

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.05.001

基于 PTZ 摄像机的行车吊钩主动跟随算法

朱 林, 龙永红, 胡聪崴

(湖南工业大学 轨道交通学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 传统固定式摄像机由于其监控的狭隘性与被动性, 无法自适应调整其焦距值来获得目标清晰图像, 使得行车吊钩跟随具有较大的挑战性。因此, 提出一种基于 PTZ 摄像机的行车吊钩主动跟随算法。首先通过摄像机标定求解摄像机初始状态角度和内置参数 K 中的焦距值, 利用几何投影关系, 建立摄像机与车间坐标系的动态成像模型, 根据模型和行车吊钩位置估计摄像机的 P 、 T 、 Z 值; 然后针对高分辨率图像逐渐偏移图像中心区域的问题, 采用特征点自动对准算法, 二次计算摄像机的 P 、 T 增量; 最后基于估计的 P 、 T 、 Z 值及其增量, 调用摄像机接口函数进行姿态调整, 使行车吊钩始终位于图像中心, 完成主动跟随任务。实验结果表明, 该算法可以很好地适用于大视场下的目标跟随。同时, 该算法需要实时采集目标点的世界坐标, 因此同样适用于装有 GPS 定位设备或者距离传感器等的目标跟随。

关键词: PTZ 摄像机; 主动跟随; 动态成像模型; 自动对准

中图分类号: TP273⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)05-0001-08

引文格式: 朱 林, 龙永红, 胡聪崴. 基于 PTZ 摄像机的行车吊钩主动跟随算法 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(5): 1-8.

An Active Following Algorithm for Crane Hooks Based on PTZ Camera

ZHU Lin, LONG Yonghong, HU Congwei

(College of Railway Transportation, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Due to the narrowness and passivity of the traditional fixed camera monitoring, as well as its inability to adjust the focal length values to obtain clear images of the target, crane hook following is confronted with a significant challenge. Therefore, an active following algorithm has thus been proposed for crane hooks based on PTZ camera. Firstly, a calculation can be made of the initial state angle of the camera and the focal length value in the built-in parameter K through camera calibration. By using geometric projection relationships, a dynamic imaging model can be established between the camera and the workshop coordinate system, followed by an estimation of the P , T , and Z values of the camera based on the model and the position of the crane hooks. Then, in view of the problem of high-resolution images gradually shifting from the center area of the image, a feature point automatic alignment algorithm is adopted for a calculation of the P and T increments of the camera twice. Finally, based on the estimated P , T , Z values and their increments, the camera interface function is called to adjust the attitude, so that the crane hook is always located in the center of the image, thus completing the active following task. The experimental results show that the

收稿日期: 2022-11-17

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2020JJ5144); 湖南省教育厅科学研究基金资助项目 (19C0563); 2022年度省市联合基金资助项目 (20221150088)

作者简介: 朱 林 (1995-), 男, 江苏扬州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为图像处理与机器视觉, E-mail: zhulin19950108@163.com

通信作者: 龙永红 (1968-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为智能检测, 控制理论与应用, 机器视觉及其应用, E-mail: lyhcai@126.com

proposed algorithm can be well applied to target tracking in a large field of view. Meanwhile, the algorithm requires a real-time collection of the world coordinates of the target point, which makes it applicable to target tracking equipped with GPS positioning equipment or distance sensors as well.

Keywords: PTZ camera; active following; dynamic imaging model; automatic alignment

1 研究背景

随着“中国制造 2025”的快速推进,传统工业正在向数字化、网络化、智能化改进。冶金工业作为工业体系的一部分,更是我国其它行业发展的基石。冶金的特殊工艺流程,需要对各个阶段的有色金属进行大规模、高频率地搬运,这使得智能物料无人搬运系统的应用具有重要作用。同时,优化智能物料无人搬运系统对冶金工业智能化具有十分重要的意义。

国内冶金工业现场的物料搬运系统,主要依靠人工交流指挥行车进行运输,由于冶金车间工业生产的特殊性,人工交流方式常常会因为高噪声、远距离等因素而使得工人指挥行车信息不明确,易导致安全事故。因此,如何对冶金现场下的行车吊钩进行主动跟随是实现智能物料无人搬运系统的关键环节。目前,对于大规模冶金工业场景的无人搬运系统的自动化、智能化要求,其主流的解决方案是构建大量固定摄像机或者 PTZ (Pan/Tilt/Zoom) 摄像机组成的多摄像机系统^[1],但是此方案的设备价格昂贵且复杂,运行稳定性较差,因此,采用单个 PTZ 摄像机主动跟随动态目标的方法受到国内外学者们的广泛关注。

