

智能制造装备视觉检测控制方法综述

王耀南, 陈铁健[†], 贺振东, 吴成中

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为满足智能制造装备产业对机器视觉技术的巨大需求, 本文结合装备技术特点和特殊应用环境, 提出了通用的机器视觉检测控制技术体系, 弥补了当前研究的不足. 本文首先对该技术体系的成像系统、自动图像获取、图像预处理、标定与分割、识别检测、视觉伺服与优化控制等关键核心技术, 进行了总结和阐述. 然后提出了视觉检测控制系统设计的一般原理, 并结合3种典型装备, 对其具体应用进行详细说明. 最后根据智能制造装备不断增长的高可靠性、智能化、高速高精度作业等需求, 探讨了视觉检测控制技术所面临的新问题和新挑战.

关键词: 智能制造装备; 机器视觉; 视觉伺服; 工业图像处理

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Review on the machine vision measurement and control technology for intelligent manufacturing equipment

WANG Yao-nan, CHEN Tie-jian[†], HE Zhen-dong, WU Cheng-zhong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract: To satisfy the enormous demands of machine vision techniques in the intelligent manufacturing equipment industry, we propose a general machine vision measurement and control technical system according to the specific application environments, which compensates the deficiency in current researches. First, the key techniques of the technical system including industry imaging, automatic imaging acquisition, image pre-processing, vision detection and measurement, visual servoing and intelligent control are summarized and elaborated. Then, a generic design principle of the vision measurement and control system is presented, which is illustrated and embodied by three typical equipment. Finally, the new problems and challenges, which are essential in developing more intelligent and reliable, extremely fast and precise automatic manufacturing equipment, are also discussed.

Key words: intelligent manufacturing equipment; machine vision; visual servoing; image processing for industrial applications

1 引言(Introduction)

智能制造装备是具有感知、决策、控制、执行功能的各类制造装备的统称, 是信息化与工业化深度融合的重要体现, 也是高端装备制造业的重点发展方向^[1]. 智能制造装备主要包括高端数控机床、工业机器人、精密制造装备、智能测控装置、成套自动化生产线、重大制造装备、3D打印等. 大力发展智能制造装备产业对于加快制造业转型升级, 提升生产效率、技术水平和产品质量, 降低能源资源消耗, 实现制造过程的智能化和绿色化发展具有重要意义. 研制智能制造装备面临着多项关键技术难题, 其中机器视觉检测控制技术作为解决这些难题的关键核心技术之一, 具有智能化程度高和环境适应性强等特点, 在多种智能

制造装备中得到了广泛的应用.

机器视觉检测控制技术是用机器视觉、机器手代替人眼、人手来进行检测、测量、分析、判断和决策控制的智能测控技术^[2-3]. 与其他检测控制技术相比, 其优点主要包括: ① 智能化程度高, 具有人无法比拟的一致性和重复性; ② 信息感知手段丰富, 可以采用多种成像方式, 获取空间、动态、结构等信息; ③ 检测速度快, 准确率高, 漏检率和误检率低; ④ 实时性好, 可满足高速大批量在线检测的需求; ⑤ 机器视觉与智能控制技术结合, 可实现基于视觉的高速运动控制、视觉伺服、精确定位和恰当力的优化控制, 极大地提高控制精度. 因此, 机器视觉检测控制技术已经广泛应用于精密制造生产线^[4]、工业产品质量在线自动化检

收稿日期: 2014-03-04; 录用日期: 2014-12-19.

[†]通信作者. E-mail: chentiejian@hnu.edu.cn; Tel.: +86 13469042838.

国家自然科学基金重点项目(60835004), 国家“863”计划项目(2007AA04Z244)资助.

Supported by State Key Program of National Natural Science Foundation of China (60835004) and National High Technology Research and Development Program of China (“863” Plan) (2007AA04Z244).

测、智能机器人、细微操作^[5]、工程机械等多个领域^[6]的智能制造装备中,在提高我国精密制造水平,保障汽车、电子^[7]、医药^[8]、食品^[9]、工业产品质量和重大工程安全施工等方面发挥巨大作用。

当前我国智能制造装备业发展迅速,在自主创新过程中,对机器视觉检测与控制等智能技术有着巨大和迫切的需求。然而当前该领域的研究主要针对分散和特定应用,还没有形成统一的技术体系。智能制造装备属于复杂光机电系统,应用环境特殊,对检测准确率、实时性、重复性等要求极高。其机器视觉检测控制技术,与其他图像应用如人脸识别、视频监控等相比,在研究内容、图像获取、处理方法、系统集成等多方面存在巨大差异。因此,需针对智能制造装备的特殊需求,建立完善的机器视觉检测控制方法体系,指导和加速新型复杂装备的开发。

本文针对上述问题,首先提出了智能制造装备机器视觉检测控制技术体系,对其核心技术方法进行了阐述和总结。其次介绍了视觉检测控制装备的基本工作原理,以典型装备为例,阐述了该技术体系在智能

制造装备中的具体应用。最后根据智能制造装备不断增长的需求,探讨了视觉检测控制在大型、自主、复杂智能制造装备中应用所面临的新挑战。

2 智能制造装备视觉检测控制技术体系(Machine vision measurement and control technical system)

本文所提出的智能制造装备机器视觉检测控制技术体系如图1所示,该技术体系由视觉成像、自动图像获取、图像预处理、图像定位与分割、图像识别与检测、视觉伺服与优化控制等部分组成。首先智能制造装备通过精密成像机构和视觉成像系统,自动获取测控对象的高速高质量图像,并且对获取图像进行去噪、增强、配准、拼接、融合等预处理。然后通过图像定位与分割,提取出检测区域;进行目标检测识别,对其位姿、轮廓、形状、质量等进行测量。最后根据检测识别结果,智能制造装备通过视觉伺服控制、恰当力的优化控制、优化协调控制实现精密定位、抓取、分拣、传输、组装等作业。

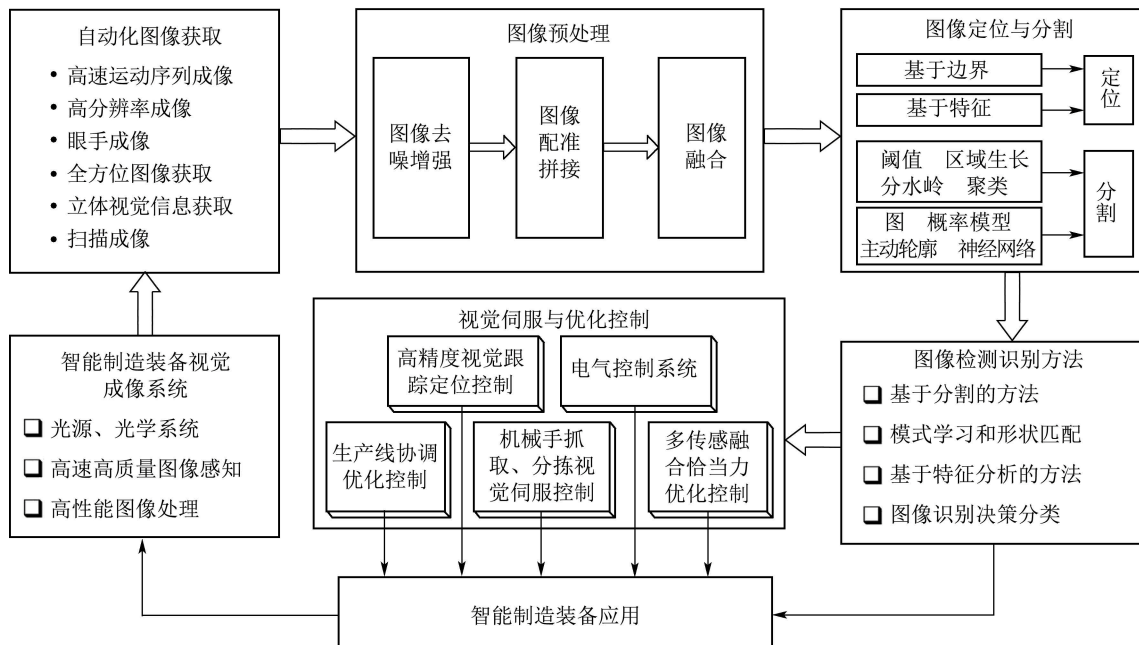


图1 智能制造装备视觉检测控制技术体系

Fig. 1 Machine vision measurement and control technical system for intelligent manufacturing equipment

该技术体系可分为视觉检测、视觉伺服控制和应用3部分,下面分别对其关键技术进行分析和总结。

3 智能制造装备视觉检测关键技术(Machine vision measurement key techniques)

视觉检测关键技术包括成像、自动图像获取、图

像预处理、定位与分割、识别与检测等方法。

3.1 成像系统关键技术(Key imaging techniques)

