

基于相关滤波的高速图像旋转运动估计算法

杨贇辉, 朱鸿泰, 程虎*, 刘丹

中科芯集成电路有限公司, 江苏 无锡 214072

摘要 针对载体姿态变化引起的相机旋转运动,提出一种基于相关滤波的高速图像旋转运动估计算法(GPCF)。在灰度投影法的基础上,该算法采用相关滤波代替互相关运算进行角度估计。通过构建循环移位矩阵,扩充负样本数量,有效提高旋转运动估计的精度和鲁棒性。构建噪声比公式,以定量分析噪声对旋转运动估计算法的影响程度。理论分析和实验结果均表明,GPCF能够实时估计图像序列旋转角度,且精度和稳定性相比灰度投影法具有较大提升。

关键词 图像处理; 旋转运动估计; 灰度投影法; 互相关; 相关滤波

中图分类号 TP391 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220749

High-Speed Image Rotation Estimation Algorithm Based on Correlation Filtering

Yang Yunhui, Zhu Hongtai, Cheng Hu*, Liu Dan

China Key System & Integrated Circuit Co., Ltd., Wuxi 214072, Jiangsu, China

Abstract This study proposes a high-speed image rotation estimation algorithm based on correlation filtering (GPCF) to estimate the camera rotation caused by carrier pose variations. The proposed algorithm uses correlation filtering rather than the correlation operation used in the gray projection method for rotation estimation. The accuracy and robustness of the algorithm are greatly enhanced by introducing a circular shift matrix to increase the number of negative samples. Additionally, a noise-to-signal ratio formula is established to quantify the impact of noise on the rotation estimation. Compared to the gray projection method, both theoretical analysis and experiments reveal that the GPCF can estimate the rotation of image sequences in real time with greater accuracy and reliability.

Key words image processing; rotation estimation; gray projection method; correlation operation; correlation filtering

1 引言

随着武器装备信息化,武器追求精准命中目标的能力,对于弹载、机载、舰载光电设备,电子稳像成为一个重要设计需求。电子稳像过程中,根据视频图像序列帧间图像信息相关性,运用图像处理对摄像系统抖动、旋转等运动进行估计,并通过运动补偿,获得稳定流畅的视频图像^[1-2]。由于载体的姿态变化通常具有频繁、高速等特点,例如滑动弹带技术的视频弹转速约为 7 r/s^[3],这就要求电子稳像技术兼顾精度和处理速度。

旋转运动估计算法是电子稳像的核心技术之一,主流方法有特征匹配方法^[4-12]、变换域方法^[3,13-19]等。特征匹配方法通过匹配模板和待估计图像的具有旋转不变性的高质量图像特征完成旋转角度估计任务。Xu

等^[20]通过设计旋转不变的梯度特征完成对遥感图像方向的估计任务。Deng 等^[21]在手部检测中构建 3 层全连接神经网络用于手部的旋转角度估计。此外还有基于 SIFT^[22]、SURF^[23]和 ORB^[24]的特征匹配方法。特征匹配方法具有估计精度高、角度估计范围大的优点,但是特征提取和特征匹配过程计算复杂度较大,难以在弹载、机载等计算资源有限的图像处理平台上完成高帧频的角度估计任务。对于低分辨率图像,特征匹配方法无法提取出足够的高质量特征,进而导致角度估计精度显著下降。变换域方法通过将图像在笛卡儿坐标系下的旋转变换为新坐标系下的平移^[25-26],使用相位相关求得平移量,估计出旋转角度。Chen 等^[16]、Bülöw 等^[17]和 Xu 等^[18-19]通过傅里叶-梅林变换方法找到每个子图像在行列方向的平移量和图像旋转角度来提取运动向量,分别完成了二维、三维空间的平移和旋转运动

