

文章编号 1004-924X(2011)06-1430-06

基于坐标轴投影勘察的深度图像树型分割

赵翠莲*, 施晓磊, 荣 坚, 范志坚

(上海大学 上海市机械自动化及机器人重点实验室, 上海 200072)

摘要:针对具有空间连通域特征的深度图像,提出了一种基于坐标轴投影勘察的树型分割方法。通过投影勘察实现沿最优投影方向的坐标轴投影,把对深度图像的空间连通域分割转化为对投影在坐标轴上的一维点数据的区间连通域分割,最终利用树型结构实现分割。将该方法应用于实际深度图像的分割,并分别对理想和极端两种情况下的分割结果进行了讨论。结果表明,算法对具有空间连通域特征的深度图像的分割行之有效,并且在相同的硬件平台上对不同深度图像具有基本恒定的分割速度。对于分别包含 19 792、35 186、79 618 个点的深度图像,理想和极端情况下的平均分割速度分别为每万点 0.168 s 和 0.494 s,具有较高的分割效率。

关键词:深度图像;空间连通域;树型分割;坐标轴;投影勘察

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111906.1430

Tree-type segmentation of range images by exploration of coordinate-axis projection

ZHAO Cui-lian*, SHI Xiao-lei, RONG Jian, FAN Zhi-jian

(Shanghai Key Laboratory of Mechanical Automation and Robot,
Shanghai University, Shanghai 200072, China)

* Corresponding author, E-mail: clzhao@mail.shu.edu.cn

Abstract: A tree-type segmentation method based on the exploration of projection onto coordinate axes was proposed for range images with a feature of spatial connective region. By implementing the projections onto coordinate axes at the optimum angle by the exploration of projection, the segmentation of range images was transformed into the segmentation of 1D point data projected onto coordinate axes. Finally, a tree-type structure was employed to carry out the process of segmentation. The algorithm was applied to the range images acquired from a concrete project to verify the effectiveness and the efficiency, and the results of both ideal and extreme conditions were discussed, respectively. The results show that the algorithm can effectively segment range images with the feature of spatial connective region and has a constant speed of segmentation with regard to different range images in the same hardware platform. For the 3 tested range images containing 19 792, 35 186 and 79 618 points, the average speeds of segmentation in ideal and extreme conditions are 0.168 s and 0.494 s every 10 000 points, respectively, which verifies the high effectiveness and efficiency of segmentation.

收稿日期:2010-06-25;修订日期:2010-09-13.

基金项目:上海市重点学科建设基金资助项目(No. Y0102);上海市科委重点科技攻关项目(No. 08511501100)

Key words: range image; spatial connective region; tree-type segmentation; coordinate axis; exploration of projection

1 引言

近年来,随着非接触式测量精度的不断提高,三维激光扫描技术在逆向工程中得到了广泛的应用。三维激光扫描仪进行一次测量得到一组点阵,每一点包含了对应场景上扫描点的距离信息,这个点阵称为深度数据或者深度图像(Range Image)^[1]。在逆向工程、机器视觉、虚拟现实建模系统等诸多领域中,深度图像的分割是基础而重要的一环,多年来一直是计算机图形图像学的研究热点之一^[2]。由于测量对象和测量现场的复杂性和多样性,这个复杂问题一直没有很好的解决^[3]。

深度图像的分割方法大致可以归为两类:基于特征的方法和基于空间连通域的区域生长法。基于特征的方法的思想是识别提取深度图像的特征,如边缘轮廓特征、曲面片之间的相交过渡特征、拉伸特征等,在此过程中往往需要计算局部法矢、曲率等微分几何属性,并以此为基础进行分割^[4-5];基于空间连通域的区域生长法根据深度图像在空间上的连通性进行分割,这种方法一般首先选定种子点,由种子点向外延伸得到相关的区域,直到在其邻域不存在连续的点集为止,最后将这些属于同一空间连通域的点云组合在一起来实现分割^[6-7]。

