



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111724446 B

(45) 授权公告日 2023.05.02

(21) 申请号 202010431827.3

(22) 申请日 2020.05.20

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111724446 A

(43) 申请公布日 2020.09.29

(73) 专利权人 同济大学
地址 200092 上海市杨浦区四平路1239号

(72) 发明人 刘超 许博强

(74) 专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225
专利代理师 杨宏泰

(51) Int. Cl.
G06T 7/80 (2017.01)
G06T 7/13 (2017.01)
G06T 17/00 (2006.01)
G06F 30/20 (2020.01)
G06F 30/13 (2020.01)

(56) 对比文件
CN 104809755 A, 2015.07.29
CN 107014312 A, 2017.08.04
CN 106327532 A, 2017.01.11
CN 104835159 A, 2015.08.12

JP 2018189580 A, 2018.11.29

US 8059154 B1, 2011.11.15

WO 2004106856 A1, 2004.12.09

穆晓等. Canny. 《数字图像处理技术》. 煤炭工业出版社, 2009, 第293-306页.

陆永耕等. Hough. 《工业技术原理概论》. 北京航空航天大学出版社, 2019, 第181-185页.

王思洁等. 基于结构化场景的单幅图像建筑物三维重建. 《地球信息科学学报》. 2016, (第08期),

付化胜. 基于单张图像的建筑物三维重建. 《中小企业管理与科技(中旬刊)》. 2016, (第07期),

余焯等. 面向建筑物重建的相机标定方法研究. 《图学学报》. 2012, (第04期),

张祖勋等. 建筑场景三维重建中影像方位元素的获取方法. 《武汉大学学报·信息学版》. 2004,

E. Guillou. Using vanishing points for camera calibration and coarse 3D reconstruction. 《The Visual Computer》. 2000, 第396-410页.

审查员 韩笑笑

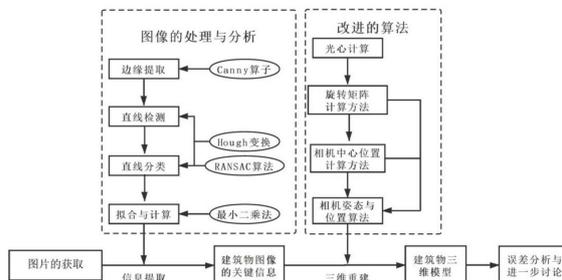
权利要求书3页 说明书15页 附图12页

(54) 发明名称

一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法

(57) 摘要

本发明涉及一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法, 包括以下步骤: 1) 利用数字图像处理技术对图像进行处理, 提取灭点在图像像素坐标系下的坐标; 2) 通过构建三个坐标系进行相机外参数标定; 3) 将标定结果用于三维重建中, 进行稀疏点云重建与密集点云重建。与现有技术相比, 本发明具有大大减少计算量、减少相机内部参数在使用过程中发生改变带来的误差、精确度高、鲁棒性好等优点。



CN 111724446 B

1. 一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法,其特征在于,包括以下步骤:

- 1) 利用数字图像处理技术对图像进行处理,提取灭点在图像像素坐标系下的坐标;
- 2) 通过构建三个坐标系进行相机外参数标定;
- 3) 将标定结果用于三维重建中,进行稀疏点云重建与密集点云重建;

所述的步骤1)具体包括以下步骤:

- 11) 利用Canny算子进行边缘检测;
- 12) 采用Hough变换提取边缘检测结果中的直线;

13) 通过二次Hough变换进行直线分类,得到在图像像素坐标系中对应现实坐标系中三个方向的直线集合;

14) 将步骤13)中得到的三个方向的直线集合对应的参数点集进行线性拟合,获得图像像素坐标系下三个灭点 V_1 、 V_2 、 V_3 的坐标;

所述的步骤2)具体包括以下步骤:

21) 将三个灭点在图像像素坐标系的坐标 (u, v) 按以下公式转换为在图像物理坐标系下的坐标 (x, y) ,则有:

$$\begin{cases} x = d(u - u_0) \\ y = d(v - v_0) \end{cases}$$

其中, d 为 x 、 y 方向像素点的宽度, (u_0, v_0) 为图像物理坐标系原点在图像像素坐标系下的坐标;

22) 分别构建建筑物坐标系 α_1 、第二直角坐标系 α_2 和投影平面坐标系 α_3 ,所述的建筑物坐标系 α_1 以建筑物表面一点作为原点,以建筑物相互垂直的三个方向为坐标轴,所述的第二直角坐标系 α_2 以照相机光心 S 为原点,并且照相机光心 S 分别与三个灭点 V_1 、 V_2 、 V_3 的连线 SV_1 、 SV_2 、 SV_3 均与建筑物坐标系 α_1 中的三个坐标轴平行,所述的投影平面坐标系 α_3 的 x 、 y 轴与图像物理坐标系的 x 、 y 轴重合,其 z 轴方向垂直于投影平面;

23) 根据建筑物坐标系 α_1 到第二直角坐标系 α_2 的转换矩阵 $K_{1 \rightarrow 2}$ 以及第二直角坐标系 α_2 到投影平面坐标系 α_3 的转换矩阵 $K_{2 \rightarrow 3}$,计算建筑物坐标系 α_1 到投影平面坐标系 α_3 的转换矩阵 $K_{1 \rightarrow 3}$,则有:

$$K_{1 \rightarrow 3} = K_{2 \rightarrow 3} \cdot K_{1 \rightarrow 2};$$

24) 根据转换矩阵 $K_{1 \rightarrow 3}$ 获取照相机光心 S 在建筑物坐标系 α_1 下的坐标,完成相机外参数标定。

2. 根据权利要求1所述的一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法,其特征在于,所述的步骤11)具体包括以下步骤:

- 111) 读取输入的图像并转换成灰度图,再进行高斯平滑处理;
- 112) 根据梯度幅度和方向估计每一点处的边缘强度与方向;
- 113) 根据梯度方向,对梯度幅值进行非极大值抑制;
- 114) 采用双阈值处理和连接边缘完成边缘检测。

3. 根据权利要求1所述的一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法,其

特征在于,所述的步骤12)具体包括以下步骤:

121) 对于图像中的每一点 (x_i, y_i) ,过其任意一条线,用法线式 $x_i \cos \theta + y_i \sin \theta = \rho$ 表示,其中,参数 (ρ, θ) 在几何上分别表示直线与x轴的夹角和原点到该直线的距离;

122) 将参数 (ρ, θ) 划分成离散单元,初始时刻每个离散单元对应的累加器数量为0,当每有一条经过离散单元的曲线,则在该离散单元对应的累加器上加1;

123) 当遍历图像的全部点之后,对整个离散单元空间取极大值对应的参数 (ρ, θ) ,则累加器数量最多的离散单元对应被检测出的直线。

4. 根据权利要求1所述的一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法,其特征在于,所述的步骤12)中,为防止出现过短的直线,设定一个与相同的Hough变换相关的两条线段的距离阈值 val_1 ,当两条线段之间的距离小于设定的距离阈值 val_1 时,则将两条线段合并为一条线段,并对合并之后的线段,设定一个线段最小长度阈值 val_2 ,如果合并后的线段比最小长度阈值 val_2 短,则丢弃。

5. 根据权利要求1所述的一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法,其特征在于,所述的步骤13)中,将步骤12)中提取出直线的方程中的参数转换成坐标点,并作为图像中的点进行Hough变换。

6. 根据权利要求1所述的一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法,其特征在于,所述的步骤23)中,建筑物坐标系 α_1 到第二直角坐标系 α_2 的转换矩阵为 $K_{1 \rightarrow 2}$ 的表达式为:

$$K_{1 \rightarrow 2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_S^{(1)} \\ 0 & 1 & 0 & -y_S^{(1)} \\ 0 & 0 & 1 & -z_S^{(1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

其中, $\begin{pmatrix} x_S^{(1)} \\ y_S^{(1)} \\ z_S^{(1)} \end{pmatrix}$ 为照相机光心S在建筑物坐标系 α_1 中的坐标。

7. 根据权利要求1所述的一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法,其特征在于,所述的步骤23)中,第二直角坐标系 α_2 到投影平面坐标系 α_3 的转换矩阵 $K_{2 \rightarrow 3}$ 的表达式为:

$$K_{2 \rightarrow 3} = \begin{pmatrix} & & & 0 \\ & R_{2 \rightarrow 3} & & 0 \\ & & & -f'd \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$f' = f/d$$

$$f = z_S$$

$$R_{2 \rightarrow 3} = \begin{pmatrix} \frac{u'_1}{\sqrt{(u_1 - u_2)(u_1 - u_3) + (v_1 - v_2)(v_1 - v_3)}} & \frac{u'_2}{\sqrt{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3) + (v_2 - v_1)(v_2 - v_3)}} & \frac{u'_3}{\sqrt{(u_3 - u_1)(u_3 - u_2) + (v_3 - v_1)(v_3 - v_2)}} \\ \frac{v'_1}{\sqrt{(u_1 - u_2)(u_1 - u_3) + (v_1 - v_2)(v_1 - v_3)}} & \frac{v'_2}{\sqrt{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3) + (v_2 - v_1)(v_2 - v_3)}} & \frac{v'_3}{\sqrt{(u_3 - u_1)(u_3 - u_2) + (v_3 - v_1)(v_3 - v_2)}} \\ -\sqrt{\frac{(u'_1 u'_3 - u'_2 u'_3) + (v'_1 v'_3 - v'_2 v'_3)}{(u_1 - u_2)(u_1 - u_3) + (v_1 - v_2)(v_1 - v_3)}} & -\sqrt{\frac{(u'_1 u'_3 - u'_2 u'_3) + (v'_1 v'_3 - v'_2 v'_3)}{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3) + (v_2 - v_1)(v_2 - v_3)}} & -\sqrt{\frac{(u'_1 u'_3 - u'_2 u'_3) + (v'_1 v'_3 - v'_2 v'_3)}{(u_3 - u_1)(u_3 - u_2) + (v_3 - v_1)(v_3 - v_2)}} \end{pmatrix}$$

$$u'_i = u_i - u_0, v'_i = v_i - v_0 \quad (i = 1, 2, 3)$$

其中, (u_i, v_i) 分别为图像物理坐标系下第 i 个灭点的像素坐标, d 为 x 、 y 方向像素点的宽度, $R_{2 \rightarrow 3}$ 为投影平面坐标系 α_3 的投影平面在建筑物坐标系 α_1 下的法向量对应的旋转矩阵, z_s 为照相机光心 S 到投影平面的距离, f 为焦距。