收稿日期: 2022-02-16; 修回日期: 2022-03-18; 录用日期: 2022-05-18; 网络首发日期: 2022-05-28

通信作者: *chhu1989@163.com

估计。Chen 等利用灰度投影法^[3,13-15]分别在笛卡儿坐标系和对数极坐标系下对灰度投影向量进行互相关运算,估计出图像的平移、旋转运动。变换域方法具有计算量小、精度高的特点^[27],但是容易受到噪声的影响,在小角度估计方面精度和鲁棒性较差^[28]。所提方法基于变换域方法中的灰度投影法,引入相关滤波^[29-30]代替互相关运算进行旋转运动估计,进一步提高灰度投影法的精度和抗噪能力。所提方法使用对数极坐标变换后初始帧图像在角度轴上的投影作为训练样本,构建循环移位矩阵以扩充负样本数量,采用一维高斯分布作为回归目标,在复数域求解岭回归,训练滤波器对后续帧图像的旋转运动进行精确估计。

2 灰度投影法基本原理

灰度投影(GP)法利用图像灰度分布的变化来估计视频帧间的运动矢量。将笛卡儿系下视频图像的灰度值分别投射在 X 和 Y 坐标轴上,获得投影向量,通过帧间投影向量的互相关运算估计帧间图像的位移量^[3]。

将灰度投影法应用于帧间图像旋转运动估计上,需要对图像进行对数极坐标变换(LPT),将图像在笛

卡儿系下的旋转运动转换为对数极坐标系下的平移运动,转换公式为

$$\begin{cases} \rho = \ln(\sqrt{x^2 + y^2}) \\ \theta = \arctan(y/x) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: θ 为角度; ρ 为向量的对数长度; (x,y) 为笛卡儿系下的坐标。

如图 1 所示,帧间图像的旋转运动表现为角度 θ 轴上投影向量的平移。参考笛卡儿系下的灰度投影法,对帧间图像的旋转角度进行估计。构建投影向量:

$$\Theta_k(\theta) = \sum_{\rho} I_k(\theta, \rho), \quad (2)$$

式中: I 为对数极坐标系下的图像; k 为帧号; Θ_k 为图像在 θ 坐标轴上的投影向量。对投影向量进行相关运算,得

$$C_k(u) = \sum_{\theta} \Theta_0(\theta + u) \Theta_k(\theta), \quad -m \leq u \leq m, \quad (3)$$

$$\Delta\theta = \underset{u}{\operatorname{argmax}} C_k(u), \quad -m \leq u \leq m, \quad (4)$$

式中: m 为搜索宽度; M 为图像在 θ 坐标轴上的投影长度; u 为搜索值; C_k 的最大值对应的搜索值 u 即为图像的旋转角度 $\Delta\theta$ 。

