

红外成像灰度随距离变化的李群表达

李晨曦^{1,2,3}, 史泽林^{1,3}, 刘云鹏^{1,3}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 大气对红外辐射传输的影响引起的红外成像灰度变化, 是红外目标跟踪应用需要应对的问题。对红外成像灰度变化规律进行李群建模, 对设计高效、鲁棒的目标跟踪算法具有重要意义。首先分析了红外辐射传输模型, 并结合红外成像机理, 得到红外成像灰度变化模型。进一步从理论上证明了大气影响下红外成像灰度变化规律符合李群结构, 提出了红外图像灰度动态变化的一种非欧数学表征。最后根据红外成像灰度变化模型对不同环境下采集到的外场实验数据进行拟合, 回归分析结果表明了该模型的准确性, 进而说明了对红外成像灰度变化规律进行李群表达的合理性。

关键词: 大气辐射传输; 李群; 红外辐射; 目标跟踪

中图分类号: O432.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1004002

Lie group representation of infrared imaging grayscale variation with distance

Li Chenxi^{1,2,3}, Shi Zelin^{1,3}, Liu Yunpeng^{1,3}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The infrared imaging grayscale variation caused by the influence of atmosphere on infrared radiation transmission is a problem that infrared target tracking application needs to cope with. The law of infrared imaging grayscale variation in Lie group was modeled, which was important to design an efficient and robust target tracking algorithm. Firstly the infrared radiation transmission model was analyzed, and then the brightness model of infrared imaging was derived by considering the mechanism of infrared imaging. Furthermore, it was theoretically proved that the infrared imaging grayscale variation caused by the atmosphere obeyed the Lie group structure, and a non-Euclidean mathematical representation of the infrared imaging grayscale variation was proposed. Finally, according to the infrared imaging grayscale variation model, the field experimental data collected under different environments were fitted. The regression analysis results demonstrate the correctness of the model, which validates the rationality of the Lie group representation of the infrared imaging grayscale variation.

Key words: atmosphere radiation transmission; Lie group; infrared radiation; target tracking

收稿日期: 2018-05-10; 修订日期: 2018-06-20

基金项目: 中国科学院重点创新基金(Y4A4080401); 中国科学院科技创新基金(Y6A4160401)

作者简介: 李晨曦(1990-), 男, 博士生, 主要从事目标跟踪与目标识别方面的研究。Email: lichenxi@sia.cn

导师简介: 史泽林(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电成像、光电跟踪、图像处理、目标识别方面的研究。Email: zlishi@sia.cn

0 引言

随着红外成像技术的发展,红外探测器在民用和军事领域获得了广泛应用。探测目标的红外辐射特性经过大气到达探测器,在传输过程中红外辐射受到大气两方面的影响。一方面,目标红外辐射会由于传输路径上的大气成分的吸收和散射而衰减。另一方面,传输路径上的大气成分本身发出红外辐射被红外探测器接收到,使红外辐射增强。在这两方面的影响下,辐射传输距离的改变导致目标的成像灰度发生变化,给红外目标的探测、识别、跟踪带来不利影响。文中对红外目标跟踪应用中大气辐射传输影响下目标成像灰度变化规律进行研究。

现有研究主要根据大气红外辐射传输理论对目标的红外辐射进行计算以及红外图像的仿真模拟。例如,刘连伟等人^[1]对无人机的红外辐射进行建模,生成红外序列图像。林娟等人^[2]对舰船排气羽流的红外辐射特性进行了仿真计算。郭立红等人^[3]提出了一种提高目标红外辐射特性测量精度的方法。韩玉阁等人^[4]通过 LOWTRAN7 软件对大气对红外辐射传输的影响进行了仿真验证,并给出红外序列图像仿真结果。探测距离的改变导致接收到的目标红外辐射发生变化。田昌会等人^[5]分析了这种变化对目标与背景对比度计算产生的影响。易亚星等人^[6]对红外探测器与目标距离越近目标灰度越低这一现象进行分析,指出了大气背景辐射对目标灰度的影响。

在目标跟踪过程中图像的几何变化(针对近似平面物体)一般可以用仿射群或射影群来表征。这些几何变换群具有非欧李群(Lie group)结构。参考文献[7-8]根据几何变换的李群结构分别设计了逆复合(Inverse Composition, IC)和二阶优化(Efficient Second-order Minimization, ESM)算法进行图像匹配。参考文献[9]根据可见光图像的几何变换和灰度变换的李群结构设计了高效的适应光照变化的图像匹配算法。

