

文章编号: 1006-2343(2014)05-045-05

基于视觉引导的工业机器人定位抓取系统设计

翟敬梅, 董鹏飞, 张铁

(华南理工大学机械与汽车工程学院机器人实验室, 广州 510641, E-mail: dongfei0207@163.com)

摘要: 以美国国家仪器公司的视觉开发模块 NI Vision 为软件支撑和以 ABB-IRB120 型机器人, 摄像机和传送带为硬件基础, 对视觉识别与检测系统进行了模块化设计, 构建了一个基于单目视觉的工业机器人工件自动识别和智能抓取系统, 其中 ABB-IRB120 型工业机器人作为操作手臂, 用 CCD 相机、运动控制器和工控机搭建了机器人视觉控制平台, 通过建立抓取系统的参数化模型给出图像坐标到机器人坐标的转换算法, 利用 NI Vision 中提供的图像处理、模式匹配等方法, 在 C# 环境下进行开发, 实现了目标定位和机器人控制两大基本功能, 最终控制机器人完成目标工件的抓取。

关键词: 工业机器人; 机器视觉; 摄像机标定; 模式匹配; 卡尔曼滤波

中图分类号: TH124 **文献标识码:** A

DOI:10.13952/j.cnki.jofmdr.2014.0135

Positioning and Grasping System Design of Industrial Robot Based on Visual Guidance

Zhai Jingmei, Dong Pengfei, Zhang Tie

(Robot Laboratory, School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Supported by U. S. National Instrument's NI Vision software, ABB IRB120 robot, CCD camera and conveyor belt, the automatic recognition and intelligent grasping system for industrial robot is developed. Using the ABB IRB120 robot as the manipulator, a robot vision control platform with CCD camera, motion controller and industrial PC is constructed. In this platform image coordinate system can be transformed to robot coordinate system through camera calibration. Developed in C# environment and using the image processing and pattern matching method which are provided by NI Vision, the system implements the two basic functions of target positioning and robot control. Finally grasping the target-workpiece is completed by controlling the robot.

Key words: industrial robots; machine vision; camera calibration; pattern matching; kalman filter

工件识别与抓取是生产线上工业机器人的一项重要应用, 而目前生产线上多数的工业机器人是通过预先示教或者离线编程的方式来控制机器人执行预定的指令动作^[1], 一旦工作环境或目标对象发生变化, 机器人不能及时适应这些变化, 从而导致抓取失败, 因此, 这种工作方式在很大程度上限制了工业机器人的灵活性和工作效率。机器视觉技术具有快速和非接触的特点^[2], 将机器视觉技术引入工业机器人领域, 通过视觉引导机器人进行抓取、搬运等任务作业, 对于提高生产线的自动化水平, 拓宽机器人的应用范围都有十分重要的意义。

本文选用美国国家仪器公司的 NI Vision 软件, 利用软件开发包中集成的各种图像处理算法, 在 C# 环境下进行二次开发, 通过 CCD 摄像机获取传送带上的工件图像, 并进行图像预处理、构建模板特征、模式匹配、位姿估计等步骤, 对工

件进行自动识别, 从而动态改变机械手的抓取操作, 为工业机器人的抓取动作提供引导。

1 系统硬件组成

(1) CCD 相机 采用 Basler 公司 acA2500-14gm 型号的工业相机, 使用千兆以太网与计算机通讯。相机安装在传送带正上方。

(2) 镜头 采用日本 COMPUTAR 公司的 M0814-MP2 型号的定焦镜头, 焦距 8 mm, 最大成像尺寸 8.8 mm × 6.6 mm, 成像大小符合设计要求。

(3) 光源 采用 CCS 公司的 LED 环形光源, LED 照明系统响应时间短, 可获得高品质、高对比度图像。

(4) 工控机 采用台湾研华公司的工控计算机, 负责接收 CCD 相机采集的图像信息并运用图像处理算法完成工件识别后转化成机器人控制信号以控制机器人末端执行器的实际位置。

