

基于仿射投影的弹载图像几何失真校正方法

岳冬雪 黄新生 谭红力

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,长沙 410073)

摘要 针对图像末制导系统中,由弹体姿态变化引起的图像几何失真,提出了一种新的弹载图像几何失真的校正方法,并首先根据仿射投影不改变目标平行结构的特性,提出了以仿射投影图像为目标进行校正的思想;然后根据弹载摄像机成像特点,推导出了目标透视投影和仿射投影与弹体俯仰角之间的函数关系;最后利用该函数关系,通过合理的坐标系设置,结合惯导和图像信息来求得目标的校正图像。仿真实验结果表明,该方法能有效地校正由弹体姿态引起的图像几何失真,不仅有利于目标的精确定位,而且对惯导误差也不敏感,计算量也较小。

关键词 仿射投影 几何失真 弹载图像 图像末制导

中图法分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2009)04-0663-06

Geometric Distortion Correction of Missile-borne Image Based on Affine Projection

YUE Dong-xue, HUANG Xin-sheng, TAN Hong-li

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract In image-aided terminal inertial guidance system geometric distortion is induced in missile-borne image with varying missile attitude. The affine projection maintains the parallel structure of the objects, on which a method of geometric distortion correction of missile-borne image is proposed, and the affine projection is applied to the terminal corrected images. The function of the perspective target and its affine projection with the missile pitch is deduced based on the perspective geometry character of the missile-borne camera. That is used to achieve the terminal corrected image using the integrated information of the inertial navigation system (INS) and image by setting appropriate reference frames of the two systems. The results of simulation demonstrate that the method proposed is feasible to correct the geometric distortion induced by the missile attitude and increase the object position accuracy. Furthermore, the method is not sensitive to the INS error and consumes little time.

Keywords affine projection, geometric distortion, missile-borne image, image-aided terminal navigation

1 引言

弹载摄像机成像过程中,随着弹体与地面目标的距离逐渐减小,弹体姿态会发生变化,而且由于外界风干扰或控制系统的不稳定性也都会引起弹体姿态的急剧变化。而弹体姿态的变化则会引起弹载摄

像机对地面目标成像的几何失真。图像的变形不利于利用几何结构特征识别目标和精确地定位目标(如图像中目标的形心不再是实际目标形心的投影)。由于规则的几何结构是机场跑道等人造建筑物的重要特征,而识别过程中最关心的是目标图像的结构变形,因此,在图像末制导系统中,为了准确地识别目标和精确地定位目标,需要对弹载图像进

基金项目:兵器预研基金项目(402050302)

收稿日期:2007-07-19;改回日期:2008-01-08

第一作者简介:岳冬雪(1978~),女。现为国防科技大学控制科学与工程专业博士研究生。主要研究方向为图像制导技术、模式识别、图像质量评价等。E-mail:ydx315@126.com

行几何校正。

由于弹体的速度、姿态变化很快,传统的应用于遥感图像的基于地面标志物的多项式几何失真校正方法不再适用^[1]。Makisara 等人通过对飞行器轨迹进行建模来校正机载图像^[1-2],即先由 GPS 信息推导飞行器的飞行轨迹,再根据中心透视投影将载机上的原始图像数据映射到地面,然后利用特征点的位置来校正图像,再由地面控制点(GCP)对图像进行精校正。根据载机的飞行特点及雷达成像的几何关系,对机载 SAR 图像几何失真进行校正的方法也有一些研究^[3-5]。仿射投影^[6-10]由于计算简单,且对透视投影具有良好的近似特性,因此在物体运动及结构特征的估计中得到了广泛的应用。弹体姿态变化引起了图像中各点分辨率的不同是造成图像几何失真的主要原因。本文基于仿射投影具有不改变物体平行结构的特性,结合惯导和图像信息,提出了一种新的弹载图像几何失真的校正方法。

