

Phasemap과 Unwrapped Phasemap을 이용한 결함의 FWHM 및 깊이에 따른 결함 탐지 정확도 분석

김기범, 김혜진

과학기술연합대학대학교, 한국전자통신연구원

chroion@ust.ac.kr, marisan@etri.re.kr

Defect Detection Accuracy Analysis According to FWHM and Depth Using Phasemap and Unwrapped Phasemap

Kim Gi Beom, Kim Hye Jin

University of Science & Technology, Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

본 논문은 자동차 공정의 표면 결함을 분석하기 위해 프린지 패턴 이미지를 생성하여 Phasemap과 Unwrapped Phasemap을 생성한 후, 결함의 FWHM과 깊이에 따른 결함 탐지 성능을 비교 분석하였다. PaDiM[1]과 PatchCore[2] 모델을 적용한 결과, Phasemap이 전반적으로 더 높은 성능을 보였으며, 특히 깊고 큰 결함에서 효과적이었다. 반면, Unwrapped Phasemap은 FWHM이 작은 결함에서 더 나은 탐지 성능을 나타내어, 결함의 특성에 따라 적절한 위상맵을 선택하는 것이 중요함을 시사한다.

I. 서론

물체의 표면 결함은 제조업에서 품질에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이다. 결함을 신속하고 정확하게 감지하는 기술은 생산 공정의 효율성을 높이는 데 필수적이며, 이를 위해 다양한 비접촉식 방법들이 제안되었다. 그 중 프린지 패턴(Fringe Pattern)을 활용한 결함 탐지 방법은 물체 표면의 미세한 단차나 변형을 포착할 수 있는 효과적인 기술로 널리 사용되고 있다. 프린지 패턴은 간섭 현상을 기반으로 생성된 주기적인 패턴을 통해 표면의 형상을 간접적으로 분석할 수 있으며, 이를 이용해 Phasemap과 Unwrapped Phasemap을 생성하여 결함을 탐지한다.

본 연구에서는 Synthetic Image Data를 이용해 프린지 패턴 기반의 데이터를 생성하고, 결함의 FWHM(Full Width at Half Maximum)과 깊이에 따라 Phasemap과 Unwrapped Phasemap이 결함 탐지에 미치는 영향을 비교 분석한다. 또한, PaDiM과 PatchCore 모델을 사용해 두 위상맵의 결함 탐지 성능을 평가함으로써, 결함의 크기와 깊이에 따른 탐지 전략을 제시하고자 한다.

II. 본론

2.1. 연구 방법

본 연구에서는 Synthetic Image Data를 생성하여, 프린지 패턴을 기반으로 결함이 포함된 데이터를 얻었다. 이 데이터를 이용해 각각 Phasemap과 Unwrapped Phasemap을 생성하였고, 결함 탐지를 위해 PaDiM 및 PatchCore 모델을 적용하였다.

무작위 위치에 결함을 생성하고, 그 결함의 깊이와 FWHM을 다양한 조합으로 설정하여 이미지를 생성하였다. 이를 통해 결함의 크기와 깊이가 서로 다른 여러 유형의 결함이 포함된 이미지 데이터셋을 구성하여 결함 탐지 모델의 성능을 평가하고, 결함의 특성에 따른 탐지 정확도를 비교 분석하는 데 활용하였다.

2.2. 실험 결과

2.2.1 Unwrapped Phasemap

	PaDiM	PatchCore
Image ROCAUC	0.784	0.813
Pixel ROCAUC	0.619	0.652

표 1. Unwrapped Phasemap 데이터셋에 PaDiM, PatchCore 모델을 이용하여 결함 탐지를 시행한 결과
표 1은 PaDiM 모델과 PatchCore 모델을 이용하여 Unwrapped Phasemap 데이터셋에 적용한 결과를 표로 나타낸 것이다. PatchCore가 PaDiM 보다 약간 더 나은 결과를 보이는 것을 알 수 있다.

