

捷联图像导引系统传感器数字复合式稳像方法

方 丹¹, 郭晓冉², 崔少辉¹

(1 军械工程学院 导弹工程系, 河北 石家庄 050003; 2 军械技术研究所, 河北 石家庄 050000)

摘 要: 针对传感器稳像与数字稳像各具优势而又存在不足的问题, 提出了传感器稳像与数字稳像相结合的复合式稳像方法, 实现两种方法之间的优势互补。首先, 利用 SIFT 算法检测图像中的特征点, 并在特征点匹配部分将陀螺数据解算出的像面位移量所指向的匹配点位置作为特征点匹配时的初始搜索位置, 指示当前帧在参考帧中以该匹配点位置为中心的一定大小矩形区域内搜索匹配特征点; 然后, 利用欧式距离最短的几对匹配点在仿射变换模型下计算出帧间变换矩阵; 最后, 利用基于视觉暂留机制的参考帧更新方法, 对每一幅当前帧图像进行重建, 完成视频序列的复合式稳像。实验结果表明, 该方法在保证较高稳像精度的同时, 降低了数字稳像方法的计算量, 提升了运算速度, 可满足捷联图像导引系统对稳像精度及实时性的要求。

关键词: 图像稳定; 传感器稳像; 数字稳像; 复合式

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)03-0050-06

Strapdown Image Homing System Sensor and Digital Compound Image Stabilization

FANG Dan¹, GUO Xiao-ran², CUI Shao-hui¹

(1 Department of Ordnance Engineering, College of Missile Engineering, Shijiazhuang 050003, China;

2 Ordnance Technical Institute, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: For the sensor image stabilization and digital image stabilization each has its advantages and insufficient, a compound image stabilization algorithm is proposed. First of all, the feature points are extracted using SIFT algorithm, and the indicated position by gyro data is made as the center point of initial sourcing position in a certain size rectangular area to search for matching feature points. Then, the interframe transformation matrix under affine transformation model is calculated using the shortest euclidean distance of matching point pairs. Finally, using the reference frame update method based on the mechanism of persistence of vision, each current frame image is reconstruction, and the compound stabilization algorithm is completed. Experimental results show that the compound image stabilization method is reducing the computational method of digital image stabilization and improving the speed of operation, it can meet the requirement for image stabilization precision and real-time performance of the strapdown image guidance system.

Key words: image stabilization; sensor image stabilization; digital image stabilization; compound

1 引言

传感器稳像方法具有运算速度快、实时性好的优点, 但是在稳像精度上受陀螺精度的限制^[1-3], 而

基于 SIFT 的数字稳像方法虽然可以达到很高的稳像精度, 但是其计算量较大^[4-6], 不能满足捷联图像导引系统对实时性的要求。本文结合传感器稳像方法与基于 SIFT 的数字稳像方法各自的优势, 提出了

一种实时高精度的传感器稳像与数字稳像相结合的复合式稳像方法.利用这种方法可以省略掉 SIFT 稳像算法中基于 kd-BBF 算法的特征点匹配和基于 RANSAC 算法的误匹配特征点剔除的步骤,降低了数字稳像算法中特征点匹配过程的运算量,提升了算法的运行速度.同时,连续帧之间的变换模型选择了具有 6 个变换参数的仿射变换模型,其复杂度介于平移变换模型与透视变换模型^[7]之间,同样可以描述平移、旋转和尺度变化,也具有较高的描述精度.另外,由于导弹飞行过程中处于高机动状态,有时突然的剧烈抖动极易造成某些连续帧之间的重合区域很小,使得以相邻前一帧为参考帧的稳像方法性能降低甚至失效.所以针对捷联导引系统的实际情况,受人眼中央凹视觉暂留机制的启发,引入了一种基于视觉暂留的参考帧更新方法:以当前帧之前连续帧的拼接图像作为参考帧,当前帧通过该参考帧进行补偿,并在补偿后与其拼接以更新参考帧,通过不断的更新来维护参考帧信息的充足性,同时利用更新后的参考帧对当前帧进行重建,以保证稳像后当前帧信息的完整性.