根据成像原理不同,成像系统可分为可见光成像、红外成像、超声成像等多种,其中可见光成像应用最为广泛。图2给出了典型的工业可见光成像系统。

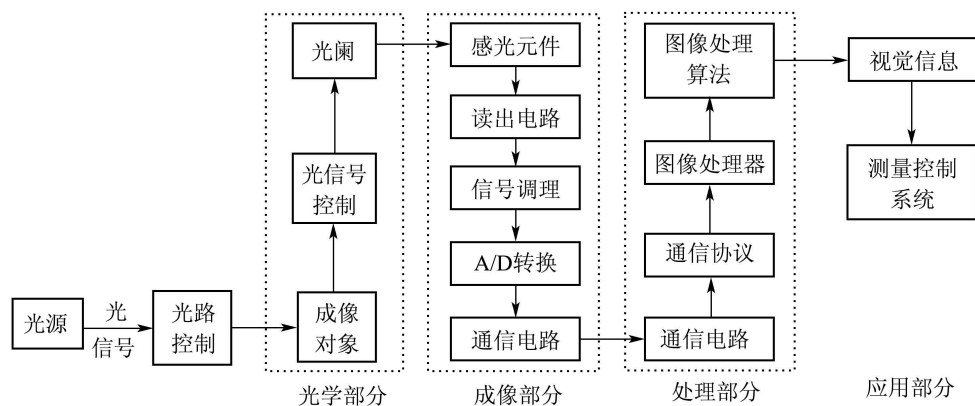


图2 工业可见光成像系统

Fig. 2 The industrial optical imaging system

整个成像系统包括光学、成像、处理3部分. 其中光学部分由光源、光学系统构成, 光源在成像对象上产生均匀光场, 以提高获取图像质量, 常用的光源包括LED光源、结构光等. 光学系统主要实现光路控制, 并将光信号聚焦到成像平面上, 当前光路控制主要通过光纤、反射、扫描装置等光学器件实现. 成像部分主要由图像传感器构成, 传感器的感光元件将入射光转化为电信号, 模拟信号经过放大、去噪、调理、A/D转换和读出, 得到数字图像. 图像传感器的加工工艺、像素结构、曝光控制方法决定了获取图像的分辨率、动态范围、信噪比、速度、传输速率等参数^[10]. 处理部分由通信电路、图像处理器和处理算法构成, 获取的图像通过通信电路和协议传输到图像处理器中, 并采用图像处理算法进行实时处理, 提取出视觉信息用于智能制造装备的检测和控制.

成像系统的发展趋势是智能成像系统, 实现光学、成像、处理3部分的高度片上集成, 提高获取图像质量和速度, 并实现实时图像处理^[11]. 智能成像系统在传感部分采用新型传感器结构, 如数字像素传感^[12]、片上存储像素结构、多重曝光方案等, 实现高速、高质量成像. 在处理部分采用高性能图像处理器, 如DSP、流处理器、Tile多核处理器^[13]、GPU等, 提供复杂实时图像处理所需的计算能力. 在图像处理过程中, 将标准图像处理算法进行模块化封装, 针对特定应用只需进行处理流程配置, 极大地加速开发流程.

3.2 自动图像获取(Automatic image acquisition)

精密成像机构是自动图像获取的关键, 它可以实现对成像位置、视角、分辨率、质量、数量等参数的精密控制. 为适应不同成像对象和装备机械结构, 多种自动图像获取方法和精密成像机构被提出, 主要包括:

1) 高速运动序列图像获取. 适用于微弱运动目标的检测和识别. 如图3所示, 针对灌装溶液中不溶性异物和微小颗粒的视觉检测, 文献^[14]提出高速旋转-急停成像方案, 检测对象由输入星轮进入检测平台, 并且在成像工位前由旋转托盘带动高速旋转, 在成像工位处急停以获得颗粒和异物的高速运动序列图像.

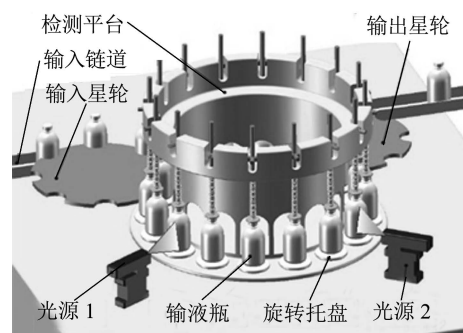


图3 高速运动序列图像获取机构

Fig. 3 The serial imaging mechanism for fast moving objects

2) 位置触发成像. 适用于生产线检测, 在成像工位安装光电传感器等位置触发装置, 当检测对象运动到成像工位时, 触发成像系统获取单幅或多幅图像^[15].

3) 显微成像. 适用于特征尺寸小于0.1 mm的对象, 通过显微成像和高倍放大, 可获得高分辨率图像.

4) 眼手(eye in hand)图像获取. 适用于复杂运动对象和非结构对象, 采用多自由度机械手夹持成像系统, 通过机械手的关节控制, 实现成像位姿的大范围调节.

5) 全方位图像获取. 适用于大尺寸、几何形状复杂的对象, 此时单视角成像无法获取整体信息,

可采用多个成像系统在不同方位成像,通过多视角拼接获取全方位图像。

6) 立体视觉成像. 适用于三维测量,采用立体视觉原理和多目成像系统,计算同一场景在不同相机中的像素偏差,结合相机几何关系得到三维信息^[16]。

7) 扫描成像. 适用于超大尺寸对象,采用线扫描成像方式,通过相对运动和图像拼接获得高分辨率图像。

3.3 图像预处理方法(Image preprocessing)

图像预处理方法主要包括去噪、增强、配准、融合、拼接,通过图像预处理可提高图像质量,降低图像识别和分类的难度,从而保证装备的检测控制精度。

3.3.1 图像去噪增强(Image denoising and enhancement)

工业成像系统获取的图像中包含盐椒、高斯等多种噪声,并存在对比度低、边界模糊和运动模糊等现象,首先进行图像去噪和特征结构增强,可显著提高图像质量。常用的去噪方法包括:

1) 空间域滤波方法. 如均值滤波和维纳滤波等线性滤波器,中值滤波、加权中值滤波等非线性滤波器。该方法简单易行,在噪声相对简单的情况下可获得较好的效果。

2) 变换域滤波方法. 根据采用基函数的不同,可分为频域低通滤波、小波域滤波和独立分量分析方法等。在小波域方法中,图像分解可采用传统小波,以及Curvelet, Contourlet, Ridgelet等能够表达几何特性的新型小波;图像去噪通过对小波系数进行线性、非线性的硬阈值、软阈值等处理实现^[17]。该方法可同时去除多种噪声,效果较好,但计算复杂度较高。

3) 基于偏微分的图像去噪方法. 如各向异性扩散(anisotropic diffusion)方法^[18],将去噪看做扩散平滑过程 $\frac{\partial g}{\partial t} = \nabla \cdot c(\nabla g)\nabla g$,其中 $c(\nabla g)$ 是与图像梯度、曲率等有关的扩散系数,如 $c(\nabla g) = e^{-\frac{\nabla g^2}{2k^2}}$ 。该方法在去噪的同时,又能很好地保留边界,克服了传统方法的弱点,但在平滑区域会产生“块状效应”。

4) 基于相似性的图像去噪方法. 利用图像局部相似性,对像素邻域按照空间距离、差值等相似程度进行加权,实现图像去噪。该过程可表述为

$$I'(X) = \frac{1}{C(X)} \int_{\Omega} I(Y) e^{-\frac{|Y-X|^2}{\rho^2}} e^{-\frac{|I(Y)-I(X)|^2}{h^2}} dY \quad (1)$$

该方法包括邻域滤波器(neighborhood filter)、双边滤波器(bilateral filter)、非局域滤波^[19]、像素块匹配和三维滤波(block-matching and 3D filtering, BM3D)^[20]等。其中非局域滤波利用像素块的均方差来衡量相似度,改善了去噪效果和稳定性。在BM3D方法中,首先通过离散余弦变换(discrete cosin transform, DCT)或快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)变换找出相似像素块,构造三维数据,然后采用三维滤波进行去噪,最后将重构像素块的加权作为去噪结果。该方法去噪效果较其他方法有很大改善,但计算复杂度极高。

常用的图像增强方法包括:

1) 直方图方法. 包括直方图均衡化、匹配、校正和基于概率密度估计的图像增强方法等。该方法适用于背景简单图像,其弱点是容易产生伪影。

2) 图像锐化方法. 利用高通滤波器,滤波器组,边缘、脊度、交点等检测方法找出图像中的特定结构,并与原图像叠加实现增强^[21]。该方法可实现对特定图像结构的增强,但容易引入高频噪声。

3) 基于视觉模型的增强方法. 包括Retinex方法和基于Phong光照模型的局部归一化方法等。其中多尺度Retinex方法^[22]通过不同尺度滤波获取全局、细节信息,并通过加权求和实现图像增强。该方法可显著提高图像质量,并消除光照等因素的影响,但计算量较大。局部归一化方法用像素所在图像块的均值和方差对图像进行增强^[23],可显著增强局部特征,并简化缺陷检测等应用,但容易改变整幅图像的灰度分布。

4) 运动模糊去除. 在装备运行中,由于机械振动等多种原因,容易在图像中产生运动模糊。为去除运动模糊,需要建立模糊模型,并采用去卷积方法进行图像恢复。针对工业应用,基于运动分析法建立点扩散模型,简单可靠,可获得较好的去模糊效果。

3.3.2 图像融合配准拼接方法(Image fusion, registration and stitching method)

对智能制造装备获取的多源图像进行融合,可以去除冗余信息,改善图像质量。图像融合主要基于图像分解和重构^[24],其中多分辨率图像分析是最常用的图像分解方法^[25],包括小波变换、金字塔形或树状小波帧变换、几何分析小波^[26]等。小波帧变换具有平移不变性,能够克服融合过程中图像间目标有轻微偏移的问题;几何分析小波除了具有多尺度、局部性特征外,还具有方向性,能够最优地表示图像边缘和平滑区域。其他分解方法包括独立分量分析,经验模式分解、稀疏表示^[27]等。在重构过程中,根据统计模型或其他融合规则对图像分解系数

进行融合, 经过逆变换得到融合图像. 该方法融合效果良好, 适用范围广.