2 投影变换

2.1 中心透视投影

在图像末制导系统中,为了进行制导系统和视觉系统的空间对准,可取制导系统的发射坐标系(北天东, g 系, g 代表 ground)作为摄像机的世界坐标系。摄像机置于弹体顶端并与弹体固联,其光轴与弹体滚动轴方向一致。为了简化计算,可将弹体坐标系(b 系)和摄像机坐标系(c 系)的原点都取在摄像机的光心 O 处(如图 1 所示),弹体坐标系的 3 个轴分别为滚动轴 Ox_b 向前、偏航轴 Oy_b 向上和俯仰轴 Oz_b 向右;摄像机坐标系的 3 个轴 Ox_c 、 Oy_c 和 Oz_c 分别与弹体坐标系的 Oy_b 、 Oz_b 和 Ox_b 轴重合。发射坐标系到弹体坐标系的转换顺序为 2-3-1,相应的欧拉角为偏航角 α 、俯仰角 β 和滚动角 γ 。成像平面坐标系(i 系)的原点为光轴与成像平面的交点 O_i ,其 x 、 y 轴分别平行于摄像机坐标系的 Ox_c 和 Oy_c 轴。如图 1 所示,发射坐标系中任意一点 P 在像平面 I 中的投影,即成像坐标系中点 p 的坐标可由透视投影的小孔成像模型求得

$$\begin{cases} x = (u - u_0) d_x = f x_c / z_c \\ y = (v - v_0) d_y = f y_c / z_c \end{cases} \quad (1)$$

其中, (u_0, v_0) , (u, v) 分别为成像平面坐标系原点 O_i 和像素点 p 的坐标, d_x 、 d_y 为像素点的 x 方向和 y 方向的间距, f 为摄像机焦距, (x_c, y_c, z_c) 为空间点

P 在摄像机坐标系中的坐标,其可由发射坐标系中的弹体位置 O_g 和空间点 P 的世界坐标系的位置 P_g 以及发射坐标系到摄像机坐标系的转换矩阵 R 表示,即

$$\begin{aligned} P_c &= [x_c \quad y_c \quad z_c]^T = R(P_g - O_g) \quad (2) \\ R &= \begin{bmatrix} -a_1 b_2 c_1 + a_2 c_2 & b_1 c_1 & a_2 b_2 c_1 + a_1 c_2 \\ a_1 b_2 c_2 + a_2 c_1 & -b_1 c_2 & -a_2 b_2 c_2 + a_1 c_1 \\ a_1 b_1 & b_2 & -a_2 b_1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中, $a_1 = \cos\alpha$, $a_2 = \sin\alpha$, $b_1 = \cos\beta$, $b_2 = \sin\beta$, $c_1 = \cos\gamma$, $c_2 = \sin\gamma$ 。

为了方便计算,取规一化像素坐标,即令 $f = 1$,则由式(1)可知,像点 p 的坐标为

$$x = x_c / z_c, \quad y = y_c / z_c \quad (3)$$

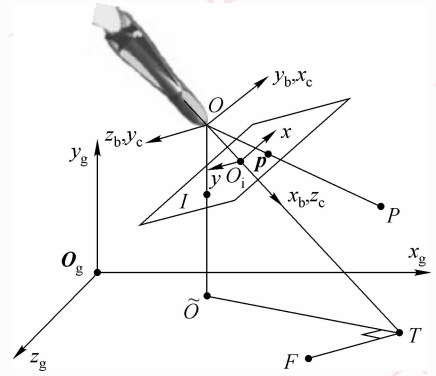


图 1 笛卡儿参考坐标系

Fig. 1 Cartesian coordinate reference frames

2.2 仿射投影

由于透视投影可以理解成投影光束是从某一点(即摄像机光心)发出的^[9-10],因此透视投影也称为中心投影。而对于仿射投影,其投影光束则是平行的,并包含比例缩放变换。

根据投影光束方向以及全局比例缩放系数的不同,有正射投影、弱透视投影和平行透视投影 3 种典型的仿射投影模型。如果投影光束平行于摄像机光轴,且没有比例缩放,则为正射投影模型;如果比例缩放系数不为 1,则为弱透视投影模型;如果投影光束平行于摄像机光心与目标形心的连线,则为平行透视投影模型。

如图 2 所示, Oz 轴为摄像机光轴, I 为实际图像平面。 P 为目标上的某一特征点, G 为由所有特征点组成的目标的形心, \tilde{I} 为通过形心 G , 且平行于 I 的平面,即目标的近似平面,则 PO 与平面 I 的交点 p 为透视投影点;过点 P 作直线平行于 OG , 且交目

