

# 基于点云与图像匹配的自动化喷涂系统坐标变换方法研究<sup>1</sup>

唐倩<sup>1</sup>，黄耀<sup>1</sup>，范秋垒<sup>1</sup>，刘飞<sup>1</sup>，裴林清<sup>2</sup>

(1.重庆大学 机械工程学院，重庆 400044；2.重庆德衡科技有限公司，重庆 400030)

**摘要：**针对当前个性化定制产品的喷涂工作需求，研发了一套自动化喷涂系统。为了实现系统中的坐标变换功能，提出了一种基于点云与图像匹配的坐标变换方法。在该方法中，利用摄像机和三维扫描仪分别获取喷涂对象的二维图像和三维点云，并将点云进行投影获得点云投影图像；通过改进 canny 算子来提取二维图像和点云投影图像的闭合边缘；计算得到边缘各点的曲率并将其展开为曲率链码的形式进行匹配，从而建立点云坐标系与机器人坐标系的变换关系。通过实验验证了该方法的可行性。

**关键词：**自动化喷涂系统；坐标变换；点云；图像匹配

**中图分类号：**TP278；TP391

**文献标识码：**A

## Study on coordinate transformation of automated spraying system based on point cloud and image matching

TANG Qian<sup>1</sup>, HUANG Yao<sup>1</sup>, FAN Qiulei<sup>1</sup>, LIU Fei<sup>1</sup>, PEI Linqing<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Deheng Technology Co., Ltd, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** An automated spraying system was proposed to meet the spraying demand of personalized customized product. In order to achieve the function of coordinate transformation module of the system, a coordinate transformation method based on point cloud and image matching was built. The 2D image and 3D point cloud of a spraying object were acquired by camera and 3D scanner respectively. The 2D point cloud image was obtained by projecting 3D point cloud. The closed edges of 2D image and point cloud projection image were obtained through improving the canny operator. The curvatures of each point in the closed edges were calculated and expanded to the form of curvature chain code to match images, and then the transformation of point cloud coordinate system and the robot coordinate system was achieved. Experiments were proposed to verify the feasibility of method.

**Keywords:** automated spraying system; coordinate transformation; point cloud; image matching

## 0 引言

喷涂机器人是目前应用最为广泛的工业机器人之一，在生产线上利用喷涂机器人进行作业有许多明显的优势，如环境适应能力更强、安全可靠、效率高、更加环保等等，在产品制造领域中，绝大部分的重复性的喷涂工作都被喷涂机器人所取代。伴随着当前个性化产品定制的需求不断增加，产品的单一重复性将降低，对喷涂机器人提出了更高的自动化要求，即在喷涂对象快速变换的情况

收稿日期：2016-06-28；修订日期：2016-12-20。Received 28 June 2016; accepted 20 Dec. 2016.

**基金项目：**国家科技支撑计划资助项目（2015BAF17B02）；2015 年智能制造专项项目（长安汽车城节能与新能源汽车智能柔性焊接新模式应用）；重庆市自然科学基金计划项目（cstc2013jjB70002）。**Foundation items:** Project supported by the National Key Technology Support Program, China (No. 2015BAF17B02), the 2015 Intelligent Manufacturing Project (the Application of Intelligent Flexible New Welding Mode of Saving and New Energy Vehicles in Changan Automobile City), and the Natural Science Foundation Project of CQ CSTC, China (No. cstc2013jjB70002).

下，机器人还要保持高效率、高可靠性的工作，因此，提高喷涂机器人对变换喷涂对象的适应能力变得尤为重要和迫切。

目前，针对喷涂机器人自动化的研究主要有机器人的离线自动编程<sup>[1-2]</sup>和“在线标定”<sup>[3-4]</sup>。离线编程是在离线的情况下根据产品的三维数字模型对机器人的运动轨迹进行规划，其能减少机器人停机时间，但是在喷涂对象快速变换的情况下，喷涂对象在机器人坐标系的位置标定过程将花费大量的时间。“在线标定”是通过将摄像机安装在机器人末端实时获取工作对象的位置和几何信息，但是“在线标定”需要的工作空间比较大，所需的时间很长、效率低。为了满足在喷涂对象快速变换的情况下，机器人高效、高可靠性的工作要求，提出一套基于点云与图像匹配的自动化喷涂系统，系统中点云坐标系与机器人坐标系的变换是非常重要的部分，直接关系到系统功能是否可以实现。

