# 机电-体化

## **MECHATRONICS**

中国科技核心期刊

中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊

中国学术期刊数据库收录期刊

主办单位 上海科学技术文献出版社 协办单位 上海交通大学机器人研究所

双月刊 2019年12月 ISSN 1007-080X CN31-1714/TM 邮发代号4—565 Vol.25,No.6 6



## 目次 CONTENTS

## 研究・开发

3	智能装配台中 Kinect 的手部末端追踪方法	
		沈 斌
9	基于改进 A-Star 算法的 AGV 全局路径规划	
	市永明 马道阳 高 飞	周怡和
16	工业机器人抛光复杂曲面抛光轮磨损分析	
		金晓怡
23	关于多路复用器动态参数测试系统的研究	
		梁琦
28	基于燃料电池电动汽车的能量管理控制策略研究	
	聂彦鑫 黄东越 郑志强	李 涛

## 目次

(双月刊) 2019年第6期

## Contents

## 机电-体化

钱伟长进 🌃

## 学术委员会

主任 杨华勇

## 委员(按姓氏笔画排序)

王立平 清华大学

王时龙 重庆大学

王树新 天津大学

朱向阳 上海交通大学

杨华勇 浙江大学

张宪民 华南理工大学

赵 杰 哈尔滨工业大学

胡俊辉 南京航空航天大学

钱晋武 上海大学

梅雪松 西安交通大学

韩建达 中国科学院沈阳自动化研究所

焦宗夏 北京航空航天大学

熊蔡华 华中科技大学

#### 编辑委员会

主任 熊振华

## 委员(按姓氏笔画排序)

王文君 西安交通大学

王兴松 东南大学

刘 达 北京航空航天大学

刘廷杰 哈尔滨工业大学

杨志永 天津大学

吴学忠 国防科技大学

陈 超 南京航空航天大学

罗 均 上海大学

赵景山 清华大学

陶 波 华中科技大学

梅德庆 浙江大学

曹华军 重庆大学

熊振华 上海交通大学

执行主编 熊振华

刊名题字 钱伟长

美术编辑 徐 琍

责任校对 周燕儿

责任编辑 盛 强

出版人张树

主管单位 上海图书馆 (上海科学技术情报研究所)

主办单位 上海科学技术文献出版社 协作单位 上海交通大学机器人研究所 编辑出版 《机电一体化》编辑部

地址:上海市长乐路 746 号 邮编: 200040 编辑部电话: 021 - 54035772 市场部电话: 021 - 54035772 传真: 021 - 64370782 邮箱: cbqks \$\text{\psi} libriet.sh.cn

国际标准刊号; ISSN 1007-080X 国内统一刊号; CN31-1714/TM 邮发代号; 4-565 广告许可证号; 310104400067 印刷; 上海昌鑫龙印务有限公司 地址; 上海金沙江路 1340 号 电话; 021-52830308 定价; 人民币 18 元

## CONTENTS | 目次

## 应用・交流

34	基于远心机构的手术机器人系统设计与精度测量					
	李 稣 林艳萍 周慧芳 李寅炜 宋雪霏					
41	基于新布局模式的仓库能耗问题建模					
	·····································					
48	最优脉动阀控理论在低转速五柱塞径向数字泵中的应用					
56	质量管理在大学生创客活动中的应用					
	仪 维 高建军					
61	SAR 在幕墙及外墙安全预警信息平台中的作用					
	徐龙涛					

## 智能装配台中 Kinect 的手部末端追踪方法

## Hand's Endpoint Tracking Based on Kinect in A Smart Assembly Workbench

冯成均 沈 (同济大学 中德学院,上海 201804)