PTZ 摄像机主动跟随系统,根据动态目标位置大小来控制摄像机的姿态和焦距变换,具体的解决方案主要分为动态目标图像检测和动态目标成像模型两种。其中,动态目标图像检测是指利用数字图像处理方法,从图像或者视频序列中分离出动态目标信息,再依据检测结果实现后续摄像机的主动跟随效果。由于本系统最终需要被应用于实际工业场景中,因此,对目标检测算法的鲁棒性和实时性提出了较高要求。同时,随着 PTZ 摄像机主动跟随下姿态角的变化,动态背景模型的更迭也加大了目标位置的定位难度。动态目标成像模型,是指利用摄像机标定技术建立动态目标成像模型,后续将动态位置坐标输入成像模型中,最终计算出摄像机主动跟随的姿态角与焦距值。其中,动态目标位置的获取主要通过可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 或者全球定位系统 (global

positioning system, GPS) 等定位设备进行采集。虽然此方案摒弃了上述目标检测中的动态目标定位过程,但是需要建立 PTZ 摄像机的动态目标成像模型,这导致其中的摄像机内外参数标定成为主要的研究目标之一。

目前,国内外学者们对 PTZ 摄像机主动跟随系统进行了大量的研究。其中文献 [2] 提出了一种基于固定摄像机与 PTZ 摄像机的动态对齐,将其视场转换为简单的反正切控制函数的方法,以动态计算 PTZ 的控制参数。文献 [3] 提出了一种智能高帧率目标跟随算法,该算法能够在复杂背景下同时检测和跟踪外观变化目标,实现高速视觉的反馈控制。文献 [4] 主要针对摄像机在不同视角下的背景变化问题,提出了一种在线校正 PTZ 摄像机内外参数的方法,实验结果表明该方法可以实时跟踪多个运动目标。文献 [5] 提出了一种快速随机森林方法,以预测摄像机的姿态角,且因该方法不需要进行图像与图像间的特征匹配,从而为新图像提供了一种有效的校准方法。文献 [6] 提出了一种通过跟踪图像中具有已知 3D 位置的无人机来估计 PTZ 摄像机 6 自由度姿态的技术,模拟实验结果证明其能在短距离视觉跟踪飞行后,定位其 PTZ 参数值。文献 [7] 将目标检测和跟踪相结合,并利用 PTZ 模糊控制策略,实现了 PTZ 对动态目标的主动跟随效果。文献 [8] 考虑到摄像机镜头的畸变问题,提出了一种简单而有效的校准 PTZ (倾斜/变焦) 相机的方法,该方法只需利用两张图像的焦距、长宽比、主点坐标和失真系数等内置参数。

也有学者通过深度学习来预测摄像机姿态角的计算方式,此方法主要被应用于较为常见的固定场景中,比如足球、篮球赛场等。如文献 [9] 提出了一种精确实用的多台云台摄像机直播校准方法。该方法对云台摄像机系统进行建模,可以准确地预估模型中的未知参数。预估完成后,利用摄像机系统中传感器采集的泛倾角和变焦值,可实时计算出准确的摄像机参数。文献 [10] 提出了一种端到端的方法,可被用于具有挑战性场景运动中的单运动摄像机校准。

此外,学者们提出了一些基于几何图形学来进行动态目标跟踪的方法,主要包括背景差分法^[11]、帧间差分法^[12]、光流法^[13]等。

虽然上述研究在各自的应用场景中均取得了较好的跟随效果,但是对于进行目标的主动跟随方面,还存在以下问题:

1) PTZ摄像机的内外参数矩阵随着 P 、 T 、 Z 值动态变化,如何校准各参数,建立摄像机与运动目标之间的动态成像模型,尚需进一步研究。

2) 当运动目标距离摄像机较为偏远时,一般通过增加焦距值来获得高分辨率的目标图像,但主动跟随效果受到 P 、 T 值的影响较大,故如何精准计算 P 、 T 值来增加算法的鲁棒性尚需深入探讨。

针对上述问题,本文提出一种基于PTZ摄像机的行车吊钩主动跟随算法,将摄像机的 P 、 T 、 Z 值作为模型参数值,建立PTZ摄像机与行车吊钩动态成像模型,此模型无需进行离线标定。且针对适用高分辨率图像进行跟踪时易受摄像机 P 、 T 值影响等问题,课题组采用自动对准算法,进行二次计算 P 、 T 值增量,提高主动跟随目标精度。

2 算法概述

本研究提出的主动跟随动态目标算法流程具体如图1所示。

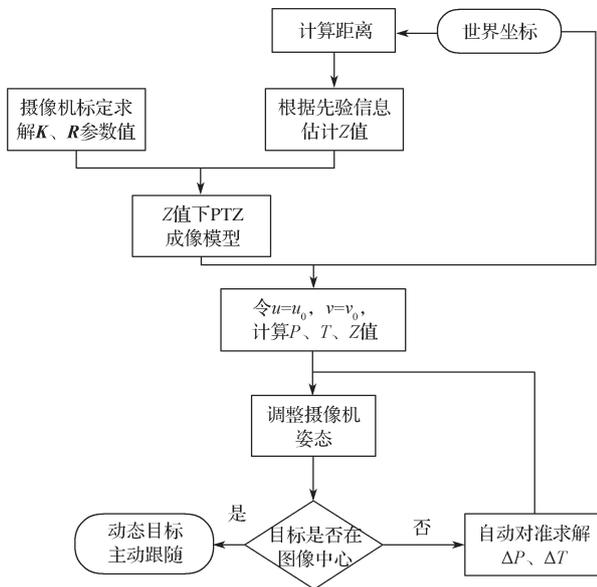


图1 主动跟随动态目标算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the active following dynamic target algorithm