2 算法原理

传感器数字稳像方法的框图如图 1 所示,首先,利用 SIFT 算法检测并描述参考帧和当前帧中的特征点集;在特征点匹配部分,将陀螺数据解算出的像面位移量作为初步确定当前帧中特征点在参考帧中的匹配像素点位置的预估值,由该预估值可以得到当前帧中的特征点在参考帧中的对应位置;受传感器稳像方法中陀螺精度的限制,其指示出的匹配特征点位置并不能保证是精确值,所以本文以这些特征点作为每个特征点匹配搜索区域的中心,并在其周围一定的区域内进行特征点的搜索及匹配,选择这些匹配点中欧氏距离最短的三组匹配点计算出两帧图像之间的仿射变换矩阵,然后再根据该变换矩阵实现当前帧向参考帧的补偿.由于补偿后可能会导致当前帧中出现边缘部分或大面积图像区域信息的丢失,所以将补偿后的当前帧与参考帧进行拼接,使当前帧中信息丢失的部分通过拼接而得以恢复,同时将拼接后的图像进行缓存作为下一帧当前帧的参考帧,以后每一帧当前帧都与缓存中的参考帧进行匹配,并在匹配后拼接到该参考帧中作为后面图像的参考帧,每一帧稳定的当前帧又通过参考帧的重建而得到.

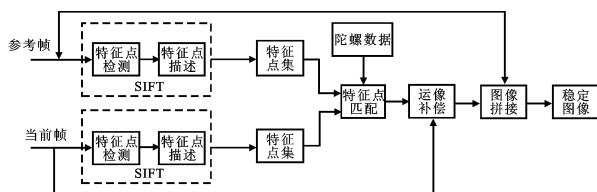


图1 复合式稳像系统框图

3 基于陀螺数据的特征点匹配

该部分对陀螺角速率与图像像面间的映射关系,以及基于 SIFT 算法的特征点检测方法不再赘述,重点介绍一下陀螺数据在特征点匹配中的应用.陀螺数据可解算为图像帧间相对运动的位移量,利用该位移量可以将特征点匹配时的搜索区域限定在一定的范围内,大大降低特征点匹配过程的计算量.本文提出的算法步骤如下:

步骤1 利用 SIFT-Harris 算法检测参考帧和当前帧中的特征点,并记录特征点在图像中的位置坐标;

步骤2 利用参考帧与当前帧所对应的陀螺数据及数据变化量,建立起当前帧中像素点与参考帧中像素点之间的对应关系,并由此初步确定当前帧中的特征点在参考帧中匹配点的位置,同时将该位置作为 SIFT 算法中特征点匹配时搜索区域的中心点;

步骤3 以当前帧某特征点 $C_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{i128})$ 位置为起点,以参考帧中陀螺数据所指示的该特征点的匹配点 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{i128})$ 位置为中心,在其邻域一定大小的搜索区域内查找特征点,本文中取该区域大小为 9×9 . 有下面三种搜索结果:

(1)如果在参考帧的该搜索区域内存在一个特征点,如图 2 所示,则认为该点即为当前帧中特征点的匹配点,计算两点之间的欧式距离,如式(1),保存该欧式距离;

$$d(C_i, R_i) = \sqrt{\sum_{n=1}^{128} (c_{in} - r_{in})^2} \quad (1)$$

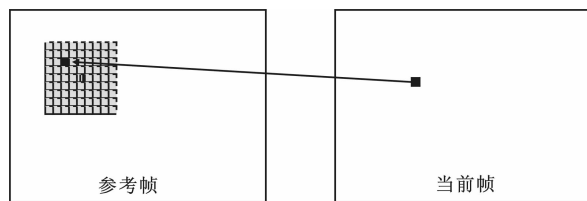


图2 只有一个匹配点

(2)如图 3 所示,如果在参考帧的该搜索区域

内有两个或两个以上的特征点,则计算并比较当前帧的特征点与参考帧中该区域内的所有特征点之间的欧式距离,将欧式距离最小的点认定为匹配点,保存该欧式距离,如式(2)所示。

