

·测试、试验与仿真·

红外目标探测系统的仿真模拟

马 韬, 耿 敏

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘要: 分析建立了导弹红外特性、大气传输特性、探测距离计算等数学模型, 并基于试验数据验证完善模型, 模拟战场对抗中的红外目标探测过程。通过仿真模拟可为作战人员提供战法训练, 也可进行相关的战术研究和验证, 以达到提高平台综合作战能力的目的。

关键词: 红外探测; 仿真模拟; 模型验证

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-02-0062-06

Simulation of Infrared Target Detection System

MA Tao, GENG Min

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: Mathematical models such as target infrared characteristic, atmospheric transmission characteristic and detecting range are analyzed and established. In order to simulate the infrared target detection in the battlefield, the models are also verified and improved by test data. The simulation could be used in tactical training, tactical research and validation, which will achieve the purpose of improving the integrative combat ability of the platform.

Key words: infrared target detection; simulation; model validation

红外目标探测设备通过分布在平台周围的红外探测器实时采集威胁目标的红外图像并经过图像处理、数据融合分析和系统综合, 实现光电感知信息的采集、处理、显示和战术应用, 可以提升平台的自我保护能力。训练模拟系统通过综合运用计算机仿真和网络通信技术, 可以提供虚拟现实的环境供训练使用, 也可以为研究人员研究和论证新战法、新武器装备性能优劣提供参考^[1-2]。因此, 对红外目标探测设备进行仿真模拟十分必要。

分析了红外目标探测设备探测目标过程的运行原理, 合理地建立红外目标探测系统的数学模型, 使用试验数据修正模型参数, 通过试验数据验证完善模型。运行红外目标探测训练仿真模拟单元时获取模型运行参数以及环境参数, 通过模型运

算输出模拟结果, 其实现原理图见图1。



图1 实现原理图

模拟红外目标探测过程的仿真模型建立和运行主要包括:

(1) 建立导弹目标红外特性的典型数学模型, 包括导弹蒙皮、尾喷管和羽烟的红外辐射特征模型;

(2) 建立红外信号的大气传输特性的数学模

收稿日期: 2017-03-19

作者简介: 马韬(1986-), 男, 河北乐亭人, 硕士学位, 工程师, 主要从事光电技术研究; 耿敏(1986-), 女, 山西永济人, 硕士学位, 工程师, 主要从事光电技术研究。

型,计算特定环境因素下大气传输衰减对红外目标探测能力的影响;

(3)建立红外探测器的探测能力计算模型,计算探测器的最大探测距离;

(4)模型运行管理控制,在具体的输入参数控制下生成模型实例;

(5)模型采样输出,按照系统要求输出模拟目标数据。

1 数学模型分析建立

1.1 目标红外特性模型

战场对抗中的红外威胁目标主要为各型导弹,而各种型号的导弹基本上都是由燃料推进剂提供动力,在空中飞行时采取特定的制导方式修正飞行轨迹,从而达到接近毁伤目标并引爆战斗部的目的^[9]。飞行中的导弹的红外辐射主要由三部分组成:羽烟辐射、蒙皮气动加热和尾喷管的辐射,则导弹的总红外辐射是以上三部分在探测方向上的线性叠加。

1.1.1 导弹蒙皮红外辐射

随着飞行速度的增加,导弹温度呈指数上升趋势,红外辐射能量也急剧增加。根据气动加热理论,导弹稳态情况下蒙皮的温度可采用下式计算

$$T_s = T_0(1 + 0.164V^2) \quad (1)$$

式中, T_s 为目标蒙皮稳态驻点温度(单位为K); T_0 为周围大气的温度(单位为K); V 为目标飞行的速度(单位为Ma)。

而导弹在非稳态过程中,速度和热力学参量都随时间的推移而发生改变。根据普朗克定律,黑体辐射的光谱分布可表示为

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (2)$$

式中, $M(\lambda, T)$ 为黑体辐射的光谱辐射出射度; C_1 和 C_2 分别为第一、第二辐射常数。导弹蒙皮一般被认为是具有一定发射率的灰体辐射,因此有下式

