

文章编号 1004-924X(2013)01-0174-07

# 基于分层块状全局搜索的三维点云自动配准

孙军华\*, 谢 萍, 刘 震, 张广军

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要:**提出了一种分层块状全局搜索到临近点局部搜索的改进迭代最近点(ICP)算法,用于进一步提高 ICP 算法的配准速度并消除点云缺失对点云配准的影响。该配准方法在粗略配准之后,以点云块为分层单元对模型点集进行选取,并对选取的少量模型点进行全局搜索获取其对应最近点;然后,以这些模型点对应的最近点作为搜索中心,在场景点集中进行局部搜索,获取这些模型点的大量临近点的对应最近点;最后,剔除错误对应最近点对,并求取坐标变换。与基于 KD-Tree 的 ICP 算法和基于 LS+HS(Logarithmic Search Combined with Hierarchical Model Point Selection)的 ICP 算法相比,该配准算法对 Happy bunny 扫描数据的配准速度分别提高了 78%和 24%;对 Dragon 扫描数据的配准速度分别提高了 73%和 30%。这些结果表明该算法可以快速、精确地实现三维点云间的配准。

**关键词:**三维点云;点云配准;分层搜索;迭代最近点算法;对应最近点

**中图分类号:**TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132101.0174

## Automatic 3D point cloud registration based on hierarchical block global search

SUN Jun-hua\*, XIE Ping, LIU Zhen, ZHANG Guang-jun

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Integration Technology of the Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

\* Corresponding author, E-mail: sjh@buaa.edu.cn

**Abstract:** A improved Iterative Closest Point(ICP) algorithm based on hierarchical block global search to neighbor local search method is presented to get up the registration speed of the ICP algorithm and remove the effect of defective point clouds on the point cloud registration. The method aims at finding the corresponding closest points for ICP algorithm and resulting in the automatic registration of 3D point clouds. After the initial registration, merely a few model points are selected hierarchically while the point cloud blocks are served as the selection units. Then, the corresponding closest points of those model points are searched globally. After a large number of neighboring points of a few model points are selected, the corresponding closest points of the vast number of the model points are searched in local areas by considering the closest points of the few model points as the searching centers. Finally, the correspondence outliers are removed, and the fine alignment transformation is obtained. As compared to both the traditional ICP algorithms based on KD-Tree and LS+HS(Logarithmic

收稿日期:2012-10-12;修订日期:2012-11-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61275162)

mic Search Combined with Hierarchical Model Point Selection), the proposed algorithm has improved its registration speeds by 78% and by 24% for the Happy bunny scanning data as well by 73% and by 30% for Dragon scanning data. It concludes that the proposed algorithm can quickly and precisely achieve the registration of 3D point clouds.

**Key words:** three dimensional point cloud; point cloud registration; hierarchical search; Iterative Closest Point(ICP) algorithm; corresponding closest point

## 1 引言

随着商品化高精度三维扫描仪的出现和普及,三维扫描点云配准技术已被广泛应用于许多领域,如:反向工程、工业检测、虚拟仿真、文化遗产保护和医疗等领域<sup>[1]</sup>。由于每次测量得到的三维点云往往只覆盖物体部分表面,为了得到物体完整表面的三维点云,需要对这些三维点云进行配准。点云配准就是将不同角度、不同位置扫描得到的不同坐标系下的三维点云转换到一个统一的坐标系下<sup>[2-3]</sup>。

目前常用的点云自动配准技术一般分两步:粗略配准和精确配准。粗略配准是将不同坐标系下点云大致对准到同一坐标系,一般很难满足精度要求,需在粗略配准的基础上使用迭代算法进行精确配准,使点云之间的配准误差达到最小<sup>[4]</sup>。目前,迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)算法<sup>[5]</sup>及其各种改进算法<sup>[6]</sup>已成为精确配准领域的主流算法,并不断有新的改进算法<sup>[7-8]</sup>出现以适用不同场合的要求。Rusinkiewicz 等人<sup>[9]</sup>将 ICP 算法分为 6 个阶段:(1)对原始点云进行采样;(2)确定初始对应最近点集;(3)计算对应最近点对的权值;(4)去除错误对应最近点对;(5)根据距离方程建立目标函数;(6)求解坐标变换。其中,ICP 算法大部分时间消耗在寻找对应最近点集上,因此,减少对应最近点集的搜索时间就能提高 ICP 算法的配准速度。Besl 等人<sup>[5]</sup>采用基于 KD-tree 最近点搜索方法来提高对应最近点的搜索速度。Greenspan 等<sup>[10]</sup>提出 AKD-tree(Approximate KD-tree)最近点搜索方法,该方法通过省去回溯查询来节省搜索时间,但是却需要花费额外的时间去构建 KD 树结构。为了进一步地提高搜索速度,Kim 等<sup>[11]</sup>提出了基于 LS+HS