点云与图像匹配的研究非常少且主要应用在三维重建方面<sup>[5-7]</sup>，本文将借鉴图像匹配的思想来实现点云与图像的匹配。图像匹配方法主要有基于灰度的图像匹配<sup>[8-10]</sup>和基于特征的图像匹配。基于灰度的图像匹配方法是利用图像的灰度值来确定图像之间的空间几何变换关系，此方法计算简单、易于实现，但是其对图像的质量要求很高，匹配的精度对噪声的存在非常敏感。基于特征的图像匹配方法能够大大减小图像处理的计算量，而且对灰度变换、图像变形以及遮挡等都有较好的适应能力，目前主要有基于区域特征匹配和基于特征点匹配的相关研究，如：Kristen 等<sup>[11]</sup>通过应用 EMD 来衡量各特征点邻域块的相似程度来进行匹配；Adamek 等<sup>[12]</sup>通过图像边缘的凹凸特性来对图像进行匹配；高晶等<sup>[13]</sup>通过角点检测算法寻找特征点来进行图像匹配；刘佳等<sup>[14]</sup>利用改进的 SIFT 算法得到特征点进行图像匹配等。由于点云图像像素点较为稀疏且具有影响其特征识别的噪声，故上述基于特征点和区域特征的匹配方法并不适用于点云与图像的匹配。因此，本文提出了一种基于闭合图像边缘整体特征配准的点云与图像匹配方法。

## 1 自动化机器人喷涂系统

目前，个性化产品定制的需求越来越高，针对不同的个性化产品的喷涂工作，即每次喷涂的对象几何形状不一样，即使喷涂对象形状相同，由于每次喷涂对象摆放位姿差异，常规方法每次喷涂均需对机器人与喷涂对象的相对位姿进行测量标定，耗费大量时间，直接影响生产效率。本文从喷涂目标三维点云与二维图像出发，提出一套基于点云与图像在线匹配的自动化机器人喷涂系统，自动识别匹配机器人与喷涂对象的相对位姿，极大的提高了喷涂效率，系统如图 1 所示。

将喷涂产品置于平台上，利用三维扫描仪对产品进行扫描，获取产品三维外形点云数据，基于点云数据通过机器人自动喷涂轨迹规划及优化技术获得点云坐标系中的喷涂轨迹。将产品输送至喷涂平台，通过点云与图像在线匹配实现点云坐标系与机器人坐标系的变换，将点云坐标系中的喷涂

轨迹变换为机器人坐标系中的喷涂轨迹。机器人系统生成程序，对产品进行自动喷涂。系统能够在喷涂对象快速变换的情况下实现自动化、高效化的工作。

系统主要包括四个模块：点云数据获取与处理模块、基于点云数据的轨迹自动规划模块、坐标变换模块、机器人喷涂模块。目前点云处理和喷涂轨迹自动规划相关的研究都比较成熟，相应的方法都能应用于本系统，本文主要研究如何实现系统中的坐标变换功能。

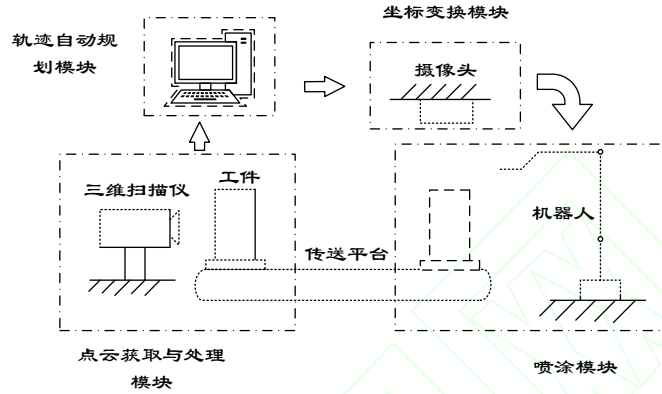


图1 自动喷涂系统组成

## 2 自动喷涂系统坐标变换方法

定义机器人坐标系  $R$ ，图像坐标系  $U$ ，点云坐标系  $V$ ，本文的研究是基于  $R$ ， $U$  和  $V$  三个坐标系的  $x-y$  平面互相平行的。

在自动喷涂系统中，经过轨迹自动规划模块后，得到基于点云坐标系的喷涂轨迹  $S_V$ 。要实现喷涂机器人的喷涂工作，系统必须将基于点云坐标系的喷涂轨迹  $S_V$  变换为基于机器人坐标系的喷涂轨迹  $S_R$ ，因此，通过建立点云坐标系与机器人坐标系的变换关系从而实现喷涂轨迹的变换。

如图2所示，摄像机固定在喷涂对象上方，通过在机器人坐标系中位置已知的摄像机对喷涂对象进行拍摄获取其图像  $Q$ ，同时获取喷涂对象在机器人坐标系中的位置：

$${}^R Q = {}^R T_U {}^U Q。$$

式中： ${}^R Q$ 表示图像在机器人坐标系  $R$  中的描述， ${}^U Q$ 表示图像在图像坐标系  $U$  中的描述， ${}^R T_U$ 表示图像坐标系  $U$  到机器人坐标系  $R$  的变换。由于摄像机在机器人坐标系中的位置已知， ${}^R T_U$ 是已知的。

