

文章编号:1671-1637(2015)04-0118-09

道路监控系统中非同步相机时间校正方法

梁华刚,程加乐,孙小喃,茹 锋

(长安大学 电子与控制工程学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了提高交通事件还原的准确性,提出一种基于双目极几何关系的高精度交通现场三维重建时间校正方法。分析了多个非同步相机帧序列,建立了非同步相机时间校正模型。为了校正多部非同步相机的时间误差,采用极几何约束和点到极线距离最小约束准则,进行对应帧时间同步匹配。由2部非同步相机组成拍摄系统,进行对应帧时间匹配误差分析,估算视频序列起始帧时间误差,实现高精度动态场景复原。通过闪烁LED灯的移动模拟高速移动的车辆,估计时间误差范围。为了进一步验证方法在实际道路环境中的有效性,利用4部相机拍摄自由落体的皮球视频序列,分别使用相似度判别的时间校正方法和本文方法进行对比试验。试验结果表明:当相机的曝光时间为 $1/30$ s,高速移动的发光源闪烁周期为6.59 ms时,视频序列的起始帧时间误差范围为0~6.59 ms,在这个误差范围内的对应帧数达到88.1%以上;与相似度判别的时间校正方法相比,本文方法效果较好;与几种传统时间校正方法相比,本文方法显著提高了道路监控系统中非同步相机对应帧时间误差匹配和三维重建的精确度。

关键词:智能交通系统;道路监控系统;机器视觉;非同步相机;时间校正;极几何;对应帧匹配

中图分类号:U491

文献标志码:A

Time correction method of asynchronous cameras in road monitoring system

LIANG Hua-gang, CHENG Jia-le, SUN Xiao-nan, RU Feng

(School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to improve the reduction accuracy of traffic incident, a high accuracy time correction method of traffic scene 3D reconstruction was proposed based on binocular epipolar geometry relationship. The frame sequences of multiple asynchronous cameras were analyzed, and the time correction model of asynchronous cameras was established. In order to correct the time error of multiple asynchronous cameras, corresponding frame time synchronous matching was carried out by using the epipolar geometry constraints and the constraint principle of minimum distance from point to pole line. The shooting system composed of 2 asynchronous cameras was built, the time matching error of corresponding frame was analyzed. The time error of start frame in video sequences was estimated, and the recovery of high precision dynamic scenes was realized. High-speed moving vehicle was simulated by using flashing LED, and the range of time error was estimated. In order to further validate the effectiveness of the method in actual road environment, four cameras were used to shoot the video sequences of freefall ball, the

收稿日期:2015-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目(61203374);陕西省科学技术研究发展计划项目(2014KW01-05)

作者简介:梁华刚(1980-),男,陕西西安人,长安大学讲师,工学博士,从事图像处理与机器视觉研究。

comparative tests were respectively carried out by using time correction method based on similarity discrimination and the proposed method. Test result indicates that when the exposure time of camera is 1/30 s, and the cycle of high-speed flashing light with is 6.59 ms, the time error range of start frame is from 0 to 6.59 ms, the corresponding frames ratio is above 88.1%. Compared with the time correction method based on similarity discrimination, the proposed method performs well. Compared with the several traditional time correction methods, the accuracies of time error matching and the 3D reconstruction of asynchronous cameras in road monitoring system are significantly improved. 2 tabs, 14 figs, 20 refs.

Key words: intelligent transportation system; road monitoring system; machine vision; asynchronous cameras; time correction; epipolar geometry; corresponding frame matching

Author resume: LIANG Hua-gang(1980-), male, lecturer, PhD, +86-29-82334640, hgliang@chd.edu.cn.

0 引言

随着科技水平的提高与智能交通系统的发展,道路监控系统在城市道路和高速公路中的应用越来越广泛。数据采集是道路监控系统的核心,主要通过视频摄像机和通信设备完成,可对道路进行车辆检测、交通检测与事件检测。为实现对交通事件的准确检测与场景还原,可利用三维重建技术对已发生事件进行还原。通过三维重建技术对交通事件进行快速准确还原可提高事故判定的公平公正,更有利于人们了解事件的真相。在利用多部监控相机拍摄图像进行交通事件三维重建时,需要对监控相机进行几何标定和时间校正。几何标定是以时间同步为基础的,如果相机时间不同步,几何标定参数毫无意义,因此,本文考虑通过提高多部相机时间同步的精度,进而提高交通事故与区间测速等交通事件检测的准确性和可靠性。

目前,交通监控系统时间校正大多是基于硬件控制以达到曝光时间同步^[1-5]。基于硬件的同步方法主要是利用电子快门线同时控制继电器闭合实现相机同步,但是,由于继电器性能存在差异,继电器闭合误差约为5~50 ms,而且快门机械闭合也存在时间差,因此,在移动车辆速度较慢或者测速间距较大时,该同步方法具有较好的效果,但是,在车速较快或监控区域范围较小时,硬件同步方法存在多个监控摄像机同步精度不足等问题。

国内外学者通过对拍摄视频序列进行分析处理,估算曝光时间; Pillman等提出通过二次触发改进相机的曝光性能^[6]; Sato等利用立体同步方法对多个摄像机进行时间标定^[7]; 陈绕青等在对成像链路仿真的基础上,提出了一种CCD相机成像最佳曝

