

自适应红外隐身系统的背景投影建模

张冬晓, 何永强, 胡文刚, 陈一超

(军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要: 实现目标自适应红外隐身的第一步是获取遮挡背景图像, 这部分图像是观察者处于某一视点观察目标时, 被目标所遮挡住的背景。而当观察者在不同的视点观察目标时, 被目标所遮挡住的背景是不同的, 目标与遮挡背景满足透视投影的关系。为求得目标与遮挡背景的关系, 首先建立了三套坐标系, 即目标本体坐标系、视点坐标系以及热像仪坐标系, 然后通过推导三套坐标系之间的转换关系, 建立了目标表面各点与热像仪获取背景图像点之间的对应模型, 从而实现了遮挡背景的获取。最后通过实验对该模型进行了验证, 结果表明: 该模型能够正确获取不同视点下的遮挡背景, 为工程应用奠定了基础。

关键词: 红外隐身; 自适应; 坐标变换; 背景投影

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0304001

Background projection modeling in the self-adaptive infrared stealth system

Zhang Dongxiao, He Yongqiang, Hu Wengang, Chen Yichao

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

Abstract: The first step of self-adaptive infrared stealth is the obtention of occlusion background image, this image is a part of the background which is covered by the object when the observer observes this object somewhere. When observing the object in different viewpoints, the background that is covered by the object is different, the object and the occlusion background have a relation of perspective projection. For obtaining the relation between object and the occlusion background, three coordinate systems were established which consist of object's body-fixed coordinates, viewpoint coordinates and thermal imager coordinates, then the corresponding model between the point on object and the point on the thermal image got by thermal imager was derived by coordinate transformation between these three coordinates. At last an experiment was carried out to verify the model, the result shows that the occlusion background is obtained in different viewpoints by this model. The model lays a foundation of practical engineering application.

Key words: infrared stealth; self-adaptive; coordinate transformation; background projection

收稿日期: 2015-07-07; 修订日期: 2015-08-13

作者简介: 张冬晓(1991-), 男, 硕士生, 主要从事光电对抗与信息处理方面的研究。Email: zhang58452sc@163.com

导师简介: 何永强(1968-), 男, 副教授, 主要从事光电对抗与信息处理方面的研究。Email: yongqianghe@sohu.com

0 引言

传统的红外隐身技术一般是通过降低目标的红外辐射强度的方式来实现目标的红外隐身,降低目标红外辐射强度可通过控制目标发射率和控制目标温度两种方法实现^[1],如采用具有低发射率的隐身涂料对目标发射率进行控制以及采用隔热、吸热材料对目标温度进行控制等,但是随着红外探测器件的不断发展,红外探测器的温度分辨率越来越高,红外弱小目标的检测技术也越来越成熟^[2],并且传统的隐身技术适用的环境有限,当环境条件变化时,可能导致目标与环境融合程度不同,导致隐身失败^[3]。因此在传统的红外隐身技术已经无法满足现代军事武装隐身需求的背景下^[4],提出了自适应红外隐身技术。自适应红外隐身技术通过实时获取目标所处背景的红外辐射分布,控制覆盖于目标表面的隐身材料,使之与背景的红外辐射分布一致,从而达到隐身的目的。在自适应红外隐身技术的研究上,英国的BAE系统公司已研制出自适应红外隐身系统,并在装甲车上进行了演示实验^[5],而国内的研究主要集中在隐身材料的控制方面^[6]。实现自适应红外隐身,首先需要建立起背景与隐身目标之间的投影模型(下简称背景投影),使得目标最终呈现出来的辐射分布与目标遮挡住的背景相一致,而这一过程直接影响到最终的隐身效果,错误的背景投影可能导致目标所复现出的遮挡背景与周围背景产生错切从而导致隐身失败,但是目前对于背景投影的相关研究还比较少,有必要对背景投影进行研究,以获取准确的遮挡背景。背景投影建模的关键是建立合理的坐标系,完成坐标系间的转换,使得遮挡背景中的空间点与获取的背景图像中的图像点对应起来,从而获取被目标所遮挡住的背景热图。

