

非平衡状态下机载激光合成孔径 雷达图像目标识别

侯宇航¹, 宋凯丽¹, 陈晓晨², 项剑锋², 邹仕军³

(1. 航空工业沈阳飞机设计研究所, 沈阳 243000; 2. 海装沈阳局驻沈阳地区第一军事代表室, 沈阳 243000;
3. 空军装备部驻沈阳地区第一军事代表室, 沈阳 243000)

摘要:为了准确地展开目标识别与跟踪,提出了非平衡状态下机载激光合成孔径雷达图像目标识别方法。首先,在卡尔曼滤波原理的基础上建立图像校正模型,校正非平衡状态下图像产生的畸变现象;其次,计算色彩补偿率,对SAR图像的色彩通道展开补偿,提高图像清晰度;最后,将处理后的SAR图像输入扩展卷积胶囊网络中通过多尺度特征融合与特征学习实现图像目标识别。实验结果表明:本文方法具有良好图像处理效果和较高的目标识别精度。

关键词:卡尔曼滤波;图像畸变校正;图像补偿;机载激光合成孔径雷达图像;目标识别

中图分类号:TP753 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)10-3410-06

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231423

Airborne laser synthetic aperture radar image target recognition under unbalanced state

HOU Yu-hang¹, SONG Kai-li¹, CHEN Xiao-chen², XIANG Jian-feng², ZOU Shi-jun³

(1. Shenyang Aircraft Design and Research Institute of Aviation Industry, Shenyang 243000, China; 2. The First Military Representative Office of Haizhuang Shenyang Bureau in Shenyang Area, Shenyang 243000, China; 3. The First Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Shenyang, Shenyang 243000, China)

Abstract: In order to accurately carry out target recognition and tracking, a non equilibrium airborne laser synthetic aperture radar image target recognition method is proposed. Firstly, based on the principle of Kalman filtering, an image correction model is established to correct the distortion phenomenon of images in non-equilibrium states; Secondly, the color compensation rate was calculated to compensate for the color channels of SAR images and image clarity was improved; Finally, the processed SAR image is input into the extended convolutional capsule network to achieve image target recognition through multi-scale feature fusion and feature learning. The experimental results show that the proposed method has good image processing performance and high target recognition accuracy.

Key words: Kalman filtering; image distortion correction; image compensation; airborne laser synthetic aperture radar images; target recognition

收稿日期: 2023-10-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(616789010).

作者简介: 侯宇航(1982-), 男, 高级工程师. 研究方向: 模拟仿真与实现. E-mail: jordanhou@163.com

0 引言

随着科技的迅速发展和应用领域的不断扩展,机载激光合成孔径雷达(SAR)图像目标识别技术已经成为当今研究的热点之一^[1]。在军事、民用等领域,该技术发挥着越来越重要的作用。然而,在非平衡状态下采集的SAR图像可能会出现目标变形、模糊或部分遮挡等问题,导致目标识别变得困难和复杂^[2]。因此,研究非平衡状态下机载激光SAR图像目标识别的方法和技术对于提高目标识别的准确性和鲁棒性具有重要的理论和实践价值。

张振中^[3]分别采用稀疏表示分类器和神经网络对待识别图像展开识别,并对识别结果展开融合处理,获得最终决策结果完成图像目标识别,但该方法无法校正图像的畸变部分,降低了目标识别精度。陈捷等^[4]采用非下采样 contourlet 变换多层次分解雷达图像,获得图像在不同尺度上的表征结果,采用多重集典型相关分析方法融合不同尺度的表征结果,获得图像特征矢量,引入联合稀疏表示对图像特征矢量展开学习,以此实现目标识别,该方法采集的图像模糊度较高,导致目标识别结果与实际结果不符。

为了解决上述方法中存在的问题,提出非平衡状态下的机载激光合成孔径雷达图像目标识别方法并进行了实验验证,结果表明本文方法具有良好的图像处理效果和较高的目标识别精度。

1 非平衡状态下机载激光合成孔径雷达图像处理

非平衡状态下机载激光合成的孔径雷达图像存在畸变与模糊现象,为了提高目标识别精度,需要对非平衡状态下采集的图像展开预处理。

1.1 图像畸变校正

根据沿方位向周期性变化的偏差和增益对存在畸变现象的SAR图像建模:

$$D_c(i, j) = h(j)D_0(i, j) + p(j) \quad (1)$$

式中: $h \in R^n$ 为沿方位向周期性变化产生的增益; $D_0(i, j) \in R^{m \times n}$ 为不存在畸变现象的SAR图像; i 为距离向位置; $p \in R^n$ 为沿方位向周期变化产生的偏差; j 为方位向位置。