光时间的自动计算方法,提高了多部相机同步校正精度^[8]。

在道路交通监控系统中,基于硬件控制曝光的方法需要大量的硬件资源,成本高,精度差,且大多数需要GPS时间定位信号。李军正等为实现多相机同步曝光使用GPRS^[9],但应用场合受限。基于图像处理的算法复杂,匹配时间长,实时性差,因此,本文提出了高精度时间同步方法,在利用NTP网络时间协议对相机时间进行粗略调整的基础上,通过对多个视频序列预处理,采用双目极几何约束进行对应帧匹配,估算出同一帧或前后相差一帧情况下的时间误差范围,避免大量的硬件资源浪费和过复杂的算法,保证高精度时间同步系统的实时性,可应用于道路监控系统中动态交通事件还原,短距离区间测速与车载相机360°全景辅助系统图像合成等智能交通领域^[10]。

1 非同步相机时间校正模型

在道路监控系统中,多相机拍摄同一场景移动车辆时,由于存在监控相机非同步问题,存在区间测速和交通事故现场还原不够精确等问题。图1为交通系统中多相机拍摄场景,图1(a)为区间测速模型,2部相机的时间同步性将影响到测速的准确性,图1(b)为多部相机拍摄交通事故现场模型,利用多部同步相机对事故发生场景进行三维重建,便可重现事故发生瞬间,便于交通事故的厘清。监控相机的同步精度直接决定监控数据的准确性和交通事故分析的公平性。

当监控系统拍摄静态场景或低速运动的物体时,通过硬件控制相机的曝光时间可以实现时间同步,但是,当拍摄对象为高速移动车辆等动态场

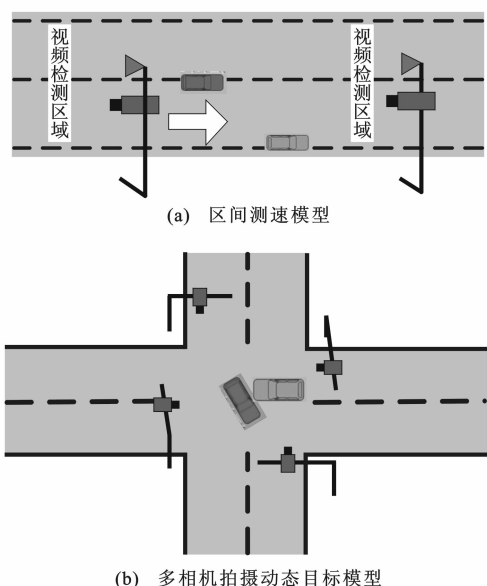


图 1 多相机拍摄场景

Fig. 1 Multi-camera shooting scenes

景时,由于相机内部传感器性能差异或拍摄过程中控制器工作时序变化会导致多部相机拍摄的视频序列起始帧时间不同步。对于动态交通事件还原,极小的帧差也会严重影响事件还原的精度,甚至产生畸变。

图 2 为多个未进行时间同步处理的监控相机时间校正模型,监控视频序列的起始帧存在时间误差,导致监控视频帧在时间轴上不能一一对应。

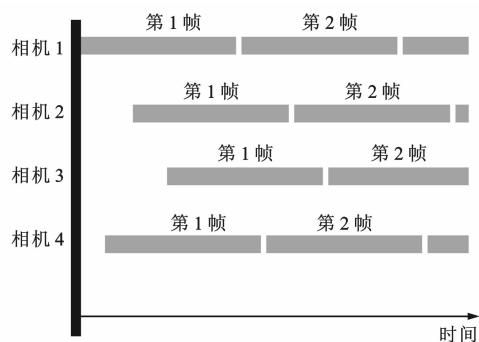


图 2 非同步相机时间校正模型

Fig. 2 Time correction model of asynchronous cameras

针对道路监控系统中硬件控制无法解决的车辆高速移动等动态场景时间同步问题^[12],本文提出基于多视点视频的时间校正算法,估算监控视频序列的起始帧时间误差,将不同时刻的对应帧匹配,实现高精度的动态交通场景复原。

为了精确推算多部非同步相机的时间误差,拍摄运动目标时需要考虑以下 2 点:相机拍摄的时间间隔可以通过运动目标图像的变化表现出来;图像变化和时间误差有紧密的联系。为此,用高速移动

的具有固定闪烁频率的 LED 灯模拟高速运动的车辆,作为相机捕捉对象。

在可弯曲的竖杆前端安装发光源,手持发光源上下左右快速抖动,用相机观测光源移动轨迹,拍摄装置原理见图 3。运动目标选取 LED 灯,使用 PIC 设置发光源的发光频率,光源的运动轨迹见图 4,虚线即为光源的运动轨迹。

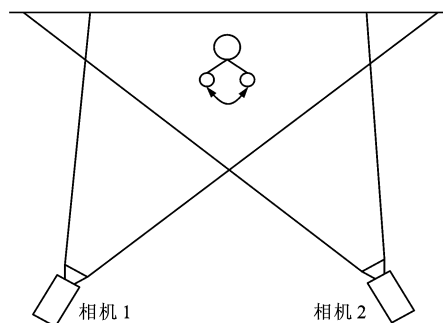


图 3 拍摄装置原理

Fig. 3 Principal of shooting device

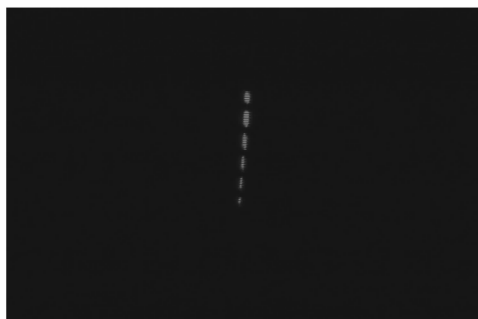


图 4 光源运动轨迹

Fig. 4 Trajectory of light source

2 时间校正算法

在道路监控系统中,由于户外环境恶劣,拍摄图像存在各种噪声污染,为了从道路监控图像中提取运动车辆目标的特征信息,减少冗长量并降低噪声干扰,需要对监控相机拍摄图像进行预处理。