文中在分析观察者、目标、背景之间对应关系的基础上建立了背景投影模型,并利用该模型进行了背景投影实验,对实验结果进行了初步分析,为后续的工程化奠定了基础。

1 自适应红外隐身原理

由热辐射定律可知,物体的红外辐射强度由物体的发射率与温度决定,在物体发射率一定的情况

下通过控制物体的温度便可以改变物体的红外辐射强度,实现自适应红外隐身的方法之一便是通过改变目标的温度分布从而控制目标的红外辐射分布,使之与环境相一致^[7]。

自适应红外隐身系统工作原理如图1所示,探测器实时探测背景的红外辐射,并且将隐身目标所遮挡住的那部分背景提取出来,与目标表面的控温材料阵列一一对应,通过控制覆盖于目标表面的控温材料阵列改变目标的红外辐射分布,使之与提取出来的背景一致,此时从一定的位置观察隐身目标,相当于看到目标所遮挡住的那部分背景,这样便实现了目标的隐身。

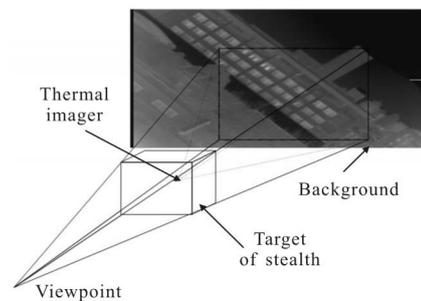


图1 自适应红外隐身系统工作原理

Fig.1 Principle of the self-adaptive infrared stealth system

由图1分析可知,实现自适应红外隐身的第一步是提取被隐身目标所遮挡住的背景,这部分背景是由位于隐身目标后方的探测器所获得,但是,随着背景与探测器之间的距离变化,被遮挡住的那部分背景对探测器所张的视场角是不同的,所以获取遮挡背景的关键是确定遮挡背景在探测器获取图像中的坐标,并且图像坐标不仅和背景与探测器之间的距离有关,还与观察者所处的位置有关。

因此必须对该过程进行建模,使得遮挡背景中各点坐标与探测器获得图像坐标相对应,从而获得遮挡背景。

2 背景投影模型

由自适应红外隐身的原理可知,将目标遮挡住的背景在目标前表面复现出来的过程实际上就是由背景向隐身目标作透视投影的过程,而遮挡背景的获取,是由位于目标后表面的红外摄像机得到全背景图像,并根据观察者的位置截取出遮挡住的那部

分背景。

文中将背景投影的过程分为两步：第一步是建立以对方观察点为光心的虚拟摄像机模型，以目标表面各点在虚拟摄像机图像平面上的投影点作为控制点，求解出与控制点相对应的不同空间深度的背景点坐标；第二步是通过位于目标上的红外热像仪获得背景的热图像，并且将第一步所获得的背景点坐标变换到热像仪图像坐标系下，得到被遮挡住的背景在热像仪图像平面上的位置，从而截取这部分背景。最后将截取出来的遮挡背景通过模型的逆过程与隐身目标表面的各点对应起来，从而完成整个投影过程。

2.1 坐标系的定义

如图 2 所示,为完成背景的投影,需建立 3 个坐标系,分别为与车体固连的目标本体坐标系 $O_b-X_bY_bZ_b$,坐标系以车体上用于背景获取的热像仪光心为原点,车体前进方向为 X 轴,以车体在水平面时的铅锤方向为 Y 轴,Z 轴以右手法则确定;与热像仪固连的热像仪坐标系 $O_r-X_rY_rZ_r$,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;最后建立以敌方观察点为原点,坐标轴与本体坐标系坐标轴平行的坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$,文中称之为视点坐标系。