可利用二阶卡尔曼滤波器^[5,6]将存在畸变的SAR图像 $D_c(i, j)$ 恢复为理想图像 $D_0(i, j)$, 将

$D_c(i, j)$ 中存在的元素作为观测值,获得偏差 $p(j)$ 和增益 $h(j)$ 在该方位向位置上的估计值,并通过下式对畸变展开校正:

$$D_0(i, j) = \frac{D_c(i, j) - p(j)}{h(j)} \quad (2)$$

上式畸变校正模型的时间复杂度较高、稳定性低,因此,用非平衡状态下机载激光合成孔径雷达图像目标识别方法对其进行改进:

$$\begin{cases} D_c(i, j) = h(j)D_1(i, j) \\ D_1(i, j) = D_0(i, j) + p(j) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $D_1(i, j)$ 为完成增益 h 校正处理后的SAR图像。

改进后的校正模型没有直接估计偏差和增益,是通过滤波处理SAR图像的均值与标准差,进而获得偏差与增益。

设 F 为方位向位置中SAR图像对应的标准差向量,可通过下式计算得到:

$$F(j) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [D_c(i, j) - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m D_0(i, j)]^2} \quad (4)$$

设 Q 为方位向位置中SAR图像对应的均值,表达式如下:

$$Q(j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m D_1(i, j) \quad (5)$$

将 F 、 Q 作为观测值,采用一阶卡尔曼滤波器对其展开两次滤波处理,获得最小均方误差估计 $\hat{F}$ 、 $\hat{Q}$ ^[7,8],以此获得增益 $h = F/\hat{F}$ 和偏差 $p = Q - \hat{Q}$ 。

建立一阶卡尔曼滤波器,沿方位向估计SAR图像的均值 Q 与标准差 F ,卡尔曼滤波器的预测方程如下:

$$\begin{cases} \hat{X}(k|k-1) = \hat{X}(k-1|k-1) \\ P(k|k-1) = P(k-1|k-1) + W \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\hat{X}(k|k-1)$ 为状态在 $k-1$ 到 k 步的一步预测值, $P(k|k-1)$ 为其对应的协方差; $\hat{X}(k-1|k-1)$ 为最小均方误差在上一步中的估计值, $P(k-1|k-1)$ 为其对应的协方差; W 为过程噪声方差。

卡尔曼滤波器的更新方程如下:

$$\begin{cases} K_g(k) = P(k|k-1) / [P(k|k-1) + R] \\ \hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K_g(k) [Z(k) - \hat{X}(k|k-1)] \\ P(k|k) = [1 - K_g(k)] P(k|k-1) \end{cases} \quad (7)$$

式中: R 为观测噪声方差; $K_g(k)$ 为产生的卡尔曼

增益; $\hat{X}(k|k)$ 为滤波输出, $P(k|k)$ 为其协方差; $Z(k)$ 为观测值。

采用上述一阶卡尔曼滤波器滤波处理标准差向量 F , 获得对应的估计值 $\hat{F}$, 在此基础上获得一次校正后的 SAR 图像 $D_1(i, j)$:

$$D_1(i, j) = D_c(i, j) \hat{F}(j) / F(j) \quad (8)$$

同理, 采用一阶卡尔曼滤波器处理均值向量 Q , 获得对应的估计值 $\hat{Q}$, 在此基础上获得二次校正后的 SAR 图像 $D_0(i, j)$:

$$D_0(i, j) = D_1(i, j) + [\hat{Q}(j) - Q(j)] \quad (9)$$

1.2 图像增强处理

校正后的 SAR 图像可表示为直接散射、前向散射和后向散射的线性叠加 R_T :

$$\begin{cases} R_T = R_d + R_f + R_b \\ R_d = Z(x, y) \cdot u(x, y) \\ R_f = Z(x, y) \cdot E(x, y) \\ R_b = N^\lambda [1 - u^\lambda(x, y)] \end{cases} \quad (10)$$