$$L_s(\lambda, T) = \frac{\varepsilon M(\lambda, T)}{\pi} \quad (3)$$

式中, $L_s(\lambda, T)$ 为光谱辐射亮度; ε 为蒙皮的发射率。再由下面的关系式

$$I_s = L_s A_s \quad (4)$$

可以得到蒙皮的光谱辐射强度,式中, A_s 为蒙皮在观察方向上的投影面积。

忽略侧翼等部分的影响,导弹的弹体蒙皮通常假设成一个圆柱体,弹头视为一个半球体,不同视角时蒙皮的投影面积为

$$A_s = \begin{cases} \pi R^2 \cos \theta + 2RL \sin \theta + \frac{1}{2} \pi R^2 \sin \theta & \theta \leq 90^\circ \\ 2RL \sin \theta + (\pi R^2 - \pi R_{hs}^2) \cos \theta & 90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中, R 为弹体半径; L 为弹体长度; R_{hs} 为尾喷管半径; θ 为视角,迎头探测时为 0° 。

1.1.2 导弹尾喷管红外辐射

发动机的尾喷管位于蒙皮外部,虽然其面积较小,但由于热气流和加热状态,其高温氧化后的辐射率高于金属氧化膜的辐射率。与蒙皮相同,尾喷管通常也被视为一个灰体辐射源,同样可以根据普朗克定理计算出其辐射强度 I_{hs} 。不同视角时,尾喷管的投影面积为

$$A_{hs} = \begin{cases} 0 & \theta \leq 90^\circ \\ \pi R_{hs}^2 |\cos \theta| & 90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (6)$$

因此,尾喷管的辐射强度为: $I_{hs} = L_s A_{hs}$ 。

1.1.3 导弹羽烟红外辐射

羽烟的红外辐射主要由导弹的燃烧尾焰产生,它是由于尾喷口喷出高压气体释放到尾喷管外而产生较大的能量,其羽烟温度与尾喷管口内气体压强成比例。

不同视角时,羽烟的投影面积为

$$A = \begin{cases} \pi(R_2^2 - R^2) \cos \theta + \frac{5}{2} R_{hs} l \sin \theta \\ \frac{5}{2} R_{hs} l \sin \theta + \pi R_2^2 |\cos \theta| - & \theta \leq 90^\circ \\ \frac{5}{2l \cos \theta_0} R_{hs} l \sin \theta |\cos \theta| & 90^\circ \leq \theta \leq \theta_0 \\ \pi R_2^2 |\cos \theta| & \theta_0 \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (7)$$

式中, l 为尾焰长度; R_{hs} 为尾喷管半径; R_2 为扩散后的尾焰半径,约为 R_{hs} 的4倍; R 为弹体半径。 θ_0 的值为 $\frac{180^\circ}{\pi} \left[\pi - \arctan \frac{3R_{hs}}{l} \right]$ 。

羽烟温度与尾喷管的温度有关,其计算公式为

$$T_{pt} = T_{hs} (P_{pt}/P_{hs})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (8)$$

式中, T_{pt} 为羽烟的温度; T_{hs} 为尾喷管的气体温度;

P_{pl} 为羽烟的气体压力; P_{hs} 为尾喷管内的气体压力; γ 为气体的定压热容量和定容热容量之比。

羽烟是一种选择性辐射体,主要成分是 CO_2 和 H_2O 。羽烟红外主要集中在中红外波段,并且在 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 处产生两个峰值,这也使得 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 成为尾焰探测的主要波段^[4-5]。计算羽烟辐射强度 I_{pl} 时将羽烟在这两个波长附近视为灰体,同样依据普朗克定理计算出其辐射强度 I_{pl} 。

以上分析了蒙皮、尾喷管和羽流三部分红外辐射,总辐射可由三部分辐射叠加得到。波段 $\lambda_1\sim\lambda_2$ 内的红外辐射可由以下积分得到

$$I_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (I_s + I_{hs} + I_{pl}) d\lambda \quad (9)$$

1.2 大气传输模型

红外辐射在到达红外探测系统的光学传感器之前必须通过大气,并被衰减。因此,若想得到目标在红外探测器光学入瞳处的能量分布,必须建立当前环境条件下的大气传输模型。目前计算红外辐射的大气传输经常利用 LOWTRAN 等大气传输模型计算,这种模型较为精确但计算使用较为复杂,很难满足模拟训练系统的实时性的要求^[6]。所以文中采用一种简化的数学模型进行大气传输透过率的运算。

大气对红外辐射传输的影响基本表现在辐射衰减,红外辐射衰减与以下三种现象有关^[7]:

(1) 大气气体分子 (H_2O 、 CO_2 等) 的选择性吸收引起的衰减;

(2) 大气中悬浮微粒对红外辐射的散射引起的衰减;