为了模拟道路监控环境,用闪烁 LED 灯模拟车辆移动,多部相机对车辆进行跟踪拍摄。LED 灯为红色,背景为黑暗的室内,使用灰度-二值化算法^[13]进行图像预处理,其原理是从原始彩色图像的左下角开始逐行扫描图像中的每一个像素点,比较 R、G、B 三个分量的大小,当像素点的 R 分量在 3 个分量中最大时,则该点像素值为 0,即为黑色,否则为 255 Pixels,即为白色。由于目标像素已经标记为黑色,背景为白色,所以进行灰度化的同时一并实现了二值化,减少了图像后续时间匹配计算时间。监控图像经过处理后,边界等区域会产生噪声,在光线轨

迹的目标区域出现细小空洞等,影响对应帧的匹配精度,因此,对监控图像二值化后,再进行2次形态学闭运算,可以有效减少空穴。

2.1 对应帧匹配

在道路监控系统中,多部相机拍摄同一动态场景的效果见图5,时间完全同步时,4部相机所拍摄汽车位置在同一时刻应该是相同的,但是由于起始时间差,在同一时刻拍摄的汽车位置有所差异。图6(a)、(b)分别为同步相机与非同步相机拍摄的视频序列,如果时间完全同步,在同一时刻的所有帧序列应该一一对应,非同步相机的起始帧存在一定时间误差,将导致视频序列的对应帧不在同一时刻。

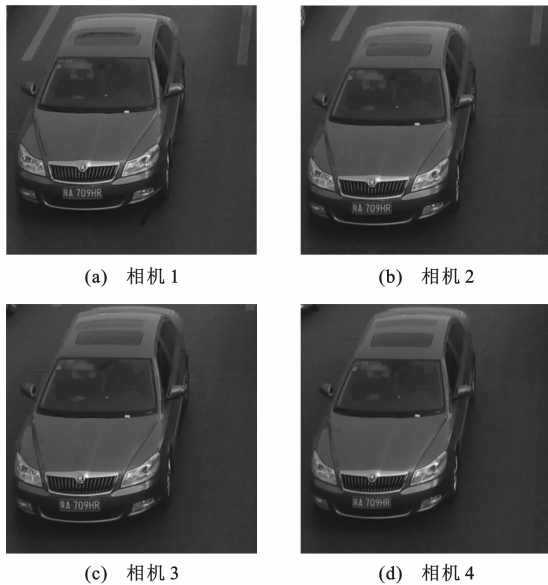


图5 非同步相机拍摄效果

Fig. 5 Shooting effects of asynchronous cameras

为了计算多部非同步相机拍摄道路监控视频中起始帧的时间差,首先要确定多个视频中对应帧的位置。对应帧匹配法搜索相似度较高的画面判断为同一帧^[14-17],但是这种方法存在很大的弊端,非同一帧的画面会被误判为对应帧,识别准确度低,严重影响交通事故动态场景复原的效果。极几何约束是特征匹配中最强有力的约束关系,因此,本文采用极几何约束和点到极线距离最小约束准则引导对应帧匹配。

选取一个监控视频序列为基准,其他监控视频序列分别与基准视频进行比对校正,多个非同步监控视频序列的研究可转换为对2个监控视频的研究。在2个监控视频序列中,每一帧图像的对应点遵循极几何关系^[15],见图7,2部相机在不同的光心 O 和 O' 获取的图像分别为左图像 I 与右图像 I' ,点 m_1 、 m_2 为空间中同一点 M 在2帧图像上的投影,互

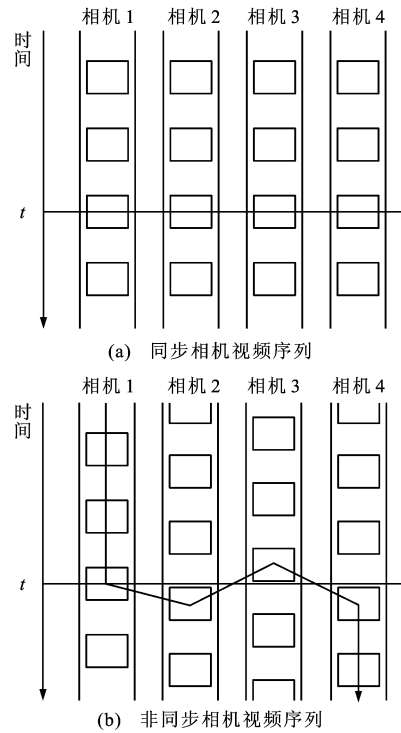


图6 视频序列

Fig. 6 Video sequences

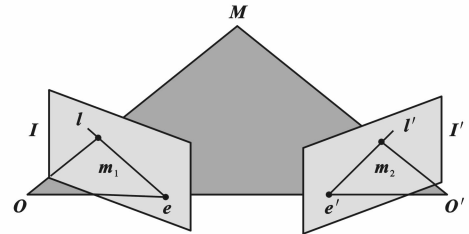


图7 极几何关系

Fig. 7 Epipolar geometry relationship

为对应点,点 M 与光心所呈的平面为极平面,2个光心的连线与图像平面的交点为极点,即 e 和 e' ,极平面与左右图像平面的交线为极线,即 l 和 l' 。极线约束是给定图像 I 上的点 m_1 ,则它的对应点 m_2 一定在极线 l' 上,同理,点 m_1 一定在极线 l 上。极线约束是两帧图像间最基本的几何关系,数学上定义为

