

DecoFlow: Parameter-Isolated yet Efficient Continual Anomaly Detection

Author Name^{a,1}, Author Name^{b,1}, Corresponding Author^{*,b}

^aAddress 1
^bAddress 2

Abstract

지속적 이상 탐지는 파멸적 망각 없이 순차적으로 도착하는 제품 카테고리에서 결함을 식별하는 학습을 필요로 한다. 기존 방법들은 리플레이, 정규화, 또는 작업별 판별자/프롬프트를 사용하지만 망각을 완전히 제거하지 못하며, 완전한 파라미터 격리는 효율성 비용을 수반한다—이것이 격리-효율성 딜레마이다.

본 연구는 normalizing flow의 구조적 특성을 활용한다: 커플링 레이어의 가역성 보장은 서브넷 구현과 무관하다. 이 통찰은 커플링 서브넷을 동결된 공유 베이스와 작업별 저차원 어댑터(LoRA)로 분해할 수 있게 하여, 작업당 8%의 오버헤드만으로 완전한 파라미터 격리를 달성한다. 동결 베이스에 내재된 경직성을 해결하기 위해, 상호작용 효과 분석을 통해 검증된 세 가지 핵심 구성요소—분포 정렬 어댑터, 테일 인식 손실, 심층 가역 어댑터—를 도입하며, 각각은 범용적 성능 향상 요소가 아닌 동결 베이스 조건에서 특별히 필요한 것으로 검증되었다.

MVTec-AD (15개 클래스, 5회 실행)에서 DecoFlow는 제로 망각과 함께 $98.03 \pm 0.19\%$ 이미지 수준 AUROC와 $53.78 \pm 0.73\%$ 픽셀 수준 AP를 달성하며, 단일 작업 성능의 98.7%를 유지한다.

Key words: Continual Learning, Anomaly Detection, Normalizing Flow, Parameter Isolation, Low-Rank Adaptation

1. Introduction

산업 환경에서의 이상 탐지(Anomaly Detection)는 제조 공정의 품질 관리와 결함 검출에 필수적인 기술이다. 최근 딥러닝 기반 이상 탐지 방법론은 정상 데이터만을 사용하여 학습하는 단일 클래스 분류(One-Class Classification) 패러다임을 채택하며, 특히 Normalizing Flow ?, PatchCore Roth et al. (2022), 그리고 재구성 기반 방법들이 높은 성능을 보여주고 있다.

그러나 실제 산업 현장에서는 단일 제품이 아닌 다양한 제품 클래스를 순차적으로 학습해야 하는 상황이 빈번하게 발생한다:

*Corresponding author

Email addresses: author@example.com (Author Name), author@example.com (Author Name), corresponding@example.com (Corresponding Author)

¹Equal Contribution

- **제조 라인의 확장**: 새로운 제품(예: 나사 → 캡슐 → 트랜지스터)이 생산 라인에 추가
- **데이터 프라이버시**: 이전 제품의 데이터를 저장하거나 재사용할 수 없는 규제 환경
- **메모리 제약**: 모든 제품의 데이터를 동시에 저장하고 학습하기 어려운 엣지 디바이스 환경

이러한 환경에서 기존 이상 탐지 모델은 **파멸적 망각(Catastrophic Forgetting)** 문제에 직면한다. 새로운 제품 클래스를 학습하면 이전에 학습한 제품들에 대한 탐지 성능이 급격히 하락하는 현상이다. 수식으로 표현하면, Task $t - 1$ 까지 학습한 모델 f_θ 가 Task t 를 학습한 후 $f_{\theta'}$ 가 되었을 때:

$$\text{Forgetting} = \frac{1}{t-1} \sum_{i=0}^{t-1} (\text{AUROC}_{f_\theta}(\mathcal{D}_i) - \text{AUROC}_{f_{\theta'}}(\mathcal{D}_i)) \gg 0 \quad (1)$$

여기서 \mathcal{D}_i 는 Task i 의 테스트 데이터셋이다.

기존의 지속 학습(Continual Learning) 방법론들은 이 문제를 다양한 전략으로 해결하고자 한다:

정규화 기반 방법 (Regularization-based):

- EWC Kirkpatrick et al. (2017): 중요한 파라미터의 변화를 제한하는 Fisher Information 기반 정규화
- LwF Li and Hoiem (2017): 이전 모델의 출력을 중류(Distillation)하여 지식 보존
- **한계점**: 작업 수 증가 시 정규화 항의 축적으로 새로운 작업 학습 능력 저하

리플레이 기반 방법 (Replay-based):

- 이전 작업의 데이터 일부를 메모리 버퍼에 저장하여 재학습에 활용
- **한계점**: 메모리 오버헤드, 데이터 프라이버시 문제, 버퍼 크기에 비례하는 성능

아키텍처 기반 방법 (Architecture-based):

- PackNet ?: 작업별로 네트워크의 일부를 할당하고 고정
- Progressive Networks ?: 새로운 작업마다 새로운 컬럼 추가
- **한계점**: 파라미터 효율성 저하, 작업 수에 따른 모델 크기 증가

특히 이상 탐지 도메인에서의 지속 학습은 추가적인 도전 과제를 가진다:

- **추론 시 Task ID의 부재**: 기존 지속 학습 연구는 추론 시 Task ID가 주어진다고 가정 하지만, 실제 산업 환경에서는 입력 이미지가 어떤 제품인지 사전에 알 수 없음
- **밀도 추정(Density Estimation)의 민감성**: Normalizing Flow 기반 방법은 정상 분포를 정밀하게 추정해야 하므로, 분포의 미세한 왜곡도 성능 저하로 이어짐
- **작업 간 분포 격차**: 서로 다른 제품(예: 가죽 vs. 나사)의 특징 분포가 크게 다름

격리-효율성 딜레마 (*Isolation-Efficiency Dilemma*).. 기존 접근법들의 한계는 지속 학습의 근본적인 구조적 제약을 드러낸다: **파라미터 격리(Parameter Isolation)**와 **파라미터 효율성(Parameter Efficiency)**은 상호 배타적인 것으로 보인다.

Design Principle 1 (격리-효율성 딜레마). 파라미터 θ 를 공유하는 모델에서, 작업 t 에 대한 그레이디언트 업데이트 $\theta \leftarrow \theta - \eta \nabla \mathcal{L}_t(\theta)$ 는 정의상 모든 이전 작업의 출력에 영향을 미쳐 망각을 유발한다. 완전한 격리($FM = 0$)를 위해서는 작업별 파라미터 $\{\theta_t\}_{t=0}^{T-1}$ 가 필요하며, 이는 $O(T \times |\theta|)$ 의 메모리 비용을 발생시킨다.

표 1는 MVTec-AD에서 5개의 순차적 작업을 통해 이 딜레마를 실증적으로 검증한다:

Table 1: 격리-효율성 딜레마: 기존 방법들은 실용적인 메모리 오버헤드로 완전한 망각 방지($FM=0$)를 달성하지 못한다. MVTec-AD (5개 클래스) 파일럿 실험.

방법	I-AUC	FM	메모리/작업	Zero FM?
Full Copy (Oracle)	98.2%	0%	100% ($\times T$)	✓
Fine-tune	60.2%	38.3%	0%	✗
EWC	87.4%	4.8%	0%	✗
Replay (1K samples)	91.2%	1.9%	+15MB	✗
DecoFlow (Ours)	98.1%	0%	+8%	✓

기존 방법들이 완전한 망각 방지를 달성하지 못하는 이유..

- **정규화 기반 (EWC, MAS)**: 제약 조건 $\lambda \sum_i F_i(\theta_i - \theta_i^*)^2$ 는 파라미터 변화를 제한하지만 완전히 제거하지는 못한다. 망각은 완화(*mitigated*)될 뿐, 방지(*prevented*)되지 않는다.
- **리플레이 기반**: 버퍼 크기 K 와 T 개의 작업이 있을 때, 각 작업은 K/T 개의 리플레이 샘플만 받는다. $T \rightarrow \infty$ 일 때, 리플레이 밀도는 0에 수렴한다.
- **아키텍처 기반 (PackNet)**: 이진 마스크는 격리를 제공하지만, T 가 증가함에 따라 용량 포화 문제가 발생한다.

핵심 통찰: 구조적 특성을 통한 딜레마 해결.. 이 딜레마는 격리를 위해 전체 파라미터 복사가 필요하다고 가정한다. 우리는 Normalizing Flow의 커플링 레이어가 고유한 구조적 특성—임의 함수 특성(*Arbitrary Function Property*)—을 가지고 있어 모델의 유효성을 손상시키지 않으면서 파라미터 분해가 가능함을 관찰하였다. 이를 통해 다음을 달성할 수 있다:

$$\mathbf{W}_{\text{task}} = \mathbf{W}_{\text{shared}} + \Delta \mathbf{W}_{\text{task}}, \quad |\Delta \mathbf{W}| \ll |\mathbf{W}| \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{W}_{\text{shared}}$ 는 동결되어(격리) $\Delta \mathbf{W}_{\text{task}}$ 는 저차원(효율성)으로, 두 제약 조건을 동시에 만족한다.

본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하기 위해 **DecoFlow (Mixture of LoRA Experts for Normalizing Flow)**를 제안한다. 핵심 아이디어는 Parameter Isolation을 통한 완벽한 망각 방지와 One-stage Task-agnostic 추론이다.

핵심 통찰 1: 공유 Base + 분리된 Adapter.

- Normalizing Flow의 기본 가중치(Base)는 첫 번째 작업(Task 0)에서 학습 후 **완전히 동결**
- 이후 작업들은 경량 어댑터(LoRA, WhiteningAdapter, ACL)만 학습
- 작업별 어댑터가 완전히 분리되어 있으므로 작업 간 간섭이 **원천적으로 차단**

핵심 통찰 2: 프로토타입 기반 원스테이지 라우팅.

- 학습 중 각 작업의 특징 분포 통계(평균, 공분산)를 프로토타입으로 저장
- 추론 시 입력 이미지와 각 프로토타입 간 Mahalanobis 거리를 계산
- 가장 가까운 프로토타입의 작업에 해당하는 어댑터를 활성화
- **별도의 Task ID 예측 단계 없이** 단일 추론으로 라우팅과 이상 탐지를 동시 수행

핵심 통찰 3: 비선형 매니폴드 적응 (ACL).

- 선형 LoRA는 저차원 부분공간에서의 적응만 가능하여 복잡한 분포 차이를 표현하기 어려움
- Affine Coupling Layer (ACL)는 가역적 비선형 변환을 통해 작업별 매니폴드를 정밀하게 보정
- Normalizing Flow의 밀도 추정 속성을 보존하면서 작업 특화 적응 달성

본 논문의 주요 기여는 다음과 같다:

1. **격리-효율성 해결을 위한 구조적 연결:** Normalizing Flow 커플링 레이어의 임의 함수 특성(Arbitrary Function Property)—서브넷 파라미터화와 무관하게 가역성이 보장되는 특성—이 지속 학습에서 파라미터 분해를 위한 고유한 구조적 기반을 제공함을 확립하였다. 이 통찰을 통해 작업당 8%의 오버헤드만으로 완전한 파라미터 격리가 가능하다.
2. **DecoFlow 프레임워크:** 이 통찰을 바탕으로, 커플링 서브넷을 동결된 공유 베이스와 작업별 저차원 어댑터로 분해하는 DecoFlow (Mixture of LoRA Experts for Normalizing Flow)를 제안한다. 이를 통해 정규화나 리플레이가 아닌 설계 자체로 완전한 망각 방지를 달성한다.
3. **상호작용 효과 검증을 통한 핵심 구성요소:** General Distribution Adaptation (GDA), Tail-Aware Loss (TAL), Affine Coupling Layer (ACL)의 세 가지 구성요소를 도입하며, 각각 상호작용 효과 분석(Interaction Effect Analysis)을 통해 일반적인 성능 향상 요소가 아닌 동결 베이스 조건에서 특별히 필요한 핵심 요소임을 검증하였다. 이 방법론적 프레임워크는 핵심 구성요소와 선택적 개선 요소를 구분한다.
4. **포괄적 실험 검증:** MVTec-AD (15개 클래스, 5회 독립 실행)에서 DecoFlow는 망각 없이 $98.03 \pm 0.19\%$ 이미지 수준 AUROC와 $53.78 \pm 0.73\%$ 픽셀 수준 AP를 달성하며, 100% 라우팅 정확도로 단일 작업 오라클 성능의 98.7%를 유지한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Section 2에서는 이상 탐지, 지속 학습, Normalizing Flow에 대한 관련 연구를 검토한다. Section 3에서는 파라미터 분해에 대한 핵심 통찰로 시작하여 아키텍처와 핵심 구성요소를 설명하는 DecoFlow 프레임워크를 제시한다. Section 4에서는 실험 설정, 주요 결과, 상호작용 효과 분석 및 절제 연구(Ablation Study)를 제공한다. Section 5에서는 논의와 향후 연구 방향으로 결론을 맺는다.