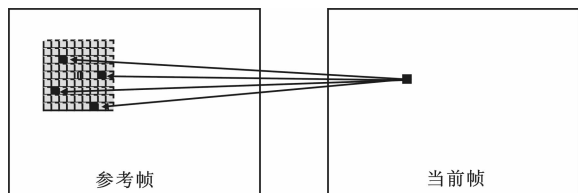


图3 多个匹配点

$$d = \min[d(C_i, R_i)] = \sqrt{\sum_{n=1}^{128} (c_{in} - r_{in})^2} \quad (2)$$

(3)如图4所示,如果在参考帧的该搜索区域内没有特征点,则认为当前帧中的特征点在参考帧搜索区域中没有匹配点,所以放弃当前帧中的该特征点,不再对其进行特征点匹配,继续对下一个特征点进行搜索。

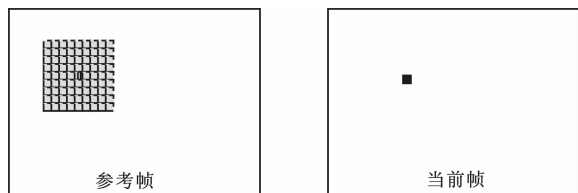


图4 没有匹配点

步骤4 遍历当前帧中所有特征点,搜索其在参考帧中的匹配点,并保存匹配点对之间的欧式距离;将所有的欧式距离按照从小到大的顺序进行排序,选择欧式距离最小的3对非共线匹配点计算仿射变换矩阵。仿射变换矩阵的求取如下所示。

(1)首先建立仿射变换模型:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

(2)将3对匹配点 (x_1, y_1) 与 (x'_1, y'_1) 、 (x_2, y_2) 与 (x'_2, y'_2) 、 (x_3, y_3) 与 (x'_3, y'_3) 带入上式,并写为线性方程组矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ x'_2 \\ y'_2 \\ x'_3 \\ y'_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

(3)解上面的矩阵方程,计算出仿射变换矩阵参数 $a_1 \sim a_6$ 。

步骤5 计算出变换矩阵后,利用该矩阵将当前帧向参考帧补偿,并将补偿后的当前帧与参考帧进行拼接作为下一帧的参考帧,同时利用参考帧重建稳定的当前帧,依此类推。

4 视觉暂留机制及参考帧更新

由于补偿后的图像中有可能会出现部分区域信息的丢失,而丢失的部分有可能包含一些的重要信息,所以需要利用一定的方法,将丢失的信息补充完整。本节在视觉暂留机制的启发,每一帧稳定的当前帧都通过缓存中参考帧的重建而得到。

4.1 NCC 特征点粗匹配

中央凹是人类视网膜中视觉最敏锐、并且唯一能够实现高精度成像的区域。中央凹覆盖的视角范围大约为2度,而人眼可以成像清晰的视角范围却远远大于该范围,这是因为眼睛有视觉暂留效应。尽管每次采集的图像都很小,但由于大脑视觉皮层形成的视觉形象能够保留一段时间,随着眼球的不断移动将中央凹成像的高精度图像通过视觉系统拼接起来,所以人类视觉系统可以形成远大于中央凹视角范围的清晰稳定并不断刷新的图像。

