

doi: 10.3788/gzxb20164502.0204002

# 自适应红外隐身系统的背景投影误差分析

张冬晓, 何永强, 任宏岩, 胡文刚, 陈一超

(军械工程学院 电子与光学工程系, 石家庄 050003)

**摘 要:**通过观察点、目标以及背景之间的透视投影关系,建立了目标与遮挡背景之间的空间对应模型,得到了模型中的视点坐标和距离参数的背景投影误差方程,并利用蒙特卡罗统计方法对旋转角度参数进行误差分析.实验结果表明:各参数误差与像素偏差之间呈线性关系,在不同初始条件下,视点坐标和距离参数的误差对像素偏差的影响是不同的;由视点 X、Y 坐标误差引起的像素偏差远大于视点 Z 坐标或距离参数的误差,俯仰角与偏航角误差引起的像素偏差远大于由滚动角引起的偏差.

**关键词:**红外隐身;自适应;坐标变换;透视投影;蒙特卡罗法;误差分析

中图分类号:TN219

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)02-0204002-6

## Background Projection Error Analysis in the Adaptive Infrared Stealth System

ZHANG Dong-xiao, HE Yong-qiang, REN Hong-yan, HU Wen-gang, CHEN Yi-chao

(Department of Electronics and Optics, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** The model between the object and the occlusion background was established by the relationship of perspective projection between the viewpoint, object and background. The error equation was obtained for the coordinates of the viewpoint and the distance to background. The errors of the angle of rotation were analyzed based on the Mont Carlo method. The results show that the relationship between the pixel offset and the errors of parameters is linear, the viewpoint coordinates and the distance errors have different influence in different initial conditions. The pixel offset which is caused by X coordinate and Y coordinate of viewpoint is much higher than the offset which is caused by Z coordinate or the distance to object. The pixel offset which is caused by the pitch angle and the yaw angle is much higher than the offset which is caused by the rolling angle.

**Key words:** Infrared stealth; Adaptive; Coordinate transformation; Perspective projection; Mont-Carlo method; Error analysis

**OCIS Codes:** 040.3060; 040.6808; 110.3080; 150.69

## 0 引言

自适应红外隐身技术的提出解决了传统红外隐身技术适用范围窄、隐身效果不佳和环境适应性差的问题,为作战装备更好地隐身提供了技术途径<sup>[1-2]</sup>.自适应红外隐身系统通过控制隐身目标上的变温材料<sup>[3]</sup>或者变发射率材料阵列使之与背景的红外辐射分布相一致<sup>[4]</sup>,从而实现隐身.在自适应红外隐身系统中,遮挡背景的获取是实现隐身的第一步.所谓的遮挡背景是指,在观察点处对目标进行观察时,被目标所遮挡住的那部分背景.从不同的位置观察目标时,目标与背景的

空间位置关系是不同的,遮挡背景点与目标上对应点位于同一直线上,且过观察点,这种关系也称作透视投影<sup>[5]</sup>.因此,遮挡背景的获取即是背景向目标作透视投影的过程.然而,实际应用中无法在观察点处直接获取目标与背景的空间关系,只能通过观察点的坐标信息以及背景的距离信息对遮挡背景进行提取,从而引进误差.

本文在已建立的背景投影模型的基础上,以投影背景与真实的遮挡背景之间的像素偏移量表示投影精度,对背景投影精度进行分析,得到了各参数对投影精度的影响程度及规律.

基金项目:武器装备军内科研项目(No. XXX)资助

第一作者:张冬晓(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电对抗与信息处理. Email: zhang58452sc@163.com

导师:何永强(1968-),男,副教授,主要研究方向为光电对抗与信息处理. Email: yongqianghe@sohu.com

收稿日期:2015-07-07;录用日期:2015-10-08

# 1 背景投影模型

自适应红外隐身系统的工作过程可由图 1 进行描述,位于隐身目标上的红外成像探测器实时捕捉背景热像,将捕捉到的背景热像在计算机中进行处理,计算出被隐身目标所遮挡住的背景,并将其与隐身材料阵列中的各单元一一对应起来,从而产生驱动信号;该信号使得隐身材料阵列作出相应改变,使其与背景的红外辐射分布相一致,同时隐身材料阵列实时反馈当前的红外辐射分布,并将其与获得的背景分布进行比较,从而进行实时调整<sup>[6]</sup>.