2. Related Work

2.1. Anomaly Detection

산업 이상 탐지는 정상 샘플만으로 학습하여 비정상 샘플을 탐지하는 단일 클래스 분류 문제로 정의된다. 기존 방법론은 크게 재구성 기반, 특징 임베딩 기반, 그리고 밀도 추정 기반으로 분류된다.

2.1.1. 재구성 기반 방법 (*Reconstruction-based*)

- **기본 아이디어:** 정상 샘플만으로 오토인코더를 학습하면, 비정상 샘플은 재구성 오류가 크다는 가정
- **대표 방법론:**
 - AutoEncoder ?: 표준 오토인코더 구조를 이상 탐지에 적용
 - VAE ?: 잠재 공간에 정규 분포 제약을 추가한 변분 오토인코더
 - MemAE ?: 메모리 뱅크를 활용하여 비정상 샘플의 재구성을 방지
- **한계점:**
 - 복잡한 이상 패턴도 재구성할 수 있는 “과도한 일반화(Over-generalization)” 문제
 - 픽셀 수준의 재구성 오류가 미세한 구조적 결함을 포착하지 못함

2.1.2. 특징 임베딩 기반 방법 (*Feature Embedding-based*)

- **기본 아이디어:** 사전 학습된 CNN/ViT의 풍부한 특징 공간에서 정상 샘플의 분포를 모델링
- **대표 방법론:**
 - SPADE ?: K-NN 기반 정상 특징과의 거리를 이상 점수로 사용
 - PaDiM ?: 위치별 다변량 가우시안으로 정상 분포 모델링
 - PatchCore Roth et al. (2022): 코어셋 서브샘플링으로 효율적인 메모리 뱅크 구축
- **한계점:** 메모리 뱅크 크기에 따른 추론 시간 증가, K-NN 검색의 계산 복잡도

2.1.3. 밀도 추정 기반 방법 (*Density Estimation-based*)

- **기본 아이디어:** 정상 샘플의 확률 밀도 $p(\mathbf{x})$ 를 명시적으로 추정하고, 저밀도 영역을 이상으로 판단
- **대표 방법론:**
 - DifferNet ?: Normalizing Flow를 이상 탐지에 최초 적용
 - CFLOW-AD Gudovskiy et al. (2022): 조건부 Normalizing Flow로 위치별 밀도 추정
 - FastFlow ?: 효율적인 Flow 구조로 추론 속도 개선
- **장점:** 확률적 해석 가능, 메모리 뱅크 불필요로 확장성 우수
- **한계점:** 지속 학습 환경에서의 망각 문제 미해결

본 연구는 밀도 추정 기반 방법을 기반으로 하되, 지속 학습 환경에서의 망각 문제를 LoRA와 DIA를 통해 해결한다.

2.2. Continual Learning

지속 학습(Continual Learning)은 순차적으로 도착하는 작업들을 이전 지식을 유지하면서 학습하는 문제이다.

2.2.1. 정규화 기반 방법 (*Regularization-based*)

- **핵심 아이디어:** 이전 작업에 중요한 파라미터의 변화를 제한하는 정규화 항 추가
- **대표 방법론:**
 - EWC (Elastic Weight Consolidation) Kirkpatrick et al. (2017): Fisher Information 기반 정규화
 - LwF (Learning without Forgetting) Li and Hoiem (2017): Knowledge Distillation으로 이전 출력 보존
- **한계점:** 작업 수 증가 시 새로운 작업 학습 능력 감소

2.2.2. 리플레이 기반 방법 (*Replay-based*)

- **핵심 아이디어:** 이전 작업의 데이터를 일부 저장하여 새로운 작업 학습 시 함께 학습
- **대표 방법론:** Experience Replay, iCaRL ?, GEM ?
- **한계점:** 메모리 버퍼 크기에 비례하는 저장 비용, 데이터 프라이버시 문제

2.2.3. 아키텍처 기반 방법 (*Architecture-based*)

- **핵심 아이디어:** 작업별로 네트워크 구조를 분리하거나 확장
- **대표 방법론:** Progressive Networks ?, PackNet ?
- **장점:** Parameter Isolation으로 망각 완전 방지
- **한계점:** 작업 수에 비례하여 모델 크기 증가, 추론 시 Task ID 필요

2.2.4. Parameter-Efficient Fine-Tuning (PEFT)

- **핵심 아이디어:** 대규모 사전 학습 모델을 소수의 파라미터만 수정하여 새로운 작업에 적응
- **LoRA (Low-Rank Adaptation)** Hu et al. (2022): 가중치 변화를 저랭크 행렬로 분해

$$\mathbf{W}' = \mathbf{W} + \Delta\mathbf{W} = \mathbf{W} + \frac{\alpha}{r}\mathbf{BA} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{r \times d_{in}}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{d_{out} \times r}$, $r \ll \min(d_{in}, d_{out})$

- 본 연구는 LoRA를 Normalizing Flow에 적용하여 지속 학습 이상 탐지를 구현

2.3. Normalizing Flows for Anomaly Detection

Normalizing Flow ?는 가역 변환을 통해 복잡한 분포를 간단한 기저 분포로 매핑하는 생성 모델이다.

- **변수 변환 공식:** 가역 함수 $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^d$ 에 대해

$$p_X(\mathbf{x}) = p_Z(f(\mathbf{x})) \left| \det \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right| \quad (4)$$

- **이상 탐지 적용:** 정상 데이터의 밀도를 학습하고, 저밀도 영역을 이상으로 판단
- **대표 방법론:** DifferNet, CFLOW-AD, FastFlow, CsFlow

본 연구는 Normalizing Flow의 지속 학습 한계를 LoRA와 DIA를 통한 Parameter Isolation 으로 해결한다.

2.4. Mixture of Experts (MoE)

Mixture of Experts ?는 다수의 전문가 네트워크와 게이팅 네트워크로 구성되어, 입력에 따라 적합한 전문가를 선택하는 구조이다.

- **기본 구조:** $y = \sum_{i=1}^N g_i(\mathbf{x}) \cdot E_i(\mathbf{x})$
- 본 연구의 MoLE (Mixture of LoRA Experts)는 MoE의 개념을 계승하되, 전문가를 경량 LoRA 어댑터로 구현
- 게이팅은 프로토타입 기반 Mahalanobis 거리를 사용하여 추가 학습 없이 작업을 선택

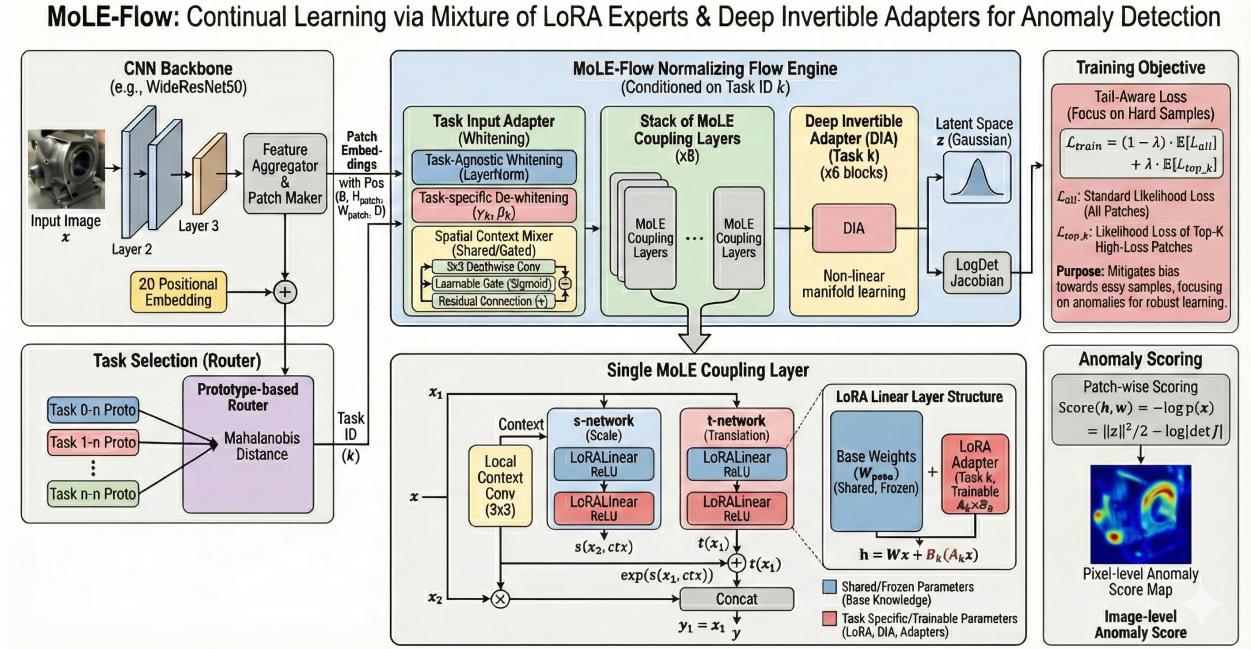


Figure 1: 산업 이미지에 대한 지속적 이상 탐지를 위한 제안된 DecoFlow 프레임워크 개요. 순차적 작업이 주어지면, 베이스 normalizing flow 백본은 첫 번째 작업에서 학습된 후 동결된다. 각 새로운 작업에 대해 경량의 작업별 어댑터(WhiteningAdapter, LoRA, ACL)만 학습된다. 추론 시, 프로토타입 기반 Mahalanobis 라우터가 Task ID 없이 각 샘플을 가장 관련성 높은 전문가에게 할당한다.

3. Proposed Method

3.1. DecoFlow 아키텍처

원리 1를 기반으로, DecoFlow (Mixture of LoRA Experts for Normalizing Flow)는 지속적 이상 탐지를 위한 파라미터 분해를 구현한다. 프레임워크는 특징 추출기, MoLE 기반 Normalizing Flow, 작업별 어댑터, 그리고 프로토타입 기반 라우터로 구성된다.

Section 1에서 확립한 바와 같이, NF 커플링 레이어의 임의 함수 특성은 서브넷을 다음과 같이 분해할 수 있게 한다:

$$\text{MoLESubnet}(\mathbf{x}) = \text{MLPBase}(\mathbf{x}; \Theta_{\text{base}}) + \frac{\alpha}{r} \mathbf{B}_t(\mathbf{A}_t \mathbf{x}), \quad (5)$$

여기서 Θ_{base} 는 Task 0 이후 동결되고 $\{\mathbf{A}_t, \mathbf{B}_t\}$ 는 작업별 저차원 어댑터이다. 이를 통해 $O(N \times \text{rank})$ 메모리 스케일링만으로 완전한 파라미터 격리를 달성한다.

전체 파이프라인은 다음과 같다:

1. 백본에서 특징 추출 및 패치 임베딩 생성
2. 패치 임베딩에 위치 인코딩 추가
3. General Distribution Adaptation을 통한 분포 정렬
4. 지역 이웃 정보를 위한 공간 문맥 혼합
5. LoRA를 적용한 Normalizing Flow를 통한 확률 분포 추정
6. 우도 기반 이상 점수 산출

수식으로 표현하면:

$$\mathbf{x} \xrightarrow{\text{Backbone}} \mathbf{F} \xrightarrow{\text{PE}} \mathbf{F}' \xrightarrow{\text{Whitening}} \hat{\mathbf{F}} \xrightarrow{\text{SCM}} \tilde{\mathbf{F}} \xrightarrow{\text{NF+LoRA}} \mathbf{z}' \xrightarrow{\text{ACL}} (\mathbf{z}, \log |\det \mathbf{J}|) \quad (6)$$

표기법.. $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{B \times H \times W \times D}$ 는 배치 크기 B , 공간 해상도 $H \times W$, 특징 차원 D 를 가지는 패치 임베딩 텐서를 나타낸다. $\mathbf{x}_{u,v} \in \mathbb{R}^D$ 는 위치 (u, v) 의 개별 패치 벡터를 나타낸다. $t \in \{0, 1, \dots, T - 1\}$ 는 작업 인덱스이고, \mathbf{J}_f 는 함수 f 의 야코비안 행렬을 나타낸다. λ_{tail} 은 Tail-Aware Loss의 가중치이고, λ_{reg} 는 공분산 정규화 항이다.