式中: R_d 为被相机接收的光线; R_f 为产生小角度偏移时, 反射进相机的光线对应的散射分量; R_b 为通过悬浮颗粒散射进相机的光线; $*$ 用于描述卷积运算; $Z(x, y)$ 为卷积核函数; λ 为光线对应的波长; N^λ 为背景光; $u^\lambda(x, y)$ 为透射率, 其计算公式如下:

$$u^\lambda(x, y) = \exp[-L(\lambda)d] \quad (11)$$

式中: d 为成像设备与目标之间的距离; $L(\lambda)$ 为衰减系数。

采集的 SAR 图像可定义为 $O^\lambda(x, y)$:

$$O^\lambda(x, y) = Z^\lambda(x, y) u^\lambda(x, y) + N^\lambda [1 - u^\lambda(x, y)] \quad (12)$$

式中: $\lambda \in \{R, G, B\}$, $N^\lambda [1 - u^\lambda(x, y)]$ 为后向散射分量; $Z^\lambda(x, y) u^\lambda(x, y)$ 为直接分量。

对上式的两边取局部红、绿、蓝三通道的最大像素值:

$$\begin{aligned} \text{Max}_{\lambda \in \{R, G, B\}} \{O^\lambda(x, y)\} &= \text{Max}_{\lambda \in \{R, G, B\}} \{Z^\lambda(x, y) \cdot \\ &u^\lambda(x, y)\} + N^\lambda [1 - u^\lambda(x, y)] \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $\text{Max}_{\lambda \in \{R, G, B\}} \{O^\lambda(x, y)\}$ 为三色通道的最亮点。针对 SAR 图像中存在的像素点, 均满足下述条件:

$$\begin{aligned} \text{Max}_{\lambda \in \{R, G, B\}} \{O^\lambda(x, y)\} - O^\lambda(x, y) &\geq \\ \text{Max}_{\lambda \in \{R, G, B\}} \{Z^\lambda(x, y) u^\lambda(x, y)\} - Z^\lambda(x, y) u^\lambda(x, y) \end{aligned} \quad (14)$$

将绿、蓝通道作为图像增强过程中主要的色彩补偿通道^[9,10], 通过下述公式对红、蓝、绿通道对应的均值 S_R 、 S_G 、 S_B 展开计算:

$$\begin{cases} S_R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R(x, y) / mn \\ S_G = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n G(x, y) / mn \\ S_B = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B(x, y) / mn \end{cases} \quad (15)$$

式中: m 、 n 分别为像素在水平方向和垂直方向中存在的数量; $R(x, y)$ 、 $G(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 表示像素坐标为 (x, y) 的红、绿、蓝通道对应的像素值。

用 P_R 、 P_G 、 P_B 分别表示三通道平均值和中红、绿、蓝通道所占的比例, 三者之间的关系满足 $P = P_R S_R + P_G S_G + P_B S_B$ 。

设 L_{R1} 、 L_{G1} 、 L_{B1} , L_{R2} 、 L_{G2} 、 L_{B2} , L_{R3} 、 L_{G3} 、 L_{B3} 分别表示红、绿、蓝通道在一级、二级和三级场景下对应的色彩补偿率, 通过下述公式对其展开计算:

$$\begin{cases} L_{R1} = \frac{P}{S_R + 0.3P}, L_{G1} = \frac{P}{S_G}, L_{B1} = \frac{P}{S_B} \\ L_{R2} = \frac{P}{S_R + 0.3P}, L_{G2} = \frac{P}{S_R + \beta P}, L_{B2} = \frac{P}{S_B + \chi P} \\ L_{R3} = \frac{P}{S_R + 0.1P}, L_{G3} = \frac{P}{S_R + \chi P}, L_{B3} = \frac{P}{S_B + \beta P} \end{cases} \quad (16)$$

根据上述计算得到的补偿率, 对 SAR 图像展开校正, 获得校正后的图像 $O_{\text{out}}^\lambda(x, y)$:

$$\begin{aligned} O_{\text{out}}^\lambda(x, y) &= \\ &\begin{cases} 0, & O_{\text{in}}^\lambda(x, y) \cdot L_{\lambda i} < 0 \\ O_{\text{in}}^\lambda(x, y) \cdot L_{\lambda i}, & 0 \leq O_{\text{in}}^\lambda(x, y) \cdot L_{\lambda i} \leq 255 \\ 255, & O_{\text{in}}^\lambda(x, y) \cdot L_{\lambda i} > 255 \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $O_{\text{in}}^\lambda(x, y)$ 为待校正的 SAR 图像; $\lambda \in \{R, G, B\}$, $i \in \{1, 2, 3\}$ 。