8. 根据权利要求 7 所述的一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法, 其特征在于, 所述的步骤 24) 中, 根据三个灭点在图像像素坐标系的坐标、旋转矩阵 $K_{1 \rightarrow 3}$ 和参数 f' 构建关于照相机光心 S 在建筑物坐标系 α_1 中的坐标方程, 当已知至少两组建筑物坐标系 α_1 的点与图像像素坐标系坐标时, 采用最小二乘法求解得到照相机光心 S 在建筑物坐标系 α_1 下的坐标 (x_s, y_s, z_s) 的最小二乘解。

一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法

技术领域

[0001] 本发明涉及计算机视觉的建筑物三维重建技术领域,尤其是涉及一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法。

背景技术

[0002] 基于计算机视觉的三维重建技术在土木工程中对结构的检查损伤、评估破坏以及施工监控等方面取得了提供了很大的便利,然而,目前基于计算机视觉的对建筑物的三维重建在具体实施的过程中存在以下几个方面的问题,一是利用传统的特征匹配-稀疏重建-密集重建的方法对计算机性能的要求较高,对于普通计算机来说,计算量超出了可承受的范围,这对实际应用以及研究工作带来了一些困难,二是随着技术的进步,越来越多的拍摄设备可以进行自动对焦,自动对焦使得相机的内参数发生了改变,另外在一些极端环境下,内参数也会改变,而传统的三维重建技术需要事先对相机的内参数进行标定,并利用这些参数,拍摄过程中内参数的变化会使得结果不精确甚至重建失败。

[0003] 经过对现有技术的文献检索发现,通常的三维重建专利方法都是通性的,针对一般的物体,中国专利CN105389845B“三维重建的图像获取方法和系统、三维重建方法和系统”,提供了用于三维重建的图像的获取方法和系统、三维重建方法和系统,用于三维重建的图像的获取方法包括:控制在空间上分离设置的至少两个光源中的每个光源的亮度周期性地变化,其中至少两个光源中至少有一个光源的亮度变化的周期与其他光源不同,或者所述至少两个光源的亮度变化的周期相同、且其中至少有一个光源的亮度变化的相位与其他光源不同;以及采用在空间上位置不同的至少三个摄像头分别采集用于三维重建的图像,其中至少有一个摄像头进行采集的开始曝光时间与其他摄像头不同。

[0004] 中国专利CN105205862B“一种图像三维重建方法及系统”提出一种图像三维重建方法及系统,所述方法包括:对原图像进行预处理,生成第一分辨率二维图像;对第一分辨率二维图像进行重采样,生成比第一分辨率二维图像的分辨率低的第二分辨率二维图像;对第二分辨率二维图像的序列进行三维重建,形成三维重建图像,并在三维重建图像中裁剪出由多个块状图像组成三维重建体的感兴趣区域;计算感兴趣区域的坐标、宽和高,并计算三维重建体图像序列中的起始帧和终止帧;根据计算的结果对第一分辨率二维图像的序列逐个进行处理,得到多个块状图像序列;对多个块状图像序列进行三维重建,得到感兴趣区域的预览。

[0005] 已有的专利中还没有提出建筑物的高效与高适应性的三维重建方法,没有有效利用建筑物几何特点来提高计算效率,且对拍摄各图片事的相机焦距要求保持不变,无法对变焦距的情形进行三维重建。

发明内容

[0006] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法。

- [0007] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现：
- [0008] 一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法，包括以下步骤：
- [0009] 1) 利用数字图像处理技术对图像进行处理，提取灭点在图像像素坐标系下的坐标；
- [0010] 2) 通过构建三个坐标系进行相机外参数标定；
- [0011] 3) 将标定结果用于三维重建中，进行稀疏点云重建与密集点云重建。
- [0012] 所述的步骤1) 具体包括以下步骤：
- [0013] 11) 利用Canny算子进行边缘检测；
- [0014] 12) 采用Hough变换提取边缘检测结果中的直线；
- [0015] 13) 通过二次Hough变换进行直线分类，得到在图像像素坐标系中对应现实坐标系中三个方向的直线集合；
- [0016] 14) 将步骤13) 中得到的三个方向的直线集合对应的参数点集进行线性拟合，获得图像像素坐标系下三个灭点 V_1 、 V_2 、 V_3 的坐标。
- [0017] 所述的步骤11) 具体包括以下步骤：
- [0018] 111) 读取输入的图像并转换成灰度图，再进行高斯平滑处理；
- [0019] 112) 根据梯度幅度和方向估计每一点处的边缘强度与方向；
- [0020] 113) 根据梯度方向，对梯度幅值进行非极大值抑制；
- [0021] 114) 采用双阈值处理和连接边缘完成边缘检测。
- [0022] 所述的步骤12) 具体包括以下步骤：
- [0023] 121) 对于图像中的每一点 (x_i, y_i) ，过其任意一条线，用法线式 $x_i \cos\theta + y_i \sin\theta = \rho$ 表示，其中，参数 (ρ, θ) 在几何上分别表示直线与x轴的夹角和原点到该直线的距离；
- [0024] 122) 将参数 (ρ, θ) 划分成离散单元，初始时刻每个离散单元对应的累加器数量为0，当每有一条经过离散单元的曲线，则在该离散单元对应的累加器上加1；
- [0025] 123) 当遍历图像的全部点之后，对整个离散单元空间取极大值对应的参数 (ρ, θ) ，则累加器数量最多的离散单元对应被检测出的直线。
- [0026] 所述的步骤12) 中，为防止出现过短的直线，设定一个与相同的Hough变换相关的两条线段的距离阈值 val_1 ，当两条线段之间的距离小于设定的距离阈值 val_1 时，则将两条线段合并为一条线段，并对合并之后的线段，设定一个线段最小长度阈值 val_2 ，如果合并后的线段比最小长度阈值 val_2 短，则丢弃。
- [0027] 所述的步骤13) 中，将步骤12) 中提取出直线的方程中的参数转换成坐标点，并作为图像中的点进行Hough变换。
- [0028] 所述的步骤2) 具体包括以下步骤：
- [0029] 21) 将三个灭点在图像像素坐标系的坐标 (u, v) 按以下公式转换为在图像物理坐标系下的坐标 (x, y) ，则有：

$$[0030] \quad \begin{cases} x = d(u - u_0) \\ y = d(v - v_0) \end{cases}$$

- [0031] 其中， (u_0, v_0) 为图像物理坐标系原点在图像像素坐标系下的坐标；

[0032] 22) 分别构建建筑物坐标系 α_1 、第二直角坐标系 α_2 和投影平面坐标系 α_3 ,所述的建筑物坐标系 α_1 以建筑物表面一点作为原点,以建筑物相互垂直的三个方向为坐标轴,所述的第二直角坐标系 α_2 以照相机光心S为原点,并且照相机光心S分别与三个灭点 V_1 、 V_2 、 V_3 的连线 SV_1 、 SV_2 、 SV_3 均与建筑物坐标系 α_1 中的三个坐标轴平行,所述的投影平面坐标系 α_3 的x、y轴与图像物理坐标系的x、y轴重合,其z轴方向垂直于投影平面;

[0033] 23) 根据建筑物坐标系 α_1 到第二直角坐标系 α_2 的转换矩阵 $K_{1 \rightarrow 2}$ 以及第二直角坐标系 α_2 到投影平面坐标系 α_3 的转换矩阵 $K_{2 \rightarrow 3}$,计算建筑物坐标系 α_1 到投影平面坐标系 α_3 的转换矩阵 $K_{1 \rightarrow 3}$,则有:

$$[0034] \quad K_{1 \rightarrow 3} = K_{2 \rightarrow 3} \cdot K_{1 \rightarrow 2};$$

[0035] 24) 根据转换矩阵 $K_{1 \rightarrow 3}$ 获取照相机光心S在建筑物坐标系 α_1 下的坐标,完成相机外参数标定。

[0036] 所述的步骤23)中,建筑物坐标系 α_1 到第二直角坐标系 α_2 的转换矩阵为 $K_{1 \rightarrow 2}$ 的表达式为:

$$[0037] \quad K_{1 \rightarrow 2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_S^{(1)} \\ 0 & 1 & 0 & -y_S^{(1)} \\ 0 & 0 & 1 & -z_S^{(1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

[0038] 其中, $\begin{pmatrix} x_S^{(1)} \\ y_S^{(1)} \\ z_S^{(1)} \end{pmatrix}$ 为照相机光心S在建筑物坐标系 α_1 中的坐标;

[0039] 所述的步骤23)中,第二直角坐标系 α_2 到投影平面坐标系 α_3 的转换矩阵 $K_{2 \rightarrow 3}$ 的表达式为:

$$[0040] \quad K_{2 \rightarrow 3} = \begin{pmatrix} & & & 0 \\ & R_{2 \rightarrow 3} & & 0 \\ & & & -f'd \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$[0041] \quad f' = f/d$$

$$[0042] \quad f = z_S$$

$$[0043] \quad R_{2 \rightarrow 3} = \begin{pmatrix} \frac{u'_1}{\sqrt{(u_1 - u_2)(u_1 - u_3) + (v_1 - v_2)(v_1 - v_3)}} & \frac{u'_2}{\sqrt{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3) + (v_2 - v_1)(v_2 - v_3)}} & \frac{u'_3}{\sqrt{(u_3 - u_1)(u_3 - u_2) + (v_3 - v_1)(v_3 - v_2)}} \\ \frac{v'_1}{\sqrt{(u_1 - u_2)(u_1 - u_3) + (v_1 - v_2)(v_1 - v_3)}} & \frac{v'_2}{\sqrt{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3) + (v_2 - v_1)(v_2 - v_3)}} & \frac{v'_3}{\sqrt{(u_3 - u_1)(u_3 - u_2) + (v_3 - v_1)(v_3 - v_2)}} \\ -\sqrt{\frac{(u'_3 u'_2 - u'_3 u'_1 - u'_2 u'_3) + (v'_2 v'_3 - v'_2 v'_1 - v'_3 v'_2)}{(u_1 - u_2)(u_1 - u_3) + (v_1 - v_2)(v_1 - v_3)}} & -\sqrt{\frac{(u'_1 u'_3 - u'_2 u'_1 - u'_2 u'_3) + (v'_2 v'_3 - v'_2 v'_1 - v'_3 v'_2)}{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3) + (v_2 - v_1)(v_2 - v_3)}} & -\sqrt{\frac{(u'_1 u'_2 - u'_3 u'_1 - u'_3 u'_2) + (v'_1 v'_2 - v'_3 v'_1 - v'_3 v'_2)}{(u_3 - u_1)(u_3 - u_2) + (v_3 - v_1)(v_3 - v_2)}} \end{pmatrix}$$

$$[0044] \quad u'_i = u_i - u_0, v'_i = v_i - v_0 \quad (i = 1, 2, 3)$$

[0045] 其中, (u_i, v_i) 分别为图像物理坐标系下第i个灭点的像素坐标,d为x、y方向像素点的宽度, $R_{2 \rightarrow 3}$ 为投影平面坐标系 α_3 的投影平面在建筑物坐标系 α_1 下的法向量对应的旋转矩阵, z_S 为照相机光心S到投影平面的距离,f为焦距。