基于PTZ摄像机的行车吊钩主动跟随算法,主要是根据吊钩的世界坐标,自动调整摄像机的姿态角 P 和 T 以及焦距值(Z)来进行主动跟随。即当PLC采集到行车吊钩的坐标后,首先计算吊钩与摄像机的距离,然后由先验信息选择合适的 Z 值动态成像模型,以初步求解所需转动的 P 、 T 值。由于机械间隙

和PLC通讯的延后性,初步求解的 P 、 T 值可能使得吊钩不在图像的中心位置处,尤其是在需要增加分辨率获得高清目标图像时,对摄像机姿态角的计算要求更加严格。因此,课题组分析了摄像机针孔模型的三角相似原理,利用自动对准算法^[14]二次微调 P 、 T 值,使得目标回到图像中心位置处。根据求解得到的 P 、 T 值,以及先验信息选择的 Z 值,调用PTZ摄像机内部接口函数,实现主动跟随行车吊钩的任务。主动跟随吊钩的前提是要实时获取吊钩的世界坐标,因此本系统同样适用于装有GPS定位设备或者距离传感器等的目标跟随。

3 PTZ摄像机成像模型与标定

摄像机成像模型主要反映的是将三维空间点坐标转化为图像像素坐标的过程。相比于传统的枪型摄像机,本研究采用的PTZ摄像机可以通过调整其旋转(P)、倾斜(T)和焦距(Z)值来获得多视角和高分辨率的图像。因此,PTZ摄像机模型是一个随着 P 、 T 、 Z 3个参数动态变化的成像模型。在任意角度和焦距下,如何精确校准摄像机的内外置参数是实现主动跟随功能的关键问题。对于内置参数的校准,文献[15]利用不同的摄像机,建立了焦距值和变焦比例之间的不同拟合模型。文献[16]还将镜头畸变系数建模为变焦比例的函数。对于外置参数校准,文献[17]根据旋转角度,推导出相对于原始位置的旋转矩阵。在本研究中,课题组提出的PTZ摄像机动态成像模型,首先基于特征点求解初始状态下($P=0$ 、 $T=0$)摄像机静态内外置参数,后续通过软件开发工具包(software development kit, SDK)反馈参数(P 、 T 、 Z 值)计算摄像机的动态内外置参数值。

3.1 PTZ摄像机模型

本研究选用的PTZ摄像机模型类似于文献[15]中的模型,其可表示为

$$Z_c \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{K}[\mathbf{R} - \mathbf{RT}]\tilde{\mathbf{X}}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 和 \mathbf{X} 分别为像素坐标和世界坐标,符号‘ \sim ’代表齐次坐标; Z_c 为尺度因子; \mathbf{R} 、 \mathbf{T} 分别为旋转矩阵和平移矩阵,称为摄像机的外置参数; \mathbf{K} 为摄像机内置参数,反映摄像机内部物理特性,且

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha f_x & s & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

其中, α 为像素长宽比; s 为倾斜因子; $f_x=fd_x$ 、 $f_y=fd_y$,其中 f 为摄像机的焦距, d_x 、 d_y 分别为 x 、 y 方向上相邻像素之间的物理尺寸; u_0 、 v_0 为图像中心

位置的坐标值。

为了简化 PTZ 摄像机的参数模型, 课题组做出以下假设:

- 1) 摄像机的主点 (u_0, v_0) 由图像中心坐标点代替;
- 2) 像素长宽比 $\alpha=1$, 倾斜因子 $s=0$;
- 3) 摄像机旋转中心保持不变, 图像坐标始终和光轴保持垂直。

3.2 内置参数估计

在上述假设条件下, 内置参数矩阵 \mathbf{K} 中只有一个动态参数 f_x 与变焦值 z 相关。摄像机的焦距值一般随着 z 的增加而增加, 对于不同的摄像机, 焦距的拟合趋势也不同。为了计算不同 z 值下的焦距值, 可以采用指数函数^[17]或者二次函数进行拟合。其中, 指数函数模型拟合焦距时可以写成:

$$K(z) = ae^{bz} + ce^{dz}; \quad (2)$$

使用二次函数拟合焦距时, 可以写成:

$$K(z) = az^2 + bz + c. \quad (3)$$

式(2)(3)中: a 、 b 、 c 、 d 为 4 个未知参数, 其值需要拟合得出, 可以通过曲线拟合工具求解。

首先, 通过估计整数倍的变焦值 (z_{\min}, z_{\max}) 来确定焦距值, 对于两个连续整数之间的变焦值, 可以进行线性差值来获得任意变焦值状态下的焦距值。其中线性差值方法表达式为

$$K(z) = \frac{z - z_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}(f_i - f_{i-1}) + f_{i-1}, \quad z_{i-1} \leq z \leq z_i. \quad (4)$$