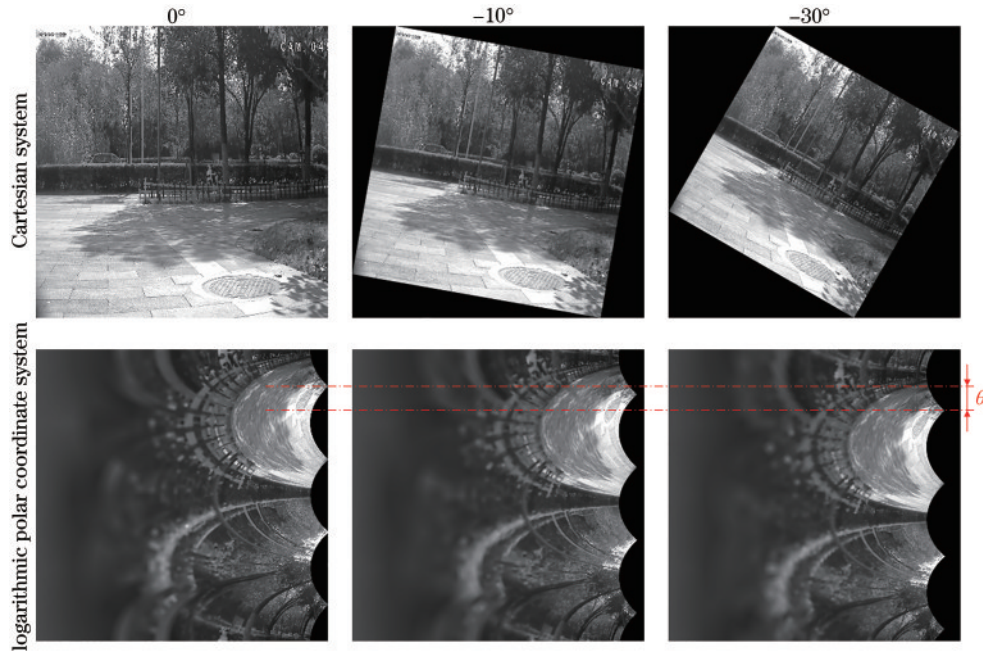


图 1 笛卡儿系下图像的旋转表现为对数极坐标系下沿角度轴方向的平移

Fig. 1 Rotation of an image in Cartesian system is represented as the translation along the angular axis in logarithmic polar coordinate

在实数域下相关运算耗时较大,对大角度旋转运动估计速度较慢。将搜索宽度 m 扩展到投影长度 M ,式(3)转换为互相关运算:

$$C_k = \Theta_0 \otimes \Theta_k, \quad (5)$$

式中: C_k 为互相关运算结果; \otimes 为互相关运算符号。根据互相关公式的性质,在频域内进行快速计算,得

$$C_k = \text{IFFT} \left[\text{conj}(\hat{\Theta}_0) \hat{\Theta}_k \right], \quad (6)$$

式中: $\text{conj}(\cdot)$ 为共轭操作; $\text{IFFT}(\cdot)$ 为快速傅里叶逆变换; $\hat{\cdot}$ 为傅里叶变换结果。 C_k 中最大相关值的位置即为旋转运动量。采用式(6),可以对 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 的旋转角度进行有效估计。在采集过程中图像内容受噪声影响发生部分变化,进而影响互相关运算对旋转运动的估计精度。

3 基于相关滤波的图像旋转运动估计算法

相关滤波(CF)在信号处理中用来描述两个信号在某个时刻的相似程度,信号越相似,响应值越大,在目标跟踪领域有着广泛的应用。相关滤波通过岭回归训练鉴别型的滤波器 w ,用于训练的损失函数为

$$l = \min_w \sum_i [f(x_i) - y_i]^2 + \lambda \|w\|^2, \quad (7)$$

式中:响应值 $f(x) = w^T x$; y_i 为回归目标; x_i 为输入样本; λ 为正则化系数。复数域下损失最小的最优解为

$$w = (X^H X + \lambda I)^{-1} X^H y, \quad (8)$$

式中:数据矩阵 X 由样本 x_i 按照行组装; I 为单位矩阵; X^H 是 X 的埃尔米特转置。

如图 1 所示,帧间图像的旋转运动表现为角度 θ 轴上投影向量的平移,故可以使用单个数据 x 构造循环移位矩阵 X ,穷举数据 x 的各种平移情况,具体为

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ x_n & x_1 & x_2 & \cdots & x_{n-1} \\ x_{n-1} & x_n & x_1 & \cdots & x_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_2 & x_3 & x_4 & \cdots & x_1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

X 中第一行为正样本 x ,其余行为 x 各元素移位构成的负样本。对于训练的滤波器 w ,若输入样本 x_i 与 x 完全相同,则回归目标 y_i 的数值为 1.0。输入样本 x_i 与 x 差别越大,则目标 y_i 的数值越小。通常采用高斯分布作为回归目标 y 。

利用循环移位矩阵的性质,有

$$X = F \text{diag}(\hat{x}) F^H, \quad (10)$$

式中: F 是离散傅里叶矩阵; $\text{diag}(\cdot)$ 为矩阵对角化操作。将式(10)代入式(8),可得频域下 w 最优解为

$$\hat{w} = \frac{\text{conj}(\hat{x}) \odot \hat{y}}{\text{conj}(\hat{x}) \odot \hat{x} + \lambda I}, \quad (11)$$

