

相机阵列中无视场重合图像时间配准方法研究

王 帅¹ 李迎春² 张廷华²

(1. 装备学院研究生管理大队 北京 101416; 2. 装备学院光电装备系 北京 101416)

摘 要: 多路商业相机组阵在进行信息融合与视场拼接之前需要对采集的多路图像进行时间配准。为保证通用性,需要研究一种与系统相对独立的多路图像时间配准方法。提出一种利用多路图像序列内变换关系的算法,首先提取多路图像中与时间相关的共同特征,然后通过改进的奇异值分解方法判定共同特征的相似度完成时间配准。本文算法不需要提前对相机进行标定,对序列内图像配准精度要求较低,且能够在多路图像之间没有视场重合的情况下完成时间配准。经实验验证,配准精度达到了亚帧级。

关键词: 相机阵列;时间配准;商业相机;视场拼接

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Method suitable for image registration of camera array used in space target observation

Wang Shuai Li Yingchun Zhang Tinghua
(The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Increasing commercial camera resolution and detection sensitivity make it possible to observe the target space, And adopt the method of multiple unit array can further expand its field of view. Before the information fusion there must be a time registration to the acquisition of multi-channel image; because the storage medium, such as CF card, the time registration can only use the relevant information in the image by post-processing. This paper proposes a method by using multiple image sequence in transformation relationship, which can finish the time registration without the criteria that each image must of the same view. And it can effectively overcome the effects of noise and error matching, verified by the experimental registration accuracy can reach millisecond level.

Keywords: Camera array; time alignment; business camera; image stitching

1 引 言

基于商业相机的观测设备具有开发周期短、性价比高等特点。为了弥补其探测能力的相对不足,一般采用多个相机组成相机阵列,通过后期图像处理完成对目标的高精度和大视场观测。在由商业相机组成的相机阵列中,大部分商业相机并不支持外触发控制快门开启,而由人工控制开始采集时间,这就造成了初始采集时间上的差异;且采集的图像存储在CF卡上,没有时间信息。在进行图像拼接或融合等处理之前,必须完成多路图像的时间配准。

已有的基于图像处理的时间配准方法主要是提取多路图像中共同存在的特征,利用共同特征随时间变换的相关性。例如,殷兴华等人^[1]提出的基于相关系数的帧对齐方法,首先使用运动量较小的多帧图像建立背景模型,然后再

利用运动量较大的多帧图像,使用帧差法计算相邻两帧之间的运动量之差,最后利用优化的变步长方法计算两组帧序列图像的运动量相关系数来完成对齐。但是其算法要求视场有30%的重合才能较为稳定,并且仅适用于背景固定的凝视成像系统。黄跃飞等人^[2]不依赖于特征点检测和相机的参数标定,提出利用简单事件的序列相关性来寻找时间轴上的对应帧,并且通过全局投票的方法得出最优偏移量。但是这种方法要求视频序列中有共同的视觉信息事件如人物动作或者感兴趣区域灰度变化等,并且也是只能适用于背景固定的凝视成像系统。其它还有Caspi等人^[3]提出的基于感兴趣区域灰度变化、Stein等人提出的基于视场中运动目标的轨迹和彭晓明等人^[4]提出的应用于固定视场的时空配准方法等。这些方法均要求多路图像都要具有随时间变化的共同特征,其中部分算法应首先完成多路图像

的空间配准,然后才能完成时间配准。图像的重叠区域大小直接会影响到空间配准精度,这必然会对时间配准的精度造成影响。但是,相机阵列在实际应用中为了完成大视场拼接,期望做到视场重合尽量小,甚至没有视场重合,这时若使用常见的时间配准方法将导致严重错误甚至无法完成对齐。