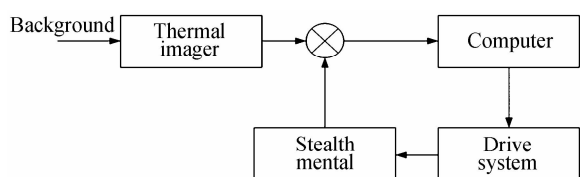


图 1 自适应红外隐身系统工作过程

Fig. 1 The principle of the self-adaptive infrared stealth system

要实现隐身,首先必须获取正确的背景辐射分布,即获取被遮挡住的背景.遮挡背景与目标、观察点之间存在透视投影关系,根据此关系建立相应的背景投影模型,能够解算出被遮挡住的背景以及与阵列上各单元之间的对应关系<sup>[7-8]</sup>.

建立背景投影模型之前,首先建立三套坐标系,一是载体坐标系  $O_b - X_b Y_b Z_b$ ,以载体上用于背景获取的热像仪光心为原点,载体前进方向为  $X$  轴,载体在水平面时铅锤方向为  $Y$  轴, $Z$  轴以右手法则确定;二是热像仪坐标系  $O_T - X_T Y_T Z_T$ ,以热像仪光心为原点,热像仪光轴为  $Z$  轴, $X$ 、 $Y$  轴分别与像平面上的  $X$ 、 $Y$  轴平行;三是视点坐标系  $O_c - X_c Y_c Z_c$ ,以敌方观察点为原点,坐标轴与载体坐标系坐标轴平行,如图 2.

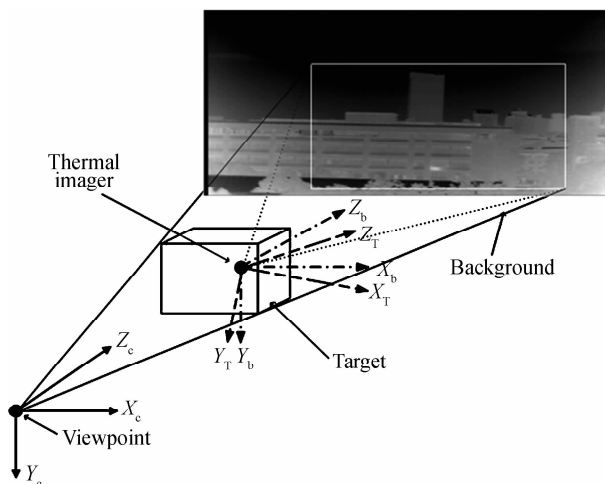


图 2 背景投影模型

Fig. 2 The model of the background projection

背景投影的目的是在热像仪所获取的背景图像上找到与隐身目标一一对应的点,可通过三个坐标系相互转换<sup>[9]</sup>以及热像仪成像模型<sup>[10]</sup>实现.

在载体坐标系下获取隐身目标各点的坐标,可直接通过简单测量;将载体坐标系下的坐标变换到视点坐标系,根据坐标系的定义可得到视点坐标系下各点坐标为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $X_b, Y_b, Z_b$  为载体上的点在载体坐标系下的坐标, $X_e, Y_e, Z_e$  为视点坐标, $X_c, Y_c, Z_c$  为视点坐标系下各点坐标.

在视点坐标系下,被遮挡的背景点坐标可表示为

$$\begin{cases} X_s = \frac{X_c(Z - Z_e)}{Z_e} \\ Y_s = \frac{Y_c(Z - Z_e)}{Z_e} \\ Z_s = Z - Z_e \end{cases} \quad (2)$$