2 图像目标识别

非平衡状态下机载激光合成孔径雷达图像目标识别方法采用扩展卷积胶囊网络识别 SAR 图像目标。

2.1 多尺度特征提取

采用空洞卷积运算提取 SAR 图像的多尺度特征, 空洞卷积运算具有如下优点:

(1) 通过卷积运算可以联系 SAR 图像中存在

的上下文语义信息,平滑 SAR 图像中存在的噪声。

(2)利用卷积运算可增加扩展卷积胶囊网络的宽度^[11,12],以此提取 SAR 图像中的丰富特征。

本文方法通过扩展率不同的空洞卷积运算多尺度提取 SAR 图像的特征,设 d' 为空洞卷积核对应的大小,可通过下式计算得到:

$$d' = d + (d - 1)(f - 1) \quad (18)$$

式中: f 为扩展率; d 为卷积核的标准大小。

2.2 特征增强与抑制

设 $G \in R^{C \times W \times H}$ 为需要精炼处理的特征图,经该部分处理后,上述特征图生成两个不同的特征注意力图 $V \in R^{C \times 1 \times 1}$ 、 $D \in R^{1 \times W \times H}$,其中 $V \in R^{C \times 1 \times 1}$ 的主要作用是在特征图中指导通道, $D \in R^{1 \times W \times H}$ 的主要作用是在特征图中指导重要区域,其中 C 用于描述特征通道在该层网络中的数量, H 为特征图的高, W 为特征图的宽。

特征精炼的具体过程如下:

$$\begin{cases} V = \sigma \{ \text{MLP} [\text{Avg-Pooling}(G)] + \\ \quad \text{MLP} [\text{Max-Pooling}(G)] \} \\ G_c = G \otimes V \\ D = \sigma \{ \text{Conv}_{7 \times 7} [\text{Avg-Pooling}(G_c); \\ \quad \text{Max-Pooling}(G_c)] \} \\ G_{\text{out}} = G_c \otimes D \end{cases} \quad (19)$$

结合最大池化运算 $\text{Max-Pooling}(\bullet)$ 和平均池化运算 $\text{Avg-Pooling}(\bullet)$ 对特征图 G 展开处理,生成对应的全局特征,利用多层感知器 MLP 处理上述特征,生成相应的注意力图 G_c ,通过对应元位元素相乘操作 $\otimes$ 对注意力图展开融合处理,利用卷积核 $\text{Conv}_{7 \times 7}$ 展开卷积操作,获得空间注意力图 D ,最终在对应元位元素相乘操作 $\otimes$ 的基础上获得精炼后的特征图 G_{out} ,上式中, σ 为 Sigmoid 函数。

通过上述过程获得不同尺度的精炼特征 G_1 、 G_2 、 G_3 ,融合上述特征,获得 SAR 图像的最终特征 $G = \text{Up}(G_1) + \text{Up}(G_2) + \text{Up}(G_3)$,其中 Up 为上采样运算。

2.3 特征学习

在扩展卷积胶囊网络中,设计胶囊单元用于学习上述提取的 SAR 图像特征,获得目标在图像中的微小变化情况,以此实现目标识别。

将上述获取的特征 G 作为胶囊层中的胶囊 s_j ,初级胶囊层中,通过加权求和全部胶囊的预测

向量获得第 j 个胶囊单元 $s_j = \sum_i c_{ij} l_{ji}$,其中 c_{ij} 用于分析本层胶囊与上层胶囊之间存在的关联关系,即耦合系数; l_{ji} 为胶囊 s_j 的预测向量,即 SAR 图像的特征学习 G 结果, $l_{ji} = W_{ij} \cdot s_j$ 。

融合胶囊层中全部胶囊单元的特征学习结果,获得 SAR 图像目标识别结果 X :

$$X = S_j \left(\sum_{i,j} l_{ji} + b \right) \quad (20)$$

式中: S_j 为非线性激活函数; m 为胶囊的数量; b 为胶囊层的偏置。

3 实验验证

为了验证非平衡状态下机载激光合成孔径雷达图像目标识别方法的整体有效性,需要对其展开测试。

图 1 为非平衡状态下采集的机载激光合成孔径雷达图像,在该状态下,图像存在模糊与畸变现象。现采用非平衡状态下机载激光合成孔径雷达图像目标识别方法、文献[3]方法和文献[4]方法对上述 SAR 图像展开处理,结果如图 2 所示。