本文利用相机阵列系统在跟踪监视过程中相机需随转台运动这一特征,认为存在通过各路相机采集的图像序列内相邻帧之间的变换关系来完成时间配准的可能性。本文算法不需要预先标定相机,且不要求视场重合。由于本文采用图像序列的变化关系的统计特征来代替单帧图像之间的变换关系,因此在存在严重噪声和空间配准精度较低的情况下,仍能完成时间配准,且精度能够达到亚帧级。

2 多路图像序列之间时间特征关系

2.1 多路图像的关系描述

由于开始采集的时间是人工控制,多路相机存储的第一帧图像必然不会是在同一时间采集的。时间配准应主要解决首帧对齐问题,剩余图像均可由相机的帧频推算采集时间完成时间配准。

为简化过程,首先对仅有两台相机的情况进行分析,如图 1 为两台相机组成的相机阵列。通常由转台带动多路相机对待观测目标进行跟踪,相机阵列中相机的相对位置固定,相机均未标定但参数固定,各路相机采集图像的帧频相同。在相机阵列完成视场拼接的应用时,为了充分利用相机视场,各路相机的光心虽然相同,但指向存在很大差异。时间配准选择其中一路图像为基准,其余各路图像与基准图像对齐。



图 1 相机阵列中双相机组阵工作方式

2.2 基于序列内相邻帧变换关系的时间配准

首先针对两路相机进行分析,假设 $S(I_0, I_1, I_2, \dots, I_n)$ 和 $S'(I'_0, I'_1, I'_2, \dots, I'_n)$ 分别是由相机 A 和相机 B 获取的图像序列,如图 2 所示,矩阵 Q_i 表示单路相机相邻两帧图像 I_i 与

I_{i+1} 之间的变换关系,矩阵 H 表示两路相机在同一时刻采集的两帧图像 I_i 与 $I'_{i+\Delta t}$ 之间的变换关系。

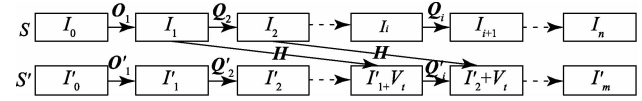


图 2 两路相机获取的图像序列

由于开始采集的时刻并不精确同步, I_0 与 I'_0 虽然分别是 S 和 S' 的第一帧,但并不是同一时刻采集的图像。假设 I_i 与 $I'_{i+\Delta t}$ 为相机 A 与相机 B 在同一时间采集的图像,只需计算出两路相机在同一时刻采集的两帧图像之间的 Δt ,便可确定两路序列图像开始采集的时间差。

在目标跟踪的应用中,相机阵列中相机随转台跟随目标运动同时进行图像采集。虽然两路相机在同一时刻采集的图像 I_i 与 $I'_{i+\Delta t}$ 之间可能没有共同视场,但当转台角速度与相机帧频之比小于相机视场角时,各路相机采集的单路图像序列中相邻两帧 I_i 与 I_{i+1} 之间必然会存在共同视场,如图 3 所示。

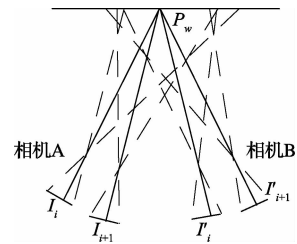


图 3 相邻时刻的两路相机对无穷远处点 P_w 成像

假设两路相机在随转台运动的过程中,在 t 时刻采集了图像 I_i 与 I'_i ,在相邻 $t+1$ 时刻采集了图像 I_{i+1} 与 I'_{i+1} ,如图 3 所示为相机 A 与相机 B 的第 i 帧拍摄位置及第 $i+1$ 帧拍摄位置,如果世界坐标系中无穷远处物点 $P_w(x, y, z)$ 同时出现在 I_i 与 I_{i+1} 中,设 $u_i(x, y)$ 为 P_w 在 I_i 中对应的像素点, R_i 为 t 时刻相机 A 的像平面相对于无穷远平面的旋转矩阵, T_i 为 t 时刻相机 A 的像平面相对于世界坐标原点的平移矩阵, M_A 为相机 A 的内参数, k 为尺度因子,齐次化之后可得:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} = kM_A[R_i, T_i] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