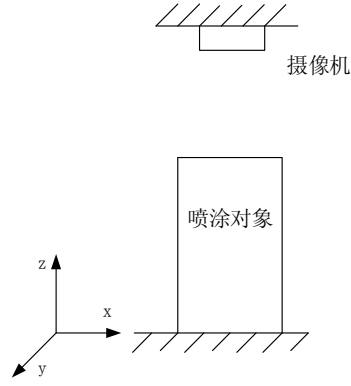


图 2 喷涂对象图像获取示意图

对图像进行处理计算获取闭合图像边缘的几何属性，并把点云模型进行平面投影，获取投影的边缘并计算其边缘的几何属性，将图像边缘和点云边缘一起展开成链码进行匹配，找到最佳的匹配点，得到点云坐标系  $V$  与图像坐标系  $U$  的变换关系：

$${}^U Q = {}^U T_V {}^V P。$$

式中： ${}^V P$  表示点云在点云坐标系  $V$  中的描述， ${}^U T_V$  表示点云坐标系  $V$  到图像坐标系  $U$  的变换。

这样就能够得到点云坐标系和机器人坐标系之间的变换关系：

$${}^R T_V = {}^R T_U {}^U T_V。$$

故基于机器人坐标系的喷涂轨迹  $S_R$  为：

$$S_R = {}^R T_V S_V = {}^R T_U {}^U T_V S_V。$$

### 3 边缘特征获取

由于点云模型是三维的，摄像机拍摄的图像是二维的，三维点云模型不能直接与二维图像进行匹配，故本文将三维点云投影成二维图像，通过提取图像的闭合边缘，计算边缘的曲率并将两个图像的边缘曲率展开为链码来寻找最佳的匹配位置，从而达到点云与图像匹配的目的。

#### 3.1 图像的边缘曲率获取

##### 3.1.1 闭合图像边缘的获取

利用摄像机拍摄得到喷涂对象图像  $Q$ ，对其进行降噪、增强对比等预处理后，通过 Canny 算法<sup>[15]</sup>可以得到单像素的边缘  $Q_1$ 。由于生产制造中许多喷涂对象为表面光滑的金属制品或表面光洁度很高的产品，会对图像的边缘提取产生较大的影响，造成图像边缘信息缺失，这些缺失的信息很难通过底层的提取算法来获取。

由于缺失的边缘往往只占边缘的很小一部分，为了获得一条闭合的图像边缘以便将边缘曲率展开成链码进行匹配，提出一种边缘开口点检测算法（如图 3），通过找到边缘开口点，将开口点进行连接来获取闭合的边缘  $Q_2$ 。

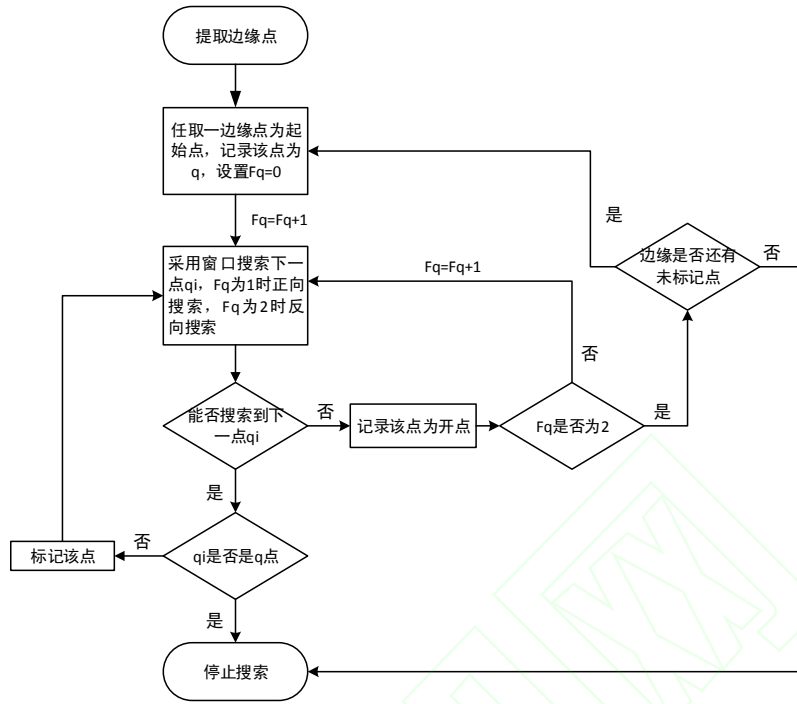


图 3 边缘开口点检测算法流程

该算法的步骤如下：

**步骤 1** 任取一边缘点为起点，记录该点为  $q$ ，采用窗口搜索对边缘点进行正向搜索并标记直至找到开口点。如该点不是起点  $q$ ，则接着从  $q$  点开始进行反向搜索并标记直至找到另一开口点，就得到一段已标记的边缘，然后进入第二步；如该点是起点  $q$ ，说明得到了封闭的边缘，则搜索结束。