要:对工作者手部位置的实时追踪是实现装配智能化的重要基础。将 Kinect 用于装配过程中 可实时追踪工作者手部位置,针对 Kinect 在竖直放置时不能获取骨骼点及装配过程中手呈现不同姿态 的问题,提出了一种基于深度和彩色信息的手部末端追踪方法。首先利用 Kinect 获取的彩色图像运用 HSV 颜色模型分割肤色区域,并利用深度图像运用高斯混合模型分割出运动区域,通过创建显示查找表将 两者结合得到手部区域,在该区域内创建若干个点,通过点的迭代获取距手部末端最近的特征点。最后, 在特征点周围选取距其最近的三个图像极值点,其坐标的均值即为代表手部末端所处位置的点的坐标,从 而对手部进行实时追踪。实验结果表明,该方法在手呈现各种姿态时都能准确地追踪手部末端区域。

关键词: Kinect 手部追踪 智能装配 HSV 颜色模型 高斯混合模型

**DOI:** 10.16413/j.cnki.issn.1007-080x.2019.06.001

Abstract: The real-time tracking of the position of the worker's hand is an important basis for the realization of assembly intelligentization. Kinect is used to trace worker's hand position in assembly process. For Kinect can't get skeletal points when vertically placed and hands will show different posture in assembly process, a hand tracking method based on depth and color information is proposed. This method firstly used to meet the requirements of the regional segmentation of skin color image using HSV color model Kinect camera, and the depth of the image using the Gauss mixture model to meet the requirements of the regional segmentation movement, by creating a display lookup table (LUT) combines segmentation of the hand region, creating a number of points in the region. To get the feature point from the hand end point through recent iteration. Finally, the three nearest image extremum points are selected around the feature points. The mean of the coordinates is the coordinates representing the location of the ends of the hands, so as to achieve real-time tracking of the opponent. The experimental results show that the method can track the end area of the hand accurately when the hands are presented with various gestures.

Key words: Kinect hand tracking smart assembly HSV color model Gaussians mixture mode

作者简介: 冯成均 1994 年生, 硕士研究生。主要研究方向为智能制造和机器视觉。

沈 斌(通讯作者) 1955年生, 工学博士, 教授。主要研究方向为智能制造和工业 4.0。

2019.6 | 机电一体化 3

#### 0 引 言

我国制造业大部分是劳动密集型企业,需 要工人手工制造和装配各类零件。随着工业4.0 及智能制造的提出,产品的装配过程需要更加智 能化<sup>[1]</sup>。Kinect 是微软推出的体感设备,通过 Kinect 可以实时获取场景的彩色以及深度信息 2 。 将 Kinect 应用到产品装配过程中, 能够实时获取 工作者手部以及工作台上各设备的位置,实时监 控装配过程,从而提高装配过程的智能化和产品 装配的效率和质量 []。

本文提出了一种基于 Kinect 深度图像和彩 色图像的手部末端区域追踪的方法,可以很好地 监视装配过程中手所处的位置。该方法首先 利用 Kinect 彩色图像中的 HSV 颜色模型筛选出 肤色区域, 可以适当扩大肤色区域判定的阈值, 减少有肤色差异的人在操作时光照变化对肤色 判定的影响 [6]; 再利用深度图像中的高斯混合模 型(GMM)筛选出图像中运动的区域<sup>66</sup>,通过创建 显示查找表(LUT),将彩色图像中满足肤色条件 的点一一对应到深度图像上, 选取同时满足肤色 和运动条件的区域即为手部区域; 最后, 获取最



a 姿态1



b 姿态2



c 姿态3



图 1 装配过程中手在盒子中的姿态

#### 机电一体化 | 2019.6

靠近手部末端区域的三个图像极值点的坐标均 值,作为代表手的特征点,从而实现手部末端位 置的实时追踪。

#### 1 手部区域分割

利用 HSV 颜色空间分割出彩色图像中满足 肤色的区域,同时利用 GMM 分割出深度图像中 运动的区域,将获取到的满足肤色条件的像素点 映射到深度图像中,即可得到同时满足两个条件 的区域,即手的区域 [5]。

