

DOI: 10.7652/xjtub201404003

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

张琳彦¹, 朱利²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学软件学院, 710049, 西安)

摘要: 针对建筑物外立面三维线段模型重建的现有算法中存在多幅图像线段匹配需要提前获知对极几何约束, 以及三维线段重建的过程会因为输入误差的累积而受到影响等问题, 提出了一种以非几何约束重建三维线段模型的算法。该算法在多幅图像的线段匹配过程中以点线相结合的高稳定性双视图线段匹配算法为基础, 通过匹配线段间的传递性形成匹配线段组, 再剔除不相容匹配合并相容匹配, 最终得到准确的匹配线段结果。三维线段重建采用分段重建的方式得到每一个匹配线段组对应的三维线段, 再经过对线段长度和角度的约束, 剔除不构成建筑物外立面框架的空间线段, 最终构成建筑物外立面的三维线段结构。实验结果表明, 该算法可以有效重建出建筑物外立面的整体框架。

关键词: 多幅图像; 线段匹配; 建筑物外立面; 三维线段

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)04-0015-05

3D Line Segments Reconstruction for Building Facades with Line Matching Across Multi-Image with Non-Geometry Constraint

ZHANG Linyan¹, ZHU Li²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Software, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The previous works on 3D line segment reconstruction of building facades require known geometrical constraints in multi-image line matching, and the line segment reconstruction is affected by accumulated input error. An improved algorithm with non-geometry constraint is proposed. In line matching across multi-image, robust two-view line matching method is chosen, line-point invariants are taken as the foundation and matched-line-segment sets are formed via transitivity of matched line segments. Incompatible matches are eliminated and compatible matches are merged from those sets to form an accurate result. For this line segments reconstruction, 3D line segments corresponding to each matched-line-segment set are obtained in piecewise, and the length constraint and angle constraint are considered to remove the line segments which do not constitute building facades. The whole structure of building facades is thus effectively reconstructed with this algorithm.

Keywords: multi-image; line matching; building facades; 3D line segment

传统上基于图像的建筑物外立面三维重建得到的是三维点云模型, 但点特征却缺乏描述场景整体

收稿日期: 2013-09-12。 作者简介: 张琳彦(1988—), 女, 硕士生; 朱利(通信作者), 男, 副教授。 基金项目: 深圳市南山区技术研发和创意设计项目(KC2012JSJS0019A)。

网络出版时间: 2014-01-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140116.1600.001.html>

结构的能力^[1-2]。人工建筑物场景的框架主要由线段构成,建筑物外立面三维线段重建,就是通过获取建筑物外立面的二维线段在空间中的三维信息得到其三维线段模型。如图1所示,该建筑物的三维点云模型在缺少纹理的地方重建精度较差,而三维线段模型却能提供更充分的结构信息,反映场景的几何拓扑关系^[3]。

建筑物外立面三维线段重建大体分为3步,首先提取图像中的特征线段,再匹配特征线段,最后根据匹配线段之间的对应关系重建出目标建筑物的三维线段模型。

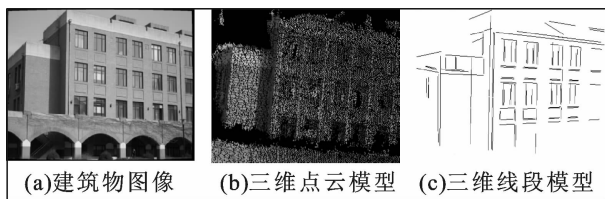


图1 三维点云模型与三维线段模型

特征线段的提取主要针对构成建筑物结构信息的边界,LSD(Line Segment Detector)^[4]是目前较稳定的线段提取算法,该算法具有错误控制功能,保证了线段检测结果的正确性。

特征线段匹配是在提取到的特征线段中,寻找同一条空间线段在不同成像图像上的投影。特征线段具有首末端点不易界定的特点,且同一条空间线段在不同图像中的投影线段之间缺乏很强的约束^[5]。应用较广的传统特征线段匹配算法一般是依据图像间预先获知的对极几何约束,只能匹配两幅或3幅图像间的线段^[5-6]。近年来提出的不单纯利用几何约束的线段匹配算法^[7-9],虽然在一定程度上克服了纯几何约束的缺点,但只能匹配两幅图像间的线段。由文献[5]扩展的算法^[10]和lmatch算法^[11]对多幅图像间线段的匹配效果虽然都较好,但都要预先获取对极几何知识,求解过程较烦琐。