标的近似平面 \tilde{I} 于点 P_1 , 则 OP_1 与平面 I 的交点 p_1 为平行透视投影点; 过点 P 作直线平行于 Oz_c , 且交目标的近似平面 \tilde{I} 于点 P_2 , 则 OP_2 与平面 I 的交点 \tilde{p} 为弱透视投影点。 PP_2 的延长线与平面 I 的交点 p_2 为正投影点。

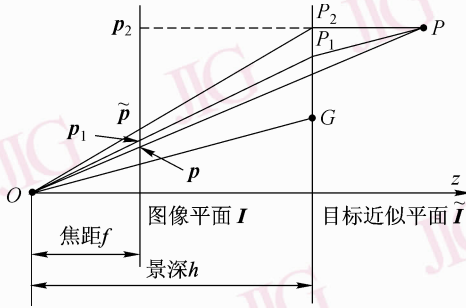


图2 仿射投影与透视投影的关系

Fig. 2 Affine projection and perspective

本文主要应用弱透视投影模型, 由图2可知, 点 P 的弱透视投影点 \tilde{p} 的坐标为

$$\tilde{x} = x_c/h, \tilde{y} = y_c/h \quad (4)$$

其中, (x_c, y_c, z_c) 为点 P 在摄像机坐标系中的坐标, h 为形心 G 的景深(即目标点到成像平面的距离)。

由式(3)、式(4)可知,

$$\frac{\tilde{y}}{\tilde{x}} = \frac{y_c}{x_c} = \frac{y_c/z_c}{x_c/z_c} = \frac{y}{x} \triangleq k \quad (5)$$

上式表明, 同一点 P 的透视投影点 p 与弱透视投影点 \tilde{p} 在像平面上的斜率相等。

3 弹载图像几何失真校正算法

3.1 弹载图像的分辨率

弹载摄像机成像过程中, 弹体与地面目标的距离逐渐减小, 弹体姿态也不断变化。当弹体距目标 2~3 km 时, 可以忽略地球的曲率, 即可认为地面是一水平面。如图1所示, 由于弹体俯仰角的存在, 致使光心 O 在地面的投影点 \tilde{O} 与光轴 Oz_c 与地面的交点 T 两点的景深是不同的, 由中心透视投影模型不难推导出图像中像素点的空间分辨率(即单个像素点代表的空间距离)为

$$l_x = z_c d_x / f, l_y = z_c d_y / f \quad (6)$$

其中, l_x, l_y 分别为图像平面中 x, y 方向的分辨率, z_c 为景深, d_x, d_y 分别为像素 x, y 方向的间距。

由式(6)可知, 图像的空间分辨率与相应目标点的景深成正比, 当景深不同时, 图像中像素点的空

间分辨率也是不同的。如果地面目标的尺寸较大(如机场跑道长 2 000~2 500 m), 当弹体俯仰角不大时, 由于景深的差别较大, 因此会引起图像中目标的严重变形。而在弱透视投影图像中, 由于目标各点的景深都与目标形心点 G (图2所示)的景深相同, 因此弱透视投影图像中各点的分辨率相同, 不会破坏目标规则的平行结构特征。

3.2 校正思想及目标近似平面的选取

弹载图像几何失真校正的思想是: 先利用仿射投影不影响目标的平行线结构特征的特点, 根据弹上惯导系统提供的弹体姿态信息, 将透视投影变换成仿射投影; 然后在仿射投影图像中, 根据规则的几何结构特征来识别目标。

对地面目标上的任意一点 P , 若要求取目标的弱透视投影, 则需要找到目标的形心, 不妨取点 T 作为地面目标的形心(实际上, 点 T 可能并不是目标上的点, 只是作为一个基准点用来确定目标的近似平面)。过点 T , 且平行于弹载摄像机成像平面的平面 \tilde{I} 即为目标的近似平面如图3所示。

