

利用角度签名进行3维表面配准

王子璇

(复旦大学通信科学与工程系, 上海 200433)

摘要 3维表面的配准在3维物体重建、场景检测和物体识别过程中起着重要的作用。为此提出了一种新的3维表面表示方法——角度签名(angle signature),并将其用于3维表面配准。该表示方法将表面的局部几何信息表示成为1维的向量,具有对刚体变换的不变性。由于其简洁的表示方式,可以实现表面的快速配准。此外,该方法较其他3维表面的表示方法具有更强的鲁棒性。在实际应用中,为了提高表面配准的速度,首先筛选出特征点,然后利用特征点寻找表面之间的对应关系,从而将刚体变换的参数求出,实现表面的配准。实验结果表明,采用角度签名实现物体表面配准具有较快的速度和较高的精度。

关键词 角度签名 表面配准 对应点 物体检测

中图法分类号:TP391.4 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)08-1538-06

3D Surface Registration Based on Angle Signature

WANG Zi-xuan

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract 3D surface registration is a challenging problem and it has many applications ranging from 3D reconstruction to object detection and recognition. This paper introduces a new 3D surface presentation approach for the 3D surface registration termed angle signature (AS). The proposed method captures the local geometry information of the given point and encodes it into a vector, so it is invariant to rigid transformation. Therefore, it is possible to implement fast registration owing to this simple representation. This method performs robustly against error of estimated normal caused by noise compared with other surface representations. In order to enhance the speed of the algorithm, this approach selects a small set of featured points and calculates their signatures. Registration is based on finding at least three points correspondence between two surfaces and the transformation parameters can be calculated. The results of the experiments show surface registration using angle signature has desirable speed and accuracy.

Keywords angle signature, surface registration, point correspondence, object detection

1 引言

3维表面的配准在3维物体重建、场景检测和物体识别过程中起着重要的作用。采用激光扫描设备或者通过两个摄像机获得的物体一个表面的深度信息,称之为2.5维数据。利用若干个相互有重合部分的2.5维数据,通过表面的配准算法,最终可以得到完整的3维表面。在场景检测和物体识别的应

用中,将已知模型对齐到复杂场景中,从而可以实现对特定物体的检测和识别。迭代最近点算法^[5]是用来实现表面配准的经典算法,但是该算法当两个表面的初始位置相差较大时,很容易陷入局部最小解,而导致配准失败。近几年,很多研究人员提出了不同的3维表面表示方法用于表面的配准^[7],其中包括 Splash 表示方法^[1], Point Signature^[2], Spin Image^[3]和 Surface Signature^[4]。这些表示方法对于刚体变换具有不变性。其中,Spin Image 对表面上

收稿日期:2006-11-13; 改回日期:2007-03-12

第一作者简介:王子璇(1986~),男。复旦大学通信科学与工程系硕士研究生。主要研究方向为计算机视觉、图像处理、传感器网络。

E-mail: zixuanwang@gmail.com

的每一点建立一个局部的坐标系,之后将该点附近的几何信息转换为 2 维的自旋图像, Spin Image 可以处理具有遮挡和部分缺失的场景,但是它对于用于建立局部坐标系的法向量的方向较为敏感,而且其计算的复杂度较高。Point Signature 将表面上每一点的局部信息转换为 1 维的向量,由于其简洁的表达形式,其配准速度比采用 Spin Image 快,但是这种表示方式仍然对法向量的方向敏感。为此提出了一种新的 3 维表面表示方法——角度签名 (angle signature),并将其用于 3 维表面配准。

2 角度签名的表面表示方法

2.1 角度签名的定义

3 维表面的表示方法通常分为全局的表示方式和基于物体的表示方式两种。基于物体的表示方式在物体表面建立局部坐标系,因此对于刚体变换具有不变性。但是,这类表示方式要求法向量具有很高的精度,而从带有噪声的点云数据中得到的法向量往往会有误差。因此,需要寻找一种简洁而且稳定的表面表示方式用来实现 3 维表面的配准。

对于物体表面上的一点 p ,以 p 为球心,做一个半径为 r 的球面,球面会与物体表面相交。设 o 为 p 的 N 个邻近点的重心, M 为邻近点的协方差矩阵:

$$M = \sum_{i=1}^N ((p_i - o)^T \cdot (p_i - o))$$

$\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3$ 代表 M 的特征值,所对应的特征向量分别为 v_1, v_2, v_3 。指定一个门限值 ε 。如果 $\lambda_1 < \varepsilon$,则最小特征值所对应的特征向量 v_1 即为 p 点的法向量 n 。然后初始 p 点的切向量 t 为垂直于 n 的任意方向。