$$m_2^T F m_1 = 0 \quad (1)$$

式中: F 为具有7个自由度,秩为2的 3×3 齐次矩阵,描述相机的内外部参数信息,又称为基本矩阵。

极线 l' 与基本矩阵 F 的关系为

$$l' = F m_1 \quad (2)$$

利用基于代数误差的线性估计算法——8点算法估计基本矩阵^[16], F 形式为

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

设 2 帧图像上有 n 对对应点, 其中 $m_{1,i}$ 与 $m_{2,i}$ 分别为 2 帧图像上第 i 处对应点, 得到对应点分别为

$$m_{1,i} = (u_i, v_i, 1)^T \quad (4)$$

$$m_{2,i} = (u'_i, v'_i, 1)^T \quad (5)$$

式中: u_i, v_i 与 u'_i, v'_i 分别为图像中对应点 $m_{1,i}$ 与 $m_{2,i}$ 的横、纵坐标值, $i = 1, \dots, n$ 。

$m_{1,i}$ 与 $m_{2,i}$ 之间满足极线约束

$$m_{2,i}^T F m_{1,i} = 0$$

展开极线约束方程为

$$u'_i u_i F_{11} + u'_i v_i F_{12} + u'_i F_{13} + v'_i u_i F_{21} + v'_i v_i F_{22} + v'_i F_{23} + u_i F_{31} + v_i F_{32} + F_{33} = 0 \quad (6)$$

由式(6)可得到 n 个方程, 构造矩阵 A, f 分别为

$$A = \begin{bmatrix} u'_1 u_1 & u'_1 v_1 & u'_1 & v'_1 u_1 & v'_1 v_1 & v'_1 & u_1 & v_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u'_n u_n & u'_n v_n & u'_n & v'_n u_n & v'_n v_n & v'_n & u_n & v_n & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$f = [F_{11} \ F_{12} \ F_{13} \ F_{21} \ F_{22} \ F_{23} \ F_{31} \ F_{32} \ F_{33}]^T \quad (8)$$

由式(6)可知, 确定基本矩阵 F 可转换为求线性方程 $Af = 0$ 的解 f 。约束条件设为 $\|f\| = 1$, 求在这个约束条件下的 $\|Af\|$ 最小值。对矩阵 A 和 f 进行奇异值分解, 当 n 大于 8 时, 可求解线性方程, 计算基本矩阵 F ^[18-19]。通过式(2), 计算 m_1 在图像 I' 上的对应极线。光源轨迹成像为虚线段, 通过对虚线段的起始端点和结束端点进行对应点匹配实现整个光迹的同步匹配。在时间同步的情况下, 端点 m_1 的对应点 m_2 一定满足极线约束方程, 但是时间不同步会使对应点 m_2 与极线位置可能存在一定的偏差, 因此, 使用距离最小约束条件, 搜索与之匹配的最佳点为对应点。式(2)中直线 l' 为法向量形式, 通过计算转换可得到其一般形式为

$$k_1 u_i + k_2 v_i + k_3 = 0 \quad (9)$$

$$k_1 = F_{11} u_i + F_{12} v_i + F_{13} \quad (10)$$

$$k_2 = F_{21} u_i + F_{22} v_i + F_{23} \quad (11)$$

$$k_3 = F_{31} u_i + F_{32} v_i + F_{33} \quad (12)$$

点 m_2 与极线 l' 的距离 d 为

$$d = \frac{|k_1 u_2 + k_2 v_2 + k_3|}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \quad (13)$$

图 8 为图像中对应点匹配, 虚线段为光源成像轨迹, 利用极几何约束和点到极线距离最小约束准则进行计算, 标记出的实线为图像 I' 中与端点 A' 所对应的极线位置, 与该极线距离最小的端点 B' 即为 A' 的对应点。

2.2 时间校正模型

以 2 部非同步相机为例, 建立道路监控系统中

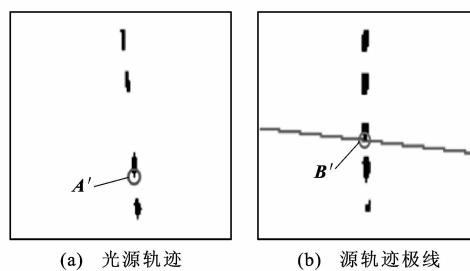


图 8 对应点匹配

Fig. 8 Matching of corresponding points

相机时间校正模型。选取相机 1 为基准相机, 相机 2 为延迟相机。对这 2 部相机组成的拍摄时间系统进行分析, 时间误差的分析模型见图 9, 其中, 实线和虚线分别表示基准相机和延迟相机的帧序列, 粗虚线段为闪烁的 LED 光源, 一个完整的 LED 闪烁周期为 2α , 由灯亮和灯灭 2 个状态组合而成, 起始帧时间差为 Δt 。