通过对焦距值的拟合, PTZ 摄像机的内置参数 \mathbf{K} 可以表示为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K(z) & 0 & \frac{u_{\max}}{2} & 0 \\ 0 & K(z) & \frac{v_{\max}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

3.3 外置参数估计

外置参数反映的是摄像机坐标系与世界坐标系的位姿关系。当摄像机位置固定后, 平移矩阵即为定值。在本文当中, 摄像机在安装固定后与世界坐标系有一个初始姿态角, 设为 r'_x 和 r'_y , 在经过水平 (T) 和垂直 (P) 方向的旋转后, 角度变为 r_x 和 r_y 。因此, 旋转矩阵 \mathbf{R} 可以记为

$$\mathbf{R}^{3 \times 3} = \mathbf{R}_x(P) \mathbf{R}_y(T), \quad (6)$$

式中:

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(r_x) & \sin(r_x) \\ 0 & -\sin(r_x) & \cos(r_x) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos(r_y) & 0 & -\sin(r_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(r_y) & 0 & \cos(r_y) \end{bmatrix};$$

其中, $r_x = r'_x + T$; $r_y = r'_y + P$ 。

上方的 r_x 和 r_y 可以由 $\mathbf{R}^{3 \times 3}$ 进行转换, 其中 r_{ij} 表示旋转矩阵 $\mathbf{R}^{3 \times 3}$ 的第 i 行第 j 列中的元素, 具体转换如下:

$$\begin{cases} r_x = \arctan(-r_{32}, r_{33}), \\ r_y = \arctan\left(r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}\right). \end{cases} \quad (7)$$

3.4 摄像机标定

摄像机标定就是求解内置参数与外置参数的过程, 标定精度会直接影响后续目标跟随的准确性。在传统摄像机标定方法中, 一般利用高精度标定物已知的世界坐标和图像处理得到的像素坐标间的对应关系, 代入预先设定的摄像机成像模型中, 使用优化算法求出摄像机的内外参数。由于可以从 PTZ 摄像机云台中读取 P 和 T 值, 因此 PTZ 摄像机需要标定的参数仅为焦距值和水平、垂直方向的初始姿态角, 通过构建目标函数迭代计算内外参数值。

$$\min F(f_i, r'_x, r'_y) = \frac{1}{2} \sum_{i=z_{\min}}^{z_{\max}} \sum_{j=0}^n \|\tilde{x}_j - \mathbf{K}_i [\mathbf{R} - \mathbf{RT}] \mathbf{X}_j\|^2, \quad (8)$$

式中: \mathbf{X}_j 为标定物第 j 个点的三维空间坐标, 即 $\mathbf{X}_j = (X_w, Y_w, Z_w)^T$; \tilde{x}_j 为第 j 个点在图像中的观测点; f_i 为内置参数 \mathbf{K}_i 中需要迭代的焦距值。

4 主动跟随动态目标算法

基于 PTZ 摄像机的主动跟随动态目标算法, 主要是求解摄像机的姿态角 (P 和 T) 以及焦距值 (Z) 来跟随目标, 其 P 、 T 、 Z 值的求解过程可分为 PTZ 摄像机动态模型初步求解和图像中心自动对准的精确求解两个过程。

4.1 PTZ 摄像机的 P 、 T 、 Z 值求解

由式(1)可知, 摄像机的成像模型可以变形为以下形式:

$$\mathbf{Z}_c \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} (u-u_0)d_x \\ (v-v_0)d_y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式中: 向量

$$[X_c, Y_c, Z_c]^T = [X_w - t_1, Y_w - t_2, Z_w - t_3]^T, \quad (10)$$

其中 t_1 、 t_2 、 t_3 为平移矩阵 T 中的元素,表示摄像机的世界坐标。

为了实现主动跟随动态目标的任务,目标图像坐标值 (u, v) 需要准确呈现在图像主点位置,即 $u=u_0$ 、 $v=v_0$ 。则进一步可以得到:

$$\mathbf{R} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

由旋转矩阵的性质,有 $\mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2^T = \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_3^T = \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_3^T = \mathbf{0}$, $|\mathbf{R}_1| = |\mathbf{R}_2| = |\mathbf{R}_3| = 1$, 其中 \mathbf{R}_i 表示 \mathbf{R} 的第 i 行元素,故可以建立如下含 9 个方程、9 个未知数的方程组:

$$\begin{cases} r_{11}r_{21} + r_{12}r_{22} + r_{13}r_{23} = 0, \\ r_{11}r_{31} + r_{12}r_{32} + r_{13}r_{33} = 0, \\ r_{21}r_{31} + r_{22}r_{32} + r_{23}r_{33} = 0, \\ r_{11}r_{11} + r_{12}r_{12} + r_{13}r_{13} = 1, \\ r_{21}r_{21} + r_{22}r_{22} + r_{23}r_{23} = 1, \\ r_{31}r_{31} + r_{32}r_{32} + r_{33}r_{33} = 1, \\ r_{11}X_c + r_{12}Y_c + r_{13}Z_c = 0, \\ r_{21}X_c + r_{22}Y_c + r_{23}Z_c = 0, \\ r_{31}X_c + r_{32}Y_c + r_{33}Z_c = |Z_c| \end{cases} \quad (12)$$

