

# 基于 FPFH 特征的三维场景重建

艾 达<sup>1</sup>, 王 苗<sup>2</sup>, 倪国斌<sup>2</sup>

(1. 西安邮电大学 公安部电子信息勘查应用技术重点实验室, 西安 710121)

2. 西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710061)

**摘要:** 文章在阐述不同视角下在对一对三维点云数据集两两配准的基础之上, 针对 ICP 精确匹配算法须使初始点云收敛否则无法获取准确匹配结果的问题, 提出了基于 FPFH 特征描述子的特征点云粗匹配; 调整两片点云的初始位置, 为 ICP 算法提供了良好的初始位置进一步提高点云的匹配精度; 并且在此基础上通过大量实验得到点云对应点对之间的最大距离与拟合系数的函数关系, 得到粗匹配最优值, 进而得到最佳配准效果。实验证明通过粗匹配最高能将匹配拟合系数提高 60.3%。

**关键词:** 两两配准; FPFH 特征; 粗匹配

## Research and Realization of 3D Restruction Based on FPFH

Ai Da<sup>1</sup>, Wang Miao<sup>1</sup>, Ni Guobin<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Posts and Telecommunications, Key Laboratory of electronic information application technology of Site-survey of Ministry of public security, Xi'an 710061, China)

2. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** The article describes a different perspective on the basis of three-dimensional point cloud pairwise data registration, for accurate matching algorithms ICP need to make an initial point cloud convergence, otherwise unable to obtain accurate matching results, this article proposes a feature based on FPFH Descriptors coarse matching feature method. Adjust the initial position of two point clouds for ICP algorithm provides a good initial position to further improve the matching precision point cloud. And on this basis to get through a lot of experiments as a function of the largest point distance and the best fitness score between correspondence pairs to obtain the optimal value match, it is proved that coarse matching can make the best fitness score up to 60.3%.

**Keywords:** registration; FPFH descriptors; coarse matching

## 0 引言

三维场景重建 (three-dimensional scene reconstruction) 技术<sup>[1]</sup>在三维视觉领域快速发展并流行的一门新技术, 通过计算机数字化手段, 将客观世界中的三维实体真实再现在计算机中, 是计算机视觉、人工智能、虚拟现实、人机交互等前沿领域的热点和难点, 与传统的通过图片等二维图像, 利用先验知识从物体的二维信息中推断出三维模型的建模技术相比, 其在重建效率、精度和实时性方面都有很大提高。

点云配准作为三维重建技术的关键技术之一, 能将多角度下获取的点云, 变换到同一坐标系下<sup>[2]</sup>。文献 [3] 在基于传统四元数算法的基础上提出迭代最近点 (iterative closest points) ICP 算法。文献 [4] 对文献 [3] 进行改进, 通过特征度量建立迭代优化函数。文献 [5] 提出基于 GPU 的 KinectFusion 重建技术, 文献 [6] 利用测量得到的横向和纵向噪声分布, 应用于 KinectFusion 系统体融合及管道内姿态估计, 得到精细模型重建。文献 [7] 提出运动恢复结构 (structure from motion, SFM) 算法, 在摄像机定位和稀疏表面重建重建效果精确。

这些算法被提出之后, 很快广泛的应用到三维重建的领域中, 取得了一些成果<sup>[8]</sup>, 但是对于透明物体和平面物体的重建效果并不是很好, 因此文章在前人研究的基础上, 介绍了迭代

最近点 (iterative closest points) ICP 算法通过配准和融合将获得的深度图像合并起来<sup>[9]</sup>, 但是 ICP 算法要求待配准的点云具有较好的初始位置, 否则难以获得较好的匹配效果。因此在 ICP 精匹配之前, 应先对点云进行粗配准, 调整两片部分重叠点云的初始位置。在对点云的粗配准的计算过程中, 首先计算两幅图像的关键点, 其次计算其关键点处快速点特征直方图描述子 (FPFH)<sup>[10]</sup>, 然后提取三组随机点对, 计算点对之间的转换关系, 将该对应关系应用于所有点对的转换, 最后设置阈值, 得到最佳的转换关系。