[0046] 所述的步骤24)中,根据三个灭点在图像像素坐标系的坐标、旋转矩阵 $K_{1 \rightarrow 3}$ 和参数 f' 构建关于照相机光心S在建筑物坐标系 α_1 中的坐标方程,当已知至少两组建筑物坐标系 α_1 的点与图像像素坐标系坐标时,采用最小二乘法求解得到照相机光心S在建筑物坐标系 α_1 下的坐标 (x_S, y_S, z_S) 的最小二乘解。

[0047] 与现有技术相比,本发明具有以下优点:

[0048] 本发明在建筑物场景下,能够有效利用民用建筑图片中的几何关系,基于数字图像处理技术提出了一种三维重建的方法,该方法可以大大减少计算量,使得三维重建在普通计算机上也可以实现,同时,由于不需要进行相机标定,从而能够减少相机内部参数在使用过程中发生改变带来的误差,具有较高的精度,另外,本发明还给出了实现算法的基于数字图像处理的具体策略,该方法精确度高,鲁棒性好,且高度自动化,几乎不需要手动操作。

附图说明

[0049] 图1为照相机成像原理示意图。

[0050] 图2为透视投影中的灭点。

[0051] 图3为 α_1 、 α_2 坐标系示意图。

[0052] 图4为像素坐标系与物理坐标系的关系。

[0053] 图5为 α_2 、 α_3 坐标系示意图。

[0054] 图6为三灭点与照相机中心的几何关系示意图。

[0055] 图7为建筑图图像中的控制点。

[0056] 图8为本发明的方法流程图。

[0057] 图9为Canny边缘检测结果,其中,图(9a)为原图,图(9b)为Canny边缘检测结果图。

[0058] 图10为Hough变换后 (ρ, θ) 参数空间上的累加值,其中,图(10a)为三维视图,图(10b)为x0y方向俯视图。

[0059] 图11为直线检测最终结果。

[0060] 图12为直线对应的参数在参数空间中的分布,其中,图(12a)为 (ρ, θ) 参数空间中的参数点,图(12b)为(A,B)参数空间中的参数点。

[0061] 图13为Hough变换后 (ρ, θ) 参数空间上的累加值,其中,图(13a)为三维视图,图(13b)为x0y方向俯视图。

[0062] 图14为Hough变换后的三个点集的拟合直线解析式与相关系数,其中,图(14a)为第一方向的拟合直线解析式与相关系数,图(14b)为第二方向的拟合直线解析式与相关系数,图(14c)为第三方向的拟合直线解析式与相关系数。

[0063] 图15为图像中三个灭点及其垂心与图像的关系,其中,图(15a)为灭点与图像中的直线(整体),图(15b)为灭点与图像中的直线(局部),图(15c)为灭点与垂心。

[0064] 图16为利用Harris角点检测算法得到的角点。

[0065] 图17为多幅实地采集图像。

[0066] 图18为重建密集点云模型。

具体实施方式

[0067] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0068] 如图8所示,本发明提供一种用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法,包括以下步骤:

[0069] 1)利用数字图像处理技术对图像进行处理,提取其中的关键信息;

[0070] 2)利用本专利中提出的新算法对相机外参数进行求解;

[0071] 3)将标定结果用于三维重建中,进行稀疏点云重建与密集点云重建。

[0072] 各步骤的细节说明如下:

[0073] 步骤1)利用数字图像处理技术提取信息的具体步骤为:

[0074] 11)利用Canny算子进行边缘检测,步骤如下:

[0075] 1、读取图像,转换成灰度图,再对输入图像进行高斯平滑。

[0076] 2、计算梯度幅度和方向来估计每一点处的边缘强度与方向。

[0077] 3、根据梯度方向,对梯度幅值进行非极大值抑制。

[0078] 4、用双阈值处理和连接边缘。

[0079] 12)Hough变换提取上一步中的直线,步骤如下:

[0080] 1、对于图像中的每一点 (x_i, y_i) ,过其任意一条线,用法线式 $x_i \cos \theta + y_i \sin \theta = \rho$ 表示,其中参数 (ρ, θ) 在几何上分别表示直线与x轴的夹角和原点到该直线的距离, (ρ, θ) 在参数空间表达的是一条正弦曲线。

[0081] 2、将 (ρ, θ) 划分成离散单元,一开始每个单元对应的累加器数量为0,每有一条经过单元的曲线,会在该单元对应的累加器上加1。

[0082] 3、当上述过程遍历图像的全部之后,对整个离散单元空间取极大值对应的 (ρ, θ) ,这些累加器数量最多的单元对应的就是被检测出的直线。

[0083] 13)二次Hough变换进行直线分类

[0084] 建筑物轮廓对应的直线有三个方向,这三个方向对应的方向分类可以再次利用Hough变换实现,此步骤由本发明首次提出,具体为:

[0085] 在步骤12)中,利用Hough变换得到了各个直线的 (ρ, θ) 值,每个 (ρ_i, θ_i) 对应的直线方程 $\cos \theta_i x + \sin \theta_i y = \rho$

[0086] 即为:

$$[0087] \quad \frac{\cos \theta_i}{\rho_i} x + \frac{\sin \theta_i}{\rho_i} y = 1$$

[0088] 记 $\frac{\cos \theta_i}{\rho_i} = A_i, \frac{\sin \theta_i}{\rho_i} = B_i$,则上式可表达为:

$$[0089] \quad A_i \cdot x + B_i \cdot y = 1$$

[0090] 由照相机投影的原理,现实中相互平行的直线在图像中都会相交于同一点,即灭点。对于相交于同一点的直线,即同一组直线,假设它们都经过点 (x_v, y_v) ,那么这些直线都满足 $A_j \cdot x_v + B_j \cdot y_v = 1$,j取这组直线对应的所有编号。对于同一组直线,这里的 (x_v, y_v) 是一个固定的坐标值,在 $A_j \cdot x_v + B_j \cdot y_v = 1$ 中直线方程中x、y的系数(A,B)的参数空间中都在同一条直线 $x_v \cdot A + y_v \cdot B = 1$ 上,假设没有噪音,三个方向的三个灭点对应了三条直线,那么参数空间(A,B)上对应的点应当聚集在三条直线附近。

[0091] 对这三条直线的检测再使用Hough变换,将坐标系中的点也看作是图像中的点,利用Hough变换将这三条直线对应的点集提取出来,步骤与前面相同。

[0092] 14)拟合得到灭点

[0093] 将步骤13)中得到的三个方向对应的点集进行线性拟合,拟合出的直线方程前的系数就是三个灭点的坐标。

[0094] 步骤2)利用新算法进行外参数标定的过程为:

[0095] 如图1所示,普通相机成像原理都符合透视投影的模型,即拍照所得到的相片是从某个投射中心将物体投射到单一投影面上所得到的图形,所以成像满足透视投影的相关理论

[0096] 如图2所示,根据射影几何的理论,在透视投影中,一束平行于投影面的平行线的投影可以保持平行,而不平行于投影面的平行线的投影会聚集到一个点,这个点即为灭点。本步骤给出一种基于通过三个两两正交方向对应灭点来估计摄像机姿态的方法。

[0097] 如图3所示,在建筑物表面选取一个点作为原点,假设建筑物的三个相互垂直的三个方向形成的直角坐标系为 α_1 ,显然,照相机光心 S 与 α_1 的 x, y, z 方向对应的灭点 V_1, V_2, V_3 的连线 SV_1, SV_2, SV_3 与 α_1 中的三个坐标轴平行,所以 SV_1, SV_2, SV_3 也两两垂直,他们也构成了一个直角坐标系,记为 α_2 。

[0098] 由几何学知识可知,对于只有平移和旋转的两个坐标系,同一个点在两个坐标系中的点 $(x_A, y_A, z_A)^T$ 与 $(x_B, y_B, z_B)^T$ 之间有如下转换关系:

$$[0099] \quad \begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{pmatrix} = K_{A \rightarrow B} \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

[0100] 其中

$$[0101] \quad K_{A \rightarrow B} = \begin{pmatrix} R_{A \rightarrow B} & t_{A \rightarrow B} \\ O & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

[0102] $R_{A \rightarrow B}$ 是 3×3 的旋转矩阵, $t_{A \rightarrow B}$ 是 3×1 的平移矩阵, O 是 1×3 的零矩阵。

[0103] 当两个坐标系 α_1 与 α_2 采用相同的度量,所以两个坐标系之间的转换矩阵符合上述描述。

[0104] 假设在 α_1 坐标系中,光心 S 的坐标为:

$$[0105] \quad S: \begin{pmatrix} x_S^{(1)} \\ y_S^{(1)} \\ z_S^{(1)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

[0106] 由于对应的坐标系是平行的,故两个坐标系是平移变换得到的,那么坐标系 α_1 到坐标系 α_2 的转换矩阵为 $K_{1 \rightarrow 2}$:

$$[0107] \quad K_{1 \rightarrow 2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_S^{(1)} \\ 0 & 1 & 0 & -y_S^{(1)} \\ 0 & 0 & 1 & -z_S^{(1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

[0108] 如图4所示,在摄影测量学中,图像坐标系分为图像像素坐标系(u,v)和图像物理坐标系(x,y)两种,其定义分别为:

[0109] (1) 图像像素坐标系(u,v)

[0110] 图像像素坐标系是以图像某个角点为原点,以像素为坐标单位的直角坐标系。u、v表示该像素在数字图像中的行或列数。

[0111] (2) 图像物理坐标系(x,y)

[0112] 图像物理坐标系是以光轴与像平面的交点为原点,以毫米为单位的直角坐标系。其x、y轴分别与图像像素坐标系的u、v轴平行。

[0113] 则两个坐标系的转换关系用矩阵形式表示,表达为:

$$[0114] \quad \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dx & 0 & -u_0 \cdot dx \\ 0 & dy & -v_0 \cdot dy \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