同理:

$$\begin{pmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ 1 \end{pmatrix} = kM_A[R_{i+1}, T_{i+1}] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

而:

$$\begin{pmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{Q}_i \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{Q}_i = \mathbf{M}_A[\mathbf{R}_{i+1}, \mathbf{T}_{i+1}][\mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i]^{-1} \mathbf{M}_A^{-1} \quad (4)$$

\mathbf{Q}_i 中各个元素的值由相机采集当前帧与上一帧的相对位置决定。

由于两路相机的空间位置固定, 相对于相机到目标的距离相机之间的距离可以忽略不计, 且光心可认为相同, 两路相机在同一时刻拍摄图像之间关系为一透射矩阵 \mathbf{H} , 且恒定不变。首先针对单个相机采集的图像序列进行分析: 假设 I_i 与 $I'_{i+\Delta t}$ 为相机 A 与相机 B 在同一时间采集的图像, I_i 到 I_{i+1} 的变换矩阵为 \mathbf{Q}_i , $I'_{i+\Delta t}$ 到 $I'_{i+\Delta t+1}$ 的变换矩阵为 $\mathbf{Q}'_{i+\Delta t}$ 。以世界坐标系为基准, 则:

$$I_{i+1} \cong \mathbf{Q}_i I_i \quad (5)$$

$$I'_{i+\Delta t+1} \cong \mathbf{Q}'_{i+\Delta t} I'_{i+\Delta t} \quad (6)$$

$$I'_{i+\Delta t} \cong \mathbf{H} I_i \quad (7)$$

$$I'_{i+\Delta t+1} \cong \mathbf{H} I_{i+1} \quad (8)$$

综上可得:

$$\mathbf{H} \mathbf{Q}_i I_i \cong \mathbf{H} I_{i+1} \cong I'_{i+\Delta t+1} \cong \mathbf{Q}'_{i+\Delta t} I'_{i+\Delta t} \cong \mathbf{Q}'_{i+\Delta t} \mathbf{H} I_i \quad (9)$$

即:

$$\mathbf{H} \mathbf{Q}_{i+1} \cong \mathbf{Q}'_{i+\Delta t} \mathbf{H} \quad (10)$$

由于 \mathbf{H} 是单应性矩阵:

$$\mathbf{Q}'_{i+\Delta t} = s_i \mathbf{H} \mathbf{Q}_i \mathbf{H}^{-1} \quad (11)$$

s_i 为缩放比例因子, 由此可得 \mathbf{Q}_i 与 $\mathbf{Q}'_{i+\Delta t}$ 为相似矩阵。

那么任意时刻, 图像序列 S 中当前帧与下一帧之间的变换关系 \mathbf{Q}_i 和图像序列 S' 中当前帧与下一帧之间的变换关系 $\mathbf{Q}'_{i+\Delta t}$ 应该都具有相似性, 而相邻两帧图像之间的变换矩阵 \mathbf{Q}_i 可由图像中的共同视场部分特征点配准得出, 配准方法可以根据应用需要参考文献[6-7]。对一定帧数的图像处理得到相机 A 的变换矩阵序列 $\mathbf{Q}_A = \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 \cdots \mathbf{Q}_n$ 与相机 B 的变换矩阵序列 $\mathbf{Q}_B = \mathbf{Q}'_1 \mathbf{Q}'_2 \cdots \mathbf{Q}'_n$, 假设人工按下快门同步误差为 $\pm b$ s, 相机的帧频为 L 帧/s, 则 Δt 取值如式(12)所示:

$$\text{SIM}(\Delta t) = \sum_{i=-M}^{M} \text{rel}(\mathbf{Q}_i, \mathbf{Q}'_{i+\Delta t}) \quad (12)$$