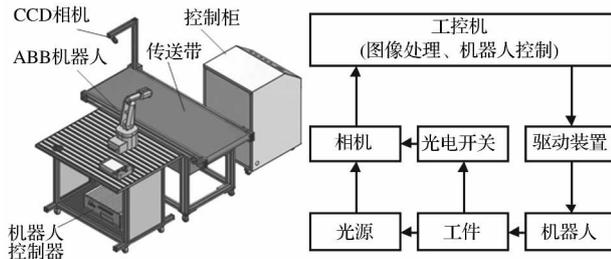
(5) 机器人 采用瑞士 ABB 公司的 IRB120 型机器人, 该机器人具有 6 个旋转关节, 由交流伺服电机驱动, 末端重复定位精度 0.01 mm, 控制简单, 编程方便, 适用于生产线上

收稿日期: 2014-02-25

基金项目: 广东省战略性新兴产业项目(2011A091101001), 广东省科技计划资助项目(2012B090600028), 中山市科技计划资助项目(201207B001)

抓取作业。

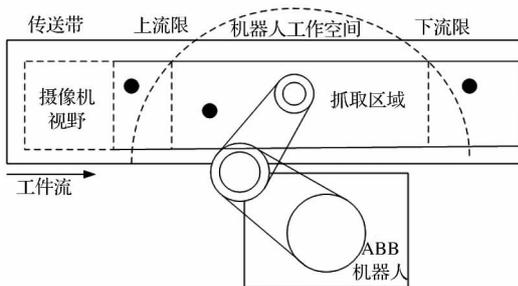
机器人视觉定位抓取系统构成如图 1 所示。



▲图 1 工业机器人视觉引导抓取系统组成

2 视觉引导抓取系统的工作原理

在本系统中,摄像机固定安装在传送带上方,传送带连续运转,工件从传送带一端进入摄像机视野,设置定时器,每 0.5 s 触发相机采集一帧图像,图像大小为 640 × 480,通过模板匹配方法确定工件的形心位置,通过两帧图像工件在运动方向的位移与拍摄这两帧图像的时间间隔可以计算出工件运动的速度,通过卡尔曼滤波预测下一时钟周期工件的位置,并规划机器人的运动轨迹,使工件运动到待抓取工位时机器人末端执行器的位姿与目标位姿重合,最后通过机器人运动学逆解,将位姿信息换算成工业机器人熟悉的关节角度和角度控制信息,从而实现利用视觉引导机器人准确地抓取工件。同时根据已抓取工件的放置要求,进一步引导机器人完成工件的定点放置,从而实现机器人搬运操作,系统的原理图如图 2 所示。



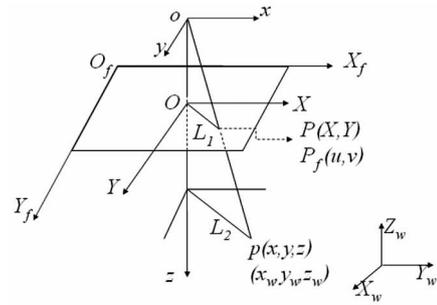
▲图 2 视觉引导抓取系统原理图

图 2 中上流限是工件刚开始进入机器人抓取区域时刻的位置,为了减少机器人的等待时间,尽可能将上流限设置靠前一些,下流限是工件离开抓取区域时刻的位置。工件必须在抓取区域被机器人抓取,否则该次抓取任务失败,机器人放弃跟踪该工件。

3 抓取系统的参数化模型建立

3.1 摄像机定标

由小孔成像模型^[3]如图 3 所示,在摄像机的光轴中心建立坐标系, Z 轴沿光轴方向, X 轴取图像坐标沿图像坐标水平增加的方向,在摄像机坐标系 $O_c - xyz$ 中,设点 p 的坐标为 (x, y, z) ,它在图像平面的投影点 P 的坐标为 (X, Y, Z) ,其中 $Z = f$ 是摄像机的焦距。



▲图 3 小孔模型

则由小孔成像原理得到以下比例关系:

$$\left. \begin{aligned} \frac{x}{z} &= \frac{X}{Z} = \frac{X}{f} \\ \frac{y}{z} &= \frac{Y}{Z} = \frac{Y}{f} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由 CCD 成像原理可知,成像平面上的像经过放大处理得到数字图像,成像平面上的像点 (X, Y) 转换为图像点 (u, v) ,并记 (u_0, v_0) 为光轴中心线与成像平面交点的图像坐标,则有:

$$\left. \begin{aligned} u - u_0 &= X/d_x = s_x X \\ v - v_0 &= Y/d_y = s_y Y \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: d_x, d_y 分别为一个像素在 X 与 Y 方向上的物理尺寸, $s_x = 1/d_x, s_y = 1/d_y$ 分别为 X 与 Y 方向上的采样频率,即单位长度的像素个数。