至此, p 附近的点可以用半径 r ,极角 φ ($0 \leq \varphi \leq \pi$) 和方位角 θ ($0 \leq \theta < 2\pi$) 进行描述,当半径 r 确定时, p 点的局部几何信息可以表示成为极角 φ 和方位角 θ 的函数。

$$\varphi_k = f(\theta_k) \quad k=0,1,2,\dots$$

为了方便匹配,选择极角最大的方向作为切向量 t 的方向,由于法向量方向上的误差会造成 t 的方向发生变化,该问题可以在后面角度签名的匹配过程中得到解决。在实际的计算过程中得到的法向量通常会带有误差^[8],图 1 显示了在

2 维情况下两种主要的误差来源。图 1(a) 中计算得到的法向量方向受到选取临近点范围的影响;图 1(b) 中由于采集的点云数据带有噪声,导致计算得到的法向量偏离正确值。然而利用上面的函数来描述表面的局部特征对于法向量方向上的误差十分敏感。假设表面上一点的真实法向量为 n ,由于噪声等因素的影响,计算得到的法向量为 n' ,两者之间的角度,即误差为 $\Delta\varphi$,为了计算方便,假设切向量 t 与 t' 重合,如图 2(a) 所示,很容易计算出由于法向量的误差 $\Delta\varphi$,造成极角 φ 的误差。

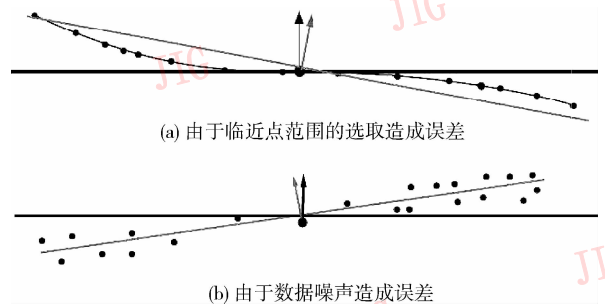


图 1 2 维情况下的法向量误差

Fig.1 Error of normal vector in 2D cases

φ' 表示有误差情况下的极角,有

$$\cos\varphi' = -\sin\varphi\sin\theta\sin\Delta\varphi + \cos\varphi\cos\Delta\varphi$$

如果固定方位角 θ , $\sin\theta$ 可以看作成一个常数。下面用 k ($-1 \leq k \leq 1$) 来代替 $\sin\theta$

$$\cos\varphi' = \cos\varphi\cos\Delta\varphi - k\sin\varphi\sin\Delta\varphi$$

由于噪声造成的法向量误差不会很大,通常不超过 5° ,可以将方程写成如下的形式:

$$\cos\varphi' = \cos\varphi\cos\Delta\varphi - \sin\varphi\sin k\Delta\varphi$$

$$\approx \cos(\varphi + k\Delta\varphi)$$

$$\varphi'_1 = \varphi_1 + k\Delta\varphi$$

采用另外一个半径为 R 的球面与表面相交,然后用上述的方法得到 $\varphi'_2 = \varphi_2 + k\Delta\varphi$,将两者相减,将差作为角度签名, $\varphi'_2 - \varphi'_1 = \varphi_2 - \varphi_1$,其不受法向量误差的影响。图 2 显示了法向量误差为 2° 时,只采用极角 φ 和方位角 θ 的函数进行描述和采用差值进行描述的差别,结果分别如图 2(b) 和图 2(c) 所示。可以看到采用差值的描述方式较原有的方式更具有对噪声的稳定性。

计算点 p 的角度签名过程如下:

(1) 首先计算点 p 的法向量,该法向量 n 可能存在误差。

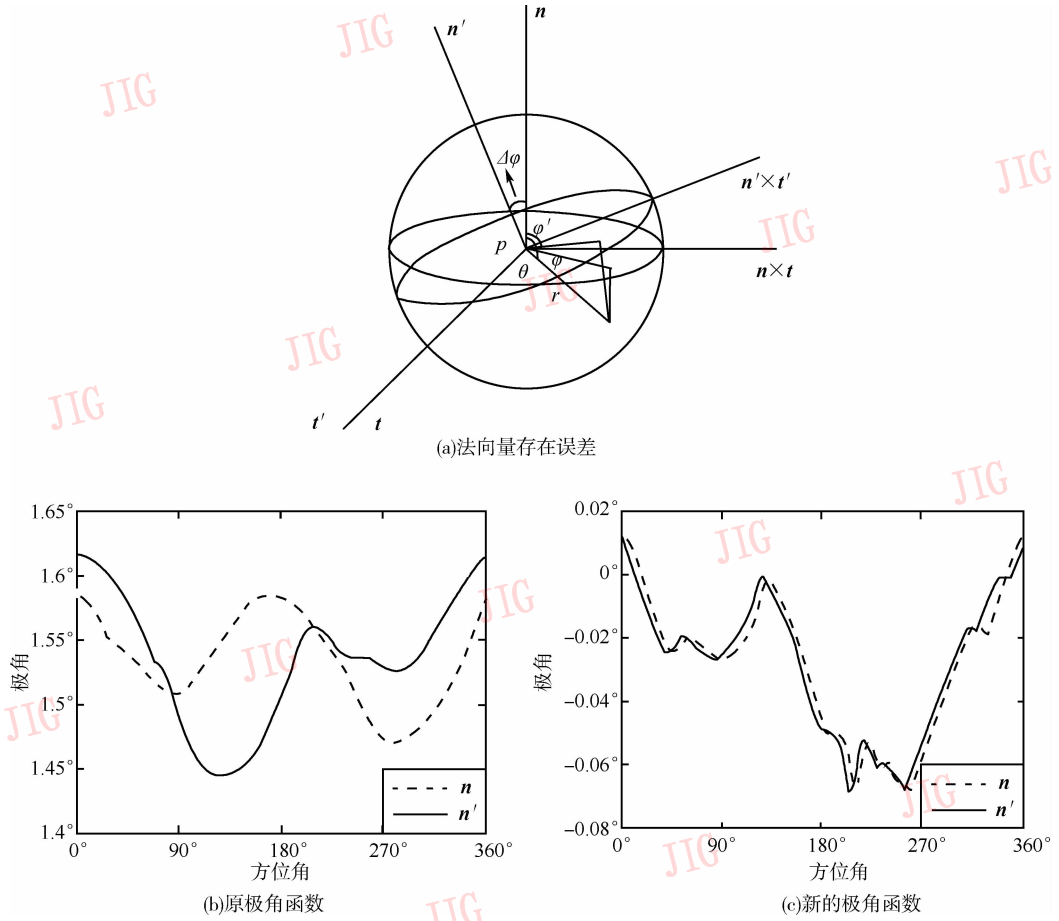


图 2 角度签名的定义

Fig. 2 Definition of angle signature

(2) 在点 p 的临近点中选择极角最大的点, 并将其与点 p 的连线在 p 点切平面上的投影作为切向量 t 。利用 n 和 t , 在点 p 建立局部球坐标系。

(3) 以点 p 为中心, 以 r 为半径, 做球面与表面相交为一系列点, 将这些点在 p 的球坐标系下表示极角 φ 为方位角 θ 的函数, 由于方位角 θ 为一些非等间隔的离散值, 采用样条函数插值, 并取等间隔的值作为自变量的取值。

(4) 以 R 为半径, 采用与步骤 3 相同的方法, 表示极角 φ 为方位角 θ 的函数。

(5) 将步骤 3 与步骤 4 得到的结果相减, 得到最终的角度签名。

由于角度签名反映了物体表面局部的几何特征, 当物体的某个表面变化不是很剧烈时, 某一点的角度签名会与其附近点的角度签名相似, 由此产生的误差可以在配准的步骤中得以最小化, 因此角度签名可以适用于采集的点云数据具有不同精度的场合。

2.2 特征点的选取

随着 3 维数据获取设备精度的提高, 3 维输入数据量通常会很大, 因此不可能对表面上所有的点计算角度签名。采用一种新的方法用于估计表面的曲率, 并选取一些曲率较高的点作为特征点, 然后利用这些特征点计算角度签名和进行表面配准。