[0115] 其中,dx与dy为x、y方向的像素点的宽度,通常情况下,像素点是正方形的,也即dx=dy=d,故在此情况下(5)等价于:

$$[0116] \quad \begin{cases} x = d(u - u_0) \\ y = d(v - v_0) \end{cases} \quad (6)$$

[0117] 步骤2中, α_1 坐标系的三个坐标轴方向在照片中对应的灭点在像素坐标系已经获得。

[0118] 由于最终得到的坐标信息是图像像素坐标系的,为了与之建立起联系,考虑将上述的坐标系 α_2 转换成投影平面上的坐标系 α_3 ,使得 α_3 的x、y轴与图像物理坐标系的x、y轴重合,GS方向为z轴方向建立 α_3 坐标系,如图5所示。

[0119] 类似 α_1 和 α_2 坐标系之间的转换,假设 α_2 和 α_3 坐标系之间的转换矩阵为 $K_{2 \rightarrow 3}$,即:

$$[0120] \quad K_{2 \rightarrow 3} = \begin{pmatrix} R_{2 \rightarrow 3} & t_{2 \rightarrow 3} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

[0121] 假设 V_1 、 V_2 、 V_3 、S在 α_2 坐标系中的坐标为 $V_1^{(2)}$ 、 $V_2^{(2)}$ 、 $V_3^{(2)}$ 、 $S^{(2)}$,由于 V_1 、 V_2 、 V_3 在三个坐标轴上,S在原点上,所以这四个点坐标为:

$$[0122] \quad (V_1^{(2)}, V_2^{(2)}, V_3^{(2)}, S^{(2)}) = \begin{pmatrix} SV_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & SV_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & SV_3 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

[0123] 对于 α_3 坐标系中的点 V_1, V_2, V_3 ,它们都在 xOy 平面上, z 坐标为0, S 在 z 轴上, x, y 坐标为0,故这四个点的坐标可以表示为:

$$[0124] \quad (V_1^{(3)}, V_2^{(3)}, V_3^{(3)}, S^{(3)}) = \begin{pmatrix} x_{V_1} & x_{V_2} & x_{V_3} & 0 \\ y_{V_1} & y_{V_2} & y_{V_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & z_S \end{pmatrix} \quad (9)$$

[0125] 根据式(6)中的转换关系,可得 $x_{V_i} = d(u_i - u_0), i = 1, 2, 3$;

[0126] 注意到,由于获取图片信息的时候是以像素点为单位的,所以 α_3 坐标系的坐标需要通过与相片坐标系中的坐标转换得到,显然, z_S 即光心到投影平面的距离,就是照相机的焦距 f ,故 $z_S = f$,假设坐标系 α_2 到坐标系 α_3 的转换矩阵为 $K_{2 \rightarrow 3}$,显然有:

$$[0127] \quad \begin{pmatrix} V_1^{(3)} & V_2^{(3)} & V_3^{(3)} & S^{(3)} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = K_{2 \rightarrow 3} \begin{pmatrix} V_1^{(2)} & V_2^{(2)} & V_3^{(2)} & S^{(2)} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

[0128] 即:

$$[0129] \quad \begin{pmatrix} d(u_1 - u_0) & d(u_2 - u_0) & d(u_3 - u_0) & 0 \\ d(v_1 - v_0) & d(v_2 - v_0) & d(v_3 - v_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = K_{2 \rightarrow 3} \begin{pmatrix} SV_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & SV_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & SV_3 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

[0130] 也即:

$$\begin{aligned}
K_{2 \rightarrow 3} &= \begin{pmatrix} du_1 & du_2 & du_3 & 0 \\ dv_1 & dv_2 & dv_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} SV_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & SV_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & SV_3 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \\
&= \begin{pmatrix} du_1 & du_2 & du_3 & 0 \\ dv_1 & dv_2 & dv_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{SV_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{SV_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{sv_3} & 0 \\ -\frac{1}{sv_1} & -\frac{1}{sv_2} & -\frac{1}{sv_3} & 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} \frac{d(u_1 - u_0)}{sV_1} & \frac{d(u_2 - u_0)}{sV_2} & \frac{d(u_3 - u_0)}{sV_3} & 0 \\ \frac{d(v_1 - v_0)}{sV_1} & \frac{d(v_2 - v_0)}{sV_2} & \frac{d(v_3 - v_0)}{SV_3} & 0 \\ -\frac{f}{sV_1} & -\frac{f}{sV_2} & -\frac{f}{sv_3} & f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{12}
\end{aligned}$$

[0132] 如图6所示,由几何学知识可得,对于直角三棱锥 $S-V_1V_2V_3$, S 在 $V_1V_2V_3$ 平面的投影 G 为三角形 $V_1V_2V_3$ 的垂心,故若已知 V_1, V_2, V_3 的坐标, G 的坐标可通过垂直关系求出,记 $u'_i = u_i - u_0, v'_i = v_i - v_0 (i=1, 2, 3)$,由于 SV_1, SV_2, SV_3 相互垂直,可得到:

$$[0133] \quad SV_1^2 + SV_2^2 = V_1V_2^2 = d^2 \left[(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2 \right] = d^2 \left[(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2 \right]$$

$$[0134] \quad SV_2^2 + SV_3^2 = V_2V_3^2 = d^2 \left[(u'_2 - u'_3)^2 + (v'_2 - v'_3)^2 \right] = d^2 \left[(u_2 - u_3)^2 + (v_2 - v_3)^2 \right]$$

$$[0135] \quad SV_3^2 + SV_1^2 = V_3V_1^2 = d^2 \left[(u'_3 - u'_1)^2 + (v'_3 - v'_1)^2 \right] = d^2 \left[(u_3 - u_1)^2 + (v_3 - v_1)^2 \right] \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
SV_1 &= \sqrt{\frac{(1) + (3) - (2)}{2}} \\
[0136] \quad &= d \sqrt{\frac{(u_1 - u_2)^2 + (u_1 - u_3)^2 - (u_2 - u_3)^2 + (v_1 - v_2)^2 + (v_1 - v_3)^2 - (v_2 - v_3)^2}{2}} \tag{14} \\
&= d \sqrt{(u_1 - u_2)(u_1 - u_3) + (v_1 - v_2)(v_1 - v_3)}
\end{aligned}$$

[0137] 同理可得:

$$[0138] \quad SV_2 = d\sqrt{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3) + (v_2 - v_1)(v_2 - v_3)} \quad (15)$$

$$[0139] \quad SV_3 = d\sqrt{(u_3 - u_1)(u_3 - u_2) + (v_3 - v_1)(v_3 - v_2)} \quad (16)$$

[0140] 记 $f' = f/d$, $K_{2 \rightarrow 3}$ 可表达为

$$[0141] \quad K_{2 \rightarrow 3} = \begin{pmatrix} \frac{du'_1}{SV_1} & \frac{du'_2}{SV_2} & \frac{du'_3}{SV_3} & 0 \\ \frac{dv'_1}{SV_1} & \frac{dv'_2}{SV_2} & \frac{dv'_3}{SV_3} & 0 \\ \frac{f'd}{SV_1} & \frac{f'd}{SV_2} & \frac{f'd}{SV_3} & f'd \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{2 \rightarrow 3} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

[0142] 其中,

$$[0143] \quad R_{2 \rightarrow 3} = \begin{pmatrix} \frac{u'_1}{\sqrt{(u_1 - u_2)(u_1 - u_3) + (v_1 - v_2)(v_1 - v_3)}} & \frac{u'_2}{\sqrt{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3) + (v_2 - v_1)(v_2 - v_3)}} & \frac{u'_3}{\sqrt{(u_3 - u_1)(u_3 - u_2) + (v_3 - v_1)(v_3 - v_2)}} \\ \frac{v'_1}{\sqrt{(u_1 - u_2)(u_1 - u_3) + (v_1 - v_2)(v_1 - v_3)}} & \frac{v'_2}{\sqrt{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3) + (v_2 - v_1)(v_2 - v_3)}} & \frac{v'_3}{\sqrt{(u_3 - u_1)(u_3 - u_2) + (v_3 - v_1)(v_3 - v_2)}} \\ -\sqrt{\frac{(u'_1 u'_3 - u'_1 u'_2 - u'_1 u'_3) + (v'_1 v'_3 - v'_1 v'_2 - v'_1 v'_3)}{(u_1 - u_2)(u_1 - u_3) + (v_1 - v_2)(v_1 - v_3)}} & -\sqrt{\frac{(u'_1 u'_3 - u'_2 u'_1 - u'_2 u'_3) + (v'_1 v'_3 - v'_2 v'_1 - v'_2 v'_3)}{(u_2 - u_1)(u_2 - u_3) + (v_2 - v_1)(v_2 - v_3)}} & -\sqrt{\frac{(u'_1 u'_2 - u'_3 u'_1 - u'_3 u'_2) + (v'_1 v'_2 - v'_3 v'_1 - v'_3 v'_2)}{(u_3 - u_1)(u_3 - u_2) + (v_3 - v_1)(v_3 - v_2)}} \end{pmatrix} \quad (18)$$

[0144] 公式(18)的第一行、第二行可以直接通过(14) - (16)求出,第三行是由于旋转矩阵始终是一个单位正交阵,有 $R_{2 \rightarrow 3} R_{2 \rightarrow 3}^T = E$,同时 f 与 d 均为正值,所以 $f'd/SV_i$ 均为负值, $R_{2 \rightarrow 3}$ 的第三行可以直接通过所在列的第一、第二行数据根据 $(R_{2 \rightarrow 3})_{1,i}^2 + (R_{2 \rightarrow 3})_{2,i}^2 + (R_{2 \rightarrow 3})_{3,i}^2 = 1$ 求出。

[0145] 注意到根据假设,对于一张图片来说, u_i, v_i ($i=1, 2, 3$) 是已知的,故其垂心坐标 u_0, v_0 也是已知的,即 $R_{2 \rightarrow 3}$ 可以通过灭点信息直接得出,同时,由于 $R_{2 \rightarrow 3}$ 是已知的,而 K_i/d 也只与 u_i, v_i ($i=0, 1, 2, 3$) 有关,故 $f' = SV_i \cdot (R_{2 \rightarrow 3})_{3,j}/d$ 也是可以确定的,其中 j 可取 $1, 2, 3$ 中的任一项。