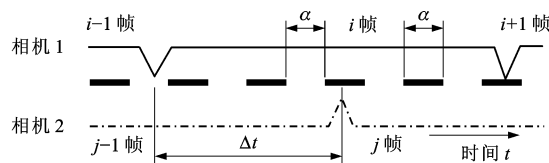


图 9 时间误差分析模型

Fig. 9 Analysis model of time error

根据拍摄的光源所成像的段宽度, 粗略估算时间误差, 具体步骤如下。

Step 1: 确定基准相机捕获的图像上起始帧的发光段总数为 S_0 。

Step 2: 确定延迟相机起始帧中与基准相机起始帧所对应的发光段数为 S_b 。

Step 3: 计算 2 个对应帧中发光 LED 灯成像段数之差 $S_b - S_0$ 。

Step 4: 用 LED 轨迹成像段数之差乘以 LED 灯的闪烁周期, 即为粗略估算的时间误差, 为 $2\alpha(S_b - S_0)$ 。

起始帧位置未知, 为了推导未知部分的时间误差需要确定起始帧的状态, 其中: 状态 1 为延迟相机和基准相机灯同时亮; 状态 2 为基准相机灯亮时延迟相机灯灭; 状态 3 为基准相机灯灭时延迟相机灯亮; 状态 4 为基准相机灯灭时延迟相机灯灭。建立 4 种状态模型见图 10, 分析时间误差的范围。在图 10(a) 中, 2 部相机的起始帧都在一个闪烁周期的亮灯段, 灯亮周期为 α , 因此, 状态 1 的时间误差范围为 $-\alpha < T_1 < \alpha$; 在图 10(b) 中, 状态 2 的时间误差范围为 $-\alpha < T_2 < \alpha$; 在图 10(c) 中, 2 个起始帧分别在一个闪烁周期的亮灯段和灭

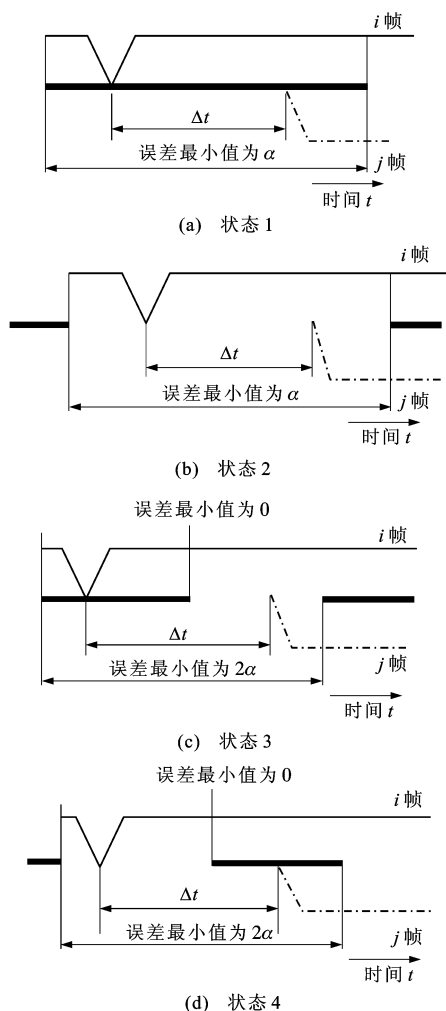


图10 起始帧状态分析

Fig. 10 Analysis of start frame statuses

灯段,一个完整闪烁周期为 2α ,状态3的时间误差范围为 $-2\alpha < T_3 < 0$;在图10(d)中,状态4的时间误差范围为 $0 < T_4 < 2\alpha$ 。

由以上分析可知,非同步相机的时间误差为一帧图像中对应发光LED成像段数的时间差与未知部分时间差总和,表示为

$$\Delta t = 2\alpha(S_b - S_0) + T_i \quad (14)$$

式中: $T_i (i=1,2,3,4)$ 为第*i*种起始帧状态的时间误差。

由式(14)可以看出,拍摄时间误差的范围由未知部分的时间误差范围决定。

3 试验结果分析

试验使用2部Sony EVI-20相机作为道路监控系统中监控视频采集设备,用闪烁LED灯的移动模拟道路中高速移动的车辆,拍摄图像尺寸为640 Pixels×480 Pixels,相机曝光时间为1/30 s。

发光源选择红色LED灯,使用PIC16F84A-20单片机控制红色LED发光源以周期为6.59 ms运动,在一个曝光时间内发光源闪烁5~6次。为了便于捕捉到目标光源的运动轨迹,在黑暗的室内进行拍摄,试验前,使用NTP网络时间协议^[20]对2部相机进行调整。图11为预处理和对应帧匹配结果,带箭头线段指明了2段视频序列中对应帧的位置。

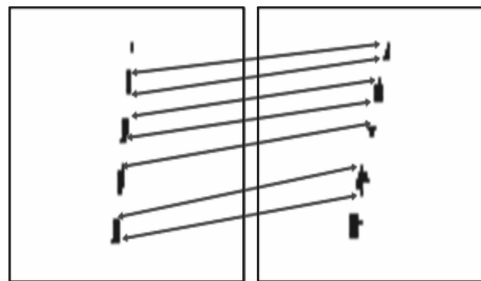


图11 预处理和对应帧匹配

Fig. 11 Pretreatment and corresponding frame matching

基准相机和相对延迟相机的监控视频起始帧对应的发光段数分别为5、4,见图11。基准相机起始状态为灯亮,延迟相机对应帧起始状态为灯灭,符合状态3,未知部分时间误差范围为 $-2\alpha < T_3 < 0$ 。取试验中拍摄的一段视频序列为例,该视频序列有92帧,使用估算的时间误差对第1~92帧图像分别进行校正,对每帧图像的时间误差数据进行分析,估计时间误差范围的合理性与有效性,最后得出3个时间误差范围所对应的帧数,结果见表1。

表1 统计结果

Tab. 1 Statistics result

误差范围	帧数	比例/%
$(-\alpha, 0]$	11	11.9
$(0, 2\alpha]$	70	76.2
$(2\alpha, 3\alpha)$	11	11.9