(3) 因大气物理特性变化(雨、雪)引起的衰减。

光谱透过率 $\tau_a(\lambda)$ 和衰减系数(消光系数) $\mu(\lambda)$ 之间的关系可用布盖尔-朗伯定律表示如下

$$\tau_a(\lambda) = \Phi_e(\lambda, R) / \Phi_e(\lambda, 0) = \exp(-\mu(\lambda)R) \quad (10)$$

式中, R 为目标与红外探测系统之间的等效海平面水平路程; $\Phi_e(\lambda, R)$ 为距离为 R 处目标辐射光能量的光谱密度; $\Phi_e(\lambda, 0)$ 为 $R=0$ 时 $\Phi_e(\lambda, R)$ 的特例; λ 为波长。

大气的衰减系数可以由各部分的影响因素的衰减系数相加获得^[8],即

$$\mu(\lambda) = \mu_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) + \mu_{\text{CO}_2}(\lambda) + \mu_s(\lambda) + \mu_c \quad (11)$$

式中, $\mu_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ 为水蒸汽吸收引起的光谱衰减系数;

$\mu_{\text{CO}_2}(\lambda)$ 为 CO_2 吸收引起的光谱衰减系数; $\mu_s(\lambda)$ 为大气分子与气溶胶的光谱散射衰减系数; μ_c 为大气气象条件(云、雾、雨、雪)引起的衰减系数。

1.2.1 水蒸汽吸收的衰减

红外辐射的透过率由大气中水蒸汽含量决定,目前大气中的水蒸汽含量与大气的透过率的关系已有大量的实验数据。只要知道一个气象条件下(温度为 T_1 、相对湿度为 r_1)水蒸汽的吸收系数 μ_1 ,便可以求得在另一个气象条件下(温度为 T_2 、相对湿度为 r_2)水蒸汽的吸收系数 μ_2 。通过实验数据可以得到在温度为 T_2 、相对湿度为 r_2 时水蒸汽的吸收系数为

$$\mu_2 = \frac{r_2 \cdot f_2}{6.67} \cdot \mu_1 \quad (12)$$

式中, μ_1 为 $T=5\ \text{℃}$ 、 $r=100\%$ 时的吸收系数。

由此可以获得海平面水平路程 R 的水蒸汽透过率为

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}} = e^{-\mu_{\text{H}_2\text{O}} \cdot R} \quad (13)$$

1.2.2 二氧化碳的吸收衰减

二氧化碳的吸收作用是造成红外辐射在大气中衰减的重要因素,取决于二氧化碳分子在空气中的含量。试验研究表明,二氧化碳的密度在大气近表层中保持不变,因此二氧化碳的光谱透射比只与辐射通过的距离有关。相关试验数据给出了二氧化碳于海平面水平路程上光谱吸收系数数据表,因而通过查表可以获得海平面水平路径上二氧化碳的吸收系数 μ_{CO_2} ,进而获得海平面水平路程 R 的二氧化碳的透过率为

$$\tau_{\text{CO}_2} = e^{-\mu_{\text{CO}_2} \cdot R} \quad (14)$$

1.2.3 大气的散射衰减

大气对红外辐射的散射系数 μ_s 的影响主要是大气中分子和悬浮的微粒的散射作用造成的,主要有瑞利散射和米氏散射两种。这里利用气象视程处理散射的方法来计算大气散射。

散射系数可利用气象视程来确定。气象视程定义为目标与背景的对比度随着距离的增加而减少到 1% 的距离。散射系数 μ_s 与气象视程 V 的关系为

$$V = 3.91/\mu_s(\lambda) \quad (15)$$

由于人眼对 $\lambda_0 = 0.55 \mu_m$ 的光最敏感,因而利用该波长来获得大气能见度,即最大视程 V_m ,可以获得,有下式

$$V_m = 3.91/\mu_s(\lambda_0) \quad (16)$$

一般可将散射系数表示为

$$\mu_s(\lambda) = A \cdot \lambda^{-q} + A_r \cdot \lambda^{-4} \quad (17)$$

式中, A, A_r 都是待定的常数; q 为经验常数。

上式中第二项表示了瑞利散射,但在 $\lambda > 1 \mu_m$ 时,瑞利散射基本可以忽略,因此对红外辐射,可以不考虑瑞利散射带来的影响,即

$$\mu_s(\lambda) = A \cdot \lambda^{-q} \quad (18)$$

则对红外光谱 λ 有下式

$$\mu_s(\lambda) = A \cdot \lambda^{-q} = \frac{3.91}{V_m} \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q = \frac{3.91}{V_m} \cdot \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^q \quad (19)$$