得到多幅图像之间线段的对应关系后,即可重建出建筑物的三维线段结构。Hartley等提出的平面交线法^[12],求解过程受到特征线段首尾端点提取不准确的干扰。Werner也使用平面交线法重建三维线段,但要求输入图像必须含有3个相互正交的主方向^[13],现实中并不是所有的建筑物图像都能满足此要求。

针对上述问题,本文提出了一种改进算法。在特征线段匹配时,结合稳定性更高的双视图匹配算法,参照lmatch算法^[11]的框架,进行多幅图像间的

线段匹配,随后采用拼接的方式对匹配线段组进行三维线段重建,将每一条特征线段对应的空间线段片段连缀成一条完整的空间线段,并筛除部分空间线段,得到简洁的建筑物三维线段模型。

1 算法

1.1 多幅图像间的特征线段匹配

1.1.1 初始匹配线段组 设输入 T 幅图像,第 t 幅图像用LSD算法^[4]提取 J_t 条线段, $t=1,2,\dots,T$,其中第 j 条线段记为 $l_{ij}=\{(x_{ij}^s, y_{ij}^s), (x_{ij}^e, y_{ij}^e)\}$, $j=1,2,\dots,J_t$, (x_{ij}^s, y_{ij}^s) 和 (x_{ij}^e, y_{ij}^e) 分别是线段 l_{ij} 的首尾坐标。摄像机矩阵 $\mathbf{P}_{3\times 4}$ 已知,通过SVD分解可计算得到相应光心,光心距离是两个光心向量之间的欧氏距离。

根据输入图像光心之间的距离,均匀选取光心距离最近的若干组图像对作为基础图像对,记为 (m_p, m_q) , $p, q \in [1, T]$ 。 (m_p, m_q) 中两幅图像的特征线段匹配采用点线相结合的算法^[9],产生的匹配线段集合记为 S_{pq} , S_{pq} 中任一组匹配线段 $s_i=\{l_{pj}, l_{qj}\}$ 的相似度为 $r_i=S_L(l_{pj}, l_{qj})$, $i=1,2,\dots,I_{pq}$, I_{pq} 为 S_{pq} 中匹配线段组的总数。记 $k(S_{pq})$ 为基础图像对中的图像 m_p, m_q ; $k'(S_{pq})$ 为未与 m_p, m_q 匹配的图像; Θ 为计算得到的所有匹配线段组的集合。

对每一组基础图像对 (m_p, m_q) ,都重复下列步骤。

步骤1 更新 Θ 为 $\Theta:=\Theta \cup S_{pq}$ 。

步骤2 根据光心距离,由式(1)计算 $k'(S_{pq})$ 中与 $k(S_{pq})$ 图像距离最近的图像 $m_{\bar{p}}$

$$(m_p, m_{\bar{p}}) = \underset{(m'_p, m'_{\bar{p}}) \in k(S_{pq}) \times k'(S_{pq})}{\operatorname{argmin}} D(m'_p, m'_{\bar{p}}) \quad (1)$$

计算 $(m_p, m_{\bar{p}})$ 中所有的匹配线段。若 m_p 中的线段 l_{pa} 与 S_{pq} 中的 s_i 相对应,如 l_{pa} 与 l_{pj} 匹配,则将 l_{pa} 纳入 s_i 中, $s_i:=\{l_{pj}, l_{qj}, l_{pa}\}$, $r_i:=r_i+S_L(l_{pj}, l_{pa})$;若 l_{pa} 与 l_{pc} 形成了新的匹配线段组 $s_v=\{l_{pa}, l_{pc}\}$,则 $S_{pq}:=S_{pq} \cup s_v$,该组新匹配的相似度为 $r_v=S_L(l_{pa}, l_{pc})$,同时, $I_{pq}:=I_{pq}+1$, $k'(S_{pq}):=k'(S_{pq})/m_{\bar{p}}$ 。