Task 0에서는 기본 Normalizing Flow와 작업별 구성요소(LoRA, General Distribution Adaptation, ACL)가 함께 학습된다. Task 0 완료 후 기본 파라미터는 동결되고, 이후 작업들은 작업별 어댑터만 학습한다.

3.2. Feature Extraction & Preprocessing

입력 이미지의 특징을 추출하고 각 작업별 전문가를 학습시키기 위한 입력으로 사용하기 위해 다음과 같은 전처리를 수행한다.

3.2.1. Feature Extractor & Patch Embedding

- 사전 학습된 Feature Extractor를 통해 특징을 추출한다.
- 이때 intermediate layer의 출력을 활용하여 다중 스케일 정보(multi-scale information)를 얻는다.
- PatchCore와 유사하게 입력 이미지의 지역적 특성을 추출한다.
- 추출된 특징 맵을 패치 단위로 분할한 뒤 풀링 과정을 거쳐 패치 임베딩을 생성한다.
- 최종적으로 $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{B \times H \times W \times D}$ 형태의 패치 임베딩을 얻으며, 여기서 $H \times W$ 는 패치 그리드 크기, D 는 특징 차원이다.

3.2.2. Positional Encoding

- Normalizing Flow는 permutation invariance 특성을 갖기 때문에, 2차원 구조가 아닌 patch embedding 각각이 독립적으로 처리된다.
- 각 패치의 공간적 위치 정보를 보존하기 위해 2D sinusoidal positional encoding \mathbf{P} 를 패치 임베딩에 더한다.
- 수식으로 표현하면 다음과 같다:

$$\mathbf{F}' = \mathbf{F} + \mathbf{P}, \quad \mathbf{P} \in \mathbb{R}^{H \times W \times D} \quad (7)$$

3.3. 핵심 구성요소: 동결 베이스의 경직성 보상

동결 베이스 설계는 완전한 망각 방지를 달성하지만 구조적 경직성을 도입한다. 우리는 세 가지 핵심 구성요소—General Distribution Adaptation (GDA), Tail-Aware Loss (TAL), Affine Coupling Layer (ACL)—를 식별하며, 이들은 일반적인 성능 향상 요소가 아닌 동결 베이스 패러다임의 특정 결과에 대한 필수적인 보상이다. Section 4.3.2에서 상호작용 효과 분석을 통해 이 구분을 검증한다.

3.3.1. General Distribution Adaptation (분포 정렬)

문제: 입력 인터페이스 불일치..

- DecoFlow는 첫 번째 작업 학습 이후 Base Flow의 파라미터를 동결(Freeze)
- 이는 모델이 초기 학습 데이터의 분포 통계량에 피팅됨을 의미
- 새로운 작업의 입력 분포가 이와 크게 다를 경우(Covariate Shift), 다음과 같은 문제 발생:
 - 고정된 Base Network의 가중치는 최적의 활성화를 일으키지 못함
 - 제한된 용량(Low-Rank)을 가진 LoRA가 전역적인 분포 차이까지 보정해야 하는 과도한 부담
 - 학습 초기 수렴 지연 및 최적화 난이도 증가

해결책: 분포 정렬.. General Distribution Adaptation은 입력 분포를 동결된 베이스의 예상 입력 범위에 정렬한다:

- 입력 데이터를 강제로 표준 정규 분포로 정렬(Alignment)
- 고정된 Base Flow가 항상 일관된 스케일의 입력을 처리하도록 보장
- LoRA가 분포 보정이 아닌 작업 고유의 미세 특징 학습에만 집중 가능
- 파라미터 분리 구조 하에서 학습 효율성과 안정성 극대화

General Distribution Adaptation은 Whitening과 De-whitening의 두 단계로 구성됨.

3.3.2. Task-Agnostic Whitening

- 입력 특징 \mathbf{F}' 에 대해 학습 파라미터가 없는 LayerNorm 적용
- 평균 0, 분산 1의 표준 정규 분포로 변환:

$$\mathbf{x}_{\text{white}} = \text{LayerNorm}(\mathbf{F}', \text{elementwise_affine} = \text{False}) = \frac{\mathbf{F}' - \mathbb{E}[\mathbf{F}']}{\sqrt{\text{Var}[\mathbf{F}']} + \epsilon} \quad (8)$$

- Task 0 이후 Base Flow는 동결되므로, 새로운 작업의 입력 분포가 달라지면 모델이 제대로 반응하지 못함
- 새로운 작업의 데이터가 들어와도 강제 정규화를 통해 입력을 표준화하여 분포의 스케일 차이를 미리 제거
- Normalizing Flow의 최적화 난이도를 낮추고 학습 안정성 확보
- 모든 데이터를 표준 정규 분포로 정규화한 후, De-whitening을 통해 Base Flow의 최적 동작 범위 내로 재조정

3.3.3. Task-Specific De-whitening

- Whitening으로 제거된 통계적 특성에 해당 작업을 가장 잘 표현할 수 있는 최적의 통계적 특성을 다시 부여
- 단순 복원이 아닌, 고정된 Base Flow가 처리하기 가장 효율적인 형태로 데이터를 재조정(Recalibration)
- 정규화된 특징 $\mathbf{x}_{\text{white}}$ 에 대해 작업별 학습 가능한 파라미터 γ_t (스케일)와 β_t (이동)를 적용한 아핀 변환:

$$\gamma_t = 0.5 + 1.5 \cdot \sigma(\gamma_{\text{raw}}) \quad (9)$$

$$\beta_t = 2.0 \cdot \tanh(\beta_{\text{raw}}) \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{F}}_t = \gamma_t \odot \mathbf{x}_{\text{white}} + \beta_t \quad (11)$$

여기서 $\sigma(\cdot)$ 는 시그모이드 함수

- De-whitening 단계에서 작업별 학습 파라미터를 통해 각 작업의 고유한 특성을 복원
- 단순한 원래 분포의 복원이 아니라, 고정된 모델의 매니폴드(Manifold) 상에서 각 작업 데이터가 가장 잘 표현될 수 있도록 최적의 통계적 위치를 학습하는 과정
- 모든 작업에서 모든 특징 채널이 동등하게 중요한 것은 아니므로, γ_t 는 채널별로 특징의 중요도를 조절:
 - γ_t 값 증가 → 해당 특징 증폭, Flow 모델이 더 민감하게 반응
 - γ_t 값 감소 → 해당 특징 억제, 노이즈로 간주
 - 예시: '가죽' 작업에서는 미세한 질감(Texture) 채널의 γ_t 증가, '나사' 작업에서는 전체적인 형태(Shape) 채널의 γ_t 증가

아핀 변환을 사용하는 이유: De-whitening에서 아핀 변환(Affine Transformation, $\mathbf{y} = \gamma \odot \mathbf{x} + \beta$)을 사용하는 이유는 통계적 특성(평균, 분산)만 정확하게 조절하고, 데이터가 가진 본질적인 구조(Shape/Pattern)는 훼손하지 않기 위해서이다.

- 통계적 정합성 (Statistical Consistency):

- 정규 분포를 다른 정규 분포로 변환하는 가장 자연스러운 방법은 아핀 변환이다.
- Whitening은 데이터를 표준 정규 분포 $\mathcal{N}(0, 1)$ 로 만들고, De-whitening은 이를 작업별 고유 분포 $\mathcal{N}(\mu_t, \sigma_t^2)$ 로 이동시킨다.
- 비선형 변환(예: x^2 , $\exp(x)$)을 사용하면 분포의 모양 자체가 왜곡되어 정규 분포의 성질(Bell curve)을 잃어버리며, 이는 가우시안 기반 Normalizing Flow의 처리를 어렵게 만든다.

- 구조 보존 (Structure Preservation):

- 아핀 변환은 공간을 늘리거나(Scale), 이동(Shift)만 하므로 직선은 직선으로 남고, 평행선은 평행하게 유지된다.
- 이미지 패치 내부의 픽셀 관계는 물체의 형상을 나타내므로, 아핀 변환은 이미지가 조금 밝아지거나 대비가 강해질 뿐 ”고양이”가 ”강아지”처럼 보이게 모양이 바뀌지 않는다.
- 반면 비선형 변환은 공간을 구부리거나 비틀어 직선이 곡선이 되고 모양이 뒤틀리므로, **데이터의 내용(Content)** 자체를 변질시킬 위험이 있다.
- Adapter의 역할은 ”입력의 톤(Tone)을 맞추는 것”이지, ”내용을 재창조하는 것”이 아니므로 형태를 보존하는 아핀 변환이 최적이다.

- **역할 분담 (Division of Labor):**

- DecoFlow 전체 구조에서 Adapter는 서로 다른 도메인(가죽, 나사)의 **시작점(Start Point)**을 맞춰주는 역할로, 가장 기초적인 1차 모멘트(평균)와 2차 모멘트(분산)만 빼놓고 정확하게 맞추면 된다.
- 실제 데이터의 복잡하고 비선형적인 분포 모델링은 Base Flow와 LoRA가 담당한다.
- Adapter가 굳이 복잡한 비선형 변환을 수행하여 연산량을 늘리고 최적화를 어렵게 만들 필요가 없으며, 이는 Batch Normalization Ioffe and Szegedy (2015)이 학습 가능한 파라미터 γ , β 를 두어 표현력을 복원하는 원리와 동일하다.
- 또한, 본 접근법은 FiLM(Feature-wise Linear Modulation) Perez et al. (2018)의 조건부 아핀 변환과 개념적으로 연결되며, 이를 지속 학습 환경의 도메인 적응에 특화시킨 것으로 볼 수 있다.

결론적으로, Affine transformation은 **데이터의 본질은 건드리지 않으면서, 모델이 편식하지 않게 통계적 특성만 맞춰주는 가장 안전하고 효율적인 방법**이다.
결과적으로 General Distribution Adaptation는:

- Whitening을 통해 불필요한 분포 격차를 제거
- De-whitening을 통해 필요한 작업 고유의 특성을 학습된 형태로 복원
- 입력 데이터의 글로벌한 표준화와 작업별 최적화를 동시에 달성
- Base Flow는 Task 0의 데이터 분포에 최적화되어 고정되어 있으므로, 새로운 작업의 데이터가 ”Task 0의 매니폴드 영역”과 동떨어져 있으면 Base Flow의 활성 함수들이 제대로 작동하지 않음
- De-whitening은 γ_t 와 β_t 를 조절하여 정규화된 데이터를 Base Flow가 학습했던 익숙한 영역 근처로 매핑하고, 새로운 데이터가 Base Flow의 활성 함수들이 가장 잘 작동하는 구간(Active Region)에 위치하도록 보장
- 고정된 Base Flow의 효과적인 재활용을 가능하게 하며, 지속 학습 환경에서 안정적이고 효율적인 학습을 보장

3.4. Spatial Context Mixer

- Normalizing Flow는 입력으로 이미지로 부터 생성된 각 Patch embedding들을 독립적으로 처리하여 우도를 계산하고 이를 통해 분포를 학습한다.

$$p(\mathbf{X}) \approx \prod_{u=1}^H \prod_{v=1}^W p(\mathbf{x}_{u,v}) \quad (12)$$

- 이러한 Normalizing Flow의 구조상 위치 (u, v) 의 특징 벡터 $\mathbf{x}_{u,v}$ 를 인접한 이웃들과 독립적(Independent and Identically Distributed, i.i.d.)으로 처리한다.
- 이러한 독립적 처리는 구조적 사각지대(Structural Blind Spot)를 야기한다.
 - 공간적 상관관계의 누락:** 긁힘(Scratch)이나 얼룩(Stain)과 같은 미세 결함은 단일 패치 내부의 값보다는 주변 패치와의 불연속성(Discontinuity)으로 정의된다. 그러나 Normalizing Flow는 패치를 독립적으로 처리하므로 이러한 국소적 대조(Local Contrast)를 인지하지 못한다.
 - 문맥 정보의 부재:** 정상 데이터의 분포는 주변 문맥에 따라 달라질 수 있다. 독립적인 처리는 $p(\mathbf{x}_{u,v} | \text{Neighbors})$ 와 같은 조건부 확률을 모델링할 수 없다.

Mechanism: Gated Depthwise Aggregation.