由于方程组 (1) 属于正定方程组,对于任意的动态目标点具有封闭解。因此可以求出目标的旋转矩阵 \mathbf{R} 后,通过式 (7) 求解 PTZ 摄像机水平和垂直所需的角度,即 P 、 T 的值。加上先验信息估计的 Z 值,即可以实现主动跟随动态目标的任务。

4.2 图像中心自动对准

主动跟随动态目标的精度取决于摄像机成像模型的准确性,在单倍焦距值下,上述求解的 P 、 T 值虽然有误差,但是目标在整体图像画面中依旧呈现在图像中心附近。当目标距离摄像机较远时,则需要增加焦距值倍数来放大目标细节,此时求解 P 、 T 的误差会使得目标偏离图像中心处,因此需要自动对准来二次微调 P 、 T 值。

如图 2 所示, q 、 Q 分别为目标在摄像机坐标和图像坐标下的点,由 P 、 T 的误差导致图像点 q 偏离图像中心位置 q' , 其中 q 转到图像中心位置 q' 的水平转动角度为 ΔP , 垂直方向转动角度为 ΔT 。根据摄像机针孔模型下的三角形相似原理,可通过式 (12) 计算自动对准所需的角度。

$$\begin{cases} \Delta P = \arctan(d_x(u-u_0)/f), \\ \Delta T = \arctan(d_y(v-v_0)/f). \end{cases} \quad (13)$$

综上所述,当目标点的世界坐标已知时,可以根据摄像机的成像模型求解 P 、 T 值以及先验信息估计

的 Z 值,调用相关摄像机 SDK 函数可以实现吊钩的初步跟踪。针对远距离目标跟踪点,增大焦距值倍数虽然可以获取目标细节,但也放大了求解 P 、 T 值的误差。因此本研究进行自动对准来二次微调 P 、 T 值,以期实现在较高倍数下的焦距值也能准确完成目标跟踪任务。

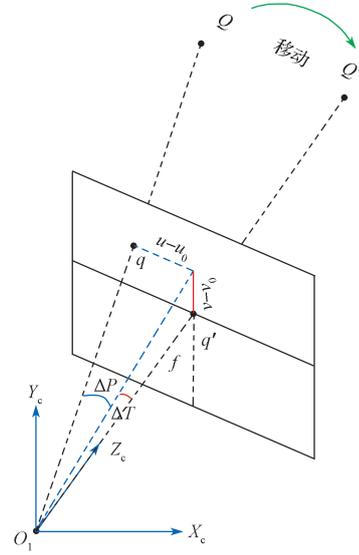


图 2 自动对准算法原理

Fig. 2 Principle of the automatic alignment algorithm

5 实验与结果分析

本实验中,使用海康网络摄像球机作为 PTZ 摄像机来验证所提出主动跟随算法的有效性,该算法在一台配有内存为 16 GB 的计算机上运行。算法得到的 P 、 T 、 Z 值通过 SDK 返回给已经标定好的 PTZ 摄像机进行主动跟随实验,该实验在真实冶金工业场景下对行车吊钩进行实时主动跟随,图 3 所示为行车吊钩跟随实验现场图。实验结果将包含 PTZ 摄像机标定的结果和主动跟随行车吊钩的结果。



图 3 吊钩跟随现场图

Fig. 3 On-site image of the hook following

5.1 PTZ 摄像机标定实验

在摄像机标定前,需要将摄像机固定在车间某一

位置处，并将摄像机视角设置在初始状态下，标定参数主要为内置参数 $Z (f_x, f_y)$ 和外置参数中旋转矩阵 $R (P, T)$ ，通过棋盘标定^[18]获取PTZ摄像机的内外参数矩阵，棋盘标定及检测效果如图4所示。