(Logarithmic Search Combined with Hierarchical Model Point Selection)搜索方法的改进 ICP 算法,并将其有效地应用于三维人体运动跟踪。但是该算法是建立在三维扫描点云是连续的前提下,因此存在对点云缺失敏感的问题。

为了更进一步地提高 ICP 算法的配准速度,并消除点云缺失对点云配准的影响,本文提出了一种基于分层块状全局搜索到临近点局部搜索的改进 ICP 算法。首先,对模型点集进行分层选取,以点云块作为分层单元来消除点云缺失对配准的影响。然后,在获取少量模型点的对应最近点后,针对这些模型点的大量临近点,在场景点集中以这些模型点的对应最近点为搜索中心建立较小的搜索窗口进行局部搜索来获取其对应最近点,从而减小搜索范围,提高搜索速度。最后,在 ICP 迭代求解过程中,以前一次迭代的对应最近点作为当前迭代对应最近点的搜索中心,作小窗口范围内的搜索,进一步地减小搜索范围,提高点云配准的速度。实验结果验证了算法的可行性和高效性。

## 2 分层块状全局搜索

### 2.1 模型点集的分层块状选取

对于模型点集:

$$P = \{(x(i), y(j))\},$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, 2^{(N-1)} + 1, j = 1, 2, 3, \dots, 2^{(N-1)} + 1)$$
(1)

定义点 $(x(i), y(j))$ 为模型点集分层选取的单元,即点 $(x(i), y(j))$ 为第 $i \times j$ 个分层单元上的点。其中: $x(i)$ 和 $y(j)$ 分别是该点在点集中所处的行位置和列位置, $N$ 为分层层次的大小。

对模型点集 $P$ 进行 $N$ 层的分层选取,定义 $P$ 的第 $n$ 层 $P_n$ (其中: $n=2, 3, 4, \dots, N$ )为:

$$P_n = \{(x(i), y(j))\} - \bigcup_{m=1}^{n-1} P_m,$$

$$(i = 1, 2^{(N-n)} + 1, 2 \times 2^{(N-n)} + 1, \dots, 2^{(N-1)} + 1,$$

$$j = 1, 2^{(N-n)} + 1, 2 \times 2^{N-n} + 1, \dots, 2^{N-1} + 1)$$

(2)

其中： $\bigcup_{m=1}^{n-1} P_m$  是点集  $P$  的前  $n-1$  层。图 1 所示为模型点集  $P$  被分为 3 层时的分层选取示意图。

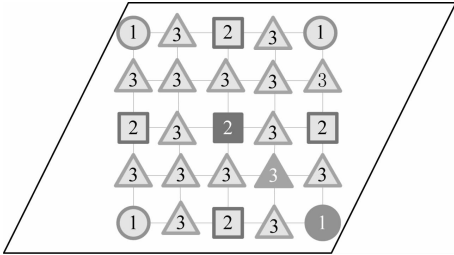


图 1 模型点集的分层选取

Fig.1 Hierarchical selection of model points

由三维扫描仪扫描得到的三维点云并不是在每一个扫描网格上都存在点,会存在点云缺失的问题,如图 2 所示,有黑点的网格表示在该扫描网格上存在点,没有黑点的网格表示在该扫描网格上不存在点。

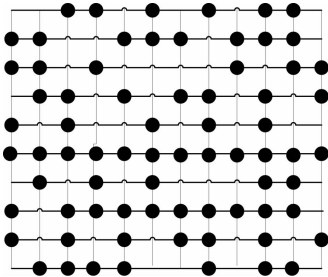


图 2 扫描网格点云示意图

Fig.2 Points in scanning grids

如果以图 2 中单个扫描网格上的点为单元进行模型点集的分层选取,那么由于点云缺失,会导致搜索到错误的对应最近点,或者是搜索不到对应最近点。因此,本文对模型点集进行块状选取,如图 3 所示,以一个大小为  $R \times R$  的扫描网格上的点云块来作为模型点集分层选取单元,以确保各分层单元在点云块中能存在至少一个点,从而消除点云缺失对搜索对应最近点的影响。图 4 为以  $5 \times 5$  的扫描网格上的点云块作为模型点集分层选取单元来进行分层选取的示意图,其中每个分层单元内都至少存在一个点。