**步骤 2** 在边缘未标记的区域任选一点，以该点为起点采用窗口搜索的方式对边缘点进行正向和反向的搜索并标记，直至找到两个开口点。

**步骤 3** 当边缘还有未标记的点时，重复第二步；当边缘没有未标记的点时，搜索结束。

### 3.1.2 图像边缘曲率计算

利用图像边缘几何属性进行图像匹配时，该几何特性必须具有一定的旋转和缩放不变性，因此本文选取边缘曲率作为匹配的特征空间。参考离散曲线曲率估算方法<sup>[16]</sup>，边缘的曲率可通过下述方法近似求得：

$p_i = (x_i, y_i)$  为闭合边缘曲线上的点，以  $p_i$  为起点向两个方向分别生长出的最长离散直线段为  $DDS[p, q]$  和  $DDS[p, s]$ ， $t_f$  和  $t_b$  分别为距离他们中心最近的栅格点，定义矢量  $u = (|p_x - q_x|, |p_y - q_y|)$ ， $v = (|p_x - s_x|, |p_y - s_y|)$ ，那么  $u$ ， $v$  可以近似的看作与  $t_f$  和  $t_b$  的切线重合，故可以计算  $u$ ， $v$  分别于与  $x$  轴的夹角得到切线。

$$\theta_b = \arctan \frac{|p_x - q_x|}{|p_y - q_y|};$$

$$\theta_f = \arctan \frac{|p_x - s_x|}{|p_y - s_y|}。$$

定义切线上的角度均值  $\theta = \frac{1}{2}(\theta_b + \theta_f)$ ，角度差值  $\delta_b = |\theta_b - \theta|$ ， $\delta_f = |\theta_f - \theta|$ 。

因此，点  $p_i = (x_i, y_i)$  的曲率可以通过下面公式近似求得：

$$\kappa(p_i) = \frac{\delta_b}{2d(p, q)} + \frac{\delta_f}{2d(p, s)}。$$

式中  $d(p, q)$  和  $d(p, s)$  分别为  $(p, q)$  和  $(p, s)$  之间的欧式距离。

### 3.2 点云的边缘曲率获取

将点云向点云坐标系  $V$  的  $x-y$  平面进行投影，其投影变换为：

$$T_H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

得到的点云投影：

$${}^V P_H = T_H {}^V P。$$

式中  ${}^V P_H$  为点云在点云坐标系  $V$  的  $x-y$  平面的投影。

投影之后得到在  $x-y$  平面的散点图，对散点图进行栅格划分，若栅格中包含数据点则该栅格数值为 1，反之则为 0，进而将点云投影转化为二值图像，利用上文相同的方法提取得到点云投影图像的边缘  ${}^V P_{H1}$ 。

栅格化具有两个关键因素，一是栅格密度，二是栅格的长宽比。栅格密度应该根据点云密度进行确定，栅格密度过大会使得图像边缘离散程度较大，为图像处理带来困难，栅格密度过小会大大降低位置精度。栅格采用正方形，其长度方向和宽度方向的个数比和投影的最小包围盒长宽比保持一致，以防止栅格化时产生变形。

由于拍摄图像的边缘点个数一般与点云投影图像边缘点个数不相同且拍摄图像的分辨率高于点云投影图像分辨率，因此以拍摄图像为基准对点云投影图像边缘  ${}^V P_{H1}$  进行插值，使得两幅图像的边缘点个数一致。为了保持图像不变形，计算得到拍摄图像边缘和投影图像边缘的像素点个数差为  $n$ ，将  ${}^V P_{H1}$  平均分成  $n$  个区域：

$${}^V P_{H1} = {}^V P_{H1}^1 + {}^V P_{H1}^2 + \dots + {}^V P_{H1}^n。$$

式中  $\{{}^V P_{H1}^1, {}^V P_{H1}^2, \dots, {}^V P_{H1}^n\} \in {}^V P_{H1}$ 。

以  ${}^V P_{H1}^1, {}^V P_{H1}^2, \dots, {}^V P_{H1}^n$  各个区域的中心点作为差值位置，得到与拍摄图像边缘像素点个数一致的