取表面上一点 p , 在空间中寻找距 p 最近的 3 个点, 分别为 p_1, p_2 和 p_3 , 如图 3 所示。

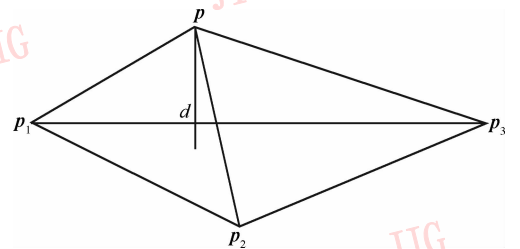


图 3 p 点的 3 个最邻近点

Fig. 3 3 nearest neighbors of p

利用 k 维树,在 N 个点的表面上进行这样的搜索,算法的时间复杂度为 $O(\log N)$ 。寻找到的 3 个最邻近点构成一个平面 P ,令 d 为点 p 到平面 P 的距离,这样可以用参数 λ 描述 p 点的局部几何特征。

$$\lambda = \frac{d}{(pp_1 + pp_2 + pp_3)/3}$$

其中,

$$-1 \leq \lambda \leq 1$$

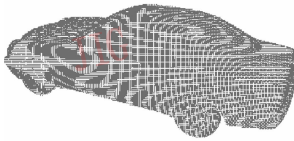
λ 的值反映了 p 点附近的几何信息。由于 λ 只与 p 和 p 的邻近点的相对位置有关, λ 在刚体变换下保持不变。如果 p 点附近的几何形状为凸时, $\lambda > 0$,当 p 点附近的几何形状为凹时, $\lambda < 0$,当 p 点附近为平面时, $|\lambda| \rightarrow 0$,当 p 点远离附近点时,

$|\lambda| \rightarrow 1$,这表明 p 点远离其他点。在实验中,选取 λ 绝对值较大的特征点计算角度签名,并且避免取 $|\lambda| \rightarrow 1$ 的点,因为这些点多数为噪声点。表 1 为选取特征点所消耗的时间,图 4 为选择特征点的结果。

表 1 选择特征点

Tab. 1 Selection of featured points

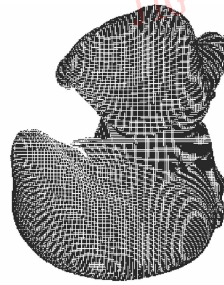
	汽车	鸭子	汽车	鸭子
原始点数	38 162	58 968	38 162	58 968
选取特征点数	3 816	5 897	1 908	2 948
比率(%)	10	10	5	5
时间(s)	59.8	96.2	60.1	95.9



(a) 原始的点云数据



(b) 选择后的特征点 (10%)



(c) 原始的点云数据



(d) 选择后的特征点 (5%)

图 4 选择特征点

Fig. 4 Selection of featured points

3 角度签名的匹配

由于角度签名简洁的形式,匹配两个点的角度签名速度很快。用参数 r 描述两个签名的相似程度。

设有如下两个角度签名:

$$\varphi_{1k} = f_1(\theta_{1k}) \quad k=0, 1, 2, \dots, M-1$$

$$\varphi_{2k} = f_2(\theta_{2k}) \quad k=0, 1, 2, \dots, M-1$$

r 定义为

$$r(\theta_j) = \frac{2}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{|f_1(\theta_{1k} - \theta_j) - f_2(\theta_{2k})|}{|f_1(\theta_{1k} - \theta_j)| + |f_2(\theta_{2k})|}$$

由于定义角度签名时,切向量 t 的方向由邻近点中具有最大极角的点所决定。当法向量具有误差时,会导致切向量的方向发生变化。所以匹配角度签名时应该考虑到这种情况,这里设定一个门限 ε ,如果 $\min(r) < \varepsilon$,则认为两个角度签名所对应的两个点为对应点。

当找到若干对对应点后,需要根据这些对应点

计算出相应的刚体变换参数。为解决这个问题,将刚体变换分解为旋转变换和平移变换,分别对应为旋转矩阵 R 和平移向量 T 。首先,假设两个表面的重心已经对齐, p'_i 和 p_i 代表一对对应点,在理想情况下

$$p'_i - R \cdot p_i = 0$$

但是在实际情况下,考虑到噪声的影响,只能通过最小化下式来求出旋转矩阵 R 。

$$E = \sum_{i=1}^N \omega_i \|p'_i - R \cdot p_i\|^2$$

式中, ω_i 为权重,这里令 $\omega_i = 1$ 。可以利用四元数解决这个非线性优化问题^[6],旋转矩阵 R 可以表示为

$$R \cdot p = q \wedge p \wedge q^*$$

式中, q 为单位四元数, q^* 为 q 的共轭,符号“ \wedge ”表示四元数的乘积。 E 可以写为

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=1}^N \omega_i \|p'_i - R \cdot p_i\|^2 \\ &= \sum_{i=1}^N \omega_i \|p'_i - q \wedge p_i \wedge q^*\|^2 \end{aligned}$$

$$= \sum_{i=1}^N \omega_i \mathbf{q}^T \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i \mathbf{q}$$