上述传统的方法都是直接在三维空间对深度图像进行计算并分割,都没有对其包含的空间点本身做改变几何形态的变换。主流的方法虽然对于特定的深度图像能实现较理想的分割结果,但是算法大多比较复杂。此外由于是在空间三个维度上进行计算和分割,因此计算效率普遍较低。本文提出了一种新颖的分割方法,该方法先对深度图像从三维空间向一维坐标轴进行投影勘察,并采用树型分割的思想,对投影得到的一维点数据按区间连通域进行分割,分割效果和效率较为理想。

2 深度图像从三维到一维的投影

在对深度图像分割之前,首先要对其进行从

三维到一维的投影。两位西班牙学者在处理单次扫描的深度图像时,使用了对深度图像进行三维到二维投影的“场景勘察法”,从而把问题转化为对二维点云的分割^[8]。本文进一步对深度图像进行三维到一维坐标轴的投影勘察,从而把三维深度数据的分割转变成对一维直线点云的分割。

对深度图像进行一维投影,可以等价并分解为两次投影变换:先进行三维到二维的投影变换 M_{32} ,再进行二维到一维的投影变换 M_{21} 。下面以 Y 轴作为投影坐标轴来说明,如图 1 所示。首先点 $P(x, y, z)$ 沿方向 $n^{yoz} = \{A, B, C\}$ 投影到 YOZ 平面,得到点 $P^{yoz}(0, y^{yoz}, z^{yoz})$,忽略零值的 x 坐标,相当于二维点 $P^{yoz}(y^{yoz}, z^{yoz})$;然后,点 $P^{yoz}(y^{yoz}, z^{yoz})$ 沿方向 $n^y = \{0, \sin \alpha^y, -\cos \alpha^y\}$ 向 Y 轴投影得到点 $P^y(0, y^a, 0)$ 。显然,最简单的情况是 M_{32} 为正交投影,即 n^{yoz} 垂直于 YOZ 平面,此时 Y 轴垂直于 $\Delta PP^{yoz} P^{y0}$ 。因此,图 1 中以 α 为投影角的点 $P(x, y, z)$ 到点 $P^y(0, y^a, 0)$ 的投影勘察转换为以 α^y 为投影角的点 $P^{yoz}(0, y^{yoz}, z^{yoz})$ 到点 $P^y(0, y^a, 0)$ 的投影勘察。由于坐标轴 X, Y, Z 具有几何轮换性,很容易得出 M_{32} 投影为向 XOY 和 ZOX 平面的等价投影过程。

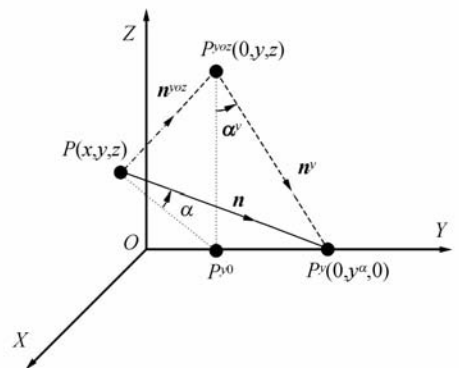


图1 投影分解

Fig. 1 Decomposition of projection

下面推导出投影变换矩阵。设空间任意一点 $P(x, y, z)$ 沿任意方向 $n^{yoz} = \{A, B, C\}$ 在 YOZ 平面的投影坐标为 $P^{yoz}(x^{yoz}, y^{yoz}, z^{yoz})$, (其中 $x^{yoz} = 0$), 则有:

$$\begin{cases} \frac{x^{yoz} - x}{A} = \frac{y^{yoz} - y}{B} = \frac{z^{yoz} - z}{C}, \\ x^{yoz} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

写成矩阵形式为:

$$P^{yoz} = (0, y^{yoz}, z^{yoz}) = (x, y, z) \begin{pmatrix} 0 & -\frac{B}{A} & -\frac{C}{A} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = (x, y, z) \mathbf{M}_{32}, \quad (2)$$

