

文章编号:1674-2869(2018)04-0446-05

三维重建中线段匹配方法的研究

陈起凤^{1,2}, 刘 军^{*1,2}, 李 威^{1,2}, 雷光元³, 董广峰³

1. 智能机器人湖北省重点实验室(武汉大学), 湖北 武汉 430205;
2. 武汉工程大学计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 430205;
3. 国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司, 新疆 哈密 893000

摘 要:针对传统基于特征点匹配的重建模型容易存在空洞现象的问题,提出一种基于直线提取算法的线段匹配方法。首先使用无人机设备获取校园建筑图片集,保证拍摄过程中相邻图片存在重叠部分,通过筛选分数最高的相似性评分得到相邻图片集合并只在相邻图片间进行匹配。接着利用直线提取算法提取图片中直线段,然后根据极线约束关系进行二维线段匹配最终生成三维线段模型。二维线段匹配阈值 τ 、相邻图片个数 M 、在相邻图像中与特定二维线段相匹配的线段个数 K 是其中3个重要参数,对4组不同的图片集进行参数评估,实验结果表明当二维线段阈值 τ 低于0.5,相邻图片个数 M 为10,在相邻图像中与特定二维线段相匹配的线段个数 K 为10时三维重建速率与模型精度可接受度最高。

关键词:三维重建;线段匹配;直线提取算法;参数评估

中图分类号:TP317.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2018.04.019

Line Matching in Three-Dimensional Reconstruction

CHEN Qifeng^{1,2}, LIU Jun^{*1,2}, LI Wei^{1,2}, LEI Guangyuan³, DONG Guangfeng³

1. Hubei Key Laboratory of Intelligent Robot (Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China;
2. School of Computer Science & Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
3. SDIC Xinjiang Luobupo Potash Co., LTD, Hami 839000, China

Abstract: A line matching method based on Line Segment Detector (LSD) algorithm was proposed to resolve holes possibly in traditional three-dimensional(3D) reconstruction by characteristic point matching. Firstly, we used Unmanned Aerial Vehicle to take pictures of campus buildings and ensured that there were overlaps in neighboring pictures. Secondly, we selected the highest similarity scores to obtain the neighboring picture sets and matched only between neighboring pictures. Then, LSD algorithm was used to extract the line segments in the pictures. Finally, the 3D segment model was reconstructed by using two-dimensional segment matching based on epipolar constraint. Three important parameters, fixed threshold τ , number of the nearest neighbors M and matched specific segment in neighbors K were used in the model. A parameter evaluation was made in four different picture sets. The experiment results showed that the reconstructing rate and model accuracy were highest when τ was less than 0.5, M was 10 and K was 10.

Keywords: 3D reconstruction; line matching; line segment detector algorithm; parameter evaluation

随着信息技术的迅猛发展,三维重建在许多领域有越来越多的应用,如文化遗产保护、文物研究、视频监控、动画电影制作、医学图像处理以及

虚拟现实等^[1-2]。在计算机视觉中^[3-4],基于图像的三维重建技术是根据场景的两张或两张以上的二维图像,由计算机自动计算并匹配场景的二维几

收稿日期:2018-03-16

基金项目:智能机器人湖北省重点实验室开放基金(HBIR201608);武汉工程大学第九届研究生教育创新基金(CX2017076)

作者简介:陈起凤,硕士研究生。E-mail:244796472@qq.com

*通讯作者:刘 军,博士,副教授。E-mail:liujun@wit.edu.cn

引文格式:陈起凤,刘军,李威,等. 三维重建中线段匹配方法的研究[J]. 武汉工程大学学报,2018,40(4):446-450.