对智能制造装备在不同位姿获取的多源图像进行配准和拼接, 可以将多幅图像对齐到单个图像坐

标系下, 还可以实现图像偏差测量. 图像配准的一般步骤如图4所示, 输入多源图像经过特征检测、匹配、变换模型估计、空间变换和图像重采样, 得到配准图像^[28].

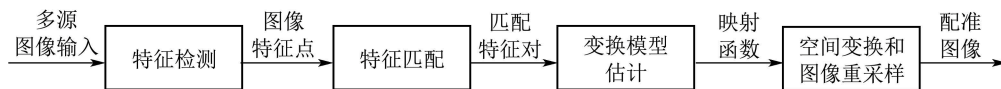


图4 图像配准流程

Fig. 4 The four steps of image registration

图像配准可采用直接或基于特征的配准方法. 在直接配准方法中, 可采用归一化的相关方法、频域方法、互信息方法、优化方法来计算图像的匹配参数. 在基于特征的匹配方法中, 通过对特征检测得到的区域、线、点等特征, 进行空间匹配、不变特征配对、松弛算法匹配等, 得到特征匹配关系. 然后结合图像旋转缩放位移、透射投影、径向基函数等变换模型, 求取图像的变换参数. 最后根据变换模型对图像进行空间变换和重采样, 获得配准后的图像. 在配准过程中, 可采用金字塔或小波方法减小运算量.

图像拼接在图像配准的基础上对图像进行合并, 需消除重叠区域由于灰度特征不同所造成的伪影和边界等. 针对这一难题, 文献^[29]提出了一种最小化梯度能量函数的图像拼接方法, 有效消除了图像假边界. 文献^[30]提出了一种基于重合区域最优分割、曲线特征对准和形变向量估计的拼接方法, 极大地改善了拼接图像质量, 但计算复杂度高.

3.4 图像定位分割方法(Object localization and segmentation)

在成像过程中由于机械和电气误差, 图像中对象位置并不固定, 因此需要进行检测区域(region of interest, ROI)定位和目标分割. 其中检测区域定位方法适用于背景简单、特征明显对象, 而目标分割可实现环境复杂、特征模糊对象的提取和定位, 但实现相对复杂.

3.4.1 检测区域定位方法(ROI localization)

该方法利用对象边界、几何特征等先验知识, 实现检测区域定位, 主要包括:

1) 基于边界的定位方法. 边界是检测对象与背景之间具有不变性的重要特征, 通过边界检测可实现定位. 如文献^[31]提出了一种基于边界的空瓶瓶口、瓶身、瓶底定位方法, 如图5所示. 通过差分阈值方法获得边界点, 然后根据对象的几何结构, 采用边界点直方图滑动窗口位法计算中线位置, 实现

定位.

2) 基于几何特征的定位方法. 通过几何形状检测实现定位, 适用于具有标准几何形状的对象, 如圆形、矩形等. 如在圆形瓶口的定位中, 首先对图像进行去噪, 通过粗扫描采样和重心法得到圆心参考坐标, 然后以参考坐标为圆心 360° 扫描瓶口边缘点, 并等间隔取点拟合圆, 最终通过加权平均法得到圆心位置.

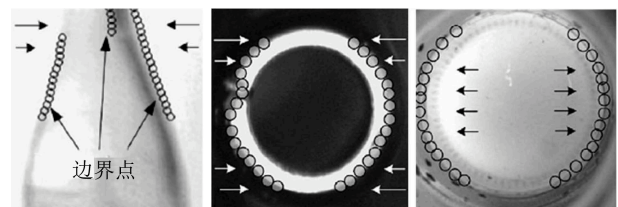


图5 边界定位方法

Fig. 5 The edge based ROI localization method

3.4.2 目标分割方法(Object segmentation)

图像分割是实现检测对象定位、缺陷检测的重要手段, 常用的图像分割方法^[32]包括:

1) 阈值分割方法. 对图像进行直方图分析, 并通过先验知识、Otsu等方法确定最优阈值^[33], 实现图像局部或全局分割. 该方法适用于检测对象与背景灰度特征差异明显的情况.

2) 区域生长法. 利用区域内像素特征的均匀性实现图像分割, 典型方法包括种子区域增长法(seed-region growing)^[34]等, 难点在于初始点和终止规则的选取. 初始点通常有一个或多个, 可以人工选取、随机选取^[35]或者自动选取, 如将相邻边界质心作为初始点集. 区域生长一般采用邻域生长法, 终止规则可采用阈值终止规则或基于距离的终止规则. 该方法对灰度特征均匀的对象效果良好, 但种子点与终止规则的选取对分割效果影响较大.

3) 分水岭分割算法. 将图像看做与像素值相关的拓扑表面, 通过从最低处注水将图像分割为盆地和分水岭. 将该方法应用于梯度图像, 可分割出图

像中的均匀区域,但容易造成图像过分割.针对此缺点,可通过残差变换、计算拟距离等方法选取初始点来改善分割效果^[36];或采用瀑布变换,建立具有权值属性的分水岭和平面图,实现分层分割.该方法对微弱边界有良好的响应,可获得封闭轮廓,但对噪声敏感,容易产生孤岛现象.

4) 聚类分割方法.包括 k 均值(k -means)、谱聚类、高斯混合模型等参数聚类方法,mean-shift等非参数方法,超像素(super-pixel)分割方法等.参数聚类方法通过距离测量、模糊判别、期望最大化等算法建立图像分割模型;如在图像谱聚类方法^[37]中,首先建立无向加权图;然后对图的Laplacian矩阵求解特征向量,并对特征向量进行 k -means聚类实现图像分割.非参数方法通过核密度估计等方法实现图像分割,如在mean-shift方法中,首先在空间-特征域进行核密度估计,其中 $K_{h_s, h_r}(x^s, x^r)$ 为空间核和特征核的乘积^[38]

$$y_{j+1} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i K_{h_s, h_r}(x^s - x_i^s, x^r - x_i^r)}{\sum_{i=1}^n K_{h_s, h_r}(x^s - x_i^s, x^r - x_i^r)}, \quad (2)$$

得到收敛点位置序列 Z_i .然后在空间和特征域对 Z_i 根据距离测量进行归并,并且对图像块进行标号,最终通过去除小区域改善分割效果.该类方法分割效果良好,但受参数选取影响较大,且计算复杂度高.

超像素方法是一种图像过分割方法,将图像分割为大小相近、内部均匀、保留边界的“超像素”.典型方法包括Turbopixels、熵率方法^[39]、简单线性迭代聚类(SLIC)^[40]等.SLIC采用空间和特征距离的加权进行距离测量,并通过迭代将距离最小的像素聚类,实现分割.熵率方法基于随机游走(random walk)模型,通过优化下模集目标函数,选择边界集实现图像分割.该方法计算复杂度低,分割效果较好,通过对超像素的聚类、分类可实现检测区域定位、缺陷检测等功能,缺点在于过分割和难以确定最优超像素数.

5) 基于图的分割方法.通过构建无向加权图 G ,将图像分割转化为图割问题.在图 $G=(V, E, W)$ 中,节点 V 为像素, E 为连接相邻像素的边,权值 W 衡量像素的相似性.图割可采用Graph cut^[41], Normalized cut^[42], random walk等多种规则.在Graph cut方法中,当区域外差 $\text{Dif}(C_1, C_2)$ 大于两个区域内差与加权项之和 $\text{Int}(C)$ 的最小值时,认为两个区域不连接.该方法分割效果较好,但计算复杂度较高.

6) 基于主动轮廓的分割方法.通过初始化轮廓和定义能量函数实现轮廓演化及图像分割,常用的演化模型包括蛇模型、Numford-Shah模型^[43]、水平

集等.以几何活动轮廓水平集方法^[44]为例,其演化方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = (c + \nabla \cdot \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right))g(I)|\nabla u| + \nabla u \cdot \nabla g(I), \quad (3)$$

其中: $g(I)$ 为边界检测函数,公式第1项驱动曲线向边界移动,第2项吸引曲线收敛于边界.该方法分割效果良好,能够改变曲线拓扑,实现亚像素边界定位,缺点在于需要初始化轮廓.

7) 神经网络图像分割方法.脉冲耦合神经网络^[45]、自组织神经网络等方法都可以应用于图像分割.该方法能够模拟人类感知过程,处理非线性等复杂问题,但存在学习过程复杂,准确率低等缺点.

3.5 图像识别检测方法(Image recognition and detection method)

通过图像识别检测方法,智能制造装备可实现目标识别和分类、缺陷检测、视觉测量等功能.图像识别面临的主要难题包括检测对象多样、特征多变、几何结构精密复杂,并且处于高速运动状态.