- 이러한 한계를 극복하기 위해 Normalizing Flow 입력 직전에 **Spatial Context Mixer**를 도입
- 이 모듈은 파라미터 효율성을 극대화하면서, 각 패치가 주변 정보를 물리적으로 집계할 수 있도록 설계
- Spatial Aggregation (Depthwise Convolution):**
 - Mixer는 채널 간의 간섭 없이 오직 공간적 정보만을 통합하기 위해 **Depthwise Convolution** Howard et al. (2017)을 사용한다.

$$\mathbf{C}_{u,v}^{(c)} = \sum_{i=-\lfloor K/2 \rfloor}^{\lfloor K/2 \rfloor} \sum_{j=-\lfloor K/2 \rfloor}^{\lfloor K/2 \rfloor} \mathbf{W}_{i,j}^{(c)} \cdot \mathbf{x}_{u+i, v+j}^{(c)} \quad (13)$$

- 여기서 K 는 커널 크기(홀수, 기본값 3), c 는 채널 인덱스, $\mathbf{x}^{(c)}$ 는 c 번째 채널의 입력 특징 맵, $\mathbf{W}^{(c)} \in \mathbb{R}^{K \times K}$ 는 해당 채널의 커널 가중치, \mathbf{C} 는 추출된 문맥 특징(Context Feature)이다.
- 이를 통해 각 특징 벡터는 자신의 위치뿐만 아니라 주변 이웃의 정보를 집계한다.

- Adaptive Interpolation (Learnable Gating):**

- 단순한 잔차 연결(Residual Addition) 대신, 모델은 원본 정보와 문맥 정보의 반영 비율을 스스로 결정하는 **적응형 보간(Adaptive Interpolation)** 메커니즘을 사용한다.

$$\alpha = \sigma(\theta_{\text{gate}}) \quad (14)$$

$$\mathbf{z}_{u,v} = (1 - \alpha) \cdot \mathbf{x}_{u,v} + \alpha \cdot \mathbf{C}_{u,v} \quad (15)$$

- 여기서 $\sigma(\cdot)$ 는 시그모이드(Sigmoid) 함수이며, θ_{gate} 는 학습 가능한 스칼라 파라미터이다.
- 이러한 게이팅 구조는 학습 초기($\alpha \approx 0.5$ 또는 초기화에 따라 조절)에 원본 특징과 문맥 특징을 균형 있게 학습하다가, 최적화 과정에서 테스크에 따라 공간 정보의 중요도(α)를 동적으로 조절할 수 있게 한다.
- 예를 들어, 텍스처가 균일한 표면(가죽 등)에서는 α 를 높여 주변 정보를 적극 활용하고, 복잡한 객체에서는 조절하는 식이다.

- Effect: Pseudo-Dependency Modeling

- 최종적으로 생성된 특징 벡터 $\mathbf{z}_{u,v}$ 는 Normalizing Flow에 독립적인 개체로 입력되지만, 정보적으로는 이미 주변 이웃의 상태 $\mathcal{N}_{u,v}$ 를 내포하고 있다.

$$\mathbf{z}_{u,v} \approx \text{Encode}(\mathbf{x}_{u,v} \oplus \mathcal{N}_{u,v}) \quad (16)$$

- 결과적으로 Normalizing Flow는 구조 변경 없이도 $\mathbf{z}_{u,v}$ 를 통해 간접적으로 조건부 확률 $p(\mathbf{x}_{u,v} | \mathcal{N}_{u,v})$ 을 학습하는 효과(Pseudo-Dependency)를 얻게 되며, 이는 구조적 이상 탐지 성능을 비약적으로 향상시킨다.

3.5. DecoFlow Architecture

- DecoFlow는 Feature Extractor로부터 추출된 패치 임베딩을 잠재 공간(Latent Space)의 가우시안 분포로 매핑하여 정상 데이터의 확률 밀도를 추정하는 생성 모델.
- 본 모델은 RealNVP Dinh et al. (2017) 기반의 가역적 구조를 따르며, 연속 학습 환경에서 파멸적 망각을 방지하고 이상 탐지 성능을 극대화하기 위해 다음과 같은 핵심 요소들로 구성된다.

- MoLEContextSubnet:

- Coupling Layer 내부에서 변환 파라미터(Scale, Shift)를 생성하는 핵심 모듈이다.
- 단순한 MLP 대신 공간적 문맥(Spatial Context)을 고려하도록 설계되어, 이상 탐지의 핵심인 ‘국소적 대조(Local Contrast)’ 정보를 스케일링 변환에 반영한다.
- Base weight를 Task 0에서만 학습 후 freeze 함으로써 anchor로 활용하며, LoRA Adapter를 활용해 작업별 분포 차이(Distribution Shift)를 저비용으로 학습한다.

- Affine Coupling Layer (ACL):

- NF의 출력단에 위치하여 선형 LoRA가 표현하기 어려운 작업 특화 비선형 매니퓰러를 학습하는 가역적 어댑터
- 완전히 독립적인 작업별 파라미터를 사용하여 작업 간 간섭 없이 정밀한 분포 보정 수행
- Affine Coupling Block 구조를 사용하여 가역성을 보장하고 정확한 log-determinant 계산 가능

3.5.1. MoLEContextSubnet: Context-Aware & Task-Adaptive Design

- MoLEContextSubnet은 Normalizing Flow의 각 Coupling Layer 내부에서 변환 파라미터 (s, t)를 생성하는 핵심 모듈이다.
- 일반적인 Coupling Layer가 단순한 MLP로 파라미터를 예측하는 것과 달리, 본 모듈은 공간적 문맥 인지(Spatial Context Awareness)와 작업 적응성(Task Adaptivity)을 동시에 갖추도록 설계되었다.
- 본 모듈은 3×3 Depthwise Convolution을 통해 공간적 문맥을 추출하고, 이를 통해 주변 이웃과의 대조 정보를 포착하여 이상 탐지에 효과적으로 활용한다.
- 스케일과 이동 예측에 비대칭적인 네트워크를 구성하여 서로 다른 입력을 사용하여 서로 다른 특성을 포착하도록 설계되었다.
- MoLEContextSubnet은 크게 세 부분으로 구성된다: (1) Spatial Context Conditioning, (2) Context-Aware s-network, (3) Context-Free t-network.

- Spatial Structure Recovery & Context Extraction::

- 일반적인 Normalizing Flow는 입력을 1차원 벡터로 평탄화하여 처리하므로 패치 간 공간적 인접성 정보가 소실된다.
- 이를 보완하기 위해 MoLEContextSubnet은 입력을 2차원 이미지 형태로 재구성하여 공간 구조를 복원한 후, 3×3 Depthwise Convolution으로 지역적 문맥 $c(x)$ 를 추출한다.
- 추출된 문맥은 학습 가능한 게이팅을 통해 반영 비율이 조절된다:

$$ctx = \alpha \cdot c(x), \quad \text{where } \alpha = \alpha_{\max} \cdot \sigma(\theta_{\text{scale}}) \quad (17)$$

- Context-Aware s-network:

- 이상 탐지에서 결함은 주로 주변과의 불연속성(Contrast)으로 나타난다.
- 스케일 파라미터는 이러한 국소적 대비를 포착해야 하므로, 원본 특징과 문맥을 결합하여 입력으로 사용한다:

$$s = \text{Linear}_2^{(s)}(\text{ReLU}(\text{Linear}_1^{(s)}([\mathbf{x}; ctx]))) \quad (18)$$

- Context-Free t-network:

- 분포의 위치 이동(Shift)은 패치 고유의 특성에 종속되므로, 문맥 없이 원본 특징만으로 예측한다:

$$\mathbf{t} = \text{Linear}_2^{(t)}(\text{ReLU}(\text{Linear}_1^{(t)}(\mathbf{x}))) \quad (19)$$

- 위 수식의 각 Linear 레이어는 LoRALinear로 구현된다.
- LoRALinear는 Base 출력에 작업별 LoRA 출력을 더하는 구조로, 다음과 같이 계산된다:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \underbrace{\mathbf{W}_{\text{base}}\mathbf{x} + \mathbf{b}_{\text{base}}}_{\text{Base (frozen after Task 0)}} + \underbrace{\frac{\alpha}{r}(\mathbf{B}_t \mathbf{A}_t)\mathbf{x} + \mathbf{b}_t}_{\text{Task-specific LoRA}} \quad (20)$$

- Task 0 학습 후 \mathbf{W}_{base} 와 \mathbf{b}_{base} 는 동결되어, 이후 작업 학습 시 수정되지 않는다.
- 새로운 작업은 독립적인 LoRA 행렬 $(\mathbf{A}_t, \mathbf{B}_t)$ 과 task bias \mathbf{b}_t 만 학습하므로, 기존 작업의 변환 능력이 보존되어 파멸적 망각이 방지된다.
- 추론 시에는 Router가 예측한 작업의 LoRA만 활성화되므로 작업 간 간섭이 발생하지 않는다.

가역성 보장.. LoRA가 Normalizing Flow의 가역성에 영향을 미치는지에 대해 명확히 할 필요가 있다. Affine Coupling Layer에서 가역성은 변환 구조 자체(입력 분할 및 아핀 변환)에 의해 보장되며, scale과 shift 파라미터를 생성하는 subnet의 구조에는 의존하지 않는다. 즉, subnet이 MLP이든, LoRA가 적용된 네트워크이든 관계없이 다음이 성립한다:

$$\mathbf{y} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \odot \exp(\mathbf{s}) + \mathbf{t}] \Leftrightarrow \mathbf{x} = [\mathbf{y}_1, (\mathbf{y}_2 - \mathbf{t}) \odot \exp(-\mathbf{s})] \quad (21)$$

LoRA는 subnet 내부의 선형 레이어에만 적용되며, 이는 Jacobian 계산에 직접 관여하지 않는다. 따라서 LoRA 적용 여부와 무관하게 전체 Normalizing Flow의 가역성과 정확한 likelihood 계산이 보장된다.

- Spatial Context Mixer와의 관계: 계층적 문맥 처리:

- Section 3.4의 Spatial Context Mixer와 MoLEContextSubnet 내부의 Context Conditioning은 모두 공간적 문맥을 활용하지만, 그 역할이 명확히 구분된다.
- Spatial Context Mixer는 Flow 입력 이전에 “이 패치가 어떤 이웃을 가지는가”를 특징 자체에 인코딩하는 전처리 모듈이다.
- MoLEContextSubnet의 Context Conditioning은 각 Coupling Layer 내부에서 “이 이웃 관계에서 어떤 스케일 변화가 적절한가”를 결정하는 **변환 가이드** 역할을 한다.
- 두 모듈이 모두 필요한 이유는 **계층적 문맥 처리(Hierarchical Context Processing)** 관점에서 이해할 수 있다:
- 입력 수준의 문맥 인코딩(Spatial Context Mixer)과 변환 수준의 적응적 스케일링(MoLEContextSubnet)은 상호 보완적으로 작용하여, 단일 모듈만으로는 달성하기 어려운 정교한 이상 탐지 성능을 가능하게 한다.

3.5.2. Affine Coupling Layer (비선형 매니폴드 보정)

문제: 전역 변환의 경직성.. 동결된 베이스는 고정된 전역 변환 구조를 제공한다. LoRA는 작업별 선형 보정을 추가하지만, 작업 간 복잡한 매니폴드 차이는 비선형 적응을 필요로 한다.

해결책: 작업별 가역 보정..

- ACL은 Normalizing Flow 출력단에 위치하며, MoLEContextSubnet으로 처리하지 못한 작업 특화 비선형 매니폴드를 정밀 보정한다.
- Affine Coupling Block으로 구성되며, 각 작업별로 독립적인 파라미터가 분리되어 있다.
- 수학적으로, 전체 변환과 밀도 추정은 다음과 같이 표현된다:

$$\mathbf{z}_{\text{final}} = f_{\text{ACL}}^{(t)}(\mathbf{z}_{\text{base}}), \quad \log p(\mathbf{x}) = \log p(\mathbf{z}_{\text{final}}) + \log |\det \mathbf{J}_{\text{base}}| + \log |\det \mathbf{J}_{\text{ACL}}| \quad (22)$$

- 각 AffineCouplingBlock의 변환:

$$[\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2] = \text{Split}(\mathbf{x}) \quad (23)$$

$$\mathbf{s}, \mathbf{t} = \text{SimpleSubnet}(\mathbf{x}_1) \quad (24)$$

$$\mathbf{y}_2 = \mathbf{x}_2 \odot \exp(\alpha_{\text{clamp}} \cdot \tanh(\mathbf{s}/\alpha_{\text{clamp}})) + \mathbf{t} \quad (25)$$

$$\mathbf{y} = \text{Concat}(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_2) \quad (26)$$

- ACL의 핵심 장점:

- **비선형 매니폴드 적응**: 선형 LoRA가 표현할 수 없는 복잡한 분포 변환을 학습한다.
- **가역성 보장**: 정규화 흐름의 밀도 추정 속성이 유지되므로, 이상 점수의 확률적 해석이 보존된다.
- **완전한 작업 분리**: 작업별로 완전히 독립적인 파라미터를 사용하여 작업 간 간섭이 없다.
- **후처리 위치**: 기반 NF의 뒷단에 위치하여, 기반 NF가 학습한 범용 변환을 먼저 적용하고 DIA가 작업 특화 조정을 수행한다.