## 1.1 基于 HSV 的肤色提取

通过 Kinect 彩色相机可以获取基于 RGB 颜 色空间的图像矩阵 A。将 A 转换为 HSV 颜色空 间得到图像矩阵 A'。

定义肤色判定阈值区间,经过大量测试,发 现当满足 5<H<44°, 10.17% <S<73.77%, 0<V<1 时,分割效果较好。







c去噪

图 2 基于 HSV 颜色模型肤色区域分割过程

## 1.2 基于高斯混合模型的运动物体的检测

b分割

图像中每个像素点的值用变量 X, 表示, 其概 率密度函数可由 K 个高斯分布表示, 即

$$p(X_{t}) = \sum_{k=1}^{K} w_{k,t} \emptyset(X_{t}, u_{k,t}, \sigma_{k,t}^{2})$$
 (1)

式中:  $u_{k,\iota}$  和  $\sigma_{k,\iota}^2$  分别是高斯分布的均值和方差;  $w_{k,\iota}$ 是t 时刻第k 个高斯分布的权重,且  $\sum_{i=1}^{K} w_{k,i} = 1$ 。  $\emptyset(X_{\iota}, u_{k,\iota}, \sigma_{k,\iota}^2)$  是  $\iota$  时刻的第 k 个高斯分布密 度,故

$$\emptyset(X_t, u, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(X_t - u)^2}{2\sigma^2}}$$
 (2)

#### 1.3 显示查找表(LUT)的创建

由干彩色图像和深度图像分别由 Kinect 的

彩色相机和深度相机所得, 所以需要创建显示查 找表(LUT) 将两者结合 ®。根据投影变换,有

$$\begin{bmatrix} x_{\epsilon} \\ y_{\epsilon} \\ z_{\epsilon} \end{bmatrix} = z_{\epsilon} \times K_{\epsilon}^{-1} \times \begin{bmatrix} u_{\epsilon} \\ v_{\epsilon} \\ 1 \end{bmatrix}$$
 (3)

根据深度相机和彩色相机的相对位置,经过 刚体旋转变换可得到同一个点在两个不同坐标 系下的关系:

$$\begin{bmatrix} x_{\epsilon} \\ y_{\epsilon} \\ z_{\epsilon} \end{bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} x_{d} \\ y_{d} \\ z_{d} \end{bmatrix} + t \tag{4}$$

代入下式则得式(5):

$$z_{\epsilon} \begin{bmatrix} u_{\epsilon} \\ v_{c} \\ 1 \end{bmatrix} = z_{d} K_{\epsilon} R K_{d}^{-1} \times \begin{bmatrix} u_{d} \\ v_{d} \\ 1 \end{bmatrix} + K_{\epsilon} t$$

$$z_{\epsilon} \times \begin{bmatrix} u_{\epsilon} \\ v_{\epsilon} \\ 1 \end{bmatrix} = z_{d} \times \begin{bmatrix} l_{1}^{(1)} \\ l_{2}^{(1)} \\ l_{3}^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{1}^{(2)} \\ l_{2}^{(2)} \\ l_{3}^{(2)} \end{bmatrix}$$
 (5)

式中: z, 是唯一未知的值; z, 可以通过深度相机 直接获取; l(1) 构成显示查找表 LUT; l(2) 为常 量Kct。

根据矩阵方程有

$$z_e = z_d \ l_3^{(1)} + l_3^{(2)} \tag{6}$$

因此,在深度相机坐标系下的任一点在彩色图像 上的坐标为

$$u_{\epsilon} = \frac{z_d \ l_1^{(1)} + l_1^{(2)}}{z_s \ l_2^{(1)} + l_2^{(2)}} \tag{7}$$

$$v_{e} = \frac{z_{d} l_{2}^{(1)} + l_{2}^{(2)}}{z_{d} l_{3}^{(1)} + l_{3}^{(2)}}$$
(8)