将式(1)代入式(2)并改写成矩阵形式有:

$$z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $f_x = f s_x, f_y = f s_y$ 分别定义为 X 和 Y 方向的等效焦距, f_x, f_y, u_0, v_0 这 4 个参数只与摄像机内部结构有关,因此称为摄像机的内部参数,摄像机的外参数模型是世界坐标系在摄像机坐标系中的描述。如图 3 所示,坐标系 $O - X_w Y_w Z_w$ 在坐标系 $O - xyz$ 中的表示,构成摄像机的外参数矩阵:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & l_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & l_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & l_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

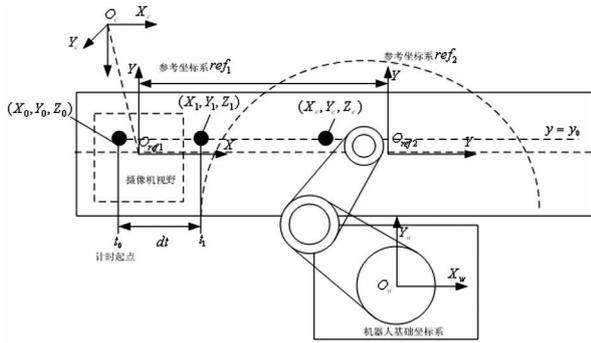
因此通过摄像机坐标系建立起世界坐标与图像坐标的关系;将式(4)代入式(3)中得:

$$z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 手眼坐标标定

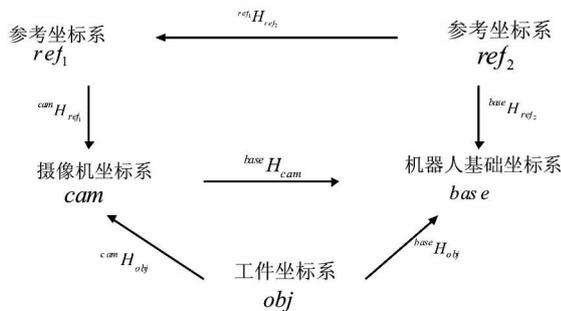
本系统中,摄像机与机器人分别安装在传送带两端,不能通过传统的手眼标定^[4]的方法确定工件与机器人之间的相对位姿,因此在传送带上建立两个参考坐标系 ref_1 和 ref_2 , ref_1 建立在摄像机视野范围内, ref_2 建立在机器人的工作空间范围内。如图 4 所示,摄像机通过平面标靶标定法标定出内外参数,并采用其中一副标定板图像建立参考坐标系 ref_1 ,得

到 ref_1 与摄像机坐标系 cam 之间的相对位姿 ${}^{cam}H_{ref_1}$; ref_1 与 ref_2 之间只有 X 方向的平移关系, 位姿关系为 ${}^{ref_1}H_{ref_2}$; 用类似标定工件坐标系的三点法^[5] 标定参考坐标系 ref_2 与机器人基础坐标系之间的位姿关系 ${}^{base}H_{ref_2}$



▲图 4 抓取系统参数化模型

通过此两个参考坐标系建立起摄像机坐标系 cam 与机器人基础坐标系 $base$ 之间的关系 ${}^{base}H_{cam} = {}^{base}H_{ref_2} \cdot {}^{ref_2}H_{ref_1} \cdot ({}^{cam}H_{ref_1})^{-1}$ 通过目标定位得到 ${}^{cam}H_{obj}$, 则目标工件在机器人基础坐标系中的位姿转换矩阵为: ${}^{base}H_{obj} = {}^{base}H_{cam} \cdot {}^{cam}H_{obj}$, 这样就建立起目标工件与机器人之间的联系。坐标之间的变换关系可由图 5 表示:



▲图 5 坐标转换示意图

4 基于灰度相关的模板匹配算法

特征提取与模板匹配是运动目标跟踪中的一个重要环节^[6], 目标图像的轮廓、形状、灰度值、颜色直方图等都可以作为模板匹配时的准则, 并且可以综合利用多种几何或灰度特征对目标进行跟踪。目标特征提取后, 选择合适的搜索匹配算法即实现目标定位。为了满足作业时的实时性较高的要求, 所采用的图像处理算法必须有足够高的运算速度, 并且对光照变化和因素具有足够的鲁棒性。