4.2 参考帧更新

在摄像机保持不动的固定视角拍摄时,一般选择固定帧为参考帧;而在摄像机做缓慢扫描运动的情况下,通常选择相邻的前一帧为参考帧。

以固定帧为参考帧的补偿模型中,当前帧与参考帧之间的运动主要是由环境或系统自身的扰动导致的,这种情况下的稳像模型比较简单,可选择4参数的相似变换模型或6参数的仿射变换模型。如果以第1帧图像 I_1 作为固定的参考帧,那么后面的所有图像都是以第1帧为参考进行帧间运动估计,并实现向该固定帧的配准。那么第 n 帧图像 I_n 与第1帧图像 I_1 之间的关系可表示为

$$I_n = \mathbf{R} \times I_1 \quad (5)$$

式中, $\mathbf{R}$ 代表两帧之间的变换矩阵,这种以固定帧为参考帧的补偿方式中,不存在每帧图像补偿过程中误差的传递和放大,但由于光照的变化以及前景物体的运动,实际摄像系统中场景也是在变化的,这样也会导致固定参考帧方式中产生误差。

选择相邻的前一帧作为参考帧的情况下,如果以第 n 帧图像 I_n 为当前帧,补偿后的第 $n-1$ 帧图像 I_{n-1} 为参考帧,两帧之间的变换模型为 $\mathbf{R}_{n-1}$,则当前

帧 I_n 与参考帧 I_{n-1} 之间的关系可表示为

$$I_n = R_{n-1} \times I_{n-1} \quad (6)$$

如果第1帧图像 I_1 为原始的参考帧,那么 I_n 与 I_1 之间的关系为

$$I_n = R_{n-1} \times I_{n-1} = R_{n-1} \times R_{n-2} \cdots \times R_1 \times I_1 \quad (7)$$

由上式可以看出,每一帧当前帧都是第1帧与之前各帧图像帧间运动参数矩阵的累计乘积,这样带来的后果就是,如果在这个过程中有一帧图像出现较大的误差,那么这一误差将会通过乘积向后面传递下去,导致后面的图像出现更大的误差。

以上两种参考帧选择的共同点就是必须保证相邻的两帧之间有足够大的重叠区域,但在导弹的高动态飞行过程中,弹体突然的剧烈抖动极有可能导致图像序列中相邻两帧之间的重合区域较少;另外,经稳定后的图像可能会出现部分区域的丢失,导致图像信息的完整性遭到破坏,严重影响后期目标跟踪的效果。所以为了保证相邻帧之间重合区域足够大并保证图像信息的完整性,本文模拟人类的视觉暂留效应,利用了连续图像的不断拼接并缓存的参考帧动态更新技术,将每一帧当前帧都与缓存中的参考帧进行匹配,并拼接成参考帧中以其进行更新,同时将拼接后的图像保存在缓存中作为后面图像的参考帧,而稳定的当前帧通过参考帧的重建得到。通过这种连续不断的拼接和缓存,实现参考帧的不断更新。参考帧更新模型如图5所示,整帧图像即为缓存中的参考帧,而阴影部分是输出的稳定当前帧。

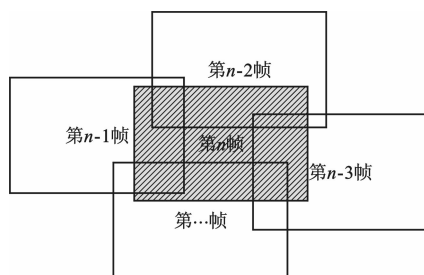


图5 参考帧更新模型

利用该参考帧更新方法可以有效地解决以上两种补偿方式中存在的问题。首先选定某一帧为参考帧,并从该帧开始进行帧间的运动估计,该参考帧相邻的下一帧相对于该参考帧进行补偿,将补偿后的当前帧与参考帧进行图像拼接并放入缓存中作为下一帧图像的参考帧。这种方式在保证参考帧信息量充足的同时,实现了参考帧的不断更新,可以最大限度的保证参考帧与当前帧进行匹配时有足够的重合