式中: $\text{rel}(\mathbf{Q}_i, \mathbf{Q}'_{i+\Delta t})$ 为矩阵 \mathbf{Q}_i 与 $\mathbf{Q}'_{i+\Delta t}$ 的相似程度。当 $\text{SIM}(\Delta t)$ 取最大值时, Δt 即为两路图像序列的时间偏移。

3 多路变换矩阵的特征提取与相似度判定

在理想情况下, \mathbf{Q}_i 与 $\mathbf{Q}'_{i+\Delta t}$ 的特征值组成的向量相关系数为 1。但是实际拍摄的空间目标图像由于受到配准精度和图像噪声的影响, 由特征值组成的向量相关系数与 1 差距较大, 且相机随转台运动的过程重复性较高, 因此需要有相对稳健的策略来判定 \mathbf{Q}_i 与 $\mathbf{Q}'_{i+\Delta t}$ 的相似性。

奇异值分解(singular value decomposition, SVD)能够有效提取矩阵特征, 通常应用于图像处理、信息检索、统计

计算和推荐系统等。SVD 最主要的应用就是判断两个稀疏矩阵的相似程度。它具有数值稳定性, 并且在矩阵维数较低的情况下有较高的运算效率。SVD 是将任意矩阵分解成三个矩阵 $\mathbf{U}, \mathbf{S}, \mathbf{V}$ 。其中 \mathbf{U}, \mathbf{V} 是两个正交矩阵, 称为左右奇异矩阵, \mathbf{S} 是个对角矩阵, 称为奇异值矩阵。奇异值矩阵中的对角元素称为原矩阵的奇异值, 按由大至小的顺序排列组成奇异值向量 $\text{SVD}(\mathbf{Q}_i) = (s_{\mathbf{Q}_i}^1, s_{\mathbf{Q}_i}^2, s_{\mathbf{Q}_i}^3)$ 。奇异值矩阵 \mathbf{S} 和正交矩阵 \mathbf{U}, \mathbf{V} 即为 \mathbf{Q} 的特征。在本例中, \mathbf{U}, \mathbf{V} 矩阵代表了相邻两帧图像之间的旋转角度、平移向量等, 而 \mathbf{S} 矩阵中的对角元素可以认为是综合旋转角度、平移向量等参数后的一个加权系数。由于相邻两帧图像之间的变换关系均为投射变换, 变换矩阵为单应性矩阵, 因此所有矩阵分解的 \mathbf{U}, \mathbf{V} 物理意义相同, 而 \mathbf{S} 矩阵则代表这种物理意义下的特征存在的差异。对矩阵进行奇异值分解判定相似度的优势在于:

1) 将物理意义相同的矩阵进行分解, 可以更直观提取出主要特征, 使变换矩阵在对图像的空间作用能够在综合各种参数之后直观量化;

2) 进行奇异值分解之后得到的奇异值向量 $\mathbf{S}_{\mathbf{Q}}$ 中三个元素的数值差异很大, 其中数值最大的 $s_{\mathbf{Q}}^1$ 往往能比 $s_{\mathbf{Q}}^2$ 高出一个数量级, 可以代表矩阵 \mathbf{Q} 的空间变换特征, 这便可以降低矩阵 \mathbf{Q} 的维度, 减小匹配的运算量;

3) SVD 具有与 PCA(主成分分析)相同的提取矩阵主成分的能力, 因此在降维之后能够更好地抵制噪声和误匹配对矩阵 \mathbf{Q} 相似度判定带来的影响。

由相似矩阵的性质可知:

$$\text{SVD}(\mathbf{Q}'_{i+\Delta t}) = s_i \text{SVD}(\mathbf{Q}_i) \quad (13)$$

$$\text{rel}(\mathbf{Q}_i, \mathbf{Q}'_{i+\Delta t}) = \frac{\text{SVD}(\mathbf{Q}_i)^T \text{SVD}(\mathbf{Q}'_{i+\Delta t})}{|\text{SVD}(\mathbf{Q}_i)^T| |\text{SVD}(\mathbf{Q}'_{i+\Delta t})|} \quad (14)$$