### 2.2 分层块状全局搜索方法

在模型点集中互为临近点的 2 个点在场景点

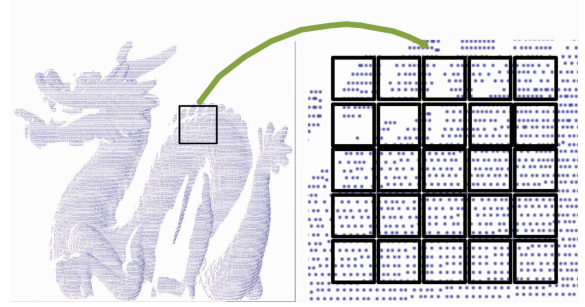


图 3 模型点集的块状选取

Fig.3 Block selection of model points

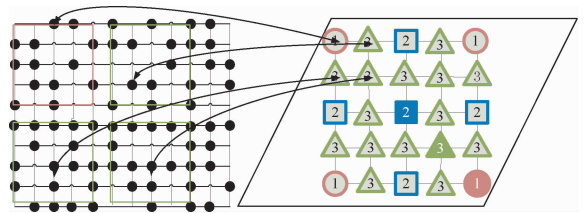


图 4 模型点集的分层块状选取

Fig.4 Hierarchical block selection of model points

集中的对应最近点也为临近点,因此,已知模型点集中一点  $P_0$  的 4 个不同的临近点在场景点集中的对应最近点,那么以该 4 个点的对应最近点为搜索窗口就能搜索到  $P_0$ 。点在场景点集中的对应最近点,而无需在场景点集的全局范围内进行搜索。

对于应用分层块状选取方法获取的模型点集  $P = \{(x(i), y(j))\}$ ,其中:点  $(x(i), y(j))$  为第  $i \times j$  个分层单元即点云块上的某一个点。定义  $P$  的第一层为:

$$P = \{(x(i), y(j))\}. \tag{3}$$

$$(i = 1, 2^{N-1} + 1, j = 1, 2^{N-1} + 1)$$

以场景点集  $Q$  上所有点为搜索对象建立搜索窗口,通过二维对数搜索方法获得第一层上 4 个点的对应最近点  $C(P_1, Q)$ 。

定义点集  $P$  的第  $n$  层  $P_n$  (其中:  $n = 2, 3, 4, \dots, N$ ) 如公式(2)所示,则对第  $n$  层上的每一个点  $p \in P_n$ ,在点集  $P$  的前  $n-1$  层  $\bigcup_{m=1}^{n-1} P_m$  中找到所求模型点  $p$  的 4 个临近点  $N_4(p)$ 。假设  $N_4(p)$  在场景点集  $Q$  上的对应最近点为  $C(N_4(p), Q)$ ,则以  $C(N_4(p), Q)$  为搜索范围建立搜索窗口,在场景点集  $Q$  上进行模型点  $p$  的对应最近点的搜

索。如图 5 所示,模型点集  $P$  被分为 3 层( $N=3$ ),第二和第三层的模型点在场景点集中对应最近点的搜索区域不是场景点集的全局范围,其搜索范围减小了。

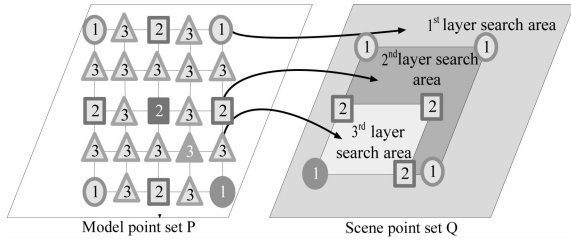


图 5 分层块状全局搜索

Fig. 5 Hierarchical block global search

### 3 对应最近点的搜索

#### 3.1 临近点局部搜索

两个模型点集上的点为临近点,则这两点在场景点集中所对应的最近点也是临近点<sup>[12]</sup>。因此,如图 6 所示,若已知模型点集上  $P_i$  点在场景点集中对应的最近点为  $Q_i$ ,则要求  $P_j$  点的临近点  $P_j$  的对应最近点  $Q_j$ ,只需在  $Q_i$  的临近区域  $V(Q_i)$  进行局部范围内的搜索即可。这在很大程度上缩小了对应最近点的搜索范围。