式中, $Z$  为载体与背景之间的距离.得到遮挡背景各点坐标后,再变换到热像仪坐标系下,通过热像仪成像模型便可得到各点在热像中的位置,变换模型为

$$Z_T \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dX & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dY & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R}_1 & 0_3 \\ 0_3^T & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $u, v$  为图像的像素坐标, $X_c, Y_c, Z_c$  为虚拟视点坐标系下的坐标,即热像仪成像模型中的世界坐标, $X_T, Y_T, Z_T$  为热像仪坐标系下的坐标, $f_1$  为热像仪焦距, $dX$  为热像仪像元在  $X$  方向的尺寸, $dY$  为热像仪像元在  $Y$  方向的尺寸, $u_0, v_0$  为图像平面中心对应的像素坐标, $\begin{pmatrix} \mathbf{R}_1 & t_1 \\ 0_3^T & 1 \end{pmatrix}$  为视点坐标系变换到热像仪坐标系下的变换矩阵. $\mathbf{R}_1$  为热像仪坐标系相对于视点坐标系的旋转矩阵,可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x(\alpha) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_y(\beta) &= \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_z(\gamma) &= \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为热像仪坐标系相对于  $X$  轴,  $Y$  轴,  $Z$  轴的旋转角, 最终的旋转矩阵即是三个子矩阵的乘积, 这里采用  $Y-X-Z$  的旋转顺序<sup>[11]</sup>, 并定义  $\alpha$  为俯仰角 (Pitch)、 $\beta$  为偏航角 (Yaw)、 $\gamma$  为滚动角 (Rolling)。

通过上述的模型, 即可得到载体上各点与它们所遮挡住的背景点之间的对应关系, 从而获得被遮挡住的背景。

## 2 背景投影模型精度分析

在第 1 节所推导的模型中, 还需获取的参数有视点坐标、载体到背景的距离以及热像仪相对于视点坐标系的旋转角度。这些参数的获取必然存在误差, 因此需要分析这些参数的误差对最终结果的影响程度<sup>[12]</sup>, 以便于在工程应用中选择合理的方式获取参数。

考虑到旋转矩阵的复杂性, 将旋转角参数和其他两个参数分开进行精度分析, 令旋转矩阵中各角度为 0, 此时的图像坐标为

$$\begin{cases} u = \frac{f_1 [X_b (Z - Z_e) + X_e (Z_b - Z)]}{Z (Z_b - Z_e) dX} + u_0 \\ v = \frac{f_1 [Y_b (Z - Z_e) + Y_e (Z_b - Z)]}{Z (Z_b - Z_e) dY} + v_0 \end{cases} \quad (5)$$

只考虑旋转时, 令背景点在载体坐标系下的坐标已知, 且坐标为  $(X_a, Y_a, Z_a)$ , 按照  $Y-X-Z$  的旋转顺序得到的旋转矩阵为

$$R_y(\beta) \cdot R_x(\alpha) \cdot R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

此时的图像坐标为

$$\begin{cases} u = \frac{f_1 (n_{11} X_a + n_{12} Y_a + n_{13} Z_a)}{dX (n_{31} X_a + n_{32} Y_a + n_{33} Z_a)} + u_0 \\ v = \frac{f_1 (n_{21} X_a + n_{22} Y_a + n_{23} Z_a)}{dX (n_{31} X_a + n_{32} Y_a + n_{33} Z_a)} + v_0 \end{cases} \quad (7)$$

通过式(5)和式(7)分析三个参数对遮挡背景获取的影响。

### 2.1 视点坐标对模型的影响

在式(5)中, 分别对  $X_e, Y_e, Z_e$  求导得

$$\left. \begin{aligned} du &= \frac{f_1 (Z_b - Z)}{Z (Z_b - Z_e) dX} dX_e - \frac{f_1 X_b Z dX (Z_b - Z_e) - f_1 Z dX [X_b (Z - Z_e) + X_e (Z_b - Z)]}{[Z (Z_b - Z_e) dX]^2} dZ_e \\ dv &= \frac{f_1 (Z_b - Z)}{Z (Z_b - Z_e) dY} dY_e - \frac{f_1 Y_b Z dY (Z_b - Z_e) - f_1 Z dY [Y_b (Z - Z_e) + Y_e (Z_b - Z)]}{[Z (Z_b - Z_e) dY]^2} dZ_e \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

从式(8)分析可知, 视点的三个坐标对结果的影响是不同的, 视点  $Z$  坐标值同时影响遮挡背景在图像坐标系  $X, Y$  方向的取值,  $Z$  越大获取的背景范围越小, 反之则获取的背景范围越大;  $X, Y$  坐标值影响获取背景的位置, 其中  $X$  坐标影响背景在图像坐标系中的  $X$  轴方向