理想情况下 $\text{rel}(\mathbf{Q}_i, \mathbf{Q}'_{i+\Delta t})$ 应当等于 1, 由式(13)和式(14)即可得出序列图像的总相似程度。但是在 $\mathbf{S}_{\mathbf{Q}}$ 中 $s_{\mathbf{Q}}^2$ 和 $s_{\mathbf{Q}}^3$ 对矩阵的相似度计算影响较小, 且误匹配和噪声会对 $s_{\mathbf{Q}}^2$ 和 $s_{\mathbf{Q}}^3$ 的值产生较大影响, 且当两帧图像之间空间相对位移很小时, $\text{rel}(\mathbf{Q}_i, \mathbf{Q}'_{i+\Delta t})$ 会非常趋近于 1, 不易反映序列图像随时间的特征变化, 会造成下一步时间对齐的严重误匹配, 舍去 $s_{\mathbf{Q}}^2$ 和 $s_{\mathbf{Q}}^3$ 会使算法的时效性和稳定性都有所提高。假设时间配准需要将序列图像 S 的时间与序列图像 S' 对齐, 在图像序列 S 中抽取一组长度为 k 的序列图像 $I_i, I_{i+1}, \dots, I_{i+k-1}$, 计算出相邻帧之间的变换矩阵 $\mathbf{Q}_i, \mathbf{Q}_{i+1}, \dots, \mathbf{Q}_{i+k-1}$, 得到变换矩阵的最大奇异值组成的序列 $\text{SVD}(\mathbf{S}) = (s_{\mathbf{Q}_i}^1, s_{\mathbf{Q}_{i+1}}^1, \dots, s_{\mathbf{Q}_{i+k-1}}^1)$; 然后在 S' 中取 $2L$ 组相同长度 k 的序列图像 $I'_{j+1}, I'_{j+2}, \dots, I'_{j+k-1}$, j 的取值范围为 $-L+i$ 帧到 $L+i-1$, 得到序列 S' 的时间相关向量 $\text{SVD}(\mathbf{S}')$ 。那么两个长度为 k 的图像序列相关性可定义为式(15)。

$$\text{SIM}(\mathbf{S}, \mathbf{S}') = \frac{\text{SVD}(\mathbf{S})^T \text{SVD}(\mathbf{S}')}{|\text{SVD}(\mathbf{S})^T| |\text{SVD}(\mathbf{S}')|} \quad (15)$$

使用由序列图像 S 得到的向量与序列图像 S' 得到的

2L 组向量每一个向量计算相关性,当 $SIM(S, S')$ 得到最大值时,即可得到两个序列图像的相差时间 $\Delta t = j - i$ 。这种利用序列图像的变换矩阵相关性判定方法由整个序列图像的相似性得出最佳时间差,也可以避免个别帧图像的误匹配给全局时间对齐带来的影响。整个算法流程图如图 4 所示。