式中: \odot 为 Hadamard 积。响应向量 R 的计算公式为

$$R = \text{IFFT}(\hat{w} \odot \hat{z}), \quad (12)$$

式中: z 是测试样本。 R 的各个成分是测试样本 z 的各个循环移位向量 z_i ,根据 $f(z_i) = w^T z_i$ 计算得到的响应值。响应向量上最大响应值位置就是 z 与训练样本 x 最相似的循环移位 z^* 所在位置。利用 z^* 的位置信息可以换算得到 z 的移位量。

引入相关滤波代替互相关运算,提出了基于相关滤波的高速图像旋转运动估计算法(GPCF),以估计图像旋转角度。投影向量 θ 在图像旋转时表现为输入样本的循环移位。约定逆时针旋转符号为正,顺时针为负。使用初始图像的投影向量 θ_0 ,按照式(9)构造循环移位矩阵 X , X 各行构成了初始图像各个旋转角度的投影向量,训练出的滤波器 w 对 θ_0 具有较强鉴别能力。假设测试样本 z 为 θ_0 旋转某一角度后图像

的投影向量 θ_k 。理想情况下 θ_k 的某一循环移位与 θ_0 相一致,即根据式(9)构成的循环移位矩阵 Z 中某一行是 θ_0 。根据式(12),计算得到的响应图上最大响应位置就是循环移位矩阵 Z 中 θ_0 的位置,通过换算移位量得出旋转角度。此外,亚像素插值方法可以更加精确地估计旋转角度。

4 灰度投影法和 GPCF 的噪声影响分析

相机在采集过程中会引入噪声,影响旋转角度估计精度。构建白噪声向量 δ 进行噪声影响分析,其成分 δ_i 满足 $E(\delta_i) = 0$ 和 $D(\delta_i) = \sigma^2$, $E(\cdot)$ 和 $D(\cdot)$ 分别为期望和方差。为定量分析白噪声向量 δ 对旋转角度估计结果(最大值位置)的影响程度,构建噪信比(NSR)公式,为

$$R_{NS} = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_u D(C^\delta - C)}}{\max \sqrt{C}}. \quad (13)$$

NSR 的分子为噪声影响下互相关结果(或相关滤波结果)的标准差;分母为计算结果最大值。NSR 越小,说明 δ 对计算结果的影响越小,方法对噪声的鲁棒性越强。在灰度投影法中引入 δ ,互相关结果为

$$C^\delta = \theta_0 \otimes (\theta_0 + \delta), \quad (14)$$

式中: θ_0 为初始帧投影向量。根据式(13)建立 NSR 的计算公式:

$$R_{NS} = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_u D[C^\delta(u) - C(u)]}}{\|\theta_0\|_2}, \quad (15)$$

式中: $\|\cdot\|_2$ 为 2-范数。

$$D[C^\delta(u) - C(u)] = \sum_\theta D[\theta_0(\theta + u)\delta(\theta)] =$$

$$\sigma^2 \sum_\theta \theta_0^2(\theta + u) = \sigma^2 \|\theta_0\|_2^2, \quad (16)$$

$$R_{NS} = \frac{\sqrt{\sigma^2 \|\theta_0\|_2^2}}{\|\theta_0\|_2} = \sigma. \quad (17)$$

式(17)表明,噪声向量 δ 对灰度投影法的 NSR 等于 σ 。对于 GPCF,引入白噪声向量 δ ,按照类似的思路建立噪信比计算公式:

$$R_{NS} = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_u D(R^\delta - R)}}{1} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_u D(w^T \delta)} = \sqrt{D(w^T \delta)}, \quad (18)$$

进一步化简,有

$$R_{NS} = \sqrt{D\left(\sum_u w_u \delta_u\right)} = \sqrt{\sum_u w_u^2 D(\delta_u)} = \sigma \|w\|_2. \quad (19)$$