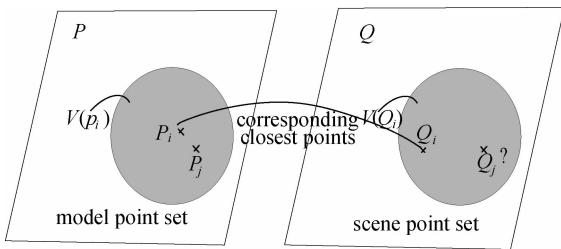


图 6 临近点的对应关系

Fig. 6 Corresponding relationship of neighboring points

#### 3.2 对应最近点的搜索方法

本文提出分层块状全局搜索到临近点局部搜索方法以实现 ICP 算法中对应最近点的搜索。首先对模型点集进行分层块状选取,得到少量模型点,并在场景点集全局范围内进行搜索获取其对应最近点,然后以这些模型点为中心建立临近区域,如图 6 所示,则这些模型点的临近区域内所

有点的对应最近点都可以通过在这些模型点的对应最近点临近区域内进行局部搜索得到,这在很大程度上减小了搜索范围。

## 4 三维点云自动配准

### 4.1 一一对应最近点原则

经过分层块状全局搜索到临近点局部搜索方法所得到的对应最近点,如图 7 所示,会有多个模型点的最近点对应同一个场景点。但是,场景点集中的任意点在模型点集中应该最多只存在一个对应最近点,也就是说,在这多个模型点中最多只有一个是该场景点的对应最近点。因此,本文采用最近距离法筛选出与该场景点距离最近的模型点作为最佳对应最近点,同时剔除错误对应最近点来提高算法的配准精度。图 8 所示为经过一一对应最近点原则筛选之后的对应最近点对。

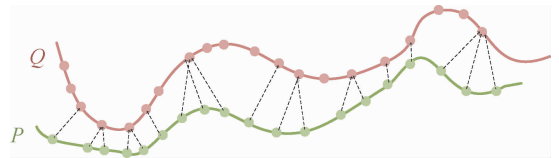


图 7 筛选之前的对应最近点对

Fig. 7 Corresponding closest point pairs before filtering

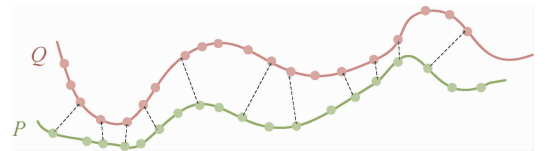


图 8 筛选之后的对应最近点对

Fig. 8 Corresponding closest point pairs after filtering

### 4.2 基于分层块状全局搜索的三维点云自动配准

在获得两点云的初始配准位置之后,应用基于分层块状全局搜索的 ICP 算法对两三维点云进行精确配准。首先对原始模型点集进行采样,然后对采样得到的点采用分层块状全局搜索到临近点局部搜索的方法搜索其对应最近点,并应用一一对应最近点原则和匹配误差约束<sup>[13]</sup>剔除错误对应最近点对,最后应用筛选出的最近点对求解精确的坐标变换,实现两点云的自动配准。

在 ICP 迭代求解过程中,采用前一次迭代的对应最近点作为当前迭代对应最近点的初始估计,即在求当前迭代中某一点的对应最近点时,以该点在前一次迭代中的对应最近点为当前迭代的搜索中心,并减小搜索窗口,这就降低了对应最近点的搜索量。

## 5 实验及结果

采用斯坦福大学计算机系图形研究组使用 Cyberware 3030MS 激光相机获取的 Happy bunny 和 Dragon 三维扫描数据来比较本文提出的基于分层块状全局搜索的改进 ICP 算法和基于 KD-Tree 的 ICP 算法及基于 LS+HS 的 ICP 算法。如图 9 和图 10 所示,这两组数据分别由 10 幅和 15 幅扫描数据组成,每幅数据约有 40 000 个点。取其中 20 对重叠扫描数据进行配准,并保证重叠部分面积大于单个表面积的 50%。

