

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102693543 A

(43) 申请公布日 2012. 09. 26

(21) 申请号 201210159132. X

(22) 申请日 2012. 05. 21

(71) 申请人 南开大学

地址 300071 天津市南开区卫津路 94 号

(72) 发明人 方勇纯 张雪波 路晗 李宝全

(74) 专利代理机构 天津佳盟知识产权代理有限公司 12002

代理人 侯力

(51) Int. Cl.

G06T 7/00 (2006. 01)

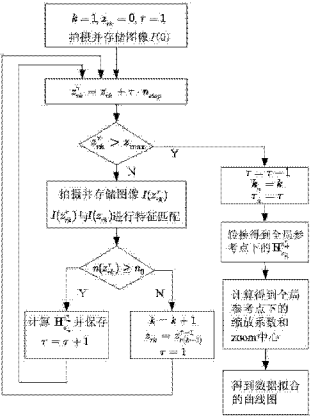
权利要求书 3 页 说明书 15 页 附图 6 页

(54) 发明名称

室外环境下变焦云台摄像机全自动标定方法

(57) 摘要

一种室外环境下变焦云台摄像机全自动标定方法。针对室外环境下变焦云台摄像机,提出一种全自动且高精度的标定算法。首先将摄像机模型分解为变焦转换模型与定焦参数模型。对于前者,通过设立多个参考点,建立多倍变焦情况下的变焦转换模型;然后基于单应矩阵回溯技术,得到全局参考点与多组已选定变焦参数下变焦模型的转换关系,并在此基础上对缩放系数与变焦中心等参数进行曲线拟合。对于后者,利用旋转角度信息对定焦参数模型进行在线标定。由于将变焦中心与主点位置作为独立变量分别进行标定,确保了模型的完整性与准确性;且多参考点方法较好解决了变焦情况下特征匹配点过少问题,提高了标定精度。实验结果表明了本发明具有良好的性能。



1. 一种室外环境下变焦云台摄像机全自动标定方法,其特征在于该方法包括:

第 1,变焦云台摄像机,简称 PTZ 摄像机模型的建立

第 1.1,对于单参考点变焦转换模型,采用如下所示模型:

$$p_{xi}^{z_2} - C_x^{z_1}(z_2) = M^{z_1}(z_2)(p_{xi}^{z_1} - C_x^{z_1}(z_2));$$

$$p_{yi}^{z_2} - C_y^{z_1}(z_2) = M^{z_1}(z_2)(p_{yi}^{z_1} - C_y^{z_1}(z_2))$$

上式中, $(p_{xi}^{z_1}, p_{yi}^{z_1})$ 与 $(p_{xi}^{z_2}, p_{yi}^{z_2})$ 分别表示三维特征点 P_i 在 zoom 值为 z_1 和 z_2 时的像素坐标,且通过通用的特征点提取与匹配算法自动获得,其中 $i = 1, 2, \dots, n$, n 表示三维特征点的个数且通过通用的特征点提取与匹配算法自动确定; $(C_x^{z_1}(z_2), C_y^{z_1}(z_2))$ 表示摄像机 zoom 值从 z_1 变化到 z_2 时图像的 zoom 中心, $M^{z_1}(z_2)$ 表示对应的缩放系数,“zoom 值”是指变焦参数;

第 1.2,在摄像机 zoom 值固定时,采用如下小孔摄像机模型:

$$A(z_r) = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, $A(z_r)$ 表示在特定变焦参数 z_r 时的摄像机内参数矩阵, f_x, f_y 分别表示有效焦距沿图像 u 轴与 v 轴方向的尺度因子, (u_0, v_0) 表示主点位置;

第 2,多参考点变焦转换模型自标定

第 2.1,单参考点变焦转换模型标定

对第 1.1 中的变焦转换模型进行整理可得:

$$\mathbf{p}_i^{z_2} = \mathbf{H}_{z_1}^{z_2} \cdot \mathbf{p}_i^{z_1}$$

其中 $\mathbf{p}_i^{z_1}, \mathbf{p}_i^{z_2}$ 分别为 zoom 值为 z_1 和 z_2 时的三维特征点 P_i 的图像齐次坐标,即 $\mathbf{p}_i^{z_2} = [p_{xi}^{z_2}, p_{yi}^{z_2}, 1]^T$, $\mathbf{p}_i^{z_1} = [p_{xi}^{z_1}, p_{yi}^{z_1}, 1]^T$, 且符号 ‘T’ 表示对相应矩阵求转置,矩阵 $\mathbf{H}_{z_1}^{z_2}$ 表示对应两幅图像的 2D 单应矩阵,为如下表达式:

$$\mathbf{H}_{z_1}^{z_2} = \begin{bmatrix} M^{z_1}(z_2) & 0 & (1 - M^{z_1}(z_2))C_x^{z_1}(z_2) \\ 0 & M^{z_1}(z_2) & (1 - M^{z_1}(z_2))C_y^{z_1}(z_2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

第 2.2,多参考点变焦转换模型标定

令 z_{rk} 表示第 k 个参考 zoom 值,其中 $k = 1, 2, \dots, k_n$, 且满足 $z_{r1} < z_{r2} < \dots < z_{rk_n}$; 令 z_{rk}^τ 表示 z_{rk} 与 $z_{r(k+1)}$ 之间以 z_{rk} 作为参考点的某一 zoom 值,即 $z_{rk} < z_{rk}^\tau \leq z_{r(k+1)}$, 其中 $\tau = 1, 2, \dots, \tau_k$, k_n 与 τ_k 分别为 k 与 τ 的最大值,并且由下面所述的标定步骤自动决定其值的大小;根据式 $\mathbf{p}_i^{z_2} = \mathbf{H}_{z_1}^{z_2} \cdot \mathbf{p}_i^{z_1}$ 可得多参考点变焦转换模型为:

$$\mathbf{p}_i^{z_{rk}^\tau} = \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^\tau} \cdot \mathbf{p}_i^{z_{r1}}$$

$$\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T} = \mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T} \cdot \mathbf{H}_{z_{r(k-1)}}^{z_{rk}^T} \cdots \mathbf{H}_{z_{r2}}^{z_{rk}^T} \cdot \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}$$

$$\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T} = \begin{bmatrix} M^{z_{r1}}(z_{rk}^T) & 0 & (1 - M^{z_{r1}}(z_{rk}^T))C_x^{z_{r1}}(z_{rk}^T) \\ 0 & M^{z_{r1}}(z_{rk}^T) & (1 - M^{z_{r1}}(z_{rk}^T))C_y^{z_{r1}}(z_{rk}^T) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 $\mathbf{p}_i^{z_{rk}^T}$ 表示 zoom 值为 z_{rk}^T 时的图像点齐次坐标, $\mathbf{p}_i^{z_{r1}}$ 表示 zoom 值为 z_{r1} 时的图像点齐次坐标, $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}$ 表示 zoom 值为 z_{rk}^T 时的图像与 zoom 值为 z_{r1} 时的图像的 2D 单应矩阵, 同样地, $\mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T}, \mathbf{H}_{z_{r(k-1)}}^{z_{rk}^T}$ 为相应的图像的 2D 单应矩阵; k_n, τ_k 由算法自动决定其值的大小;

多参考点变焦转换模型参数的具体标定步骤如下:

第 2.2.1, 初始化: 令 $k = 1, z_{rk} = 0, \tau = 1$; 设定摄像机 zoom 值为 z_{rk} , 拍摄并存储图像 $I(z_{rk})$;

第 2.2.2, 取 $z_{rk}^T = z_{rk} + \tau n_{step}$, 其中 n_{step} 即 zoom 每次变化的步长; 当 $z_{rk}^T > z_{max}$ 时, 令 $\tau = \tau - 1, k_n = k, \tau_k = \tau$, 转第 2.2.4 步, 其中 z_{max} 为摄像机的最大 zoom 值;

第 2.2.3, 设定摄像机的 zoom 值为 z_{rk}^T , 拍摄并存储图像 $I(z_{rk}^T)$, 根据通用的特征提取与匹配算法, 对图像 $I(z_{rk}^T)$ 与 $I(z_{rk})$ 进行特征匹配, 得到第 i 个匹配特征点对 $\mathbf{p}_i^{z_{rk}^T}, \mathbf{p}_i^{z_{rk}}$, 如果匹配特征点的对数 $n(z_{rk}^T) \geq n_0$, 其中 n_0 为匹配点对数的阈值, 则根据式 $\mathbf{p}_i^{z_2} = \mathbf{H}_{z_1}^{z_2} \cdot \mathbf{p}_i^{z_1}$ 计算 $\mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T}$ 并保存, 其中 $\mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T}$ 表示对应两幅图像的 2D 单应矩阵, 令 $\tau = \tau + 1$, 转第 2.2.2 步; 当 $n(z_{rk}^T) < n_0$, 则令 $k = k + 1$, 即加入一个参考点 z_{rk} , 设定其 zoom 值为 $z_{rk} = z_{r(k-1)}^{T-1}$, 设定 $\tau = 1$, 转第 2.2.2 步;

第 2.2.4, 根据式 $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T} = \mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T} \cdot \mathbf{H}_{z_{r(k-1)}}^{z_{rk}^T} \cdots \mathbf{H}_{z_{r3}}^{z_{rk}^T} \cdot \mathbf{H}_{z_{r2}}^{z_{rk}^T}$, 可以计算出任意 zoom 值 z_{rk}^T 下的图像到 zoom 值 $z_{r1} = 0$ 下图像之间的数学变换矩阵 $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}$; 即利用单应矩阵回溯技术, 将各个参考 zoom 值下的变焦转换关系巧妙地融入到以初始 zoom 值 z_{r1} 作为全局参考点的等效变焦转换模型之中;

第 2.2.5, 在计算得到 $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}$ 的基础上, 根据下式求解出以 zoom 值 $z_{r1} = 0$ 为全局参考点的等效 zoom 中心 $C_x^{z_{r1}}(z_{rk}^T), C_y^{z_{r1}}(z_{rk}^T)$ 以及缩放系数 $M^{z_{r1}}(z_{rk}^T)$:

$$M^{z_{r1}}(z_{rk}^T) = \frac{\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}(1,1) + \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}(2,2)}{2}, C_x^{z_{r1}}(z_{rk}^T) = \frac{\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}(1,3)}{1 - M^{z_{r1}}(z_{rk}^T)}, C_y^{z_{r1}}(z_{rk}^T) = \frac{\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}(2,3)}{1 - M^{z_{r1}}(z_{rk}^T)}$$

其中, $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}(i, j)$ 表示矩阵 $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}$ 的第 i 行第 j 列元素;

第 2.2.6, 利用通用的数据拟合方法, 得到以 zoom 值 z_{r1} 作为全局参考点下的等效 zoom 中心与缩放系数曲线;

第 3, 定焦参数模型自标定

将摄像机的 zoom 值固定以求取摄像机内参数 u_0, v_0, f_x, f_y , 其中 f_x, f_y 分别表示有效焦距沿图像 u 轴与 v 轴方向的尺度因子, u 轴为图像的水平坐标轴, v 轴为图像的垂直坐标轴, (u_0, v_0) 表示主点位置;在此条件下,使摄像机在不同位置拍摄一些列图像 $I_1, I_2, \dots, I_{\text{num}}$, 其中 num 为图像幅数;