区域,提高了匹配的成功率,同时利用更新后的参考帧对稳定的当前帧进行重建。参考帧更新的表达式如下

$$I'_{\text{cache}} = I_{\text{cache}}(Lo) + R \times I_c \quad (8)$$

式中, I'_{cache} 和 I_{cache} 分别代表更新后和更新前的参考帧; Lo 代表当前帧补偿后信息丢失的区域,即与参考帧不重合的区域; R 代表对当前帧进行运动补偿的变换参数矩阵; I_c 代表补偿前的当前帧。同时考虑到在补偿的过程中可能会偶尔出现当前帧补偿后图像质量较差的情况,所以对参考帧的更新设定了一个判定条件:当稳定后当前帧的 PSNR 值大于设定的阈值时,证明该帧图像的质量较高,可用其与参考帧拼接后的图像更新参考帧,否则,保留拼接前的参考帧。

利用该参考帧更新方法在保证稳定后图像信息完整性的同时,也保证了下一帧匹配时图像之间有足够的匹配重合区域。该方法的应用可以有效提升特征匹配时的可靠性及匹配精度,增强运动估计的精确性,保证图像稳定的效果。

5 实验结果与分析

为了测试所提出的方法的稳像能力,将实验分为两个部分:第一部分利用第二章实验中的三组图像对复合式稳像方法的稳像能力进行测试,比较其与传感器稳像方法和 SIFT 稳像方法的稳像精度及单帧平均处理时间。然后利用一段抖动视频序列同时对传感器稳像方法、SIFT 稳像方法和复合式稳像方法进行测试,并比较测试结果。其中,稳像精度的比较仍然通过计算稳定后相邻两帧间的 PSNR 值。

5.1 复合式稳像方法的稳像能力测试

(1) 偏航角变化较大,俯仰角和滚转角变化较小

利用复合式稳像方法,对图6中的(a1)、(a2)、(a3)和(a4)进行稳像处理。其中(a1)、(b1)和(c1)为同一帧图像,(b2)、(b3)和(b4)为复合式稳像方法中未采用参考帧更新机制的逐帧补偿结果;(c2)、(c3)和(c4)为采用参考帧更新机制的逐帧补偿结果。

对复合式稳像方法中未采用参考帧更新机制的逐帧补偿结果及采用参考帧更新机制的逐帧补偿结果分别计算 PSNR 值,如表1所示。

表1 PSNR 值比较

第 a2 帧	第 a3 帧	第 a4 帧
--------	--------	--------

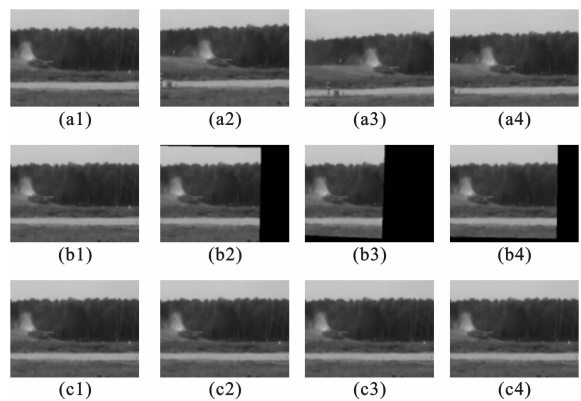


图 6 偏航角变化较大的稳像结果

未更新参考帧	10.927 2	12.017 7	12.013 2
更新参考帧	45.622 0	48.376 4	46.423 1

(2) 俯仰角变化较大,偏航角和滚转角变化较小

利用复合式稳像方法,对图 7 中的(a1)、(a2)、(a3)和(a4)进行稳像处理. 其中(a1)、(b1)和(c1)为同一帧图像,(b2)、(b3)和(b4)为复合式稳像方法中未采用参考帧更新机制的逐帧补偿结果;(c2)、(c3)和(c4)为采用参考帧更新机制的逐帧补偿结果.