式中,

$$\mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} 0 & (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}'_i)^T \\ -(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}'_i) & [\mathbf{p}_i - \mathbf{p}'_i]_{\times} \end{pmatrix}$$

对于一个 3 维向量 $\mathbf{v} = (x, y, z)^T$,

$$[\mathbf{v}]_{\times} = \begin{pmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{pmatrix}$$

令

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^k \omega_i \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i$$

\mathbf{A} 为对称矩阵,且 E 可以表示为

$$E = \mathbf{q}^T \mathbf{A} \mathbf{q}$$

由于 \mathbf{q} 为单位四元数, $\mathbf{q}^T \cdot \mathbf{q} = 1$, E 为矩阵 \mathbf{A} 的瑞利商,当 \mathbf{q} 取 \mathbf{A} 的最小特征值所对应的特征向量

时, E 取得最小值。通过 \mathbf{q} 可以得到旋转矩阵 \mathbf{R} , 设 \mathbf{q} 为 (a, b, c, d) , 则

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} a^2 + b^2 - c^2 - d^2 & 2(bc - ad) & 2(bd + ac) \\ 2(bc + ad) & a^2 - b^2 + c^2 - d^2 & 2(cd - ab) \\ 2(bd - ac) & 2(cd + ab) & a^2 - b^2 - c^2 + d^2 \end{pmatrix}$$

求出 \mathbf{R} 后,很容易得到平移向量 \mathbf{T} , \mathbf{T} 可以通过下面的方程解出,其中, \mathbf{p}'_m 和 \mathbf{p}_m 分别是两个待配准表面的重心。