步骤3 重复步骤2,直到 $k'(S_{pq})$ 中没有图像。

1.1.2 筛选匹配 在上述过程结束后, Θ 中包含了 T 幅图像间所有的匹配线段组,但此时 Θ 中各匹配线段组之间的关系还不准确。两个匹配线段组之间的关系可能会有3种情况:相同匹配(两组匹配包含的数据完全一致)、相容匹配(两组匹配包含的数据不一致,但不存在互相矛盾)和不相容匹配(两组匹

配包含的数据互相矛盾,如一幅图中的一条线段与另一幅图中的两条不同线段形成匹配)。

在对各匹配线段组之间关系进行分析的基础上,对 Θ 中数据进行筛选和整合,最终的准确数据会存放在 Θ^* 中,具体步骤如下。

步骤1 在 Θ 中选取相似度最高的匹配线段组 s_i , $\Theta^* := \Theta^* \cup s_i, \Theta := \Theta / s_i$ 。

步骤2 遍历 Θ 中的 s_k ,与 s_i 比较,若 s_i 与 s_k 是相容匹配,则将 s_k 中与 s_i 不同的匹配线段合并入 s_i , $\Theta := \Theta / s_k$;若 s_i 与 s_k 是完全相同匹配或不相容匹配,则 $\Theta := \Theta / s_k$ 。

步骤3 重复步骤1和步骤2,直至 Θ 中没有匹配线段组。

图2所示为Wadham学院基准图像集^[14]中一幅图像的特征线段匹配结果。图2a和图2b分别是本文算法和lmatch算法的结果。上方图像为在输入原图上标注的匹配结果,图中标注有数字的线段属于各匹配线段组;下方图像为局部放大图。由图可见,在本文算法匹配部分的结果中,建筑物外立面中大部分的线段都能在不同的图像中找到正确的匹配,lmatch算法虽然也可以找到正确的匹配结果,但匹配的线段数量较为稀疏,并且基本都是直边缘的线段,大门等存在弧形边缘的部分没有匹配线段结果。因此,本文方法得到的匹配线段组更为细致。

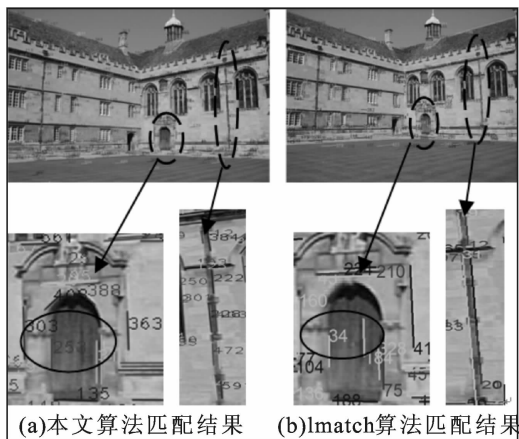


图2 多幅图像特征直线段匹配结果

1.2 空间三维线段重建

1.2.1 重建初始三维线段 下面以 $N(N \leq T)$ 幅图像重构为例,详述平面交线法^[12]重构三维线段的过程。假设有一组匹配线段组 $s_i = \{l_{1a}, l_{2b}, \dots, l_{Nd}\}$, N 幅图像对应的摄像机矩阵分别为 $P_1, P_2, \dots, P_N$ 。

首先,重建匹配线段组 s_i 对应的空间直线。经过线段 l_{ij} 的直线记作 I_{ij} ,由直线反向投影定义的平面是 $\pi_{ij} = P_i^T I_{ij}$, P_i^T 为 P_i 的转置。将 s_i 中的 N 条线段按照上述过程生成 N 个相互对应的平面 $\pi_{1a}, \pi_{2b}, \dots, \pi_{Nd}$ 。

N 条投影直线 $I_{1a}, I_{2b}, \dots, I_{Nd}$ 是由同一条空间直线 W (未知)产生的,所以 $\pi_{1a}, \pi_{2b}, \dots, \pi_{Nd}$ 交于这条公共的三维直线。这个相交约束可以描述为 $N \times N$ 的矩阵

$$A = \begin{bmatrix} \pi_{1a}^T \\ \pi_{2b}^T \\ \vdots \\ \pi_{Nd}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{1a}^T P_1 \\ I_{2b}^T P_2 \\ \vdots \\ I_{Nd}^T P_N \end{bmatrix}$$