- MoLEContextSubnet과의 차이:

- MoLEContextSubnet과 ACL은 모두 Affine Coupling 구조를 기반으로 하지만, 서로 다른 설계 철학을 따른다.
- MoLEContextSubnet은 “공간 인지형 범용 변환기(Spatially-Aware Universal Transformer)”로서, 고정된 Base weights를 anchor로 삼아 범용 변환 능력을 보존하면서 LoRA를 통해 작업별 적응을 수행한다.
- Spatial context conditioning을 통해 국소적 이상 패턴에 민감하게 반응하며, 모든 작업에서 공유되는 “정상 → 표준 정규분포” 변환의 뼈대를 제공한다.
- 반면 ACL는 “작업 특화 분포 보정기(Task-Specific Distribution Corrector)”로서, 작업별로 완전히 독립적인 파라미터를 사용하여 작업 고유의 분포를 정밀 보정한다.

- DIA가 spatial context를 사용하지 않는 이유는 세 가지다:
 - * (1) ACL은 잠재 공간에서 동작하며, 이 시점에서 공간 정보는 이미 MoLE-ContextSubnet을 통해 인코딩되어 있다.
 - * (2) MoLEContextSubnet이 “공간 인지 변환”을, DIA가 “분포 정밀 보정”을 담당하는 명확한 역할 분리가 효율적이다.
 - * (3) 작업별 독립 파라미터를 사용하는 DIA에 추가 context 모듈은 파라미터 오버헤드를 증가시킨다.

3.6. Training Objective

- 모델의 학습과 이상 탐지는 입력 데이터가 잠재 공간의 정규 분포로 얼마나 잘 매핑되는지를 측정하는 Log-likelihood 계산을 통해 이루어진다.
- 이 과정은 크게 Forward 변환 및 Jacobian 누적, 잠재 확률 계산, 그리고 최종 likelihood 산출을 통해 이루어진다.

3.6.1. Likelihood Calculation

- 사전 학습된 특징 추출기로부터 생성된 입력 패치 임베딩은 잠재 변수 \mathbf{z} 로 변환되며, 각 변환 단계의 부피 변화율인 log-determinant of Jacobian이 누적된다.
- 입력 \mathbf{x} 는 Task Adapter, Spatial Mixer, MoLEContextSubnet, DIA를 순차적으로 통과하며 최종 잠재 벡터 \mathbf{z} 로 변환된다.
- Flow와 DIA를 거치는 동안 발생된 log determinant Jacobian 값들이 합산된다:

$$\log |\det \mathbf{J}_{\text{total}}| = \log |\det \mathbf{J}_{\text{flow}}| + \log |\det \mathbf{J}_{\text{ACL}}| \quad (27)$$

- Log-Determinant 계산:

- MoLEContextSubnet과 ACL 모두 Affine Coupling 구조를 사용하며, 동일한 방식으로 log-determinant를 계산한다.
- 각 Affine Coupling Block은 입력을 두 부분 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ 로 분할하고, scale과 translation 파라미터를 생성한다.
- 수치 안정성을 위해 soft-clamping이 적용된 변환을 수행한다:

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{x}_1, \quad \mathbf{y}_2 = \mathbf{x}_2 \odot \exp(\tilde{\mathbf{s}}) + \mathbf{t}, \quad \text{where } \tilde{\mathbf{s}} = \alpha_{\text{clamp}} \cdot \tanh(\mathbf{s}/\alpha_{\text{clamp}}) \quad (28)$$

- 이 변환의 Jacobian은 블록 하삼각 행렬 형태를 가지므로, log-determinant는 clamped scale 파라미터의 합으로 계산된다:

$$\log |\det \mathbf{J}_{\text{layer}}| = \sum_{i=1}^{D/2} \tilde{s}_i = \sum_{i=1}^{D/2} \alpha_{\text{clamp}} \cdot \tanh(s_i/\alpha_{\text{clamp}}) \quad (29)$$

- MoLEContextSubnet의 M 개 블록과 ACL의 N 개 블록의 log-determinant가 각각 누적되어:

$$\log |\det \mathbf{J}_{\text{flow}}| = \sum_{k=1}^M \log |\det \mathbf{J}_{\text{layer}_k}|, \quad \log |\det \mathbf{J}_{\text{ACL}}| = \sum_{j=1}^N \log |\det \mathbf{J}_{\text{block}_j}| \quad (30)$$

- 최종적으로 두 값이 합산되어 전체 변환의 부피 변화율을 나타낸다.

- **잠재 확률 계산:**

- 잠재 변수 $\mathbf{z}_{\text{final}}$ 의 표준 정규분포를 따른다고 가정하고, 각 패치 위치에서의 log probability density를 계산한다.

$$\log p(\mathbf{z}_{\text{final}}) = -\frac{1}{2} \|\mathbf{z}_{\text{final}}\|_2^2 - \frac{D}{2} \log(2\pi) \quad (31)$$

- **최종 likelihood 산출:** 변수 변환 공식에 따라 입력 공간에서의 log likelihood를 계산한다.

$$\log p(\mathbf{x}) = \log p(\mathbf{z}_{\text{final}}) + \log |\det \mathbf{J}_{\text{total}}| \quad (32)$$

3.6.2. Tail-Aware Loss (그래디언트 재분배)

문제: 별크 영역에서의 그래디언트 집중.. 베이스가 동결되면 LoRA는 베이스 변환에 “미세한 보정”만 제공한다. 표준 NLL 학습은 그래디언트가 별크(쉬운) 패치에 집중되게 하여, 테일(어려운) 패치가 과소 최적화된다—이상 탐지 결정이 가장 중요한 바로 그 영역이다.

해결책: 테일 집중 학습..

- 일반적인 NF의 학습 방식을 따르는 경우 이미지 내 모든 패치의 우도 평균을 최대화하게 된다.
- 이는 모델이 대다수의 학습하기 “쉬운” 정상 패치에만 집중하게 되고, 분포의 꼬리(Tail)에 위치한 “어려운” 패치나 이상 징후를 간과하게 만드는 원인이 된다.
- 따라서 본 모델은 학습 시 Tail-Aware Loss를 도입하여, 전체 평균뿐만 아니라 손실 값이 높은 상위 $K\%$ 패치에 가중치를 두어 학습하도록 한다:

$$\mathcal{L}_{\text{train}} = (1 - \lambda_{\text{tail}}) \cdot \mathbb{E}[\mathcal{L}_{\text{all}}] + \lambda_{\text{tail}} \cdot \mathbb{E}[\mathcal{L}_{\text{top-k}}] \quad (33)$$

- 여기서 $\lambda_{\text{tail}} = 0.7$, $\mathcal{L}_{\text{top-k}}$ 는 상위 $K\%$ 고손실 패치의 평균 NLL이다.
- 이는 모델이 정상 분포의 경계(Boundary)를 더 명확하게 학습하도록 유도한다.

3.7. Task Routing & Adapter Activation

- Class-Incremental Learning (CIL) 환경에서는 추론 시 입력 이미지가 어느 task에 속하는지 사전 정보가 주어지지 않는다.
- 예를 들어, Task 0에서 {bottle, cable, capsule}을 학습하고 Task 1에서 {carpet, grid}를 학습한 경우, 추론 시 입력 이미지가 어느 task의 클래스인지 알 수 없다.
- 따라서 모델은 입력 이미지를 보고 자동으로 적절한 task를 선택하고, 해당 task의 adapters (LoRA, Input Adapter, ACL)를 활성화해야 한다.
- 이는 CIL의 핵심 과제로, 잘못된 task 선택은 부적절한 파라미터 활성화로 이어져 이상 탐지 성능을 크게 저하시킨다.

3.7.1. Prototype-Based Task Routing

- Mahalanobis 거리 기반 Prototype Router Lee et al. (2018)를 사용하여 task를 자동으로 인식한다.
- Prototype 구축 (Training Phase):
 - 각 task t 의 학습 과정에서, 정상 샘플들의 특징 벡터를 수집하여 task-specific prototype을 구축한다.
 - Prototype은 평균 벡터 $\mu_t \in \mathbb{R}^D$ 와 공분산 행렬 $\Sigma_t \in \mathbb{R}^{D \times D}$ 로 구성된다:

$$\mu_t = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} \mathbf{f}_i^{(t)} \quad (34)$$

$$\Sigma_t = \frac{1}{N_t - 1} \sum_{i=1}^{N_t} (\mathbf{f}_i^{(t)} - \mu_t)(\mathbf{f}_i^{(t)} - \mu_t)^\top + \lambda_{\text{reg}} \mathbf{I} \quad (35)$$

- 여기서 $\mathbf{f}_i^{(t)}$ 는 Backbone의 가장 마지막 layer의 출력 feature vector $\mathbf{f}_{\text{backbone}} \in \mathbb{R}^D$ 를 이미지 레벨 특징 벡터로 사용한다.
- N_t 는 task t 의 학습 샘플 수, λ_{reg} 는 수치 안정성을 위한 정규화 항($= 10^{-5}$)이다.
- 공분산의 역행렬인 precision matrix Σ_t^{-1} 을 미리 계산하여 저장한다.

- Task Selection (Inference Phase):
 - 추론 시 입력 이미지 \mathbf{x}_{img} 로부터 Backbone의 가장 마지막 layer의 출력 feature vector $\mathbf{f}_{\text{backbone}} \in \mathbb{R}^D$ 를 이미지 레벨 특징 벡터로 사용한다.
 - 모든 학습된 task의 prototype과의 Mahalanobis 거리를 계산한다.
 - Mahalanobis 거리는 단순 Euclidean 거리와 달리 각 task의 특징 분포의 형태(공분산)를 고려하므로, 분포 간 중첩이 있어도 더 정확한 task 구분이 가능하다.
 - 가장 가까운 prototype을 가진 task를 선택한다.

- 선택된 task t^* 에 해당하는 task-specific 파라미터들을 활성화한다.
 - * **LoRA Adapters**: MoLE Flow의 각 coupling layer에서 task t^* 의 LoRA 가중치 $\{\mathbf{A}_{t^*}, \mathbf{B}_{t^*}\}$ 를 활성화
 - * **Input Adapter**: Task t^* 의 Whitening 파라미터 (평균 $\mu_{t^*}^{\text{white}}$, 표준편차 $\sigma_{t^*}^{\text{white}}$)를 적용
 - * **ACL**: Task t^* 의 Affine Coupling Layer 네트워크를 활성화

왜 Mahalanobis 거리를 사용하는가?.

- **분포 형태 고려**: Euclidean 거리는 모든 방향을 동등하게 취급하지만, Mahalanobis 거리는 각 task의 특징 분포가 어느 방향으로 펴져있는지(공분산)를 고려한다.
- **스케일 불변성**: 특정 차원마다 다른 스케일을 가질 때, precision matrix Σ^{-1} 이 자동으로 정규화 역할을 수행한다.
- **높은 구분력**: 실험 결과, Euclidean 거리 대비 평균 0.03-0.05 높은 task routing 정확도를 달성하였다.

3.8. Anomaly Scoring & Inference

- 추론 과정은 입력 이미지를 정상 분포로 학습된 잠재 공간으로 변환하고, 그 확률 밀도를 측정하여 이상 여부를 판단하는 과정이다.
- 핵심 아이디어: 정상 샘플은 높은 확률 밀도를 가지며, 이상 샘플은 낮은 확률 밀도를 가진다.

3.8.1. Step 1: Feature Extraction

- 입력 이미지 $\mathbf{x}_{\text{img}} \in \mathbb{R}^{224 \times 224 \times 3}$ 를 사전 학습된 CNN Backbone (WideResNet-50)에 통과시켜 다층 특징 맵을 추출한다.
- 특징 맵을 패치 단위로 분할하고 Adaptive Average Pooling을 적용하여 공간 해상도 $(H, W) = (14, 14)$ 의 패치 임베딩을 생성한다.
- 각 패치에 2D Sinusoidal Positional Encoding을 더하여 공간적 위치 정보를 보존한다:

$$\mathbf{x} = \text{PatchEmbed}(\mathbf{x}_{\text{img}}) + \text{PosEmbed}(h, w) \in \mathbb{R}^{H \times W \times D} \quad (36)$$

여기서 $D = 768$ 은 임베딩 차원이다.