点云投影图像边缘 ${}^V P_{H2}$ ，采用上文的方法计算 ${}^V P_{H2}$ 的曲率特征。

#### 4 图像与点云投影图像匹配

将上文得到的拍摄图像的闭合边缘 $Q_2$ 中任一点为起始点 $q_1$ ，在八邻域内搜索相邻边缘点 $q_2$ ，并将起始点标记，然后以 $q_2$ 点为起始点进行搜索，直到全部边缘点都被标记，得到一条展开的曲率链码 $\kappa_Q$ 。算法流程如图4所示。

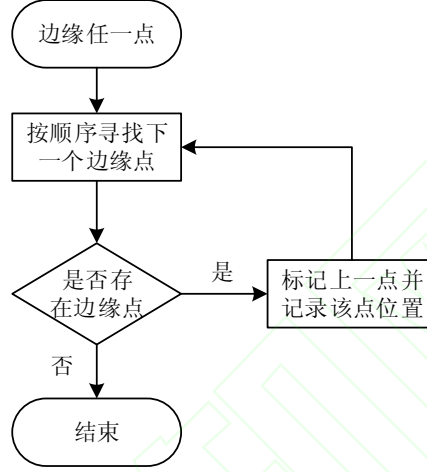


图4 边缘展开流程图

依次选取 ${}^V P_{H2}$ 上的点按上述展开流程将其展开得到一系列的曲率链码：

$$K_p = \{\kappa_{p1}, \kappa_{p2}, \dots, \kappa_{pn}, \dots\}^T。$$

以 $\kappa_Q$ 为参照链码，与 $K_p$ 进行匹配，计算各点曲率的偏差的平方和 $E$ ：

$$E = |K - \kappa_Q|^2 = \left\{ |\kappa_{p1} - \kappa_Q|^2, |\kappa_{p2} - \kappa_Q|^2, \dots, |\kappa_{pn} - \kappa_Q|^2, \dots \right\}^T。$$

以偏差平方和 $|\kappa_{pi} - \kappa_Q|_{\min}^2$ 时为最佳匹配位置，此时在 $Q_2$ 和 ${}^V P_{H2}$ 选取几个曲率较大的匹配点，由

$${}^U Q_2 = {}^U R_{VH} {}^V P_{H2} + {}^U L_{VH}。$$

其中 ${}^U R_{VH}$ 表示点云坐标系 $V$ 与图像坐标系 $U$ 在 $x-y$ 平面的旋转变换， ${}^U L_{VH}$ 表示点云坐标系 $V$ 与图像坐标系 $U$ 在 $x-y$ 平面的平移变换。

因此点云坐标系 $V$ 与图像坐标系 $U$ 的 $x-y$ 平面变换关系为：

$${}^U T_{VH} = \begin{bmatrix} {}^V R_{VH}, & {}^U L_{VH} \end{bmatrix}。$$

由于 $R$ ， $U$ 和 $V$ 的 $x-y$ 平面是互相平行的，可得：

$${}^U T_V = \begin{bmatrix} {}^V R_{VH}, & {}^U L_{VH} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}。$$

即为点云坐标系  $V$  与图像坐标系  $U$  的坐标变换关系, 其中  $Z$  为点云坐标系  $V$  与图像坐标系  $U$  的  $x-y$  平面之间的偏移距离, 固定的系统  $Z$  是已知的。

因此点云坐标系  $V$  与机器人坐标系  $R$  的坐标变换关系为:

$${}^R T_V = {}^R T_U {}^U T_V。$$

故基于机器人坐标系的喷涂轨迹  $S_R$  可以表示为:

$$S_R = {}^R T_U {}^U \left[ {}^V R_{VH}, {}^U L_{VH} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z \\ 0 \end{bmatrix} \right] S_V。$$

式中  $S_V$  表示基于点云坐标系的喷涂轨迹。

## 5 实验验证

为了验证本文方法的有效性, 选用尺寸约为  $500\text{mm} \times 240\text{mm} \times 200\text{mm}$  的油箱作为喷涂对象来进行可行性验证分析。