即对于深度图像上的任意一点,利用式(7)和式 (8)即可求出该点在彩色图像上的位置。由上文 可知, color 为肤色分割后的二值化图像矩阵, 其 中 0 为背景, 1 为肤色区域。mask 为 GMM 分割 后的二值化图像矩阵,其中0为背景,1为运动区 域。定义一个尺寸和 mask 相同的矩阵 mask,,满 足上述两个条件时  $\max_{i}(u_{d}, v_{d}) = 1$ , 即手部区 域; 否则  $\max_{s}(u_s, v_s) = 0$ , 即背景区域。通过上 述方法得到的图像如图 3 所示。为了使获取的结 果更具有说服力,在环境中加入了与肤色相似的 静止物体和与肤色不同的运动物体进行干扰。 其中图 3a 是彩色图像, 图 3b 是只满足肤色条件 的区域,图 3c 是只满足运动条件的区域,图 3d 是 同时满足两个条件的区域,即为手的区域。



b肤色区域





c运动区域

d最终结果

图 3 手部区域分割过程

## 2 手部特征点的获取

在手伸入盒子内时, 无论手呈现出何种姿态, 手的末端区域一定位于盒子内。根据该特征,可 选取手部末端区域的点来代表手所处的位置。

在工作过程中,操作者可能是双手操作也可 能是单手操作,定义 mask。中有效图像的数量为 n(有效图像指的是 mask,中彼此不相连的白色 区域,在一般情况下, n≥0) <sup>図</sup>。利用 MATLAB 中的 regionprops 函数获取图像属性,由该函数可 得出 mask,中有效图像的数量,每个有效图像的 重心为  $P_{c1}(x_{c1}, y_{c1}), P_{c2}(x_{c2}, y_{c2}), \dots,$  $P_{Cn}(x_{cn}, y_{cn})$ 

2019.6 | 机电一体化 5

$$AxisP_1 = [al_m cos\alpha, -al_m sin\alpha]$$
 (9)

$$AxisP_{2} = [-al_{m}cos_{\alpha}, al_{m}sin_{\alpha}]$$
 (10)

令

$$\begin{cases} x_p = al_m \cos \alpha \\ y_p = -al_{\text{major}} \sin \alpha \end{cases}$$
 (11)

为了准确稳定地求得代表手部末端区域的点的坐标,在每个有效图像中,以重心  $P_a$  为起点,分别沿向量  $AxisP_1$ 和  $AxisP_2$ 方向,并以向量长度为距离各生成距离相同的 m 个点。则重心以及这 2m 个点( $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ , …,  $P_{2m}$ ,  $P_{2m+1}$ )的坐标分别为

$$\begin{bmatrix} x_c & y_\epsilon \\ x_c + x_p & y_c + y_p \\ x_\epsilon - x_p & y_\epsilon - y_p \\ \vdots & \vdots \\ x_\epsilon + mx_p & y_\epsilon + my_p \\ x_\epsilon - mx_p & y_\epsilon - my_p \end{bmatrix}$$

$$(12)$$

在这些点中, 获取最靠近手部末端的点, 并 以该点为基准, 获取最靠近该点的三个图像极值 点, 其坐标分别为

$$P_{e1}(x_{e1}, y_{e1}), P_{e2}(x_{e2}, y_{e2}), P_{e3}(x_{e3}, y_{e3})$$

计算这三个点坐标的均值,得到的坐标值即为代表手部区域的特征点在深度图像上的坐标,即

$$P_h\left(\frac{x_{e1} + x_{e2} + x_{e3}}{3}, \frac{y_{e1} + y_{e2} + y_{e3}}{3}\right)$$
 (13)

根据工作台的布局形式以及工作者所处的位置可知,手部末端区域的位置相对于手的其他部位距离人最远,因此,可以选取这些点中纵坐标最大的点作为选取图像极值点的基准点。但是在实际工作过程中出现的一些干扰可能会使本应彼此相连的白色区域出现缝隙。为了增强系统的鲁棒性,设定一个长度阈值 length, 若两点之间的距离小于 length,则不论这两个点是否在同一白色