何信息和深度信息,最后建立三维模型的过程。传统三维重建是基于点的特征提取与匹配^[5-8],三维点云模型在缺少纹理的地方重建精度较差,三维线段模型能提供更充分的结构信息,反映场景的几何拓扑关系^[9]。要生成一个基于线段的三维重建模型需要建立来自不同图片的二维线段的对应关系,线段匹配^[10-11]指在两组线段中建立对应关系的过程。早期Schimid等^[12]提出一种在三视图间自动进行线匹配的方法,在已知相机姿态信息的情况下,建立基于强度的点向线段匹配的对对应关系。2005年Bay等^[13]提出借助宽基线图像进行线段匹配的方法,通过计算任意相邻线段上像素点的颜色直方图(Hue, Saturation, Value, HSV)来完成,后来一种基于块的线段描述方法^[14]被提出,该方法能快速得到亚像素级别直线的位置,但未考虑尺度变化的自适应性,会造成某些块过短从而线段无法被提取的现象。2009年,梯度均值-标准差描述子(mean-standard line deviation, MSLD)算法^[15]被提出,该方法建立在梯度直方图基础上,在视角存在缺陷和光照有变化的情况下实验结果良好,但缺少几何属性做约束条件,当存在尺度变换时线段匹配准确率较低。Kim等^[16]提出一种利用共面二维线段相交透视不变性的线段匹配方法,在线段交点处通过归一化交叉相关系数进行匹配,但未与建筑外观相结合,在进行多视图三维重建时模型表面会出现空洞现象。针对上述问题,本文将外观和几何约束相结合,利用直线提取(line segment detector, LSD)算法^[17]检测直线段。首先寻找相邻图片,然后在相邻图片间进行二维线段匹配,最后进行三维模型重建。

1 线段检测技术

LSD算法是一种能在线性时间内得到亚像素级准确度的直线段分割检测算法,将梯度方向作为判定像素点之间图像关系依据进行线段检测。该算法可分为6个步骤:1)图像缩放;2)梯度计算;3)梯度排序;4)梯度阈值;5)区域增长;6)矩形估计。首先计算每个像素点附近的线场角度,生成一个线场区域即单位向量域,其中所有向量都与通过基准点的水平线相切。该区域被分割为连通的若干部分,它们在一定的容忍度内有相同的水平线角度,这些连通的部分被称为水平线支撑区域。每个水平线支撑区域都是一个直线分割的备选区域,同时需要一个矩形与它对应,水平线支撑区域的主轴表示矩形的主方向。矩形中线场区域

角度与矩形主方向在一定容忍度下保持一致的像素点称为对准点。统计出矩形区域像素个数以及对准点个数,通过判定准则判断水平线支撑区域是否为直线段。算法示意图如图1所示。

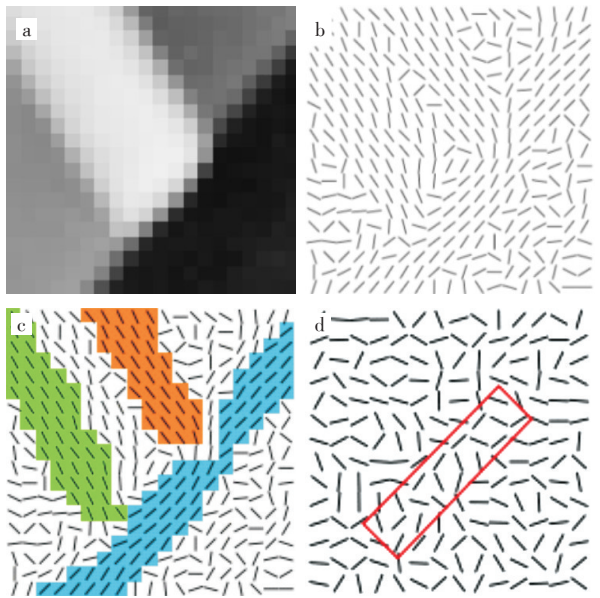


图1 LSD算法示意图:

(a)图片,(b)线场区域,(c)水平线支撑区域,(d)对准点
Fig. 1 Schematic diagram of LSD algorithm:
(a) image, (b) lever-line field, (c) line support regions,
(d) aligned points