### 5.1 图像边缘属性提取

图 5 所示为喷涂对象图像获取示意图, 其中, 摄像机、油箱和机器人的坐标系都是相互平行的, 各坐标系之间的变换关系可以通过人工标定得出。

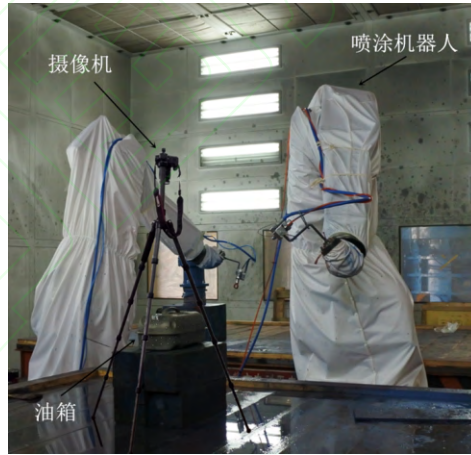


图 5 图像获取

图 5 中的各坐标系通过标定后得到图像坐标系  $U$  与机器人坐标系  $R$  的变换关系为:

$${}^R T_U = \begin{bmatrix} 0.0036 & 0.993 & 0 & 15 \\ 0.999 & -0.003 & 0 & 37 \\ 0.001 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

利用图 5 所示的图像获取模块来获取油箱图像的闭合边缘如图 6 所示, 图 6a 为摄像机拍摄后经过降噪和增强处理后得到的油箱图像, 图 6b 为利用 Canny 算子提取得到的油箱图像边缘, 由图 6b



可以看出，通过 Canny 算子提取的边缘在油箱边缘处出现了一小段间隙，这样就不能通过该边缘得到连续的曲率链码，必须补齐缺口。图 6c 为利用本文提出的开口点检测算法补全后得到的闭合的油箱图像边缘。



图 6

利用本文提出的曲率计算方法计算图 6c 的图像边缘各点的曲率值并展开得到曲率链码  $\kappa_Q$  如图 7 所示，图中得到的是 1078 个离散点的曲率，由图可以看出，四个波峰分别为油箱图像四个圆角处离散点的曲率，且其中两个圆角的曲率比另外两个圆角的曲率大。

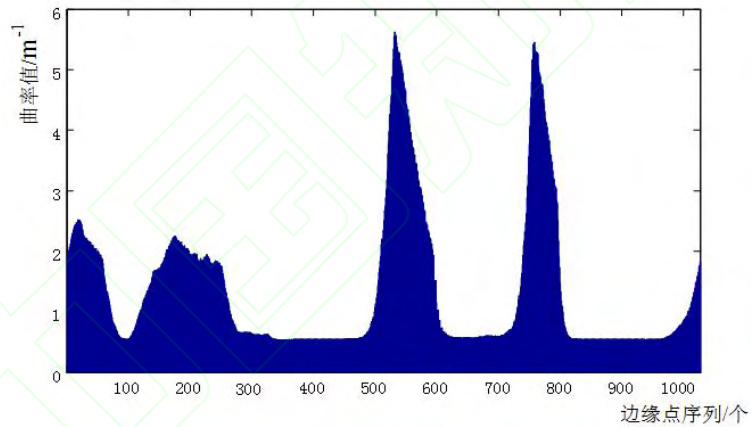


图 7 图像边缘展开曲率链码  $\kappa_Q$

## 5.2 点云的边缘属性提取

利用结构光三维扫描仪，离线获取油箱点云，如图 8a 所示。通过人工标定得到点云坐标系  $V$  与图像坐标系  $U$  在  $x-y$  平面的偏移量为 +403.21 mm。三维扫描仪扫描后经过滤波后得到的箱体点云图像如图 8b 所示，图 8c 为箱体点云图像采用  $400 \times 614$  的分辨率向  $x-y$  平面投影后得到平面二值图像，图 8c 为提取边缘并进行插值处理后得到的点云投影图像边缘  ${}^V P_{H2}$ 。

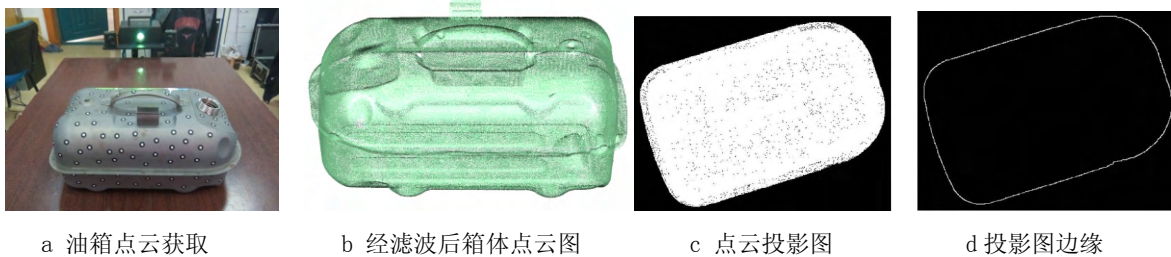


图 8

同样利用本文提出的曲率计算方法计算得到点云投影图像边缘各点的曲率值并展开得到其中的一条曲率链码如图 9 所示，其为  $K_p$  中的一个边缘曲率图。与图像边缘曲率图一样，图中得到的是 1078 个离散点的曲率且四个波峰分别为油箱图像四个圆角处离散点的曲率，其中两个圆角的曲率比另外两个圆角的曲率大。