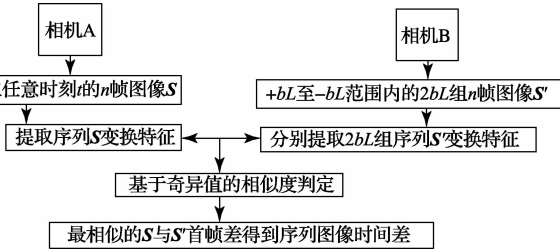


图 4 不同视场图像配准算法流程

4 实验过程

4.1 仿真星图实验

为了验证算法的可行性和对图像噪声的稳定性,首先利用虚拟星图模拟无穷远视场进行仿真分析。开发环境:VS2010+OPENCV,CPU:3.4 GHz, RAM:2 G。利用已有的星图模拟软件,相机参数根据商业相机真实参数设定,相机的视场角约为 $5^\circ \times 4^\circ$,两路图像无视场重合。星空图像在仿真过程中添加了空间目标模型和均值为 0,方差为 0.01 的高斯噪声。同时改变两路相机的方位与俯仰参数并采集图像,这样便可以模拟出两路相机在运动过程中拍摄空间目标的图像序列,这两路图像可认为是时间对齐的,设定相机的帧频为 25 P/s,人工控制快门同步误差范围为 ± 2 s,那么在两部相机共同采集 25 帧的之后,相机 B 继续采集 100 帧,然后将相机 B 采集的 25 帧图像随机插入 100 帧图像中任意位置,得到 25 帧相机 A 的图像与 125 帧相机 B 的图像,如果能通过算法检测出插入图像的位置,即可认为完成了时间对齐。

以国内常见经纬仪如 778 经纬仪的转台参数对采集的图像进行仿真。778 型经纬仪跟踪系统主要参数如表 1 所示。

表 1 778 型经纬仪跟踪系统参数

跟踪角速度	$0.01 \sim 20^\circ/\text{s}$
跟踪角加速度	$0 \sim 8^\circ/\text{s}^2$
跟踪误差	$\pm 3'$

设定相机的帧频为 25 P/s,针对转台不同的工作状态,分为转台随目标作随机运动时跟踪模式和转台随目标作匀速运动跟踪模式两种状态进行仿真。相邻两帧图像之间视场相差角度按式(16)生成,角度由跟踪角速度得到的当前

时刻相邻两帧之间的角度之差和转台跟踪误差两部分组成。在转台随目标随机转动时,每两帧之间的 $\text{rand}(0, 0.8)$ 各不相同;在转台随目标作匀速运动时,整个序列的每两帧之间的 $\text{rand}(0, 0.8)$ 相同;匀速运动时理想情况下所有帧之间空间变化关系一致,无法按本文方法进行时间对齐,但是在实际应用中,由于存在跟踪误差等因素,相邻两帧图像之间的变化并不是完全一致的,因此也本文算法也可得到时间对齐结果。

$$D = \text{rand}(0, 0.8) + \text{rand}(-0.05, 0.05) \quad (16)$$

多次测试后发现待配准的相机 A 取 1 s 时长即 25 帧图像时能在运行时间和对齐精度上有较好的平衡。同时采集 25 帧图像时两路图像的首帧如图 5 所示,可见并没有视场重合。

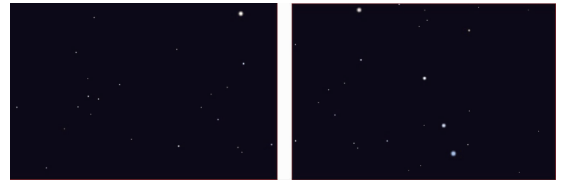


图 5 仿真相机 A 与相机 B 的第一帧图像

将相机 B 的 25 帧图像随意插入随后采集的长度为 100 帧的图像序列,本次实验选择的三个位置是第 25 帧、第 50 帧和第 75 帧,然后分别对两种运动情况实验结果如图 6 和表 2,图 7 和表 3 所示。定义波形图的主峰与次峰之比为信噪比,用以区分 Δt 的检出难度。可见在随机移动时,信号与噪声差别较大,能够作为时间配准的特征确定 Δt ;但是在匀速运动时,由于只能依靠转台的跟踪误差作为时变特征,且当跟踪误差范围较小时,时变特征会表现出一定的周期性,所以信噪比较低,但是仍能确定 Δt 。