取值,  $Y$  坐标影响背景在图像坐标系中的  $Y$  轴方向取值, 二者互不影响, 且二者与图像坐标呈线性关系。

### 2.2 载体到背景的距离对模型的影响

在式(5)中, 对  $Z$  求导得

$$\left. \begin{aligned} du &= \frac{f_1 Z dX (X_b - X_e) (Z_b - Z_e) - f_1 dX (Z_b - Z_e) [X_b (Z - Z_e) + X_e (Z_b - Z)]}{[Z (Z_b - Z_e) dX]^2} dZ \\ dv &= \frac{f_1 Z dY (Y_b - Y_e) (Z_b - Z_e) - f_1 dY (Z_b - Z_e) [Y_b (Z - Z_e) + Y_e (Z_b - Z)]}{[Z (Z_b - Z_e) dY]^2} dZ \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由式(9)可得知, 载体到背景的距离对获取结果的影响与式(8)中的第二项相似, 即  $Z$  值将影响遮挡背景的范围, 与式(8)中第二项不同的是, 此时的  $Z$  越大, 获取的背景范围越大,  $Z$  越小获取的背景范围越小。随着  $Z$  的增大, 由  $Z$  的变化所引起的图像像素偏差逐渐变小。

### 2.3 旋转角度对模型的影响

分析旋转角度对模型的影响时, 考虑到旋转矩阵的复杂性, 用全微分的方式进行误差分析计算量庞大, 故采用蒙特卡罗统计方法进行误差分析<sup>[13]</sup>。首先令式(7)中  $u = u(\alpha, \beta, \gamma)$ ,  $v = v(\alpha, \beta, \gamma)$ , 则由旋转角度引起的像素偏移可表示为

$$\begin{cases} \Delta u = u(\alpha + \Delta\alpha, \beta + \Delta\beta, \gamma + \Delta\gamma) - u(\alpha, \beta, \gamma) \\ \Delta v = v(\alpha + \Delta\alpha, \beta + \Delta\beta, \gamma + \Delta\gamma) - v(\alpha, \beta, \gamma) \end{cases} \quad (10)$$

由蒙特卡罗方法的特性可知, 当抽样样本数量足够大时, 得到的结果将以很高的精度趋近理想值。在此模型中, 旋转角度偏差服从均值为零的正态分布<sup>[14]</sup>, 通过对该分布进行抽样, 得到一组旋转角度的误差随机数, 进而带入式(10)中进行误差分析。

## 3 实验结果及分析

实验中所用到的各参数见表 1。

表 1 实验参数  
Table 1 the parameter of experiment

| Parameters                        | Parameter values | Parameters                              | Parameter values            |
|-----------------------------------|------------------|---|-----------------------------|
| Focus/mm                          | 90               | Pixel size/ $\mu\text{m}$               | $35 \mu\text{m}$            |
| Center coordinate of image /pixel | (384,288)        | Distance of background /m               | 3.5                         |
| Pitch angle $\alpha/(\circ)$      | $3^\circ$        | The size of target/mm                   | $320 \times 120 \times 210$ |
| Yaw angle $\beta/(\circ)$         | $0^\circ$        | Coordinate of viewpoint/m               | (0,0,-3.43)                 |
| Rolling angle $\gamma/(\circ)$    | $0^\circ$        | The point coordinate of the top-left/mm | (-177,0,-60)                |

图 3(a)为位于表 1 视点处的热像仪所拍摄带有目标的场景图像,图 3(b)为目标上的热像仪所拍摄目标后方的背景.将表 1 中的参数代入模型之中,求得背景图像如图 3(c),将获得的背景图像置于目标上,与没有目标的纯背景作对比,如图 3(d),从图中可看出通过模型所获得的背景图像与真实被遮挡的图像是一致的,验证了模型的正确性.