区域内,都认为它们同属一个有效图像。

在此过程中, 共创建 (2m+1)n 个点, 将这些点的坐标全部存储在一个  $(2m+1)n \times 2$  矩阵  $E_p$ 中。矩阵中, 第 1 至 2m+1 行为第一块有效图像内的点的坐标, 第 2m+2 至 2(2m+1) 行为第二块有效图像内的点的坐标, 以此类推。将所有的点标记为 1 ,得到一个  $1 \times [2m+1)n]$  矩阵  $E_u$  ,  $E_u$  中第 i 列的值即为第 i 个点的标记,即

$$\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{u}} = [1 \quad 1 \quad \cdots \quad 1] \tag{14}$$

对于这些点中的任一点  $P_i$ , 经过一系列迭代, 得到该有效图像内纵坐标最大的点。

在工作过程中,操作者至多有两只手操作, 所以获取到的特征点至多有两个。此处以单手 操作为例,获取到一个特征点  $P_m$ ,根据上文,获 取到的代表手的特征点的坐标为

$$P_h\left(\frac{x_{e1} + x_{e2} + x_{e3}}{3}, \frac{y_{e1} + y_{e2} + y_{e3}}{3}\right)$$
 (15)

即  $P_h(x_{hand}, y_{hand})$ 。 此时获取到的坐标是二维图像坐标系上的坐标,该点深度值  $z_{hand} = Z(x_{hand}, y_{hand})$ 。 将该点坐标转换为 Kinect 坐标系下的坐标,即

$$\begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} = z_{\text{hand}} \times K_d^{-1} \times \begin{bmatrix} x_{\text{hand}} \\ y_{\text{hand}} \\ 1 \end{bmatrix}$$
 (16)

最终求得的代表手的点在 Kinect 坐标系下的坐标为  $P_{H}(X_{H},Y_{H},Z_{H})$ 。

为了保证选取点的精度,提高系统鲁棒性,相邻两点间距离  $al_{major}$ ,以及每块白色区域内定义的点的数量 2m+1 的取值是实现上述方法稳定运行的关键。点的数量过多会导致运算效率下降,点的数量过少则会产生较大误差。经过多次测试发现,当 a=1/15 且 m=6 时,该方法能够稳定运行。同时,根据在每个白色区域内定义的点的数量,以及普通人的手臂的最大长度,经过多次实验验证,当定义 rangesearch 函数中长度的阈

6 机电一体化 | 2019.6

值 length = 25 时,该方法的鲁棒性较好。此时,两 个向量分别为

$$AxisP_1 = \left[\frac{1}{15} l_m cos\alpha, -\frac{1}{15} l_m sin\alpha\right] \quad (17)$$

$$AxisP_2 = \left[ -\frac{1}{15} l_m cos\alpha, \frac{1}{15} l_m sin\alpha \right] \quad (18)$$

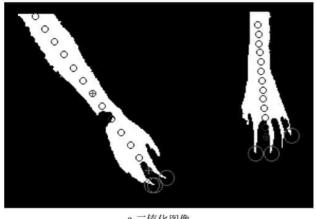
每个白色图像内生成13个点的坐标分别为

$$\begin{bmatrix} x_{\epsilon} & y_{\epsilon} \\ x_{c} + x_{p} & y_{c} + y_{p} \\ x_{c} - x_{p} & y_{c} - y_{p} \\ \vdots & \vdots \\ x_{\epsilon} + 6x_{p} & y_{\epsilon} + 6y_{p} \\ x_{\epsilon} - 6x_{p} & y_{\epsilon} - 6 y_{p} \end{bmatrix}$$

$$(19)$$

#### 3 实验结果与分析

本文邀请了6位实验者在环境光照稳定的条 件下进行实验。实验者以随机的手势在装配台 上进行装配操作,保存装配过程中彩色图像的每 一帧,将获取到的特征点标记在彩色图像上,如 图 4 所示。图 4a 为测试得到的二值化图像,图 4b 为对应的彩色图像, "o"标记的为图像极值点, "+"标记的为代表手部区域的特征点。由图 4 可 得,特征点位于手部的末端区域。若特征点不论 在手呈现何种姿态时都在手部末端,则认为识别 正确。实验结果如表1所示。