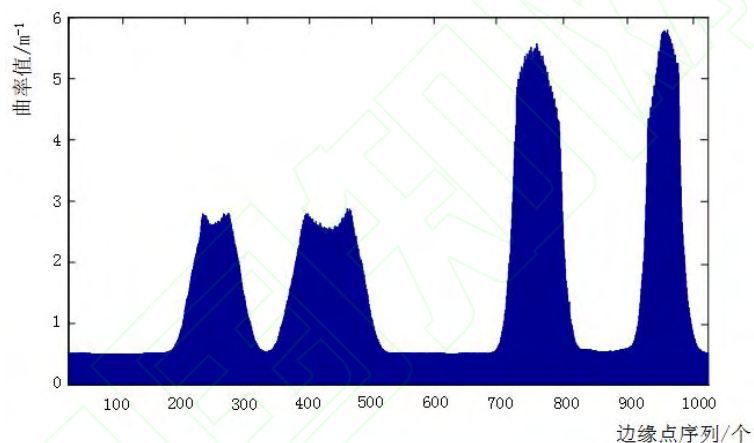


图 9 点云投影图像边缘曲率链码

### 5.3 点云与图像匹配

利用本文提出的匹配方法，将曲率链码进行匹配，得到如图 10 所示的曲率偏差的平方和  $E$  值的图像，由图可知通过  $K_p$  中 1 078 个曲率链码与  $\kappa_Q$  进行  $E$  值计算得到的结果不尽相同，且通过计算可以得到  $E$  值最小的匹配组合，以  $E$  值最小时为最佳匹配位置作为评价标准，由图中也可以看出，以第 843 个点为起点时得到的点云投影图像边缘曲率链码与  $\kappa_Q$  匹配得到的  $E$  值最小，故其为最佳匹配位置。

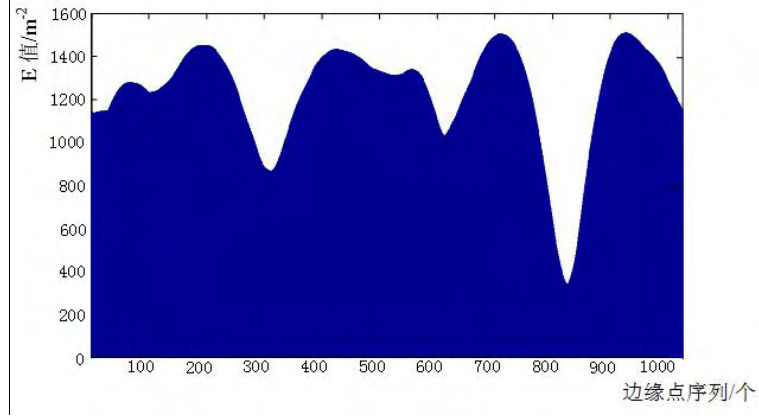


图 10 各点曲率偏差平方和  $E$

计算得到点云坐标系  $V$  与图像坐标系  $U$  在  $x-y$  平面的变化关系  ${}^U T_{VH}$  为:

$${}^U T_{VH} = \begin{bmatrix} 0.025 & -0.913 & 0 & 76 \\ 0.949 & -0.031 & 0 & 85 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\circ}$$

点云坐标系  $V$  与图像坐标系  $U$  的变化关系  ${}^U T_V$  :

$${}^U T_V = \begin{bmatrix} 0.025 & -0.913 & 0 & 76 \\ 0.949 & -0.031 & 0 & 85 \\ 0 & 0 & 1 & 403.21 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\circ}$$

因此, 点云坐标系  $V$  与机器人坐标系  $R$  的坐标变换关系为:

$${}^R T_V = {}^R T_U {}^U T_V = \begin{bmatrix} 0.9424 & -0.0341 & 0 & 99.6786 \\ 0.0221 & -0.9120 & 0 & 112.6690 \\ 0 & -0.0009 & 1 & 403.286 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\circ}$$

## 6 总结

为了满足当前产品个性化定制需求的情况下企业对喷涂生产效率的要求, 提出了一套自动喷涂系统, 重点对系统中坐标变换的模块进行了研究。通过改进 canny 算法, 提出一种图像边缘开口点的检测算法来寻找开口点并进行两两配对相连获得了闭合的图像边缘, 进而能够将图像和点云投影图像的的边缘特征展开成连续的链码进行匹配, 计算各点的曲率偏差平方和得到最佳的匹配位置, 从而得到图像和点云投影图像的匹配关系即能够获得点云坐标系和机器人坐标系的变换关系, 使得点云坐标系中的喷涂轨迹转换为机器人坐标系中的喷涂轨迹, 实现自动化喷涂系统中坐标变换模块的功能。