2 寻找相邻图片

已知一组图片集 $I=\{I_1, \dots, I_N\}$, 通过处理后获得相机姿态信息的三维点坐标集合为 $X=\{X_1, \dots, X_K\}$, 定义 $L_i=\{l_1^i, \dots, l_m^i\}$ 是每张图片中二维线段集合, 每个二维线段 l_m^i 由两个端点 p_m^i, q_m^i 构成, $p_m^i, q_m^i \in R^2$ 。理论上二维线段匹配需要遍历所有图片中的所有线段, 但只有少数线段之间会存在潜在对应关系。在进行图片集拍摄过程中, 保证每两张相邻图片有重叠的部分, 即相邻图片中存在有对应关系的线段。当任意两张图片 I_i 与 I_j 进行二维线段匹配, 其中下标 i, j 表示在图片集 I 中的第 i 张和第 j 张, 如果三维点 P 同时存在于图片 I_i 与 I_j 中, 则两张图片的相机拥有共同的视野, 即两张图片有重叠部分。根据戴斯相似性系数(Dice similarity coefficient, DSC)^[18], 定义图片 I_i 与图片 I_j 相似性评分为:

$$S_l(i, j) = \begin{cases} \frac{2 \cdot |X_i \cap X_j|}{|X_i| + |X_j|}, & i \neq j \\ -\infty & \end{cases} \quad (1)$$

相似性评分越高表示两张图片重叠的部分越多,通过筛选相似性评分得到与图片 I_i 相邻的图片集合:

$$V_i = \{j_1, j_2, \dots | S_l(i, j) > 0 \cap x < y \Rightarrow S_l(i, j_x) \geq S_l(i, j_y)\} \quad (2)$$

对于每个图片 I_i , 集合 V_i 仅包含所有相邻图片 I_j 的索引, 并按照其视图相似性评分 $S_l(i, j)$ 降序排序。由于三维建模中数图片集的数据量较大并且任意两张图片都存在重叠部分的可能性较小, 本文选取相邻图片进行二维线段筛选与匹配以达到高效建模的目的。本文使用相邻图片集合 V_i 中相似性评分最高的前 M 张图片即 V_i^M , 假设图片集 I 有 N 张图片, 该算法时间复杂度为 $O(MN)$ 。

3 二维线段匹配

假设二维线段集合 L_i 与 L_j 分别存在于图片 I_i 与 I_j 中, 在筛选完相邻图片后, 选取相似度评分较高的 M 张图片, 相邻图片 I_i 与 I_j 应满足条件 $j \in V_i^M$, 二维线段匹配阶段只需进行集合 L_i 与 L_j 的线段匹配。

根据对极几何知识, 本文利用极线约束关系进行二维线段间的匹配。当 $l_m^i \in L_i$ 且 $l_m^j \in L_j$ 时, 首先计算 l_m^i 的端点 p_m^i 与 q_m^i 在另一张图片中的极线, 得到两条极线与图片 I_j 中的二维段 l_m^j 相交, 获得与二维线段 l_m^j 的端点 p_m^j 与 q_m^j 共线的两个交点 χ_1 和 χ_2 , 如图2所示。

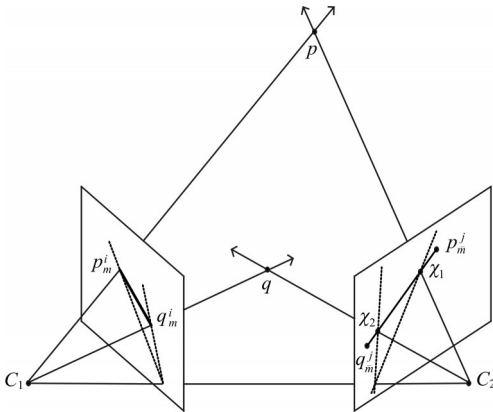


图2 二维线段匹配图

Fig. 2 Matched image of two-dimensional line segments

本文定义二维线段 l_m^i 与 l_m^j 之间的匹配得分为:

$$s(l_m^i, l_m^j) = \frac{d(\chi_1, \chi_2)}{d(p_m^j, q_m^j)} \quad (3)$$

其中, $d(\chi_1, \chi_2)$ 与 $d(p_m^j, q_m^j)$ 表示两个二维端点之间的欧几里得距离。由图2看出, 四个端点

$\chi_1, \chi_2, p_m^j, q_m^j$ 共线。如果这两个二维线段是同一个三维模型的测量结果, 理想情况下匹配得分 $s(l_m^i, l_m^j)$ 的值为1。由于光照变化、镜头畸变、相机参数变化、拍摄角度改变等因素, 对匹配得分有一定影响, 本文只取大于一个定值的一部分集合。假设当匹配得分超过阈值 τ 时, 二维线段 l_m^i 与 l_m^j 视为一组潜在的匹配线段。