## 1 三维场景重建及其步骤

图 1 是三维重建流程图, 首先利用激光扫描仪<sup>[11]</sup>或三维相机<sup>[12]</sup>等获取三维景深数据。其次进行点云预处理, 消除由于设备精度、环境因素等点云数据中的噪声点, 滤波作为点云处理流程的第一步, 对后续处理管道影响很大。对滤波后的点云进行下采样能在不影响精度的情况下, 简化点云数量, 提高匹配效率。再次, 对得到的点云进行配准<sup>[13]</sup>, 先求取三维数据的法线信息, 然后利用其法线信息提取一对点云的 FPFH 特征, 最后使用采样一致性初始匹配算法 (SAC-IA 算法) 获取点云的初始变换矩阵, 在粗匹配的基础上进行 ICP 精确配准。最后使用贪婪投影三角化算法对点云进行三角化得到重建表面。

## 2 点云匹配算法

在实际的点云获取过程中, 由于点云的获取会出现孔洞、旋转错位、平移错位等, 因此要得到完整重建表面就需要对初始点云进行配准, 以得到被测物体的完整三维模型。点云配

收稿日期: 2016-01-12; 修回日期: 2016-03-07。

基金项目: 公安部重点实验室项目 (2014GABJC02)。

作者简介: 艾 达 (1975-), 男, 博士, 高工, 硕导, 主要从事数字图像处理方向的研究。

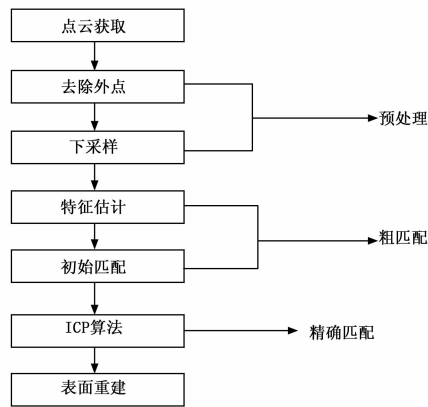


图 1 三维重建流程图

准算法按照实现过程可以分为粗匹配和精确配准，确定一个刚体变换，将从各个视角得到的点集转换到一个统一的坐标系下形成完整的数据点云，最后进行可视化操作。配准的最终目的是求得坐标变换参数  $\mathbf{R}$  (旋转矩阵) 和  $\mathbf{T}$  (平移矩阵)，使得不同视角下获得的三维数据经坐标变换后的距离最小。

2.1 点云粗匹配的步骤

点云粗匹配是指在点云之间初始转换矩阵位置是，通过提取各自点云里的特征点并获取其位置处的特征描述符来唯一性的代表各自点云，继而正确的匹配两点云的特征描述符，求取平移向量和旋转矩阵，经过转换将散乱点云初始位置对齐，提高 ICP 算法精确匹配的匹配精度，图 2 所示为点云粗匹配流程图。

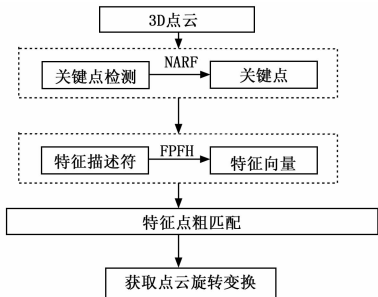


图 2 点云粗匹配流程图

2.2 点特征直方图 (PFH)

点特征直方图 (PFH) 是一种以统计直方图的形式来描述一个样本点周围的局部几何特征信息的点特征表示方法，PFH 统计的是样本点与其  $k$  邻域之间的关系和它们估计的法线之间的关系，即通过估计法线方向之间所有的相互作用，试图得到最好的样本表面变化情况，以描述样本的几何特征。图 3 所示表示的是一个查询点 ( $p_q$ ) 的 PFH 计算的影响区域，半径为  $r$ ，( $p_q$ ) 的所有  $k$  邻元素全部互相连接在一个网络中，最终 PFH 描述子通过计算邻域内所有两点之间关系而得到的直方图。

其具体计算如下：

- 1) 对样本点  $p$  查询其邻  $k$  临域内所有邻近点。
- 2) 对点  $p$  的  $k$  邻域中每对点  $p_s$  和  $p_t$  ( $s! = t$ ) 和它们对应的估计法线  $n_s$  和  $n_t$ ，定义一个  $uvw$  坐标系来计算  $p_s$  和  $p_t$  以及它们对应的估计法线  $n_s$  和  $n_t$  之间的偏差，在其中的一个点上定义一个固定的局部坐标系，如图 4。

$$u = \vec{n_s}, v = u \times \frac{(p_t - p_s)}{(p_t - p_s)}, w = u \times v \quad (1)$$