式中, q 为经验常数,可由试验数据确定。

所以通过以上各式可以获得光谱散射系数 $\mu_s(\lambda)$,进而获得大气散射的透过率为

$$\tau_s = e^{-\mu_s(\lambda) \cdot R} \quad (20)$$

1.2.4 气象衰减

气象(雨、雪)粒子的尺寸通常比红外波长大得多,由米氏理论,其产生的衰减为非选择的辐射散射。雨、雪与其强度相关的散射衰减系数可采用下述经验公式计算

$$\mu_r = 0.66 J_r^{0.66} \quad (21)$$

$$\mu_s = 6.5 J_s^{0.7} \quad (22)$$

式中, J_r 和 J_s 为与气象条件有关的降雨、降雪强度,单位为 mm/h。

所以由雨、雪造成的气象衰减透射率为

$$\tau_c = e^{-(\mu_r + \mu_s) \cdot R} \quad (23)$$

1.2.5 等效海平面距离计算

以上讨论的衰减模型的计算只适合于海平面的水平路程,实际上红外辐射的传播路径通常为倾斜路程,因而在运算过程中需要将倾斜路程换算成海平面的等效水平路程。

对于一定高度水平路程上的透过率可以用把路程折算到海平面等价水平路程长度来近似计算,假设高度为 h 上目标至红外探测器的水平路程为 x ,由相关理论研究可得等效路程 x_0 的近似计算公式为

$$x_0 = x \cdot e^{-\beta \cdot h} \quad (24)$$

式中的修正参数 β 可由试验数据得出,水蒸汽时, $\beta = 0.0654$; 二氧化碳时, $\beta = 0.19$ 。

则倾斜距离 S 的海平面水平等效路程 R 由积分方法求解如下

$$R = \int_{H_1}^{H_2} ds \cdot e^{-\beta h} = \int_{H_1}^{H_2} \frac{dh}{\sin \theta} \cdot e^{-\beta h} = \frac{e^{-\beta H}}{\beta \cdot \sin \theta} [1 - e^{-\beta \cdot \sin \theta \cdot S}] \quad (25)$$

式中, θ 为倾斜路径的俯仰角。

1.2.6 大气透过率的计算

综合以上分析,温度为 T 、相对湿度为 r 、降雨强度为 J_r 、降雪强度为 J_s 的气象条件下,红外辐射在倾斜路程(距离为 S 、仰角为 θ 、海拔高度为 H)大气透过率 $\tau_a(\lambda)$ 的计算公式为

$$\tau_a(\lambda, S) = \exp\left[-\frac{r \cdot f}{6.67} \cdot \mu_{\text{OH}_2\text{O}} \cdot \frac{e^{-0.0654H}}{0.0654 \sin \theta} \cdot (1 - e^{-0.0654 \cdot \sin \theta \cdot S}) - \mu_{\text{CO}_2} \cdot \frac{e^{-0.19H}}{0.19 \sin \theta} (1 - e^{-0.19 \cdot \sin \theta \cdot S}) - \frac{3.91}{V_m} \cdot \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^q \cdot S - 0.66 J_r^{0.66} \cdot S - 6.5 J_s^{0.7} \cdot S\right] \quad (26)$$

式中, $\mu_{\text{OH}_2\text{O}}$ 、 μ_{CO_2} 分别为在大气温度为 5°C 、相对湿度为 100% 时水蒸汽和二氧化碳的光谱吸收系数; f 为温度为 T 时饱和空气中的水蒸汽质量。

1.3 探测距离计算模型

探测距离是指目标辐射的红外能量与背景干扰的比值满足探测要求,并能判定目标的方位时,红外探测器至目标的最大距离。由于探测距离较远且导弹目标体积较小,一般可将其视为点源目标,则探测距离由目标辐射功率和背景辐射功率的信噪比决定^[9-11]。

$$SNR = \frac{A_0}{S^2 V_n} \cdot \bar{\tau}_a(S) \cdot \bar{\tau}_0 \cdot \bar{R} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |I_\lambda - I_b| d\lambda = \quad (27)$$

$$\frac{A_0}{S^2 V_n} \cdot \bar{\tau}_a(S) \cdot \bar{\tau}_0 \cdot \bar{R} \cdot |I_{\lambda_1} - I_{\lambda_2}| \quad (28)$$