	PaDiM					
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.035
1.500	-	-	-	1.000	1.000	1.000
2.000	0.917	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3.000	0.833	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4.000	0.583	0.750	0.833	0.917	1.000	1.000
5.000	0.500	0.333	0.667	0.750	0.917	1.000
6.000	0.417	0.167	0.333	0.583	0.750	0.500
7.000	0.250	0.250	0.333	0.500	0.500	0.750
8.000	0.417	0.417	0.167	0.250	0.083	0.333

	PatchCore					
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.035
1.500	-	-	-	1.000	1.000	1.000
2.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4.000	0.917	0.667	1.000	1.000	0.917	1.000
5.000	0.833	0.333	0.583	0.833	0.917	1.000
6.000	0.833	0.167	0.250	0.333	0.667	0.500
7.000	0.833	0.000	0.083	0.083	0.333	0.250
8.000	0.083	0.083	0.000	0.000	0.083	0.000

표 2. hasemap 데이터셋에서의 결함의 깊이, FWHM 별 결함 탐지 정확도 결과

표 2는 PaDiM 모델과 PatchCore 모델을 이용하여 결함이 있는 이미지들에 나타난 결함의 깊이와 FWHM에 따른 결함 탐지 결과를 나타낸 것이다. 가로축은 깊이 (mm)를, 세로축은 FWHM (mm)을 나타내며, 각 셀은

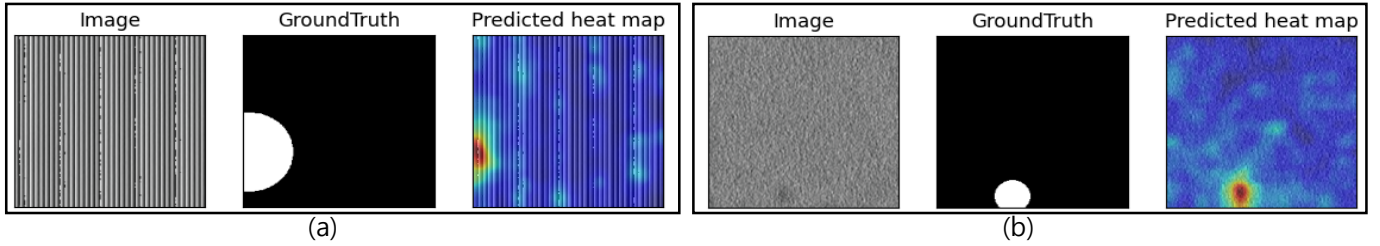


그림 1. PaDiM 모델로 결함을 예측한 결과. (a) Phasemap 이미지로 예측한 결과와 Ground Truth와 비교했을 때, 예측된 히트맵에서 결함이 뚜렷하게 나타나며, 결함 주변의 stripe 패턴이 왜곡된 것이 관찰된다. (b) Unwrapped Phasemap 이미지로 예측한 결과와 Ground Truth와 비교했을 때, 예측된 히트맵에서 결함이 작고 얇은 경우에도 비교적 뚜렷하게 탐지되었다.

해당 결함 유형에 대해 모델이 각 이미지의 결함 존재 여부를 탐지한 정확도(Accuracy)를 의미한다. Threshold를 기준으로 결함이 있는지 여부를 예측한 결과로, 정확도 값이 높을수록 모델이 결함을 올바르게 탐지한 비율이 높은 것을 의미한다.

2.2.2 Phasemap

	PaDiM	PatchCore
Image ROCAUC	0.954	0.959
Pixel ROCAUC	0.907	0.936

표 3. Phasemap 데이터셋을 PaDiM, PatchCore 모델을 이용하여 결함 탐지를 시행한 결과

표 3은 PaDiM 모델과 PatchCore 모델을 이용하여 Phasemap 데이터셋에 적용한 결과를 표로 나타낸 것이다. PatchCore가 PaDiM 보다 약간 더 나은 결과를 보이는 것을 알 수 있다.

