $x$  轴和  $y$  轴平移的距离。这些距离可通过读取传送带编码器数值  $M1$  和  $M2$  计算获得，计算方法如下：

$$x_{w1w2} = D_x \cdot D_M \quad (8)$$

$$y_{w1w2} = D_y \cdot D_M \quad (9)$$

$$D_M = |M2 - M1| \quad (10)$$

式中： $D_x$  表示编码器每转一个脉冲，机器人世界坐标系  $X$  轴变化的矢量（简称“ $X$  轴脉冲单位矢量”）， $D_y$  表示编码器每转一个脉冲，机器人世界坐标系  $Y$  轴变化的矢量（简称“ $Y$  轴脉冲单位矢量”）； $D_M$  表示从  $\{W1\}$  到  $\{W2\}$  编码器所转过的脉冲数总和。

综上所述，当产品被智能相机检测出位置与姿态后，随着传送带的前进，其在机器人世界坐标系下的位姿数据  ${}^U W2 P$  表示如下：

$${}^U W2 P = {}^{W1} W2 P \times {}^U W1 P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & D_x \cdot D_M \\ 0 & 1 & D_y \cdot D_M \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \cos c_{uv} & -\sin c_{uv} & x_{uv} \\ \sin c_{uv} & \cos c_{uv} & y_{uv} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos c_{vw1} & -\sin c_{vw1} & kx_{vw1} \\ \sin c_{vw1} & \cos c_{vw1} & ky_{vw1} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

从式 (11) 可知，为了计算运动过程中产品在机器人世界坐标系下的实时位姿数据  ${}^U W2 P$ ，必须标定出  $D_x, D_y, x_{uv}, y_{uv}, c_{uv}, k$  等未知量的数值。

## 3 坐标系统的标定

产品在传送带输送过程中，为了自动计算智能相机检测出的产品在机器人世界坐标系下的实时位姿数据，必须对智能相机坐标系在机器人世界坐标系中的安装位置（即变换矩阵  ${}^U V P$ ）相机拍摄物体的成像比例  $k$  以及传送带编码器在机器人世界坐标系中的脉冲单位矢量（ $D_x, D_y$ ）等物理量进行标定。

### 3.1 传动带坐标系与机器人坐标系的标定方法

制作一张十字架标定纸，粘贴于传送带上游方向机器人可到达处，见图 3。获取十字架标定纸中心点在机器人世界坐标系中的位置数据  $P_{W1}$  和此刻编码器数据  $M\text{Enc}1$ ；启动传送带，将标定纸移动到传送带下游方向机器人可到达处，获取十字架标定纸中心点在机器人世界坐标系中的位置数据  $P_{W2}$  和此刻编码器数据  $M\text{Enc}2$ 。

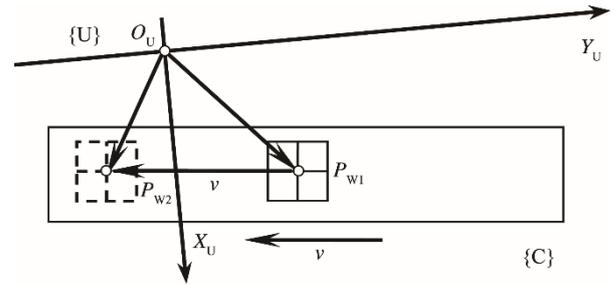


图 3 传送带坐标系与机器人世界坐标系标定  
Fig.3 Calibration between conveyor and robot's coordinate system

计算  $D_x$  和  $D_y$  如下：

$$D_x = (PW2.x - PW1.x) / (|M\text{Enc}2 - M\text{Enc}1|) \quad (12)$$

$$D_y = (PW2.y - PW1.y) / (|M\text{Enc}2 - M\text{Enc}1|) \quad (13)$$

即传送带变换矩阵  ${}^{W1} W2 P$  的表达式为：

$${}^{W1} W2 P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & D_M (PW2.x - PW1.x) / (|M\text{Enc}2 - M\text{Enc}1|) \\ 0 & 1 & D_M (PW2.y - PW1.y) / (|M\text{Enc}2 - M\text{Enc}1|) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中： $D_M$  表示相机拍照时刻与任意时刻传送带