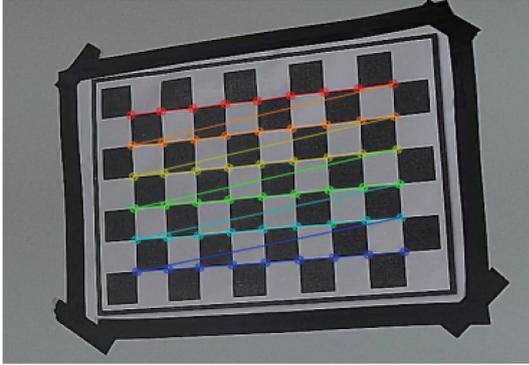


图4 棋盘及角点检测效果图

Fig. 4 Checkerboard image with its corner detection effect

实验所得PTZ球形摄像机内置参数求解结果如图5所示。

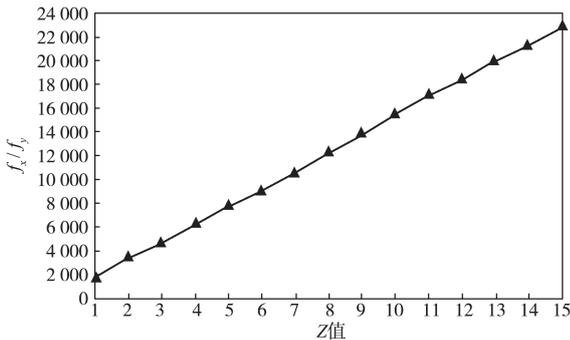


图5 不同Z值下的焦距值变化

Fig. 5 Focal length values under different Z

实验所得初始状态下PTZ球形摄像机的外置参数如表1所示。

表1 初始状态下球形摄像机外置参数结果

Table 1 External parameter results of the ball machine in the initial state

| 参数 | 旋转矩阵 R | 平移矩阵 T |
|-----|---|-----------------------------|
| 摄像机 | $\begin{bmatrix} 0.911 & 0.399 & 0.096 \\ -0.410 & 0.880 & 0.236 \\ 0.009 & -0.255 & 0.966 \end{bmatrix}$ | $[-9\ 912\ 4\ 537\ 1\ 713]$ |

PTZ 内置参数中的 f_x 和 f_y 是关于 Z 的线性函数，单倍 Z 的焦距值约为 1 750。旋转矩阵 R 是初始状态下摄像机坐标系与世界坐标系之间的转换关系，在本实验的换算中，选取欧拉角为 $P=25.0^\circ$ 、 $T=13.7^\circ$ 。当 PTZ 改变其姿态角时，在其基础上加上其增量便可以求得其旋转后的欧拉角度数，即摄像机成像模型也随之确立。

5.2 PTZ 摄像机主动跟随实验

完成标定后，PTZ 摄像机的动态成像模型即已经建立。为了验证 PTZ 摄像机的主动跟随效果，本研究随机选择 10 个点位，每个点位距离摄像机约为 10~20 m。具体的实验数据如表 2 所示，其中 P 和 T 由式 (1) 计算得到，此过程为行车吊钩初次进行跟踪的姿态角。

表2 PTZ 初次跟随吊钩姿态角
Table 2 PTZ initial following hook attitude angles

| index | world coordinates/mm | | camera coordinates/mm | | |
|-------|----------------------|--------|------------------------------|---------------|-------|
| | $P(X_w, Y_w, Z_w)$ | | $O(-9\ 912, 4\ 537, 1\ 713)$ | | |
| | | | $P(^{\circ})$ | $T(^{\circ})$ | |
| 1 | -11 634 | 8 227 | 2 705 | 232 | 10.9 |
| 2 | -12 375 | 11 057 | 5 300 | 229 | 26.6 |
| 3 | -9 751 | 12 035 | 9 527 | 203 | 45.5 |
| 4 | -15 021 | 14 409 | 9 508 | 232 | 33.3 |
| 5 | -10 993 | 11 144 | 3 429 | 239 | 4.2 |
| 6 | -8 534 | 12 611 | 5 722 | 238 | 8.7 |
| 7 | -16 402 | 12 610 | 9 002 | 259 | 29.0 |
| 8 | -14 694 | 10 236 | 2 095 | 243 | 356.9 |
| 9 | -9 224 | 19 316 | 12 156 | 255 | 22.9 |
| 10 | -11 067 | 8 302 | 3 636 | 229 | 358.6 |

为获取吊钩高分辨率图像，提高焦距值的同时会使得吊钩偏移图像中心点，为此本研究通过自动对准算法二次计算其姿态角增量 ΔP 和 ΔT ，进行精准跟踪行车吊钩。其中图 6 显示在各个点位下需要的增量 ΔP 和 ΔT ，在后续吊钩跟随过程中，取其平均值作为自动对准的增量值。