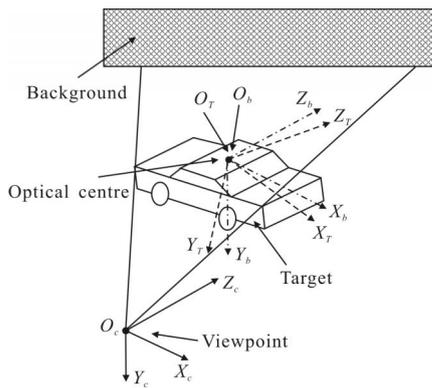


图 2 背景投影模型

Fig.2 Model of the background projection

背景投影模型便是以上述三个坐标系为基础,通过坐标系间的变换得到,常用的坐标转换模型有布尔莎模型、莫洛斯基模型和武测模型^[9]。而布尔莎模型是使用最多的空间坐标变换模型,同时也是最严密的转换方法,由于该模型共含有 7 个参数,所

以又被称为七参数模型^[9]。

布尔莎模型可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + (1+k)R_x(\gamma)R_z(\alpha)R_y(\beta) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (X, Y, Z) 与 (X_a, Y_a, Z_a) 为空间点在变换前坐标系以及变换后坐标系中的坐标; k 为尺度参数; T_x 、 T_y 、 T_z 为坐标系的平移参数; $R_x(\alpha)$ 、 $R_y(\beta)$ 、 $R_z(\gamma)$ 分别为坐标系绕 X 轴、Y 轴、Z 轴的旋转矩阵。旋转矩阵可表示为:

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2 背景投影模型推导

在目标本体坐标系下易知隐身目标表面各点相对于目标本体坐标系的坐标,将之变换到虚拟视点坐标系,在进行坐标变换之前,必须先获得视点的位置参数,在此模型中,假设视点位置坐标为隐身目标本体坐标系下的坐标,于是坐标变换可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} + R_z(\gamma)R_x(\alpha)R_y(\beta) \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: X_c 、 Y_c 、 Z_c 为视点坐标系下坐标; X_e 、 Y_e 、 Z_e 为本体坐标系到视点坐标系的平移量; $R_x(\alpha)$ 、 $R_y(\beta)$ 、 $R_z(\gamma)$ 为旋转矩阵。在此,取视点坐标系方向与本体坐标系方向一致,即相对于本体坐标系无旋转,此时,本体坐标系与视点坐标系之间的变换为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

现在视点处建立一虚拟摄像机,通过虚拟摄像机将三维的目标投影到二维的平面上,以投影点为控制点,根据目标与背景的距离可求出被目标所遮挡住的背景坐标。此过程可由公式(4)表示:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:虚拟摄像机视线方向为视点坐标系 Z 轴方向; X_c, Y_c, Z_c 为视点坐标系下的坐标; $f=Z_e$ 为虚拟摄像机的焦距; $\begin{pmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix}$ 为目标本体坐标系到虚拟视点坐标系的变换矩阵。以目标表面各点在图像平面上的投影点为约束,通过改变 Z_c 可得到目标所遮挡住的不同空间深度的物点在视点坐标系下的坐标,由此便可得到物体所遮挡住的背景点的坐标。

上述模型描述了背景投影的第一步,即获取被遮挡住的背景。以遮挡背景点的坐标为世界坐标,在获得的背景热图像上找出与之对应的图像点,从而获得被遮挡住的背景在背景图像中的位置。此过程的成像模型为:

$$Z_T \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dX & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dY & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} R_1 & t_1 \\ 0_3^T & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: X_c, Y_c, Z_c 为视点坐标系下的坐标; 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; $\begin{pmatrix} R_1 & t_1 \\ 0_3^T & 1 \end{pmatrix}$ 为虚拟视点坐标系转换到当前摄像机坐标系时的旋转和平移矩阵,即外部参数矩阵。

目前需要确定的是作为世界坐标系的视点坐标系与热像仪坐标系间的外部参数矩阵,可利用上文的逆过程对该外参数矩阵进行求解。由于热像仪坐标系与本体坐标系共原点,通过求得热像仪坐标系相对于本体坐标系的旋转矩阵,可完成本体坐标系到热像仪坐标系的转换。将视点坐标系下遮挡背景各点坐标先变换到本体坐标系下,再变换到热像仪坐标系下,即可完成外部参数矩阵的求解。