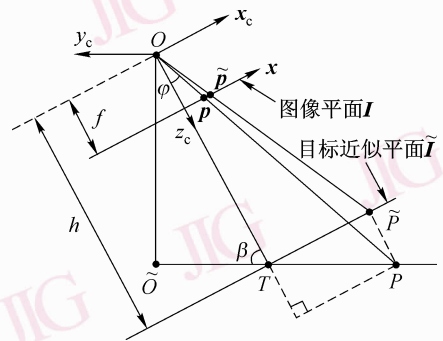


图3 弹载成像截面图

Fig. 3 The section of missile-borne camera perspective

图1中, 设地面上一点 F , 且 TF 垂直于 $\tilde{O}T$ 。

$\therefore TF \in$ 地平面, 则 $O\tilde{O} \perp TF$

又 $\therefore TF \perp \tilde{O}T$, 且 $\tilde{O}T$ 与 $O\tilde{O}$ 交于点 \tilde{O} (7)

$\therefore TF \perp$ 面 $O\tilde{O}T$

如果不考虑弹体滚动的情况, 则发射坐标系到弹体坐标系的转换为: 先绕竖直的 Oy_g 旋转 α 角, 即可得到弹体坐标系的 Oz_b 轴; 再绕 Oz_b 轴旋转 β 角即可得到弹体坐标系。由此可看出, 在旋转过程中, 若 Oz_b 轴(即为摄像机坐标系的 Oy_c 轴)始终在水平面内, 则 Oy_c 垂直于 $O\tilde{O}$; 再由摄像机坐标系的3个轴之间的正交关系可知, Oy_c 垂直于 Oz_c (即 OT),

即有

$$\begin{aligned} & \because O_{y_c} \perp O\tilde{O} \\ & \text{又} \because O_{y_c} \perp OT, \text{且 } OT \text{ 与 } O\tilde{O} \text{ 交于点 } O \quad (8) \\ & \therefore O_{y_c} \perp \text{面 } O\tilde{O}T \end{aligned}$$

由式(7)、式(8)可知,由于 TF 平行于 O_{y_c} 轴,即 TF 平行于 $Ox_c y_c$ 平面,因此 TF 上各点的景深相等。再根据摄像机坐标系和图像平面坐标系的转换关系可知, TF 的投影为图像中的 O_y 轴,即在弹体没有滚动的情况下,图像中 x 轴坐标相等的像点的空间分辨率是相等的。

3.3 弹载图像几何失真校正算法

弹载摄像机坐标系 x 轴方向的成像关系如图 3 所示,在 $\triangle OTP$ 中,由三角正弦公式可知

$$\frac{OP}{\sin(\pi - \beta)} = \frac{h}{\sin(\beta - \varphi)} \Rightarrow OP = \frac{h \sin \beta}{\sin(\beta - \varphi)} \quad (9)$$

其中, β 为弹体的俯仰角, φ 为摄像机 x 轴方向上点 P 与光轴 OT 的夹角,点 P 在摄像机坐标系中的坐标 P_c 为

$$x_c = T\tilde{P} = OP \sin \varphi, z_c = OP \cos \varphi \quad (10)$$

由式(3)可得空间点 P 的像点 p 的 x 轴坐标为

$$x = x_c / z_c = \tan \varphi \quad (11)$$

将式(9)、式(10)代入式(4),可得空间点 P 的弱透视投影像点 \tilde{p} 的 x 轴坐标为

$$\tilde{x} = \frac{x_c}{h} = \frac{\sin \beta \sin \varphi}{\sin(\beta - \varphi)} \quad (12)$$

整理上式,并将式(11) $x = \tan \varphi$ 代入,即可得如下特征点的透视投影和弱透视投影与弹体俯仰角的函数关系:

$$\tilde{x} = \frac{x}{1 - x \operatorname{ctg} \beta} \quad (13)$$

若 $x \neq 0$,即像点不在像平面的 y 轴上,则 $\tilde{x} \neq 0$,由式(5)可得

$$\tilde{y} = k\tilde{x} \quad (14)$$

若 $x = 0$,即像点在像平面的 y 轴上,则

$$\tilde{x} = 0, \tilde{y} = y \quad (15)$$

综上所述,由弹载图像及弹上惯导提供的弹体姿态信息计算相应仿射校正图像的步骤如下:

(1) 首先判断弹载图像中的特征点 (x, y) 是否在像平面的 y 轴上(即 x 是否为 0)。若 $x = 0$,则由式(15)计算相应的仿射投影点 (\tilde{x}, \tilde{y}) ; 否则,转到步骤 2;

(2) 根据式(5),由弹载图像点 (x, y) 计算仿射

投影图像中的特征点 (\tilde{x}, \tilde{y}) 的斜率 k ;