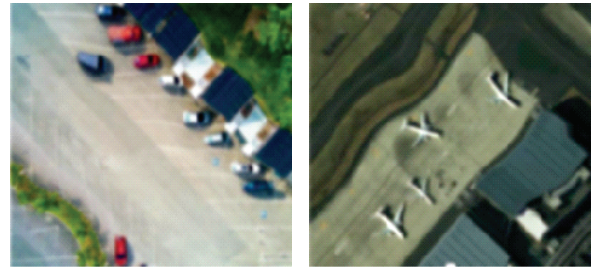


图 1 非平衡状态下采集的 SAR 图像

Fig. 1 SAR Images captured in non-equilibrium state

由图 2 可知,文献[3]方法处理后,图像模糊现象虽然有所缓解,但清晰度仍然较低,且无法校正图像中存在的畸变现象;文献[4]方法解决了图像模糊问题,但无法校正畸变;本文方法可有效降低图像模糊度并解决图像在非平衡状态下产生的畸变现象。因为本文方法建立了畸变校正模型,并补偿了图像中的颜色分量,进而提高了图像处理效果。

现采用上述方法对 SAR 图像展开目标定位,结果如图 3 所示。由图 3 可知,本文方法可准确识别 SAR 图像中的目标,文献[3]方法存在误识别现象,文献[4]方法存在漏识别现象,通过上述测试可知,本文方法具有较高的识别精度。

采用 ROC 曲线评价上述方法的目标识别精



图 2 不同方法的图像处理结果

Fig. 2 Image processing results of different methods

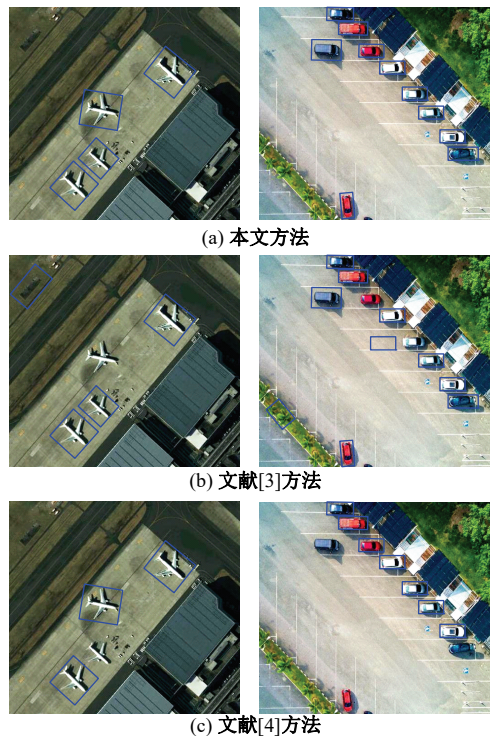


图 3 图像目标识别结果

Fig. 3 Image target recognition results

度,结果如图 4 所示。由图 4 可知,本文方法 ROC 曲线与 x 轴围成的面积远大于其他两种方法,表明在 SAR 图像识别领域中,本文方法具有较高的

识别精度。

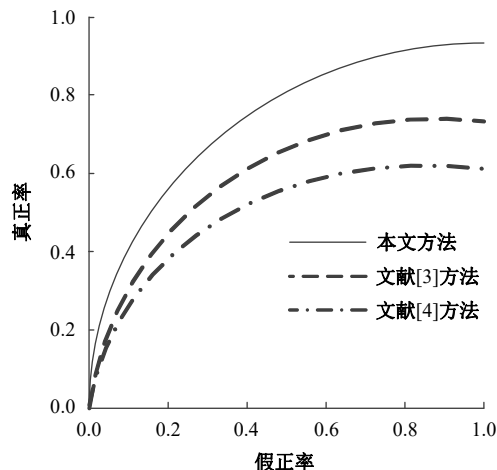


图 4 目标识别精度

Fig. 4 Target recognition accuracy

4 结束语

针对目前 SAR 图像目标识别方法存在的图像处理效果差、图像识别精度低的问题,提出了非平衡状态下载激光合成放空井雷达图像目标识别方法,针对非平衡状态下采集图像存在的质量问题,对 SAR 图像展开校正与补偿处理,通过扩展卷积胶囊网络实现目标识别,经验证,本文方法在 SAR 图像目标识别领域中具有良好的识别性能。