3.5.1 图像识别方法(Image recognition method)

图像识别可通过对分割后图像特征分析,序列图像运动分析和模式匹配等方法实现.常用方法包括:

1) 基于图像分割的识别方法.识别目标多表现为灰度或纹理均匀的闭合区域,利用检测对象轮廓等不变性特征和形状、面积、灰度、纹理等先验信息,对分割后图像进行特征分析,即可实现图像识别^[46],典型方法包括动态阈值blob分析方法等.该方法应用广泛,适用于特征明显目标的识别,在分割图像拓扑复杂、特征模糊、背景多样时效果较差.

2) 序列图像识别方法.适用于运动对象识别,可采用时间轴小波变换、独立成分分析等图像时空分割方法,或者图像差分和轨迹分析方法,实现运动目标的识别.如文献^[45]提出了一种微弱异物序列检测方法,在获得的每一帧图像中对图像进行分割,并通过对变化区域的运动分析实现异物识别.

3) 基于模式学习和形状匹配的识别方法.其中形状可以用点集、轮廓、骨架来表示^[47],匹配过程可采用动态规划、最优化、最大似然、Patmax方法、图匹配方法等.Patmax^[48]方法广泛应用于工业场合,选用对象边界作为匹配特征,在匹配过程中,通过最大化匹配函数,得到对象尺度、角度、形变等自由度参数.

Patmax方法由离线训练和在线检测两部分构成,其中离线训练主要进行边界检测和模式构建.在边界检测中,训练图像首先经过低通滤波、重采样和

梯度估计,得到梯度幅值和方向,然后采用峰值检测和亚像素插值得到边界点序列.在模式构建中,将具有方向一致性的相邻边界点相连,形成边界链;并对梯度幅值、方向进行重采样,得到探测点序列,表示期望边界梯度和几何信息,即图像模式.在线识别过程中,首先对获取图像进行上述边界检测,然后根据旋转、切变、尺度、 x 缩放、 y 缩放、纵横比等自由度参数,对图像模式进行空间变换,并与输入图像梯度进行相似性匹配.匹配度为梯度方向和幅值匹配度的乘积,方向匹配度用方向角度差 d 来衡量,幅值匹配函数为 $f(m) = \max(\frac{M_r}{M}, 1)$, M_r, M 分别为输入图像和模式中对应采样点的梯度幅值.匹配结果为各个变换下模式匹配度的最大值,当其大于阈值时,认为存在检测对象,并将该位置作为识别结果.该方法准确率高,稳定可靠,缺点在于计算复杂度高,适用于速度要求不高的场合.

3.5.2 图像检测方法(Image detection method)

图像检测可实现对缺陷、特定结构及特征的检测,由于检测目标在尺寸、灰度、纹理等特征方面,与背景差异较大,因此图像检测主要通过特征分析实现.针对不同应用,多种特征分析方法被提出,主要包括:

1) 基于纹理分析的检测方法.适用于纹理特征丰富对象的检测^[49-50],纹理特征分析方法主要包括子带域共生矩阵、形态学滤波器、Gabor滤波器 etc.

2) 基于局部特征的检测算法.主要适用于和背景差异较大的局部异常和缺陷检测,局部特征分析方法主要包括最大稳定极致区域、区域灰度特征、方向梯度直方图、形状上下文、纹理基元(texton)、方向可调滤波器、小波特征^[51]、尺度不变特征等^[52],采用适当的特征分析方法,即可实现局部异常和缺陷的检测.

3) 基于模板匹配的缺陷检测方法.主要适用于存在标准检测模板的情况,包括归一化互相关系数方法^[53],通过对差分图像和相关系数进行阈值运算,改善缺陷识别精度.以及基于光流法的相似性评估算法^[54],计算图像每个像素关于模板图像的光流向量 $[u, v]$,由于缺陷区域 $[u, v]$ 幅值较大,通过阈值方法可实现缺陷检测.该方法简单直观,但检测效果容易受光照变化、噪声、位移、旋转等因素的影响.

3.5.3 图像分类方法(Image classification method)

图像分类是实现图像识别、检测、决策的关键,其精度直接决定最终检测识别结果.常用的分类方法包括模糊方法、神经网络方法^[55]、支持向量机、极限学习机、深度学习等机器学习方法.上述方法能够模仿人的学习能力,处理非线性等复杂问题,

提高图像分类决策的智能化程度.

在图像分类方法中,特征、训练集和学习方法的选择是影响分类精度的重要因素.根据具体应用,多种图像特征被用来进行分类,包括纹理特征、局部特征、形状特征^[56]等.训练过程可采用误差反向传播(back propagation, BP)神经网络、细胞神经网络、支持向量机等方法.如针对医药注射剂质量在线检测问题,文献^[57]提出了一种基于支持向量机的气泡和杂质的分类方法,以区域的长宽比作为特征,去除了由气泡干扰造成的误判.针对瓶口缺陷检测问题,文献^[31]提出了一种多级神经网络检测方法,第1级对图像不同位置的灰度差和统计特征进行学习,第2级为决策级,根据第1级分类结果确定瓶口是否存在缺陷.

传统图像分类方法普遍存在训练时间长,不能满足实时性需求的缺点,针对这一难题,极限学习机将单隐层神经网络训练简化为线性方程组 $H * \beta = T$ 的求解问题^[58],并随机选择隐层结点参数,通过求极小范数的最小二乘解

$$\hat{\beta} = (H^T H)^{-1} H^T T \quad (4)$$

计算隐层结点权值 $\hat{\beta}$.该方法不需要迭代过程,实时性高,并且可实现在线序列学习.文献^[59]将该方法应用于在线缺陷识别,采用Hu矩和Zernike不变特征,实现了异物序列图像的多目标分类决策.

新型机器学习方法如流形学习、深度学习等,可显著提高分类性能,然而当前主要问题在于图像分类精度不理想,特别是对于复杂高维数据、非均衡数据集等,同时图像空间域与特征域的建模也是一大难点.

4 智能制造装备视觉伺服与优化控制技术 (Visual servoing and control techniques)

智能制造装备根据视觉检测识别结果,可实现定位、抓取、分拣、组装、灌装、装配等作业.简单作业,如生产线上不合格产品的剔出,通过开环控制即可完成.然而随着作业复杂、精细程度和环境不确定性的增加,只有采用视觉伺服运动控制方法,将机器视觉和机器人、精密运动控制技术结合,才能提高作业精度和自动化、智能化程度.

视觉伺服控制原理如图6所示,视觉控制率根据视觉误差产生控制量,驱动机器人的关节运动,完成给定作业.其中视觉误差 $e(t)$ 定义为给定特征向量 S^* 和视觉信息反馈 S 之间的差值.

$$e(t) = S(m(t), a) - S^* \quad (5)$$

在反馈环节,通过成像参数、控制对象模型等信息 a ,将当前图像特征的测量值 $m(t)$ 转化为与给定特征向量同类型的测量值 S ^[60-61].根据特征向量类型,

可分为基于位置的视觉伺服(position based visual servoing, PBVS)、基于图像的视觉伺服(image based visual servoing, IBVS)、混合视觉伺服和直接视觉伺服等. 其中: PBVS采用机器人末端空间位姿

作为反馈, IBVS将图像特征作为反馈, 而混合视觉伺服则将一种扩展图像坐标特征作为反馈. 与其他控制方法相比, 视觉伺服控制的主要难点在于视觉反馈信息的测量和视觉控制率的确立.

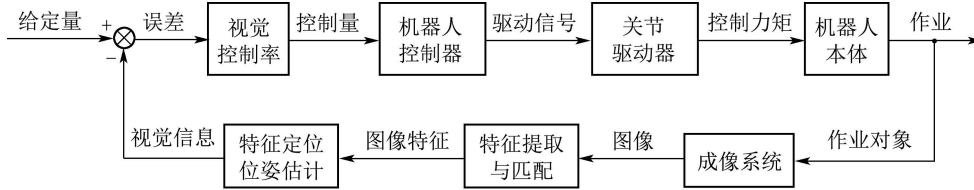


图6 视觉伺服控制原理

Fig. 6 The visual servoing control principal

4.1 视觉伺服中的成像系统设计(Imaging system design for visual servoing system)

视觉伺服要求成像系统具有大的视场(field of view), 并且在作业过程中不存在视角遮挡. 视觉伺服常用的成像方法包括手眼、眼手和混合成像^[62]模式. 在手眼模式中, 成像系统安装在机器人末端, 可以清晰观测操作对象的局部细节, 但会减小有效视场范围. 在眼手模式中, 成像系统安装在固定位置, 能提供较大视场范围的全局图像, 但存在遮挡现象. 混合模式结合了两者的优点, 采用多成像系统, 部分工作在手眼模式, 其他工作在眼手模式, 但是增加了系统复杂度. 另外, 针对单目视觉深度信息缺失的不足, 可采用双目成像获取深度信息, 提高稳定性和控制精度.