若 $AV=0$,则点 V 在该重构直线 W 上。根据空间直线的平面表示方法^[12], A 的秩为2,可推出该重构直线 W 上的点可表示为 $V = \alpha \xi_0 + \beta \xi_1$,其中 ξ_0 和 ξ_1 是 A 的零空间的标准正交基。

得到了空间直线上任一点的表达方式,便可据此在重构直线上截取匹配线段组对应的空间线段。传统的做法通过最小化重投影误差之和,对该空间线段首尾端点的确切位置进行最大似然估计。由于不能保证准确提取到线段真实的首末端点,并且计算时存在累积误差,故最大似然估计的结果通常不理想。

针对上述缺陷,本文通过分段的方式得到三维空间线段,具体步骤如下。

步骤1 对一个匹配线段组中的一条线段,按照最大似然准则,求解对应的三维空间子线段。此时,每一条三维子线段都不受匹配线段组中其他线段位置的影响,与相应的图像线段是准确对应的。

匹配线段组中任一条线段对应的三维子线段都在 W 上,故可由 W 上的两点定义该空间线段的首尾端点。取 s_i 中的线段 l_{1a} ,设 l_{1a} 对应的三维子线段为 $W_{1a} = \{V_0, V_1\}$,其中 $V_0 = \alpha_0 \xi_0 + \beta_0 \xi_1, V_1 = \alpha_1 \xi_0 + \beta_1 \xi_1$ 。依据最大似然准则,最小化 W_{1a} 到图像1的投影与 l_{1a} 之间的重投影误差,得到每个参数的值。

步骤2 对匹配线段组 s_i 中的每一条线段都重复步骤1,直到所有线段都生成对应的空间三维线段。

步骤3 将以上得到的所有三维子线段按照首尾相接的方式连接起来,形成一段完整的与 s_i 相对应的空间三维线段,记作 W^* 。

步骤4 对 Θ^* 中的每一个匹配线段组都重复步骤1~步骤3,直到每一个匹配线段组都得到了其对应的空间三维线段。

建筑物三维重建的初始结果如图 3 所示。从图中已经可以看到建筑物的整体形状(共 630 条线段),但结果中还有一些错误的线段(图 3 中的黑色线段)需要在后续处理中去除。

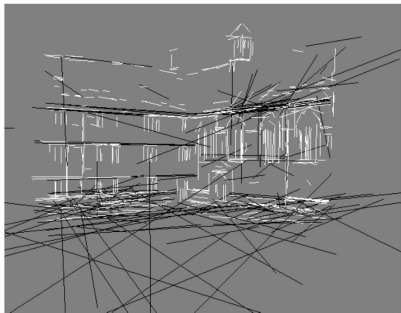


图 3 建筑物三维重建的初始结果

1.2.2 过滤初始三维线段 由于线段提取错误、线段匹配错误等原因,重建出的线段也会有错误,这些错误的线段称为“非期望假设”^[15]。本文通过各种约束对其剔除。

长度约束是限制空间线段的长度。有一类“非期望假设”的长度远大于组成建筑物的线段长度,因此可对空间线段的长度进行约束,将大于某一长度 d_0 的线段丢弃。如图 4 所示,图 4a 为图 3 经过长度约束后得到的结果(共 473 条线段)。

误差约束是控制重投影误差。计算某一匹配线段组对应的空间三维线段与匹配线段组中各线段之间的重投影误差之和,当误差小于阈值 d_1 时,该空间线段才能被保留。

角度约束是限制空间线段与空间平面的夹角大小。一般构建建筑物的线条方向主要集中在某几个方向,而“非期望假设”的方向却通常杂乱无章,可以通过同时约束三维线段到任意两个垂直平面的夹角,进一步剔除“非期望假设”。对夹角值分别进行分段统计,同时保留满足两种夹角值都占优(线段数最多)的空间线段。当加入的分段数目达到设定阈值 d_3 时停止。图 4b 为图 4a 经过角度约束后的效果,共 410 条线段。