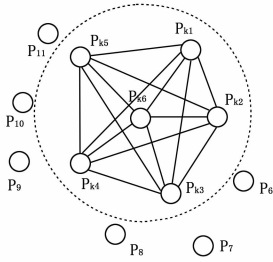


图 3 查询点  $p_q$  的 PFH 计算的影响区域

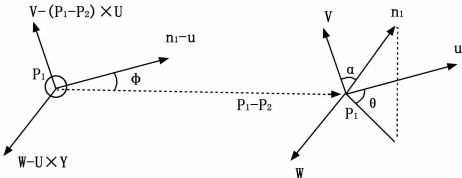


图 4 一个固定的局部坐标系

使用上图的  $uvw$  坐标系，用下面一组角度来表示估计法线  $n_s$  和  $n_t$  之间的偏差：

$$\alpha = v \cdot \vec{n_t} \quad (2)$$

$$\beta = u \cdot \frac{(p_t - p_s)}{(p_t - p_s)} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan(\omega \cdot \vec{n_t}, u \cdot \vec{n_t}) \quad (4)$$

$\|p_t - p_s\|$  表示两点间的欧式距离， $p_q$  的所有  $k$  近邻点中任意两点之间的关系就可以用  $(\alpha, \beta, \theta, d)$  表示。邻域内所有的四组值以统计的方式放进直方图，就得到  $p_q$  点的直方图特征。

2.3 快速点特征直方图 (FPFH)

快速点特征直方图 FPFH (fast point feature histograms)<sup>[10]</sup> 是在 PFH 的基础上通过简化邻域间的互联降低了直方图的特征计算复杂度，使其复杂度由  $O(nk^2)$  降低为  $O(nk)$ ，FPFH 对每一个样本点，首先计算这个点和它的  $k$  邻域内每个点之间  $\alpha, \beta, \theta$  3 个特征值，统计输出成一个简化的点特征直方图 SPFH (simple point feature histograms)，然后重新确定每个点的  $k$  邻域，利用公式 (5)：

$$FPFH(p_q) = SPFH(p_q) + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1}{\omega_k} \cdot SPFH(p_k) \quad (5)$$

结合邻近点  $p_k$  的  $SPFH$  值来计算  $p_q$  最终的直方图  $FPFH$ 。式中，权重  $\omega_k$  定义为查询点  $p_q$  和邻近点  $p_k$  间的距离，表 1 是各个描述子维度对比。

表 1 局部特征描述符比较

| 局部特征  | NARF | SIFT | PFH | FPFH |
|-------|------|------|-----|------|
| 描述子   | 描述子  | 描述子  | 描述子 | 描述子  |
| 特征量维度 | 36   | 128  | 125 | 33   |

从表 1 中可以看出相比于其它 3 个描述符，FPFH 的维度最小，大大降低了其时间复杂度，提高了运算速度。

3 ICP 点云精确匹配算法

ICP 算法的核心思想是：对不同坐标系下的两个点云，找到其对应点迭代的缩小匹配点间的距离，直到距离小于设定的阈值，最终得到点云集间的最优刚体变换，实现点云的配准，计算过程如下所示：