首先根据式 $\mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \lambda \mathbf{G}^s \mathbf{p}_c^{s,t}$ 求得 \mathbf{G}^s , 其中 $\mathbf{p}_c^{(s+1),t}, \mathbf{p}_c^{s,t}$ 表示第 t 对匹配特征点在图像 I_s 与 I_{s+1} 中的齐次像素坐标, 且 $t=1, 2, \dots, n_s$, 其中 n_s 表示对应 I_s 于 I_{s+1} 中匹配点的数量;且 $s=1, 2, \dots, \text{num}-1$; λ 为比例因子, \mathbf{G}^s 为射影单应矩阵;进而由 $\mathbf{H}^s = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{G}^s \mathbf{C}$ 求得单应矩阵 \mathbf{H}^s , 其中 \mathbf{C} 为 (u_0, v_0) 相关矩阵;选取 (u_0, v_0) 初始值为图像几何中心以确定矩阵 \mathbf{C} ;任选一组图像即可求解出 f_x, f_y 初始估计值:

$$f_x = \frac{\mathbf{H}^s(1,3) + \mathbf{H}_\delta^s(3,1)}{\mathbf{H}_\delta^s(1,3) + \mathbf{H}^s(3,1)}, f_y = \frac{\mathbf{H}^s(2,3) + \mathbf{H}_\delta^s(3,2)}{\mathbf{H}_\delta^s(2,3) + \mathbf{H}^s(3,2)}$$

其中 \mathbf{H}_δ^s 为相应旋转矩阵且通过摄像机的角度传感器获取, $\mathbf{H}^s(i, j), \mathbf{H}_\delta^s(i, j)$ 分别表示矩阵 $\mathbf{H}^s, \mathbf{H}_\delta^s$ 的第 i 行第 j 列元素;在计算出初始估计值后,利用最小化图像平面反投影误差函数来求取内参数的最终优化值;将目标函数定义为:

$$J(\hat{f}_x, \hat{f}_y, \hat{u}_0, \hat{v}_0) = \sum_{s=1}^{\text{num}-1} \sum_{t=1}^{n_s} (\mathbf{p}_c^{(s+1),t} - \hat{\mathbf{p}}_c^{(s+1),t}(\hat{\mathbf{A}}(z_{rk}), \mathbf{H}_d^s, \mathbf{p}_c^{s,t}))^2$$

其中 num 为图像数, $\mathbf{A}(z_{rk})$ 为内参数阵, $\hat{\mathbf{A}}(z_{rk})$ 表示对 $\mathbf{A}(z_{rk})$ 的估计, n_s 表示第 s 与第 s+1 图像上的匹配像素点个数, $\hat{f}_x, \hat{f}_y, \hat{u}_0, \hat{v}_0$ 表示四个内参数的自标定结果, 反投影点的估计 $\hat{\mathbf{p}}_c^{(s+1),t}$ 通过式 $\hat{\mathbf{p}}_c^{(s+1),t} = \lambda \hat{\mathbf{A}}(z_{rk}) \mathbf{H}_d^s \hat{\mathbf{A}}^{-1}(z_{rk}) \mathbf{p}_c^{s,t}$ 进行计算。

室外环境下变焦云台摄像机全自动标定方法

技术领域

[0001] 本发明属于计算机视觉与摄像机标定的技术领域,特别是涉及一种室外环境下变焦云台摄像机全自动标定方法。

背景技术

[0002] 变焦云台摄像机(Pan-Tilt-Zoom, PTZ)能够对焦距、姿态、光圈等进行自动调节与控制,具有灵活、视场范围大、对光照条件适应能力强等特点,因此已在视频监控、电子安防、机器人导航,智能空间等各个领域得到了广泛的应用。随着图像处理技术,模式识别技术以及计算机处理技术等的高速发展,一方面,对运动目标的检测、分类、跟踪、超分辨率重建与行为分析等成为一个重要的发展方向;另外一方面,利用视觉传感器对运动目标的状态如尺寸,速度等进行几何测量或者估计,在自动仓储、加工制造、交通事故鉴定等方面的需求推动下,也亟待便捷度与精度的改善。

[0003] 为了提高视觉测量的精度,往往需要使用离线采集的大量数据对摄像机的模型参数进行预先标定。经典的摄像机标定算法,如Tsai的两步标定法[1],张正友的平面标定法[2]等,主要研究焦距固定情况下的摄像机标定算法。该类方法利用高精度的立体或平面标定设备,借助于线性最小二乘/奇异值分解,以及基于最大似然准则的非线性优化方法,能够达到较为精确的标定结果[3,4]。遗憾的是,由于温度、使用环境、底座震动等因素影响,摄像机参数往往逐渐发生变化,造成实际参数与出厂参数偏差较大,从而导致视觉测量精度较低甚至产生错误。

[0004] 此外,在室外工作场合下,利用参考标定物对摄像机进行标定往往非常繁琐,甚至难以实现。为了解决这一问题,通常需要在现场环境下,如公共场所监控,自主机器人载体上等,自主进行摄像机参数标定,即完成摄像机自标定[5-11]。随着电子安防与视频监控行业的发展,该功能的研发可以大大地提高监控相机对环境变化的自适应能力,因此可以提高产品的核心竞争力。当前主流的摄像机自标定方法主要包括基于Kruppa方程的自标定方法与基于分层逐步标定的自标定方法。针对场景未知和摄像机任意运动的一般情形,Faugeras等人首先提出了自标定的概念,利用绝对二次曲线和极线变换得到了Kruppa方程,在此基础上可望实时在线地校准摄像机模型参数[6]。但是,直接求解Kruppa方程的方法存在计算复杂,对噪声敏感的问题,为此研究学者们又提出了分层逐步标定的思想[7-9],即首先对图像序列做射影重建,在此基础上再进行仿射标定和欧氏标定。分层逐步标定的方法以Hartley的QR分解法[7],Triggs的绝对二次曲面法[8],Pollefeys的模约束法[9]等为代表。此外,与现有这些基于离散视觉多视几何原理的标定方法不同,方勇纯等人从连续动态视觉系统的角度出发,结合非线性观测器设计理论,设计了一种摄像机内参数在线自标定与自校正方法,并证明了该方法的收敛性[12]。然而,上述方法主要适用于焦距固定情况下的摄像机标定,仍然无法解决焦距连续变化的PTZ摄像机的参数标定问题。

[0005] 针对室外PTZ监控摄像机标定问题,R. T. Collins等人在美国DARPA项目VSAM

(Visual Surveillance and Monitoring)的支持下,提出了一种室外 PTZ 摄像机的标定方法。遗憾的是,该方法假设摄像机变焦中心与主点(即光轴与图像平面的交点)相互重合,因而使得视觉测量的精度受到了限制 [13]。R. G. Willson 在其博士论文中对 PTZ 摄像机的标定方法进行了深入的研究,他提出了图像几何中心,主点,变焦中心,畸变中心等多个概念,对 PTZ 的严格几何数学模型进行了详细的探讨。然而由于其模型过于复杂,实际标定的步骤比较繁琐,从而限制了其应用范围 [14]。M. Sarkis 等人利用离线标定的方法,在几个焦距设定点处,分别对其焦距,主点等内参数进行了标定,然后利用移动最小二乘方法 (Moving Least Squares) 拟合出内参数随焦距设定值变化的函数曲线。这种方法需要进行离线标定,并且其精确度与离线标定次数有关,因此标定步骤较为繁琐,且无法实现全自动的在线运行 [15]。总结文献可以得知,现有方法或者在模型精度上有所欠缺,或者标定过程过于繁琐,难以实际应用。

发明内容

[0006] 本发明目的是解决现有技术存在的上述不足,提供一种室外环境下 PTZ 摄像机全自动标定方法。

[0007] 本发明为了兼顾模型准确度,精度与标定便捷性方面的需求,将 PTZ 摄像机模型分解为变焦转换模型与定焦参数模型两个部分。在此基础上,利用特征点提取与匹配技术对这两个子模型分别进行全自动标定,然后将两者相互融合。因而,一方面,着重考虑到变焦中心随焦距连续变化的情况,求取了多参考点变焦转换模型;另一方面,在视觉测量时,又能够根据变焦转换模型将不同焦距参数下的图像首先变换到某一定焦等效图像中,进而可以根据定焦摄像机参数完成精度较高的视觉测量任务,同时避免了求解主点,焦距等内参数随变焦参数的变化规律,使得标定过程更为快捷。实验结果证明本发明算法具有全自动、便捷、且精度较高的优点。

[0008] 本发明提供的室外环境下变焦云台摄像机全自动标定方法包括:

[0009] 第 1, 变焦云台摄像机, 简称 PTZ 摄像机模型建立

[0010] 为了兼顾模型的准确性与标定的快捷性, 本发明将先考虑模型变焦中心 (zoom 中心) 随着变焦参数 (即 zoom 值) 变化的情况, 建立变焦转换模型; 根据该模型, 可将不同 zoom 值下的图像等效转换为特定 zoom 值下的图像。最后, 根据特定 zoom 值下建立的定焦参数模型, 可以对外界物体进行相关的视觉测量。

[0011] 第 1.1, 对于单参考点变焦转换模型, 采用如下所示的模型:

$$[0012] \quad p_{xi}^{z_2} - C_x^{z_1}(z_2) = M^{z_1}(z_2)(p_{xi}^{z_1} - C_x^{z_1}(z_2)) \quad (1)$$

$$[0013] \quad p_{yi}^{z_2} - C_y^{z_1}(z_2) = M^{z_1}(z_2)(p_{yi}^{z_1} - C_y^{z_1}(z_2)) \quad (2)$$

[0014] 上式中, $(p_{xi}^{z_1}, p_{yi}^{z_1})$ 与 $(p_{xi}^{z_2}, p_{yi}^{z_2})$ 分别表示三维特征点 P_i 在 zoom 值为 z_1 和 z_2 时的像素坐标, 且通过通用的特征点提取与匹配算法自动获得, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$, n 表示三维特征点的个数且通过通用的特征点提取与匹配算法自动确定; $(C_x^{z_1}(z_2), C_y^{z_1}(z_2))$ 表示摄像机 zoom 值从 z_1 变化到 z_2 时图像的 zoom 中心, $M^{z_1}(z_2)$ 表示对应的缩放系数。式 (1) (2) 描述了摄像机变焦转换模型, 即将 zoom 值为 z_1 时的图像作为参考图像, 把其转换到 zoom 值为 z_2 时的图像像素间的数学变化关系。

[0015] 第 1.2, 在摄像机 zoom 值固定时, 本发明将采用如下小孔摄像机模型:

$$[0016] \quad \mathbf{A}(z_r) = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0017] 其中, $\mathbf{A}(z_r)$ 表示在特定变焦参数 z_r 时的摄像机内参数矩阵, f_x, f_y 分别表示有效焦距沿图像 u 轴与 v 轴方向的尺度因子, (u_0, v_0) 表示主点位置。

[0018] 综上所述, PTZ 摄像机模型标定即在 z_1, z_2 为任意值的情况下, 求解参数 $M^{z_1}(z_2)$, $(C_x^{z_1}(z_2), C_y^{z_1}(z_2))$, f_x, f_y 以及 (u_0, v_0) 。

[0019] 第 2, 多参考点变焦转换模型自标定

[0020] 第 2.1 单参考点变焦转换模型标定

[0021] 本小节将首先对单参考点变焦转换模型标定算法进行研究。选定一个参考 zoom 值 z_1 , 根据匹配特征点对 $(p_{xi}^{z_1}, p_{yi}^{z_1})$ 与 $(p_{xi}^{z_2}, p_{yi}^{z_2})$ ($i = 1, 2, 3 \cdots n$), 求解其到任意变焦参数 z_2 之间的变焦转换模型, 即参数 $M^{z_1}(z_2), C_x^{z_1}(z_2), C_y^{z_1}(z_2)$ 。

[0022] 对式 (1) (2) 进行整理可得:

$$[0023] \quad \mathbf{p}_i^{z_2} = \mathbf{H}_{z_1}^{z_2} \cdot \mathbf{p}_i^{z_1} \quad (4)$$