设 YOZ 平面上一点 $p^{yoz}(0, y^{yoz}, z^{yoz})$ 沿投影方向 $y = \tan \alpha^y \cdot z$ 在 Y 轴上的投影坐标为 $P^y(0, y^a, 0)$ ($x^a = z^a = 0$), 则有:

$$y^a = y^{yoz} + \tan \alpha^y \cdot z^{yoz}, \quad (3)$$

写成矩阵形式为:

$$P^y = (x^a, y^a, z^a) = (x^{yoz}, y^{yoz}, z^{yoz}) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \tan \alpha^y & 0 \end{pmatrix} = (x^{yoz}, y^{yoz}, z^{yoz}) \mathbf{M}_{21}. \quad (4)$$

空间任意一点 $P(x, y, z)$ 到 Y 轴上的点 $P^y(0, y^a, 0)$ 的投影方程可以写成:

$$P^y = \mathbf{P} \mathbf{M}_{32} \mathbf{M}_{21} = \mathbf{P} \mathbf{M}_{31}, \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{M}_{31} = \mathbf{M}_{32} \mathbf{M}_{21} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{B}{A} & -\frac{C}{A} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \tan \alpha^y & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\tan \alpha^y \cdot \frac{C}{A} - \frac{B}{A} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \tan \alpha^y & 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

当 \mathbf{M}_{32} 为正交投影时, $B=C=0$, 得:

$$\mathbf{M}_{31} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \tan \alpha^y & 0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

代入(5)式得:

$$P^y(0, y^a, 0) = \mathbf{P} \mathbf{M}_{31} = (x, y, z) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \tan \alpha^y & 0 \end{pmatrix} = (0 \quad y + \tan \alpha^y \cdot z \quad 0), \quad (8)$$

可简写为:

$$P^y(y^a) = (y + \tan \alpha^y \cdot z). \quad (9)$$

3 投影勘察与树型分割

为了能将三维深度图像转化为满足分割条件的坐标轴上的一维深度图像, 必须先确定最优投影方向, 即确定最优投影角 α_{op} 或 α_{op}^y . 最优投影角的确定是一个迭代的过程, 即投影勘察. 投影矩阵中独立自变量的数量定义为投影勘察的自由度 F , 即投影勘察方向的个数. 根据式(6), 一般情况下 $F(\mathbf{M}_{31})=3$, 其中 $F(\mathbf{M}_{32})=2, F(\mathbf{M}_{21})=1$. 本文中 \mathbf{M}_{32} 为正交投影, 因此 $F(\mathbf{M}_{32})=0, F(\mathbf{M}_{31})=F(\mathbf{M}_{21})=1$, 即投影勘察只在 \mathbf{M}_{21} 中进行, 大大提高了投影效率.

如图 2 所示, 深度图像中任意一个空间点 P_i 向 Y 轴进行以 α_i 为投影角的投影勘察, 等价于对 P_i 在 YOZ 面的垂直投影点 P_i^{yoz} 进行以 α_i^y 为投影角的投影勘察, 得到 Y 轴上的一维点 P_i^y . 投影角 $\alpha_j^y = \alpha_0^y + j \cdot \Delta \alpha^y$ ($j=0, \pm 1, \pm 2, \dots$), 初始投影角 α_0^y 一般取 0° , $\Delta \alpha^y$ 为勘察步进角; 在勘察过程中, 终止投影角 $\alpha_{end}^y = \pm(90^\circ - \Delta \alpha^y)$, 投影角的勘察范围为 $180^\circ - 2\Delta \alpha^y$. 同理. 根据坐标轴的几何轮换性, 可以很容易得到 X 轴和 Z 轴对应的投影勘察过程.