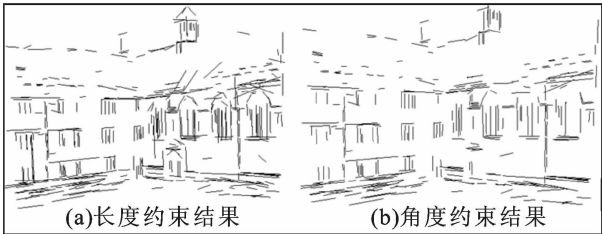


图 4 长度约束与角度约束后的结果

2 实验结果及分析

实验中的两个图像集均采用手持相机拍摄。角度约束时,两种夹角值都是按照每 15° 分一段。lmatch 算法的参数 DispRange 设置为 400。

2.1 实验结果

第一组实验重建具有平面状的建筑物外立面。使用西安交通大学化工楼图像集,共 33 幅大小为 $1\,028 \times 960$ 的图像,如图 5 所示。图 5a 为其中一幅图像;图 5b 和图 5c 分别为 lmatch 算法和本文算法的重建结果。实验中 d_0 为 2.5, d_1 为 15, d_2 为 2。由图可见,本文算法能清晰显示窗户的单元格构造,且组成建筑物的线段大部分都是相互平行或垂直的,没有过多“非期望假设”。lmatch 算法虽然也可以看到建筑物的整体结构,但是由于线段匹配的精确度不高,导致“非期望假设”丛生,在一定程度上掩盖了重建结果的主体结构。

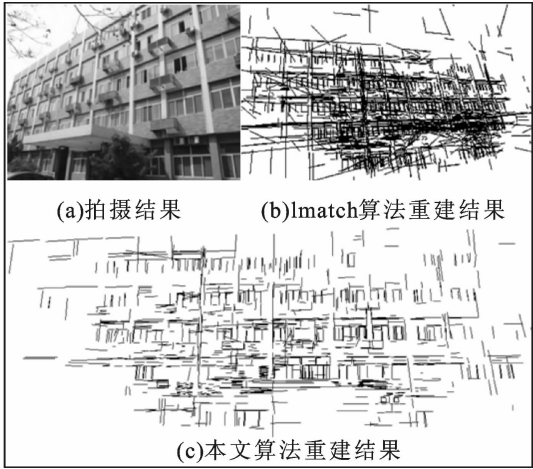


图 5 化工楼图像集结果

第二组实验重建具有多外立面的建筑物。使用清华大学理科楼图像集,共 49 幅大小为 $1\,092 \times 728$ 的图像。该楼是一个类 U 型的建筑物,共有 3 面,如图 6 所示。图 6a 为其中一幅图像,图 6b 和图 6c 分别为 lmatch 算法和本文算法的重建结果,实验中 d_0 为 2.5, d_1 为 22, d_2 为 3。由图可见,本文算法可较好地体现建筑的整体框架,而 lmatch 算法只重建了建筑物中的两个外立面,建筑物的整体结构都没有得到有效重建。由于图像集中有关左侧建筑部分的图像较多,因此在两种算法中该部分墙面的重建精度都会高一些。

2.2 参数分析

参数影响重建结果的线段数目。参数选择严格时,在剔除“非期望假设”的同时也会损失一部分组

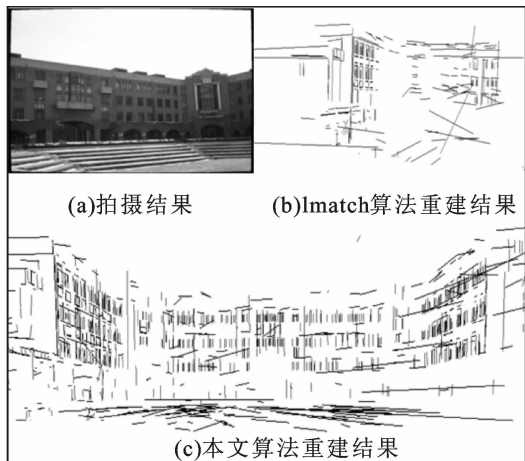
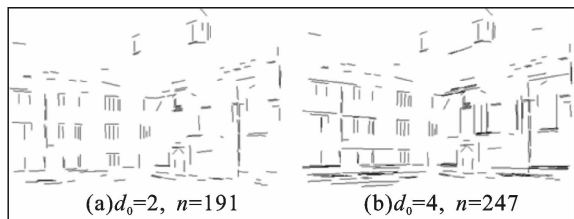