对于红外目标来说,大气辐射传输影响造成目标跟踪过程中成像灰度随距离的变化规律是否符合李群结构是一个值得讨论的问题。如果这种变化规律能够用李群来建模,那么据此可以设计更加快速

鲁棒的跟踪算法。文中结合探测器成像机理,证明大气影响下红外成像的灰度变化的确服从李群规律,并建立目标成像灰度变化李群模型。最后利用不同环境下采集到的真实数据对模型进行线性回归分析以验证结论的合理性。

1 目标成像灰度变化的李群表达

首先分析大气对红外辐射传输的影响,得到目标辐射亮度随距离变化公式。然后结合红外探测器成像机理,给出目标成像灰度随距离变化的关系。最后对目标成像灰度变化规律进行李群表达,并给出其李代数参数化形式。

1.1 大气对红外辐射传输的影响

大气成分非常复杂,主要包括氮气、氧气、水汽、二氧化碳、气溶胶等。气体分子对红外辐射的吸收以及气溶胶颗粒对红外辐射的散射造成目标红外辐射的衰减。传输路径上的大气本身发出的红外辐射被红外探测器接收,造成红外辐射信号的增强。下面对这两方面的影响进行综合分析。

对于短时间的跟踪应用来说,可以假设大气是均质恒温的。在此假设下讨论分析会得到简化。

设目标固有光谱辐射亮度为 $I_\lambda(0)$,在大气中经过 s 距离的传输后,目标光谱辐射亮度为 $I_\lambda(s)$ 。下面根据大气的的影响推导。目标在大气中的辐射传输如图 1 所示。由于大气的吸收和散射效应,经过 ds 距

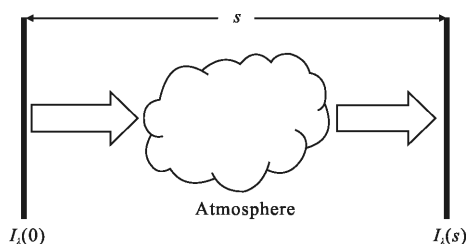


图 1 大气辐射传输示意图

Fig.1 Sketch map of atmospheric radiation transmission

离后,辐射变化量 $dI_\lambda(s)$ 为:

$$dI_\lambda(s) = -\mu_\lambda I_\lambda(s) \cdot ds \quad (1)$$

式中: μ_λ 为大气的光谱衰减系数,在上面的假设下与路径无关;负号表示辐射衰减。考虑到传输路径上大气的辐射及多次散射效应,辐射变化量 $dI_\lambda(s)$ 还需要加上增强项,公式(1)改为:

$$dI_{\lambda}(s) = -\mu_{\lambda}I_{\lambda}(s) \cdot ds + \mu_{\lambda}J(s) \cdot ds \quad (2)$$

式中:等号右边第一项表示辐射衰减项;第二项表示辐射增强项。例如,在 3~5 μm 波段内,二氧化碳的吸收作用占主要地位,在 8~14 μm 波段内,水汽的吸收作用占主要地位。 $J(s)$ 为大气源函数,引起接收辐射的增强。 $J(s)$ 一般与大气的温度有密切关系,所以其随高度的变化而变化。文中假设大气是均质恒温的,尤其是在文中实验条件下,考虑水平探测路径,高度不变,从而可以认为它与路径无关,在参考文献[10]中为大气的普朗克函数。求解公式(2)可以得到:

$$I_{\lambda}(s) = I_{\lambda}(0)\exp(-\mu_{\lambda}s) + J(1 - \exp(-\mu_{\lambda}s)) \quad (3)$$

该式为目标光谱辐射亮度在大气中的传输公式。

1.2 红外成像灰度变化关系

上一节分析了大气对目标的红外辐射传输的影响,下面结合红外探测器成像机理来分析目标的成像灰度变化。红外探测器成像单元接收到的目标辐射亮度由公式(3)给出,那么所激发的信号电压^[3,6]为:

$$V(s) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda)I_{\lambda}(s)d\lambda \quad (4)$$

式中: $M(\lambda)$ 为成像单元的光谱电压响应率。目标成像灰度为:

$$L(s) = a \cdot V(s) + b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} a \cdot M(\lambda)I_{\lambda}(s)d\lambda + b \quad (5)$$