1) 基于投影映射法的匹配点对获取, 由于摄像机一直处于运动状态, 所以必须将摄像机不同位置下获得的点云数据由摄像机坐标转换为全局坐标, 进行融合。ICP 算法利用基于投影映射法获取匹配点对, 首先计算每帧摄像机坐标  $O_k$  到全局坐标  $O_g$  的刚体变换矩阵, 用  $\mathbf{T}_{k,g} = [\mathbf{R}_{k,g}/\mathbf{t}_{k,g}]$  表示变换矩阵,  $\mathbf{R}_{k,g}$  表示旋转矩阵,  $\mathbf{t}_{k,g}$  表示平移向量。对于点云空间集  $V_k$  中任意一点  $S$ , 坐标向量为  $\mathbf{V}_k(u, v)$ , 按照 (5) 式将摄像机坐标系下的任意定点坐标向量  $\mathbf{V}_{k,g}(u, v)$  及法向量  $\mathbf{N}_{k,g}(u, v)$ , 转换到全局坐标系  $O_g$  下, 利用 (6) 式前一帧变换逆矩阵, 将  $O_g$  下任意点向量  $\mathbf{V}_{k,g}(u, v)$  映射到  $O_{k-1}$  坐标系下, 然后通过摄像机反透视投影获得对应点坐标  $(u', v')$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{k,g}(u, v) = \mathbf{R}_{k,g}^{-1} \mathbf{V}_k(u, v) + \mathbf{t}_{k,g}^{-1} \\ \mathbf{N}_{k,g}(u, v) = \mathbf{R}_{k,g}^{-1} \mathbf{N}_k(u, v) \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{V}_{c,p}(u', v') = \mathbf{R}_{k-1,g}^{-1} [\mathbf{V}_{k,g}(u, v) - \mathbf{t}_{k-1,g}] \quad (6)$$

2) 点到切平面距离误差函数估计配准参数, 距离误差函数的优化, 本文采用文献 [14] 提出的方法, 将当前帧点云中的点到其在前一帧点云中的对应点所在切平面的距离作为误差函数, 误差函数如 (7) 式:

$$E(T_{g,k}) = \sum_{\Omega(u) \neq \emptyset} \| (T_{g,k} \hat{\mathbf{V}}_{k-1}(u) - \hat{\mathbf{V}}_{k-1}^g(\hat{u}))^T \hat{\mathbf{N}}_{k-1}^g(u) \|_2 \quad (7)$$

其中,  $\Omega(u) \neq \emptyset$  表示当前点云中的一个点  $u$  存在对应点,  $\hat{\mathbf{V}}_k(u)$  为当前帧中  $u$  点的顶点坐标,  $\hat{\mathbf{V}}_{k-1}^g(\hat{u})$ 、 $\hat{\mathbf{N}}_{k-1}^g(\hat{u})$  分别代表  $u$  点在预测帧中对应点的顶点坐标和法向量。通过优化 (7) 式得到摄像机的最佳的转换矩阵  $\mathbf{T}_{g,k}$ 。按照文献 [9] 最小化目标函数的方法, 假设存在更新矩阵  $\mathbf{T}_{inc}^z$  满足  $\mathbf{T}_{k,g}^z = \mathbf{T}_{inc}^z \cdot \mathbf{T}_{k,g}^{-1}$ ,  $\mathbf{T}_{inc}^z$  定义如下:

$$\mathbf{T}_{inc}^z = [\mathbf{R}_{inc}^z/\mathbf{t}_{inc}^z] = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & -r & t_x \\ -\alpha & 1 & \beta & t_g \\ r & -\beta & 1 & t_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

3) 更新源集: 更新矩阵  $\mathbf{T}_{inc}^z$  可用向量  $\beta, r, \alpha, t_x, t_g, t_z$  表示。采用线性化的方法, 将优化问题转化为最小二乘。最终找到满足 (9) 式的  $x$ , 误差函数最小。

$$\sum (\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \mathbf{x} = \sum \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (9)$$

其中,

$$\mathbf{b} = \mathbf{N}_{k-1,g}(u', v')^T [\mathbf{V}_{k-1}(u', v') - \mathbf{V}_{k,g}(u', v')]$$

4) 重复迭代: 当两次迭代更新矩阵满足一定的阈值, 则停止迭代, 转换矩阵等于最后一次迭代矩阵。

## 4 仿真结果及分析

仿真实验在 Visual Studio2010 环境下 Inter (R) —core (TM) i3-4050 3.5 GHz, 4 GB 内存的 PC 机上结合 PCL 点云开源库<sup>[15]</sup>运行, 为了验证本文方法的有效性, 实验数据采用待配准的两只斯坦福兔子点云分别作为源点云和目标点云。

### 4.1 特征点估计

表面法线是几何体表面的重要属性, 由于我们获取的点云数据集在真实物体的表面表现为一组顶点样本, 因此我们直接从点与数据集中近似推断表面法线。图 5 按每 10 个点显示法线方向, 由图中可以看出点云表面法线方向一致。