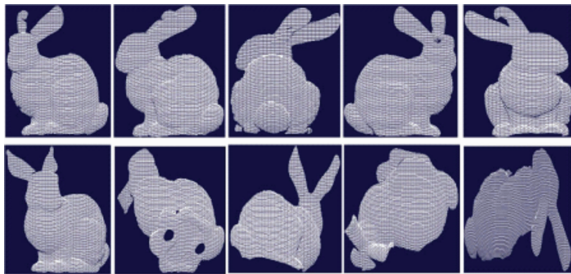


图 9 Happy bunny 三维扫描数据

Fig. 9 Happy bunny 3D scanning data

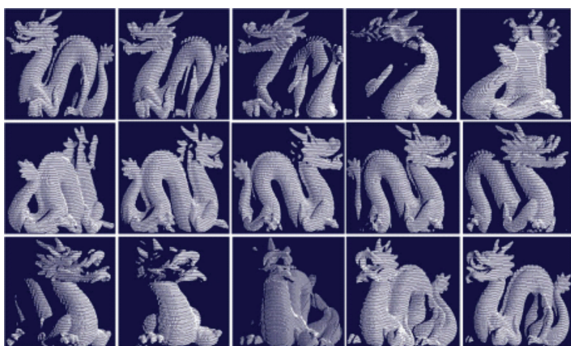


图 10 Dragon 三维扫描数据

Fig. 10 Dragon 3D scanning data

实验中,选取分层层次大小为  $N=3$ ,点云块大小  $R \times R=20 \times 20$ 。三种配准算法均在 MATLAB 中实现,计算机 CPU 2.6 GHz,内存为 2 G。

均采用基于局部曲率分布图的粗略配准方法<sup>[14]</sup>获取扫描点云的初始配准位置。部分扫描图像配准结果如图 11 和 12 所示,从左到右依次为从两个不同视角获取的两幅扫描图像和采用本文算法进行精确配准后的图像。

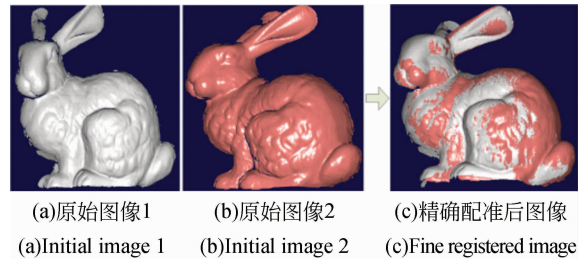


图 11 Happy bunny 三维扫描数据配准结果示意图

Fig. 11 Registering result of Happy bunny 3D scanning data

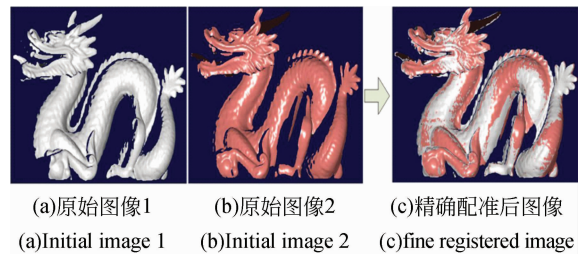


图 12 Dragon 三维扫描数据配准结果示意图

Fig. 12 Registering result of Dragon 3D scanning data

采用本文算法、基于 KD-Tree 的 ICP 算法和基于 LS+HS 的 ICP 算法进行三维扫描点云自动配准,比较三种算法的配准速度和配准精度,分别以精确配准时间  $t$  和距离均方误差 mse 来度量算法的配准速度和配准精度。其精确配准时间  $t$  和距离均方误差 mse 分别如表 1 和表 2 所示。由表 1 和表 2 可知:对于 Happy bunny 扫描数据,本文算法精确配准时间分别比 KD-Tree 方法和 LS+HS 方法减少了 78% 和 24%,距离均方误差分别减少了 0.58% 和 6.02%;对于 Dragon 扫描数据,本文算法精确配准时间分别比 KD-Tree 方法和 LS+HS 方法减少了 73% 和 30%,距离均方误差比 KD-Tree 方法增加了 8.07%,比 LS+HS 方法减少了 8.26%。分析可知,相比于 KD-Tree 方法,本文算法在配准精度基本不受影响的情况下提高了配准速度;相比于 LS+HS 方法,本文算法在提高配准速度的同时提高了配准精度。

表1 精确配准时间的对比

Tab.1 Comparison of the fine registration time

精确配准时间 /ms	Happy bunny	Dragon
	扫描数据	扫描数据
KD-Tree 方法	278	281
LS+HS 方法	194	204
本文方法	156	162

表2 距离均方误差的对比

Tab.2 Comparison of the distance mean squared error

距离均方误差 /mm	Happy bunny	Dragon
	扫描数据	扫描数据
KD-Tree 方法	0.518	0.490
LS+HS 方法	0.546	0.577
本文方法	0.515	0.533