[0024] 其中 $\mathbf{p}_i^{z_1}, \mathbf{p}_i^{z_2}$ 分别为 zoom 值为 z_1 和 z_2 时的三维特征点 P_i 的图像齐次坐标, 即 $\mathbf{p}_i^{z_2} = [p_{xi}^{z_2}, p_{yi}^{z_2}, 1]^T$, $\mathbf{p}_i^{z_1} = [p_{xi}^{z_1}, p_{yi}^{z_1}, 1]^T$, 且符号 ‘T’ 表示对相应矩阵求转置, 矩阵 $\mathbf{H}_{z_2}^{z_1}$ 表示对应两幅图像的 2D 单应矩阵, 为如下表达式:

$$[0025] \quad \mathbf{H}_{z_1}^{z_2} = \begin{bmatrix} M^{z_1}(z_2) & 0 & (1 - M^{z_1}(z_2))C_x^{z_1}(z_2) \\ 0 & M^{z_1}(z_2) & (1 - M^{z_1}(z_2))C_y^{z_1}(z_2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0026] 根据式 (4) 可知, zoom 值变化前后图像之间的变换关系可以用 2 维单应矩阵 $\mathbf{H}_{z_1}^{z_2}$ 来表示。因此, 根据通用的特征提取与匹配算法 [16], 得到四对或四对以上的匹配特征点 $(p_{xi}^{z_1}, p_{yi}^{z_1})$ 与 $(p_{xi}^{z_2}, p_{yi}^{z_2})$ ($i = 1, 2, \dots, n, n \geq 4$) 时, 便可利用线性最小二乘或奇异值分解等 SVD 方法 [2] 求解出 $\mathbf{H}_{z_1}^{z_2}$ 。在此基础上, 根据式 (5), 便可从矩阵 $\mathbf{H}_{z_1}^{z_2}$ 中求解出变焦转换模型参数 $M^{z_1}(z_2), C_x^{z_1}(z_2), C_y^{z_1}(z_2)$:

$$[0027] \quad M^{z_1}(z_2) = \frac{H_{z_1}^{z_2}(1,1) + H_{z_1}^{z_2}(2,2)}{2} \quad (6)$$

$$[0028] \quad C_x^{z_1}(z_2) = \frac{H_{z_1}^{z_2}(1,3)}{1 - M^{z_1}(z_2)}, C_y^{z_1}(z_2) = \frac{H_{z_1}^{z_2}(2,3)}{1 - M^{z_1}(z_2)} \quad (7)$$

[0029] 其中, $\mathbf{H}_{z_1}^{z_2}(i, j)$ 表示矩阵 $\mathbf{H}_{z_1}^{z_2}$ 的第 i 行第 j 列元素。

[0030] 第 2.2 多参考点变焦转换模型标定

[0031] 当 zoom 范围较大时,一方面,当前 zoom 值下的图像与参考 zoom 值时图像之间能够匹配的特征点比较少;另一方面,变焦中心的变化在范围较大时呈现出较强的非线性。鉴于上述原因,本文选取多个 zoom 值作为参考点,建立了多参考点变焦转换模型。利用各个参考点之间的转换关系,能够将当前图像转变为任意 zoom 值下的图像。具体模型如下所述:

[0032] 根据式 $\mathbf{p}_i^{z_2} = \mathbf{H}_{z_1}^{z_2} \cdot \mathbf{p}_i^{z_1}$, 任意 zoom 值 z_{rk}^T 下的图像点 $\mathbf{p}_i^{z_{rk}^T}$ 到 zoom 值 $z_{r1} = 0$ 下对应图像点 $\mathbf{p}_i^{z_{r1}}$ 的变换为:

$$[0033] \quad \mathbf{p}_i^{z_{rk}^T} = \mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T} \cdot \mathbf{p}_i^{z_{rk}}$$

$$[0034] \quad = \mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T} \cdot \mathbf{H}_{z_{r(k-1)}}^{z_{rk}} \cdot \mathbf{p}_i^{z_{r(k-1)}}$$

$$[0035] \quad = \mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T} \cdot \mathbf{H}_{z_{r(k-1)}}^{z_{rk}} \cdots \mathbf{H}_{z_{r2}}^{z_{r3}} \cdot \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{r2}} \cdot \mathbf{p}_i^{z_{r1}}$$

[0036] 上式中, z_{rk} 表示第 k 个参考 zoom 值 ($k = 1, 2, \dots, k_n$), 且满足 $z_{r1} < z_{r2} < \dots < z_{rk_n}$ 。令 z_{rk}^T 表示 z_{rk} 与 $z_{r(k+1)}$ 之间 ($\tau = 1, 2, \dots, \tau_k$) 以 z_{rk} 作为参考点的某一 zoom 值, 即 $z_{rk} < z_{rk}^T \leq z_{r(k+1)}$, k_n 与 τ_k 分别为 k 与 τ 的最大值, 并且由下面所述的标定步骤自动决定其值的大小。

[0037] 由此可得多参考点变焦转换模型如下:

$$[0038] \quad \mathbf{p}_i^{z_{rk}^T} = \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T} \cdot \mathbf{p}_i^{z_{r1}} \quad (8)$$

$$[0039] \quad \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T} = \mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T} \cdot \mathbf{H}_{z_{r(k-1)}}^{z_{rk}} \cdots \mathbf{H}_{z_{r2}}^{z_{r3}} \cdot \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{r2}} \quad (9)$$

$$[0040] \quad \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T} = \begin{bmatrix} M^{z_{r1}}(z_{rk}^T) & 0 & (1 - M^{z_{r1}}(z_{rk}^T))C_x^{z_{r1}}(z_{rk}^T) \\ 0 & M^{z_{r1}}(z_{rk}^T) & (1 - M^{z_{r1}}(z_{rk}^T))C_y^{z_{r1}}(z_{rk}^T) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0041] 其中 $\mathbf{p}_i^{z_{rk}^T}$ 表示 zoom 值为 z_{rk}^T 时的图像点齐次坐标, $\mathbf{p}_i^{z_{r1}}$ 表示 zoom 值为 z_{r1} 时的图像点齐次坐标, $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}$ 表示 zoom 值为 z_{rk}^T 时的图像与 zoom 值为 z_{r1} 时的图像的 2D 单应矩阵, 同样地, $\mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T}, \mathbf{H}_{z_{r(k-1)}}^{z_{rk}}$ 为相应的图像的 2D 单应矩阵; k_n, τ_k 由算法自动决定其值的大小。

[0042] 在此基础上, 根据式 (10) 可以求解出以 zoom 值 $z_{r1} = 0$ 为全局参考点的等效 zoom 中心 $C_x^{z_{r1}}(z_{rk}^T), C_y^{z_{r1}}(z_{rk}^T)$ 以及缩放系数 $M^{z_{r1}}(z_{rk}^T)$:

$$[0043] \quad M^{z_{r1}}(z_{rk}^T) = \frac{\mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T}(1,1) + \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}(2,2)}{2} \quad (11)$$

$$[0044] \quad C_x^{z_{r1}}(z_{rk}^T) = \frac{\mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T}(1,3)}{1 - M^{z_{r1}}(z_{rk}^T)}, C_y^{z_{r1}}(z_{rk}^T) = \frac{\mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T}(2,3)}{1 - M^{z_{r1}}(z_{rk}^T)} \quad (12)$$

[0045] 其中, $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}(i, j)$ 表示矩阵 $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}$ 的第 i 行第 j 列元素。

[0046] 多参考点变焦转换模型参数的具体标定步骤如下:(标定流程图见附图 1)

[0047] 第 2.2.1, 初始化:令 $k = 1, z_{rk} = 0, \tau = 1$ 。设定摄像机 zoom 值为 z_{rk} , 拍摄并存储图像 $I(z_{rk})$ 。

[0048] 第 2.2.2, 取 $z_{rk}^T = z_{rk} + \tau n_{step}$ (n_{step} 即 zoom 每次变化的步长)。当 $z_{rk}^T > z_{max}$ (z_{max} 为摄像机的最大 zoom 值), 令 $\tau = \tau - 1, k_n = k, \tau_k = \tau$, 转第 2.2.4 步。

[0049] 第 2.2.3, 设定摄像机的 zoom 值为 z_{rk}^T , 拍摄并存储图像 $I(z_{rk}^T)$, 根据通用的特征提取与匹配算法, 对图像 $I(z_{rk}^T)$ 与 $I(z_{rk})$ 进行特征匹配, 得到第 i 个匹配特征点对 $\mathbf{p}_i^{z_{rk}^T}, \mathbf{p}_i^{z_{rk}}$, 如果匹配特征点的对数 $n(z_{rk}^T) \geq n_0$ (n_0 为匹配点对数的阈值), 则根据式 (4) 计算 $\mathbf{H}_{z_{rk}^T, z_{rk}}$ 并保存 ($\mathbf{H}_{z_{rk}^T, z_{rk}}$ 表示对应两幅图像的 2D 单应矩阵), 令 $\tau = \tau + 1$, 转第 2.2.2 步; 当 $n(z_{rk}^T) < n_0$, 则令 $k = k + 1$, 即加入一个参考点 z_{rk} , 设定其 zoom 值为 $z_{rk} = z_{r(k-1)}^{T-1}$, 设定 $\tau = 1$, 转第 2.2.2 步。

[0050] 第 2.2.4, 根据式 (9), 可以计算出任意 zoom 值 z_{rk}^T 下的图像到 zoom 值 $z_{r1} = 0$ 下图像之间的数学变换矩阵 $\mathbf{H}_{z_{rk}^T, z_{r1}}$ 。即利用单应矩阵回溯技术, 将各个参考 zoom 值下的变焦转换关系巧妙地融入到以初始 zoom 值 z_{r1} 作为全局参考点的等效变焦转换模型之中。

[0051] 第 2.2.5, 在计算得到 $\mathbf{H}_{z_{rk}^T, z_{r1}}$ 的基础上, 根据式 (11) 与式 (12) 求解出以 zoom 值 $z_{r1} = 0$ 为全局参考点的等效 zoom 中心 $C_x^{z_{r1}}(z_{rk}^T), C_y^{z_{r1}}(z_{rk}^T)$ 以及缩放系数 $M^{z_{r1}}(z_{rk}^T)$ 。

[0052] 第 2.2.6, 利用通用的数据拟合方法, 得到以 zoom 值 z_{r1} 作为全局参考点下的等效 zoom 中心与缩放系数曲线。

[0053] 第 3, 定焦参数模型自标定

[0054] 如附图 2 所示, F_w, F_c 分别表示世界坐标系与摄像机坐标系, 两者之间的关系可以用水平旋转与俯仰运动来表示。其中, 其中 α_s 为水平旋转角度值, β_s 为竖直俯仰角度值, 箭头表示其正方向, F'_w 为中间转换坐标系。首先, 将摄像机的 zoom 值固定为某一参考值 $z_{rk} (1 \leq k \leq k_n)$, 在此条件下, 对于摄像机不同位置拍取一系列图像 I_1, I_2, \dots, I_{num} (num 为图像幅数), 并由云台摄像机的角度传感器获取其相应的旋转角度信息 (α_s, β_s) ($s = 1, 2, \dots, num$)。

[0055] 以相邻两幅图像为一对, 得到 $(num-1)$ 对图像。接着分别对每对图像进行特征点提取与匹配, 来求解 zoom 值为 z_{rk} 时的定焦参数模型, 即参数 f_x, f_y, u_0, v_0 。在拍摄图像时, 合理地设定摄像机的姿态角以保证相邻每对图像含有足够多特征点。