[0146] 结合 $K_{1 \rightarrow 2}$ 的表达式,可得:

$$[0147] \quad K_{1 \rightarrow 3} = K_{2 \rightarrow 3} \cdot K_{1 \rightarrow 2} = \begin{pmatrix} R_{2 \rightarrow 3} & -R_{2 \rightarrow 3} \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -f'd \end{pmatrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

[0148] 在 α_3 坐标系下,投影平面是 xOy 平面,光心在 z 轴上,坐标系中任意一点的投影点都

容易求得,假设任意一点 $P(x_P^{(3)}, y_P^{(3)}, z_P^{(3)})^T$ 在投影平面上的投影为 $P'(x_{P'}^{(3)}, y_{P'}^{(3)}, z_{P'}^{(3)})^T$,由P、P'、S三点共线以及P'在 x_0y_0 上等几何条件,易得出

$$[0149] \quad P \begin{pmatrix} x_P^{(3)} \\ y_P^{(3)} \\ z_P^{(3)} \end{pmatrix} \xrightarrow{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f \end{pmatrix}} \begin{pmatrix} \frac{x_P^{(3)} f}{f - z_P^{(3)}} \\ \frac{y_P^{(3)} f}{f - z_P^{(3)}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

[0150] 另一方面,考虑P在 α_1 坐标系下的坐标,设为 $(x_P^{(1)}, y_P^{(1)}, z_P^{(1)})$,并记 $R_{2 \rightarrow 3}(x_s, y_s, z_s)^T = (x_s', y_s', z_s')^T$ 由(19)可得:

$$[0151] \quad \begin{pmatrix} x_P^{(3)} \\ y_P^{(3)} \\ z_P^{(3)} \\ 1 \end{pmatrix} = K_{1 \rightarrow 3} \cdot \begin{pmatrix} x_P^{(1)} \\ y_P^{(1)} \\ z_P^{(1)} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & -x'_s & & \\ R_{2 \rightarrow 3} & -y'_s & & \\ & -z'_s - f'd & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_P^{(1)} \\ y_P^{(1)} \\ z_P^{(1)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (21)$$

[0152] 即:

$$[0153] \quad \begin{pmatrix} x_P^{(3)} \\ y_P^{(3)} \\ z_P^{(3)} \end{pmatrix} = R_{2 \rightarrow 3} \begin{pmatrix} x_P^{(1)} \\ y_P^{(1)} \\ z_P^{(1)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x'_s \\ y'_s \\ f'd + z'_s \end{pmatrix} \quad (22)$$

[0154] 记 $R_{2 \rightarrow 3}(x_P^{(3)}, y_P^{(3)}, z_P^{(3)})^T = (x_P^r, y_P^r, z_P^r)^T$,有:

$$[0155] \quad \begin{pmatrix} x_P^{(3)} \\ y_P^{(3)} \\ z_P^{(3)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_P^r - x'_s \\ y_P^r - y'_s \\ z_P^r - z'_s - f'd \end{pmatrix} \quad (23)$$

[0156] 根据(20)中的P与P'坐标的转换关系,可以得到

$$[0157] \quad P \begin{pmatrix} x'_P - x'_S \\ y'_P - y'_S \\ z'_P - z'_S - f'd \end{pmatrix} \xrightarrow{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f \end{pmatrix}} P' \begin{pmatrix} \frac{(x'_P - x'_S)f}{z'_S - z'_P} \\ \frac{(y'_P - y'_S)f}{z'_S - z'_P} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

[0158] 根据(6)中的图像像素坐标系与图像物理坐标系的转换关系,有:

$$[0159] \quad \begin{cases} \frac{(x'_P - x'_S)f}{z'_S - z'_P} = d(u_P - u_0) = du'_P \\ \frac{(y'_P - y'_S)f}{z'_S - z'_P} = d(v_P - v_0) = dv'_P \end{cases} \quad (25)$$

[0160] 再结合 $f' = f/d$,上式等价于:

$$[0161] \quad \begin{cases} x'_S f' - z'_S u'_P = x'_P f' - z'_P u'_P \\ y'_S f' - z'_S v'_P = y'_P f' - z'_P v'_P \end{cases} \quad (26)$$

[0162] 写成矩阵形式,并利用(*)可得到

$$[0163] \quad \begin{pmatrix} f' & 0 & -u'_P \\ 0 & f' & -v'_P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_S \\ y'_S \\ z'_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f' & 0 & -u'_P \\ 0 & f' & -v'_P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_P \\ y'_P \\ z'_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f' & 0 & -u'_P \\ 0 & f' & -v'_P \end{pmatrix} R_{2 \rightarrow 3} \begin{pmatrix} x_P^{(1)} \\ y_P^{(1)} \\ z_P^{(1)} \end{pmatrix} \quad (27)$$

[0164] 即:

$$[0165] \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{-u'_P}{f'} \\ 0 & 1 & \frac{-v'_P}{f'} \end{pmatrix} R_{2 \rightarrow 3} \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{-u'_P}{f'} \\ 0 & 1 & \frac{-v'_P}{f'} \end{pmatrix} R_{2 \rightarrow 3} \begin{pmatrix} x_P^{(1)} \\ y_P^{(1)} \\ z_P^{(1)} \end{pmatrix} \quad (28)$$

[0166] 在三个灭点的像素坐标系的坐标值已知的情况下, $R_{2 \rightarrow 3}$ 与 f' 已知,将其看作关于 (x_s, y_s, z_s) 的方程,则它是一个具有无穷多解的线性方程组。若是能找到不少于2组 α_1 坐标系的点 $(x_{P_k}^{(1)}, y_{P_k}^{(1)}, z_{P_k}^{(1)})^T$ 与其对应的照片中点的像素坐标系坐标 $(u_{P_k}, v_{P_k})^T$ ($k = 1, 2 \dots n, n \geq 2$)。这样就能得到一个方程数量大于未知数数量的方程组:

$$[0167] \quad \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{u'_{P_1}}{f'} \\ 0 & 1 & -\frac{v'_{P_1}}{f'} \end{pmatrix} R_{2 \rightarrow 3} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{u'_{P_2}}{f'} \\ 0 & 1 & -\frac{v'_{P_2}}{f'} \end{pmatrix} R_{2 \rightarrow 3} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{u'_{P_3}}{f'} \\ 0 & 1 & -\frac{v'_{P_3}}{f'} \end{pmatrix} R_{2 \rightarrow 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{u'_{P_1}}{f'} \\ 0 & 1 & -\frac{v'_{P_1}}{f'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{P_1}^{(1)} \\ y_{P_1}^{(1)} \\ z_{P_1}^{(1)} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{u'_{P_2}}{f'} \\ 0 & 1 & -\frac{v'_{P_2}}{f'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{P_2}^{(1)} \\ y_{P_2}^{(1)} \\ z_{P_2}^{(1)} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{u'_{P_3}}{f'} \\ 0 & 1 & -\frac{v'_{P_3}}{f'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{P_3}^{(1)} \\ y_{P_3}^{(1)} \\ z_{P_3}^{(1)} \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (29)$$

[0168] 该方程组可以利用最小二乘法求出 x_S 、 y_S 、 z_S 的最小二乘解。另外，旋转矩阵 $R_{2 \rightarrow 3}$ 表示的就是 α_2 坐标系和 α_1 坐标系之间的旋转关系， α_2 坐标系由 α_1 坐标系平移得来，故 $R_{2 \rightarrow 3}$ 也包含了在建筑物表面建立的 α_1 坐标系下的投影平面法向量方向。至此，利用灭点与少数几个点的已知坐标信息就可以对摄像机的位置与姿态进行估计。而对于建筑物来说，由于普通民用建筑一般都是规则的，可利用的点一般比较容易被找到。建筑的层高都是一致的，这样在两个面的交线处的相邻两层交界点的距离总是相等的，为每层高度，如图7所示，控制点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 相邻点之间的间距均相同。如果层高已知，则(29)方程可以直接求解。

[0169] 步骤3) 三维重建的步骤：

[0170] 31) 特征点提取和匹配。若物体上明暗变化大的一点由多张图片捕捉到，不同图像中对应的特征点被提取出来，并匹配其所在图像中的坐标。

[0171] 32) 利用前面得到的结果，再根据针孔相机模型，解算出特征点的三维坐标，绘制在同一坐标系下，得到稀疏点云，稀疏点云可以反映物体的大致轮廓。

[0172] 33) 利用稀疏点云得到的投影关系，将各个图片的所有像素点进行重投影，添加到稀疏点云中，得到密集点云，密集点云可以反映物体的具体轮廓。

[0173] 实施例：

[0174] 本发明用于建筑物三维重建的变焦距相机外参数标定方法的标定过程，以上海市五角场某楼房的图像为例，采用该方法进行参数求解，编程软件采用MATLAB，具体包括以下步骤：

[0175] 步骤1，利用数字图像处理进行关键技术处理

[0176] 1) 利用Canny算子对图像进行边缘检测，如图9所示；

[0177] 2) 利用Hough变换提取图像中的直线；

[0178] 将图9b进行参数的变换，并划分累加单元，对每个单元进行累加，取累加值的极值，如图10所示；

[0179] 为防止出现过短的直线,指定一个与相同的Hough变换相关的两条线段的距离。当两条线段之间的距离小于指定的值 val_1 时,把线段合并为一条线段(默认的距离是20个像素),另一方面,对合并之后的线段,制定一个线段最小长度 val_2 ,如果合并的线比 val_2 指定的值短,就丢弃(默认值是40),最终检测结果如图11所示;

[0180] 3) 再利用Hough变换对直线进行分类

[0181] 将图像中检测出的直线用法线式 $\frac{\cos \theta_i}{\rho_i} x + \frac{\sin \theta_i}{\rho_i} y = 1$ 表示,对应的 (ρ, θ) 参数按照

$\frac{\cos \theta_i}{\rho_i} = A_i, \frac{\sin \theta_i}{\rho_i} = B_i$ 转换成(A,B)空间上的点,如图12所示;

[0182] 将图12b中的点利用Hough变换划分累加单元,可以得到三个峰值,检测出三个峰值的对应的点即为三条直线上的点。

[0183] 4) 拟合与灭点的求解

[0184] 将分类出的每组点用最小二乘法拟合,得到直线解析式与对应的相关系数,如图14所示;

[0185] 直线解析式中A、B前的系数即为灭点坐标,三个灭点构成三角形的垂心即为照相机中心在投影平面上的投影点,这些点在图中的位置如图15所示;