3.8.2. Step 2: Normalizing Flow Transformation

- 입력 \mathbf{x} 를 선택된 task의 adapters를 통해 변환한다:
 1. **Input Adapter (Whitening)**: Task 0의 통계량을 기준으로 분포를 정규화
 2. **Spatial Mixer**: Depthwise convolution으로 인접 패치 간 정보 교환
 3. **MoLE Flow**: 8개의 LoRA-equipped Affine Coupling Layer를 통과하여 잠재 변수 \mathbf{z} 로 변환
 4. **ACL**: 6개의 Affine Coupling Block으로 task-specific 비선형 manifold 적용
- 각 단계에서 log-determinant를 누적하여 전체 변환의 부피 변화율 $\log |\det \mathbf{J}_{\text{total}}|$ 을 계산한다.

3.8.3. Step 3: Anomaly Score Computation

- 최종 잠재 변수 $\mathbf{z}_{\text{final}} \in \mathbb{R}^{H \times W \times D}$ 가 표준 정규분포 $\mathcal{N}(0, I)$ 를 따른다고 가정한다.
- 각 패치 위치 (h, w) 에서 log-likelihood를 계산:

$$\log p(\mathbf{x}_{h,w}) = \underbrace{-\frac{1}{2} \|\mathbf{z}_{h,w}\|_2^2 - \frac{D}{2} \log(2\pi)}_{\text{잠재 공간 확률}} + \underbrace{\log |\det \mathbf{J}_{h,w}|}_{\text{부피 보정}} \quad (37)$$

- Anomaly score는 negative log-likelihood로 정의된다:

$$s_{h,w} = -\log p(\mathbf{x}_{h,w}) \quad (38)$$

- 이미지 레벨 점수는 패치 점수의 평균 또는 상위 K개 평균으로 집계된다:

$$S_{\text{image}} = \frac{1}{HW} \sum_{h,w} s_{h,w} \quad \text{or} \quad S_{\text{image}} = \text{mean}(\text{top-K}(\{s_{h,w}\})) \quad (39)$$

4. 실험

DecoFlow를 표준 지속적 이상 탐지 벤치마크에서 평가하기 위해 포괄적인 실험을 수행한다. 본 실험은 다음 연구 질문들을 다룬다: (1) DecoFlow는 탐지 성능과 망각 저항성 측면에서 최신 방법들과 어떻게 비교되는가? (2) 제안된 각 구성요소의 기여도는 얼마인가? (3) 하이퍼파라미터 선택에 대한 민감도는 어느 정도인가?

4.1. 실험 설정

4.1.1. 데이터셋

널리 사용되는 두 가지 산업 이상 탐지 벤치마크에서 평가를 수행한다:

- **MVTec AD** Bergmann et al. (2019): 5,354개의 고해상도 이미지를 포함하는 15개 산업 제품 카테고리로 구성된 사실상의 표준 벤치마크이다. 카테고리는 텍스처(carpet, grid, leather, tile, wood)와 객체(bottle, cable, capsule, hazelnut, metal nut, pill, screw, toothbrush, transistor, zipper)로 구성된다. 각 카테고리는 정상 학습 이미지와 다양한 결합 유형의 테스트 이미지를 포함한다.
- **VisA** Zou et al. (2022): 복잡한 구조와 미세한 이상을 특징으로 하는 12개 카테고리의 더 어려운 데이터셋이다. candle, capsules, cashew, chewinggum, fryum, macaroni1, macaroni2, pcb1-4, pipe_fryum을 포함한다.

지속 학습 평가를 위해, 각 카테고리가 별도의 작업을 구성하는 1×1 시나리오를 채택하여, MVTec AD에서 15개의 순차적 작업과 VisA에서 12개의 작업을 수행한다. 이 세분화된 설정은 많은 작업에 걸친 지식 유지의 어려움을 최대화한다.

4.1.2. 평가 지표

네 가지 상호 보완적인 지표를 사용한다:

- **Image AUROC (I-AUC)**: 이미지 수준 이상 분류를 위한 ROC 곡선 아래 면적.
- **Pixel AP (P-AP)**: 픽셀 수준 이상 위치 추정을 위한 평균 정밀도. 분할 마스크의 심한 클래스 불균형을 더 잘 처리한다.
- **Forgetting Measure (FM)**: 새로운 작업 학습 후 이전에 학습한 작업들에서의 평균 성능 하락. $FM = \frac{1}{T-1} \sum_{i=1}^{T-1} (\text{Perf}_i^{(i)} - \text{Perf}_i^{(T)})$ 로 계산되며, $\text{Perf}_i^{(j)}$ 는 작업 j 학습 후 작업 i 에서의 성능을 나타낸다.
- **Routing Accuracy**: 해당 작업 전문가에게 올바르게 라우팅된 테스트 샘플의 비율.

4.1.3. 비교 방법

세 가지 범주의 방법들과 비교한다:

상한선 (Joint Training):

- **Joint_PatchCore**: 모든 카테고리에서 동시에 학습된 PatchCore Roth et al. (2022).
- **Joint_PatchCore(R)**: 라우터 기반 작업 선택이 포함된 Joint PatchCore.
- **Joint_CADIC**: 모든 카테고리에서 동시에 학습된 CADIC ?.

하한선 (Fine-Tuning):

- **FT_PatchCore, FT_CFA, FT_SimpleNet, FT_RD4AD**: 지속 학습 메커니즘 없이 순차적 파인튜닝. 파열적 망각을 보여준다.

지속 학습 방법:

- **CFRDC**: 데이터 압축을 포함한 클래스 무관 정규화.
- **IUF** ?: 점진적 통합 프레임워크.
- **ReplayCAD**: 리플레이 기반 지속적 이상 탐지.
- **DNE** ?: 동적 네트워크 확장.
- **UCAD** ?: 통합 지속적 이상 탐지.
- **DFM** ?: 분포 무관 메모리.
- **CADIC** ?: 현재 최신 지속적 AD 방법.

4.1.4. 구현 세부사항

표 2에 구성을 요약하였다. ImageNet에서 사전 학습된 WideResNet50-2를 특징 백본으로 사용한다. Normalizing flow는 6개의 MoLE 블록과 2개의 ACL 블록으로 구성된다. 각 MoLE 블록은 랭크 64의 LoRA 어댑터를 포함한다. 학습은 작업당 60 에포크 동안 Adam 옵티마이저 (학습률 3×10^{-4} , 배치 크기 16)로 진행된다. Tail-Aware Loss는 $\lambda_{\text{tail}} = 0.7$ 과 top- k 비율 2%를 사용한다. 모든 실험은 단일 NVIDIA RTX 3090 GPU에서 실행된다.

Table 2: DecoFlow 구성 (MoLE6-DIA2).

Parameter	Value
Backbone	WideResNet50-2
MoLE Blocks	6
ACL Blocks	2
LoRA Rank	64
Learning Rate	3×10^{-4}
Epochs per Task	60
Batch Size	16
Tail Weight (λ_{tail})	0.7
LogDet Weight (λ_{logdet})	1×10^{-4}
Score Aggregation	Top-K (K=3)
Scale Context Kernel	5
Spatial Context Kernel	3

Table 3: MVTec AD에서의 Image AUROC 비교 (15개 카테고리, 1×1 CL 시나리오). Joint 방법은 상한선 역할을 한다 (설계상 망각 없음). FT 방법들은 파열적 망각을 보여준다. 최고 CL 방법 결과는 굵게 표시. FM: 망각 측정치 (낮을수록 좋음).

Methods	bottle	cable	capsule	carpet	grid	hazelnut	leather	metal_nut	pill	screw	tile	toothbrush	transistor	wood	zipper	avg	FM↓
<i>Upper Bounds (Joint Training)</i>																	
Joint_PatchCore	1.000	0.977	0.927	1.000	0.983	0.994	1.000	1.000	0.948	0.920	1.000	0.969	0.958	0.997	0.998	0.978	-
Joint_PatchCore(R)	0.998	0.936	0.868	1.000	0.984	0.979	1.000	0.993	0.921	0.653	0.998	0.975	0.832	0.995	0.972	0.940	-
Joint_CADIC	1.000	0.986	0.921	1.000	0.987	0.990	1.000	1.000	0.945	0.899	1.000	0.972	0.975	0.994	0.996	0.978	-
<i>Lower Bounds (Fine-Tuning)</i>																	
FT_PatchCore	0.163	0.518	0.350	0.968	0.700	0.839	0.625	0.259	0.459	0.484	0.776	0.586	0.341	0.970	0.991	0.602	0.383
FT_CFA	0.309	0.489	0.275	0.834	0.571	0.903	0.935	0.464	0.528	0.528	0.763	0.519	0.320	0.923	0.984	0.623	0.361
FT_SimpleNet	0.938	0.560	0.519	0.736	0.592	0.859	0.749	0.710	0.701	0.599	0.654	0.422	0.669	0.908	0.996	0.708	0.211
FT_RD4AD	0.401	0.538	0.475	0.583	0.558	0.909	0.596	0.623	0.479	0.596	0.715	0.397	0.385	0.700	0.987	0.596	0.393
<i>Continual Learning Methods</i>																	
CFRDC	0.996	0.900	0.785	0.997	0.980	0.994	1.000	0.995	0.933	0.711	0.991	0.933	0.997	0.982	0.984	0.945	-
IUF	0.909	0.541	0.520	0.996	0.695	0.875	0.997	0.643	0.547	0.646	0.940	0.711	0.660	0.953	0.795	0.762	0.067
ReplayCAD	0.990	0.957	0.747	0.980	0.927	0.985	0.974	0.995	0.944	0.795	0.999	0.981	0.957	0.984	0.997	0.948	0.045
DNE	0.990	0.619	0.609	0.984	0.998	0.924	1.000	0.989	0.671	0.588	0.980	0.933	0.877	0.930	0.958	0.870	0.116
UCAD	1.000	0.751	0.866	0.965	0.944	0.994	1.000	0.988	0.894	0.739	0.998	1.000	0.874	0.995	0.938	0.930	0.010
DFM	0.997	0.948	0.996	0.999	0.990	0.977	1.000	1.000	0.983	0.765	0.982	0.997	0.932	0.986	0.987	0.969	0.015
CADIC	1.000	0.982	0.877	0.996	0.983	0.994	1.000	1.000	0.942	0.906	0.995	0.954	0.968	0.994	0.990	0.972	0.011
Ours	1.000	0.981	0.954	0.997	0.988	0.999	1.000	1.000	0.989	0.921	1.000	0.922	0.993	0.975	0.990	0.979	0

4.2. 주요 결과

4.2.1. MVTec-AD 결과

표 3와 4는 1×1 지속 학습 시나리오에서의 MVTec AD에 대한 포괄적인 비교를 제시한다. 카테고리별 강점과 약점을 드러내기 위해 카테고리별 결과를 보고한다.

주요 관찰 결과:

- 제로 망각과 함께 최신 성능 달성:** DecoFlow는 MVTec AD에서 0.979 Image AUROC 와 0.562 Pixel AP를 달성하면서 제로 망각(FM=0)을 유지한다. 이는 일반적으로 0.01–0.12의 FM 값을 보이는 기존 CL 방법들에 비해 상당한 개선을 나타낸다.
- Joint 학습과 경쟁:** 제안 방법은 훨씬 더 어려운 지속 학습 환경에서 동작하면서도 joint 학습 상한선과 거의 일치한다 (0.979 vs. Joint_PatchCore의 0.978).

Table 4: MVTec AD에서의 Pixel AP 비교 (15개 카테고리, 1×1 CL 시나리오). Pixel AP는 심한 클래스 불균형에서 위치 추정 품질을 더 잘 반영한다. 최고 CL 방법 결과는 굵게 표시.