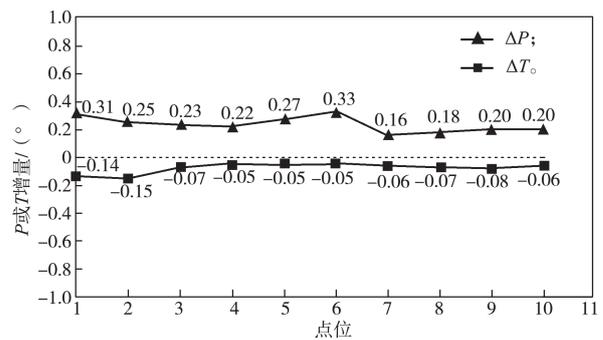


图6 不同位点下自动对准增量 ΔP 和 ΔT

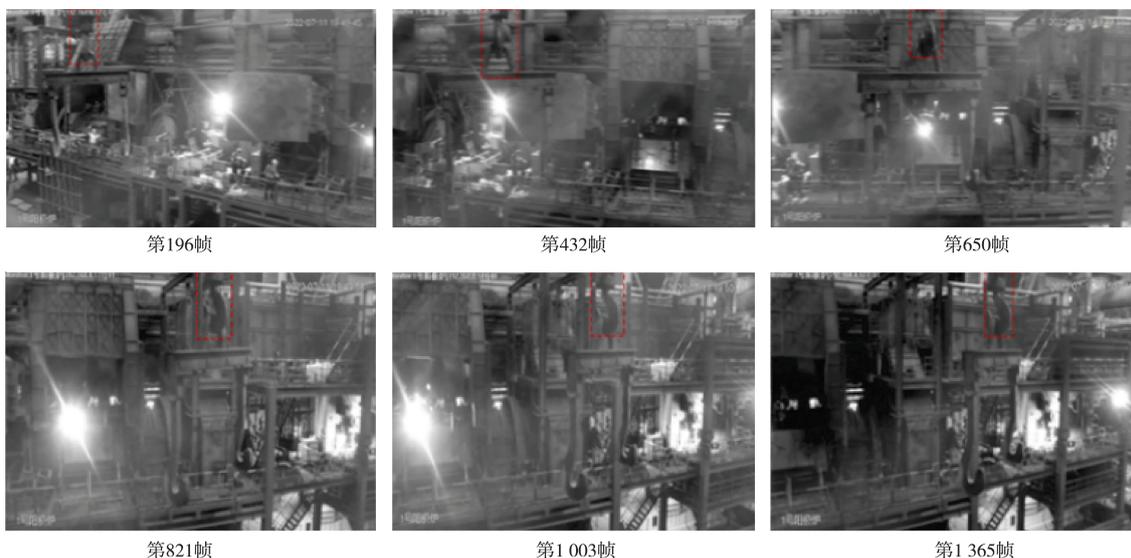
Fig. 6 Automatic alignment increments ΔP and ΔT values at different locations

5.3 结果与分析

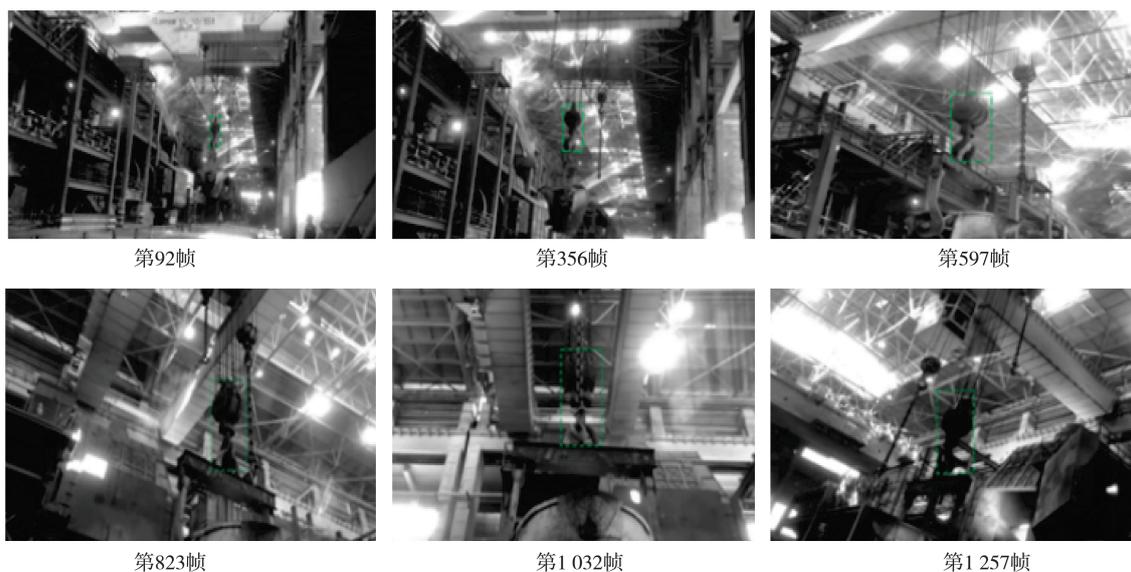
为了验证所提出的基于主动跟随动态目标算法的有效性，本文在某工业车间现场对行车吊钩进行主动跟随实验，并用两组实验数据来验证 PTZ 摄像机的控制结果，一组是采用摄像机模型下初始 P 、 T 值来控制摄像头的转动，另一组是经过自动对准算法微调姿态角的主动跟随数据，所得跟随效果图像如图 7

所示。由图 7 可以看出, 标定后初次得到的 P 、 T 值虽然可以得到吊钩的方位, 但是不够准确, 尤其在提高摄像机的焦距后, 吊钩会逐渐偏离图像的中心点。

而当使用自动对准算法后, 在原有的基础上进行了摄像机姿态角的微调, 吊钩一直位于图像中心处, 可见显著提高了吊钩的跟随效果。



a) 初次跟随效果图



b) 自动对准后跟随效果图

图 7 自动跟随效果对比图

Fig.7 Automatic following effect comparison diagrams

6 结语

目前, 工业现场的视觉监控系统正向智能化、无人化转型, PTZ 摄像机的高分辨率、360° 视角以及光学变焦镜头等优势, 使得它在智能监控系统中被越来越多地使用。因此, 本文提出一种基于 PTZ 摄像机的行车吊钩自动跟随算法, 该算法可以在行车作业人员进行远程操作时, 提供实时高分辨率吊钩图像, 并且可以主动跟随吊钩, 感知周围环境。该算法首先需要建立 PTZ 摄像机的动态成像模型, 其中包括内