a二值化图像



b彩色图像

图 4 测试结果

表 1 手部位置判断结果

实验者	视频帧数	正确识别 次数	正确率/
1	200	197	98.5
2	200	191	95.5
3	200	191	95.5
4	200	188	94.0
5	200	192	96.0
6	200	189	94.5
总计	1 200	1 148	95.67

表1中,由于实验者1是作者本人,操作比较 熟练, 识别正确的次数也较多, 而其他实验者都 是在经过简单培训后进行操作的,但是总体正确 率也能保持在95%左右。根据实验结果可知,本 文算法能够准确实时追踪手在呈现不同姿势状 态下的手部末端区域,为实现装配智能化提供了 重要基础。

## 4 结束语

本文利用 Kinect 彩色和深度图像技术, 针对 现阶段 Kinect 在竖直布置时不能获取骨骼点的 问题,提出了一种能够实时稳定跟踪手在呈现不 同姿势时手部末端区域的算法。与传统的基于 深度信息的手部位置的方法相比,通过该方法获 取到的特征点,能够实时稳定检测手的位置,并 且在装配作业中能准确、快速地判断手是否伸入 物料盒,为装配智能化提供了基础。

2019.6 | 机电一体化 7

#### 参考文献

- [1] 刘金媛, 孟宪遵, 丁海韬. 改变移动互联网的新型人机交互技术 [J]. 电信科学, 2013, 29(6): 136-138, 163.
- [2] 张诗潮,钱冬明.体感技术现状和发展研究 []. 华东师范大学学报(自然科学版),2014(2): 40-49,126.
- [3] 陆忠燕, 沈斌, Jürgen Fleischer, 等.基于 OPC-UA 架构的装配系统的 KPI 可视化 [J]. 机电一体化, 2018, 24(10): 16-23.
- [4] ZENG J, WANG Y, TURNER R, et al. Vision-based finger tracking of breast palpation for improving breast selfexamination C //Proceedings of the 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1996: 148-149.
- [5] DORFMULLER-ULHAAS K, SCHMALSTIEG D. Finger tracking for interaction in augmented environments [C] //Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, 2001: 29-30.

- [6] 陈锻生,刘政凯.肤色检测技术综述 [1].计算机 学报,2006,29(2): 194-207.
- [7] SATO Y, KOBAYASHI Y, KOIKE H. Fast tracking of hands fingertips in infrared images for augment desk interface [C] //Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Sciety Press, 2000: 462-467.
- [8] REN Z, YUAN J, ZHANG Z, Robust hand gesture recognition based on finger-earth mover's distance with a commodity depth camera [C] // Proceeding of ACM Multimedia Conference and Co-Located Workshops. New York: ACM Press, 2011: 1093-1096.
- [9] RAHEJA J L, CHAUDHARY A, SINGAL K. Tracking of fingertips and centers of palm using Kinect [C] //Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 248-252.





定价:98.00元

《机械平衡及其装备》为上海科技专著出版资金资助项目。该书全面系统阐述转子机械平衡的基本概念,刚性转子和挠性转子两种不同类型转子机械平衡的力学原理、平衡方法以及相关的技术标准,贴近生产实际,注重反映和介绍国内外有关的先进技术和装备,以及相关的最新技术标准。本书还介绍了有关于如何制定和检验转子机械平衡的最终状态——许用剩余不平衡量的允差等级、检验方法和测试手段,以及平衡机性能的标定及规范等标准,实用性强,对于推动机械制造业的技术进步、设备更新和平衡装备新产品的开发颇具参考价值。

联系地址:上海市长乐路746号

网址: http://www.sstlp.com

邮编:200040

微信号:SHKJWX

传真:64374078