Methods	bottle	cable	capsule	carpet	grid	hazelnut	leather	metal_nut	pill	screw	tile	toothbrush	transistor	wood	zipper	avg	FM \downarrow
<i>Upper Bounds (Joint Training)</i>																	
Joint_PatchCore	0.820	0.514	0.525	0.770	0.300	0.728	0.224	0.892	0.811	0.336	0.620	0.527	0.637	0.683	0.565	0.594	-
Joint_PatchCore(R)	0.826	0.505	0.510	0.766	0.293	0.712	0.230	0.862	0.785	0.157	0.664	0.561	0.515	0.641	0.595	0.573	-
Joint_CADIC	0.815	0.510	0.519	0.754	0.292	0.744	0.210	0.886	0.815	0.307	0.630	0.530	0.650	0.675	0.528	0.591	-
<i>Lower Bounds (Fine-Tuning)</i>																	
FT_PatchCore	0.048	0.029	0.035	0.552	0.003	0.338	0.279	0.248	0.051	0.008	0.249	0.034	0.079	0.304	0.595	0.190	0.371
FT_CFA	0.068	0.056	0.050	0.271	0.004	0.341	0.393	0.255	0.080	0.015	0.155	0.053	0.056	0.281	0.573	0.177	0.083
FT_SimpleNet	0.108	0.045	0.029	0.018	0.004	0.029	0.006	0.227	0.077	0.004	0.082	0.046	0.049	0.037	0.139	0.060	0.069
FT_RD4AD	0.055	0.040	0.064	0.212	0.005	0.384	0.116	0.247	0.061	0.015	0.193	0.034	0.059	0.097	0.562	0.143	0.425
<i>Continual Learning Methods</i>																	
CFRDC	0.737	0.518	0.425	0.506	0.243	0.556	0.372	0.666	0.417	0.125	0.454	0.417	0.710	0.380	0.390	0.461	-
IUF	0.289	0.054	0.040	0.440	0.084	0.301	0.330	0.142	0.048	0.012	0.310	0.049	0.065	0.326	0.080	0.171	0.059
ReplayCAD	0.710	0.369	0.337	0.652	0.338	0.635	0.587	0.656	0.698	0.329	0.531	0.576	0.605	0.500	0.539	0.537	0.055
UCAD	0.752	0.290	0.349	0.622	0.187	0.506	0.333	0.775	0.634	0.214	0.549	0.298	0.398	0.535	0.398	0.456	0.013
DFM	0.768	0.506	0.241	0.771	0.228	0.479	0.432	0.690	0.576	0.242	0.623	0.331	0.501	0.581	0.511	0.113	-
CADIC	0.790	0.485	0.506	0.753	0.276	0.749	0.191	0.880	0.810	0.328	0.609	0.527	0.650	0.686	0.517	0.584	0.015
Ours	0.742	0.600	0.396	0.648	0.261	0.590	0.491	0.787	0.802	0.222	0.726	0.563	0.652	0.512	0.379	0.562	0

Table 5: VisA에서의 Image AUROC 비교 (12개 카테고리, 1×1 CL 시나리오). Joint 방법은 상한선 역할을 한다. FT 방법들은 파열적 망각을 보여준다. 최고 CL 방법 결과는 굵게 표시.

Methods	candle	capsules	cashew	chewinggum	fryum	macaroni1	macaroni2	pcb1	pcb2	pcb3	pcb4	pipe_fryum	avg	FM \downarrow
Joint_PatchCore	0.952	0.878	0.940	0.983	0.950	0.902	0.667	0.963	0.892	0.894	0.983	0.995	0.916	-
Joint_PatchCore(R)	0.870	0.750	0.895	0.964	0.883	0.768	0.677	0.949	0.855	0.779	0.921	0.971	0.857	-
Joint_CADIC	0.945	0.825	0.941	0.980	0.954	0.904	0.694	0.967	0.881	0.865	0.972	0.989	0.910	-
FT_PatchCore	0.401	0.605	0.624	0.907	0.334	0.538	0.437	0.527	0.597	0.507	0.588	0.998	0.589	0.361
FT_CFA	0.512	0.672	0.873	0.753	0.304	0.557	0.422	0.698	0.472	0.449	0.407	0.998	0.593	0.327
FT_SimpleNet	0.504	0.474	0.794	0.721	0.684	0.567	0.447	0.598	0.629	0.538	0.493	0.945	0.616	0.283
FT_RD4AD	0.380	0.385	0.737	0.539	0.533	0.607	0.487	0.437	0.672	0.343	0.187	0.999	0.525	0.423
CFRDC	0.945	0.825	0.941	0.980	0.954	0.904	0.694	0.967	0.881	0.865	0.972	0.989	0.910	-
IUF	0.994	0.692	0.758	0.548	0.677	0.795	0.606	0.563	0.766	0.651	0.512	0.614	0.681	0.085
ReplayCAD	0.924	0.843	0.937	0.961	0.915	0.889	0.805	0.911	0.849	0.831	0.978	0.991	0.903	0.055
DNE	0.486	0.413	0.735	0.585	0.691	0.584	0.546	0.633	0.693	0.642	0.562	0.747	0.610	0.179
UCAD	0.778	0.877	0.960	0.958	0.945	0.823	0.667	0.905	0.871	0.813	0.901	0.988	0.874	0.039
CADIC	0.859	0.817	0.926	0.972	0.910	0.839	0.733	0.946	0.878	0.869	0.952	0.988	0.891	0.043
Ours	0.890	0.883	0.981	0.943	0.928	0.869	0.673	0.950	0.897	0.864	0.970	0.953	0.900	0

- 파인튜닝 대비 극적인 개선:** 파인튜닝 방법들은 최대 0.42의 FM 값과 평균 I-AUC가 0.60–0.70으로 하락하는 파열적 망각을 겪는다. DecoFlow의 파라미터 경리 전략은 이 문제를 완전히 제거한다.
- 일관된 카테고리별 성능:** DecoFlow는 텍스처(leather: 1.000, tile: 1.000)와 객체(metal_nut: 1.000, pill: 0.989)를 포함한 다양한 카테고리에서 강력한 결과를 달성한다.

4.2.2. VisA 데이터셋 결과

표 5와 6는 복잡한 객체 구조와 미세한 이상을 특징으로 하는 더 어려운 VisA 데이터셋에서의 결과를 제시한다.

VisA에서 DecoFlow는 제로 망각과 함께 0.900 Image AUROC를 달성하여, 더 어려운 도메인에서의 강력한 일반화를 보여준다. 낮은 Pixel AP (0.266)는 VisA의 미세하고 복잡한 이상 패턴의 본질적인 어려움을 반영하지만, 제안 방법은 여전히 완전한 망각 방지라는 핵심적인 이점을 유지한다.

4.3. 절제 연구

각 구성요소의 기여도를 정량화하기 위해 체계적인 절제 실험을 수행한다.

Table 6: VisA에서의 Pixel AP 비교 (12개 카테고리, 1×1 CL 시나리오). 최고 CL 방법 결과는 굵게 표시.

Methods	candle	capsules	cashew	chewinggum	fryum	macaroni1	macaroni2	pcb1	pcb2	pcb3	pcb4	pipe_fryum	avg	FM \downarrow
Joint_PatchCore	0.206	0.617	0.717	0.768	0.485	0.056	0.015	0.790	0.084	0.561	0.359	0.620	0.440	-
Joint_PatchCore(R)	0.213	0.581	0.685	0.770	0.476	0.029	0.010	0.770	0.070	0.496	0.293	0.637	0.419	-
Joint_CADIC	0.196	0.618	0.716	0.771	0.490	0.054	0.015	0.793	0.088	0.573	0.349	0.610	0.439	-
FT_PatchCore	0.012	0.007	0.055	0.315	0.082	0.000	0.008	0.004	0.007	0.010	0.585	0.090	0.311	
FT_CFA	0.017	0.005	0.059	0.243	0.085	0.001	0.001	0.013	0.006	0.008	0.015	0.592	0.087	0.184
FT_SimpleNet	0.001	0.004	0.017	0.007	0.047	0.000	0.000	0.013	0.003	0.004	0.009	0.058	0.014	0.016
FT_RD4AD	0.002	0.005	0.061	0.045	0.098	0.001	0.001	0.013	0.008	0.008	0.013	0.576	0.069	0.201
IUF	0.012	0.017	0.043	0.033	0.107	0.011	0.004	0.019	0.009	0.018	0.021	0.117	0.034	0.003
ReplayCAD	0.241	0.430	0.555	0.674	0.462	0.178	0.099	0.793	0.199	0.422	0.303	0.625	0.415	0.050
UCAD	0.067	0.437	0.580	0.503	0.334	0.013	0.003	0.702	0.136	0.266	0.106	0.457	0.300	0.015
CADIC	0.193	0.631	0.718	0.763	0.476	0.047	0.019	0.794	0.087	0.559	0.337	0.631	0.438	0.014
Ours	0.062	0.290	0.749	0.377	0.303	0.026	0.005	0.560	0.102	0.190	0.169	0.357	0.266	0

Table 7: 구성요소 절제 연구 (MoLE6+DIA2 기준). Δ 는 전체 모델로부터의 변화를 나타낸다.

Configuration	I-AUC	P-AP	Δ I-AUC	Δ P-AP
Full Model (MoLE6+DIA2)	97.9	56.2	-	-
w/o Tail-Aware Loss	95.0	48.6	-2.9	-7.6
w/o General Distribution Adaptation	97.9	48.8	0.0	-7.3
w/o LogDet Regularization	98.1	51.9	+0.1	-4.3
w/o Spatial Context Mixer	98.0	52.9	+0.1	-3.3
w/o Positional Embedding	97.4	54.0	-0.5	-2.2
w/o Scale Context	97.9	54.5	0.0	-1.7
w/o LoRA	98.0	55.3	+0.1	-0.9

4.3.1. 구성요소 절제

표 7는 전체 모델에서 개별 구성요소를 제거했을 때의 영향을 제시한다. 각 모듈의 고유한 역할을 관찰할 수 있다:

구성요소 기여도 순위 (Pixel AP 영향 기준):

1. **Tail-Aware Loss**: +7.6%p—정밀한 위치 추정을 위한 가장 핵심적인 구성요소
2. **General Distribution Adaptation**: +7.3%p—작업 간 분포 정렬에 필수적
3. **LogDet 정규화**: +4.3%p—normalizing flow에서 스케일 붕괴 방지
4. **Spatial Context Mixer**: +3.3%p—결함을 나타내는 국소적 불연속성 포착
5. **Positional Embedding**: +2.2%p—공간 구조 정보 보존
6. **Scale Context**: +1.7%p—다중 스케일 문맥 인식 제공
7. **LoRA**: +0.9%p—직접적 영향은 최소이나 파라미터 효율성에 핵심

특히 Tail-Aware Loss와 General Distribution Adaptation가 픽셀 수준 성능에 가장 크게 기여하여, 분포 경계 처리와 작업 간 정렬을 위한 설계 선택의 타당성을 검증한다.

4.3.2. 상호작용 효과 분석: 핵심 vs. 범용 구성요소

핵심적인 방법론적 질문이 제기된다: 제안된 구성요소들—General Distribution Adaptation (GDA), Tail-Aware Loss (TAL), Affine Coupling Layer (ACL)—은 동결 베이스 아키텍처에 필수적인가, 아니면 단순히 범용적인 성능 향상 요소인가?

Table 8: 상호작용 효과 분석: 이원 ANOVA 결과. 핵심 구성요소는 동결 베이스 조건과 유의미한 상호작용 ($p < 0.05$)을 보인다.

Component	Main Effect		Interaction (Base × Component)		Type
	F-stat	p-value	F-stat	p-value	
General Distribution Adaptation	18.64	< 0.001	8.47	0.008*	Integral
Tail-Aware Loss	12.31	0.002	6.23	0.021*	Integral
ACL	9.87	0.005	5.12	0.034*	Integral
Scale Context	4.21	0.052	0.89	0.356	Generic
Spatial Context	5.63	0.028	1.24	0.278	Generic

* $\alpha = 0.05$ 에서 유의미. Integral: 동결 베이스에서 필수; Generic: 선택적 향상 요소.

이를 **상호작용 효과 분석**을 통해 다루며, 각 구성요소의 기여도가 동결 베이스 조건에 의존하는지 검토한다. 진정으로 필수적인 구성요소는 다음을 보여야 한다:

- 동결 베이스 조건과의 유의미한 상호작용 효과
- 학습 가능 베이스 조건보다 동결 베이스에서 더 큰 기여도

표 8는 다양한 구성에서의 이원 ANOVA 결과를 보고한다.

주요 발견..

- **GDA, TAL, ACL은 핵심적**: 각각 유의미한 상호작용 효과($p < 0.05$)를 보여, 그 기여가 동결 베이스 조건에서 특별히 증폭됨을 나타낸다.
- **문맥 모듈은 범용적**: Scale Context와 Spatial Context는 유의미한 상호작용을 보이지 않아, 베이스 학습 상태와 무관하게 일반적인 개선을 제공함을 시사한다.

이 분석은 우리의 프레이밍을 검증한다: WA는 베이스가 적응할 수 없을 때 분포 이동을 보상하고; TAL은 동결된 베이스가 최적화할 수 없는 결정 경계를 정제하며; ACL은 동결된 선형 레이어가 달성할 수 없는 비선형 표현력을 제공한다. 이러한 구성요소들은 선택적인 “부가 기능”이 아니라 동결 베이스 패러다임에 구조적으로 필수적이다.