位置对应的编码器偏差。

### 3.2 视觉坐标系与机器人坐标系的标定设计

制作一张 10 mm 网格标定纸, 粘贴于传送带上游方向智能相机前方任意位置; 首先, 启动传送带, 使得标定纸处于相机视野中央。此时, 标签位置记为  $W_1$ , 读取传送带编码器数据  $ME_1$  和网格 4 个交点在相机坐标系中的位置数据  ${}^V_{w_1}P_1, {}^V_{w_1}P_2, {}^V_{w_1}P_3, {}^V_{w_1}P_4$ 。再次启动传送带, 将标定纸移动到传送带下游方向机器人可到达处。此时, 标签位置记为  $W_2$ , 读取传送带编码器数据  $ME_2$ , 从机器人示教器上读取网格 4 个交点在机器人世界坐标系中的位置数据  ${}^U_{w_2}P_1, {}^U_{w_2}P_2, {}^U_{w_2}P_3, {}^U_{w_2}P_4$ , 见图 4。以上每个位置数据只提取  $x$  和  $y$  轴坐标数据。

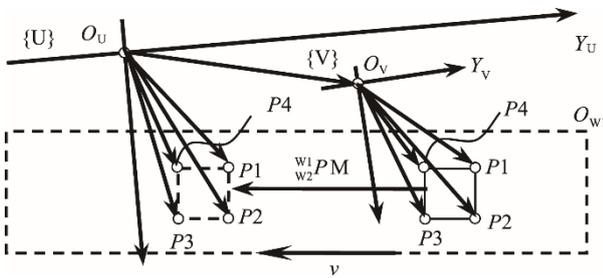


图 4 相机坐标系与机器人世界坐标系标定

Fig.4 Calibration between camera and robot's coordinate system

#### 3.2.1 计算智能相机的成像比例 $k$

根据  ${}^V_{w_1}P_1$  和  ${}^V_{w_1}P_2$  计算出相机坐标系下  $P_1P_2$  点的长度  ${}^V P_{12}$ , 根据  ${}^U_{w_2}P_1$  和  ${}^U_{w_2}P_2$  计算出机器人世界坐标系下  $P_1P_2$  点的长度  ${}^U P_{12}$ , 则:

$$k_1 = {}^U P_{12} / {}^V P_{12} \quad (15)$$

为减小测量误差, 采用多次测量求平均值的方法, 分别求出相机坐标系下和机器人世界坐标系下  $P_2P_3, P_3P_4, P_4P_1$  的长度, 分别代入求出另外 3 次的比例值; 最后计算 4 次测量结果的平均值作为  $k$  的值。

#### 3.2.2 计算坐标系变换矩阵 ${}^U_V P$

若将传送带反方向移动  $|ME_2 - ME_1|$  个编码器脉冲时,  $W_2$  位置的  $P_1$  点与  $W_1$  位置的  $P_1$  点重合, 即:

$${}^U_{w_2} P_1 \times \frac{w_2}{w_1} P M = {}^U_V P \times {}^V_{w_1} P_1 \quad (16)$$

整理等式得:

$${}^U_V P = \frac{{}^U_{w_2} P_1 \times \frac{w_1}{w_2} P M^{-1} \times {}^V_{w_1} P_1^{-1}}{\quad} \quad (17)$$

$$\text{式中: } \frac{w_1}{w_2} P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & D_x \cdot (ME_2 - ME_1) \\ 0 & 1 & D_y \cdot (ME_2 - ME_1) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

为了减小测量误差, 采用多次测量求平均值的方法, 将  $P_2$  点、 $P_3$  点和  $P_4$  点的机器人坐标系数据与相机坐标系数据依次代入式 (17), 求出另外 3 次的坐标系变换矩阵, 并将 4 次结果的平均值作为  ${}^U_V P$ 。

## 4 试验

上述坐标系换算以及标定方法的正确性及准确性, 在微动开关包装流水线上得到了验证测试。实验采用三菱 RH-3CH4018 型号的 4 自由度水平关节工业机器人、欧姆龙 FH 系列 FZ-S 的 30 万像素黑白智能相机、欧姆龙 E6B2-CWZ1X 的 2000 分辨率编码器、自制同步带传送装置等核心部件创建试验平台。为了稳定拍照效果, 配置了环形红外光 PPX-RI7030-R, 其设计效果和样机实物见图 5 和 6。



图 5 微动开关视觉检测、包装流水线效果

Fig.5 Effect picture of micro-switch visual inspection and packaging line

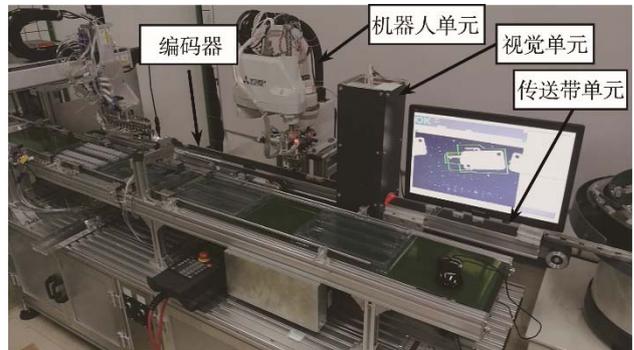


图 6 基于智能相机检测的机器人动态抓取系统实物

Fig.6 Actual machine picture of the robot's dynamically grasping system base on intelligent camera