(3) 由惯导系统给出的弹体俯仰角 β 及弹载图像点 x , 根据式(13)计算相应的仿射投影 \tilde{x} ;

(4) 由式(14)计算仿射投影的 y 方向坐标 \tilde{y} 。

以上是针对弹体无滚动时的情况,当弹体存在滚动时(滚动角为 γ),则必须对特征点 (x^γ, y^γ) 进行反向滚动变换,先得到无滚动时的像点 (x, y) ,再根据上面的方法计算校正后的像点 (\tilde{x}, \tilde{y}) ,最后通过对校正后的特征点进行滚动变换来得到有弹体滚动时校正后的特征点 $(\tilde{x}^\gamma, \tilde{y}^\gamma)$ 。滚动变换及反向滚动变换的转换矩阵如下:

$$\begin{aligned} M_3 &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \\ \tilde{M}_3 &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \end{aligned}$$

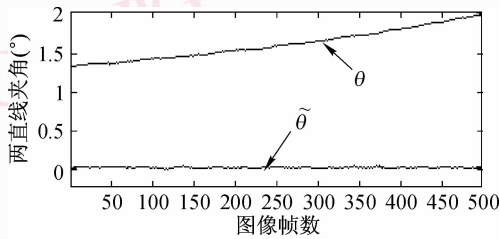
由上面的分析可以看出,本文校正算法只用到了弹上惯导系统提供的弹体俯仰角信息,算法比较简单。若对整个图像逐点进行校正,则会增加计算开销,而实际应用中,可以只对感兴趣的目标区域的特征点进行校正,例如在进行跑道目标的识别中,可以只对跑道的 4 个端点进行校正,然后依次连接 4 个端点即可得到跑道的 4 条边缘线,由于如此增加的计算量是很小的,因此不会为跑道的目标识别带来计算负担,而影响系统的实时性能。

4 仿真实验

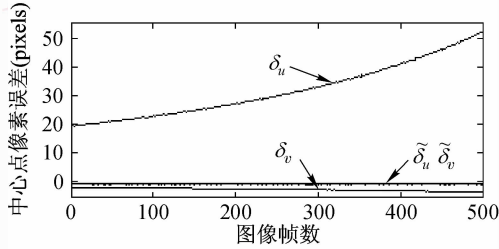
仿真实验是对弹体从某一设定高度,以一定的距离攻击地面机场的跑道中心的弹道图像进行校正,拍摄图像时摄像机与弹体固联,摄像机视角为 30° ,坐标系的设置如图 1 所示。实验时,首先利用 Matlab 六自由度弹道仿真程序生成弹体位置、姿态数据;然后由该数据根据中心透视投影模型生成 512×512 pixels 的机场跑道序列图像(由跑道的 4 个端点确定);最后利用跑道两长边缘的平行性(两长边缘直线之间的夹角)及图像中检测到的跑道中心点与实际中心点投影的像素误差作为指标参数来评价校正算法的性能。为了“看清”跑道目标并保证跑道端点落在弹载摄像机视野范围内,本文选取距离目标 3.7 ~ 2.4 km 之间的数据做实验。

实验 1 该实验是在无弹体姿态误差时,对校正前后图像中跑道目标的变形情况进行比较,其比较结果如图 4 所示。图 4 中 x 轴方向为图像帧数,

随着图像帧数的增加,摄像机到地面目标的距离逐渐减小,弹载图像的分辨率逐渐提高。



(a) 校正前后图像中两边缘直线的夹角



(b) 校正前后图像中检测到的中心点像素误差

图4 校正前后图像中跑道的平行性及中心点像素误差

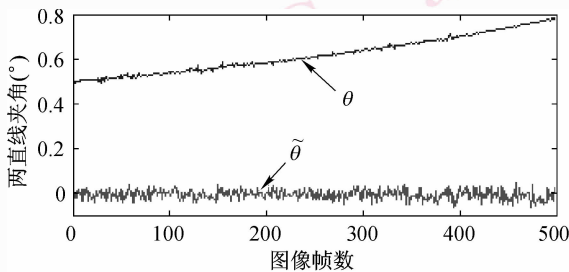
Fig. 4 The parallels and errors of the runway center in perspective and corrected images