[0056] 对于第 $s (s = 1, 2, \dots, num-1)$ 对图像, 图像 I_s 和 I_{s+1} 经特征点提取与匹配算法后, 得到 n_s 对匹配特征点。对于第 $t (t = 1, 2, \dots, n_s)$ 对匹配特征点, 其中 n_s 通过通用的图像特征点提取与跟踪算法自动确定, 根据小孔成像模型, 有以下关系:

$$[0057] \quad \mathbf{p}_c^{s,t} = \frac{1}{Z_c^{s,t}} \mathbf{A}(z_{rk}) \mathbf{R}_{\beta_s} \mathbf{R}_{\alpha_s} \mathbf{P}_w^{s,t} \quad (13)$$

$$[0058] \quad \mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \frac{1}{Z_c^{(s+1),t}} \mathbf{A}(z_{rk}) \mathbf{R}_{\beta_{s+1}} \mathbf{R}_{\alpha_{s+1}} \mathbf{P}_w^{s,t} \quad (14)$$

[0059] 上式中, $\mathbf{p}_c^{s,t}, \mathbf{p}_c^{(s+1),t}$ 分别表示第 t 对匹配特征点在图像 I_s, I_{s+1} 中的齐次像素坐标, 该特征点在三维世界坐标系中的非齐次坐标为 $\mathbf{P}_{\mathcal{W}}^{s,t}$, 而 $Z_c^{s,t}$ 与 $Z_c^{(s+1),t}$ 分别表示该特征点在其对应的摄像机坐标系下的深度信息。矩阵 $\mathbf{R}_{\alpha_s}, \mathbf{R}_{\alpha_{s+1}}, \mathbf{R}_{\beta_s}, \mathbf{R}_{\beta_{s+1}}$ 分别表示由水平旋转角与俯仰角对应的旋转矩阵, 其中 $\mathbf{R}_{\alpha_s}, \mathbf{R}_{\beta_s}$ 的表达式如下 ($\mathbf{R}_{\alpha_{s+1}}, \mathbf{R}_{\beta_{s+1}}$ 同理可得):

$$[0060] \quad \mathbf{R}_{\alpha_s} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_s & 0 & \sin \alpha_s \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_s & 0 & \cos \alpha_s \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{\beta_s} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_s & -\sin \beta_s \\ 0 & \sin \beta_s & \cos \beta_s \end{bmatrix} \quad (15)$$

[0061] 综合式(13)与式(14), 可得:

$$[0062] \quad \mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \frac{Z_c^{s,t}}{Z_c^{(s+1),t}} \mathbf{A}(z_{rk}) \mathbf{R}_{\beta_{s+1}} \mathbf{R}_{\alpha_{s+1}-\alpha_s} \mathbf{R}_{\beta_s}^T \mathbf{A}^{-1}(z_{rk}) \mathbf{p}_c^{s,t} \quad (16)$$

[0063] 对上式整理得:

$$[0064] \quad \mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \lambda \mathbf{A}(z_{rk}) \mathbf{H}_\delta^s \mathbf{A}^{-1}(z_{rk}) \mathbf{p}_c^{s,t} \quad (17)$$

[0065] 其中, λ 为比例因子, \mathbf{H}_δ^s 为 3×3 外参数角度矩阵且可以根据角度传感器获得, 其表达式如下:

$$[0066] \quad \lambda = \frac{Z_c^{s,t}}{Z_c^{(s+1),t}}, \mathbf{H}_\delta^s = \mathbf{R}_{\beta_{s+1}} \mathbf{R}_{\alpha_{s+1}-\alpha_s} \mathbf{R}_{\beta_s}^T.$$

[0067] 根据式(3), 摄像机内参数矩阵可进行如下分解:

$$[0068] \quad \mathbf{A}(z_{rk}) = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & u_0 \\ 0 & 1 & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{F} \quad (18)$$

[0069] 其中, 矩阵 \mathbf{C} 和 \mathbf{F} 为如下表达式:

$$[0070] \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & u_0 \\ 0 & 1 & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

[0071] 把式(18)代入式(17)整理可得:

$$[0072] \quad \mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \lambda \mathbf{C} \mathbf{F} \mathbf{H}_\delta^s \mathbf{F}^{-1} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{p}_c^{s,t} \quad (20)$$

$$[0073] \quad \mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \lambda \mathbf{C} \mathbf{H}^s \mathbf{C}^{-1} \mathbf{p}_c^{s,t} \quad (21)$$

$$[0074] \quad \mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \lambda \mathbf{G}^s \mathbf{p}_c^{s,t} \quad (22)$$

[0075] 其中单应矩阵 \mathbf{H}^s 和射影单应矩阵 \mathbf{G}^s 为如下表达式:

$$[0076] \quad \mathbf{H}^s = \mathbf{F} \mathbf{H}_\delta^s \mathbf{F}^{-1}, \mathbf{G}^s = \mathbf{C} \mathbf{H}^s \mathbf{C}^{-1} \quad (23)$$

[0077] 即

$$[0078] \quad \mathbf{H}^s = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{G}^s \mathbf{C} \quad (24)$$

[0079] 根据式(22), 利用通用的特征提取与匹配算法, 从每一对图像中提取出四对或四对以上的匹配特征点, 即可利用奇异值分解等方法 [2] 求解出射影单应矩阵 \mathbf{G}^s 。本发明接

下来采用线性求解和非线性优化的方法,求解定焦参数模型的内参数。

[0080] 对于非线性的初始条件,选取 (u_0, v_0) 初始值为图像几何中心,这样就确定了矩阵 C。任选一对图像,根据式 (24) 可求得矩阵 H^s 。再结合式 (19), 式 (23) 中矩阵 F 和 H^s 的定义,整理出如下 f_x, f_y 的初始估计值:

$$[0081] \quad f_x = \frac{\mathbf{H}^s(1,3) + \mathbf{H}_\delta^s(3,1)}{\mathbf{H}_\delta^s(1,3) + \mathbf{H}^s(3,1)} \quad (25)$$

$$[0082] \quad f_y = \frac{\mathbf{H}^s(2,3) + \mathbf{H}_\delta^s(3,2)}{\mathbf{H}_\delta^s(2,3) + \mathbf{H}^s(3,2)} \quad (26)$$

[0083] 其中, $\mathbf{H}^s(i, j), \mathbf{H}_\delta^s(i, j)$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$) 分别表示矩阵 $\mathbf{H}^s, \mathbf{H}_\delta^s$ 的第 i 行第 j 列元素。

[0084] 计算出初始估计值后,利用最小化图像平面反投影误差函数来求取 f_x, f_y, u_0, v_0 的最终优化值。根据式 (17), 目标函数可以定义为:

$$[0085] \quad J(\hat{f}_x, \hat{f}_y, \hat{u}_0, \hat{v}_0) = \sum_{s=1}^{num-1} \sum_{t=1}^{n_s} (\mathbf{p}_c^{(s+1),t} - \hat{\mathbf{p}}_c^{(s+1),t}(\hat{\mathbf{A}}(z_{rk}), \mathbf{H}_d^s, \mathbf{p}_c^{s,t}))^2 \quad (27)$$

[0086] 其中, num 为图像数, $\mathbf{A}(z_{rk})$ 为内参数阵, $\hat{\mathbf{A}}(z_{rk})$ 表示对 $\mathbf{A}(z_{rk})$ 的估计, n_s 表示第 s 与第 $s+1$ 图像上的匹配像素点个数, $\hat{f}_x, \hat{f}_y, \hat{u}_0, \hat{v}_0$ 为内参数的自标定结果, 反投影点 $\hat{\mathbf{p}}_c^{(s+1),t}$ 可以通过下式计算得到:

$$[0087] \quad \hat{\mathbf{p}}_c^{(s+1),t} = \lambda \hat{\mathbf{A}}(z_{rk}) \mathbf{H}_d^s \hat{\mathbf{A}}^{-1}(z_{rk}) \mathbf{p}_c^{s,t}$$

[0088] 第 4, 变焦转换模型与定焦参数模型的融合

[0089] 在完成多参考点变焦转换模型与定焦参数模型的标定后,可按照如下方法对两个模型进行融合与应用。例如,在视觉高度测量的任务中,为了对某 zoom 值下图像中的感兴趣目标进行高度测量,首先,根据多参考点变焦转换模型中得到的全局参考点下的等效 zoom 中心与缩放系数曲线,将该图像变换为特定 zoom 值下的已完成定焦参数模型标定的等效图像;进而,根据该 zoom 值下的定焦参数模型并利用通用的高度测量方法,完成精度较高的视觉测量任务。如此便可避免对主点,焦距等内参数随变焦参数变化规律的求解,使得 PTZ 摄像机下的视觉测量工作更为方便快捷。

[0090] 本发明的优点和有益效果

[0091] 本发明提出了一种可全自动运行且精度较高的 PTZ 摄像机自标定方法。这种标定方法将摄像机模型分解为变焦转换模型与定焦参数模型,既考虑了变焦中心的变化,又考虑了变焦中心与主点位置的不同,从而使模型结构更为准确完整。此外,由于建立了多参考点变焦模型,因此可以很好地解决变焦情况下特征匹配点过少的问题,达到了较高的标定精度。通过大量实验结果充分证明了本发明算法的有效性。

附图说明:

[0092] 图 1 为多参考点变焦转换模型标定流程图;

[0093] 图 2 为定焦模型自标定中的坐标系变换图;

- [0094] 图 3 为多参考点变焦转换模型下的匹配点对数；
- [0095] 图 4 为多参考点变焦转换模型下的缩放倍数；
- [0096] 图 5 表示多参考点变焦转换模型下的 zoom 中心 x 坐标；
- [0097] 图 6 表示多参考点变焦转换模型下的 zoom 中心 y 坐标；
- [0098] 图 7 为全局参考点变焦转换模型下的缩放倍数；
- [0099] 图 8 为全局参考点变焦转换模型下的 zoom 中心 x 坐标；
- [0100] 图 9 为全局参考点变焦转换模型下的 zoom 中心 y 坐标；
- [0101] 图 10 是图像变换模型对比结果一。其中 A 图表示将 $z_{r1} = 0$ 时的图像按照标定出的参数进行放大后的结果, B 图表示 $z_{r1} = 1000$ 时所拍摄的图像；
- [0102] 图 11 是图像变换模型对比结果二。其中其中 A 图表示将 $z_{r1} = 1000$ 时的图像按照标定参数进行缩小后的结果, B 图表示 $z_{r1} = 0$ 时所拍摄的图像。

具体实施方式：

[0103] 实施例 1：

[0104] 第 1, 变焦云台摄像机, 简称 PTZ 摄像机模型的建立

[0105] 为了兼顾模型的准确性与标定的快捷性, 本发明将先考虑模型变焦中心 (zoom 中心) 随着变焦参数 (即 zoom 值) 变化的情况, 建立变焦转换模型; 根据该模型, 可将不同 zoom 值下的图像等效转换为特定 zoom 值下的图像。最后, 根据特定 zoom 值下建立的定焦参数模型, 可以对外界物体进行相关的视觉测量。

[0106] 第 1.1, 对于单参考点变焦转换模型, 采用如下所示的模型：

$$[0107] \quad p_{xi}^{z_2} - C_x^{z_1}(z_2) = M^{z_1}(z_2)(p_{xi}^{z_1} - C_x^{z_1}(z_2)) \quad (1)$$

$$[0108] \quad p_{yi}^{z_2} - C_y^{z_1}(z_2) = M^{z_1}(z_2)(p_{yi}^{z_1} - C_y^{z_1}(z_2)) \quad (2)$$