且有: $A_d = \Omega f^2$ 式中, Ω 为探测器的瞬间视场; f 为光学系统的等效焦距。

由光学系统数值孔径(NA),有下式

$$D = (NA) \cdot 2f \quad (29)$$

将以上公式整合,可得探测距离为

$$S = \left[\frac{(\pi |I_{\lambda_1 - \lambda_2} - I_b|) D(NA) D^* \bar{\tau}_a(S) \bar{\tau}_0}{2(\Omega \Delta f)^{1/2} SNR} \right]^{1/2} \quad (30)$$

2 训练模拟系统中模型的实现

基于上文分析的数学模型,可建立相应的训练模拟系统,该系统的设计和实现主要包括:

(1)模型管理:实现对模型库访问、模型的选择、修改、初始状态的确定,以及所选仿真模型的输入输出连接关系的设定。模型的初始化数据依赖于训练模拟系统对训练库数据的加载。

(2)运行控制:获取模型的特征参数,生成特定条件下的模型实例。在模型运行过程中对外部激励引起的模型状态改变进行及时响应并反馈至模型运行数据中。模型运行过程中依赖外部实时输入数据的支撑,至少需要三批完整的数据输入才能完成模型的运算处理工作,模型运行过程中如果外部输入数据中断,则停止模拟,等待输入数据回复后继续。若超过预定时间后仍然未收到输入数据,则停止模拟。

(3)模拟数据生成:根据训练模拟系统的数据要求按照相应的采样周期对模型进行数据采样,生成可供训练模拟系统使用的模拟目标数据。

(4)模拟软件运行:基于上述设计原理运行的模拟系统软件工作流程如图2所示。

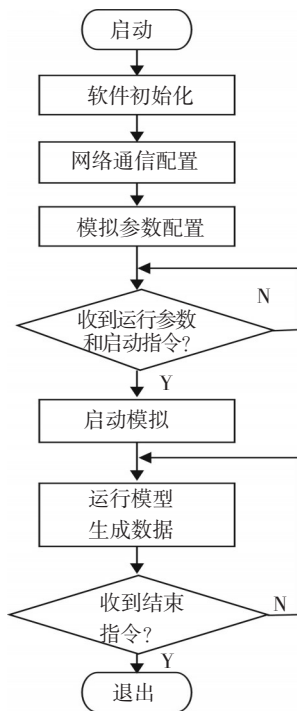


图2 模拟系统软件工作流程图

3 仿真与验证

为了验证模型的准确度,将某种典型环境下目标的红外辐射特性进行建模仿真,仿真计算结果见图3。

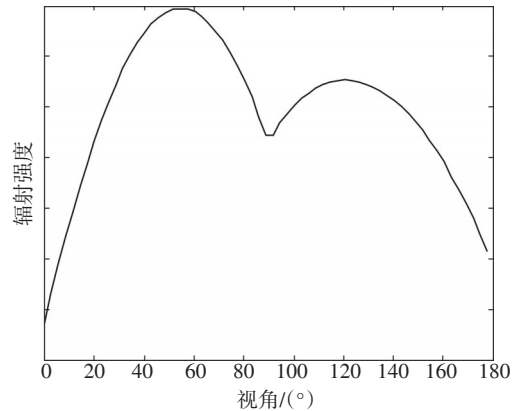


图3 红外辐射强度仿真结果

进一步模拟计算该环境条件的大气透过率,将红外辐射强度数据和大气透过率数据作为模型输入,可得出最大探测距离数据的仿真模拟结果,如图4所示。

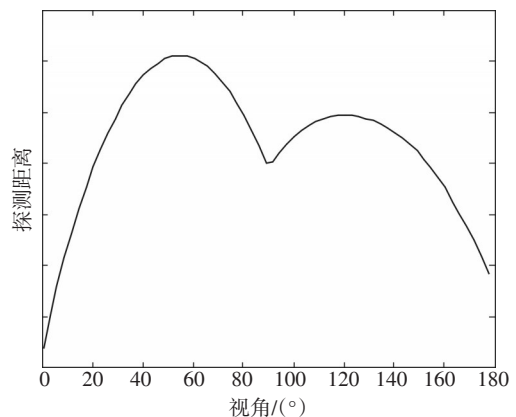


图4 探测距离仿真结果

由图3和图4中的仿真数据与试验数据相比较,两者趋势基本相符。通过模拟仿真结果与真实试验数据的对比,可以验证上述模型算法的正确性与准确度。

4 结论

分析介绍了红外目标探测仿真模拟系统的运

行原理和实现,在特定的条件和运行环境下对红外探测部件的探测过程模拟,经过了仿真和验证,可以用于对抗模拟系统中进行战术模拟训练,具有较强的应用价值。在后续的开发与验证过程中,还可通过试验数据修正模型参数,进一步提高模型的精确性。