式中: a 为显示增益系数; b 为显示白平衡基数。假设在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内成像单元的光谱电压效应率为常数 M 。通过平均当量参数法^[11]将光谱辐射亮度 $I_{\lambda}(s)$ 转化为波段辐射亮度 $I(s)$,去掉光谱符号 λ ,得到:

$$I(s) = I(0)\exp(-\mu s) + J(1 - \exp(-\mu s)) \quad (6)$$

式中: μ 为波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内大气平均衰减系数。将公式(6)代入公式(5),去掉积分号得到:

$$L(s) = aM \cdot (I(0)\exp(-\mu s) + J(1 - \exp(-\mu s))) + b \quad (7)$$

公式(7)为距离 s 处目标成像灰度模型,描述了成像灰度与距离的变化关系。

1.3 目标成像灰度变化建模及其李群结构

下面根据目标成像灰度模型(7)来考察任意不同距离处目标成像灰度的变化规律。将公式(7)写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} L(s) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aM & b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-\mu s) & J(1 - \exp(-\mu s)) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

在上式中令 $s=0$,得到:

$$\begin{bmatrix} L(s) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aM & b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

结合公式(8)和(9)两式,得到:

$$\begin{bmatrix} L(s) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-\mu s) & (aMJ+b)(1 - \exp(-\mu s)) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L(0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

公式(10)为目标零视距下成像灰度 $L(0)$ 与距离 s 处的目标成像灰度之间的关系。可以看出:灰度变化关系与目标辐射亮度变化关系(公式(6))形式类似,只不过是原来的大气源函数 J 由常数 $aMJ+b$ 替代。在下面的叙述中,记 $B=aMJ+b$ 。容易验证,任意不同距离处的目标成像灰度变化都有公式(10)的形式,即:

$$\begin{bmatrix} L(s_2) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-\mu \Delta s) & B(1 - \exp(-\mu \Delta s)) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L(s_1) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $\Delta s = s_2 - s_1$ 为距离差。

根据公式(11)定义集合

$$AtmI = \left\{ P(s) \begin{bmatrix} \exp(-\mu \Delta s) & B(1 - \exp(-\mu \Delta s)) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mid s \in \mathcal{R} \right\} \quad (12)$$

集合 $AtmI$ 只与大气和探测器成像机理有关,与目标辐射无关。可以证明该集合在矩阵乘法运算下满足李群定义^[12],因此大气与成像机理的综合影响作用满足李群结构。

证明:集合 $AtmI$ 在矩阵乘法运算下为李群。

证:首先, $P(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为单位元。通过计算容易

得到 $P(\alpha)P(\beta) = P(\alpha + \beta)$,因此满足群的封闭性。另外,计算得到

$$(P(\alpha)P(\beta))P(\gamma) = P(\alpha + \beta + \gamma) = P(\alpha)(P(\beta)P(\gamma)) \quad (13)$$

从而群的结合律得以满足。而 $P(\alpha)P(-\alpha) = P(-\alpha)P(\alpha) = P(0)$,所以 $P(-\alpha)$ 与 $P(\alpha)$ 互为逆元。因此集合 $AtmI$ 满足群的定义,并且是仿射李群 $GA(1) = \left\{ \begin{bmatrix} a & b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mid a, b \in \mathcal{R}, a \neq 0 \right\}$ 的子群,从而集合 $AtmI$ 在矩阵乘法运算下为李群。证毕。

1.4 李群 $AtmI$ 的李代数及群作用

$AtmI$ 是一个一维李群,其李代数为:

$$atmi = \left\{ A(s) \begin{bmatrix} -\mu s & B\mu s \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mid s \in \mathcal{R} \right\} \quad (14)$$

式中: $atmi$ 是一个一维向量空间,其基为 $\begin{bmatrix} -\mu & B\mu \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。

$AtmI$ 与 $atmi$ 通过指数映射联系, $\forall P(s) \in AtmI$,

$$P(s) = \begin{bmatrix} \exp(-\mu s) & B(1 - \exp(-\mu s)) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \exp \left(\begin{bmatrix} -\mu s & B\mu s \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \quad (15)$$