[0186] 步骤2,进行标定计算

[0187] 三个灭点的坐标为 $V_1(5254.348, 8282.712)$ 、 $V_2(1954.268, -5070.942)$ 、 $V_3(-18217.294, 6806.001)$,易求得垂心坐标为 $G(1687.293, 2087.617)$ 以及由 $f' = f/d$ 定义的 $f' = -6190.945$ 。

[0188] 进一步可以求得

$$[0189] \quad R_{2 \rightarrow 3} = \begin{pmatrix} 0.3620 & 0.0289 & -0.9317 \\ 0.6251 & -0.7490 & 0.2197 \\ -0.6915 & -0.6620 & -0.2892 \end{pmatrix}$$

[0190] $R_{2 \rightarrow 3}$ 表示的即为相机的姿态信息。

[0191] 利用Harris角点检测寻找到图16中的角点,并筛选出所需要的 $P_1 \sim P_5$,如图16所示。

[0192] 最终提取到 $P_1 \sim P_5$ 的像素点坐标:

$$[0193] \quad (u_{P_1}, v_{P_1}) = (1205, 3304),$$

$$[0194] \quad (u_{P_2}, v_{P_2}) = (1299, 2287),$$

$$[0195] \quad (u_{P_3}, v_{P_3}) = (1371, 1497),$$

$$[0196] \quad (u_{P_4}, v_{P_4}) = (1429, 856),$$

$$[0197] \quad (u_{P_5}, v_{P_5}) = (1477, 321)$$

[0198] 根据国家颁布的《国家住宅设计规范》,民用住宅的层高一般为2.8m,取 $h = 2.8m$ 。再根据本专利的算法,可得到方程:

$$[0199] \begin{pmatrix} 0.416 & 0.080 & -0.909 \\ 0.489 & -0.879 & 0.163 \\ 0.405 & 0.070 & -0.914 \\ 0.603 & -0.770 & 0.210 \\ 0.397 & 0.063 & -0.917 \\ 0.691 & -0.686 & 0.247 \\ 0.391 & 0.056 & -0.920 \\ 0.763 & -0.617 & 0.277 \\ 0.386 & 0.051 & -0.922 \\ 0.823 & -0.560 & 0.302 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.000 \\ 0.000 \\ 0.197 \\ -2.157 \\ 0.351 \\ -3.840 \\ 0.474 \\ -5.185 \\ 0.576 \\ -6.272 \end{pmatrix} \quad (8)$$

[0200] 利用最小二乘法对其进行求解,有

$$[0201] \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -10.2616 \\ -6.6781 \\ -5.2863 \end{pmatrix} \quad (9)$$

[0202] 综上所述,相机的位置与姿态都可以得到:

$$[0203] \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -10.2616 \\ -6.6781 \\ -5.2863 \end{pmatrix}, R_{2 \rightarrow 3} = \begin{pmatrix} 0.3620 & 0.0289 & -0.9317 \\ 0.6251 & -0.7490 & 0.2197 \\ -0.6915 & -0.6620 & -0.2892 \end{pmatrix}$$