### 4.2 点特征直方图

表面法线和曲率估计是某个点几何特征的基本表示法, 虽然计算快速容易, 但获取的信息有限, 通过有限的参数值来近似表示一个点的 K 邻域的几何特征。然而大部分场景中包含许多特征点, 这些特征点有非常相近的特征值, 因此采用点特

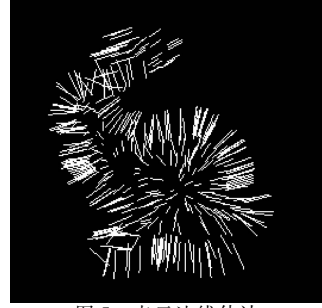


图 5 点云法线估计

征直方图, 减少全局的特征信息。下图分别是 bun0 和 bun4 两个三维点云及其对应点的 FPFH 点特征直方图, 通过点特征直方图获得特征描述子, 获得匹配点对。

图 6 (a) (b) 分别表示每幅图对应的关键点处的 FPFH 点特征直方图, 可以看出使用局部特征的直方图形式表示后, 特征之间的差异量化的更加明显。

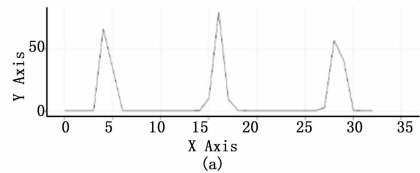
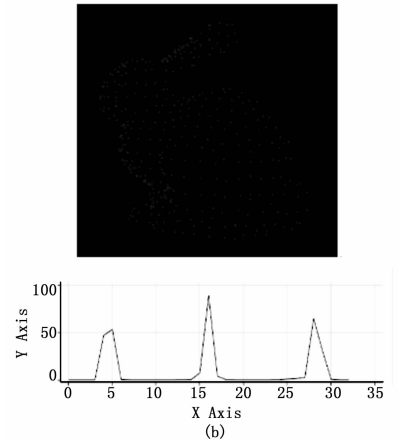


图 6 两幅点云各自关键点处的 FPFH

### 4.3 对应点估计

通过两侧扫描的点云数据获得的两组特征向量, 在此基础上, 找到相似特征获得数据的特征点对, 在此基础上对点云进行配准, 如图 7 所示。

图 8~图 10 分别展示了点云未配准之前, 直接使用 ICP 算法和使用改进型算法所得效果。可以看出, 未配准之前, 点云散乱的堆积在一起; 直接使用 ICP 配准, 虽有一定效果, 但误

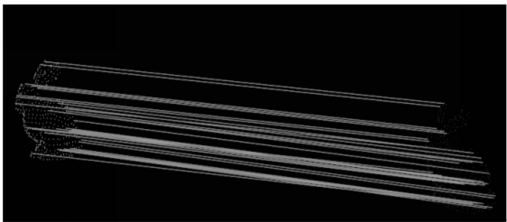


图 7 对应点估计

差非常大; 而使用改进型算法配准后的点云完美的结合到一起。



图 8 点云未配准前



图 9 直接使用 ICP 算法进行精确配准

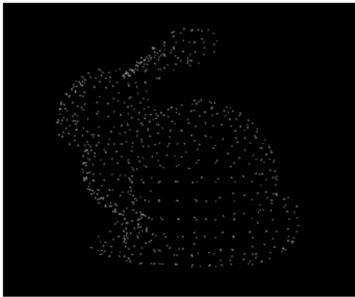


图 10 本文方法

本文采用基于 FPFH 特征点对的点云粗匹配, 采用 SAC-IA 算法执行配准计算, 在该算法中有一个最关键的参数, 即 Maxcorrespondencedistance, 为两个点云中对应对点之间的最大距离, 图 11 是对应点最大距离与拟合系数的对应关系图: 从图中可以发现, 随着对应点距离的增大, 对应的拟合系数也在逐渐增大, 当增加到一定程度, 趋于一个定值。但是对应点对最大距离的减小又会直接增加时间复杂度, 当拟合系数为 0.000 02 时就可达到良好的匹配效果, 因此综合计算复杂度与匹配精度, 与之对应的该参数值为 0.01, 得到粗匹配结果, 然后对其结果进行 ICP 精确匹配, 最终匹配精度为 0.000 025, 与未进行点云粗匹配的匹配精度 0.000 063 相比, 提高了百分之 60.3%, 此时的转移矩阵和平移向量分别为:

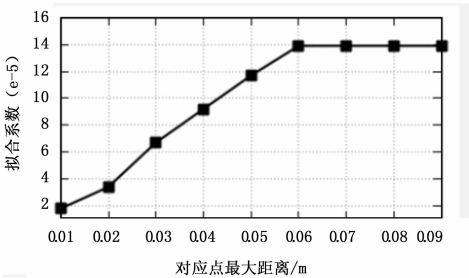
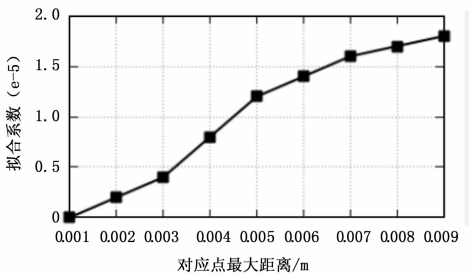


图 11 对应点对与拟合系数函数关系

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.827 & -0.084 & -0.555 \\ 0.067 & 0.996 & -0.051 \\ 0.558 & 0.005 & 0.830 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{t} = [0.046, 0.0020, 0.040]$$

为了进一步验证本文算法的有效性, 对 ICP 算法和本文改进的算法精度进行比较, 如表 2 所示, 相比于经典 ICP 算法, 本文克服了其初始点云不收敛而引起较大匹配误差的缺点, 大大提高了匹配精度。与现有的其它两种匹配算法相比本文算法得到的匹配误差最小。

表 2 同类方法配准精度比较

| 算法       | 关键点  | 特征描述子 | 迭代次数 | 匹配精度(e-5 m) |
|----------|------|-------|------|-------------|
| ICP      | —    | —     | 30   | 0.63        |
| 3DNT[16] | —    | —     | 30   | 1.53        |
| NARF-ICP | NARF | —     | 30   | 0.45        |
| 本文算法     | NARF | FPFH  | 30   | 0.25        |
| 特征量维度    | 36   | 128   | 125  | 33          |

综上实验结果, 在大量的实验基础上, 利用 FPFH 特征描述符对原始散乱点云进行粗匹配的基础上, 再进行 ICP 精确匹配, 图像匹配精度提高, 很好的实现了点云配准。

最后对配准后的点云进行三角化得到最终的重建模型, 如图 12 所示。



图 12 三维模型

5 小结

针对点云处理流程中, 因 ICP 算法需要收敛的初始位置,

文中使用基于FPFH描述子的点云粗匹配,提高匹配精度,取得了良好的拼接效果,从而实现了三维重建。实验结果证明本文的方法可以有效地实现三维重建,具有一定的实际应用价值。

#### 参考文献:

- [1] Arafa Majdi, Mohamed Chafik Bakkay and Ezzeddine Zagrouba. 3D Modeling of Indoor Environments Using kinect sensor [A]. 2013 IEEE Second International Conference on Image Information Processing (ICIIP) [C]. Shimla, IEEE, 2013, 67-72.
- [2] 艾达, 乔明明. 三维激光扫描技术在犯罪现场重建中的应用 [D]. 西安: 西安邮电大学学报, 2013.
- [3] Besl PJ, McKay H D. A Method for Registration of 3D Shape [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14 (2): 239-256.
- [4] 王君. 基于kinect的三维场景重建研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [5] Richard A Newcombe, Shahram Izadi, Otmar Hilliges, David Molyneaux, David Kim. KinectFusion: Real-Time Dense Surface Mapping and Tracking [A]. 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) [C]. Basel, 2011, 127-136.
- [6] Nguyen C V, Izadi S, Lovell D. Modeling Kinect sensor noise for Improved 3D Reconstruction and Tracking [A]. Proceedings of the 2012 Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission, 2012 [C]. IEEE Computer Society.
- [7] Wan Y, Wang J, Hu J W. A Study in 3D-Reconstruction Using