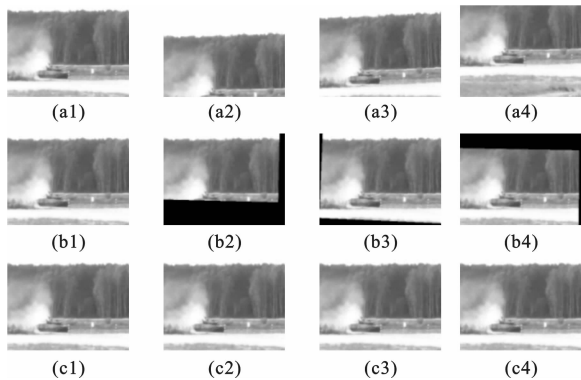


图 7 俯仰角变化较大的稳像结果

对复合式稳像方法中未采用参考帧更新机制的逐帧补偿结果及采用参考帧更新机制的逐帧补偿结果分别计算 PSNR 值,如表 2 所示.

表 2 PSNR 值比较			
	第 a2 帧	第 a3 帧	第 a4 帧
拼接前	7.362 7	8.023 1	9.013 4
拼接后	44.901 6	46.302 6	44.107 5

(3) 滚转角变化较大,俯仰角和偏航角变化较小

利用复合式稳像方法,对图 8 中的(a1)、(a2)、

(a3)和(a4)进行稳像处理. 其中(a1)、(b1)和(c1)为同一帧图像,(b2)、(b3)和(b4)为复合式稳像方法中未采用参考帧更新机制的逐帧补偿结果;(c2)、(c3)和(c4)为采用参考帧更新机制的逐帧补偿结果.

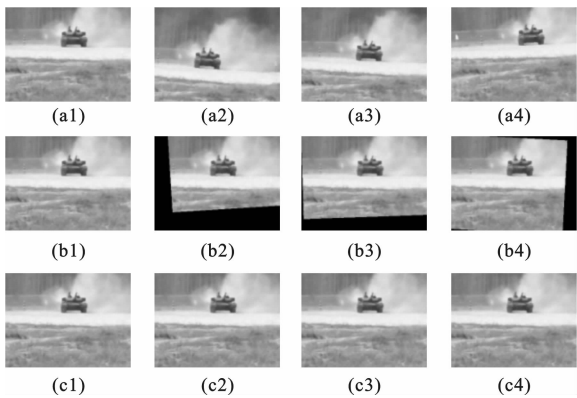


图 8 滚转角变化较大的稳像结果

分别计算未采用参考帧更新及采用参考帧更新机制的逐帧补偿结果的 PSNR 值,如表 3 所示.

表 3 PSNR 值比较			
	第 a2 帧	第 a3 帧	第 a4 帧
拼接前	9.361 2	12.012 1	10.136 2
拼接后	46.002 1	44.967 5	45.106 9

5.2 抖动视频序列测试

该部分采用一段航拍抖动视频序列对三种稳像方法进行测试. 通过分别计算稳像后的连续 100 帧图像序列中每两帧之间的 PSNR 值来比较三种方法的稳像精度,结果曲线如图 9 所示.

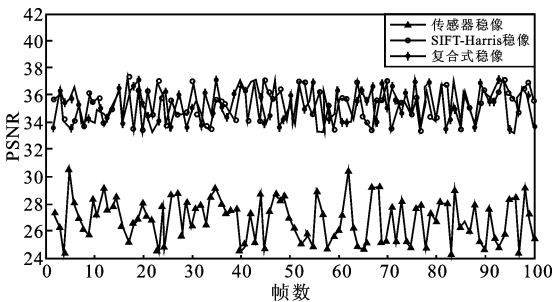


图 9 峰值信噪比实验结果

由图 9 可以直观地看出在这段抖动视频序列中,复合式稳像方法中的 PSNR 值折线几乎与 SIFT 稳像方法的折线相差很小,均高于传感器稳像方法.