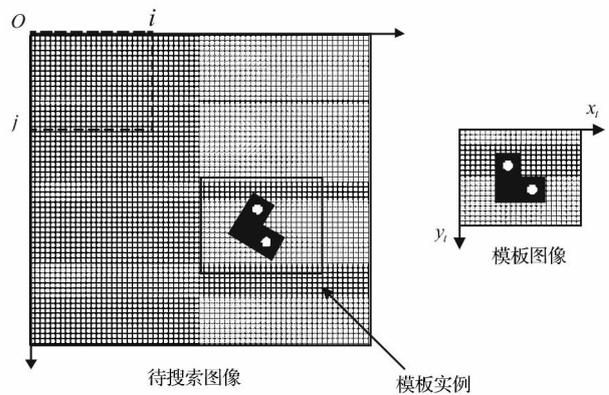
常用的模板匹配算法主要是基于灰度相关和基于几何特征的两种模板匹配算法^[7]。基于灰度相关的模板匹配算法是以图像灰度值信息作为特征参数直接进行匹配, 基于灰度相关的算法比较成熟, 原理简单、实现也较为容易^[8]。因此, 本文采用基于灰度相关的模板匹配算法。采用的相似性度量准则为计算模板图像与待搜索图像之间所有像素灰度值差值的平方和, 即 SSD 算法, 设模板大小为 $M \times N$ 个像素, 模板与待匹配图像的相似性函数^[9] 为:

$$SSD(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m, n) - S(i+m, j+n)]^2 \quad (6)$$

式中: $T(m, n)$ 和 $S(i+m, j+n)$ 分别是模板图像和待搜索图像在 (m, n) 坐标处和 $(i+m, j+n)$ 坐标处的灰度值, 通过计算每一个位置时的相似性函数值来确定图像中是否具有与模板相同或相近的目标。将上式归一化得到模板匹配的归一化互相关系数 $NCC^{[10]}$:

$$NCC(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m, n) S(i+m, j+n)]}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m, n)]^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S(i+m, j+n)]^2}} \quad (7)$$

NCC 系数大小表示在 (i, j) 位置处模板与待搜索图像的匹配程度, 其值在 $0 \sim 1$ 之间, $NCC = 1$ 表示在待搜索图像中找到与模板完全相同的实例, 在待搜索图像中完成全部搜索后找出 NCC 极大值处的位置, 该位置即匹配出的目标。模板匹配示意图如图 6 所示, 利用相似性度量函数, 模板图像经过平移和旋转在待搜索图像中找到模板的一个或多个实例, 并确定实例的位置坐标和旋转角度, 为后续机器人的抓取规划提供可靠信息。

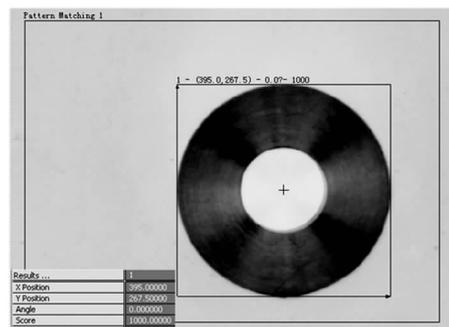


▲图 6 模板匹配示意图

本系统利用 NI 中基于灰度相关的匹配 PatternMatching, 这种匹配方式允许匹配对象可以有 $0 \sim 360^\circ$ 的旋转和一定范围的大小比例变化。相关操作为:

(1) 首先将原始图像进行图像平滑、滤波等图像预处理, 去除噪声的同时使工件的特征更加明显。

(2) 在原始图像中选取目标工件的全部或局部图像作为模板图像 TargetTemplate, 建立模板学习模式时选择允许模



▲图 7 模板匹配界面

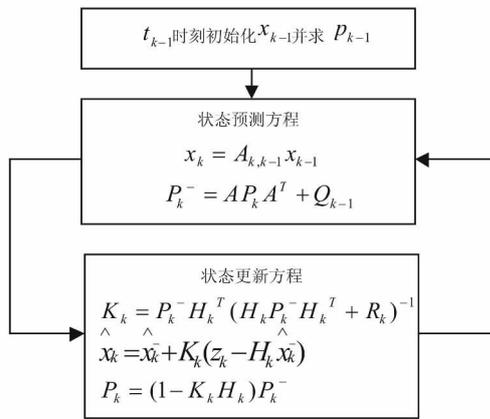
板旋转的模式,如图 7 所示,然后在原始图像中定义一个搜索区域 ROI(Region of interest),以 TargetTemplate 为模板,通过灰度相关匹配,在搜索区域内找到模板的一个或多个实例,并给出它们的图像坐标和世界坐标信息。