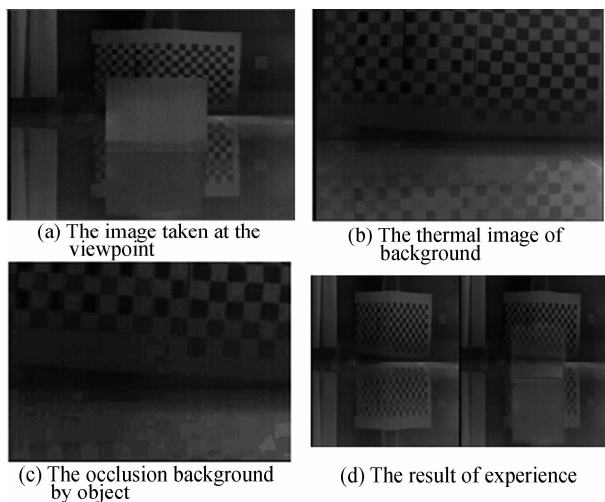


图 3 背景投影过程及投影结果

Fig. 3 The process and the result of the background projection

由于纵向像素偏移规律与横向完全一致,因此只需给出各参数误差对像素横向偏移的影响.从式(8)和式(9)可看出,初始条件不同导致各参数对像素偏移的影响曲线斜率不同,所以应考虑在不同初始条件下的误差.

由于参数误差与其所引起的像素偏差呈线性关系,所以可固定一组参数误差,并将初始条件设为变量,得到初始条件对结果的影响.首先根据应用实际将目标尺寸进行放大,取目标左上角点的坐标为(4,0,0),误差取为 1 m,结果如图 7,从上到下分别为视点坐标  $X_e$ 、 $Z_e$  和目标与背景距离  $Z$  对固定误差的影响.

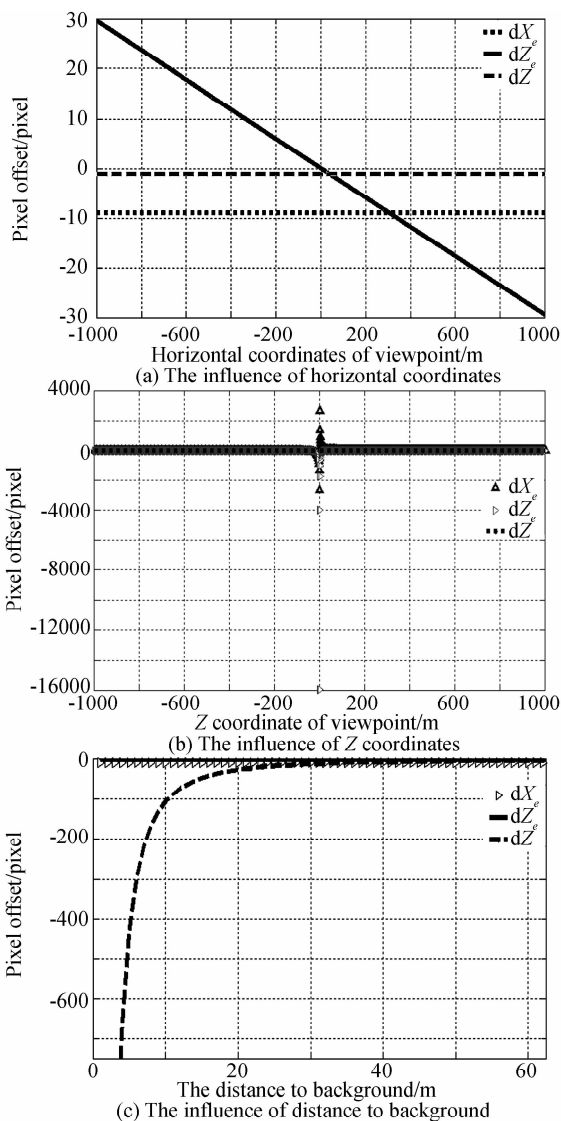


图 4 各参数初值对像素偏差的影响

Fig. 4 The relation between initial value and pixel offset

从图 4 中可得出结论为:

1) 对于不同的视点坐标  $X$ 、 $Y$ ,由视点  $X$ 、 $Y$  坐标误差以及目标与背景距离误差所引起的像素偏差是不变的,即视点  $X$ 、 $Y$  坐标不影响上述两个参数所引起的误差.而由视点  $Z$  坐标误差所引起的像素偏差与视点的  $X$ 、 $Y$  坐标成正比,相应的由视点  $Z$  坐标误差引起的像素偏差曲线斜率发生变化.

2) 在不同的视点  $Z$  坐标下,目标与背景距离误差引起的像素偏差变化率不随  $Z$  坐标变化;而由视点  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标误差所引起的像素偏差随  $Z$  坐标的变化而变化,并且在零点附近变化剧烈,离零点越远变化越平稳,即在实际应用时,当视点相对于目标较远时,所要求的参数精度是一定的,不会再随着  $Z$  坐标的变化而变化.