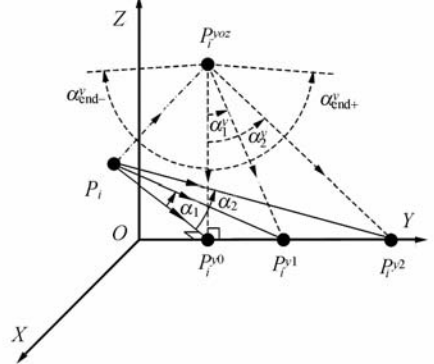


图 2 投影勘察

Fig. 2 Exploration of projection

P_i 经过投影转化为在 Y 轴上的投影点 P_i^y , 从而空间三维深度图像 $\{P_i\}$ 的区域分割就转化为对坐标轴上的一维点集 $\{P_i^y\}$ 进行区间分割. 初始投影方向定为垂直于 Y 轴, 然后判断 Y 轴上的投影点集 $\{P_i^y\}$ 是否存在非连通区间, 如果不存在, 以步进角 $\Delta \alpha^y$ 为单位进行投影并勘察, 直到出现非连通区间为止, 非连通区间即是接下来的树型分割的基准.

树结构被广泛用于平面图像^[9]和深度图像处理^[10-11]领域,典型的有八叉树、四叉树、二叉树等。本文借鉴树结构的思想,在对深度图像进行投影勘察的过程中,同时进行树型分割,把根节点逐层细分,最后形成无法细分的叶节点。图 3 所示为树型分割示意图,每一个节点分别表示深度数据,其中白色节点 R_0 为根节点,代表原始深度图像;浅灰色节点 R_1, R_3 及其子节点 R_{32} 为枝节点,代表仍能分割的子深度图像;深灰色的 $R_2, R_{11}, R_{12}, R_{31}, R_{33}, R_{34}$ 和 R_{321}, R_{322} 为叶节点,即为最终分割得到的子深度数据。

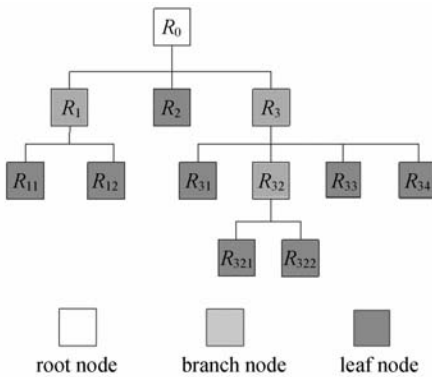


图 3 树型分割

Fig. 3 Tree-type segmentation

完整的树型分割算法描述如下:

Step1: 读取原始深度图像,对每一个点进行编号;

Step2: 设定勘察步进角 $\Delta\alpha^y$, 计算投影角 $\alpha_j^y = \alpha_0^y + j \cdot \Delta\alpha^y$, 初始 $j=0$;

Step3: 按公式(9)计算每个点的 Y 轴投影坐标 y_j^i ;

Step4: 以 y_j^i 的取值范围为闭区间,按分割精度 K 均分成 $L=1/K$ 个子区间,计算每个点所在子区间号和每个子区间包含的点数;

Step5: 设定点数阈值 T , 点数小于 T 的子区间为空区间,空区间把整个区间(根节点)分割成若干个子区间连通域(子节点);

Step6: 如果 $|\alpha_j^y| < (90^\circ - \Delta\alpha^y)$, 执行 $j \pm 1$, 并跳到 Step2, 否则,继续下一步;

Step7: $|\alpha_j^y| = (90^\circ - \Delta\alpha^y)$, 投影勘察结束,整个区间被细分为若干无法细分的子区间连通域(叶节点),各个子区间连通域中的点的集合,即为分割得到的子深度图像。

对于任何深度图像,易知 Y 轴的投影勘察次数:

$$N_E = \left\lceil \frac{180^\circ - 2\Delta\alpha^k}{\Delta\alpha^k} \right\rceil = \left\lceil \frac{180^\circ}{\Delta\alpha^k} - 2 \right\rceil. \quad (10)$$

其中 $k \in \{x, y, z\}$, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整符号。可以看出,无论原始深度数据分为多少层、最终分割成多少块,投影勘察次数只和勘察步进角 $\Delta\alpha^y$ 有关。因此 $\Delta\alpha^y$ 的选择直接关系到投影勘察的效果和效率,取得过大会导致勘察失败,取得过小则会导致勘察次数过多,降低运算效率。综合考虑勘察准确性和效率,本文选择 $\Delta\alpha^y = 5^\circ$ 来进行投影勘察。本算法虽然只对固定坐标轴进行投影勘察,但是多数情况下,深度图像无法人工确定最优投影坐标轴,就需要按次序在 3 根坐标轴上进行如上步骤的投影勘察,由于坐标轴的集合轮换性,算法完全通用。