根据文中算法, 在机器人控制器 CR751、相机控制器 FH-L550 中编写机器人控制程序和视觉检测程序, 由机器人控制器采集编码器信号, 智能相机控制器通过 TCP-IP 协议向机器人控制器发送产品坐标系  $\{W_1\}$  的位姿数据  $(x_{vw_1}, y_{vw_1}, c_{vw_1})$ 。由于此次实验依托的项目平台是双列产品输送, 为了确保每个产品通过相机视野区域时至少能被拍 1 次, 机器人控制器会每隔  $L_V - L_W$  的距离触发相机拍照 ( $L_V$  为相机视野长度,  $L_W$  为产品长度)。智能相机检测画面见图 7。本次实验中机器人控制器参考普遍方法对产品位姿数据作了去重复处理<sup>[11]</sup>。

为了验证检测结果, 对产品上某一点的  $X, Y$  坐

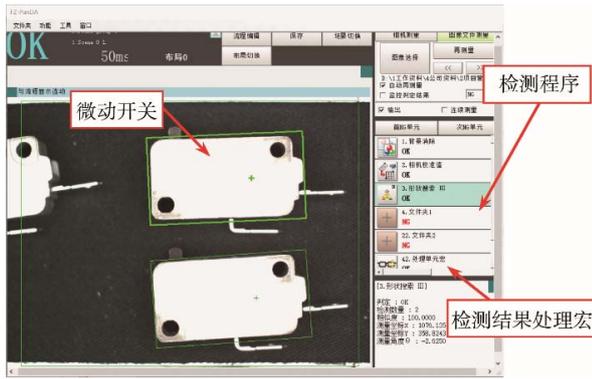


图 7 智能相机检测画面  
Fig.7 Inspecting picture of intelligent camera

标作如下测试：将一个微动开关放置于智能相机视野范围内，单步运行机器人程序，触发智能相机拍照检测；移动传送带至机器人可到达微动开关位置；通过机器人示教器手动 JOG 控制机器人测出微动开关的实际位置，记录给 PTeach 变量，借助智能相机检测数据而计算得到的理论位置赋值给 PWKPOS。3 组测试结果见表 1。由于实验条件原因，此次实验省去对姿态角度数据的分析对比。

由上述实验及结果可知，每个产品的单轴坐标数据最大检测误差在 0.3 mm 内，总体位置检测误差在 0.4 mm 内，满足机器人采用真空吸盘自动吸取微动开关和放入包装盒的工艺要求。

表 1 相机检测位置与机器人示教位置数据  
Tab.1 Position data of camera inspection and robot teaching

序号	数据名称	实验结果
1	相机检测位置PVR(x,y)	( 1042.469 , 283.457 )
	理论计算位置PWKPOS(x,y)	( 208.660,90.513 )
	实际测试位置PTeach(x,y)	( 208.845,90.325 )
2	相机检测位置PVR(x,y)	( 1067.362 , 444.160 )
	理论计算位置PWKPOS(x,y)	( 201.775,97.567 )
	实际测试位置PTeach(x,y)	( 201.591,97.661 )
3	相机检测位置PVR(x,y)	( 1107.715,919.520 )
	理论计算位置PWKPOS(x,y)	( 211.611,118.438 )
	实际测试位置PTeach(x,y)	( 211.401,118.338 )

## 5 结语

文中提出了一整套基于智能相机和编码器检测的机器人动态抓取产品的位姿数据计算方法。重点对机器人世界坐标系下的传送带编码器单位脉冲矢量、智能相机坐标系与机器人世界坐标系变换矩阵的标定方法进行了设计。采用位置间隔自动触发智能相机拍照来检测产品的位姿数据，可以很好地解决 2 个并列输送、位姿随机的产品的定位抓取问题，提高了自动化设备的柔性和智能程度；

下一步，将在此研究成果基础上，继续研究相机检测姿态角度的准确性测试方法；重点研究结合 3D 相机检测，使工业机器人准确抓取空间位置产品的系统方法。

### 参考文献：

[1] 张德红, 代艳霞. 机器人视觉搬运系统构建与软件开发[J]. 包装工程, 2019, 40(1): 149—155.  
ZHANG De-hong, DAI Yan-xia. Construction of Robot Vision Handling System and Software Development[J].