式(19)表明,噪声向量 δ 对 GPCF 的影响与训练

滤波器 w 的模大小相关。为简化运算,将系数 λ 设置为 0,根据帕塞瓦尔定理,有

$$\|w\|_2^2 = \|\hat{w}\|_2^2 = \left\| \frac{\hat{y}}{\hat{x}} \right\|_2^2 = \sum_u \left(\left| \frac{\hat{y}_u}{\hat{x}_u} \right| \right)^2 = \sum_u \left(\left| \frac{\hat{y}_u}{\hat{x}_u} \right| \right)^2. \quad (20)$$

GPCF 采用高斯分布作为回归目标 y 的傅里叶变换结果为

$$\hat{y}_u = \frac{\sqrt{2\pi\eta^2}}{e^{2\pi^2\eta^2 u^2}}, \quad (21)$$

式中: η^2 为回归目标一维高斯分布方差。由于回归目标最大数值设置为 1.0, y 傅里叶变换结果与标准高斯分布在幅度值上相差比例系数 $\sqrt{2\pi\eta^2}$ 。式(20)表明 $\|w\|_2$ 取决于回归目标 y 和训练样本 x 。训练样本 x 为初始帧投影向量 Θ_0 , 各成分为图像像素数据的累加和,取值固定;调整高斯分布的方差 η ,可以令 $\|w\|_2$ 小于 1,降低 GPCF 受到 δ 的影响,可以实现比灰度投影法更鲁棒的旋转运动估计。

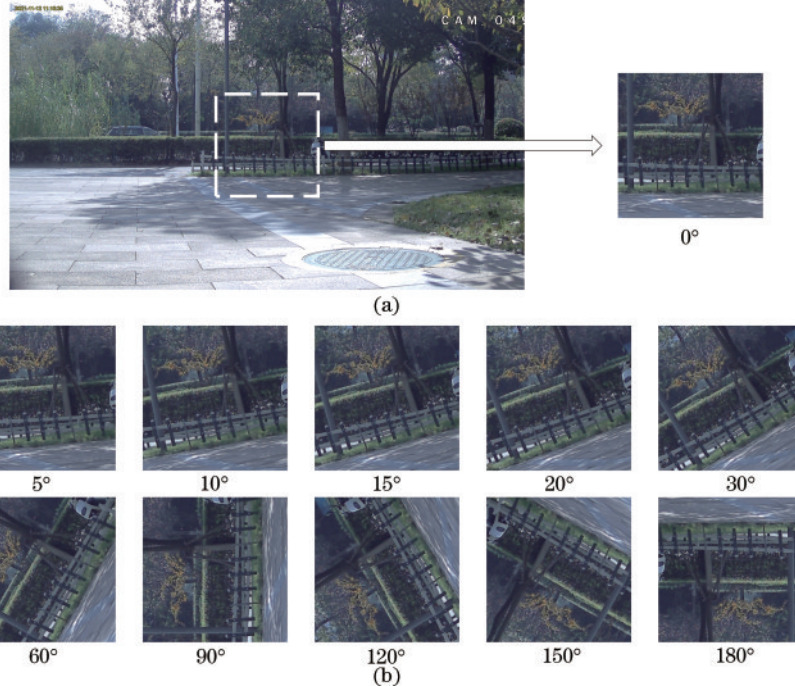


图 2 人造旋转图像数据示意图。(a)人造数据构造示意图;(b)构造的各角度人造数据

Fig. 2 Artificial image data. (a) Artificial data construction schematic; (b) artificial data with different angles

表 1 比较了灰度投影法和 GPCF 在人造旋转图像数据上的角度估计误差。GPCF 和灰度投影法均能有效估计旋转角度,但是整体上而言 GPCF 的估计精度更高。

实际旋转过程如图 3 所示,图像数据尺度维持不变。GPCF 初始化计算得到 $\|w\|_2 = 1.567 \times 10^{-2}$, 远远小于 1,因此相比灰度投影法, GPCF 对噪声具有更强的鲁棒性。图 3 比较了 SIFT、灰度投影法和 GPCF 对标定图片数据的旋转角度估计结果。SIFT 方法的精度最高, GPCF 方法优于灰度投影法。