4 实例分析

本文以开发的人脸数据快速测量系统获得的单侧深度图像对文中方法进行验证。图 4 为分割示意图,由于实际测量范围的原因,测量获取的原始深度图像包括脸部以外的区域,因此需要通过分割来实现对脸部深度图像的提取。

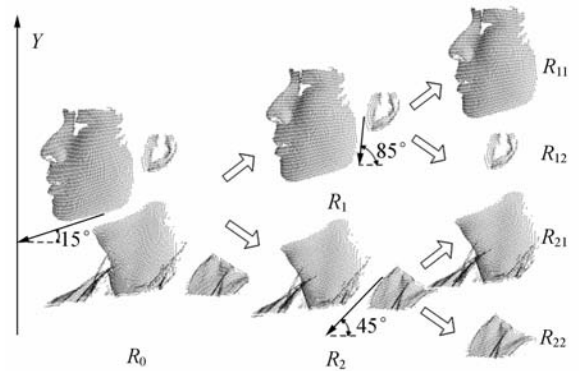


图 4 分割示意图

Fig. 4 Demonstration of segmentation

初始投影角 α_0^y 设为 0° , 勘察步进角 $\Delta\alpha^y = 5^\circ$, 分割精度 K 设为 0.01, $L=100$ 。根据公式(10)可得一根坐标轴上的投影勘察次数 $N_E = 34$ 。投影角 $\alpha_3^y = 15^\circ$ 时, 分割出第一层 R_1 和 R_2 两块子深度图像; 继续投影勘察, 进行第二层分割: 45° 投影角时 R_2 分割为 R_{21} 和 R_{22} 两块子深度图像, 85° 投影角时 R_1 分割为 R_{11} 和 R_{12} 两块子深度

图像,85°同时也是投影终止角,此时分割完毕。其中 R_{11} 子深度图像就是感兴趣的脸部深度图像,用于后续的进一步处理和建模。

本文用测量得到的 3 片原始深度图像经过不同程度的精简得到的数据来验证算法的有效性,测试平台为 P4 2.26 G,768 M 内存。由于本测量系统专用于人脸测量,因此测量得到的原始深度数据具有一致的空间特性,即 Y 轴恒为最优投影坐标轴,因此算法应用于本测量系统的人脸深度图像的分割,可指定 Y 轴为最优投影坐标轴。但是多数深度图像无法确定最优投影坐标轴,因此需要程序自动判断出最优投影坐标轴。在极端情况下,第三次投影勘察才能确定最优投影坐标轴,因此本文分别试验了指定最优投影坐标轴(Y 轴)的理想情况和第 3 次投影勘察实现分割的极端情况,结果如表 1 所示。

表 1 不同点数的深度图像的分割时间比较

Tab.1 Comparison of segmentation time among range images with different points

总点数	19 792	35 186	79 168
指定 Y 轴 总时间	0.329 s	0.601 s	1.310 s
分割时间 每万点时间	0.167 s	0.171 s	0.165 s
极端情况 总时间	0.928 s	1.753 s	3.866 s
分割时间 每万点时间	0.496 s	0.498 s	0.489 s

可以看出,如果投影勘察的坐标轴数相等,包含不同点数的深度图像的分割速度基本为常数,

分割时间和总点数以及投影勘察的坐标轴数近似成线性关系。理想和极端情况下的平均分割速度分别为每万点 0.168 s 和 0.494 s,接近 3 倍关系,说明算法的时间主要消耗在投影勘察过程中,树型分割花费时间很小,因此分割精度 K 的选取对于分割效率的影响可以忽略。