3) 当目标与背景的距离不同时,视点坐标误差所

引起的像素偏差变化率不随目标与背景距离变化;而由目标与背景距离误差所引起的像素偏差变化率会随着目标与背景的距离而变化,且随着目标与背景的距离增大,像素偏差变化率会逐渐趋于平缓。

考虑到旋转矩阵的复杂性,采用蒙特卡罗统计方法进行误差分析,首先根据变量的分布产生一组随机数,将产生的随机数代入式(10)中,得到像素偏移量,统计结果的二阶中心距即为最终的误差<sup>[15]</sup>。取样本数为10000,对各旋转参数进行分析,设定初始值都为零,旋转角度误差在 $\pm 1^\circ$ 之间,此时的像素偏差如图5。

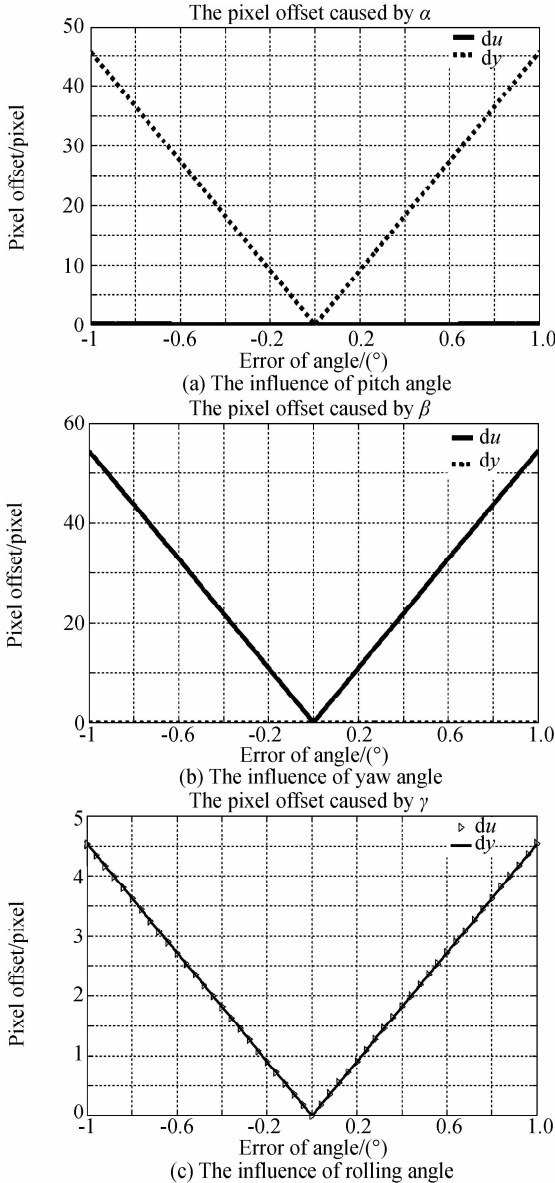


图5 旋转角度误差与像素偏差的关系曲线

Fig. 5 The relation between angle error and pixel offset

由图5可知, $\alpha$ 、 $\beta$ 角分别影响着像素的横向偏差和纵向偏差,且呈线性关系,并且对各自另外一个方向的偏差几乎无影响; $\gamma$ 角对像素横向偏差和纵向偏差的影响程度是一致的,并且 $\gamma$ 角对像素偏差的影响比另外两个角小得多。在实际应用中,应严格控制 $\alpha$ 、 $\beta$ 角精度。

## 4 结论

本文通过坐标变换的方法建立了自适应红外隐身系统的背景投影模型,并对模型中各未知参数进行了误差分析,分析了各参数误差对结果的影响。

对于视点坐标以及目标与背景距离两个参数,采用直接微分的方法建立误差方程,讨论了各参数误差对像素偏移的影响以及初始参数对像素偏移的影响;采用蒙特卡罗统计方法对旋转角度的影响进行误差分析,得到了三个旋转角度分别对结果造成的影响。