通过阈值筛选, 二维线段匹配程序拥有较高的查全率, 但查准率很低。单纯提高阈值, 在线段检测时会存在检测不精确的问题, 本文选取 K 个与特定二维线段潜在相匹配的线段。二维线段匹配阶段提到了三个重要参数值: 二维线段匹配阈值 τ 、相邻图片个数 M 、在相邻图中与特定二维线段相匹配的线段个数 K 。本文将这三个参数分为两组进行评估分析: 首先对 τ 单独进行分析, 然后将 M 与 K 组合进行分析。

4 结果与讨论

首先用小米无人机、iphone手机、索尼微单相机对武汉大学(Wuhan Institute of Technology, WIT)校园建筑进行了3组图片集采集。分别为36张的武汉大学图书馆图片集、41张的武汉大学教务处图片集、250张的武汉大学全景图片集, 另外本文选取了PHOTOSCAN软件中50张建模实例图片集。然后, 对这4组图片集进行重建实验。

4.1 二维线段匹配阈值 τ 对重建结果的影响

二维线段匹配阈值 τ 默认值设置为0.25, 即两种可能匹配的二维线段的相互重叠率至少要达到25%。为了获得最佳的阈值, 选取5个值0.1、0.25、0.5、0.75、0.9进行对比试验。其中0.1表示二维线段极少重叠, 0.9表示二维线段几乎完全重叠。实验结果如表1所示。不同阈值 τ 下图书馆重建模型如图3所示。

数据表1与图3表明三维模型中的三维线段数量与极线重叠阈值成反比, 当阈值增加时, 三维线段数量递减; 运行时间也与阈值成反比, 阈值越小, 所花费的时间越长。当阈值低于0.5时, 重建模型相对稳定, 当阈值超过0.5, 重建线段数会减少, 三维模型会逐渐模糊, 尤其在阈值等于0.9时, 重建模型线段数锐减, 模型完全不符合预期效果。根据实验结果得出结论: 极线重叠阈值应该选择一个较小的值, 一般低于0.5更合适, 这样可以降低误删正确线匹配的可能性。

表 1 不同二维线段匹配阈值 τ 下的重建时间与线段数
Tab. 1 Time and line numbers of 3D reconstruction under different τ

图片集地点	$\tau=0.1$		$\tau=0.25$		$\tau=0.5$		$\tau=0.75$		$\tau=0.9$	
	时间 / min	线段数 / 条	时间 / min	线段数 / 条	时间 / min	线段数 / 条	时间 / min	线段数 / 条	时间 / min	线段数 / 条
WIT图书馆	22	2 534	21	2 524	17	1 741	19	2 397	16	908
WIT教务处	21	1 737	24	1 745	16	945	18	1 613	16	273
WIT全景	39	1 042	42	1 046	29	5 035	37	9 642	24	1 499
PHOTOSCAN 建模实例	21.5	5 693	20.6	5 678	17	4 793	20	5 603	16	33 54