最后一项的指数运算为矩阵指数。通过李群与李代数的指数映射关系建立了 $Atml$ 的参数化表示。

定义李群 $Atml$ 的元素 $P(s)$ 对目标成像灰度 L 的群作用为:

$$P(s) \circ L = \exp(-\mu s)L + B(1 - \exp(-\mu s)) \quad (16)$$

公式(16)表示经过距离 s 后,目标成像灰度的变化规律。根据李群的性质,容易证明 $P(s_2) \circ (P(s_1) \circ L) = (P(s_2)P(s_1)) \circ L = P(s_2 + s_1) \circ L$,这表明先经过距离 s_1 再经过距离 s_2 后的成像灰度与经过距离 $s_1 + s_2$ 是一样的。

2 实验验证

文中通过外场采集到的红外图像数据来验证所提模型的合理性。红外成像灰度变化规律的李群表达模型公式(12)的合理性建立在红外成像灰度变化关系公式(10)上,因此只需对公式(10)的准确性进行验证即可说明对成像灰度变化规律李群表达的合理性。这里通过对采集到的真实数据进行回归分析来验证。

2.1 实验设置

探测目标是一座未完工的楼房,拍摄过程中红外探测器远离目标,并记录距离信息,得到不同距离下探测目标的成像。实验使用法国 Sofradir(索芙拉蒂)MWMARS 中波红外热像仪,波段为 $3 \sim 5 \mu m$ 。为了验证不同环境下模型的准确性,在 5 月份(环境温度为 $20^\circ C$)采集了两组数据,在 7 月份(环境温度为 $28^\circ C$)采集了一组数据,这样得到 3 组实验数据。图 2

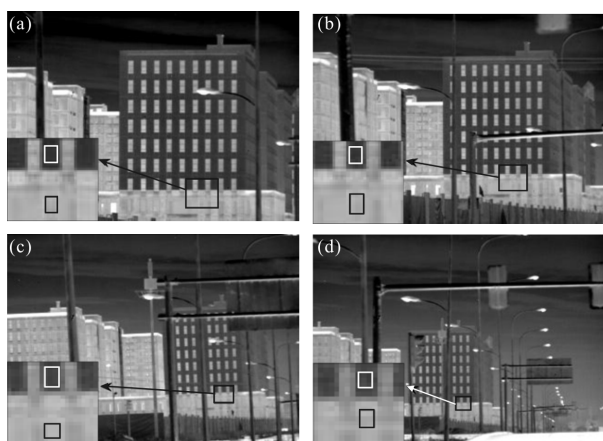


图 2 不同距离采集到的红外图像。放大区域中白色方框标注材质 1,黑色方框标注材质 2

Fig.2 Infrared images collected at different distances. White box marks material 1, and black box marks material 2 in the enlarged region

给出了不同距离处采集到的红外图像的示例。值得指出的是,模型验证过程使用的是原始 14 位数据,即没有经过调光处理的数据。为了显示,在图 2 中做了调光处理。从图像中选取两种灰度差异明显的材质。为了便于观察,对选取材质的细节做了放大,如图像中箭头所示。在放大的区域,白色方框为材质 1,黑色方框为材质 2。

2.2 验证方法

根据公式(10),材质 1 与材质 2 的灰度随距离的变化关系为:

$$L_i(s) = L_i(0)\exp(-\mu s) + B(1 - \exp(-\mu s)) \quad (17)$$

式中: $i = \{1, 2\}$ 表示材质下标; s 表示红外探测器与探测对象之间的距离, m 。通过采集到的数据对公式(17)进行拟合来考察该变化关系的合理性。材质初始灰度 $L_i(0)$ 、大气衰减系数 μ 以及常数 B 是未知参数。

首先对这两种材质的灰度差进行回归分析,这样可以将非线性回归问题转化为线性回归问题,便于进行显著性水平分析。令 $\Delta L(s) = L_1(s) - L_2(s)$,那么

$$\Delta L(s) = \Delta L(0)\exp(-\mu s) \quad (18)$$

对上式取对数,得到:

$$\ln \Delta L(s) = \ln \Delta L(0) - \mu s \quad (19)$$

式中: $\ln \Delta L(s)$ 与 s 为已知量; $\ln \Delta L(0)$ 与 μ 为待回归参数。根据采集到的数据对公式(19)进行线性回归得到参数 μ 。

然后,将公式(17)写为下面的形式:

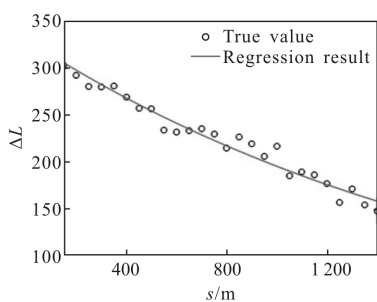
$$L_i(s) = (L_i(0) - B)\exp(-\mu s) + B \quad (20)$$