图6 理科楼图像集结果

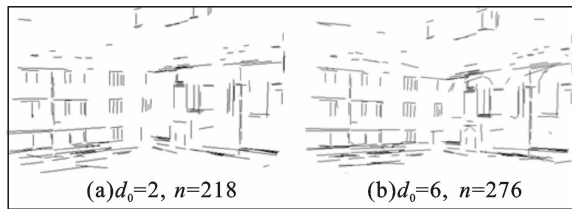
成建筑物结构的线段,最终重建结果中的线段数目也会较少。反之,如果约束过于宽松,较完整的三维模型结构也会淹没在杂乱无章的“非期望假设”中。

参数 d_0 和 d_2 是两个较为重要的参数, d_0 的确定主要依据组成建筑物的线段长短,若建筑物主要由较连贯的、长度较大的线段组成, d_0 的取值可以稍大;反之, d_0 的取值稍小为宜。一般情况下 d_0 的取值在 2~5 之间。如图 7 所示,以 Wadham 大学基准图像集为例,显示了 d_0 取值的变化对重建结果的影响,其中 n 为各重建结果中的线段数目,实验中保持 $d_1=17.5$, $d_2=4$ 不变。该图像集的原始重建结果经过 d_1 和 d_2 的约束得到 305 条线段, d_0 的约束会进一步减少这些线段,而随着 d_0 取值的增大,图中水平和竖直线条渐渐增多,房屋的框架、窗体等结构也慢慢清晰。

图7 d_0 变化对重建结果的影响

d_2 的确定依据建筑物的主要结构,若建筑物的构造比较规整,主要由相互垂直的线段组成, d_2 可设置小一些,以便滤除更多的“非期望假设”;若建筑物中还有较多的曲线、斜线等方向的线条,稍大些的 d_2 可保留更多的建筑物细节线条。 d_2 的取值范围一般是 2~4 之间的整数。如图 8 所示,以 Wadham 大学基准图像集为例,显示了 d_2 取值的变化对重建结果的影响,其中 n 为各重建结果中的线段数目,实验中保持 $d_0=5$, $d_1=17.5$ 不变。由实验结果可以

看出,随着 d_2 取值的增大,角度约束放松,图中斜线增多,右侧墙壁窗子上方的装饰、房顶烟囱的尖顶等都渐渐显现。

图8 d_2 变化对重建结果的影响

若三维重建的效果已经较为满意,则对 d_1 稍加约束即可。该参数对线段数量和建筑物结构的影响没有前两个参数明显。

3 结 论

针对建筑物三维线段模型重建问题,本文结合准确度更高的双视图线段匹配算法,在没有任何几何先验的条件下,对任意幅输入图像进行更精确的线段匹配,三维线段的重建过程也不再因为匹配线段之间的位置干扰而受到影响。实验结果表明,本文算法对于具有单一平面状外立面及具有多外立面的建筑物都有良好的重建结果。

参考文献:

- [1] CHEN Tingwang, WANG Qing. 3D line segment detection for unorganized point clouds from multi-view stereo [C]//Proceedings of the 10th Asian Conference on Computer Vision. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2011: 400-411.
- [2] 彭亚丽,刘芳,刘待刚. 一维子空间的三维重建方法[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 31-34.
PENG Yali, LIU Fang, LIU Shigang. 3D reconstruction method with 1D subspace [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(12): 31-34.
- [3] PARK J S. Interactive 3D reconstruction from multiple images: a primitive-based approach [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(16): 2558-2571.
- [4] von GIOI R G, 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.
- [5] SCHMID C, ZISSEMAN A. Automatic line matching across views [C]//Proceedings of the 1977 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and

(下转第 25 页)