[0204] 步骤3,对多张图像照片,利用上述得到相机位置与姿态的方法进行建筑物三维重建

[0205] 为了进行三维重建,对某建筑采集了十张图像(如图17所示)。

[0206] 对采集到的的多个图像,首先利用步骤二中使用的方法对相机的位置与姿态进行标定,并进行三维重建,下图为得到的密集点云模型。

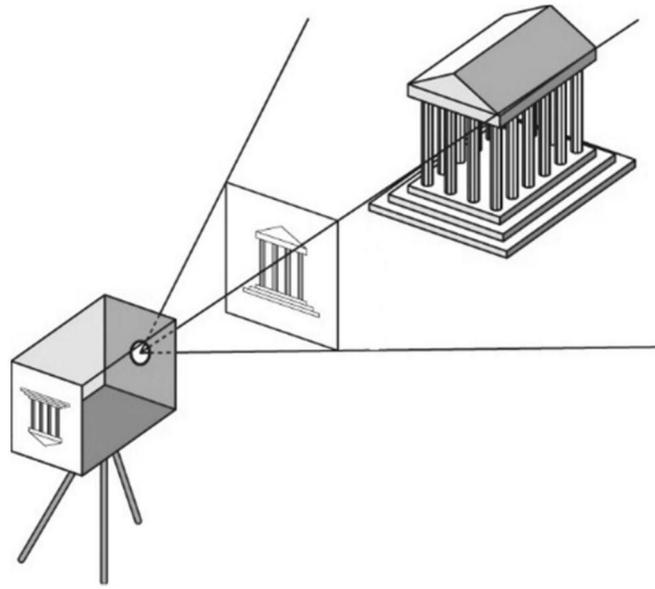


图1

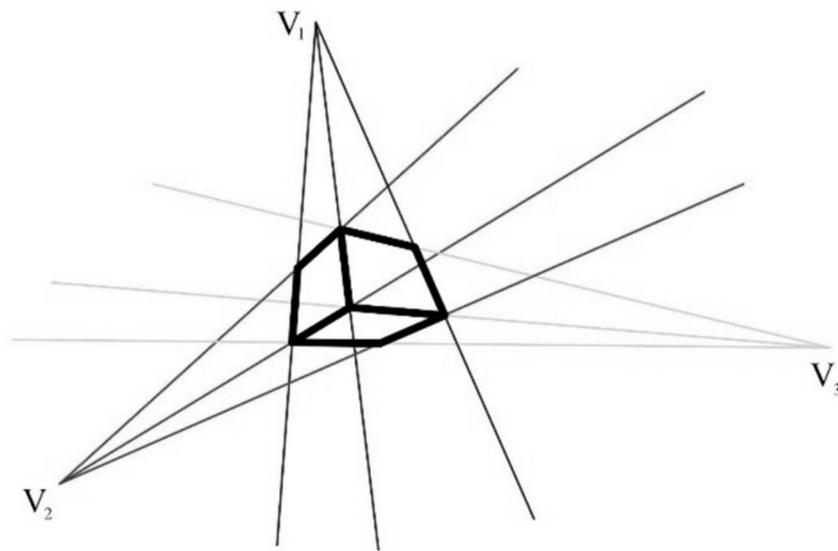


图2

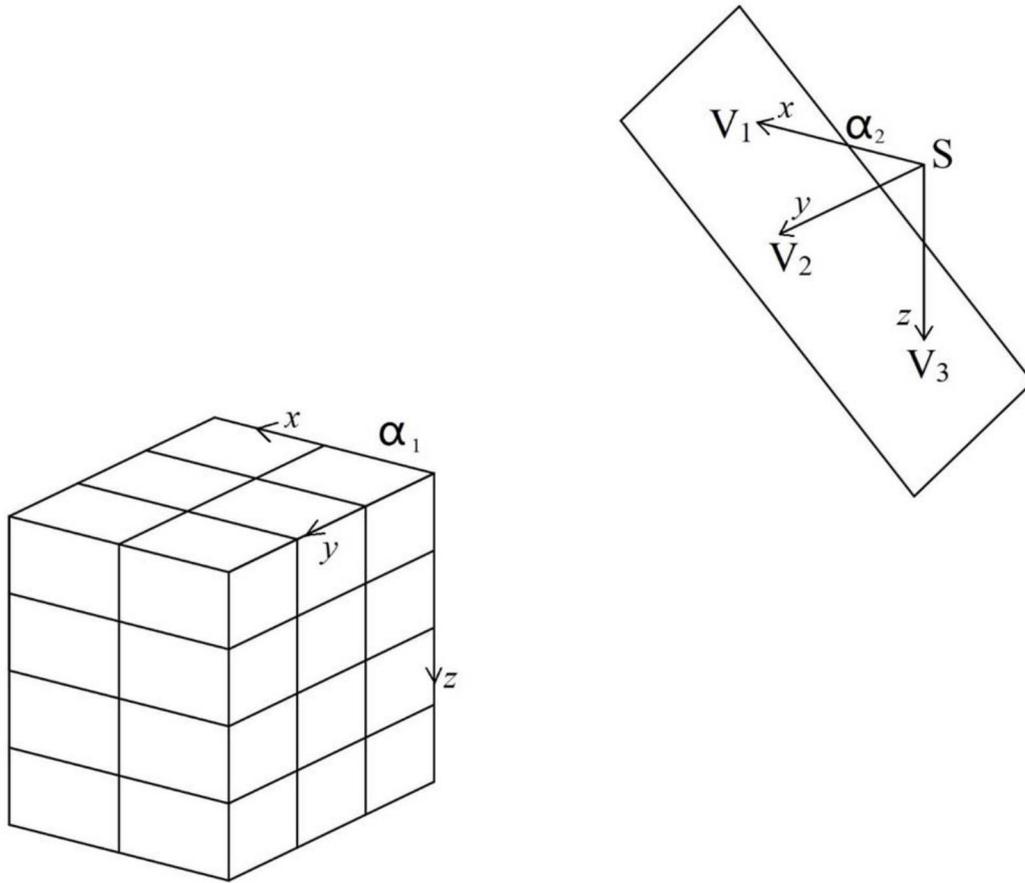


图3

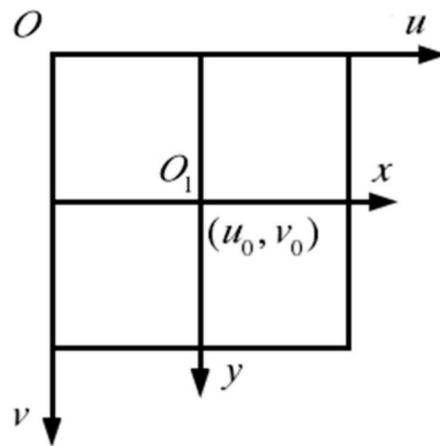


图4

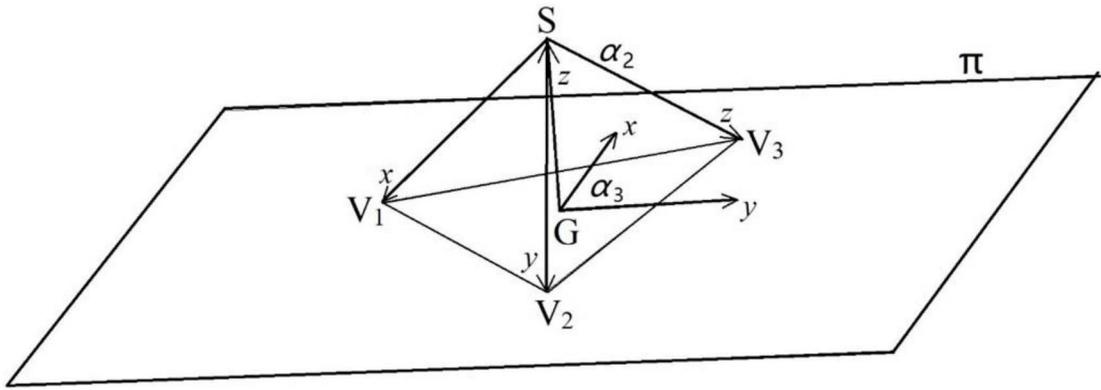


图5

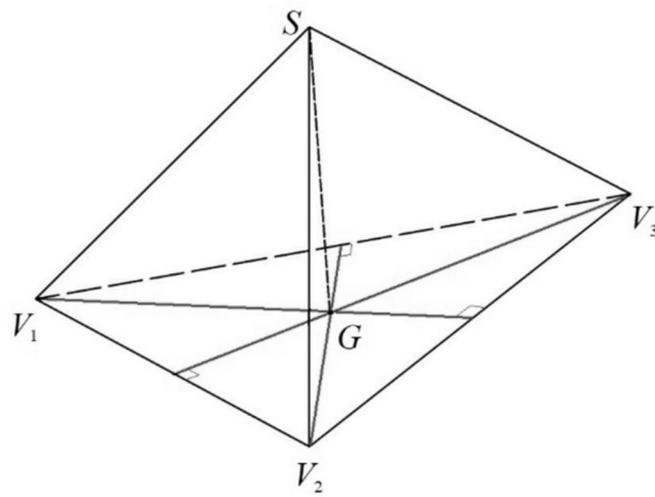


图6



图7

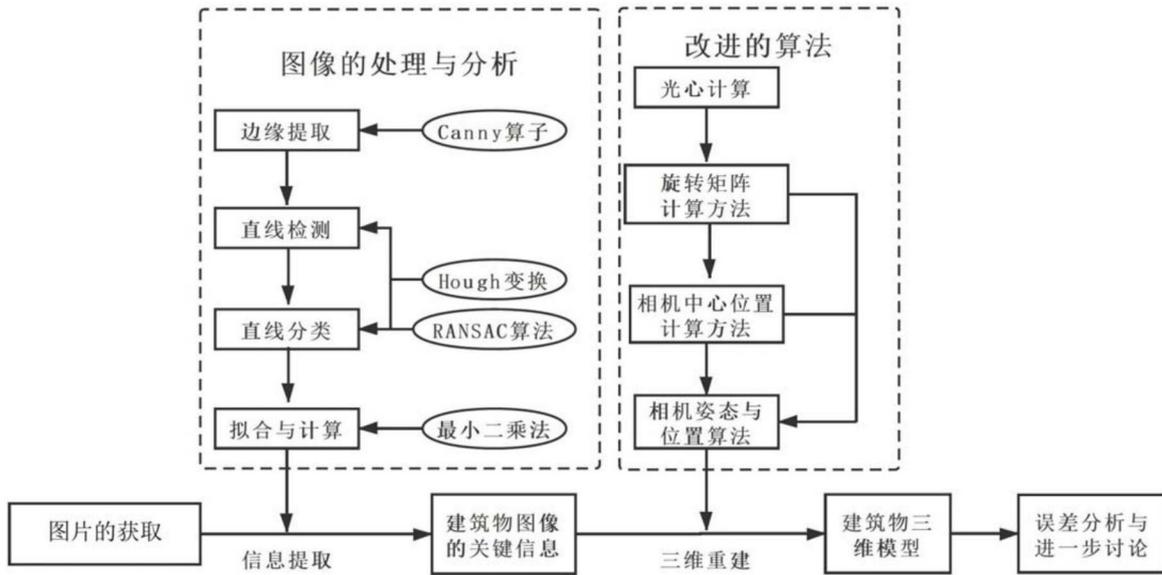


图8

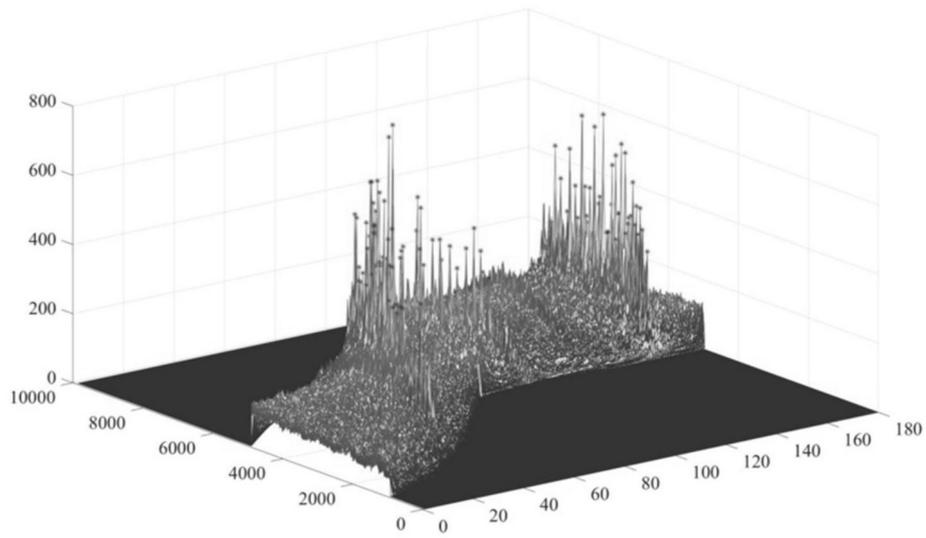


(9a)

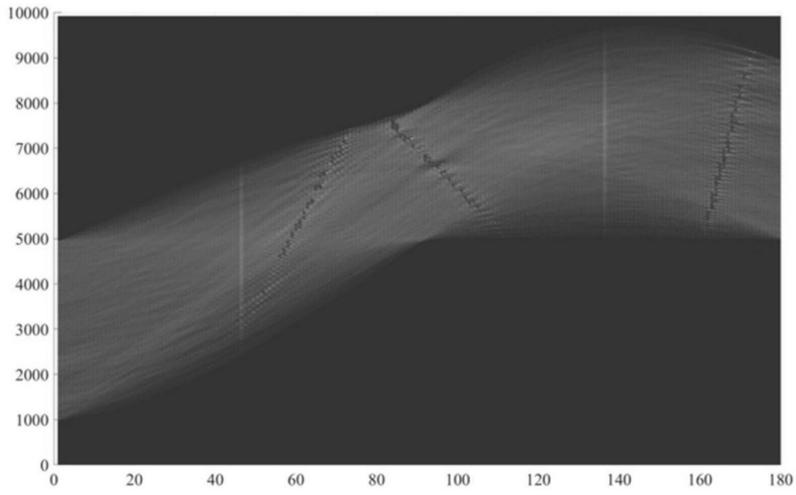


(9b)

图9



(10a)



(10b)

图10

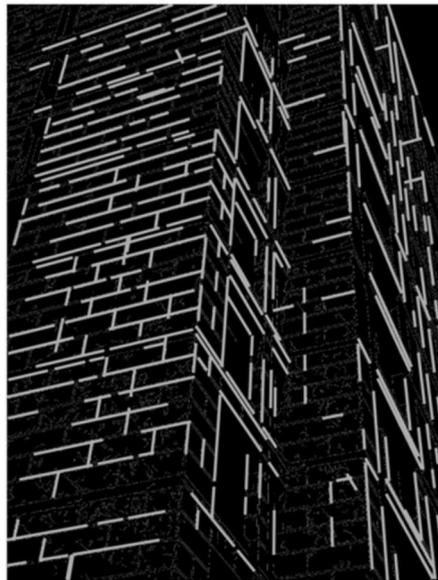
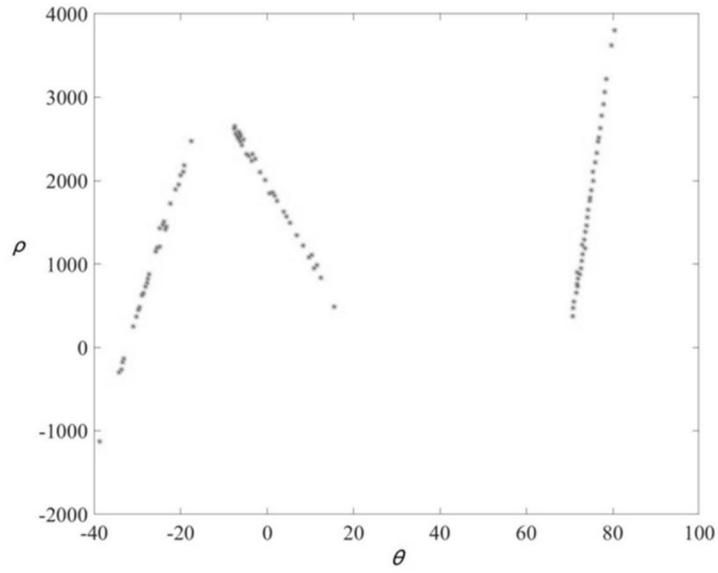
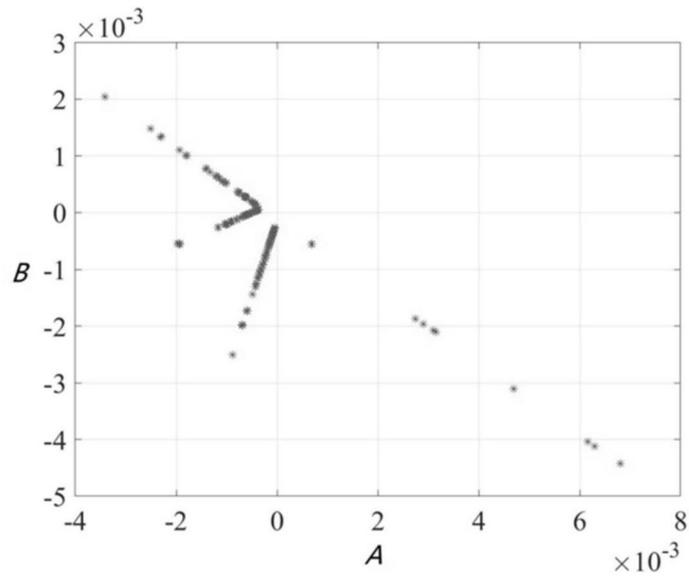