将视点坐标系向本体坐标系做变换,如公式(6)所示:

$$\begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: X_e, Y_e, Z_e 为本体坐标系相对于视点坐标系的平移参数。然后将本体坐标系向热像仪坐标系做变换,由于两坐标系共原点,所以只有旋转变换,如公式(7)所示:

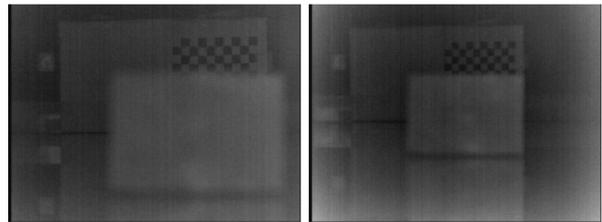
$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} = R_x(\gamma') R_z(\alpha') R_y(\beta') \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $R_x(\alpha'), R_z(\beta'), R_y(\gamma')$ 分别为本体坐标系到热像仪坐标系的旋转矩阵。将得到的热像仪坐标系下的坐标代入公式(5)即可得到遮挡背景在热图像上的坐标。

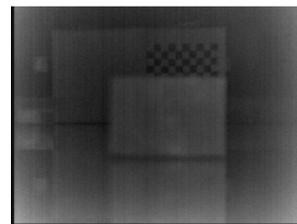
3 实验及分析

3.1 背景投影实验

通过上文的分析可知,当得到视点在本体坐标系下的坐标以及目标与背景在虚拟摄像机视线方向的距离后,便可求得被隐身目标所遮挡住的背景。为此设计实验对该模型进行验证,首先在实验目标上建立目标本体坐标系,得到目标各点的坐标,文中选择目标前表面的 4 个顶点作为控制点,分别在距目标 2 m、2.5 m、3 m 的距离上设置观察视点,如图 3 所



(a) 距离 2 m (a) Distance of 2 m
(b) 距离 2.5 m (b) Distance of 2.5 m



(c) 距离 3 m (c) Distance of 3 m

图 3 不同距离下的视点热像

Fig.3 Thermal image of viewpoint in different distances

示,图中明亮的白色矩形为目标,目标上装有热像仪用以拍摄背景图像,后方的棋盘格区域为背景。

实验中各参数如表 1 所示,包括固定参数,如热像仪自身固定参数等,以及随视点变化而变化的参数,如视点坐标。

表 1 实验参数

Tab.1 Parameters of experiment

Fixed parameters	Parameter values	Coordinates of control points /mm	Parameter values
Focus/mm	90	Top-left	(-143.92, 0, -6)
Center coordinate of image/pixel	(384, 288)	Top-right	(177, 0, -6)
Pixel size / μm	35 μm	Bottom-left	(-143.92, 21, -6)
Yaw angle (β')/($^\circ$)	0.3 $^\circ$	Bottom-right	(177, 21, -6)
Rolling angle (α')/($^\circ$)	0 $^\circ$	Coordinate of viewpoint/mm	-
Pitch angle (γ')/($^\circ$)	2.1 $^\circ$	2 m	(100, 100, -2 060)
Distance of background /m	3.18	2.5 m	(100, 100, -2 560)
Size of target /mm	320 \times 120 \times 210	3 m	(100, 100, -3 060)

通过位于目标上的热像仪拍摄到的背景图像如图 4 所示。

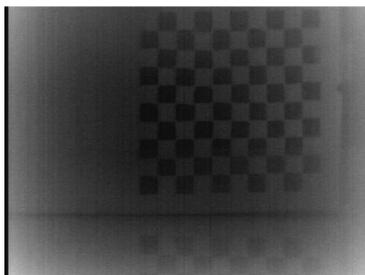
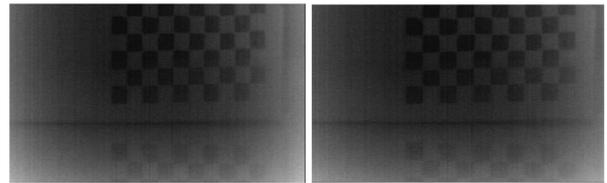