5 实验结果与分析

5.1 实验环境

实验环境配置: Python3.7、GTX 2070、Inter Core i9-9900KF 3.60 GHz CPU、16 GB 内存。为验证所提算法的性能,采用人工方式采集旋转视频和图像数据,分别对灰度投影法和 GPCF 进行性能测试。采用 SIFT 特征点匹配法的输出结果作为参考。算法参数设置:输入图像尺寸默认为 360 pixel \times 360 pixel;相关滤波的回归目标 y 的方差 η 设定为 0.053。采集设备: FY-SP1510 型智能变速云台、VIAU SDI 高清相机。

5.2 性能评估

采用人造旋转图像数据对灰度投影法和 GPCF 进行性能测试。如图 2(a) 所示,以图像中心为旋转中心,旋转固定角度,然后在虚线框区域内截取尺寸为 360 pixel \times 360 pixel 的图像块,构建的人造旋转图像数据如图 2(b) 所示。

表 1 灰度投影法和 GPCF 对人造旋转图像的角度估计误差
Table 1 Angle estimation error of gray projection method and GPCF for artificial rotating image

Algorithm	5°	10°	15°	20°	30°
Gray projection	0.0052°	0.0023°	0.0065°	0.0048°	0.0113°
GPCF	0.0021°	0.0036°	0.0016°	0.0017°	0.0077°
Algorithm	60°	90°	120°	150°	180°
Gray projection	0.0129°	0°	0.0111°	0.0129°	0°
GPCF	0.0073°	0°	0.0088°	0.0041°	0°

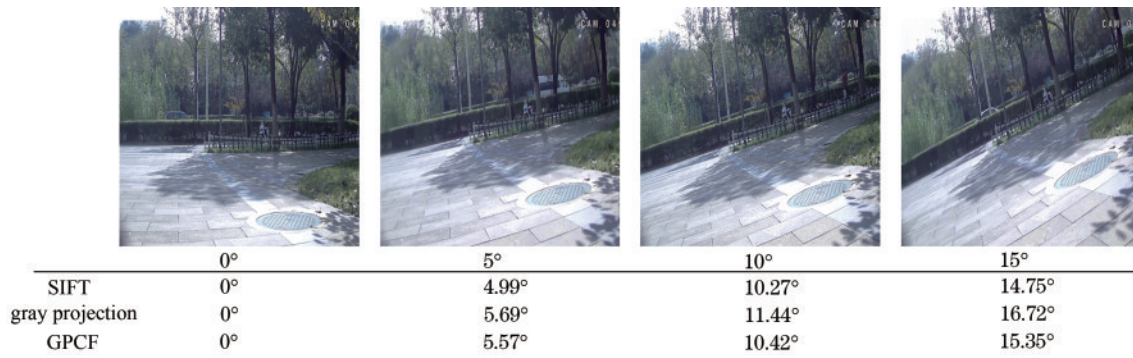


图 3 实际采集的图像数据及各方法估计结果

Fig. 3 Image data and the estimation results of each method

采用 SIFT 特征点匹配法对连续旋转视频图像数据(视频的旋转角度从 0°变化到 20°)进行角度标定,分别对灰度投影法和 GPCF 的估计结果与标定结果进行比较。表 2 给出 360 pixel×360 pixel 和 720 pixel×720 pixel 输入尺寸下灰度投影法、GPCF 的估计角度同 SIFT 方法标定结果比较的平均误差以及误差的方差。GPCF 的平均误差小于灰度投影法,说明 GPCF 具有更高的角度估计精度。此外,GPCF 的误差方差远远小于灰度投影法,说明 GPCF 的角度估计更加稳定。

表 2 灰度投影法、GPCF 分别与 SIFT 方法估计角度比较结果
Table 2 Result comparison of the gray projection and GPCF to the SIFT method for estimating angles, respectively