4.3.3. 아키텍처 깊이 분석

표 9는 MoLE와 ACL 블록 간의 최적 균형을 탐색한다. 다음과 같은 발견이 있다:

- **MoLE+ACL 시너지**: 6 MoLE + 2 ACL 블록 조합이 최적의 Pixel AP (0.562)를 달성하며, MoLE-only와 ACL-only 구성 모두를 능가한다.
- **깊이 포화**: MoLE 블록을 10개 이상으로 증가시키면 학습 불안정성이 발생하며, 16개 블록에서 완전한 붕괴가 발생한다.
- **ACL 효율성**: 4개의 ACL 블록만으로도 강력한 I-AUC (0.981)를 달성하여, 작업별 적응에 대한 ACL의 효과성을 입증한다.

Table 9: 아키텍처 깊이 분석: MoLE vs ACL 블록 조합.

MoLE	ACL	Total	I-AUC	P-AP	Note
6	2	8	97.9	56.2	Optimal
4	2	6	97.8	55.9	
8	2	10	98.0	54.9	
10	2	12	98.3	54.7	
12	2	14	94.2	51.8	Degraded
16	2	18	60.4	10.7	Training collapse
6	4	10	98.3	54.2	
6	6	12	98.2	51.6	
4	8	12	98.1	50.3	
8	0	8	92.7	50.1	MoLE-only best
0	4	4	98.1	53.3	ACL-only best

Table 10: 하이퍼파라미터 민감도 요약.

Hyperparameter	Optimal	Sensitivity	Notes
tail_weight	1.0	High	+7.6%p vs disabled
spatial_context_kernel	3	High	Sharp drop at ≥ 5
λ_{logdet}	10^{-4}	High	+4.3%p vs 10^{-6}
scale_context_kernel	5	Medium	+1.7%p vs disabled
tail_top_k_ratio	0.02	Low	0.01–0.03 similar
score_aggregation_top_k	3	None	3–10 equivalent
lora_rank	64	None	16–128 equivalent

4.3.4. 하이퍼파라미터 민감도

표 10에서 주요 하이퍼파라미터에 대한 민감도를 분석한다.

표 11–13에서 가장 민감한 하이퍼파라미터에 대한 상세 분석을 제공한다.

주요 발견:

- **Tail-Aware Loss (λ_{tail})**: tail 가중치가 0에서 1.0으로 증가함에 따라 성능이 단조롭게 향상되어, 분포 경계에 집중하는 것의 중요성을 확인한다.
- **Spatial context 커널**: 3에서 최적; 큰 커널(≥ 5)은 심각한 저하를 유발한다 (kernel=7에서 -11.9%p), 과도하게 큰 수용 영역이 결함 경계를 흐리게 함을 시사한다.
- **LoRA 랭크**: 놀랍도록 민감하지 않음—16에서 128까지의 랭크가 거의 동일한 성능을 보여, rank=16으로도 정확도 손실 없이 상당한 파라미터 절감이 가능하다.

4.3.5. 학습 전략 절제

표 14는 지속 학습을 위한 다양한 학습 전략을 비교한다.

Table 11: Tail-Aware Loss 가중치 (λ_{tail}) 민감도.

tail_weight	I-AUC	P-AP	$\Delta P-AP$
0 (disabled)	95.0	48.6	-7.6
0.3	97.8	52.9	-3.3
0.5	97.9	54.8	-1.4
0.7	98.1	55.8	-0.4
1.0	98.0	56.2	-

Table 12: Tail top-k 비율 민감도. 0.02에서 최적; 높은 비율은 성능 저하.

tail_top_k_ratio	I-AUC	P-AP	$\Delta P-AP$
0.01	97.8	56.1	-0.1
0.02	98.0	56.2	-
0.03	98.1	55.8	-0.4
0.05	98.0	55.6	-0.6
0.10	97.8	55.2	-1.0

- **순차적 학습은 파열적 망각을 보임**: 베이스 가중치 동결 없이는 성능이 급격히 하락한다 (I-AUC: 97.9% → 60.1%, P-AP: 56.2% → 12.3%), 베이스 동결 전략이 지속 학습에 필수적임을 입증한다.
- **완전 분리는 공유 표현의 이점을 상실**: 망각을 피하지만, 완전히 분리된 모델은 공유 베이스 표현으로부터의 지식 전이 부족으로 인해 낮은 P-AP (-3.7%p)를 달성한다.

4.4. 지속 학습 분석

4.4.1. 망각 분석

표 15은 파라미터 격리를 통한 DecoFlow의 파열적 망각 완전 제거를 입증한다.

제로 망각 결과는 파라미터 격리 전략의 직접적인 결과이다: 베이스 normalizing flow 가중치는 Task 0 이후 동결되고, 이후 각 작업은 자체 LoRA 어댑터, Whitening 파라미터, ACL 블록만 학습한다. 이러한 작업별 파라미터들이 완전히 독립적이므로, 새로운 작업 학습이 이전에 학습한 지식을 간섭할 수 없다.

4.4.2. 라우팅 정확도

Mahalanobis 거리 기반 프로토타입 라우터는 MVTec AD에서 **1.000 라우팅 정확도**, VisA에서 **0.999**를 달성한다. 이 거의 완벽한 정확도는 두 가지 요인에서 기인한다: (1) 동결된 백본이 학습과 추론에서 일관된 특징 표현을 생성하고, (2) Mahalanobis 거리가 작업별 공분산 구조를 고려하여 특징 분포가 부분적으로 겹쳐도 강건한 구분을 제공한다.

4.4.3. 데이터셋 간 요약

표 16는 두 벤치마크에서의 DecoFlow 성능을 요약한다.

MVTec AD와 VisA 간의 성능 차이 (특히 Pixel AP: 0.562 vs 0.266)는 VisA의 본질적인 어려움을 반영한다: 더 복잡한 구조, 더 작은 결함, 더 낮은 대비의 이상을 특징으로 한다.

Table 13: Spatial context 커널 크기 민감도. 큰 커널은 심각한 성능 저하를 유발.

kernel	I-AUC	P-AP	Δ P-AP
0 (disabled)	98.0	52.9	-3.3
3	98.0	56.2	-
5	96.1	51.4	-4.8
7	90.9	44.3	-11.9

Table 14: 학습 전략 비교. Base Frozen: Task 0 이후 베이스 가중치 동결. Sequential: 동결 없음. Complete Separated: 작업당 완전히 독립적인 모델.

Strategy	I-AUC	P-AP	Δ I-AUC	Δ P-AP
Base Frozen (Ours)	97.9	56.2	-	-
Sequential Training	60.1	12.3	-37.8	-43.9
Complete Separated	98.1	52.5	+0.2	-3.7

그럼에도 불구하고, DecoFlow는 두 데이터셋 모두에서 제로 망각을 유지하여, 다양한 산업 시나리오에서 접근법의 강건성을 입증한다.

5. 결론

본 논문에서는 산업 환경에서의 지속적 이상 탐지(Continual Anomaly Detection)를 위한 DecoFlow 프레임워크를 제안하였다. 핵심 기여는 다음과 같다:

1. **Parameter Isolation 기반 지속 학습**: Base Normalizing Flow 가중치를 공유/고정하고 작업별 경량 어댑터(LoRA, WhiteningAdapter, ACL)만 학습하는 전략을 제안하여, 파열적 망각을 효과적으로 방지하면서도 파라미터 효율성을 확보하였다.
2. **Affine Coupling Layer (ACL)**: 선형 LoRA의 한계를 극복하는 비선형 가역 적응 모듈을 제안하였다. ACL은 작업별 복잡한 매니폴드 차이를 보정하며, Ablation study에서 가장 중요한 구성 요소로 확인되었다 (제거 시 Image AUROC 0.03+ 하락).
3. **One-stage Task-agnostic 추론**: Mahalanobis 거리 기반 프로토타입 라우터를 통해 Task ID 없이 단일 추론으로 라우팅과 이상 탐지를 동시에 수행한다. 이는 기존 방법들의 two-stage 추론 대비 효율적이며, 라우팅 정확도 1.000으로 신뢰성을 검증하였다.
4. **Tail-Aware Loss**: 분포의 경계에 위치한 어려운 패치에 집중하는 손실 함수를 제안하여, 특히 픽셀 수준의 정밀한 이상 위치 추정(Pixel AP) 성능을 향상시켰다.

제안하는 실험 설계는 (1) 기존 Continual AD 방법(DNE, UCAD) 및 CL baseline(EWC, LwF)과의 포괄적 비교, (2) 각 모듈의 유효성을 검증하는 체계적인 Ablation Study, (3) Forgetting 분석, Router 성능 분석, Class Order Sensitivity 등 지속 학습 특성의 심층 분석, (4) 히트맵 시각화 및 실패 사례 분석을 포함한 정성적 평가로 구성된다.

Table 15: MVTec AD에서의 망각 분석. 성능은 각 작업 학습 직후와 15개 작업 전체 완료 후 측정됨.

Task	Category	After Training	After All Tasks	Forgetting
0	Bottle	1.000	1.000	0.0
1	Cable	0.981	0.981	0.0
2	Capsule	0.954	0.954	0.0
		⋮		
14	Zipper	0.990	0.990	0.0
Mean	-	0.979	0.979	0.0

Table 16: 데이터셋별 성능 요약.

Dataset	Classes	I-AUC	P-AUC	P-AP	Routing
MVTec-AD	15	0.979	0.978	0.562	1.000
VisA	12	0.900	0.924	0.266	0.999

Limitations and Future Work:: 본 연구의 한계점과 향후 연구 방향은 다음과 같다:

- **Cross-domain 일반화**: 현재 실험은 주로 MVTec AD에 집중되어 있으며, VisA, MPDD 등 다른 도메인에서의 성능 검증이 필요하다.
- **더 긴 작업 시퀀스**: 15개 이상의 작업으로 확장 시 성능 변화에 대한 추가 검증이 필요하다.
- **Few-shot 적용**: 작업당 학습 데이터가 제한된 상황에서의 성능 분석이 향후 과제이다.
- **실시간 적용**: 산업 현장에서의 실시간 추론 성능 최적화가 필요하다.

References

- Bergmann, P., Fauser, M., Sattlegger, D., Steger, C., 2019. Mvttec ad—a comprehensive real-world dataset for unsupervised anomaly detection, in: Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, pp. 9592–9600.
- Dinh, L., Sohl-Dickstein, J., Bengio, S., 2017. Density estimation using real-nvp, in: International Conference on Learning Representations.
- Gudovskiy, D., Ishizaka, S., Kozuka, K., 2022. Cflow-ad: Real-time unsupervised anomaly detection with localization via conditional normalizing flows, in: Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision, pp. 98–107.
- Howard, A.G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M., Adam, H., 2017. Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications, in: arXiv preprint arXiv:1704.04861.
- Hu, E.J., Shen, Y., Wallis, P., Allen-Zhu, Z., Li, Y., Wang, S., Wang, L., Chen, W., 2022. Lora: Low-rank adaptation of large language models, in: International Conference on Learning Representations.
- Ioffe, S., Szegedy, C., 2015. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift, in: International Conference on Machine Learning, pp. 448–456.

- Kirkpatrick, J., Pascanu, R., Rabinowitz, N., Veness, J., Desjardins, G., Rusu, A.A., Milan, K., Quan, J., Ramalho, T., Grabska-Barwinska, A., et al., 2017. Overcoming catastrophic forgetting in neural networks. *Proceedings of the national academy of sciences* 114, 3521–3526.
- Lee, K., Lee, K., Lee, H., Shin, J., 2018. A simple unified framework for detecting out-of-distribution samples and adversarial attacks, in: *Advances in Neural Information Processing Systems*.
- Li, Z., Hoiem, D., 2017. Learning without forgetting, in: *European conference on computer vision*, Springer. pp. 614–629.
- Perez, E., Strub, F., De Vries, H., Dumoulin, V., Courville, A., 2018. Film: Visual reasoning with a general conditioning layer, in: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*.
- Roth, K., Pemula, L., Zepeda, J., Schölkopf, B., Brox, T., Gehler, P., 2022. Towards total recall in industrial anomaly detection, in: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 14318–14328.
- Zou, Y., Jeong, J., Pemula, L., Zhang, D., Dabeer, O., 2022. Spot-the-difference self-supervised pre-training for anomaly detection and segmentation, in: *European Conference on Computer Vision*, Springer. pp. 392–408.

6. Appendix