式中: $L_i(s)$ 与 $\exp(-\mu s)$ 为已知量; $(L_i(0) - B)$ 与 B 为待回归参数。公式(20)同样是一个线性回归问题,根据采集到的数据进行线性回归,得到参数 $L_i(s)$ 和 B 。

2.3 实验结果及分析

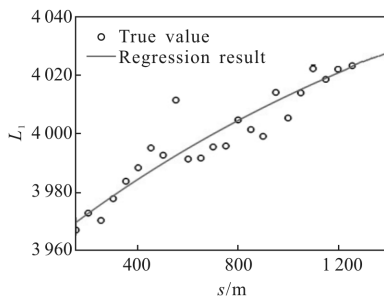
对采集到的 3 组数据进行线性回归分析。图 3 给出 5 月份第一组数据回归结果(图中显示原始数据的关系),图 4 给出 5 月份第二组数据回归结果,图 5 给出 7 月份数据回归结果。从图 3~5 可以看出:数据拟合效果很好。

为了定量地对回归结果进行评估,文中给出了回归结果的相关系数和 P 值,3 组数据的分析结果分别见表 1、表 2 和表 3。相关系数反应了变量间的线性相关程度,该值越接近 1,说明相关程度越高。 P 值



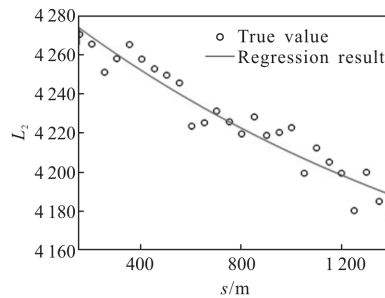
(a) 两种材质灰度差的回归结果

(a) Regression result of grayscale difference of the two materials



(b) 材质 1 的回归结果

(b) Regression result of material 1



(c) 材质 2 的回归结果

(c) Regression result of material 2

图 3 第一组数据回归结果

Fig.3 Regression results of the first set of data

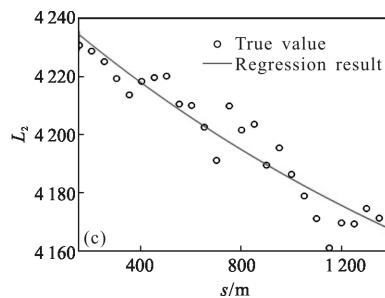
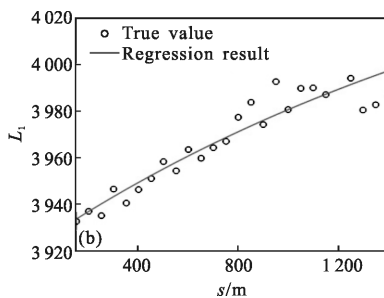
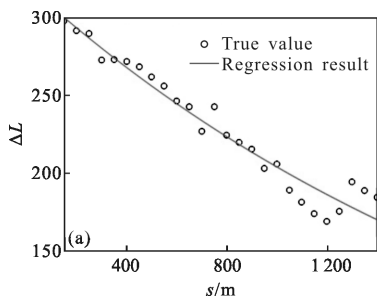


图 4 第二组数据回归结果

Fig.4 Regression results of the second set of data

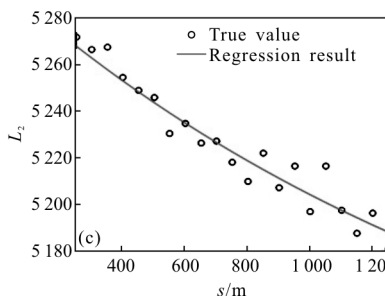
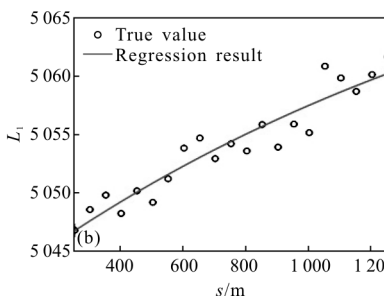
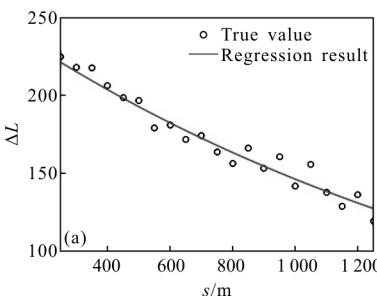