5 运动目标跟踪算法

5.1 卡尔曼滤波

通过相机标定和模板匹配得出了拍照时刻目标在传送带上的位置,但目标在传送带上是不断运动着的,并且机器人实现抓取动作也需要一定的时间间隔,因此,只有提前预测出目标可能出现的位置,并使机器人提前运动和目标同时到达预测位置处才能完成工件抓取,这里目标位姿的预测由卡尔曼滤波器来完成,卡尔曼滤波器是一种线性滤波器,即只要获知上一时刻状态的估计值以及当前状态的观测值就可以计算出当前状态的估计值,因此不需要记录观测或者估计的历史信息^[11]。卡尔曼滤波器在视觉跟踪系统中被广泛应用。它可以较为准确的估计运动物体将来的状态,进而引导机器人完成动态抓取任务。

卡尔曼滤波算法主要包括状态方程和观测方程两个方程^[12],分别如图 8 所示。



▲图 8 卡尔曼滤波的一般步骤

5.2 运动模型的建立

传送带上的工件一般做匀速直线运动,设目标的运动状态参数为某一时刻目标的位置和速度,在跟踪过程中,由于相邻两帧图像时间间隔较短,目标运动状态变化比较小,可以假设目标在单位时间间隔内匀速运动,所以速度参数足以反映目标的运动趋势。在这里用一个四维变量定义系统状态 x_k ,即 $(x_{s_k}, y_{s_k}, x_{v_k}, y_{v_k})$ 分别代表目标在 x 和 y 方向的位置和速度,其方程为:

$$\left. \begin{aligned} x_{s_k} &= x_{s_{k-1}} + x_{v_k} dt \\ y_{s_k} &= y_{s_{k-1}} + y_{v_k} dt \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

因此对本系统,系统模型建立如下: dt 为 t_{k-1} 与 t_k 的时间间隔。

$$\begin{pmatrix} x_{s_k} \\ y_{s_k} \\ x_{v_k} \\ y_{v_k} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{s_{k-1}} \\ y_{s_{k-1}} \\ x_{v_{k-1}} \\ y_{v_{k-1}} \end{pmatrix} + w \quad (9)$$

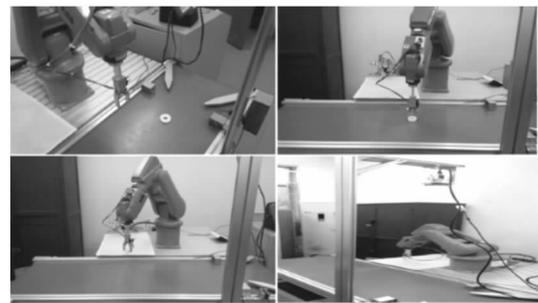
在图像中只能观测到目标的位置,观测模型 z_k 为:

$$z_k = \begin{pmatrix} x_{s_k} \\ y_{s_k} \\ x_{v_k} \\ y_{v_k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{s_k} \\ y_{s_k} \\ x_{v_k} \\ y_{v_k} \end{pmatrix} + v \quad (10)$$