成像系统建模对视觉伺服至关重要, 从三维空间到图像空间的变换关系可表述为

$$U = KR[I - \tilde{C}]X, \quad (6)$$

其中: $U = (u_x, u_y, 1)$ 为图像空间齐次坐标, $X = (X, Y, Z, 1)$ 为成像对象齐次坐标, K 为相机的内参数矩阵, R 为空间坐标系到相机坐标系的旋转矩阵, \tilde{C} 为相机坐标系原点在空间坐标系的坐标^[63]. 当前普遍采用的工业相机符合透视投影成像模型, 当空间坐标系与成像坐标系重合时, 映射关系可表述为

$$(x, y) = \left(\frac{X}{Z}, \frac{Y}{Z} \right) = \left(\frac{u_x - C_u}{\alpha f}, \frac{u_y - C_v}{f} \right), \quad (7)$$

其中: C_u, C_v 为主像点坐标, f 为焦距, α 为图像的纵横比. 在视觉伺服中, 还可以采用全景相机^[64]、鱼眼相机来扩展视场, 其成像过程符合统一投影模型,

在伺服过程中, 对成像过程的内外参数进行优化, 可提高控制精度和稳定性. 如在微装配过程中要求对景深和视场同时控制, 针对这一难题, 文献^[65]提出了一种基于人工势场法的放大倍数调节方案, 保证从粗组装到精组装过程中, 获取的图像质

量最好. 针对外参数控制的难题, 文献^[66]提出了一种两级控制策略, 在底层控制相机姿态使目标点在视场范围内, 在上层通过控制机器人运动, 移动到最佳成像位置.

4.2 基于图像和位置的视觉伺服方法(Image and position based visual servoing control)

在IBVS和PBVS视觉伺服系统中, 当给定量为常量时, 视觉误差变化率与位姿变化率 $V_c = \{v_c, w_c\}$ 之间的关系可表述为

$$\dot{e} = L_e V_c, \quad (8)$$

其中 $L_e \in \mathbb{R}^{k \times 6}$ 为交互矩阵(图像雅克比矩阵).

在基于图像的视觉伺服方法中, 通过对投映公式(7)求导和运动分析可得单个像素点图像特征变化率与 V_c 之间的对应关系

$$L_x = \begin{vmatrix} \frac{-1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & \frac{-1}{Z} & \frac{y}{Z} & 1+y^2 & -xy & -x \end{vmatrix} \quad (9)$$

为控制6自由度机器人, 至少需要3个点来保证交互矩阵 $k \geq 6$. 由于深度信息 Z 不能直接得到, 因此多种交互矩阵估计方法被提出, 包括与深度无关的方法^[67]、鲁棒统计预估方法等^[68]. 交互矩阵选取的原则是在当前点的深度已知时, 直接计算 L_x^+ ; 未知时可用目标点的交互矩阵 L_x^* , 或将 $\frac{L_x^* + L_x^+}{2}$ 作为当前交互矩阵.

在基于位置的视觉伺服方法中, 交互矩阵与坐标系的选取密切相关. 当以对象坐标系 F_0 为参考时, 误差为 $e = ({}^c t_0 - {}^{c^*} t_0, \theta u)$, 其中 ${}^c t_0$ 和 ${}^{c^*} t_0$ 分别为对象原点相对当前和目标相机坐标系的坐标, θu 为旋转量. 当以相机坐标系为参考时, 则误差为 $e = ({}^{c^*} t_c, \theta u)$.

视觉控制率的设计要保证伺服控制的稳定性, 为此多种视觉控制率被提出, 其中误差指数控制率的应用最为广泛, 即 $\dot{e} = -\lambda \times e$. 当采用速度控制策略时, 机械臂控制器输入量 V_c 为

$$V_c = -\lambda \times L_e^+ \times e, \quad (10)$$

其中 L_e^+ 为交互矩阵 L_e 的伪逆. 视觉伺服还可以采用基于李雅普诺夫稳定性分析的控制率、自适应控制率等以提高鲁棒性. 为消除不同成像系统对视觉伺服稳定性的影响, 文献[69]提出了一种基于统一投影模型的解耦控制策略, 采用表面旋转不变性特征实现稳定性控制. 针对视觉伺服过程中图像特征对象消失和新加入的现象, 文献[70]提出了一种特征点加权的控制策略, 实现了大范围连续视觉伺服.

4.3 直接视觉伺服(Direct visual servoing control)

在传统的视觉伺服方法中, 所选用的视觉信息为图像中的点、线、矩特征^[71-72]等, 未充分利用图像信息. 针对这一不足, 直接视觉伺服方法将整幅图像作为反馈, 改善视觉伺服的精度和鲁棒性.

直接视觉伺服可转化为优化问题, 在文献[73]中, 定义如下代价函数:

$$C(q) = (I - I^*)^T (I - I^*), \quad (11)$$

其中: I^* 和 I 分别为目标图像和当前图像的向量表述. 根据光流法假设, 目标灰度特征在时间 dt 内不变, 且运动距离为 $d\mathbf{x}$, 则有 $I(\mathbf{x}, t) = I(\mathbf{x} + d\mathbf{x}, t + dt)$, 对其求导可得像素交互矩阵, 将所有像素点交互矩阵的堆叠定义为图像交互矩阵. 上述代价函数可采用 Levenverg-Maquardt 优化算法求解

$$\dot{q} = -\beta \|I - \bar{I}^*\|^2 (\mathbf{H} + \mu \times \text{diag}\{\mathbf{H}\})^{-1} \mathbf{J}_I^T (I - I^*), \quad (12)$$

其中: \mathbf{J}_I 为根据图像交互矩阵和机器人控制模型得到的雅克比矩阵, $\mathbf{H} = \mathbf{J}_I^T \mathbf{J}_I$, β 和 μ 为正增益, 用于改善收敛速度.

文献[74]将图像配准算法用于视觉伺服控制, 提出了一种基于非度量信息的视觉伺服方法. 图像配准可转化为非线性优化问题, 用当前图像 I 光度变换和几何变换后的图像 $I'_{g,h}$ 最优匹配目标图像 I^* ,

$$\min_{\{g,h\}} \frac{1}{2} \sum_{p_i^* \in T^*} [I'_{gh}(x, p^*) - I^*(p_i^*)]^2, \quad (13)$$

$$I'_{gh}(x, p^*) = S(p^*) \cdot I(w(g, p^*)) + \beta \geq 0, \quad (14)$$

其中: $x = \{g, h\}$, $h = \{S, \beta\}$ 为光度变换参数, $S = [S_{i,j}]_{i,j=1}^n$ 表征全局和局部光照变化的表面集, β 反映背景光照和相机响应的漂移, “ \cdot ” 算子表征颜色空间和对应表面的线性组合. $g = \{G, e, \rho^*\}$ 为几

何变换参数变量, 图像的几何变换模型为

$$w : SA(3) \times R \times P^2; (g, p^*) \mapsto p = w(g, p^*), \quad (15)$$

w 为映射函数, G 为单应性矩阵, e 为核点, ρ^* 为视差. 该优化问题可采用二阶优化算法, 快速得到光度和几何变换参数. 在该视觉伺服方法中, 视觉误差为

$$\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_v \\ \varepsilon_w \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (\mathbf{H} - \mathbf{I})m^{*'} + \rho^* e' \\ \vartheta \mu \end{vmatrix}, \quad (16)$$

其中 \mathbf{H} , e' , m' , μ 是与 g 有关的参数,

$$\mathbf{H} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{G} \mathbf{K}, \quad e' = \mathbf{K}^{-1} e, \quad m^{*'} = \mathbf{K}^{-1} p^*. \quad (17)$$

另一种基于图像配准的视觉伺服方法采用图像互信息^[75]来衡量当前图像 I 和参考图像 I^* 的相似程度, 在该方法中将图像 I 看做与位姿相关, 并通过优化公式(18)求取位姿

$$\hat{r} = \arg \max_r \text{MI}(I^*, I(r)). \quad (18)$$

控制目标在于寻找新的姿态 r^{k+1} , 使互信息关于姿态的变化为零即 $L_{\text{MI}}(r^{k+1}) = 0$, 求解可采用迭代策略, 步长采用指数更新, 即 $r^{k+1} = e^{[v]} r_k$. 有

$$L_{\text{MI}}(r^{k+1}) = L_{\text{MI}}(r^k) + H_{\text{MI}}(r^k) v \Delta t. \quad (19)$$

由于 $v = \dot{r}$, 最终求得速度

$$v = -\alpha H_{\text{MI}}^{*-1} L_{\text{MI}}^T, \quad (20)$$

其中 L_{MI} 和 H_{MI} 为互信息的交互矩阵和海森矩阵.

4.4 基于视觉的优化控制方法(Vision based optimal control)

智能制造装备应用于自动化生产线上, 需要与生产线上的其他设备协同工作, 而生产线伺服传送是一种高阶、非线性、强耦合的多变量系统, 因此生产线的精密协同运动控制成为高速自动化生产制造的关键. 针对这一难题, 机器人手眼协调控制将视觉伺服与机器人智能控制相结合, 将机器人逆运动学分析、轨迹规划、运动学建模、智能电机伺服控制等机器人控制技术用于视觉伺服中, 实现关节空间的机器视觉伺服控制, 可提高控制精度和智能化程度^[76]. 其环境和作业适应性强, 可满足精确力/位混合控制和精密抓取、分拣和装配等复杂作业需求^[77].

5 视觉检测控制在智能制造装备中的具体应用 (Vision measurement and control technique applications)

基于视觉检测和控制技术的智能制造装备虽然功能、作业对象、结构、运动控制方法、图像处理方法差别较大, 但其原理方案却基本相同, 如图7所示.