置参数随着 Z 值估计以及外置参数随着 P 、 T 值估计。对于 PLC 采集得到的吊钩位置, 动态成像模型会给出相应姿态角的封闭解。针对高分辨率图像, 本研究采用图像中心对准算法, 二次计算姿态角的增量, 以实现远程吊钩也能主动跟随。主动跟随算法的前提是要实时获取目标的世界坐标, 因此本系统适用于装有 GPS 定位设备或者距离传感器物体的跟随。由于所做工作有限, 还有如下问题需要解决:

- 1) 主动跟随算法精度取决于 PTZ 摄像机动态成

像模型,故摄像机镜头的畸变、抖动、内外参数的标定误差等,均会对主动跟随效果造成一定的影响。

2) PLC 数据采集、摄像机云台转动和图像画面呈现出一定的延迟,如何自适应做好提前量的转动需要进一步研究。

参考文献:

- [1] CHONG D, SONG B, AKSHAY M, et al. Collaborative Sensing in a Distributed PTZ Camera Network[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(7): 3282-3295.
- [2] LI X Z, SU Y Q, LIU Y H, et al. Active Target Tracking: A Simplified View Aligning Method for Binocular Camera Model[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2018, 175: 11-23.
- [3] JIANG M J, SOGABE R, SHIMASAKI K, et al. 500-Fps Omnidirectional Visual Tracking Using Three-Axis Active Vision System[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [4] LISANTI G, MASI I, PERNICI F, et al. Continuous Localization and Mapping of a Pan-Tilt-Zoom Camera for Wide Area Tracking[J]. Machine Vision and Applications, 2016, 27(7): 1071-1085.
- [5] CHEN J H, ZHU F R, LITTLE J J. A Two-Point Method for PTZ Camera Calibration in Sports[C]//2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). Lake Tahoe, USA: IEEE, 2018: 287-295.
- [6] GUO Q J, LIANG Z Y, XU J, et al. A New UAV PTZ Controlling System with Target Localization[C]//MATEC Web of Conferences. Nanjing: Nanjing Research Institute of Electronic Engineering, 2017, 139: 180-185.
- [7] 李新利, 廖风柯, 杨国田, 等. 基于改进人工鱼群算法和自适应模糊 PID 的云台相机位姿控制 [J]. 电站系统工程, 2021, 37(2): 1-4, 7.
LI Xinli, LIAO Fengke, YANG Guotian, et al. PTZ Camera Pose Control Based on Improved Artificial Fish Swarm Algorithm and Adaptive Fuzzy PID[J]. Power System Engineering, 2021, 37(2): 1-4, 7.
- [8] WANG R, HUANG R, YANG J R. Facilitating PTZ Camera Auto-Calibration to Be Noise Resilient with Two Images[J]. IEEE Access, 2019, 7: 155612-155624.
- [9] MASANORI K, HIDEHIKO O, MASAKI T, et al. Accurate and Practical Calibration of Multiple Pan-Tilt-Zoom Cameras for Live Broadcasts[J]. IEEE Access, 2020, 8: 153993-154006.
- [10] SHA L, HOBBS J, FELSEN P, et al. End-to-End Camera Calibration for Broadcast Videos[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle, USA: IEEE, 2020: 13624-13633.
- [11] PICCARDI M. Background Subtraction Techniques: a Review[C]//IEEE International Conference on Systems. The Hague, Netherlands: IEEE, 2004: 3099-3104.
- [12] CHENG Y H, WANG J. A Motion Image Detection Method Based on the Inter-Frame Difference Method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 490/491: 1283-1286.
- [13] ALVAREZ L, WEICKERT J, SÁNCHEZ J. Reliable Estimation of Dense Optical Flow Fields with Large Displacements[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 39(1): 41-56.
- [14] WANG Y, WANG X J. On-Line Three-Dimensional Coordinate Measurement of Dynamic Binocular Stereo Vision Based on Rotating Camera in Large FOV[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 4986-5005.
- [15] WAN D R, ZHOU J. Stereo Vision Using Two PTZ Cameras[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 112: 184-194.
- [16] WU Z, RADKE R J. Keeping a Pan-Tilt-Zoom Camera Calibrated[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(8): 1994-2007.
- [17] MAO K, XU Y C, WANG R D, et al. A General Calibration Method for Dual PTZ Cameras Based on Feedback Parameters[J]. Applied Sciences, 2022, 12(18): 9148.
- [18] ZHANG Z Y. A Flexible New Technique for Camera Calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1134.

(责任编辑:廖友媛)