	PaDiM					
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.035
1.500	-	-	-	0.667	0.667	0.750
2.000	0.167	0.333	0.333	0.500	0.750	0.917
3.000	0.167	0.833	0.583	1.000	0.833	1.000
4.000	0.333	0.667	1.000	1.000	1.000	1.000
5.000	0.833	0.917	1.000	1.000	1.000	1.000
6.000	0.750	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
7.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
8.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	PatchCore					
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.035
1.500	-	-	-	0.583	0.667	0.750
2.000	0.333	0.250	0.333	0.500	0.917	1.000
3.000	0.333	0.833	0.667	0.833	0.917	1.000
4.000	0.500	0.667	1.000	1.000	1.000	1.000
5.000	0.917	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6.000	0.667	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
7.000	0.917	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
8.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

표 4. hasemap 데이터셋에서의 결함의 깊이, FWHM 별 결함 탐지 정확도 결과

표 4는 PaDiM 모델과 PatchCore 모델을 이용하여 결함이 있는 이미지들에 나타난 결함의 깊이와 FWHM에 따른 결함 탐지 결과를 나타낸 것이다. 가로축은 깊이 (mm)를, 세로축은 FWHM (mm)을 나타내며, 각 셀은 해당 결함 유형에 대해 모델이 각 이미지의 결함 존재 여부를 탐지한 정확도(Accuracy)를 의미한다.

2.3. 분석 및 고찰

실험 결과, Phasemap을 이용한 결함 탐지가 Unwrapped Phasemap에 비해 전반적으로 높은 성능을 보였다. 특히, 이미지 수준과 픽셀 수준 모

두에서 Phasemap이 더 높은 ROCAUC 값을 기록하였다. 이는 Phasemap이 결함이 있는 부분에서 프린지 패턴의 왜곡을 명확하게 포착할 수 있기 때문으로 해석된다. 특히 깊고 큰 FWHM 결함에서는 Phasemap이 결함 부분에서 일자 무늬 패턴이 굽혀지는 형태로 나타나, 결함의 위치와 크기를 쉽게 확인할 수 있기에 성능 역시 더 높아지는 것을 알 수 있다.

반면, Unwrapped Phasemap은 결함이 얇고 FWHM이 작은 경우, 더 나은 성능을 보였다. 결함에서는 Phasemap에서의 주기적 위상 변동이 결함을 덜 명확하게 드러내는 반면, Unwrapped Phasemap에서는 급격한 위상 변화로 인해 결함이 더 두드러져 보였다. 이러한 결과는 결함의 크기와 깊이에 따라 위상맵의 선택이 중요하다는 점을 시사한다.

III. 결론

본 논문에서는 Fringe Pattern을 기반으로 생성된 Phasemap과 Unwrapped Phasemap을 사용해 결함 탐지 성능을 비교하였다. PaDiM 및 PatchCore 모델을 사용하여 결함 탐지 성능을 평가한 결과, Phasemap이 전반적으로 더 나은 성능을 보였으며, 특히 깊고 큰 결함에서 우수한 결과를 나타냈다. 반면, Unwrapped Phasemap은 얇고 작은 결함에서 더 효과적인 탐지가 가능했다. 이를 통해 결함의 크기와 깊이에 따라 적합한 위상맵을 선택하는 것이 결함 탐지 성능을 극대화하는 중요한 요소임을 확인할 수 있었다.

또한, 본 연구는 Synthetic Data를 사용하여 다양한 결함 크기와 깊이를 모사한 데이터를 생성하였으며, 이를 통해 실제 결함 데이터를 얻기 어려운 상황에서도 신뢰성 있는 탐지 성능 평가를 가능하게 했다. 마지막으로, Phasemap과 Unwrapped Phasemap이 각각 다른 결함 유형에 더 적합하다는 점을 기반으로 하이브리드 탐지 시스템의 가능성을 제시하였다. 향후 연구에서는 두 위상맵을 결합한 탐지 알고리즘을 개발하여 더 높은 성능의 알고리즘을 개발함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.P0023760, EUV 반도체 생산성 향상을 위한 펠리클/마스크 결함검출용 데이터 구축 및 AI 솔루션 개발)

참고 문헌

[1] DEFARD, Thomas, et al. Padim: a patch distribution modeling framework for anomaly detection and localization. In: International Conference on Pattern Recognition. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 475-489.

[2] ROTH, Karsten, et al. Towards total recall in industrial anomaly detection. In: Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2022. p. 14318-14328.