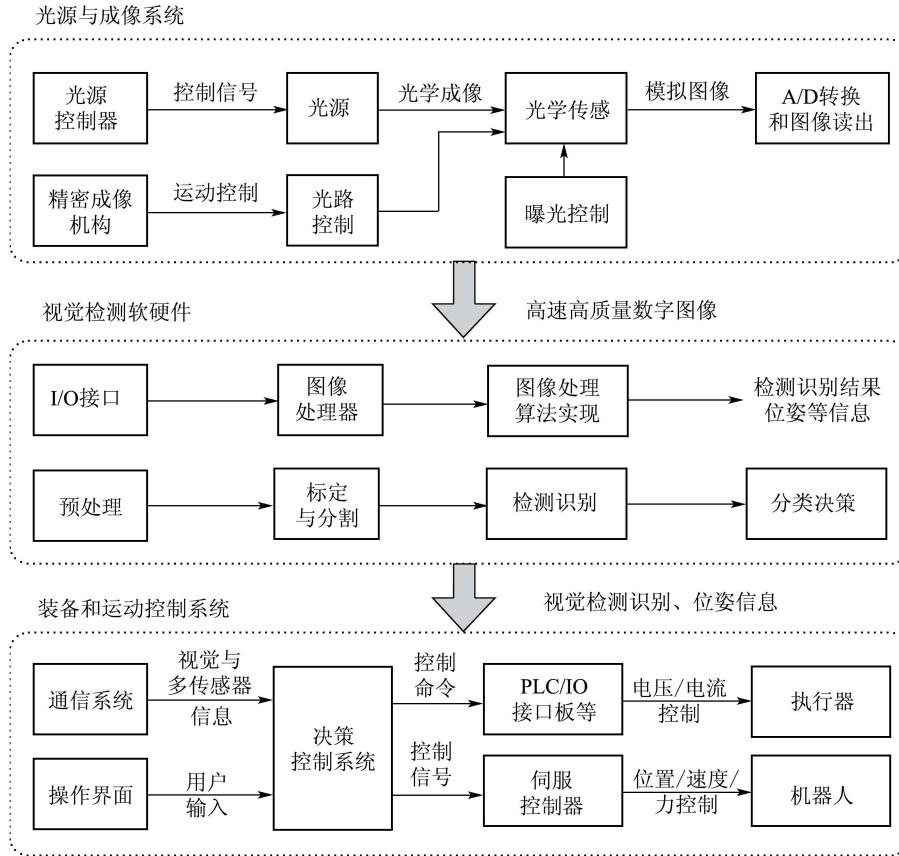


图7 智能制造装备视觉检测控制原理方案

Fig. 7 Intelligent machine vision measurement and control manufacturing equipment system architecture

智能制造装备的机器视觉检测控制系统由光源和成像系统、视觉检测软硬件、装备和运动控制系统构成。在视觉检测和控制过程中,精密成像机构和成像系统自动获取图像,图像经过I/O接口传输到图像处理硬件中,并经过预处理、标定分割、检测识别、分类决策等过程,获得位姿、质量、分类等信息。运动控制系统根据作业任务,通过PLC或I/O接口板控制执行器、机器人进行位置、速度、力闭环控制。视觉检测控制系统通过通信系统与整机控制器、装备其他系统有机结合,实现自动化操作。

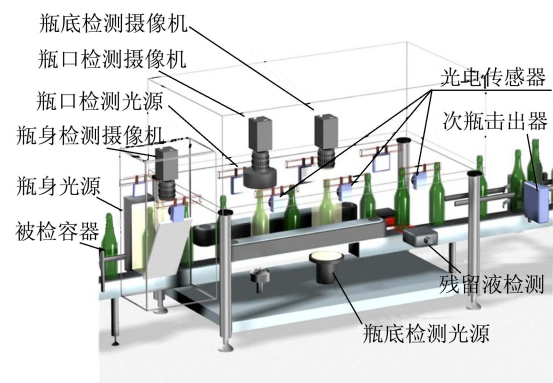
下面结合笔者所在课题组开发的智能制造装备,对机器视觉检测和控制技术的应用实例进行分析。

5.1 大型智能空瓶检测分拣装备(Intelligent bottle quality inspection machine)

智能空瓶检测分拣装备是一种应用在啤酒、饮料等大型制造自动化生产线上,对清洗后和灌装前的空瓶缺陷进行视觉检测和分拣的装备。空瓶缺陷主要包括瓶口、瓶身、瓶底破损、可见异物和残留液等^[78]。

该装备如图8所示,由空瓶传送系统、多成像系统、视觉检测系统、残留液检测和分拣装置组成。该

装备采用直线式传送机构,当空瓶分别运动到瓶口、瓶身、瓶底检测工位时,触发光电传感器,多成像系统自动获取各检测区域的图像,视觉检测系统分别对各工位图像进行处理。在图像处理过程中,首先采用第3.4.1节所述的方法对瓶口、瓶身、瓶底检测区域进行定位,然后分别对各区域进行缺陷检测,其中瓶身和瓶底采用基于局部掩膜的高频系数提取和阈值方法,瓶口采用分块和基于灰度的多层神经网络分类方法。最终分拣装置根据多个工位检测结果将存在缺陷的空瓶剔出生产线。



(a) 工作原理



(b) 装备实物

图 8 智能空瓶检测分拣智能制造装备

Fig. 8 The intelligent bottle quality inspection machine

5.2 大型医药智能视觉检测分拣装备(Intelligent injection inspection machine)

大型医药智能视觉检测分拣装备是应用于制药自动化生产线上,对安瓿、口服液及输液瓶等药品

质量进行高速、全自动、在线检测的装备.待识别的杂质主要包括图9(a)所示的玻璃屑、毛发、纤维等微弱可见异物如和瓶体破损、瓶口封装污染等,该装备还可以根据检测结果自动剔除不合格品^[79].

医药质量检测面临杂质类型多样,微弱(检测标准为 $50\mu\text{m}$ 及以上),部分杂质附着于瓶底等难题.为此,装备采用如图9(b)所示的多工位成像和精密旋转-急停成像机构,获取杂质的运动图像序列.杂质检测采用序列图像轨迹分析的方法,首先通过基于边界的定位方法确定检测区域,然后对相邻帧图像进行空洞填充差分,并采用基于脉冲神经网络和Tsallis熵的图像分割算法提取杂质,通过杂质不变特征分析运动轨迹,并实现杂质的识别^[59].在输出星轮处,根据检测结果,装备将药品进行分类.研制的装备实物如图9(c)所示.

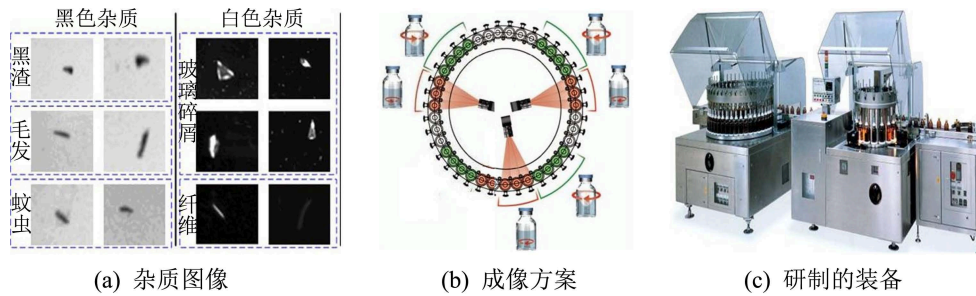


图 9 大型医药智能视觉检测分拣装备

Fig. 9 The intelligent injection inspection machine

5.3 精密智能电子视觉检测与分拣装备(Precise intelligent electronics inspection machine)

精密电子视觉检测与分拣装备是应用于电子制造生产线上,完成精密识别、定位、抓取、检测和分拣等制造工序的智能装备^[80].如图10所示,该装备由上料机械手、PLC、传送系统、精密视觉运动控制、高分辨率成像与视觉检测系统、下料机械手、分拣控制器和装备主控系统构成.

该装备作业包括上料、检测和分拣3个环节.在上料环节,上料机械手采用手眼成像模式,在给定位置对电路板成像,采用Patmax方法识别和定位电路板,并结合相机内外参数获取电路板中心位姿.上料机械手运动到给定位姿,末端执行器抓取对象,并移动到传送系统的夹具上方,再次成像并通过夹具定位获取夹具空间位姿.机械手移动执行器到夹具正上方,并放置电路板到夹具上.在检测环节,夹具在PLC的控制下移动到检测工位,并采用多个相机获取高分辨率图像,进行拼接和缺陷检测.在分拣环节,当电路板运动到下料工位时,下料机械手采用手眼模式成像,识别和计算出夹具位姿,并移动到夹具中心位置,执行器抓取对象,根据质量检测结果将对象放置到不同位置,最终进行精密电子组装.

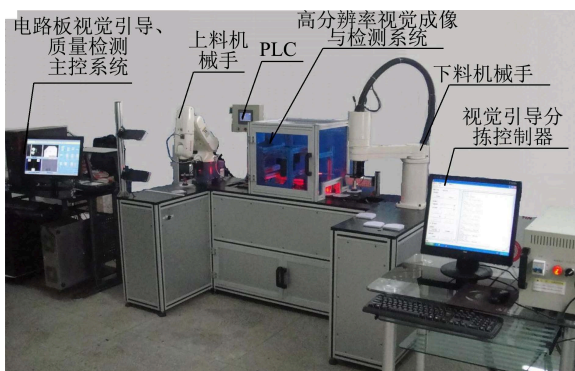


图 10 精密智能电子组装视觉检测与分拣制造装备

Fig. 10 The precise intelligent electronics inspection machine

6 面临的新挑战(New challenges)

智能制造装备是一种复杂精密光机电系统,要实现高速、高精度视觉检测和控制,保障装备的稳定、可靠、高效运行,必须在系统级进行优化设计.