[0109] 上式中, $(p_{xi}^{z_1}, p_{yi}^{z_1})$ 与 $(p_{xi}^{z_2}, p_{yi}^{z_2})$ 分别表示三维特征点 P_i 在 zoom 值为 z_1 和 z_2 时的像素坐标, 且通过通用的特征点提取与匹配算法自动获得, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$, n 表示三维特征点的个数且通过通用的特征点提取与匹配算法自动确定; $(C_x^{z_1}(z_2), C_y^{z_1}(z_2))$ 表示摄像机 zoom 值从 z_1 变化到 z_2 时图像的 zoom 中心, $M^{z_1}(z_2)$ 表示对应的缩放系数。式 (1) (2) 描述了摄像机变焦转换模型, 即将 zoom 值为 z_1 时的图像作为参考图像, 把其转换到 zoom 值为 z_2 时的图像像素间的数学变化关系。

[0110] 第 1.2, 在摄像机 zoom 值固定时, 本发明将采用如下小孔摄像机模型：

$$[0111] \quad A(z_r) = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0112] 其中, $A(z_r)$ 表示在特定变焦参数 z_r 时的摄像机内参数矩阵, f_x, f_y 分别表示有效焦距沿图像 u 轴与 v 轴方向的尺度因子, (u_0, v_0) 表示主点位置。

[0113] 综上所述, PTZ 摄像机模型标定即在 z_1, z_2 为任意值的情况下, 求解参数 $M^{z_1}(z_2)$, $(C_x^{z_1}(z_2), C_y^{z_1}(z_2))$, f_x, f_y 以及 (u_0, v_0) 。

[0114] 第 2, 多参考点变焦转换模型自标定

[0115] 第 2.1, 单参考点变焦转换模型标定

[0116] 本小节将首先对单参考点变焦转换模型标定算法进行研究。选定一个参考 zoom 值 z_1 , 根据匹配特征点对 $(p_{xi}^{z_1}, p_{yi}^{z_1})$ 与 $(p_{xi}^{z_2}, p_{yi}^{z_2})$ ($i = 1, 2, 3 \dots n$), 求解其到任意变焦参数 z_2 之间的变焦转换模型, 即参数 $M^{z_1}(z_2), C_x^{z_1}(z_2), C_y^{z_1}(z_2)$ 。

[0117] 对式 (1) (2) 进行整理可得:

$$[0118] \quad \mathbf{p}_i^{z_2} = \mathbf{H}_{z_1}^{z_2} \cdot \mathbf{p}_i^{z_1} \quad (4)$$

[0119] 其中 $\mathbf{p}_i^{z_1}, \mathbf{p}_i^{z_2}$ 分别为 zoom 值为 z_1 和 z_2 时的图像齐次坐标, 即 $\mathbf{p}_i^{z_2} = [p_{xi}^{z_2}, p_{yi}^{z_2}, 1]^T$, $\mathbf{p}_i^{z_1} = [p_{xi}^{z_1}, p_{yi}^{z_1}, 1]^T$, 且符号 ‘T’ 表示对相应矩阵求转置, 矩阵 $\mathbf{H}_{z_1}^{z_2}$ 表示对应两幅图像的 2D 单应矩阵, 为如下表达式:

$$[0120] \quad \mathbf{H}_{z_1}^{z_2} = \begin{bmatrix} M^{z_1}(z_2) & 0 & (1 - M^{z_1}(z_2))C_x^{z_1}(z_2) \\ 0 & M^{z_1}(z_2) & (1 - M^{z_1}(z_2))C_y^{z_1}(z_2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0121] 根据式 (4) 可知, zoom 值变化前后图像之间的变换关系可以用 2 维单应矩阵 $\mathbf{H}_{z_1}^{z_2}$ 来表示。因此, 根据通用的特征提取与匹配算法 [16], 得到四对或四对以上的匹配特征点 $(p_{xi}^{z_1}, p_{yi}^{z_1})$ 与 $(p_{xi}^{z_2}, p_{yi}^{z_2})$ ($i = 1, 2, \dots, n, n \geq 4$) 时, 便可利用线性最小二乘或奇异值分解等 SVD 方法 [2] 求解出 $\mathbf{H}_{z_1}^{z_2}$ 。在此基础上, 根据式 (5), 便可从矩阵 $\mathbf{H}_{z_1}^{z_2}$ 中求解出变焦转换模型参数 $M^{z_1}(z_2), C_x^{z_1}(z_2), C_y^{z_1}(z_2)$:

$$[0122] \quad M^{z_1}(z_2) = \frac{H_{z_1}^{z_2}(1,1) + H_{z_1}^{z_2}(2,2)}{2} \quad (6)$$

$$[0123] \quad C_x^{z_1}(z_2) = \frac{H_{z_1}^{z_2}(1,3)}{1 - M^{z_1}(z_2)}, C_y^{z_1}(z_2) = \frac{H_{z_1}^{z_2}(2,3)}{1 - M^{z_1}(z_2)} \quad (7)$$

[0124] 其中, $\mathbf{H}_{z_1}^{z_2}(i, j)$ 表示矩阵 $\mathbf{H}_{z_1}^{z_2}$ 的第 i 行第 j 列元素。

[0125] 第 2.2, 多参考点变焦转换模型标定

[0126] 当 zoom 范围较大时, 一方面, 当前 zoom 值下的图像与参考 zoom 值时图像之间能够匹配的特征点比较少; 另一方面, 变焦中心的变化在范围较大时呈现出较强的非线性。鉴于上述原因, 本文选取多个 zoom 值作为参考点, 建立了多参考点变焦转换模型。利用各个参考点之间的转换关系, 能够将当前图像转变为任意 zoom 值下的图像。具体模型如下所述:

[0127] 根据式 (4), 任意 zoom 值 z_{rk}^T 下的图像点 $\mathbf{p}_i^{z_{rk}^T}$ 到 zoom 值 $z_{r1} = 0$ 下对应图像点 $\mathbf{p}_i^{z_{r1}}$ 的变换为:

$$[0128] \quad \mathbf{p}_i^{z_{rk}^T} = \mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{r1}} \cdot \mathbf{p}_i^{z_{rk}}$$

$$[0129] \quad = \mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T} \cdot \mathbf{H}_{z_{r(k-1)}}^{z_{rk}} \cdot \mathbf{p}_i^{z_{r(k-1)}}$$

$$[0130] \quad = \mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T} \cdot \mathbf{H}_{z_{r(k-1)}}^{z_{rk}} \cdots \mathbf{H}_{z_{r3}}^{z_{rk}} \cdot \mathbf{H}_{z_{r2}}^{z_{rk}} \cdot \mathbf{p}_i^{z_{r1}}$$

[0131] 上式中, z_{rk} 表示第 k 个参考 zoom 值 ($k = 1, 2, \dots, k_n$), 且满足 $z_{r1} < z_{r2} < \dots < z_{rk_n}$, z_{rk}^T 表示 z_{rk} 与 $z_{r(k+1)}$ 之间 ($\tau = 1, 2, \dots, \tau_k$) 以 z_{rk} 作为参考点的某一 zoom 值, 即 $z_{rk} < z_{rk}^T \leq z_{r(k+1)}$, 其中, k_n 与 τ_k 均为正整数, τ 为正整数且最大为 τ_k , k_n 与 τ_k 由下面所述的标定步骤, 自动决定其值的大小。

[0132] 由此可得多参考点变焦转换模型如下:

$$[0133] \quad \mathbf{p}_i^{z_{rk}} = \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}} \cdot \mathbf{p}_i^{z_{r1}} \quad (8)$$

$$[0134] \quad \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}} = \mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T} \cdot \mathbf{H}_{z_{r(k-1)}}^{z_{rk}} \cdots \mathbf{H}_{z_{r2}}^{z_{rk}} \cdot \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}} \quad (9)$$

$$[0135] \quad \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T} = \begin{bmatrix} M^{z_{r1}}(z_{rk}^T) & 0 & (1 - M^{z_{r1}}(z_{rk}^T))C_x^{z_{r1}}(z_{rk}^T) \\ 0 & M^{z_{r1}}(z_{rk}^T) & (1 - M^{z_{r1}}(z_{rk}^T))C_y^{z_{r1}}(z_{rk}^T) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0136] 其中 $\mathbf{p}_i^{z_{rk}^T}$ 表示 zoom 值为 z_{rk}^T 时的图像点齐次坐标, $\mathbf{p}_i^{z_{r1}}$ 表示 zoom 值为 z_{r1} 时的图像点齐次坐标, $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}$ 表示 zoom 值为 z_{rk}^T 时的图像与 zoom 值为 z_{r1} 时的图像的 2D 单应矩阵, 同样地, $\mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T}, \mathbf{H}_{z_{r(k-1)}}^{z_{rk}}$ 为相应的图像的 2D 单应矩阵; k_n, τ_k 由算法自动决定其值的大小。

[0137] 在此基础上, 根据式 (10) 可以求解出以 zoom 值 $z_{r1} = 0$ 为全局参考点的等效 zoom 中心 $C_x^{z_{r1}}(z_{rk}^T), C_y^{z_{r1}}(z_{rk}^T)$ 以及缩放系数 $M^{z_{r1}}(z_{rk}^T)$:

$$[0138] \quad M^{z_{r1}}(z_{rk}^T) = \frac{\mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T}(1,1) + \mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}(2,2)}{2} \quad (11)$$

$$[0139] \quad C_x^{z_{r1}}(z_{rk}^T) = \frac{\mathbf{H}_{z_{rk}}^{z_{rk}^T}(1,3)}{1 - M^{z_{r1}}(z_{rk}^T)}, \quad C_y^{z_{r1}}(z_{rk}^T) = \frac{\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}(2,3)}{1 - M^{z_{r1}}(z_{rk}^T)} \quad (12)$$

[0140] 其中, $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}(i, j)$ 表示矩阵 $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}$ 的第 i 行第 j 列元素。

[0141] 多参考点变焦转换模型参数的具体标定步骤如下: (标定流程图见附图 1)

[0142] 第 2.2.1, 初始化: 令 $k = 1, z_{rk} = 0, \tau = 1$ 。设定摄像机 zoom 值为 z_{rk} , 拍摄并存储图像 $I(z_{rk})$ 。

[0143] 第 2.2.2, 取 $z_{rk}^T = z_{rk} + \tau n_{step}$ (n_{step} 即 zoom 每次变化的步长)。如果 $z_{rk}^T > z_{max}$ (z_{max} 为摄像机的最大 zoom 值), 令 $\tau = \tau - 1, k_n = k, \tau_k = \tau$, 转第 2.2.4 步。

[0144] 第 2.2.3, 设定摄像机的 zoom 值为 z_{rk}^T , 拍摄并存储图像 $I(z_{rk}^T)$, 根据通用的特征提取与匹配算法, 对图像 $I(z_{rk}^T)$ 与 $I(z_{rk})$ 进行特征匹配, 得到第 i 个匹配特征点对 $\mathbf{p}_i^{z_{rk}^T}, \mathbf{p}_i^{z_{rk}}$, 如

果匹配特征点的对数 $n(z_{rk}^T) \geq n_0$ (n_0 为匹配点对数的阈值), 则根据式 (4) 计算 $\mathbf{H}_{z_{rk}^T}^{z_{rk}^T}$ 并保存 ($\mathbf{H}_{z_{rk}^T}^{z_{rk}^T}$ 表示对应两幅图像的 2D 单应矩阵), 令 $\tau = \tau + 1$, 转第 2.2.2 步; 如果 $n(z_{rk}^T) < n_0$, 则令 $k = k + 1$, 即加入一个参考点 z_{rk} , 设定其 zoom 值为 $z_{rk} = z_{r(k-1)}^{\tau-1}$, 设定 $\tau = 1$, 转第 2.2.2 步。

[0145] 第 2.2.4, 根据式 (9), 可以计算出任意 zoom 值 z_{rk}^T 下的图像到 zoom 值 $z_{r1}=0$ 下图像之间的数学变换矩阵 $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}$ 。即利用单应矩阵回溯技术, 将各个参考 zoom 值下的变焦转换关系巧妙地融入到以初始 zoom 值 z_{r1} 作为全局参考点的等效变焦转换模型之中。