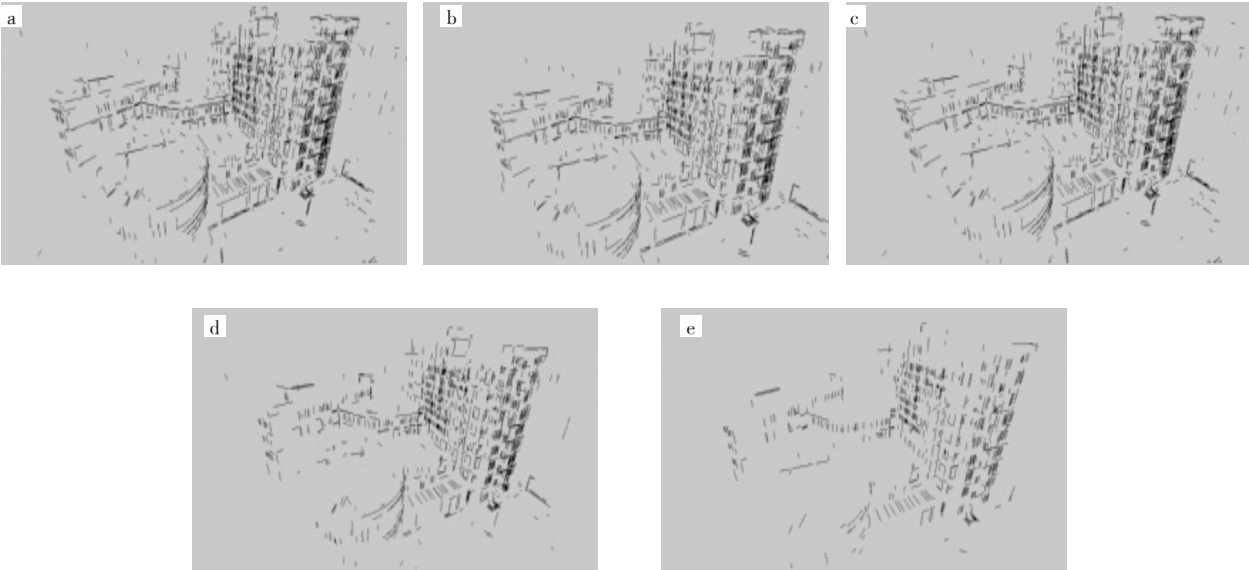


图 3 不同阈值 τ 对 WIT 图书馆三维重建模型的影响:(a)0.1,(b)0.25,(c)0.5,(d)0.75,(e)0.9
Fig. 3 Effects of different τ on 3D reconstruction of library of WIT: (a)0.1,(b)0.25,(c)0.5,(d)0.75,(e)0.9

4.2 M 和 K 对重建结果的影响

相邻图片个数 M 、在相邻图像中与特定二维线段相匹配的线段数 K 默认值是 10,表示选取每张图片最相邻的 10 张图片,在可视相邻图片中与某个二维线段相匹配的个数限制为 10 条。 M 与 K 的乘积表示潜在匹配二维线段的总数,在不考虑运行时间的情况下, M 与 K 乘积越大,重建的结果越精确。

为了分析 M 与 K 单个参数对重建结果的影响,本文选取 WIT 图书馆图片集,对 M 与 K 分别取 $M \in \{5, 10, 20\}$ 与 $K \in \{1, 5, 10, 20\}$ 组合实验,得到

12 组重建结果,实验数据总表如表 2 所示,不同 M 、 K 对重建结果的运行时间和线段数影响如图 4 所示。

当拥有充足的运行时间预算时,选用越大的 M 、 K 值,重建线段数越多,得到的重建结果会越精密。 M 选取值为 5、20 时,重建时间一直随 K 值增大而增大。 M 选取值为 10,当 K 值小于 5 时,重建时间随 K 值增大而增大;当 K 值选取 5 到 10 时,重建时间随 K 值增大而减小, K 值为 10 时,重建时间最短; K 值由 10 增到 20 时,重建时间与 K 值成正比。

表 2 不同 M 、 K 下的图书馆图片集重建时间与线段数
Tab. 2 Time and line numbers of 3D reconstruction of library of WIT at different M , K

M	$K=1$		$K=5$		$K=10$		$K=20$	
	时间 / min	线段数 / 条	时间 / min	线段数 / 条	时间 / min	线段数 / 条	时间 / min	线段数 / 条
5	4	204	5	552	6	721	6	925
10	6	894	9	2 083	7	2 524	11	2 856
20	13	1 276	14	1 925	21	2 259	33	2 614