同时,为了比较三种稳像方法的运行速度,表 4 给出了以上四组实验中,三种方法的单帧平均处理时间对比. 由表 4 可以看出 SIFT 算法的单帧平均处

理时间最长,并且远高于传感器稳像方法,几乎不能满足捷联图像导引系统对实时性的要求;传感器稳像方法中的平均处理时间最短,而复合式稳像方法的单帧平均处理时间介于二者之间,相对 SIFT 算法下降了大约 1/3,尽管仍远高于传感器稳像方法,但其在捷联导引系统强大的并行 DSP + FPGA 硬件平台上,可满足实时性要求。

表4 单帧平均处理时间 ms

	传感器稳像	SIFT 稳像	复合式稳像
第一组实验	14.541	143.585	96.012
第二组实验	15.344	153.750	100.628
第三组实验	14.836	141.499	93.317
抖动视频	16.131	146.356	96.566

6 结束语

本文结合传感器稳像方法与 SIFT 数字稳像算法各自的优势,提出了一种实时高精度的复合式传感器数字稳像方法.利用 SIFT 算法检测图像中的特征点,并在特征点匹配部分将陀螺数据解算出的像面位移量所指向的匹配点位置作为特征点匹配时的初始搜索位置,指示当前帧在参考帧中以该匹配点位置为中心的一定大小矩形区域内搜索匹配特征点;利用欧式距离最短的几对匹配点在仿射变换模型下计算出帧间变换矩阵,通过基于视觉暂留机制的参考帧更新方法,对每一幅当前帧图像进行重建,完成视频序列的复合式稳像.实验结果表明,在稳像精度上,复合式稳像方法与 SIFT 算法几乎相同,均高于传感器稳像方法;在计算耗时上,复合式稳像高于传感器稳像方法,但相对 SIFT 稳像算法大幅下降,并且在捷联图像导引系统的硬件平台上能够达到实时性的要求.因此,本文提出的复合式稳像是一种实时、高精度的稳像方法,可满足捷联图像导引系统对稳像精度及实时性的要求。

参考文献:

[1] 王鹏,赵跃进,孔令琴,等.改进块匹配宏块的快速传感器电子稳像方法[J].光子学报,2012,41(9):1065-1070.

[2] Zhang Yongxiang, Zhang Weiqong, Zhao Xiaoyu, et al. Study on electronic image stabilization system based on mems gyro [C]// Proceeing of International Conference on Electronic Computer Technology. Singapore, 2009: 641-643.

[3] Wang Peng, Zhao Yuejin, Dong Liquan, et al. A novel small area fast block matching algorithm based on high-accuracy gyro in digital image stabilization [C]// Proceedings of the SPIE Conference. San Diego, 2010: 78501A-1-11.

[4] Yao Shen, Parthasarathy Guturu, Thyagaraju Damarla. Video stabilization using principal component analysis and scale invariant feature transform in particle filter framework[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(3): 1714-1721.

[5] 郭晓冉,崔少辉.局部特征点的鲁棒性数字稳像[J].光电工程,2013,40(5):106-112.

[6] Junlan Yang, Dan Schonfeld, Magdi Mohamed. Robust video stabilization based on particle filter tracking of projected camera motion[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2009, 19(7): 945-954.

[7] 郭晓冉,崔少辉.透视变换模型的 Harris 图像配准[J].微电子学与计算机,2014,31(4):18-22.

作者简介:

方丹男,(1979-),博士,讲师.研究方向为电子稳像、目标检测、识别与跟踪技术.

郭晓冉(通讯作者)男,(1985-),博士研究生.研究方向为电子稳像、目标检测与跟踪技术.

E-mail:vip850522@163.com.

(上接第49页)

作者简介:

谢勇男,(1990-),硕士研究生.研究方向为模拟/射频集成电路设计. E-mail:xieyong@ime.ac.cn.

来强涛男,(1981-),助理研究员.研究方向为模拟/射频集成电路设计.

陈华男,(1984-),博士研究生.研究方向为模拟/射频

集成电路设计.

姜宇男,(1983-),助理研究员.研究方向为模拟/射频集成电路设计.

郭桂良男,(1981-),副研究员.研究方向为模拟/射频集成电路设计.

阎跃鹏男,(1963-),研究员.研究方向为微波/射频集成系统.