[0146] 第 2.2.5, 在计算得到 $\mathbf{H}_{z_{r1}}^{z_{rk}^T}$ 的基础上, 根据式 (11) 与式 (12) 求解出以 zoom 值 $z_{r1}=0$ 为全局参考点的等效 zoom 中心 $C_x^{z_{r1}}(z_{rk}^T)$, $C_y^{z_{r1}}(z_{rk}^T)$ 以及缩放系数 $M^{z_{r1}}(z_{rk}^T)$ 。

[0147] 第 2.2.6, 利用通用的数据拟合方法, 得到以 zoom 值 z_{r1} 作为全局参考点下的等效 zoom 中心与缩放系数曲线。

[0148] 第 3, 定焦参数模型自标定

[0149] 如附图 2 所示, F_w , F_c 分别表示世界坐标系与摄像机坐标系, 两者之间的关系可以用水平旋转与俯仰运动来表示。其中, 其中 α_s 为水平旋转角度值, β_s 为竖直俯仰角度值, 箭头表示其正方向, F'_w 为中间转换坐标系。首先, 将摄像机的 zoom 值固定为某一参考值 z_{rk} ($1 \leq k \leq k_n$), 在此条件下, 对于摄像机不同位置拍取一系列图像 I_1, I_2, \dots, I_{num} (num 为图像幅数), 并由云台摄像机的角度传感器获取其相应的旋转角度信息 (α_s, β_s) ($s = 1, 2, \dots, num$)。

[0150] 以相邻两幅图像为一对, 得到 (num-1) 对图像。接着分别对每对图像进行特征点提取与匹配, 来求解 zoom 值为 z_{rk} 时的定焦参数模型, 即参数 f_x, f_y, u_0, v_0 。在拍摄图像时, 合理地设定摄像机的姿态角以保证相邻每对图像含有足够多特征点。

[0151] 对于第 s ($s = 1, 2, \dots, num-1$) 对图像, 图像 I_s 和 I_{s+1} 经特征点提取与匹配算法后, 得到 n_s 对匹配特征点。对于第 t ($t = 1, 2, \dots, n_s$) 对匹配特征点, 其中 n_s 通过通用的图像特征点提取与跟踪算法自动确定, 根据小孔成像模型, 有以下关系:

$$[0152] \quad \mathbf{p}_c^{s,t} = \frac{1}{Z_c^{s,t}} \mathbf{A}(z_{rk}) \mathbf{R}_{\beta_s} \mathbf{R}_{\alpha_s} \mathbf{p}_w^{s,t} \quad (13)$$

$$[0153] \quad \mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \frac{1}{Z_c^{(s+1),t}} \mathbf{A}(z_{rk}) \mathbf{R}_{\beta_{s+1}} \mathbf{R}_{\alpha_{s+1}} \mathbf{p}_w^{s,t} \quad (14)$$

[0154] 上式中, $\mathbf{p}_c^{s,t}, \mathbf{p}_c^{(s+1),t}$ 分别表示第 t 对匹配特征点在图像 I_s, I_{s+1} 中的齐次像素坐标, 该特征点在三维世界坐标系中的非齐次坐标为 $\mathbf{p}_w^{s,t}$, 而 $Z_c^{s,t}$ 与 $Z_c^{(s+1),t}$ 分别表示该特征点在其对应的摄像机坐标系下的深度信息。矩阵 $\mathbf{R}_{\alpha_s}, \mathbf{R}_{\alpha_{s+1}}, \mathbf{R}_{\beta_s}, \mathbf{R}_{\beta_{s+1}}$ 分别表示由水平旋转角与俯仰角对应的旋转矩阵, 其中 $\mathbf{R}_{\alpha_s}, \mathbf{R}_{\beta_s}$ 的表达式如下 ($\mathbf{R}_{\alpha_{s+1}}, \mathbf{R}_{\beta_{s+1}}$ 同理可得):

$$[0155] \quad \mathbf{R}_{\alpha_s} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_s & 0 & \sin \alpha_s \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_s & 0 & \cos \alpha_s \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{\beta_s} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_s & -\sin \beta_s \\ 0 & \sin \beta_s & \cos \beta_s \end{bmatrix} \quad (15)$$

[0156] 综合式(13)与式(14),可得:

$$[0157] \quad \mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \frac{Z_c^{s,t}}{Z_c^{(s+1),t}} \mathbf{A}(z_{rk}) \mathbf{R}_{\beta_{s+1}} \mathbf{R}_{\alpha_{s+1}-\alpha_s} \mathbf{R}_{\beta_s}^T \mathbf{A}^{-1}(z_{rk}) \mathbf{p}_c^{s,t} \quad (16)$$

[0158] 对上式整理得:

$$[0159] \quad \mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \lambda \mathbf{A}(z_{rk}) \mathbf{H}_\delta^s \mathbf{A}^{-1}(z_{rk}) \mathbf{p}_c^{s,t} \quad (17)$$

[0160] 其中, λ 为比例因子, \mathbf{H}_δ^s 为 3×3 外参数角度矩阵且可以根据角度传感器获得,其表达式如下:

$$[0161] \quad \lambda = \frac{Z_c^{s,t}}{Z_c^{(s+1),t}}, \mathbf{H}_\delta^s = \mathbf{R}_{\beta_{s+1}} \mathbf{R}_{\alpha_{s+1}-\alpha_s} \mathbf{R}_{\beta_s}^T.$$

[0162] 根据式(3),摄像机内参数矩阵可进行如下分解:

$$[0163] \quad \mathbf{A}(z_{rk}) = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & u_0 \\ 0 & 1 & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{F} \quad (18)$$

[0164] 其中,矩阵 C 和 F 为如下表达式:

$$[0165] \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & u_0 \\ 0 & 1 & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

[0166] 把式(18)代入式(17)整理可得:

$$[0167] \quad \mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \lambda \mathbf{C} \mathbf{F} \mathbf{H}_\delta^s \mathbf{F}^{-1} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{p}_c^{s,t} \quad (20)$$

$$[0168] \quad \mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \lambda \mathbf{C} \mathbf{H}^s \mathbf{C}^{-1} \mathbf{p}_c^{s,t} \quad (21)$$

$$[0169] \quad \mathbf{p}_c^{(s+1),t} = \lambda \mathbf{G}^s \mathbf{p}_c^{s,t} \quad (22)$$

[0170] 其中单应矩阵 \mathbf{H}^s 和射影单应矩阵 \mathbf{G}^s 为如下表达式:

$$[0171] \quad \mathbf{H}^s = \mathbf{F} \mathbf{H}_\delta^s \mathbf{F}^{-1}, \mathbf{G}^s = \mathbf{C} \mathbf{H}^s \mathbf{C}^{-1} \quad (23)$$

[0172] 即

$$[0173] \quad \mathbf{H}^s = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{G}^s \mathbf{C} \quad (24)$$

[0174] 根据式(22),利用通用的特征提取与匹配算法,从每一对图像中提取出四对或四对以上的匹配特征点,即可利用奇异值分解等方法[2]求解出射影单应矩阵 \mathbf{G}^s 。本发明接下来采用线性求解和非线性优化的方法,求解定焦参数模型的内参数。

[0175] 对于非线性的初始条件,选取 (u_0, v_0) 初始值为图像几何中心,这样就确定了矩阵 C。任选一对图像,根据式(24)可求得矩阵 \mathbf{H}^s 。再结合式(19),式(23)中矩阵 F 和 \mathbf{H}^s 的定义,整理出如下 f_x, f_y 的初始估计值:

$$[0176] \quad f_x = \frac{\mathbf{H}^s(1,3) + \mathbf{H}_\delta^s(3,1)}{\mathbf{H}_\delta^s(1,3) + \mathbf{H}^s(3,1)} \quad (25)$$

$$[0177] \quad f_y = \frac{\mathbf{H}^s(2,3) + \mathbf{H}_\delta^s(3,2)}{\mathbf{H}_\delta^s(2,3) + \mathbf{H}^s(3,2)} \quad (26)$$

[0178] 其中, $\mathbf{H}^s(i, j)$, $\mathbf{H}_\delta^s(i, j)$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$) 分别表示矩阵 \mathbf{H}^s , \mathbf{H}_δ^s 的第 i 行第 j 列元素。

[0179] 计算出初始估计值后, 利用最小化图像平面反投影误差函数来求取 f_x, f_y, u_0, v_0 的最终优化值。根据式 (17), 目标函数可以定义为:

$$[0180] \quad J(\hat{f}_x, \hat{f}_y, \hat{u}_0, \hat{v}_0) = \sum_{s=1}^{num-1} \sum_{t=1}^{n_s} (\mathbf{p}_c^{(s+1),t} - \hat{\mathbf{p}}_c^{(s+1),t}(\hat{\mathbf{A}}(z_{rk}), \mathbf{H}_d^s, \mathbf{p}_c^{s,t}))^2 \quad (27)$$

[0181] 其中, num 为图像数, $\mathbf{A}(z_{rk})$ 为内参数阵, $\hat{\mathbf{A}}(z_{rk})$ 表示对 $\mathbf{A}(z_{rk})$ 的估计, n_s 表示第 s 与第 $s+1$ 图像上的匹配像素点个数, $\hat{f}_x, \hat{f}_y, \hat{u}_0, \hat{v}_0$ 为内参数的自标定结果, 反投影点 $\hat{\mathbf{p}}_c^{(s+1),t}$ 可以通过下式计算得到:

$$[0182] \quad \hat{\mathbf{p}}_c^{(s+1),t} = \lambda \hat{\mathbf{A}}(z_{rk}) \mathbf{H}_d^s \hat{\mathbf{A}}^{-1}(z_{rk}) \mathbf{p}_c^{s,t} \quad (28)$$

[0183] 第 4, 变焦转换模型与定焦参数模型的融合

[0184] 在完成多参考点变焦转换模型与定焦参数模型的标定后, 可按照如下方法对两个模型进行融合与应用。例如, 在视觉高度测量的任务中, 为了对某 $zoom$ 值下图像中的感兴趣目标进行高度测量, 首先, 根据多参考点变焦转换模型中得到的全局参考点下的等效 $zoom$ 中心与缩放系数曲线, 将该图像变换为特定 $zoom$ 值下的已完成定焦参数模型标定的等效图像; 进而, 根据该 $zoom$ 值下的定焦参数模型并利用通用的高度测量方法, 完成精度较高的视觉测量任务。如此便可避免对主点, 焦距等内参数随变焦参数变化规律的求解, 使得 PTZ 摄像机下的视觉测量工作更为方便快捷。

[0185] 第 5, 实验效果描述

[0186] 为验证上述室外环境下 PTZ 摄像机全自动标定方法的有效性, 本发明在型号为 VC-C50i 的 PTZ 摄像机上进行了实际实验验证。其中在多参考点变焦转换模型的实验中, $zoom$ 值变化范围从 0 到 1950, 选取 $n_{step} = 50$, 设置匹配点对数阈值 $z_{max} = 1950$ 。

[0187] 第 5.1, 多参考点变焦转换模型自标定结果

[0188] 在多参考点变焦转换模型的实验中, 选取 $n_{step} = 50$, 设置匹配点对数阈值 $n_0 = 20$, 按照多参考点变焦转换模型的标定步骤, 进行变焦转换模型的标定。

