# 대용량 전자동 분자 진단 장비를 위한 비전 기반 검증 시스템

# 오도아<sup>1</sup>, 은창수<sup>2\*</sup>, 박종원<sup>2</sup> <sup>1</sup>바이오니아, <sup>2</sup>충남대학교 전파정보통신공학과

# Vision-based verification system for high-throughput fully automated molecular diagnostics equipment

Doa Oh<sup>1</sup>, Changsoo Eun<sup>2\*</sup>, Jong Won Park<sup>2</sup> <sup>1</sup>Bioneer Corporation <sup>2</sup>Dept of Radio and Information Communications Engineering Chungnam National University

**요 약** 대용량 통합형 전자동 분자 진단 장비는 검체 분주, 핵산 추출, 유전자 증폭을 연속 수행하는 시스템으로, 검사자 에게 편의성을 제공하고 교차오염 및 내부 감염을 최소화하여 의학 및 바이오 연구 분야에서 중요성이 주목받고 있다. 본 논문에서는 전자동 분자 진단 장비의 동작 전 부품의 위치와 상태를 판별해 잠재적 오류에 대응하기 위한 비전 기반 검증 시스템을 제안한다. 이 시스템은 Object Detection과 Gaussian blur, Scharr, Morphology, Binarization, Contour detection과 같은 이미지 프로세싱을 통한 이중 검증 방식을 채택하여, 의료 기기의 특수성을 고려한 접근 방법을 제시한다. 300개의 전체 테스트 데이터에 대한 시스템의 검증시간은 평균 0.53s/image이고, 1차 검증에서는 100% 정확도로 상태를 검출하였으며, 2차 검증 과정에서는 Lock case'는 평균 회전 각도 93.68°, 표준편차 2.99이고, 'Unlock case'는 평균 회전 각도 65.62°, 표준편차 8.86으로 검증했다. 검증 각도는 상태 판정 범위 안에 포함되고, 부품의 실제 상태와 2차 검증 결과는 100% 일치한다. 이 결과로 비전 기반 검증 시스템이 분자 진단 장비의 준비 상태 를 신속하게 판단하는 데 효과적이며, 오작동 방지, 교차 오염 및 샘플 손실 위험을 감소하는 데 기여할 수 있음을 확인 했다.

**Abstract** High-throughput, integrated, fully automated molecular diagnostic equipment continuously performs sample dispensing, nucleic acid extraction, and gene amplification. It provides convenience to laboratory technicians, minimizes cross-contamination and infection risk, and is gaining importance in medical and biological research. This paper proposes a vision-based verification system to determine the status of such equipment components before operation. The system countered potential errors like specimen confusion and loss. The system used dual verification through object detection and image processing, considering the special characteristics of medical devices. The average system verification time for component data was 0.53s per image. The verification angle was within the status determination range, with an average rotation angle of 93.68° and a standard deviation of 2.99 for the 'Lock Case' and an average rotation angle of 65.62° and a standard deviation of 8.86 for the 'Unlock Case.' The verification results were consistent with the actual status of clamps, demonstrating effectiveness in judging the readiness of molecular diagnostic equipment, preventing malfunctions, and reducing cross-contamination and sample loss risk.

Keywords : Automated Molecular Diagnostics, MDx System, Vision-Based Verification, Object Detection, Image Processing

#### 1. 서론

분자 진단 시스템[1]은 생체 분자를 검출하고 분석하 는 기술로, 질병의 조기 진단과 예방, 치료 등 의학 및 바 이오 연구 분야에 널리 사용된다. 최근에는 대용량 통합 형 전자동 분자 진단 시스템의 중요성이 주목받고 있는 데, 이 시스템은 샘플 튜브의 개폐, 핵산 추출[2], 실시간 유전자 증폭[3] 까지의 전 단계를 자동화하고 연속적으로 수행하여 진단과정의 효율성과 정확성을 높인다. 그러나, 자동화 시스템에는 잠재적 오류 가능성이 항상 동반된 다. 대량의 표본을 진단하는 만큼 오작동으로 인한 검체 혼선이나 손실은 진단 결과에 악영향을 줄 수 있으며, 재 검사가 필요할 경우, 막대한 시간과 비용을 소모해 전체 샘플을 다시 채취하는 상황까지 초래한다. 따라서, 전자 동 분자 진단 시스템의 전반적인 안정성 개선을 위해 비 전 기반 검증 시스템 도입을 고려할 수 있다. 이 시스템 은 검체 표본을 고정하여 이탈 및 혼합을 방지하는 중요 부품인 클램프의 상태를 점검하여, 진단 과정 중 발생할 수 있는 오류를 사전에 감지해 교차오염 및 샘플 손실 위 험을 방지할 수 있다.

윤형조[4] 등은 YOLOv2 기반의 모델을 활용해 AOI 과정에서 PCB 부품을 자동으로 분류하는 방법을 제안하 였는데 이는 딥러닝 모델 사용에 초점을 두고 있다. 문강 호[5]는 이미지 프로세싱에 초점을 두고 AR로 취득한 2 차원 이미지로부터 특징 데이터를 추출한 후 휘도를 판 별하여 밸브의 조립 상태를 검지하는 방식을 제안 한 바 있다. 이한해솔[6] 등은 딥러닝 기반의 영상 처리 기법을 이용한 겹침 돼지 분리 논문에서 실시간 처리를 위해 YOLO 모델을 적용하여 돈사 내 돼지 위치를 정의하고 이미지 프로세싱으로 분리하는 방식을 제안했다. 이소영 [7] 등은 신속한 객체 탐지를 위해 RCNN 기반 모델로 볼트를 검출하고 이미지 프로세싱으로 볼트 풀림을 감지 했다. 본 논문에서는 의료 기기 분야의 높은 신뢰성을 위 하여 Object Detection 모델을 사용한 초기 검증 및 관 심 영역 추출과 이미지 프로세싱을 이용한 추가 검증단 계를 도입한 이중 탐지 방법을 제안한다.