实验表明,弹体顺着跑道方向接近目标时,弹载图像中跑道两长边缘线之间的夹角最大,即跑道的变形最严重(如图4所示)。由图4(a)、图4(b)可

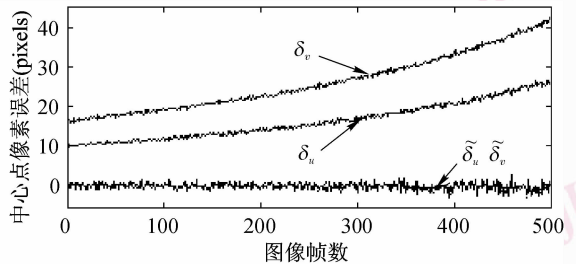
以看出,校正前弹载图像中跑道两长边缘线之间的夹角 θ 较大,并且越接近目标夹角越大;图像中检测到的跑道中心点与实际跑道中心像点之间的位置误差 δ_u, δ_v 较大(顺着跑道时, u 方向的误差 δ_u 最大),且 δ_u 随着弹体与目标距离的减小急剧增大。而校正后,若跑道两边缘直线的夹角 $\tilde{\theta}$ 小于 0.05° ,则可以认为是计算噪声,不会影响目标的识别;而且在校正图像中检测到的跑道中心点的位置误差 $\tilde{\delta}_u, \tilde{\delta}_v$ 均小于 0.5 pixel 。因此,本文方法能有效地校正跑道的图像变形,使目标的定位更精确。

实验2 该实验是为了验证在弹体姿态存在误差时,校正算法是否鲁棒,其校正结果如图5所示。

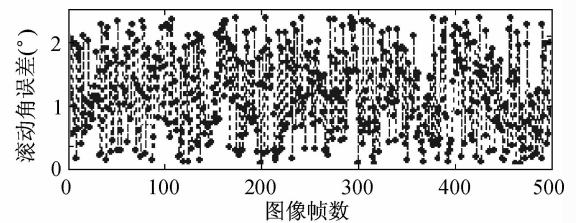
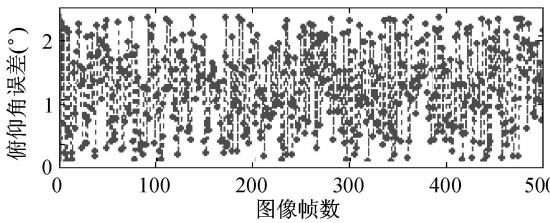
图5给出的是弹体攻击方向与跑道的长边缘成 45° 角的情况。通过比较图4(a)、图5(a)和图4(b)、图5(b)4幅图像可知,跑道两边缘直线夹角 θ 及中心点的 u 方向的误差 δ_u 有所减小,而中心点的 v 方向的误差 δ_v 却增大了许多,并且由于滚动角的影响,使 $\theta, \delta_u, \delta_v$ 有一定的振动。实验表明,弹体俯仰角的姿态误差对校正结果的影响较大,而滚动角误差的影响则较小。实验2中,弹体的俯仰角和滚动角的姿态误差如图5(c)所示,在末制导系统中, 2° 的姿态误差是很容易满足的。由图5(a)、图5(b)两幅图像可以看出,校正后的图像中,跑道



(a) 校正前后图像中两边缘直线的夹角



(b) 校正前后图像中检测到的中心点像素误差



(c) 弹体俯仰角和滚动角误差

图5 弹体姿态有误差时校正前后图像的平行性及中心点像素误差

Fig. 5 The parallels and errors of the runway center in perspective and weak perspective images as the attitude errors of missile is introduced

两长边缘直线的夹角 $\tilde{\theta}$ 小于 0.07° , $\tilde{\delta}_u, \tilde{\delta}_v$ 均小于 3 pixels。与没有误差时的跑道方向、中心点位置(如图 4(a)、图 4(b)两图所示)相比,误差虽有所增大,但与校正前的跑道方向、中心点位置相比,其误差很小,仍可以认为是计算噪声。由此可见,校正算法对弹体姿态误差不敏感,具有鲁棒性。