[0189] 附图 3 至附图 6 表示各 $zoom$ 值下的图像, 与相应的 $zoom$ 值为 z_{rk} 的参考图像之间的关系。其中, 图 3 展示了特征点的匹配对数, 并据此确立了如下的参考点: $z_{r1} = 0$, $z_{r2} = 650$, $z_{r3} = 1150$, $z_{r4} = 1450$, $z_{r5} = 1750$ 。在这些参考点下, 根据多参考点变焦转换模型标定算法, 可得各 $zoom$ 值下图像与 $zoom$ 值为 z_{rk} 的参考图像间的缩放系数 (如附图 4 所示) 和 $zoom$ 中心 (如附图 5, 附图 6 所示)。

[0190] 在得到所有图像相对于各个参考点的多参考点变焦转换模型参数后, 将基于多个参考点的变焦图像统一地转换到 $zoom$ 值为 $z_{r1} = 0$ 的全局参考点变焦转换模型中, 得到如

附图 7 所示的整体缩放系数和附图 8、附图 9 所示的整体 zoom 中心。利用数据拟合的方法，对全局参考点的缩放系数与 zoom 值关系进行函数关系拟合，拟合曲线如图 7 所示，拟合结果如下：

[0191] $\text{mag}(z_{rk}) = a \cdot \exp(b \cdot z_{rk}) + c \cdot \exp(d \cdot z_{rk})$

[0192] 其中：

[0193] $a = 0.8527, b = 0.001187$

[0194] $c = 0.001854, d = 0.004556$

[0195] 对全局参考点的 zoom 中心的 x 坐标和 y 坐标与 zoom 之间的关系，采用线性最近邻插值法分别进行拟合，得到的拟合曲线如附图 8 和附图 9 所示。

[0196] 为了对上述变焦模型进行验证，将 zoom 值为 0 的图像与 zoom 值为 100 的图像进行变换后，得到如附图 10 与附图 11 所示的结果。其中，附图 10 左图是将 zoom 值为 0 的图像按照标定出的变焦转换参数进行放大的结果，而右图则表示 zoom 值为 100 时所拍摄的图像。附图 11 左图是将 zoom 值为 100 的图像按照标定参数进行缩小的结果，而右图则是 zoom 值为 0 时所拍摄的图像（右图中的红框区域即为左图中图案部对应区域）。经过对比可知，即使在大范围变焦的情况下，左右两幅图像轮廓和样貌完全几乎重合，表明该方法达到了较高的标定精度。

[0197] 第 5.2，定焦模型自标定结果

[0198] 固定 zoom 值为参考值 $z_{r1} = 0$ ，在此前提下求取定焦参数模型，即参数 f_x, f_y, u_0, v_0 。为了验证本发明算法的准确度，首先在实验室环境下利用张正友平面标定法 [2] 对相机进行标定，结果如表 1 所示。

[0199] 表 1. 传统标定板标定结果

	f_x	f_y	u_0	v_0
[0200] 近似真实值	845.37	854.69	318.57	251.43

[0201] 接下来使用 PTZ 摄像机，连续采集不同位置的图像，利用采集到的一系列图像和位置信息，自动计算求取出定焦模型的参数，结果如表 2 所示。

[0202] 表 2. 三组图像的自标定结果

[0203]

	f_x (相对误差)	f_y (相对误差)	u_0 (相对误差)	v_0 (相对误差)
A 组 10 对图	843.36 (-0.24%)	857.08 (0.28%)	304.69 (-4.36%)	253.53 (0.83%)
B 组 10 对图	845.13 (-0.03%)	840.69 (-1.64%)	316.67 (-0.60%)	245.16 (-2.49%)
C 组 10 对图	842.90 (-0.29%)	858.91 (-0.29%)	304.02 (-4.57%)	248.39 (-1.21%)

[0204] 从表 2 可以看出，在室外环境下进行多次自标定，每组之间的结果相差较小，每一个内参数的相对误差也较小，表明本发明具有良好的稳定性，可以获得较为精确的标定结果。

[0205] 参考文献

[0206] 1. R. Y. Tsai. A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987.

- [0207] 2. Z. Zhang, A flexible new technique for camera calibration, "IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330 - 1334.
- [0208] 3. 张雪波, 方勇纯, 马博军. 基于单应矩阵的摄像机标定方法及应用. 控制工程, 2010, 17(2):248-251.
- [0209] 4. 苑英海, 方勇纯, 张雪波. 基于全局代价函数优化的立体标定方法. 仪器仪表学报, 2011, 32(10):2228-2234.
- [0210] 5. 孟晓桥, 胡占义. 摄像机自标定方法的研究与进展. 自动化学报, 2003, 29(1):110-124.
- [0211] 6. O. Faugeras, Q. T. Luong, S. Maybank. Camera self-calibration: Theory and experiments. In Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Vision, 1992:321-334.
- [0212] 7. R. Hartley. Euclidean reconstruction and invariants from multiple images. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(10):1036-1041.
- [0213] 8. B. Triggs. Auto-calibration and the absolute quadric. Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, 1997:609-614.
- [0214] 9. M. Pollefeys, L. V. Gool, A. Osterlinck. The modulus constraint: A new constraint for self-calibration. Proceedings of International Conference of Pattern Recognition, Vienna, 1996:349-353.
- [0215] 10. M. Miksch, B. Yang, K. Zimmermann, Automatic extrinsic camera self-calibration based on homography and epipolar geometry, 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010:832-839.
- [0216] 11. Ferran Espuny, Jose I. Burgos Gil. Generic Self-calibration of Central Cameras from Two Rotational Flows, International Journal of Computer Vision, 2011, 91(2):131-145.
- [0217] 12. 刘玺, 方勇纯, 李宝全, 张雪波. 一种全局指数收敛的摄像机内参数观测器. 控制理论与应用, 2011, 28(9):1082-1090.
- [0218] 13. R. T. Collins, Y. Tsin, Calibration of an Outdoor Active Camera System. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999:1528-1534.
- [0219] 14. R. G. Willson, Modeling and Calibration of Automated Zoom Lenses, Ph. D dissertation, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1994.
- [0220] 15. M. Sarkis, C. T. Senft, K. Diepold, Calibrating an automatic zoom camera with moving least squares. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(3):492-503.
- [0221] 16. D. G. Lowe, Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110, 2004.