本文提出的基于点云与图像匹配的自动化喷涂系统坐标变换方法是基于图像整体进行, 计算量

较小，匹配的效率较高，并通过实验验证了本文方法的可行性，因此，该方法能够应用于自动化喷涂系统中。

### 参考文献:

- [1] Zhu Weidong, Qu Weiwei, Cao Lianghong, et al. An off-line programming system for robotic drilling in aerospace manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68:2535-2545.
- [2] Neto P, Mendes N. Direct off-line robot programming via a common CAD package[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(8):896-910.
- [3] Qi Yuhua, Jing Fengshui, Tan Min. Line-feature-based calibration method of structured light plane parameters for robot hand-eye system[J]. Optical Engineering, 2013, 52(3):037202-037214.
- [4] Hu J S, Chang Y J. Calibration of an eye-to-hand system using a laser pointer on hand and planar constraints[C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington, D. C., USA:IEEE, 2011:982-987.
- [5] WANG Jun, ZHU Li. 3D building façade reconstruction based on image matching-point cloud fusing[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(10):2072-2079(in Chinese). [王俊, 朱利. 基于图像匹配-点云融合的建筑立面三维重建[J]. 计算机学报, 2012, 35(10):2072-2079]
- [6] WU Mengqi, LI Zhongwei, ZHONG Kai, et al. Adaptive point cloud registration method based on geometric features and photometric features[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2):0215002-1-0215002-8(in Chinese). [伍梦琦, 李中伟, 钟凯, 等. 基于几何特征和图像特征的点云自适应拼接方法[J]. 光学学报, 2015, 35(2):0215002-1-0215002-8.]
- [7] ZHANG Qishen, ZHOU Ya, HU Xiaoming, et al. Hand vein recognition based on three dimensional point clouds matching[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1):0115005-1-0115005-11(in Chinese). [张祺深, 周雅, 胡晓明, 等. 基于几何特征和图像特征的点云自适应拼接方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1):0115005-1-0115005-11.]
- [8] ADRIAN P, ANAND R. Maximum likelihood wavelet density estimation with applications to image and shape matching[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(4):458-468.
- [9] SETIYONO B, HARIADI M, PURNOMO, M H. Survey of super resolution using phased based image matching[J]. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2012, 43(2):245-253.
- [10] KOICHI I, TAKAFUMI A. Phase-based image matching and its application to biometric recognition[C]//Proceedings of Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference. Washington, D. C., USA:IEEE, 2013:1-7.
- [11] GRAUMAN K, DARRELL T. Efficient image matching with distributions of local invariant features[C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. Washington, D. C., USA:IEEE, 2005, 2:627-634.
- [12] Adamek T, O' Connor N E. A multiscale representation method for nonrigid shapes with a single closed contour[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(5):742-753.
- [13] GAO Jing, WU Yufeng, WU Kun, et al. Image matching method based on corner detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8):1717-1725(in Chinese). [高晶, 吴育峰, 吴昆, 等. 基于角点检测的图像匹配算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8):1717-1725.]
- [14] LIU Jia, FU Weiping, WANG Wen, et al. Image matching based on improved SIFT algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5):1107-1112(in Chinese). [刘佳, 傅卫平, 王雯, 等. 基于改进 SIFT 算法的图像匹配[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5):1107-1112.]

- [15] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligent, 1986, 8(6):679-701.
- [16] TONG Li, PING Xijian, LI Lei. Discrete curvature estimation based on adaptive fuzzy segments[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2007, 19(5):499-594(in Chinese). [童莉, 平西建, 李磊. 一种基于自适应模糊线段的离散曲率估计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(5):499-594.]

#### 作者简介:

唐倩(1969—), 女, 重庆人, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向: 工业机器人及柔性自动化生产线, 智能制造技术与装备等, E-mail: tqcqu@cqu.edu.cn;

黄耀(1992—), 男, 江西丰城人, 硕士研究生, 研究方向: 工业机器人及柔性自动化生产线, E-mail: huangyao1212@qq.com;

范秋垒(1990—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向: 工业机器人及柔性自动化生产线, E-mail: 1261697626@qq.com;

刘飞(1986—), 男, 重庆人, 博士, 硕士生导师, 研究方向: 机器人及自动化、机电一体化系统等, E-mail: liufei5828@163.com;

裴林清(1985—), 男, 江西鄱阳人, 博士, 研究方向: 智能制造技术与装备等, E-mail: lp115@uowmail.edu.au。