5 结 论

本文针对具有一定空间连通域特征的海量点的深度图像提出了一种新颖的以坐标轴投影勘察为基础的深度图像树型分割方法。每根坐标轴的投影勘察次数只和勘察步进角有关,算法的分割效率与深度图像树型细分层数和节点总数无关,并且对于不同点数的深度图像能保持接近恒定的分割速度。在应用实例中,分别计算了多个深度图像在理想和极端两种情况下的分割时间和分割速度,以验证算法的稳定性。在试验的 P4 2.2 G,768 M 平台上,理想和极端情况下的分割速度分别为每万点 0.168 s 和 0.494 s,这表明对于海量点的深度图像,在极端情况下算法仍然具有较快的分割速度。此外,如用于特定测量对象的深度图像分割,则可以根据测量对象的空间连通域特性人为确定最优投影坐标轴,本算法具有比一般情况更高的分割效率,最快可以达到近 3 倍的分割速度。本方法作为一种高效的分割方法,为后续的进一步处理奠定了基础。

参考文献:

- [1] TAKESHI M. Registration and integration of multiple range images by matching signed distance fields for object shape modeling[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2002,87:51-65.
- [2] MICHAL H, PAVEL Z. Multimodal range image segmentation by curve grouping[C]. *Proceedings of The 18th International Conference on Pattern Recognition*, 2006:9-12.
- [3] 赵翠莲,范志坚,孙亮,等. 体素连通性的深度图像拉伸特征提取[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(4): 930-936.
ZHAO C L, FAN ZH J, SUN L, CHEN Y. Ex-
- trusion feature extraction of range image by voxel directed connectivity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(4):930-936. (in Chinese)
- [4] WOO H, KANG E, WANG S, et al.. A new segmentation for point cloud data [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42:167-178.
- [5] CHEN Y H, LIU C Y. Robust segmentation of CMM data based on NURBS [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1997,13:530-534.
- [6] 吴世雄,王成勇. 散乱噪声点云的数据分割[J]. *机械工程学报*, 2007,43(2):230-233.
WU SH X, WANG CH Y. Data segmentation of

- unorganized noise point-cloud[J]. *Chinese Journal Of Mechanical Engineering*, 2007, 43(2): 230-233. (in Chinese)
- [7] SAPIDIS N S, BESL P J. Direct construction of polynomial surfaces from dense range images through region growing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1995, 14(2): 171-200.
- [8] MERCHÁNA P, ADÁN A. Exploration trees on highly complex scenes: A new approach for 3D segmentation[J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40: 1879-1898.
- [9] 曲兴华, 宫辉, 贾果欣. 数码相机的彩色图像预处理过程[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 207-212.
QU X H, GONG H, JIA G X. Preprocessing of color image based on digital camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 207-212. (in Chinese)
- [10] 宋涛, 欧宗瑛, 王瑜, 等. 八叉树编码体数据的快速体绘制算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(9): 1990-1996.
SONG T, OU Z Y, WANG Y, *et al.*. Fast volume rendering algorithm of octree encoded volume [J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(1): 207-212. (in Chinese)
- [11] 刘含波, 王昕, 强文义. RBF 隐式曲面的离散数据快速重建[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2): 338-343.
LIU H B, WANG X, QIANG W Y. A fast reconstruction method for implicit surface based on RBF [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 338-343. (in Chinese)

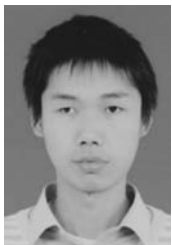
作者简介:



赵翠莲(1963—),女,上海人,博士,教授,硕士研究生导师,主要从事CAX、数字几何处理和虚拟现实等方面的研究。E-mail: clzhao@mail.shu.edu.cn



荣 坚(1986—),男,湖北人,硕士研究生,主要研究方向为CAD和模型重建等。E-mail: myrzh_1986@163.com



施晓磊(1982—),男,江苏人,硕士研究生,主要研究方向为逆向工程和计算机图形学等。E-mail: flowerrainfly@hotmail.com



范志坚(1982—),男,山西人,硕士,助教,主要研究方向为逆向工程、虚拟现实和图像处理等。E-mail: chris2813@shu.edu.cn

(本栏目编辑:李树军)