结果表明,各参数误差与像素偏差之间呈线性关系,且在不同初始条件下同一误差所引起的像素偏差不同,在不同的视点 $X$ 、 $Y$ 坐标下,同样的视点 $Z$ 坐标误差所引起的像素偏差与 $X$ 、 $Y$ 坐标成正比;在不同的视点 $Z$ 坐标下,同样的视点坐标误差所引起的像素偏差在靠近零点处变化剧烈,而随着 $Z$ 坐标绝对值的增大,该变化量逐渐减小并趋于平缓;在不同的目标与背景距离下,由目标与背景距离误差引起的像素偏差变化量随着目标与背景距离的增大而逐渐减小。像素偏差与旋转角度误差成线性关系,且由俯仰角和偏航角引起的像素偏差远大于滚动角引起的像素偏差。

### 参考文献

- [1] LI Pei-qing, TIAN Ying, CAO Jia-feng, *et al.* Research progress of adaptive infrared stealth technology [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, **32**(10):5-12.  
李佩青,田英,曹嘉峰,等. 自适应红外隐身技术研究进展[J]. *传感器与微系统*, 2013, **32**(10):5-12.
- [2] QIAO Ya. IR dynamic distortion camouflage technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2):204-207  
乔亚. 红外动态变形伪装技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(2):204-207.
- [3] FENG Yun-song, SHEN Jia, LU Yuan, *et al.* Mechanism and implementation of dynamic IR pattern painting based on Peltier effect[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(7):1695-1699.  
冯云松,沈佳,路远,等. 基于帕尔贴效应的动态红外迷彩的机理与实现[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(7):1695-1699.
- [4] FENG Yun-song, LU Yuan, FAN Bin, *et al.* Realization and analysis of a dynamic infrared stealth technique [J]. *Laser&Infrared*, 2007, **37**(6):558-560.  
冯云松,路远,范彬,等. 一种动态红外隐身技术的实现与分析[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(6):558-560.
- [5] ZHANG Xu. Research of unknown environment reconstruction and camera pose estimation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.  
张栩. 未知环境重建及摄像机位姿估计算法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2010.
- [6] ZHANG Sheng-kang, CHEN Zhong, FENG Lai, *et al.* Development of smart material system of infrared camouflage [J]. *Surface Technology*, 2004, **33**(1):63-64.  
张升康,陈重,冯来. 表面控温红外智能隐身材料系统的研制[J]. *表面技术*, 2004, **33**(1):63-64.
- [7] SCHARFE M. Active visual and thermography neutral camouflage system; DE, 201220011986[P]. 2013-01-10.

- [8] BETTINGER D S. Orthogonal projection concealment apparatus; US, 6333726[P]. 2001-12-25.
- [9] DONG Shi-du. Study of the key techniques of computer vision measurement[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.  
董世都. 计算机视觉测量关键技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
- [10] KANG Wen-wei. Study on the method of determining the three-dimensional coordinates based on the images[D]. Jilin: Jilin University, 2004.  
康文伟. 基于图像确定空间坐标方法的研究[D]. 吉林:吉林大学, 2004.
- [11] LI Zhe, SU Xiu-qin, QIAO Yong-ming, *et al.* Study LOS stabilization of warship-based electro-optical theodolite based on measure by sensors of vessel[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1552-1556.  
李哲, 苏秀琴, 乔永明, 等. 基于船姿测量的舰载光电经纬仪视轴稳定方法研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(6):1552-1556.
- [12] HAN Shao-kun, ZHANG Li-hua, LIU Ming-qi. Transforms and excursion function analysis in the electronic image stabilization[J]. *Optical Technique*, 2004, **28**(3):278-281.  
韩绍坤, 张立华, 刘明奇. 电子稳像技术中的坐标变换及像偏移函数分析[J]. 光学技术, 2004, **28**(3):278-281.
- [13] WANG Jia-qi, JIN Guang, YAN Chang-xiang. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(2): 105-116.  
王家骥, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, **13**(2):105-116.
- [14] SUN Hui, ZHANG Shu-mei. Computation model and error budget for image motion of aerial imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(11):2492-2499.  
孙辉, 张淑梅. 机载成像系统像移计算模型与误差分析[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(11):2492-2499.
- [15] SONG Dan, LIU Jin-guo, WU Guo-dong. Error analysis of mapping camera calibration based on monte carlo method[J]. *Optoelectronic Technology*, 2008, **28**(3):177-183.  
宋丹, 刘金国, 吴国栋. 基于蒙特卡罗法的测绘相机标定误差分析[J]. 光电子技术, 2008, **28**(3):177-183.