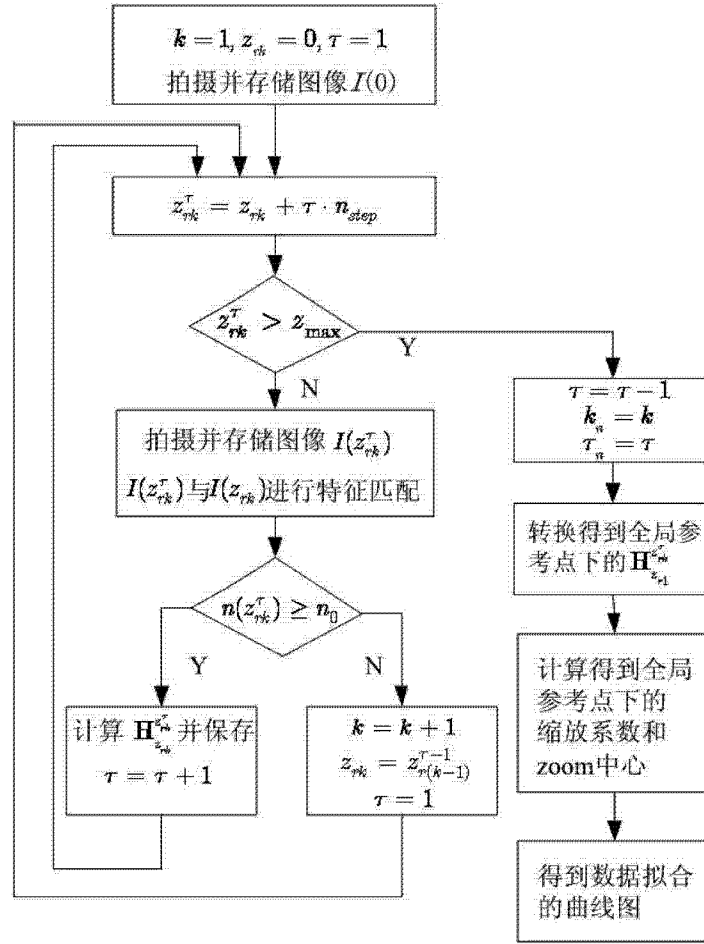


图 1

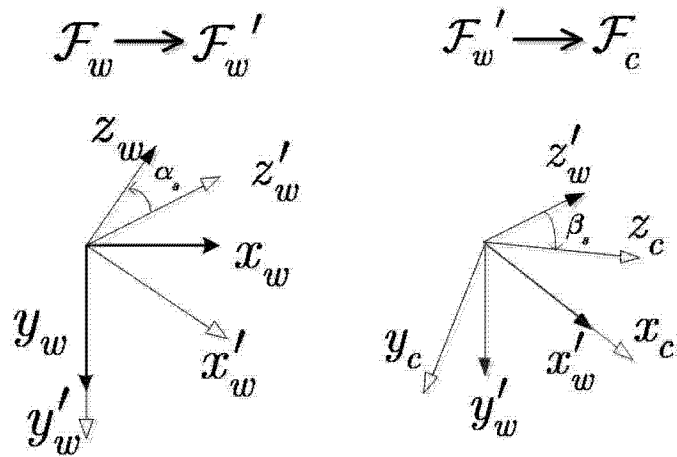


图 2

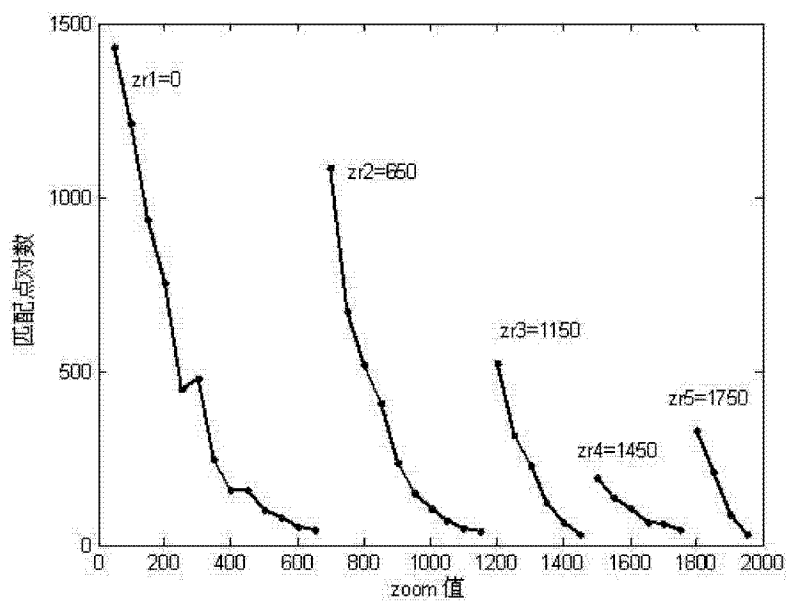


图 3

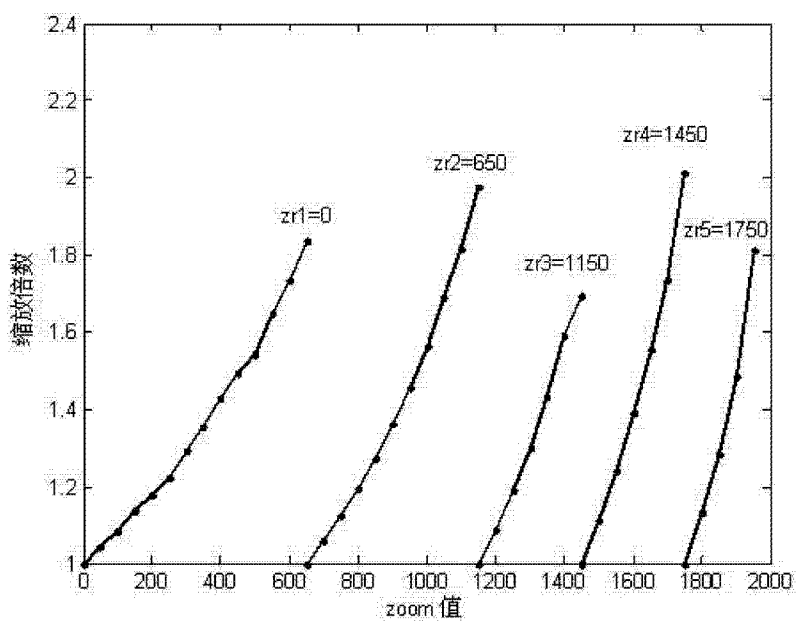


图 4

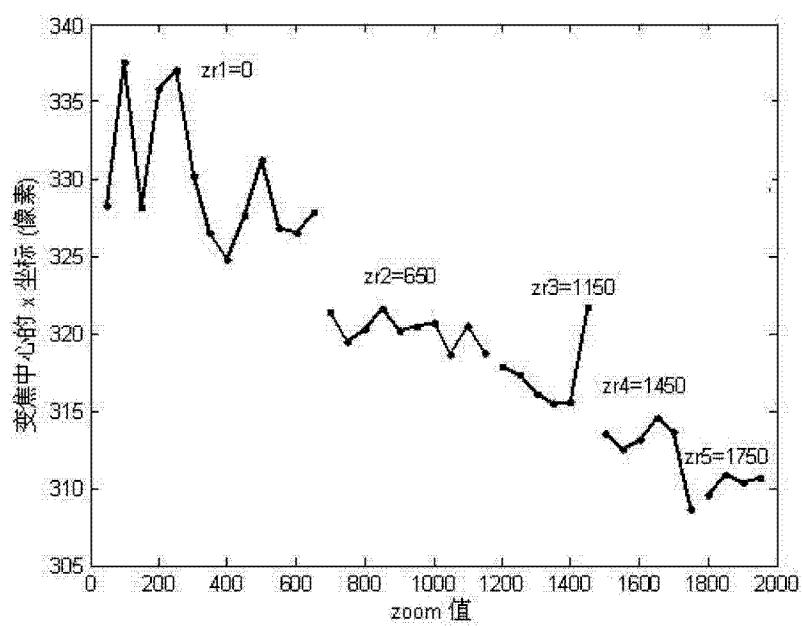


图 5

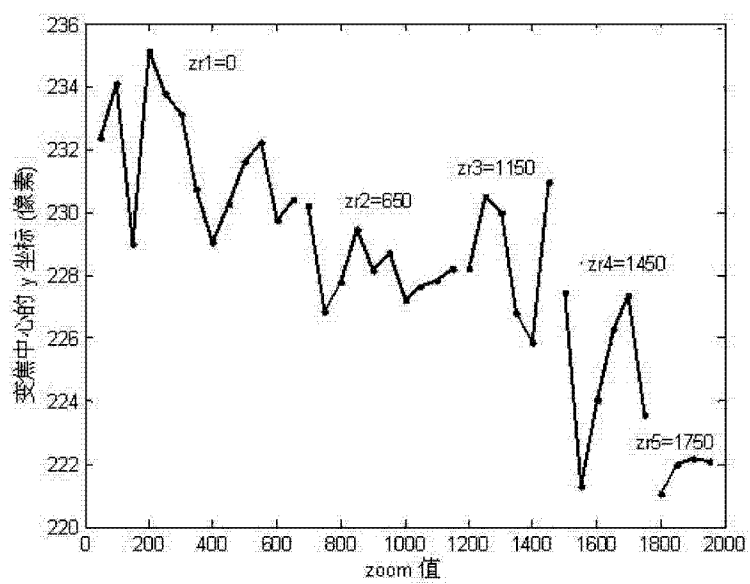


图 6

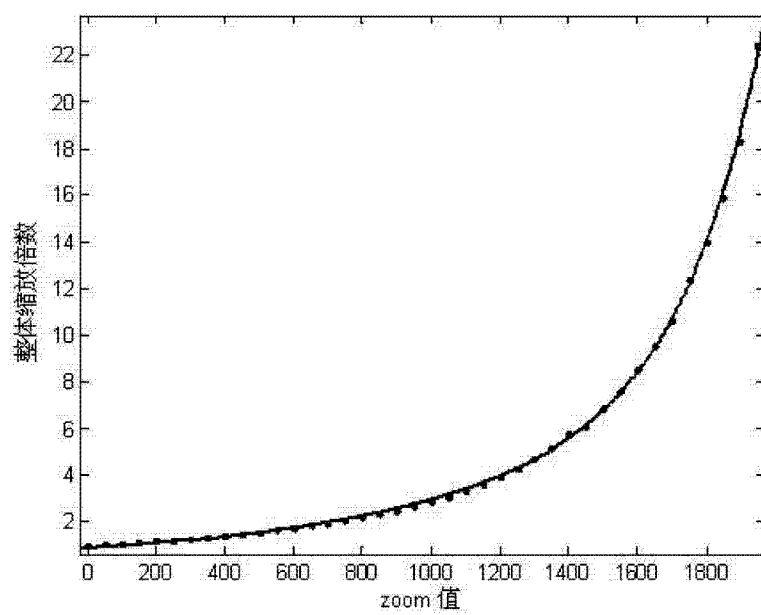


图 7

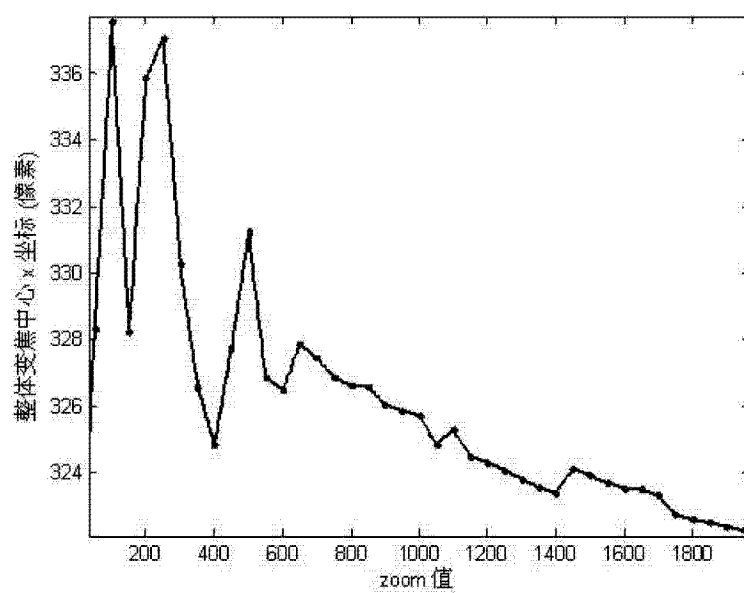


图 8

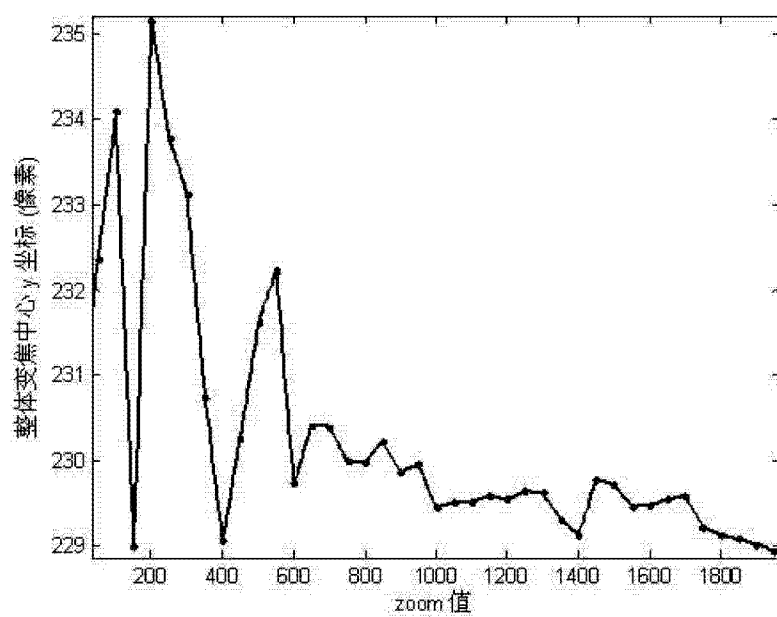


图 9

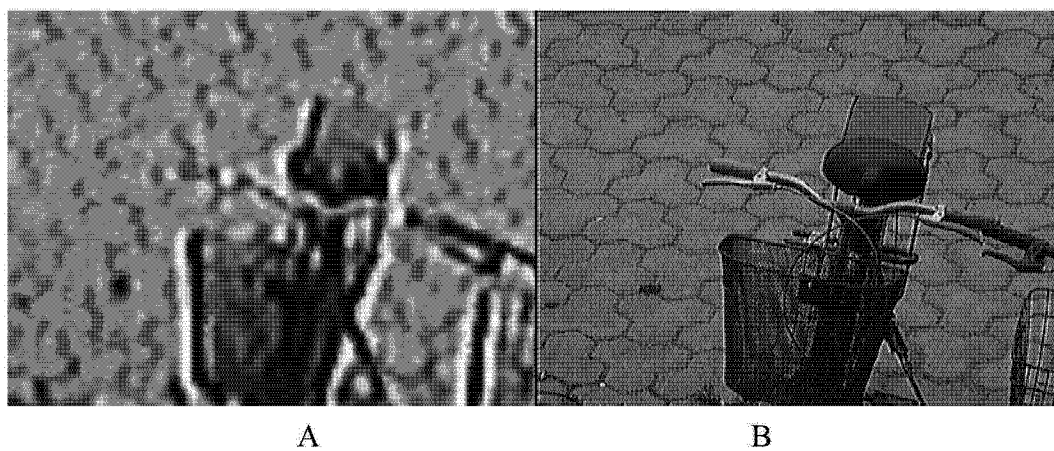


图 10

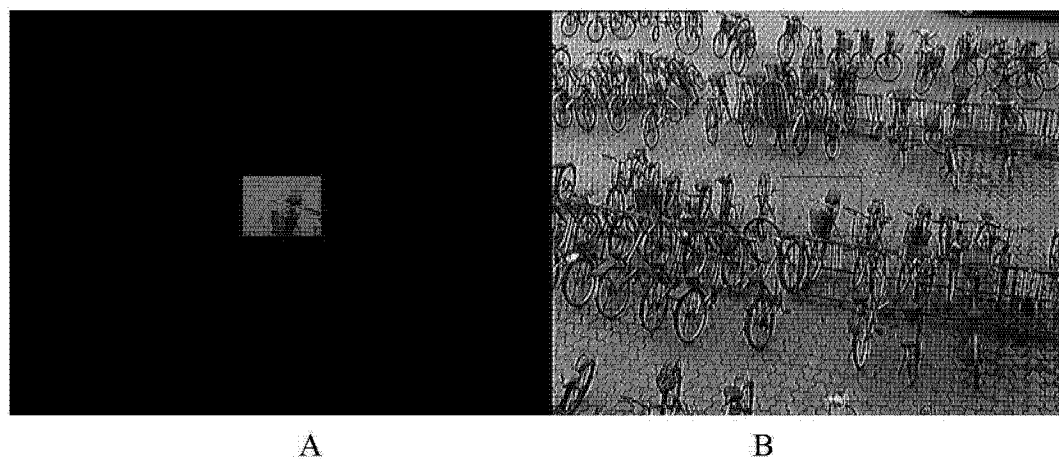


图 11