由试验结果可以看出,对应帧在一个闪烁周期 2α 时间误差范围的帧数达到88.1%以上,因此,估算的时间误差范围 $0 < \Delta t < 6.59$ ms 合理、有效。计算2个视频序列起始帧整体的时间误差。基准相机和延迟相机同步校正后,将其他多部相机与基准相机进行时间校正,就可以实现多部相机的时间同步校正。

由于实际车辆在道路中运动环境比较复杂,为了进一步验证算法的有效性,将算法应用到多相机拍摄的动态场景中进行动态场景复原。采用自由落体的皮球模拟车辆的移动,使用4部Sony EVI-20相机分别置于不同角度拍摄自由落体的皮球。试验环境见图12,4部相机的架设高度均为160 cm,图像大小为320 Pixels×240 Pixels,格式为PPM,

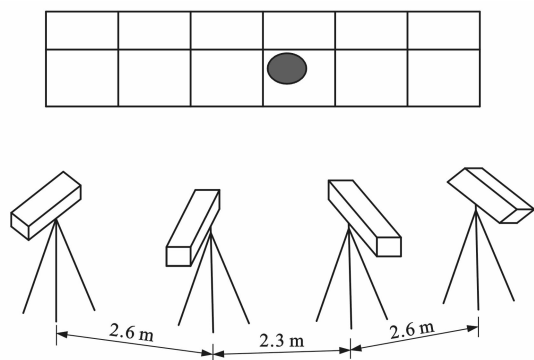
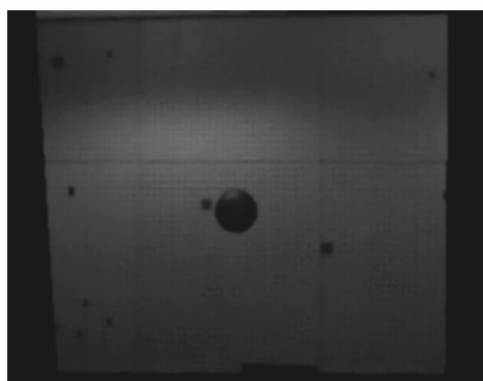


图 12 试验环境

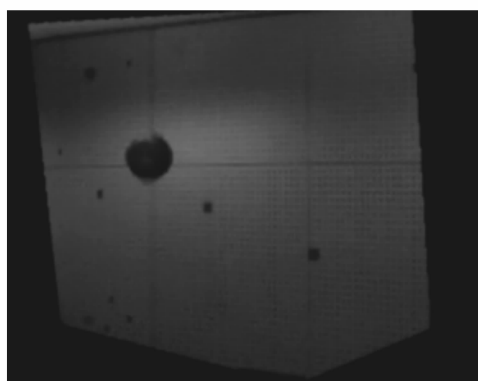
Fig. 12 Experimental environment

曝光时间和曝光间隔均为 $1/30$ s。

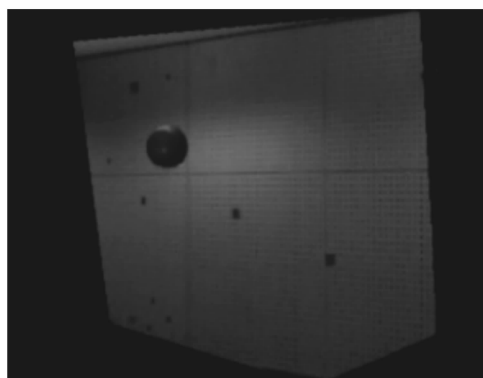
分别对 4 部相机拍摄的视频序列使用相似度判别的时间校正方法和本文对应帧匹配时间校正方法进行比较,并选取同一时刻的帧序列进行三维重建,动态场景复原结果分别见图 13、14。由图 13 可以看出,同一时刻 4 部相机拍摄的视频中皮球明显不在同一水平线上,出现上下起伏的现象,这是由于一般的时间校正方法是搜索多个视频序列中相似度较高的画面判断为同一帧,从而导致非同帧的画面被误判。本文基于极几何约束关系的对应帧匹配时间校正方法对 4 个视频序列进行对应帧提取后的三



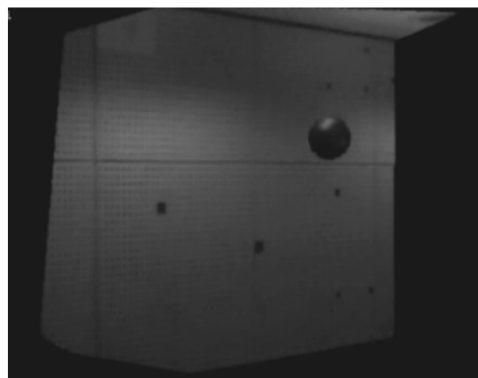
(a) 相机 1



(b) 相机 2



(c) 相机 3



(d) 相机 4

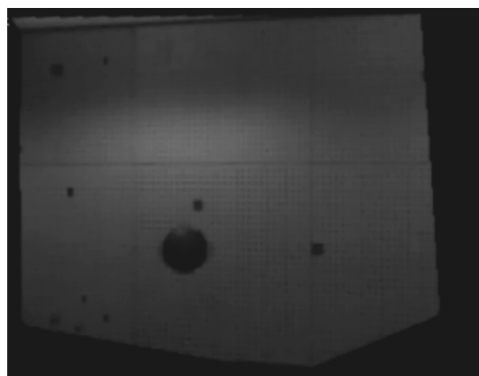
图 13 相似度判别的时间校正方法试验结果

Fig. 13 Test results of time correction method based on similarity discrimination