图11

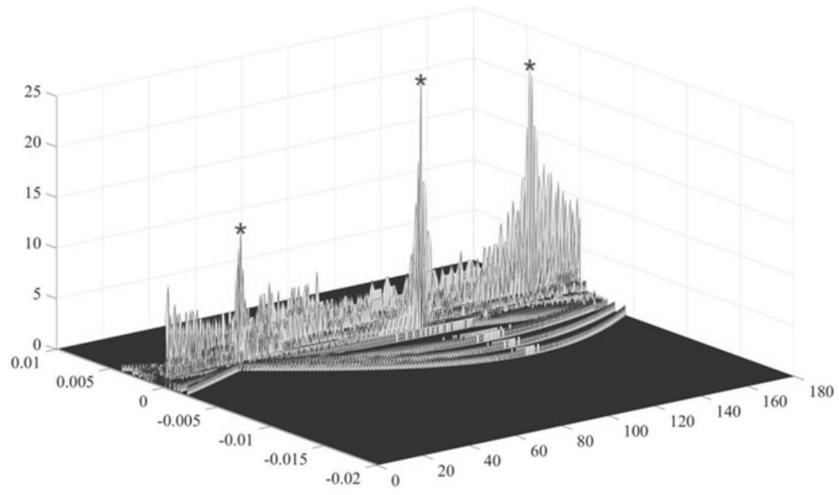


(12a)

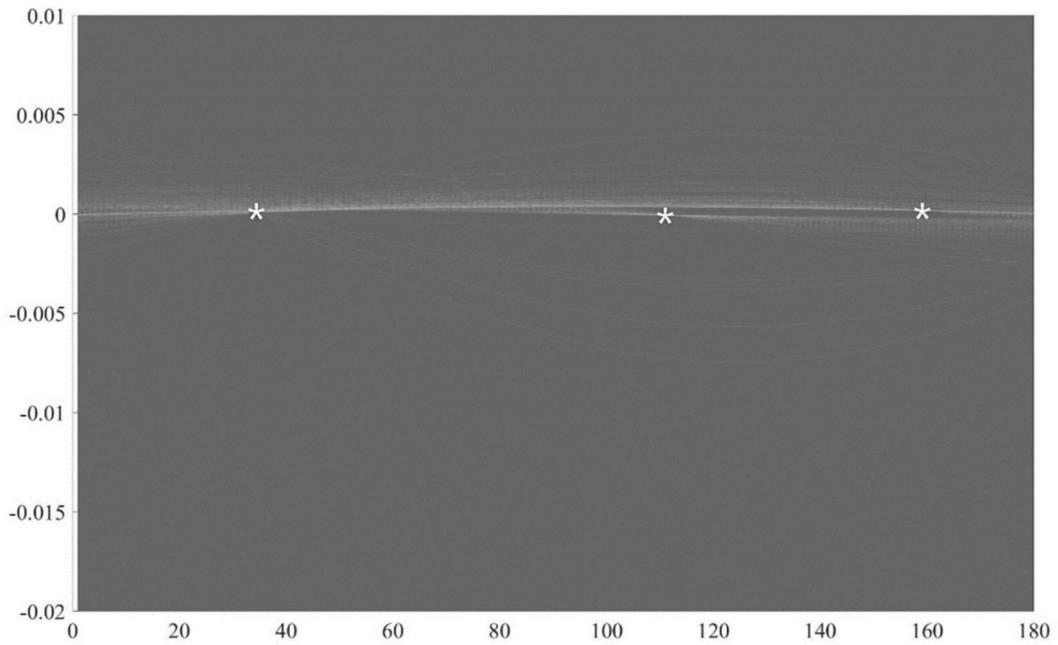


(12b)

图12

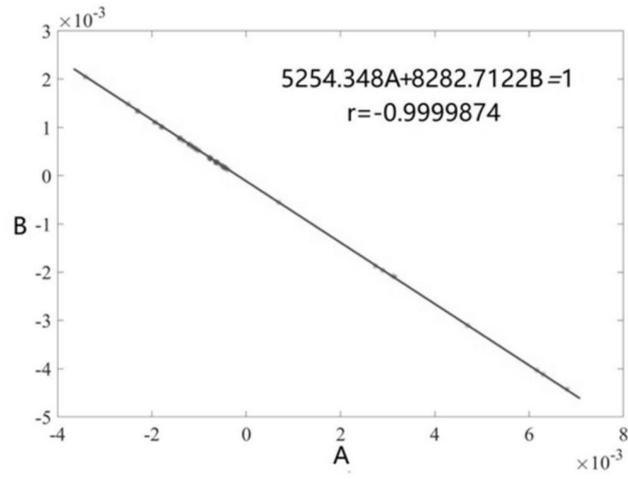


(13a)

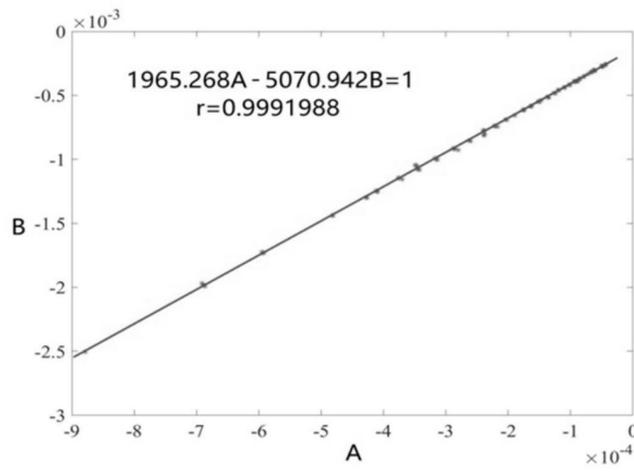


(13b)

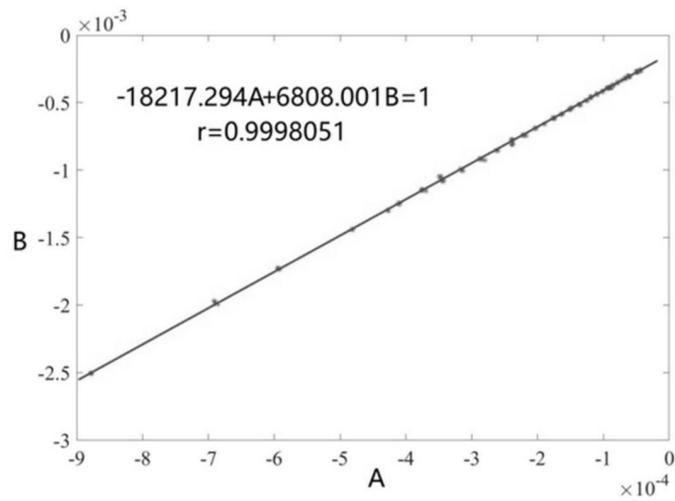
图13



(14a)

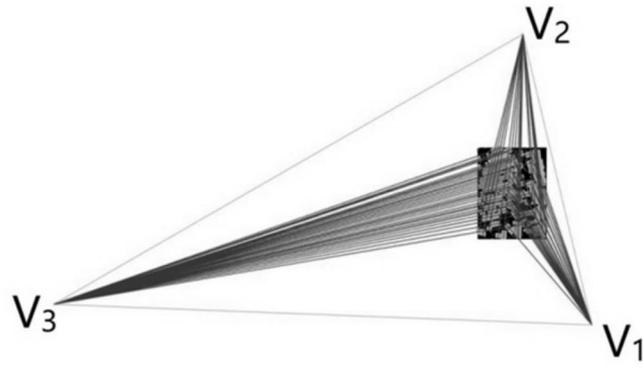


(14b)



(14c)

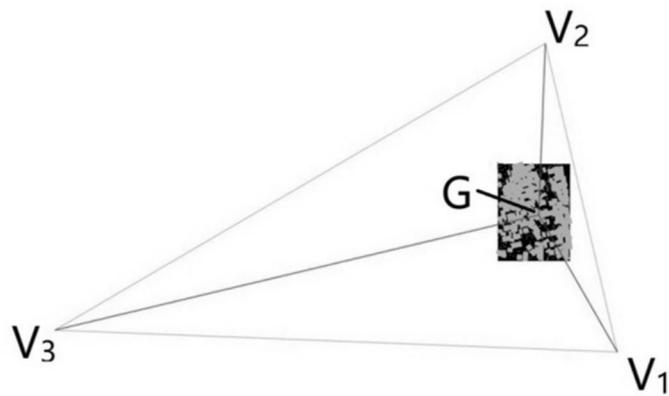
图14



(15a)



(15b)



(15c)

图15

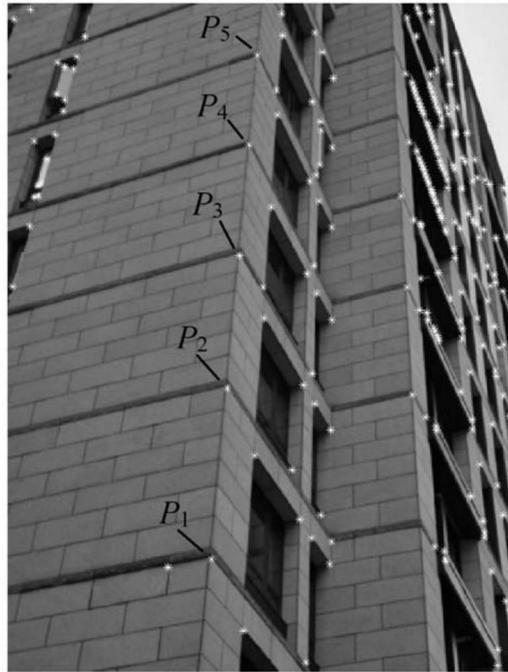


图16



图17

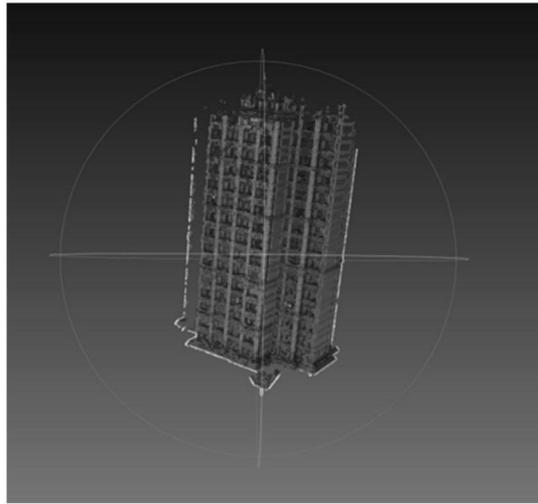


图18