图 4 背景热像

Fig.4 Thermal image of background

将得到的视点坐标以及表中所列的各项参数代入模型中,求得了 4 个顶点所遮挡住的背景在背景热像上的位置,从而截取出了遮挡住的背景,如图 5 所示。

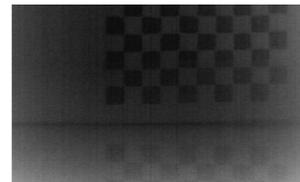


(a) 距离 2 m

(b) 2.5 m

(a) Distance of 2 m

(b) Distance of 2.5 m



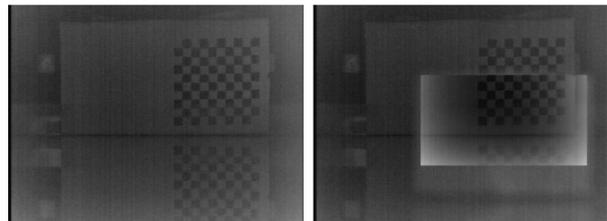
(c)距离 3 m

(c) Distance of 3 m

图 5 获取的遮挡背景

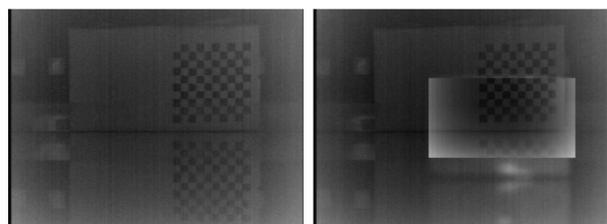
Fig.5 Occlusion background by object

将获取的遮挡背景经过缩小后,覆盖住视点图像的目标区域,可得出利用该模型进行背景投影后的最终结果,如图 6 所示。



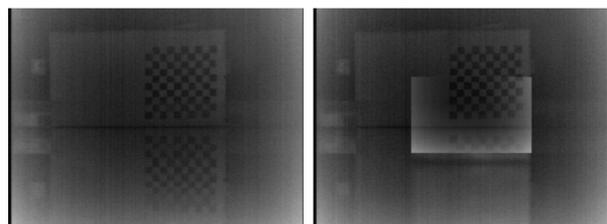
(a) 距离 2 m

(a) Distance of 2 m



(b) 距离 2.5 m

(b) Distance of 2.5 m



(c) 距离 3 m

(c) Distance of 3 m

图 6 投影结果

Fig.6 Result of projection

图中,位于左边的图像是在视点处拍摄的无目标遮挡的背景,右边的图像是通过模型得到的覆盖住目标的背景。

在此有几点问题需要说明:

(1) 为了验证模型的正确性,实验中只取了目标的4个顶点坐标进行计算,得到4个顶点在背景图像中的位置,从而获得被目标遮挡住的背景,而在实际应用中,在目标前景上复现出被遮挡住的背景是通过覆盖在目标表面的控温材料阵列实现的,阵列中的每个控温单元可独立进行温度控制。此时需要将每个控制单元的坐标代入模型中计算出每个单元所对应的那部分背景。

(2) 从结果可以看出由于背景图像和视点图像所处的距离以及所用的热像仪不同,导致遮挡背景图像覆盖住目标后与背景的灰度分布出现极大的差异,这并不是文中的重点,因为所获取的背景最终需要转化为每个控制单元的温度,只要控制每个单元的红外辐射强度与对应背景在该点处的红外辐射强度一致便可。而由热像仪的工作原理可知,红外图像的灰度与红外辐射强度之间存在一定关系,通过红外测温相关技术可以得到控制单元所需要达到的温度,从而实现隐身。

(3) 在实际应用中,视点即为敌方所处的位置,对敌方目标定位的准确性直接关系到最终的结果,所以在应用时,应尽可能对目标进行准确的定位。对目标进行定位的方法多种多样,例如可通过车载探测设备对目标进行定位,也可通过飞机等其他侦察装备获取目标位置从而通过信息平台传送到隐身目标。目标位置的获取应根据实际情况选择合适的定位方式。敌方目标的定位精度对结果的影响,可通过将定位误差代入模型进行误差分析得到。