参考文献

- [1] 刘小荷. 空军作战模拟[M]. 北京: 空军指挥学院出版社, 2002.
- [2] 李兆展. 面向对抗的新型地空导弹训练模拟器关键技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2007.
- [3] 魏毅寅. 世界导弹大全[M]. 北京: 军事科学出版社, 2011.
- [4] David Marran. Turbine engine exhaust gas measurements using in-situ FT-IR emission/transmission spectroscopy [J]. Proceedings of the SPIE(S0277-786X), 2001, 4201: 118-128.
- [5] 谢蓄芬, 任智斌, 曹小燕. 巡航导弹尾焰红外辐射特性建模及分析[J]. 光电工程, 2009, 36(4): 70-74.
- [6] 孟凡斌, 郑丽. 基于LOWTRAN7的红外大气透过率计算方法[J]. 光电技术应用, 2009, 24(3): 29-32.
- [7] 张晓哲, 李云霞, 马丽华, 等. 红外制导半实物仿真系统中大气传输模型的分析[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(1): 104-106.
- [8] 韩涛, 朱学光. 一种计算大气透过率的方法[J]. 红外技术, 2002, 24(6): 51-53.
- [9] 白延柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [10] 安毓英, 曾晓东. 光电探测原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.
- [11] 张幼文. 红外光学工程[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.

(上接第48页)

量。基于机器视觉的大型零件尺寸测量系统可以方便有效地对大型的零件进行测量,并且满足非接触、测量速度快、测量精度高、实时显示等测量要求,为工业的发展提供了有力支持。

参考文献

- [1] 刘祥锋. 基于机器视觉技术的零件尺寸检测系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [2] 马玉真, 胡亮, 方志强. 计算机视觉检测技术的发展及应用研究[J]. 济南大学学报, 2004(3): 222-227.
- [3] 薛琴. 基于图像拼接的零件几何尺寸的图像测量算法的研究[D]. 广州: 广州工业大学, 2007.
- [4] 徐孙浩. 大尺寸零件的机器视觉在线测量方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.
- [5] Ya-jun FANG, Ichiro Masaki. Depth-based target segmentation for intelligent vehicles: fusion of radar and binocular stereo[J]. IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(3).
- [6] Lu R S. On-line measurement of the straightness of seamless steel pipes using machinevision technique[J]. Sensors and Actuators, 2001(94): 417-427.
- [7] 罗胜彬, 宋春华, 韦兴平. 非接触测量技术发展研究综述[J]. 机床与液压, 2013, (23): 150-153.
- [8] 刘超. 基于机器视觉的微小零件自动测量与装配[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [9] Bremner J F. Automatic vision inspection system for the inspection of shapes cut in sheet material[J]. Proceeding on Image Processing, 1986: 40-43.
- [10] 彭激汐, 赵冠先, 王志前. 基于图像识别系统的灰度化算法研究与效率分析[J]. 电子世界, 2014(7): 105-106.
- [11] 杨山. 基于中值滤波和小波变换的图像去噪[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
- [12] 张恒. 基于SIFT的图像拼接算法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- [13] Matthew Bown, David G Lowe. Automatic panoramic image stitching using invariant features[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 74(1): 59-73.
- [14] 杨威. 基于机器视觉的图像配准技术的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014.
- [15] 段振云, 杨丹, 赵文辉. 一种改进的Canny自适应边缘检测算法[J]. 机械工程师, 2015(3): 7-9.
- [16] 张永宏, 胡德金, 徐俊杰. 基于视觉图像的加工零部件亚像素边缘定位[J]. 机械工程学报, 2004(6): 179-182.
- [17] 艾红干. 基于亚像素的图像检测方法与关键技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [18] Triggs B. Empirical filter estimation for subpixel interpolation and matching [J]. ICCV, 2001, 2(2): 550-557.
- [19] 陈华江. 基于机器视觉的零件几何量测量方法研究与系统开发[D]. 上海: 东华大学, 2011.