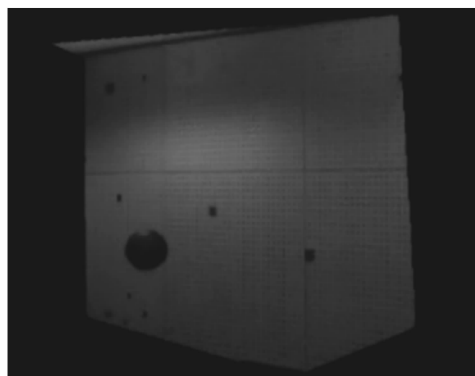
维重建见图 14,可以看出同一时刻皮球保持在相同水平高度。

将本文提出的交通监控系统中非同步相机时间校正方法与同类方法,包括一般时间校正方法、单片机控制曝光方法、RS-232 串口控制曝光方法、光耦继电器控制曝光方法、基于图像质量评价和遥感控制方法的校正误差进行比较,结果见表 2。一般时间校正方法是通过电子快门控制同步曝光 $5 \sim 50$ ms^[2],曝光时间很不稳定。使用单片机和 RS-232 串口控制实现同步摄影^[3,5],误差分别为 18.01、10.00 ms,完全

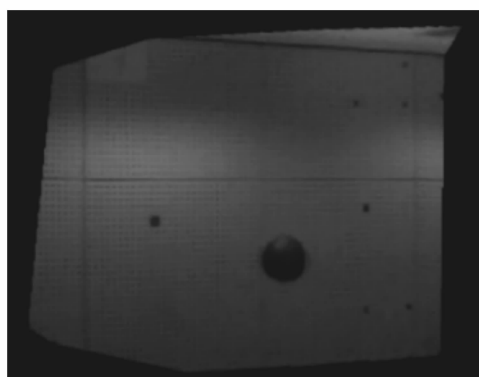
不能满足道路监控系统中高精度的时间校正要求。通过光耦继电器进行同步曝光方法^[2],平均误差为 6.78 ms。以上方法的时间精度均明显低于本文方法。基于图像质量评价的基础上结合专业的遥感控制技术,时间精度虽然略高于本文方法,但方法过程复杂,并且需要专用的成像、检测、控制设备,成本非常高,不适用道路监控系统。本文方法通过多次试验,选取 92 帧序列进行处理分析就能达到稳定的同步效果,保证道路监控系统中相机时间同步方法的实时性,避免大量的硬件资源损耗和过复杂



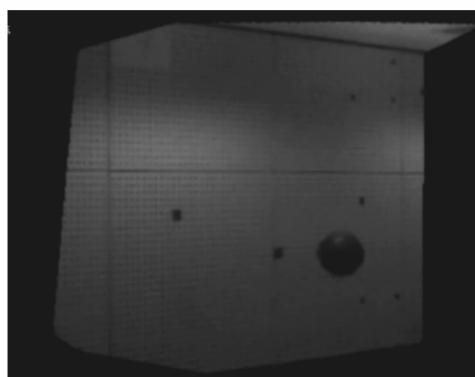
(a) 相机 1



(b) 相机 2



(c) 相机 3



(d) 相机 4

图 14 对应帧匹配时间校正方法试验结果

Fig. 14 Test results of time correction method based on corresponding frame matching

的算法,同时大大提高了交通监控相机时间同步校正的精度。

表 2 不同方法误差比较

Tab. 2 Error comparison of different methods ms

一般时间校正方法	单片机控制曝光方法	RS-232 串口控制曝光方法	光耦继电器控制曝光方法	本文方法	基于图像质量评价和遥感控制方法
50.00	18.01	10.00	6.78	6.59	6.54

4 结 语

(1)道路监控系统传统的基于硬件控制相机同步方法中存在时间校正精度低和实时性不足等问题。本文分析了道路监控中现有的非同步相机时间校正方法,提出了基于双目极几何约束的非同步相机时间校正方法。

(2)分析了道路监控系统时间误差模型,通过使用NTP网络时间协议对道路监控相机进行时间粗校正,然后利用多部监控相机间的极几何约束关系,提出满足高速移动车辆监控环境的高精度时间校正方法。

(3)通过试验验证,在曝光时间和间隔时间为 $1/30\text{ s}$,高速移动的发光源闪烁周期为 6.59 ms 的情况下,相机时间误差绝对值 $|\Delta t| < 6.59\text{ ms}$ 的对

应帧数达到 88.1% 以上,并且在小球自由落体的动态场景中,有很好的动态场景复原效果。

(4)道路监控系统中非同步相机时间校正精度,不仅取决于校正算法,而且受监控对象运动速度和监控设备的影响较大。在道路监控系统中,监控设备和监控对象运动速度对监控系统时间校正精度的影响是后续研究的主要内容。

参考文献:

References:

- [1] 魏君成,武星星,刘金国,等.空间相机平台时间同步误差分析与改进研究[J].计算机测量与控制,2014,22(4):1294-1296.
WEI Jun-cheng, WU Xing-xing, LIU Jin-guo, et al. Research on analysis and improvement of platform time synchronization errors of space camera[J]. Computer Measurement and Control, 2014, 22(4): 1294-1296. (in Chinese)
- [2] 石波,李国玉,王冬.数码航测中多拼CCD相机同步曝光方法及其实验分析[J].测绘科学,2012,37(5):72-75.
SHI Bo, LI Guo-yu, WANG Dong. A method for synchronized exposure of multi-CCD cameras in digital photogrammetry and its experimental analysis[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(5): 72-75. (in Chinese)
- [3] 陈建华,张雷,阮善发.非量测相机同步摄影控制器[J].南京工业大学学报:自然科学版,2003,25(5):92-94,100.