3.2 实验结果及分析

通过分析投影结果发现,实验得到的遮挡背景并没有完美复现出真实遮挡背景的纹理,现对结果中出现的一些问题进行分析。

(1) 提取的遮挡背景不完全

从实验结果上看,有一部分目标并没有被提取的背景所覆盖住,即出现了提取背景的缺失情况,如目标的下部,出现这种情况的原因在于,位于目标上的热像仪,其视场有限,部分遮挡背景位于热像仪的视场之外,无法进行获取,所以导致了部分背景的丢失。

(2) 提取的遮挡背景覆盖目标后出现错切等现象

出现这种现象的原因与摄像机相对于本体坐标系旋转角度的误差、摄像机焦距误差有关系,并且在背景图像到视点图像的放缩过程中,放缩因子的精度对此也有影响。

虽然结果中出现了上述的一些问题,但是并不是模型本身带来的理论缺陷,而是在实际的工程应用中出现的上述问题,通过提高模型中的各参数精度以及增大背景获取的范围能够更加准确地得到投影结果。

4 结论

文中在坐标变换的基础上建立了自适应红外隐身中的背景投影模型,并在实验中对此模型进行了验证,将各参数代入模型后求解到的遮挡背景能够较好地与周围背景进行匹配,但是通过对结果的分析发现,获得的遮挡背景并不能完全复现出真实遮挡背景的纹理,出现错切等现象,这是由于实验中各项参数的测量误差以及热像仪本身的特性造成的,今后的研究中还需对模型进行进一步的优化,例如根据视点位置获取方式的不同,建立中间坐标系,将视点位置坐标转换到本体坐标系中,能够更好地适用于工程需求。

参考文献:

- [1] Yu Dabin, Tang Kun, Zou Jiwei, et al. Effect of infrared emissivity of coatings on the camouflage effectiveness of targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 194-197. (in Chinese)
余大斌,唐坤,邹继伟,等. 红外迷彩伪装涂料发射率对目标伪装效率的影响 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 194-197.
- [2] Zhang Luping, Li Biao, Wang Luping. Dim target detection method under complex spatial background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2048-2053. (in Chinese)
张路平,李彪,王鲁平. 复杂空间背景下的弱小目标检测方法 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 2048-2053.
- [3] Liu Dongqing, Cheng Haifeng, Zhen Wenwei, et al. Applications of VO₂ in adaptive infrared stealth technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 2898-2902. (in Chinese)
刘东青,程海峰,郑文伟,等. 二氧化钒在红外自适应隐身

- 技术中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2898-2902.
- [4] Li Peiqing, Tian Ying, Cao Jiafeng, et al. Research progress of adaptive infrared stealth technology [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(10): 5-12. (in Chinese)
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.
- [5] Samuel Filipek, Peter Droopa. Thermo vision protection of military mobile technics [J]. *Proceedings of the Institute of Vehicles*, 2014, 3(99): 55-60.
- [6] Wang Hongpeng, Wang Xiaoqun, Wang Zhenqing, et al. Control design of surface temperature adaptive material system[J]. *Microcomputer Information*, 2007, 23(19): 1-3. (in Chinese)
王宏鹏, 王小群, 王振清, 等. 表面自适应变温材料系统中的控制设计[J]. 微计算机信息, 2007, 23(19): 1-3.
- [7] Zhang Shengkang, Chen Zhong, Feng Lai, et al. Development of smart material system of infrared camouflage [J]. *Surface Technology*, 2004, 33(1): 63-64. (in Chinese)
张升康, 陈重, 冯来, 等. 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.
- [8] Liu Da, Han Xiaobing, Fang Long. The research and implementation of 3-Dimensional Cartesian coordinate system direct conversion algorithm [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2012, 35(5): 175-182. (in Chinese)
刘达, 韩晓冰, 房龙. 3维直角坐标系直接转换算法的研究与实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(5): 175-182.
- [9] Liu Yong, Chen Xiaohui, Yin Qing, et al. Applications of three-dimensional coordinate transform in space device's geometry measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 147-150. (in Chinese)
刘勇, 陈晓晖, 殷晴, 等. 三维坐标变换在航天器机械测试中的应用[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 147-150.