参考文献:

- [1] 宋玉成, 李景润, 田甜, 等. 跨模态域自适应 SAR 图像舰船检测与识别[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2022, 50(11): 107-113.
Song Yu-cheng, Li Jing-run, Tian Tian, et al. Cross modal domain adaptive SAR image ship detection and recognition[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2022, 50(11): 107-113.
- [2] 周晓玲, 张朝霞, 鲁雅, 等. 基于改进 R-FCN 的 SAR 图像识别[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(4): 1202-1209.
Zhou Xiao-ling, Zhang Chao-xia, Lu Ya, et al. SAR image recognition based on improved R-FCN[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(4): 1202-1209.
- [3] 张振中. 基于更新分类器的合成孔径雷达图像目标识别[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 226-233.
Zhang Zhen-zhong. Ship detection and recognition in SAR images with cross-modality domain adaption[J].

- Laser and Optoelectronics Progress, 2021, 58 (14): 226-233.
- [4] 陈婕, 潘洁, 杨小英. 结合非采样剪切波和MCCA的SAR目标识别方法[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(3): 89-94.
- Chen Jie, Pan Jie, Yang Xiao-ying. SAR target recognition via combination of NSCT and MCCA[J]. Journal of Detection & Control, 2023, 45(3): 89-94.
- [5] 余远平, 李海艳, 甘华权, 等. 基于卡尔曼滤波的双约束CUP-VISAR压缩图像重构算法[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(8): 80-88.
- Yu Yuan-ping, Li Hai-yan, Gan Hua-quan, et al. Double-constrained CUP-VISAR compressed image reconstruction algorithm based on Kalman filtering[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(8): 80-88.
- [6] 刘芬, 范洪强, 吕涛, 等. 基于卡尔曼滤波的含噪声小样本数据处理方法[J]. 上海大学学报:自然科学版, 2022, 28(3): 427-439.
- Liu Fen, Fan Hong-qiang, Lv Tao, et al. Kalman filter based method for processing small noisy sample data[J]. Journal of Shanghai University(Natural Science Edition), 2022, 28(3): 427-439.
- [7] 李成城, 马立森, 田原, 等. 基于CLAHE与卡尔曼滤波的掘进机机载视频稳像算法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(5): 66-73.
- Li Cheng-cheng, Ma Li-sen, Tian Yuan, et al. An onboard video stabilization algorithm for roadheader based on CLAHE and Kalman filter[J]. Industry and Mine Automation, 2023, 49(5): 66-73.
- [8] 王杰, 经俊森, 陈正伟, 等. 基于Harris和卡尔曼滤波的农业机器人田间稳像算法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 30-36, 53.
- Wang Jie, Jing Jun-sen, Chen Zheng-wei, et al. Field Image stabilization algorithm for agricultural robot based on harris and kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 30-36, 53.
- [9] 杨爱萍, 邢金娜, 刘瑾, 等. 利用中通道补偿的单幅图像去雾[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2021, 42(2): 180-188.
- Yang Ai-ping, Xing Jin-na, Liu Jin, et al. Single image dehazing based on middle channel compensation[J]. Journal of Northeastern University Natural Science, 2021, 42(2): 180-188.
- [10] 杨森, 王海文, 胡珂, 等. 一种基于色彩补偿的水下图像综合增强算法[J]. 图学学报, 2021, 42(1): 59-64.
- Yang Miao, Wang Hai-wen, Hu Ke, et al. An underwater image comprehensive enhancement algorithm based on color compensation[J]. Journal of Graphics, 2021, 42(1): 59-64.
- [11] 周文荣, 张葵, 肖述. 融合图卷积和胶囊网络的内容感知排序推荐[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(1): 158-165.
- Zhou Wen-rong, Zhang Yan, Xiao Shu. Content-aware ranking recommendation based on graph convolutional network and capsule network[J]. Computer Engineering and Design, 2023, 44(1): 158-165.
- [12] 邓强, 王航, 彭敏俊, 等. 基于时间卷积胶囊网络的核动力装置事故诊断技术研究[J]. 原子能科学技术, 2023, 57(2): 302-312.
- Deng Qiang, Wang Hang, Peng Min-jun, et al. Research on accident diagnosis technology of nuclear power plant based on time convolution capsule network[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2023, 57(2): 302-312.