首先要保证成像系统获取高质量图像,背景简单,以简化图像识别算法,时序设计满足实时性要求。其次,要实现光学感知、机械传动、电气控制与计算机软硬件协同工作,并采用误差分配原则控制精度。为进一步扩展视觉检测控制技术的应用范围,并提高精度、准确性和稳定性,以下挑战问题有待进一步研究解决:

1) 先进工业成像技术. 当前采用的成像技术大多局限于可见光成像,导致在某些应用中,获得的图像特异性差,很难实现图像检测和识别. 为此需从光源、光强和频谱控制、精密光路控制、先进阵列感知、信号调理等方面全面研究成像技术,研究不同对象与电磁波相互作用和成像的新现象、新原理、新方法. 将多种先进成像技术,如激光扫描成像、弱干涉成像、层析成像、太赫兹成像、电容成像等应用于工业视觉检测和控制,丰富视觉感知手段.

2) 高性能图像处理技术. 为提高视觉检测和控制的精度,通常需采用复杂图像处理流程,导致计算复杂度高;同时智能制造装备对实时性要求极高,造成了巨大的计算压力. 为此,需研究高性能图像处理装置,并且对图像处理算法进行并行化,实现实时图像处理.

3) 自动化图像处理流程设计. 图像处理过程是由多个图像处理步骤构成,每个步骤都可以采用多种处理方法,造成图像处理流程设计困难. 为针对特定应用实现自动图像处理流程设计,首先分析不同图像处理方法的异同,以及实现的处理效果,并分析不同参数对于处理结果的影响^[81]. 根据任务、先验知识和图像特征,选择最优图像处理算法和参数,实现自动图像处理流程设计.

4) 智能视觉控制技术. 当前视觉伺服研究的对象大多面向传统的6自由度机械手,其视觉控制相对简单. 随着作业复杂性增加,新型机器人如柔性机械手^[82]、并联机械手、精密多关节机械手等应用于精密视觉伺服;同时特种作业如超高精度细微操作、限定环境作业对机器人避障、路径规划和作业精度、速度都产生了新的要求. 为此要研究智能视觉伺服和限定环境下视觉伺服控制方法,将机器人智能控制、高精密切电机运动控制和机器视觉技术有机融合,实现高速高精度控制.

5) 精密光机电协同控制. 智能制造装备是机器视觉、高速高精度伺服控制、精密机械和智能控制软件的深度集成,装备的高效、可靠运行需要各部分的协同工作. 为此需研究高可靠性的光机电协同和集成技术,并通过状态监控和故障诊断技术提高

装备自动化程度和容错能力.

6) 视觉测控应用高稳定性、高可靠性和适应性研究. 由于图像信息属于非线性多维信息,在应用中存在多种不确定性,限制了装备的稳定性和可靠性. 为此需研究提高视觉信息稳定性、可靠性的方法,以及误差控制方法,提高装备对制造环境的适应能力.

参考文献(References):

- [1] 杨叔子, 吴波. 先进制造技术及其发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 73 – 78.
(YANG Shuzi, WU Bo. Trends in the development of advanced manufacturing technology [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(10): 73 – 78.)
- [2] 王耀南, 李树涛, 毛建旭. 计算机图像处理与识别技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 10 – 20.
(WANG Yaonan, LI Shutao, MAO Jianxu. *Digital Image Processing and Recognition* [M]. Beijing: High Education Press, 2001: 10 – 20.)
- [3] MALAMAS E N, PETRAKIS E G M, ZERVAKIS M, et al. A survey on industrial vision systems, applications and tools [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(2): 171 – 188.
- [4] 胡跃明, 杜鹃, 吴忻生, 等. 基于视觉的高速高精度贴片系统的程序实现 [J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(9): 760 – 764.
(HU Yueming, DU Juan, WU Xinsheng, et al. Program realization of high-speed and high-precision surface mounting system based on vision [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2003, 9(9): 760 – 764.)
- [5] FANG Z J, XIA L, CHEN G D, et al. Vision-based alignment control for grating tiling in petawatt-class laser system [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(6): 1628 – 1638.
- [6] 段峰, 王耀南, 雷晓峰, 等. 机器视觉技术及其应用综述 [J]. 自动化博览, 2002, 19(3): 59 – 62.
(DUAN Feng, WANG Yaonan, LEI Xiaofeng, et al. A review on machine vision technology and its applications [J]. *Automation Panorama*, 2002, 19(3): 59 – 62.)
- [7] 刘良江, 王耀南. 灰度直方图和支持向量机在磁环外观检测中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(8): 840 – 844.
(LIU Liangjiang, WANG Yaonan. Ferrite core appearance inspection using gray histogram and support vector machine [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(8): 840 – 844.)
- [8] 王耀南, 吴成中, 张辉, 等. 医药输液视觉检测机器人关键技术综述 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 130 – 140.
(WANG Yaonan, WU Chengzhong, ZHANG Hui, et al. Review on key technology of the machine vision inspection robot on pharmaceutical injection [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(7): 130 – 140.)
- [9] 张辉, 王耀南, 周博文, 等. 基于机器视觉的保健酒可见异物检测系统研究与开发 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(5): 973 – 979.
(ZHANG Hui, WANG Yaonan, ZHOU Bowen, et al. Development of healthy wine visible particle detection system based on machine vision [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(5): 973 – 979.)
- [10] YADID-PECHT O, ETIENNE-CUMMINGS R. *CMOS Imagers: from Phototransduction to Image Processing* [M]. Berlin: Springer, 2004: 32 – 43.
- [11] OHTA J. *Smart CMOS Image Sensors and Applications* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2010: 10 – 34.
- [12] KLEINFELDER S, LIM S H, LIU X, et al. A 10000 frames/s CMOS digital pixel sensor [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2001, 36(12): 2049 – 2059.