Input image size / (pixel×pixel)	Method	Mean error / (°)	Variance of error
360×360	Gray projection	2.04	0.64
	GPCF	0.70	0.05
720×720	Gray projection	1.54	0.75
	GPCF	0.65	0.11

表 3 给出了输入尺寸 360 pixel×360 pixel 下三种方法的运算耗时。SIFT 方法精度最高,但是运算耗时最大,速度低,不适用于对高帧频旋转角度估计需求高的弹载、机载光电设备。灰度投影法和 GPCF 的速度高,适合于高帧频图像处理系统设计。综合考虑,在保证高帧频处理能力的情况下,GPCF 具有更小的误差

表 3 灰度投影法、GPCF、SIFT 方法的运算耗时

Table 3 Time consuming of the gray projection method, GPCF, and SIFT

Method	Time /ms	Speed / (frame·s ⁻¹)
SIFT	323.43	3.09
Gray projection	11.52	86.81
GPCF	10.92	91.57

和更高的稳定性。

6 结 论

提出了一种基于相关滤波的高速图像旋转运动估计算法,用以实时估计相机载体的姿态变化引起的相机旋转运动。所提算法采用相关滤波代替互相关,利用循环移位矩阵扩充负样本,以训练滤波器,对旋转运动进行更精确和鲁棒的估计。还构建了噪信比公式,定量分析噪声对算法的影响,理论分析表明通过调整回归目标的方差,GPCF 具有更强的抗噪能力。实验结果表明,GPCF 能够实时有效地估计相机的旋转运动,且相比灰度投影法,在精度和稳定性上具有较大提升。

参 考 文 献

- [1] 杜登崇, 蒋晓瑜, 姚军. 可同时估计旋转和平移的电子稳像方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(4): 233-235. Du D C, Jiang X Y, Yao J. Electronic image stabilization algorithm for estimating rotation and translation simultaneously[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(4): 233-235.
- [2] 胡涛, 郭宝平, 郭轩, 等. 基于轮廓特征的图像配准[J]. 光电工程, 2009, 36(11): 118-122, 127. Hu T, Guo B P, Guo X, et al. Contour feature based on image registration[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(11): 118-122, 127.
- [3] 陈都. 视频图像电子消旋算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019. Chen D. Research on electronic image revolving algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [4] Vanne J, Aho E, Hamalainen T D, et al. A parallel memory system for variable block-size motion estimation algorithms[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(4): 538-543.
- [5] Smith M J, Boxerbaum A, Peterson G L, et al. Electronic image stabilization using optical flow with inertial fusion[C]//2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 18-22, 2010, Taipei, China. New York: IEEE Press, 2010: 1146-1153.
- [6] Ryu Y G, Chung M J. Robust online digital image