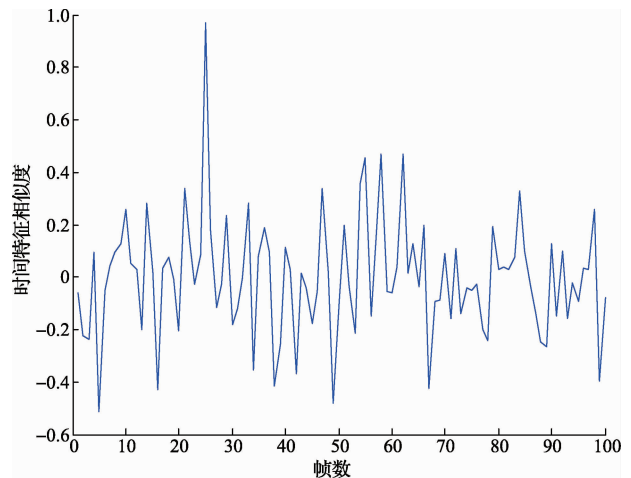


图 6 模拟随机运动跟踪在第 25 帧处时间对齐

表 2 随机运动时间对齐情况

实际位置	测得位置	偏差	信噪比
25	25	0	2.05
50	50	0	1.82
75	75	0	1.49

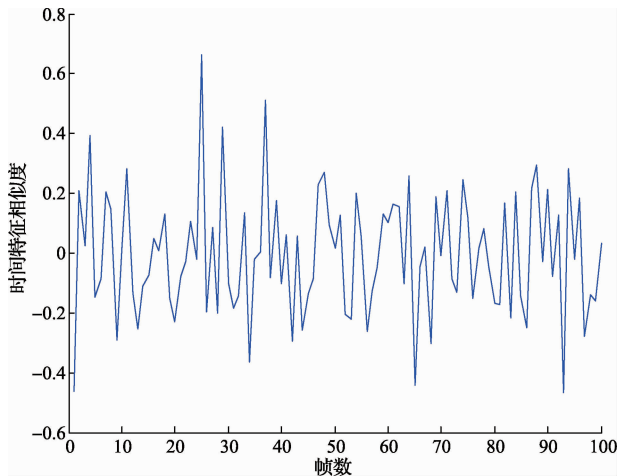


图 7 模拟匀速运动时在第 25 帧处时间对齐

表 3 匀速运动时时间对齐情况

实际位置	测得位置	偏差	信噪比
25	25	0	1.21
50	50	0	1.33
75	75	0	1.39

4.2 实际图像实验

实际图像实验主要验证当物面不是无穷远时的时间配准效果。实验采用两个商业相机搭配 50 mm 定焦镜头,两个相机光轴预先已经调平,且视场无重合,采集帧率为 25 P/s。相机随转台进行随机运动并采集图像,采用人工控制的方法同时按下快门,时间误差为 ± 2 s。将采集的序列图像抽帧处理,两部相机第 100 帧图像直接拼接如图 8 所示,可见并不是同一时刻采集的图像;从相机 A 中抽出第 100 帧至第 124 帧组成长度为 25 帧待配准图像序列 $S_A(I_{100}I_{101}\cdots I_{124})$,按照时间误差,相机 A 与相机 B 图像序列最多相差 ± 50 帧,在此范围内按照本文算法对图像进行时间配准,在序列内图像配准的过程中,由于天气原因和相机抖动,照成了数帧如图 9 所示的严重误匹配,但是仍然能够提取出时间相关特征。得到结果为相机 A 的第 100 帧应与相机 B 的第 67 帧对齐,对齐结果如图 10 所示,时间对齐后再次进行图像拼接结果如图 11 所示。