如图 4 所示,通过模板匹配检测出拍照时刻工件的位置 (x_{s_0}, y_{s_0}) ,工件的起始速度 $(x_{v_0}, 0)$,由起始两帧包含工件的图像,通过计算工件中心在运动方向的位移,除以拍摄这 2 帧图像的时间得出,则将系统的初始状态 $\hat{x}_0 = (x_{s_0}, y_{s_0}, x_{v_0}, 0)$ 和系统初始误差协方差矩阵 $P_0 = 10 \cdot \text{eye}(4)$ ($\text{eye}(4)$ 表示 4 阶对角矩阵)初始化卡尔曼滤波器,并记录当前图像的时刻,在下一帧图像进行模式匹配之前,通过计算两帧之间的时间间隔 dt 并带入状态预测方程中,得出当前运动状态 (\hat{x}_1, \hat{y}_1) 的估计值,并将 (\hat{x}_1, \hat{y}_1) 为中心的区域作为本次模式匹配的 ROI(Region of interest),在 ROI 中寻找模板的最佳匹配,得到 (x_1, y_1) ,并记录当前图像的时刻。将 $z_1 = (x_1, y_1)$ 观测向量带入状态更新方程,更新滤波器状态,得到每一时刻运动目标的位置和速度的估计值。采用卡尔曼滤波器预测工件在图像中的可能位置,从而避免了对整幅图像搜索匹配,大大加快了模板匹配的速度,提高了系统的实时性。经过这样的预估-校正过程,用卡尔曼滤波器估计出目标一定时间 Δt 之后的位置 (t_2 时刻),并据此规划机器人的运动轨迹和速度。将生成的控制指令通过控制柜控制机器人完成此次抓取动作。

6 实验

通过模板匹配得到工件的图像坐标,通过系统的参数化模型将图像坐标映射到机器人基础坐标系中得到工件在机器人基础坐标系中的坐标,利用卡尔曼滤波器预测工件在机器人抓取区域的位置,将此位置与机器人抓取时机械手末端相对与基座的坐标(可在机器人控制软件实时读取,机器人定位精度为 0.1 mm)相比较,误差在 1.5 mm 以内,可以准确的抓取运动目标工件,本系统具有较高的定位精度,满足一般工业生产的的要求。抓取实验如图 9 所示。



▲图 9 工件抓取实验

表 1 视觉定位结果与机器人末端实际位置对比,单位: mm

序号	视觉定位结果	机器人末端位置
1	(444.8112, 132.8965, -25.0719)	(443.9, 133.7, -25.3)
2	(412.3321, 197.5294, -25.1482)	(412.6, 196.4, -24.3)
3	(457.5165, 203.0563, -25.3341)	(456.2, 202.8, -26.1)
4	(464.3551, 259.3223, -25.1236)	(463.8, 258.1, -25.2)
5	(528.1085, 186.9865, -25.0125)	(526.9, 186.3, -25.1)

7 结 论

本文针对流水线上运动的工件进行识别定位抓取, 基于 NI 图像处理软件并在 C# 中进行开发, 通过对抓取系统建立参数化模型, 得出图像坐标系和机器人基础坐标系的关系后进行基于灰度的模式匹配, 结合卡尔曼滤波算法, 最终得到目标在传送带上的位置并控制机器人准确抓取了目标, 实验证明, 该系统具有较高的定位精度, 满足工业生产的要求, 对于提高生产线的自动化水平具有重要意义。

参考文献

[1] 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.
 [2] 左建中, 刘峰, 张定昭等. 机器视觉技术在螺纹检测中的应用[J]. 机械设计与制造 2006(4): 113~114.
 [3] 徐德, 谭民, 李原. 机器人视觉测量与控制[M]. 北京: 国防工业出版社 2011.
 [4] 于乃功, 华瑾, 秦永刚. 手眼系统的目标轨迹实时跟踪控制策略研究[C]//2009 中国智能自动化会议论文集, 2009(4): 771~777.

[5] 张文增, 陈强. 弧焊机器人工件坐标系快速标定方法[J]. 焊接学报 2005(7): 1~4.
 [6] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle, Image Processing, Analysis and Machine Vision, 2nd ed[M]. PWS, Pacific Grove, ISBN: 053495393X, 1999.
 [7] 邹广华. 基于几何特征的快速模板匹配算法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2010.
 [8] Richard Szeliski. Computer Vision: Algorithms and Applications[M]. Washington 2010.
 [9] M Gharavi-Alkhansari. A Fast Globally Optimal Algorithm for Template Matching Using Low-resolution Pruning[J]. IEEE transactions on image process 2001, 10(4): 526~533.
 [10] S W Lee, W Y Kim. Rotation-invariant Template Matching Using Projection Method[J]. Proc. KIT, 1996, 19(1): 475~476.
 [11] 崔吉, 张燕超. 基于卡尔曼滤波的多运动跟踪算法研究[J]. 影像技术 2010, 3(6): 10~15.
 [12] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理与应用[J]. 软件导刊 2009, 11(8): 32~34.