- stabilization based on point-feature trajectory without accumulative global motion estimation[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2012, 19(4): 223-226.
- [7] Brox P, Baturone I, Sanchez-Solano S. Fuzzy motion-adaptive interpolation with picture repetition detection for deinterlacing[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(9): 2952-2958.
- [8] 黄平, 曹镇, 王欢. 基于环形特征匹配的双目视觉里程计[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1515002.
Huang P, Cao Z, Wang H. Stereo visual odometry based on ring feature matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1515002.
- [9] 王月敏, 张宗华, 高峰, 等. 基于特征匹配的非连续镜面物体三维测量[J]. *光学学报*, 2021, 41(16): 1612004.
Wang Y M, Zhang Z H, Gao F, et al. Three-dimensional measurement of discontinuous specular object based on feature matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1612004.
- [10] 钱琦, 白庭铭, 闭云峰, 等. 基于点线特征的单目同步定位与建图初始化方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1215002.
Qian Q, Bai T M, Bi Y F, et al. Monocular simultaneous localization and mapping initialization method based on point and line features[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1215002.
- [11] 李泽一, 赵薇薇, 喻夏琼, 等. 基于最大相位索引图的异源影像配准方法[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1509002.
Li Z Y, Zhao W W, Yu X Q, et al. Registration of heterologous images based on maximum phase index map [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1509002.
- [12] 谢中思, 郭天太, 刘维, 等. 全息中基于多算法融合的相位拼接方法研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0709001.
Xie Z S, Guo T T, Liu W, et al. Phase splicing method based on multi-algorithm fusion in holography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0709001.
- [13] 吴浩, 邓宏彬. 一种基于分块灰度投影运动估计的视频稳像方法[J]. *兵工学报*, 2013, 34(4): 406-411.
Wu H, Deng H B. A video stabilization method based on sub-block gray projection[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(4): 406-411.
- [14] Lu X Y, Manduchi R. Fast image motion segmentation for surveillance applications[J]. *Image and Vision Computing*, 2011, 29(2/3): 104-116.
- [15] 陶声祥, 周亚军, 张江辉, 等. 基于行灰度投影相关的快速角度矢量估计算法[J]. *光电工程*, 2008, 35(11): 91-95.
Tao S X, Zhou Y J, Zhang J H, et al. Fast angle vector computation algorithm based on row gray projection correlation for rotation image[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(11): 91-95.
- [16] Chen Q S, Defrise M, Deconinck F. Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(12): 1156-1168.
- [17] Bülow H, Birk A. Fast and robust photomapping with an unmanned aerial vehicle (UAV)[C]// *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 11-15, 2009, St. Louis, MO, USA. New York: IEEE Press, 2009: 3368-3373.
- [18] Xu Q W, Chavez A G, Bülow H, et al. Improved Fourier Mellin invariant for robust rotation estimation with Omni-cameras[C]// *2019 IEEE International Conference on Image Processing*, September 22-25, 2019, Taipei, China. New York: IEEE Press, 2019: 320-324.
- [19] Xu Q W, Long X L, Kuang H F, et al. Rotation estimation for omni-directional cameras using sinusoid fitting[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2021, 103(1): 10.
- [20] Xu W H, Zhong S, Zhang W J, et al. A new orientation estimation method based on rotation invariant gradient for feature points[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(5): 791-795.
- [21] Deng X M, Zhang Y D, Yang S, et al. Joint hand detection and rotation estimation using CNN[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 27(4): 1888-1900.
- [22] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [23] Bay H, Tuytelaars T, van Gool L. Surf: speeded up robust features[M]//Leonardis A, Bischof H, Pinz A. *Computer vision-ECCV 2006. Lecture notes in computer science*. Heidelberg: Springer, 2006, 3951: 404-417.
- [24] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF[C]// *2011 International Conference on Computer Vision*, November 6-13, 2011, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2011: 2564-2571.
- [25] Dai S X, Zhang Y J, Song W Q, et al. Rotation angle estimation of JPEG compressed image by cyclic spectrum analysis[J]. *Electronics*, 2019, 8(12): 1431.
- [26] Goljan M. Blind detection of image rotation and angle estimation[J]. *Electronic Imaging*, 2018, 30(7): 1-10.
- [27] 张永祥, 闫文林, 张伟功, 等. 一种旋转运动估计稳像算法的研究与实现[J]. *小型微型计算机系统*, 2014, 35(9): 2151-2155.
Zhang Y X, Yan W L, Zhang W G, et al. Research and implementation of image stabilization in a rotary motion estimation algorithm[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2014, 35(9): 2151-2155.
- [28] Zeng H, Hosseini M D M, Goljan M. Replacing DWT with DTCWT in blind image rotation angle estimation [J]. *Electronic Imaging*, 2021, 2021(4): 1-7.
- [29] Henriques J F, Caseiro R, Martins P, et al. High-speed tracking with kernelized correlation filters[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(3): 583-596.
- [30] 任兴旺. 带旋转估计的目标跟踪算法研究[D]. 太原: 山西大学, 2021.
Ren X W. Research on target tracking algorithm with rotation estimation[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.