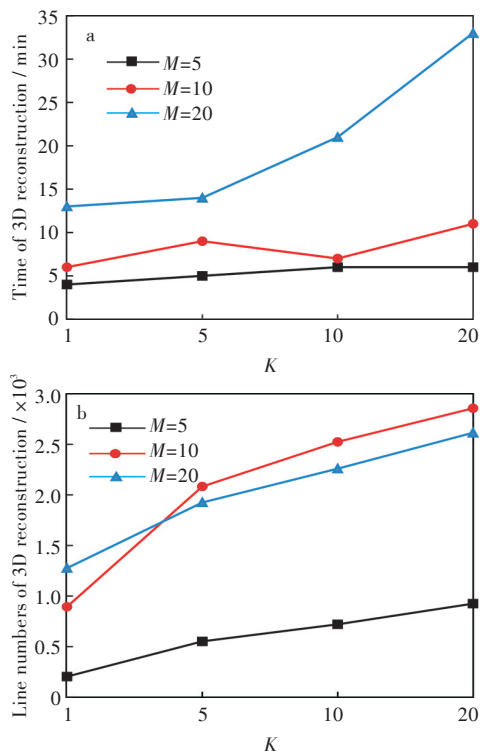


图 4 不同 M 、 K 对重建结果的影响:(a)时间,(b)线段数
Fig. 4 Effects of different M , K of 3D reconstruction on
(a)time, (b) line numbers

综上所述,选用 $M=10$ 、 $K=10$ 组合时,能够接近最佳重建效果并保证算法拥有较低的时间复杂度。

5 结 语

利用 LSD 线段提取算法检测出图片集中二维线段,在二维线段匹配阶段,对二维线段匹配阈值 τ 、相邻图片个数 M 、在相邻图像中与特定二维线段相匹配的线段个数 K 三个重要参数进行评估,实验结果表明当阈值 τ 低于 0.5, $M=10$, $K=10$ 时三维建模效果最好并且运行时间可接受度较高,为后续对三维重建算法优化提供依据。

参考文献:

[1] 王传安,葛华,王亚军. 基于非完全拓扑分析的三维建筑识别算法[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(10): 100-102.

[2] 胡红权. 视频监控中运动图像序列三维重建[J]. 现代电子技术, 2018, 41(3): 67-70.

[3] 徐超,李乔. 基于计算机视觉的三维重建技术综述[J]. 数字技术与应用, 2017(1): 54-56.

[4] 刘军,李娜,刘鹏. 双目视觉立体标定方法的改进[J].

武汉工程大学学报, 2013, 35(10): 68-73.

[5] 郭盛威,章秀华,范艳,等. 三维重建表面几何特征的提取与参数测量计算[J]. 武汉工程大学学报, 2016, 38(2): 186-188.

[6] 章秀华,白浩玉,李毅. 多目立体视觉三维重建系统的设计[J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(3): 70-74.

[7] 肖永强,王海辉,刘奥丽,等. 双目实时目标三维测量实现方法的研究[J]. 武汉工程大学学报, 2016, 38(4): 386-393.

[8] 杨辉,刘军,阮松. 基于 Mean Shift 算法视频跟踪研究[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(6): 2062-2066.

[9] 张琳彦,朱利等. 以多幅图像非几何约束线段匹配重建建筑物外立面三维线段模型[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 16-25.

[10] 翟优,郭希维,何鹏,等. 利用共线性和对极约束实现匹配扩展[J]. 光学技术, 2017(5): 450-454.

[11] 欧元汉,黄鸿,陆宇海. 基于密集点云重投影的三维线段模型重建算法[J]. 计算机工程与设计, 2015(12): 3291-3296.

[12] LOURAKIS M I A, TZURBAKIS S V, ARGYROS A A, et al. Feature transfer and matching in disparate stereo views through the use of plane homographies [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2003, 25(2): 271-276.

[13] BAY H, FERRARI V, GOOL L V. Wide-baseline stereo matching with line segments [C] //IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern. IEEE, 2005: 329-336 vol. 1.

[14] BAY H, TUYTELAARS T, GOOL L V. SURF: speeded up robust features [J]. Computer Vision & Image Understanding, 2006, 110(3): 404-417.

[15] WANG Z, LIU H, WU F. MSLD: a robust descriptor for line matching[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(5): 941-953.

[16] KIM H, LEE S. A novel line matching method based on intersection context [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2010: 1014-1021.

[17] GROMPONE R, JAKUBOWICZ J, MOREL J M, et al. LSD: a fast line segment detector with a false detection control [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(4): 722-732.

[18] HOCQUELET A, TRILLAUD H, FRULIO N, et al. Three-dimensional measurement of hepatocellular carcinoma ablation zones and margins for predicting local tumor progression [J]. Journal of Vascular & Interventional Radiology Jvir, 2016, 27(7): 1038-1045.

本文编辑:陈小平