## 5 结 论

针对 ICP 算法中对应最近点的搜索,本文提

出了分层块状全局搜索到临近点局部搜索的搜索方法。该方法以点云块作为分层单元来消除点云缺失对点云配准的影响,通过缩小大量点云对应最近点的搜索范围来提高搜索速度,从而提高点云配准的效率。最后,采用斯坦福大学计算机系图形研究组的三维扫描数据比较了本文算法和基于 KD-Tree 的 ICP 算法及基于 LS+HS 的 ICP 算法。对 Happy bunny 三维扫描数据的配准实验结果表明,本文算法的配准速度分别比 KD-Tree 方法和 LS+HS 方法提高了 78% 和 24%;其配准精度分别比 KD-Tree 方法和 LS+HS 方法提高了 0.58% 和 6.02%。对 Dragon 三维扫描数据的配准实验结果表明,本文算法的配准速度分别比 KD-Tree 方法和 LS+HS 方法提高了 73% 和 30%;其配准精度比 KD-Tree 方法降低了 8.07%,比 LS+HS 方法提高了 8.26%。本文算法在速度方面表现出了更优的性能。

## 参考文献:

- [1] 龚卫国,张旋,李正浩. 基于改进局部敏感散列算法的图像配准[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1375-1383.  
GONG W G, ZHANG X, LI Z H. Image registration based on extended LSH [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1375-1383. (in Chinese)
- [2] 郝志成,朱明. 基于多约束准则匹配算法的序列图像配准[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 702-707.  
HAO Z C, ZHU M. Serial image registration based on multiple registration matching algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 702-707. (in Chinese)
- [3] 刘向增,田铮,史振广,等. 基于 FKICA-SIFT 特征的合成孔径图像多尺度配准[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2186-2195.  
LIU X Z, TIAN Z, SHI Z G. SAR image multi-scale registration based on FKICA-SIFT features [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2186-2195. (in Chinese)
- [4] SALVI J, MATABOSCH C, FOFI D, et al.. A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation [J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 25(5): 578-596.

- [5] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [6] CHEN Y, MEDIONI G. Object modeling by registration of multiple range images [J]. *Image and Vision Computing*, 1992, 10(3): 145-155.
- [7] PARK S Y, SUBBARAO M. An accurate and fast point-to-plane registration technique [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(16): 2967-2976.
- [8] PHILLIPS J M, LIU R, TOMASI C. Outlier robust ICP for minimizing fractional RMSD [C]. *Proceedings of the sixth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2007:427-434.
- [9] RUSINKIEWICZ S, LEVOY M. Efficient variants of the ICP algorithm [C]. *Proceedings of the third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2001:145-152.
- [10] GREENSPAN M, YURICK M. Approximate k-d tree search for efficient ICP [C]. *Proceedings of the fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2003: 442-448.
- [11] KIM D. A fast ICP algorithm for 3-D human body motion tracking [J]. *IEEE Signal Processing Let-*

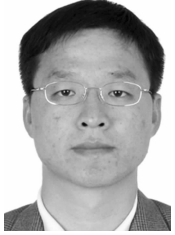
ters, 2010, 17(4): 402-405.

- [12] JOST T, HUGLI H. A multi-resolution ICP with heuristic closest point search for fast and robust 3D registration of range images [C]. *Proceedings of the fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2003: 427-433.
- [13] LIU Y H. Constraints for closest point finding [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29 (7) : 841-

851.

- [14] 杨珍, 孙军华, 张广军. 基于局部曲率分布图的曲面自动配准[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(2): 245-248.
- YANG Z, SUN J H, ZHANG G J. Automatic surface registration based on regional curvature map [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(2): 245-248. (in Chinese)

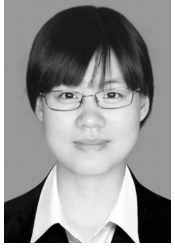
#### 作者简介:



孙军华(1975—),男,湖北荆门人,博士,副教授,2006年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事计算机视觉,图像处理和光电检测方面的研究。E-mail: sjh@buaa.edu.cn



刘震(1975—),男,辽宁沈阳人,博士,讲师,2010年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事光电精密测量、机器视觉和图像理解方面的研究。E-mail: liuzhen008@buaa.edu.cn



谢萍(1989—),女,湖南衡阳人,硕士研究生,2010年于湘潭大学获得学士学位,主要从事图像配准算法方面的研究。E-mail: qingfengping2@126.com



张广军(1965—),男,天津人,教授,博士生导师,1991年于天津大学获得博士学位,主要从事光电精密测量、机器视觉和图像理解方面的研究。E-mail: gjzhang@buaa.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)