Packaging Engineering, 2019, 40(1): 149—155.  
[2] 翟敬梅, 董鹏飞, 张铁. 基于视觉引导的工业机器人定位抓取系统设计[J]. 制造业自动化, 2014, 30(5): 45—49.  
ZHAI Jing-mei, DONG Peng-fei, ZHANG Tie. Positioning and Grasping System Design of Industrial Robot Based on Visual Guidance[J]. Manufacturing Automation, 2014, 30(5): 45—49.  
[3] 廖万辉, 李琳. 基于机器视觉的工业机器人定位系统[J]. 微计算机信息, 2009, 25(3-2): 242—244.  
LIAO Wan-hui, LI Lin. Stereo Vision for Tracking and Location System Working on Industrial Robot[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(3-2): 242—244.  
[4] 王耀南, 陈铁健, 贺振东, 等. 智能制造装配视觉检测控制方法综述[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(3): 273—286.  
WANG Yao-nan, CHEN Tie-jian, HE Zhen-dong, et al. Review on the Machine Vision Measurement and Control Technology for Intelligent Manufacturing[J]. Control Technology and Applications, 2015, 32(3): 273—286.  
[5] 刘正琼, 万鹏. 基于机器视觉的超视场工件识别抓取系统[J]. 机器人, 2018, 40(3): 294—308.  
LIU Zheng-qiong, WAN Peng. Recognition and

- Grappling System for Workpieces Exceeding the Visual Field Based on Machine Vision[J]. Robot, 2018, 40(3): 294—308.
- [6] 倪鹤鹏, 刘亚男. 基于机器视觉的 Delta 机器人分拣系统算法[J]. 机器人, 2016, 38(18): 49—55.  
NI He-peng, LIU Ya-nan. Sorting System Algorithms Based on Machine Vision for Delta Robot[J]. Robot, 2016, 38(1): 49—55.
- [7] 陈海永, 方灶军, 徐德, 等. 基于视觉的薄钢板焊接机器人起始点识别与定位控制[J]. 机器人, 2013, 35(1): 90—97.  
CHEN Hai-yong, FANG Zhao-jun, XU De, et al. Vision Based Starting Position Recognition and Positioning Control for Thin Steel Sheet Welding Robot[J]. Robot, 2013, 35(1): 90—97.
- [8] 季旭全, 王君臣, 赵江地, 等. 基于机器人与视觉引导的星载设备智能装配方法[J]. 机械工程学报, 2018, 23(1): 63—72.  
JI Xu-quan, WANG Jun-chen, ZHAO Jiang-di, et al. Intelligent Robotic Assembly Method of Spaceborne Equipment Based on Visual Guidance[J]. Mechanical Engineer, 2018, 23(1): 63—72.
- [9] 王吉岱, 王明鹏. 基于视觉引导的自动码放生产线设计[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 148—152.  
WANG Ji-dai, WANG Ming-peng. Design of Automatic Stacking of Production Line Based on Visual Guidance[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 148—152.
- [10] 邱素贞, 李庆年, 卢志翔, 等. 基于机器视觉检测的码垛机器人控制系统设计[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 207—211.  
QIU Su-zhen, LI Qing-nian, LU Zhi-xiang, et al. Design of Palletizing Robot Control System Based on Machine Vision Detection[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(3): 207—211.
- [11] 王诗宇, 林浒, 孙一兰, 等. 基于机器视觉的机器人分拣系统的设计与实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(3): 125—133.  
WANG Shi-yu, LIN Hu, SUN Yi-lan, et al. The Research of Industrial Robots Sorting Technology Based on Robot Vision[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(3): 125—133.
- [12] 郑华, 陈军, 金鸿章, 等. SCARA 机器人运动学和视觉抓取研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017, (6): 50—58.  
ZHENG Hua, CHEN Jun, JIN Hong-zhang. Research on Kinematics and Visual Grapping SCARA Robot [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(6): 50—58.
- [13] 陈志伟, 徐世许, 刘云鹏, 等. 基于视觉筛选的并联机器人平面抓取系统设计[J]. 制造业自动化, 2018, 40(5): 44—47.  
CHEN Zhi-wei, XU Shi-xu, LIU Yun-peng, et al. Design of Parallel Robot Plane Grasping System Based on Visual Screening[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(5): 44—47.
- [14] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.  
CAI Zi-xing. Robot[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [15] 孙树栋. 工业机器人技术基础[M]. 北京: 西北工业大学出版社, 2007.  
SUN Shu-dong. Industrial Robot Technology[M]. Beijing: Northwest University of Technology Press, 2007.