图 5 第三组数据回归结果

Fig.5 Regression results of the third set of data

针对的是假设 H_0 : 假设两变量无线性相关。一般 P 值小于 0.05, 就拒绝假设 H_0 , 说明两变量有线性相关关系。从 3 个表中可以看出: 数据拟合的相关系数均大于 0.92, 并且表示显著性水平的 P 值远小于 0.05, 从统计学意义上说明了公式(17)的合理性, 另外也说明不同环境下公式(17)的通用性。

需要指出的是, 模型公式(17)中的参数 B 以及大气衰减系数 μ 一般与大气参数(温度、相对湿度和气体分子密度等)有关。文中实验均通过车载探测器获得, 每组实验数据的获取均在 3 min 内完成, 时间跨度较小, 可以认为大气参数不变, 满足文中关于大气均质恒温的假设。

表 1 第一组数据评估结果

Tab.1 Evaluation results of the first data set

	Correlation coefficient	P
$\ln\Delta L(s)$	0.98	$1.05e-17$
$L_1(s)$	0.95	$1.29e-13$
$L_2(s)$	0.96	$2.48e-14$

表 2 第二组数据评估结果

Tab.2 Evaluation results of the second data set

	Correlation coefficient	P
$\ln\Delta L(s)$	0.96	$2.35e-15$
$L_1(s)$	0.94	$4.11e-13$
$L_2(s)$	0.95	$1.51e-13$

表 3 第三组数据评估结果

Tab.3 Evaluation results of the third data set

	Correlation coefficient	P
$\ln\Delta L(s)$	0.96	$2.32e-16$
$L_1(s)$	0.92	$6.62e-13$
$L_2(s)$	0.95	$1.61e-15$

3 结 论

文中详细分析了大气对红外辐射传输的影响,并结合红外探测器的成像机理得到大气影响下红外成像灰度变化模型。从该模型中抽象出大气与探测器成像机理的作用,理论上证明了该作用满足李群结构,得到红外成像灰度变化的李群表达,并给出其李代数参数化。为设计快速鲁棒的红外目标跟踪算法奠定了理论基础。

为了验证红外成像灰度变化李群表达的合理性,通过采集到的不同环境下的真实数据对红外成像灰度模型进行回归分析。文中利用两种材质将非线性回归模型转化为线性回归模型,便于对回归结果做定量分析。结果表明:回归分析得到的相关系数接近 1,显著性 P 值远小于 0.05,验证了红外成像灰度变化模型的准确性,从而表明文中对红外成像灰

度变化李群表达的合理性。下一步工作为将得到的红外成像灰度变化李群引入到红外目标跟踪算法中。

参考文献:

- [1] Liu Lianwei, Yang Miaomiao, Zou Qianjin, et al. UAV infrared radiation modeling and image simulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0628002. (in Chinese)
- [2] Lin Juan, Bao Xingdong, Wu Jie, et al. Computation of infrared radiation from ship exhaust plumes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0904004. (in Chinese)
- [3] Guo Lihong, Guo Hanzhou, Yang Ciyin, et al. Improvement of radiation measurement precision for target by using atmosphere-corrected coefficients [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1871-1877. (in Chinese)
- [4] Han Yuge, Xuan Yimin. Effect of atmospheric transmission on IR radiation feature of target and background [J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, 23(6): 8-11. (in Chinese)
- [5] Tian Changhui, Yang Baiyu, Cai Ming, et al. Effect of atmospheric background on infrared target detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 439-441. (in Chinese)
- [6] Yi Yaxing, Yao Mei, Wu Junhui, et al. Factors of the detected luminance of an infrared target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 13-18. (in Chinese)
- [7] Baker S, Matthews I. Lucas-Kanade 20 years on: A unifying framework [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 56(3): 221-255.
- [8] Benhimane S, Malis E. Homography-based 2D visual tracking and servoing [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2007, 26(7): 661-676.
- [9] Bartoli A. Groupwise geometric and photometric direct image registration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(12): 2098-2108.
- [10] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press. 2004. (in Chinese)
- [11] Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua, et al. Numerical Calculation of Infrared Radiation and Transmission-Calculation of Thermal Radiation [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [12] Hall B. Lie Groups, Lie Algebras, and Representations: An Elementary Introduction [M]. Berlin: Springer, 2004.