- Kinect Sensor 3D-Reconstruction [A]. 2012 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM) [C]. Shanghai, China, 2012, 1-7.
- [8] 叶日藏. 基于Kinect深度传感器的三维重建技术应用研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2013.
- [9] 何文峰. 大型场景三维重建中的深度图像配准 [D]. 北京: 北京大学, 2004.
- [10] Radu Bogdan Rusu, Nico Blodow, Michael Beetz. Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D Registration [A]. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Japan, 2009, 3212-3217.
- [11] 高珊珊. 基于三维激光扫描仪的点云配准 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [12] 张旭东, 吴国松等. 基于TOF三维相机相邻散乱点云配准技术研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (12): 8-22.
- [13] 陈聪梅. 基于Kinect的三维点云数据处理 [D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [14] Szymon Rusinkiewicz Marc Levoy. Efficient Variants of the ICP Algorithm [A]. Proceedings. Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling [C]. 2001: 145-152.
- [15] Radu Bogdan Rusu and Steve Cousins Willow Garage. 3D is here: Point Cloud Library (PCL) [A]. International Conference on Robotics and Automation (ICRA) [C]. 2011 IEEE. Shanghai: 2011, 1-4.
- [16] 胡修祥, 张良. 结合NARF特征的改进型3D-NDT多 viewpoints 云配准 [J]. 信号处理, 2015, 31 (12): 1674-1679.

(上接第231页)

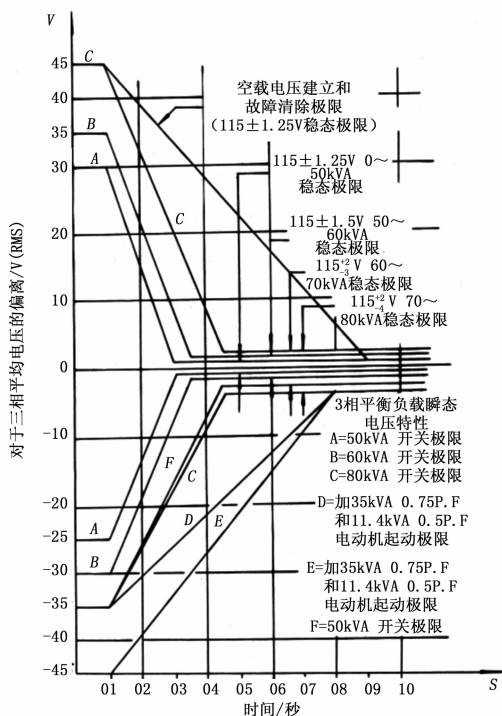


图5 电压瞬态极限特性

时,硬件过流保护功能启动,实现快速切断发电机励磁电路,满足设计要求。

#### 2.4 数字保护接口和禁止调压功能验证

在机载传动装置的启动过程中,需要禁止发电机的调压功

能,进而减轻传动装置启动过程中的负担,该功能在系统联试中得到验证。

目前该多功能调压器已经应用到多个机载交流发电机上,在系统联试和机载环境中都能满足电源系统的需求。

### 3 结论

在现代航空电源系统中,发电机负载缺相和负载短路等故障会给电源系统带来很大的危害,因此快速、准确地进行故障定位和隔离保护就变得尤为重要。本文中提出的机载多功能调压器集成了快速调压、高相限制、过流保护等功能为一体的产品,并预留数字保护接口和禁止调压接口。这样不仅能很好的实现保护功能,而且很容易进一步扩展更多的数字保护;还能在启动及停车时实现禁止调压,减轻发动机的启动负载和缩短发动机的启动时间,使整个电源系统在启动和停车的过程中更加平稳、安全。

#### 参考文献:

- [1] 杨善水, 张卓然, 杨春源, 等. 基于多环调压控制的混合励磁航空变频交流发电系统 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (3): 176-180.
- [2] 王莉, 曹小庆, 张卓然, 等. 电励磁双凸极无刷直流发电机非线性PI调压技术的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (5): 153-158.
- [3] Olaiya M, Buchan N. High power variable frequency generator for large civil aircraft [A]. IEE Colloquium (Digest) [C]. 1999: 13-16.
- [4] Liu C, Zhou B, Yan Y G. Implementation and study of a novel doubly salient structure starter/generator system [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2002, 15 (3): 151-155.
- [5] 陈志辉, 严仰光, 陈鸿茂. 双凸极发电机电压调节的DSP控制实现 [J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32 (3): 251-255.