图 8 未进行时间对齐之前对应图像拼接

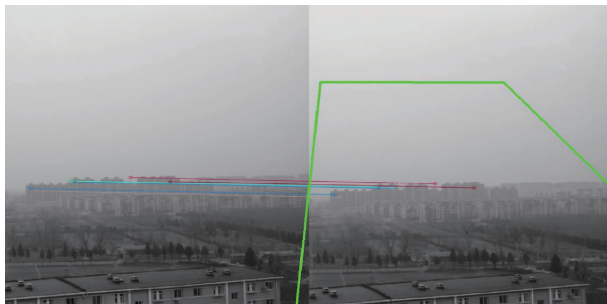


图 9 序列内相邻帧误配准图像之一

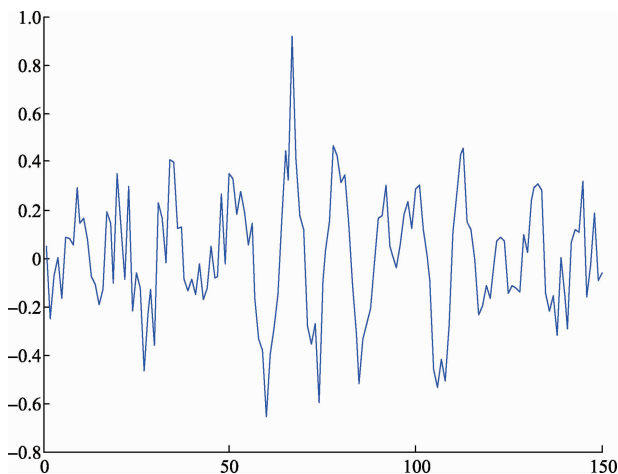


图 10 相机 A 待配准图像序列与相机 B 图像序列在第 67 帧处时间对齐



图 11 完成时间对齐后帧对应图像拼接

5 结 论

由仿真星图 and 实际拍摄图像的时间配准实验结果可以看出,本文算法具有良好的可行性和稳健性,能够克服图像噪声和配准精度低的影响,甚至在实验中遇到其中若干帧图像无法配准也不会对结果造成较大影响。并且对多路相机之间的视场重合率等参数没有要求,只需相机阵列跟随转台运动即可,在随机运动和匀速运动的应用中都能达到较好的对齐效果;时间配准最大误差为 1/2 fps。由于本文采用序列图像与时间相关的统计特征,对配准要求不高且抗噪性能好,并且只需要序列内图像同源即可,因此本文算法亦可推广到多源图像,如可见光图像与红外图像的时间配准。

参考文献

- [1] 殷兴华. 基于相关系数的适用于视频拼接的帧对齐方法[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(3): 1037-1041.
- [2] 黄飞跃, 徐光祐. 基于事件序列匹配的多摄像机视频同步[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 1: 033.
- [3] CASPI Y, IRANI M. Spatio2temporal alignment of sequences[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(11): 1409-1419.
- [4] 彭晓明, 丁明跃, 周成平, 等. 一种序列图像配准的计算框架[J]. 中国图象图形学报: A 辑, 2005, 10(4): 441-449.
- [5] 何小海, 吴媛媛, 陈为龙, 等. 视频超分辨率重建技术

综述[J]. 信息与电子工程, 2011, 01: 1-6.

- [6] 闫钧华, 杭谊青, 许俊峰, 等. 基于 CUDA 的高分辨率数字视频图像配准快速实现[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 380-386.
- [7] 许佳佳, 张叶, 张赫. 基于改进 Harris-SIFT 算子的快速图像配准算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 48-54.
- [8] CASPI Y, IRANI M. Aligning non-overlapping sequences[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48(1): 39-51.
- [9] WANG S, LI Y, DU L, et al. An algorithm of rapid extraction star point and diffuse plaque in star image [C]//Selected Proceedings of the Photoelectronic Technology Committee Conferences held July-December 2013. International Society for Optics and Photonics, 2014: 914215-914215-6.
- [10] 王军. 基于 FPGA 的压控晶振同步频率控制系统研究[J]. 电子测量技术, 2013, 35(11): 83-85.
- [11] 郭连平, 田书林, 蒋俊, 等. 高速数据采集系统中触发点同步技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(3): 224-229.

作者简介

王帅, 1991 年出生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为光电信息对抗。

E-mail: mage1120@foxmail.com