$$\mathbf{p}'_m - (\mathbf{R} \cdot \mathbf{p}_m + \mathbf{T}) = 0$$

4 实验结果

将角度签名用于两个实验,实验 1 中利用角度签名配准不同位置的两个初始位置不同的表面,如图 5 所示。

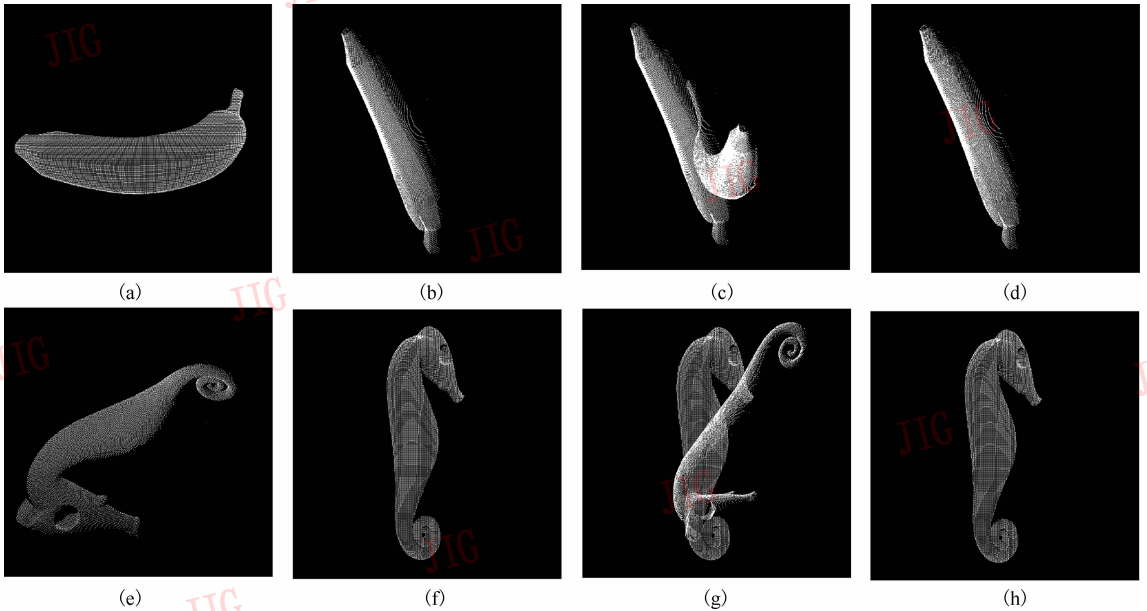


图 5 配准初始位置差别较大的相同表面

Fig. 5 Registration of same surfaces with different gestures

两组实验中图 5(a)、(b)和图 5(e)、(f)为初始位置相差较大的两个相同的表面,迭代最近点方法在这种情况下通常会陷入到局部最小解,如图 5(c)、(g),从而导致表面配准失败。如图 5(d)、(h),分别显示了利用迭代最近点方法配准的结果。角度签名由于采用基于物体的坐标系,对于刚体变换具有不变性,克服了迭代最近点方法的缺点。

在实验 2 中,配准两个具有重叠部分的不同 2.5 维表面。表 2 显示了配准所用的时间,图 6 显

示了配准的结果,实验中所采用的深度数据来自 Stuttgart 深度图像数据库。

表 2 配准所需时间

Tab. 2 Time used for registration

	平均点数	计算角度签名时间	匹配签名时间	总计
青蛙	6.3×10^4	188	170	358
兔子	4.1×10^4	78	175	253
塑像	2.2×10^4	95	202	297

单位:s

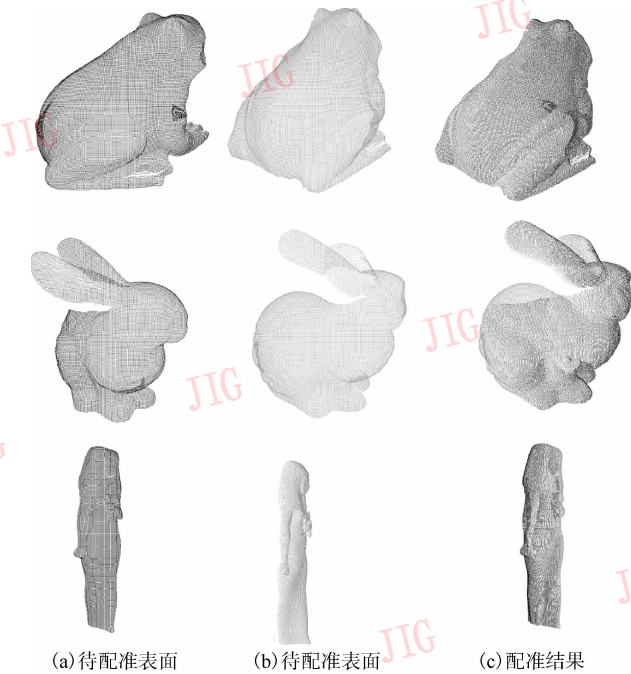


图 6 配准部分重叠的 2.5 维表面

Fig. 6 Registration of overlapping 2.5D surfaces

5 结 论

提出了一种用于 3 维表面配准的新方法。其简洁的表示方式以及对于噪声的稳定性使其适合用在快速精确的配准应用中。这种配准方法可以应用在

真实 3 维物体重建中,将采集到的 2.5 维深度数据配准,形成完整的 3 维深度图像。进一步的工作包括如何提高算法的速度以及如何处理两个重叠比率较低的两幅深度图像。

参考文献 (References)

- 1 Besl P, Kay N D. A method for registration of 3D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, **14**(2): 239.
- 2 Richard J Campbell, Patrick J Flynn. A survey of free-form object representation and recognition techniques[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2001, **81**(2): 166 ~ 210.
- 3 Stein F, Medioni G. Structural indexing: efficient 3-D object recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, **14**(2): 125 ~ 145.
- 4 Chua C S, Jarvis R. Point signatures: A new representation for 3D object recognition [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, **25**(1): 63 ~ 85.
- 5 Johnson A, Hebert M. Surface matching for object recognition in complex three-dimensional scenes[J]. Image and Vision Computing, 1998, **16**(9): 635 ~ 651.
- 6 Yamany, S M, Farag A A, Free-Form Surface Registration Using Surface Signatures [A]. In: Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision[C], Kerkyra, Greece, 1999, **2**: 1098 ~ 1104.
- 7 Niloy J Mitra. An Nguyen estimating surface normals in noisy point cloud data [A]. In: Proceedings of Annual Symposium on Computational Geometry 2003 [C], San Diego, California, USA, 2003: 322 ~ 328.