实验 3 该实验是为了考察校正算法的计算时间。对实验 1 所用的同一组弹道数据用算法循环计算 20 次,每次 499 幅图像,平均每帧图像的计算时间如图 6 所示,其中 t_1 、 t_2 和 t_3 分别为图像生成、跑道边缘直线参数和特征点检测以及图像校正和目标检测所用的时间。为了减小直线端点量化误差的影响,可利用文献[10]中的方法选取每条直线端点处的 20 个特征点做校正。由图 6 可以看出,与目标特征点的识别相比,校正所用的时间是很少的,不会为目标识别带来计算负担。

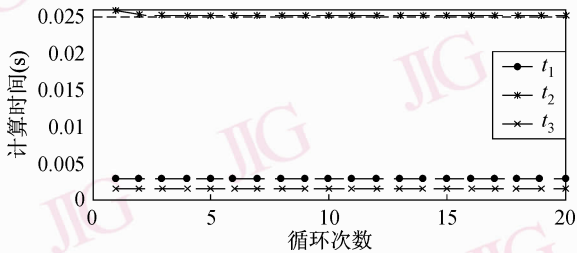


图 6 每帧图像的计算时间

Fig. 6 The time consumed of each image

5 结 论

弹载成像系统中,由于弹体姿态的变化,导致摄像机光轴与地面的夹角不断变化,从而造成地面目标图像中像点空间分辨率的不同,因此容易产生目标的几何失真。以机场跑道目标为例,由于仿射投影作为校正目标图像可以保留目标的平行结构特征,因此便于目标识别。根据透视和仿射投影模型,推导出两种投影图像中的特征点具有相同的斜率,且特征点的坐标与弹体倾角存在某一函数关系。利用该函数关系即可由弹体姿态及弹载图像来求得相应的仿射校正图像。仿真实验表明,本文方法能有效地校正弹体姿态引起的图像几何失真,其不仅有利于目标的精确定位,而且对弹体姿态误差不敏感,

具有鲁棒性,由于计算量较小,因此也不会影响目标识别的实时性。

参考文献 (References)

- 1 Makisara Kai, Lohi Anssi, Karna Juha-petri. A system for geometric and radiometric correction of airborne imaging spectrometer data[A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C], Pasadena, CA, USA, 1994: 1503-1505.
- 2 Makisara Kai, Karna Juha-petri, Lohi Anssi. Geometric correction of airborne imaging spectrometer data[A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Pasadena, CA, USA, 1994: 851-853.
- 3 Lauknes I, Johnsen H, Guneriusen T. Geometric and radiometric calibration of synthetic aperture radar images acquired in alpine regions- spaceborne and airborne [A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Seattle, WA, USA, 1998: 1134-1136.
- 4 Li Yong, Zhu Dai-yin, Zhu Zhao-da. Geometric distortion correction in the subaperture processing for high squint airborne SAR imaging [A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Anchorage, AK, USA, 2004: 3919-3922.
- 5 Yu Gen-miao, Deng Hai-tao, Wu Shun-jun. Method for geometric distortion correction of missile-borne SAR [J]. Journal of Xidian University, 2006, **33**(3): 386-389. [俞根苗, 邓海涛, 吴顺军. 弹载 SAR 图像几何失真校正方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2006, **33**(3): 386-389.]
- 6 Li Wen-jing, Lee Tong. Image registration and object recognition by affine invariant matching [A]. In: Proceedings of International Symposium on Intelligent Multimedia, Video and Speech Processing [C], Hong Kong, China, 2001: 56-59.
- 7 Chetverikov Dmitry, Hajder Levente. Robust structure from motion under weak perspective[A]. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission [C], Thessaloniki, Greece, 2004: 828-835.
- 8 Hagege Rami, Francos Joseph. Parametric estimation of two dimensional affine transformations[A]. In: Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing [C], Montreal, Canada, 2004: 305-308.
- 9 Horaud Radu, Christy Stephane, Dornaika Fadi. Object pose: The Link Between Weak Perspective, Para Perspective, and Full Perspective[R]. Rapport de Recherche No 2356, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, France, 1994.
- 10 Yue Dong-xue, Huang Xin-sheng. Method of line detection based on improved multiresolution Hough transform[J]. Computer Simulation, 2006, **23**(9): 76-79. [岳冬雪, 黄新生. 基于改进的多分辨率 Hough 变换的直线检测方法[J]. 计算机仿真, 2006, **23**(9): 76-79.]