- [13] TAYLOR M B. *Tiled microprocessors* [D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [14] 张辉, 王耀南, 周博文. 基于机器视觉的液体药品异物检测系统研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(3): 548 – 553.
(ZHANG Hui, WANG Yaonan, ZHOU Bowen, et al. Research on foreign substance detection system for medicinal solution based on machine vision [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(3): 548 – 553.)
- [15] 段峰, 王耀南, 刘焕军. 基于机器视觉的智能空瓶检测机器人研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(5): 624 – 627.
(DUAN Feng, WANG Yaonan, LIU Huanjun. Study on machine vision based empty bottle inspector [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(5): 624 – 627.)
- [16] 余洪山, 赵科, 王耀南, 等. 融合2D/3D摄像机的方法与获取高精度三维视觉信息的装置 [J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(10): 1383 – 1392.
(YU Hongshan, ZHAO ke, WANG Yaonan, et al. Fusion of 2D camera with 3D camera and equipment for acquiring high resolution 3D visual information [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(10): 1383 – 1392.)
- [17] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A review of image denoising algorithms, with a new one [J]. *Multiscale Modeling & Simulation*, 2005, 4(2): 490 – 530.
- [18] ZHU L, ZHAO X T, GU M H. SAR image despeckling using improved detail-preserving anisotropic diffusion [J]. *IEEE Transactions on Electronic Letters*, 2014, 50(15): 1092 – 1093.
- [19] BHUJLE H, CHAUDHURI S. Novel speed-up strategies for non-local means denoising with patch and edge patch based dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 23(1): 356 – 365.
- [20] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(8): 2080 – 2095.
- [21] GUANG D. A generalized unsharp masking algorithm [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(5): 1249 – 1261.
- [22] NAM Y O, CHOI D Y, SONG B C. Power-constrained contrast enhancement algorithm using multiscale retinex for OLED display [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(8): 3308 – 3320.
- [23] LI Q, REN S. A real-time visual inspection system for discrete surface defects of rail heads [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(8): 2189 – 2199.
- [24] STATHAKI T. *Image Fusion: Algorithms and Applications* [M]. Neatherland: Elsevier, 2011: 1 – 30.
- [25] 王宏, 敬忠良, 李建勋. 多分辨率图像融合的研究与发展 [J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(1): 145 – 151.
(WANG Hong, JING Zhongliang, LI Jianxun. Research and development of multiresolution image fusion [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(1): 145 – 151.)
- [26] ZHANG Q, GUO B. Multifocus image fusion using the nonsubsampling contourlet transform [J]. *Signal Processing*, 2009, 89(7): 1334 – 1346.
- [27] YANG B, LI S T. Multifocus image fusion and restoration with sparse representation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(4): 884 – 892.
- [28] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(11): 977 – 1000.
- [29] ZOMET A, LEVIN A, PELEG S, et al. Seamless image stitching by minimizing false edges [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(4): 969 – 977.
- [30] JIA J, TANG C K. Image stitching using structure deformation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(4): 617 – 631.
- [31] DUAN F, WANG Y N, LIU H J, et al. A machine vision inspector for beer bottle [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2007, 20(7): 1013 – 1021.
- [32] SEERHA G K. Review on recent image segmentation techniques [J]. *International Journal on Computer Science and Engineering*, 2013, 5(2): 109 – 112.
- [33] NG H F. Automatic thresholding for defect detection [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, 27(14): 1644 – 1649.
- [34] FAN J, ZENG G, BODY M, et al. Seeded region growing: an extensive and comparative study [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2005, 26(8): 1139 – 1156.
- [35] 张耀, 王耀南, 周博文. 异型瓶药液中可见异物的智能视觉检测机器人 [J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(5): 1058 – 1063.
(ZHANG Yao, WANG Yaonan, ZHOU Bowen. Intelligent visual inspector for visible foreign substance in special shaped bottled medical liquid [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(5): 1058 – 1063.)
- [36] ROERDINK J B T M, MEIJSTER A. The watershed transform: Definitions, algorithms and parallelization strategies [J]. *Fundamenta Informaticae*, 2000, 41(1): 187 – 228.
- [37] KIM H, LEE K M, LEE S U. Learning full pairwise affinities for spectral segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(7): 1690 – 1703.
- [38] COMANICIU D, MEER P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(5): 603 – 619.
- [39] LIU M Y, TUZEL O, RAMALINGAM S, et al. Entropy-rate clustering: cluster analysis via maximizing a submodular function subject to a matroid constraint [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2014, 36(1): 99 – 112.
- [40] ACHANTA R, SHAJI A, SMITH K, et al. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(11): 2274 – 2282.
- [41] FELZENSZWALB P F, HUTTENLOCHER D P. Efficient graph-based image segmentation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 59(2): 167 – 181.
- [42] SHI J, MALIK J. Normalized cuts and image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(8): 888 – 905.
- [43] 刘国才, 王耀南. 多层Mumford-Shah向量值图像分割、去噪与重建模型 [J]. *自动化学报*, 2007, 33(6): 602 – 607.
(LIU Guocai, WANG Yaonan. Hierarchical Mumford-Shah model for vector-valued image segmentation, denoising and reconstruction [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(6): 602 – 607.)
- [44] CASELLES V, KIMMEL R, SAPIRO G. Geodesic active contours [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 22(1): 61 – 79.
- [45] WANG Y, GE J, ZHANG H, et al. Intelligent injection liquid particle inspection machine based on two-dimensional Tsallis Entropy with modified pulse-coupled neural networks [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2011, 24(4): 625 – 637.
- [46] SAID A F, BENNETT B L, KARAM L J, et al. Automated detection and classification of non-wet solder joints [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, 8(1): 67 – 80.
- [47] 周瑜, 刘俊涛, 白翔. 形状匹配方法研究与展望 [J]. *自动化学报*, 2012, 38(6): 889 – 910
(ZHOU Yu, LIU Juntao, BAI Xiang. Research and perspective on shape matching [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(6): 889 – 910.)
- [48] SILVER W M, MCGARRY E J, HILL M L, et al. Method for fast, robust, multi-dimensional pattern recognition: US, 7016539[P]. Natick, MA, US: Cognex Corporation, 2006.

- [49] KUMAR A. Computer-vision-based fabric defect detection: a survey [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(1): 348 – 363.
- [50] XIE X. A review of recent advances in surface defect detection using texture analysis techniques [J]. *Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis*, 2008, 7(3): 1 – 22.
- [51] 张学武, 吕艳云, 丁燕琼, 等. 小波统计法的表面缺陷检测方法 [J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(10): 1331 – 1336.
(ZHANG Xuewu, LÜ Yanyun, DING Yanqiong, et al. Surface defect inspection based on wavelet statistical analysis [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(10): 1331 – 1336.)
- [52] LI J, ALLINSON N M. A comprehensive review of current local features for computer vision [J]. *Neurocomputing*, 2008, 71(10): 1771 – 1787.
- [53] WANG C C, JIANG B, LIN J, et al. Machine vision-based defect detection in IC images using the partial information correlation coefficient [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2013, 26(3): 378 – 384.
- [54] TSAI D M, CHIANG I Y, TSAI Y H. A shift-tolerant dissimilarity measure for surface defect detection [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(1): 128 – 137.
- [55] 王耀南. 智能信息处理技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 76 – 200.
(WANG Yaonan. *Intelligent Information Processing* [M]. Beijing: High Education Press, 2003: 76 – 200.)
- [56] LUCCHI A, SMITH K, ACHANTA R, et al. Supervoxel-based segmentation of mitochondria in EM image stacks with learned shape features [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2012, 31(2): 474 – 486.
- [57] 周博文, 王耀南, 葛继, 等. 基于机器视觉的医药注射剂智能检测系统研究 [J]. *机器人*, 2009, 31(1): 53 – 60.
(ZHOU Bowen, WANG Yaonan, GE Ji, et al. A machine-vision-based intelligent inspection system for pharmaceutical injections [J]. *Robot*, 2009, 31(1): 53 – 60.)
- [58] HUANG G B, KASUN L L, ZHOU H M, et al. Extreme learning machines [J]. *IEEE Intelligent Transactions on System*, 2013, 28(6): 30 – 59.
- [59] GE J. *Research on vision-based ampoule liquid particle inspection machine* [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [60] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. Visual servo control, I: Basic approaches [J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, 13(4): 82 – 90.
- [61] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. Visual servo control, part II: advanced approaches [J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2007, 14(1): 109 – 118.
- [62] LIPPIELLO V, SICILIANO B, VILLANI L. Position-based visual servoing in industrial multirobot cells using a hybrid camera configuration [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(1): 73 – 86.
- [63] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision [M]. Cambridge: Cambridge Press, 2004: 89 – 121.
- [64] CARON G, MARCHAND E. Photometric visual servoing for omnidirectional cameras [J]. *Autonomous Robots*, 2013, 35(2): 177 – 193.
- [65] TAO X, JANABI-SHARIFI F, CHO H. An active zooming strategy for variable field of view and depth of field in vision-based microassembly [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, 6(3): 504 – 513.
- [66] FANG Y, LIU X, ZHANG X. Adaptive active visual servoing of non-holonomic mobile robots [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(1): 486 – 497.
- [67] LIU Y H, WANG H, WANG C, et al. Uncalibrated visual servoing of robots using a depth-independent interaction matrix [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(4): 804 – 817.
- [68] KOSMOPOULOS D I. Robust Jacobian matrix estimation for image-based visual servoing [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(1): 82 – 87.
- [69] TAHRI O, MEZOUAR Y, CHAUMETTE F, et al. Decoupled image-based visual servoing for cameras obeying the unified projection model [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, 26(4): 684 – 697.
- [70] GARCIA-ARACIL N, MALIS E, ARACIL-SANTONJA R, et al. Continuous visual servoing despite the changes of visibility in image features [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(6): 1214 – 1220.
- [71] CHAUMETTE F. Image moments: a general and useful set of features for visual servoing [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2004, 20(4): 713 – 723.
- [72] 李优新, 毛宗源, 田联房. 基于图像矩与神经网络的机器人四自由度视觉伺服 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(10): 1162 – 1166.
(LI Youxin, MAO Zongyuan, TIAN Lianfang. Visual servoing of 4DOF using image moments and neural network [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(10): 1162 – 1166.)
- [73] TAMADAZTE B, LE-FORT PIAT N, MARCHAND E. A direct visual servoing scheme for automatic nanopositioning [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(4): 728 – 736.
- [74] SILVEIRA G. On intensity-based nonmetric visual servoing [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(4): 1019 – 1025.
- [75] DAME A, MARCHAND E. Mutual information-based visual servoing [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(5): 958 – 969.
- [76] 王耀南. 智能控制系统 [M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2006: 12 – 34.
(WANG Yaonan. *Intelligent Control System* [M]. Beijing: Hunan University Press, 2006: 12 – 34)
- [77] 王耀南. 机器人智能控制工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 71 – 125.
(WANG Yaonan. *Intelligent Robot Control Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2004: 71 – 125.)
- [78] DUAN F. *Research on beer bottle vision inspector* [D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [79] 张辉, 王耀南, 吴成中, 等. 高速医药自动化生产线大输液视觉检测与识别技术 [J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(10): 1404 – 1413.
(ZHANG Hui, WANG Yaonan, WU Chengzhong, et al. Visual detection and recognition for medical infusion automatic production lines [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(10): 1404 – 1413.)
- [80] LIU L J. *Visual inspection methods and technology for advanced electronics manufacturing production line* [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [81] RANAWEEERA K. *Optimization, artificial intelligence and machine learning in the development of image processing plans* [D]. Canada: The University of Western Ontario, 2005.
- [82] OTT L, NAGEOTTE F, ZANNE P, et al. Robotic assistance to flexible endoscopy by physiological-motion tracking [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(2): 346 – 359.

作者简介:

王耀南 (1957–), 男, 教授, 主要研究方向为智能控制、机器视觉和智能制造装备, E-mail: yaonan@hnu.edu.cn;

陈铁健 (1985–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能制造装备和机器视觉, E-mail: chentiejian@hnu.edu.cn;

贺振东 (1981–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能制造装备和机器视觉, E-mail: hezhendong_itl@163.com;

吴成中 (1987–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能制造装备和机器视觉, E-mail: hnrabbit2002@sina.com.