- CHEN Jian-hua, ZHANG Lei, RUAN Shan-fa. Synchronic exposure controller for non-metric cameras[J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2003, 25(5): 92-94, 100. (in Chinese)
- [4] 冷 雪, 张雪菲, 李文明, 等. 全帧 CCD 相机时间延迟积分模式下的图像缺损[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 467-473.
LENG Xue, ZHANG Xue-fei, LI Wen-ming, et al. Image defect of full-frame CCD in TDI mode[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2): 467-473. (in Chinese)
- [5] 林 辉, 石 波, 赵 倩, 等. 多相机同步曝光及 GPS 时间校正的处理与实现[J]. 测绘工程, 2013, 22(2): 79-81.
LIN Hui, SHI Bo, ZHAO Qian, et al. Multi-camera synchronization exposure and GPS time correction processing[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2013, 22(2): 79-81. (in Chinese)
- [6] PILLMAN B, JASINSKI D. Camera exposure determination based on a psychometric quality model[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2011, 65(2): 147-158.
- [7] SATO S, OKADA Y, AZUMA T. Real time high-sensitivity imaging for home surveillance system by using combined long/short exposure[C]// IEEE. 2011 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications. New York: IEEE, 2011: 429-435.
- [8] 陈绕青, 曹 国, 毛志红. 一种空间面阵 CCD 成像的曝光时间计算方法[J]. 计算机工程, 2012, 38(12): 1-4.
CHEN Rao-qing, CAO Guo, MAO Zhi-hong. Computation method of exposure time for space array CCD imaging[J]. Computer Engineering, 2012, 38(12): 1-4. (in Chinese)
- [9] 李军正, 李建文, 郝金明, 等. GPS 接收机动态检定场中的时间同步问题[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(6): 429-431.
LI Jun-zheng, LI Jian-wen, HAO Jin-ming, et al. The time synchronization in the kinematic verification network for GPS receivers[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2006, 23(6): 429-431. (in Chinese)
- [10] 杜保强, 刘 丹, 郭淑婷, 等. 基于时间间隔测量的宽范围高分辨率时间同步检测方法[J]. 电子学报, 2013, 41(6): 1076-1083.
DU Bao-qiang, LIU Dan, GUO Shu-ting, et al. High-resolution and wide-range time synchronization detection method based on time interval measurement[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 1076-1083. (in Chinese)
- [11] 周 鹏, 皮亦鸣, 戴永寿, 等. 星机双基地 SAR 的时间同步误差分析[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1467-1470.
ZHOU Peng, PI Yi-ming, DAI Yong-shou, et al. Analysis of time synchronization errors in spaceborne/airborne hybrid bistatic SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1467-1470. (in Chinese)
- [12] 李英环. 高速图像数字记录同步精度监测系统设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LI Ying-huan. Design and implementation for synchronization precision detection system of the record of high-speed digital image[D]. Harbin: Harbin Institute of technology, 2013. (in Chinese)
- [13] 吕行军, 韩宪忠, 陈 含, 等. 改进分量法的麦穗图像灰度-二值化处理[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(3): 112-116.
LU Xing-jun, HAN Xian-zhong, CHEN Han, et al. Wheat spike image gray-binarization processing using improved G-component method[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2012, 35(3): 112-116. (in Chinese)
- [14] 刘 红. 一种基于图的近重复视频子序列匹配算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(12): 3857-3862.
LIU Hong. Graph-based near-duplicate video subsequence matching algorithm[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(12): 3857-3862. (in Chinese)
- [15] 耿英楠, 赵 岩, 陈贺新. 基于运动估计的置信度传播立体视频匹配算法[J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2010, 28(4): 329-333.
GENG Ying-nan, ZHAO Yan, CHEN He-xin. Stereo video matching algorithm of belief propagation based on motion estimation[J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2010, 28(4): 329-333. (in Chinese)
- [16] HACHAJ T, OGIELA M R. Real time area-based stereo matching algorithm for multimedia video devices[J]. Opto-Electronics Review, 2013, 21(4): 367-375.
- [17] 吴成柯, 颜尧平, 卢朝阳. 对极几何约束下的运动估计和补偿[J]. 电子学报, 1998, 26(10): 66-69.
WU Cheng-ke, YAN Yao-ping, LU Zhao-yang. Motion estimation and compensation based on epipolar geometry constraint[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(10): 66-69. (in Chinese)
- [18] 李立春, 邱志强, 王鲲鹏, 等. 基于匹配测度加权求解基础矩阵的三维重建算法[J]. 计算机应用, 2007, 27(10): 2530-2533, 2537.
LI Li-chun, QIU Zhi-qiang, WANG Kun-peng, et al. 3D reconstruction based on fundamental matrix estimation weighted by match measure[J]. Computer Applications, 2007, 27(10): 2530-2533, 2537. (in Chinese)
- [19] 山海涛, 郝向阳, 哈长亮, 等. 视觉基本矩阵与摄影测量中相对方位元素的关系推导[J]. 海洋测绘, 2012, 32(1): 11-13.
SHAN Hai-tao, HAO Xiang-yang, HA Chang-liang, et al. The derivation for relation between vision fundamental matrix and relative orientation element of photogrammetry[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(1): 11-13. (in Chinese)
- [20] 段丕轩, 程 尧, 何 苗, 等. 基于 NTP 的同步采集系统研制[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(12): 3439-3440, 3443.
DUAN Pi-xuan, CHENG Yao, HE Miao, et al. Development of a synchronous measurement system with NTP[J]. Computer Measurement and Control, 2013, 21(12): 3439-3440, 3443. (in Chinese)