作者简介: 翟敬梅(1967-), 女; 主要研究方向: 机电装备信息化处理与人工智能, 已发表论文 40 余篇。

(上接第 44 页)

表 2 各机构方案摆角、悬点垂直方向速度、悬点垂直方向加速度、曲柄转矩变化范围

项目	序号				
	Lgeyj4	Lgeyj21	Lgeyj22	Lgeyj35	Lgeyj36
摆角 $\psi / (^\circ)$	$-45 < \psi < 35$	$-25 < \psi < 55$	$-30 < \psi < 50$	$-30 < \psi < 50$	$-35 < \psi < 45$
悬点垂直方向速度 $v / (m \cdot s^{-1})$	$-1.26 < v < 0.75$	$-0.91 < v < 2.47$	$-1.08 < v < 0.86$	$-1.3 < v < 0.79$	$-1.01 < v < 0.96$
悬点垂直方向加速度 $a / (m \cdot s^{-2})$	$-1.69 < a < 0.79$	$-4.17 < a < 3.8$	$-0.62 < a < 0.73$	$-0.5 < a < 1.14$	$-0.49 < a < 0.64$
曲柄转矩 $M / (\times 10^5 N \cdot m)$	$-2.57 < M < 1.54$	$-1.85 < M < 5.19$	$-2.29 < M < 1.81$	$-2.55 < M < 1.51$	$-2.03 < M < 1.93$
按综合性能优选 (1→5) 排序	4	5	2	3	1

4 结 论

机构创新设计是一个复杂而抽象的设计过程, 在构思和设计时要凭空构想出一个能满足要求的新机构是非常困难的, 而运用基于杆组组成原理的再生运动链法高效程序化地解决了游梁式抽油机机构创新设计过程的这一难题, 获得了所有可行的 69 种非同构的抽油机机构运动链及其对应的机构运动简图。并采用虚拟样机技术对符合要求的 5 种抽油机机构进行了仿真、运动及动力分析。通过定性定量分析, 确定了优选的机构方案。从而为抽油机机构创新设计提供理论依据和分析数据, 也为机构进一步优化设计打下基础。

参考文献

[1] 朱君, 王增藩, 孙慧峰等. 游梁式节能抽油机的原理及性能对比[J]. 大庆石油学院学报 2005, 29(5): 40~43.
 [2] 陈宪佩. 抽油机采油技术[M]. 北京: 石油工业出版社 2004.
 [3] 王晓方. 国内外采油工业的现状分析及发展趋势研究[J]. 中国矿业 2005, 14(5): 4~5.
 [4] 肖铁英. 斯蒂芬森链六杆机构在抽油机上的应用及设计[J]. 石油矿场机械 2003, 32(2): 28~31.
 [5] 李瑞琴. 机构系统创新设计[M]. 北京: 国防工业出版社 2008.

[6] 颜鸿森. 机械装置的创造性设计[M]. 北京: 机械工业出版社 2002.
 [7] 李宁波. 机构方案创新设计及其自动化创成研究[D]. 湖南: 湘潭大学 2010.
 [8] 邹慧君, 田永利, 郭为忠, 等. 机构系统概念设计的基本内容[J]. 上海交通大学学报 2003, 37(5): 668~673.
 [9] 邹慧君, 梁庆华, 郭为忠, 等. 功能-运动行为-结构的概念设计模型及运动行为的多层表示[J]. 机械设计 2000, 17(8): 1~4.
 [10] 张义智, 郭连考. 给纸机递纸吸嘴机构的再生设计[J]. 机械设计与研究 2007, 23(2): 113~116.
 [11] 周万春, 刘冬敏, 王栋. 丝织机开口机构的创新设计[J]. 机械设计与研究 2009, 25(2): 37~39.
 [12] 张春林主编. 机械创新设计[M]. 北京: 机械工业出版社 2007.
 [13] 陈文华, 连文志, 王守民. 常规游梁式抽油机的增程与节能与改造研究[J]. 工程设计学报 2004, 11(6): 39~43.
 [14] 郑建荣编著. ADAMS 虚拟样机入门与提高[M]. 北京: 机械工业出版社 2001.
 [15] 李军等编. ADAMS 实例教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社 2002.

作者简介: 张宁(1963-), 男, 高级工程师; 主要研究方向: 机械设计理论、材料加工技术, 已发表论文 16 篇。