본 논문의 2장에서는 비전 기반 검증 시스템에 관해 서술하며 YOLOv7과 이미지 프로세싱에 관해 설명한다. 3장에서는 1차, 2차 검증 과정에 관해 서술하며, 4장에 서는 실험 결과에 대해 분석한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론과 의의를 제시한다.

# 2. 비전 검증 시스템

먼저, YOLOv7 전이 학습을 통해 학습된 Object Detection 모델을 사용하여 대상 객체의 상태와 위치 를 식별하고 클램프의 관심 영역(ROI)을 추출한다. 영상 처리를 사용한 객체 인식 방법은 정적인 환경에서 단순한 형태의 객체를 탐지하는 데 효과적이나, 클램프와 같이 반사율이 높고 회전 변위가 큰 객체는 그림자 및 반사 광의 영향으로 각도에 따라 형태가 크게 변화하여, 다 양한 환경 조건에서 식별하는 데 한계가 있다. 객체의 각도와 크기 변화에 강건한 성능을 보이는 Invariant Template Matching[8]과 저조도 환경에서도 매칭 성 능을 향상하는 기법을[9] 적용한 Keypoint Matching 그리고 YOLOv7으로 100개의 데이터에서 객체 검출 을 테스트한 결과, Invariant Template Matching의 경우 43%, Keypoint Matching의 경우 41% 낮은 탐 지 성공률을 보였다. 반면 YOLOv7의 경우 100% 객 체 탐지에 성공했다.



Fig. 1. Object Detection techniques comparison: Original image, Keypoint matching result (KM), Template matching result (TM), and YOLOv7 result

- (a) Detected by KM,TM and YOLOv7
- (b) Detected by YOLOv7 but undetected by KM and TM
- (c) Detected by TM and YOLOv7, but undetected by KM
- (d) Detected by KM and YOLOv7, but undetected by TM

Table 1. Comparison of template matching and keypoint matching result for object detection, conducted on macOS with an 10 core CPU, 16core GPU, 32GB RAM

Method	Detection Rate	Run Time(s)
Invariant Template Matching	43%	17.50
Keypoint Matching	41%	0.79
YOLOv7	100%	0.531

따라서, 객체의 다양한 변형과 조명 조건에 강건한 탐 지 능력을 지닌 딥러닝 기반의 Object Detection 모델 을 적용하면, 복잡한 각도 변화에도 객체 상태를 식별하 고 ROI를 정의할 수 있다. 이렇게 설정된 ROI는 불필요 한 정보의 영향을 최소화하여 계산 비용을 줄이고 정확 도를 개선한다. 다음 2차 검증 과정에는 이미지 프로세 싱을 사용해 정확한 회전 각도를 측정해 상태를 더 정밀 하게 파악한다.



Fig. 2. Vision-Based verification system sequence

#### 2.1 YOLOv7을 이용한 Object Detection

YOLO는 우수한 객체 탐지 및 분류 성능을 보여, 많 은 산업 분야에 사용된다. YOLOv7은 2022년 7월 공개 되었으며, Trainable bag-of-freebies 방법을 제안하 여 inference cost를 증가시키지 않고도 객체 인식 정확 도를 크게 향상했다. 또한 복합 스케일링을 도입하여 모 델의 크기와 성능을 조정할 수 있어 다양한 응용 분야와 하드웨어 환경에서 활용될 수 있도록 설계되었으며[10], 현재 모델의 네트워크 구조에 따라 YOLOv7, YOLOv7-X, YOLOv7-W6, YOLOv7-E 6E 등을 제공하고 있다[11]. 논문에서는 분자 진단 장비의 영상데이터를 사용해 YOLOv7을 전이 학습하여 클램프의 장착 상태를 탐지하 는 모델을 구축하였다.

#### 2.2 이미지 프로세싱

이미지 프로세싱을 사용한 2차 검증단계에서는 먼저 Gaussian Blur를 5x5 커널 사이즈로 적용하여 이미지 의 경계선을 정제하고 노이즈를 줄인다. 이후 Scharr 필 터를 적용하여 이미지의 경계선을 강조한다. Scharr 필 터는 Sobel 필터의 방향성과 회전 불변성 특성을 개선한 것으로 Sobel 커널에 비해 더 큰 가중치를 경계 픽셀에 할당하여 대각선 방향의 에지에 대해서도 민감하게 검출 이 가능하다[12]. 이때 x 방향으로 1차 미분을 계산하는 데 이렇게 하면 수평 방향으로 변화가 발생하는 지점인 수직 엣지 특성을 강조하여 검출할 수 있다.



(a) (b) (c) (d) (e)
Fig. 3. Scharr and Sobel edge detection comparison:
(a) Original image (b) Scharr X-axis derivatives
(c) Scharr Y-axis derivatives (d) Sobel X-axis derivatives (e) Sobel Y-axis derivatives.

이어서, Morphology Closing[13] 연산을 5x5 크기 의 구조를 사용하여 수행한다. 이 과정에서 작은 잡음이 제거되며, 주요 구조는 보존된다.



Fig. 4. Comparison of morphological operations with different kernel sizes: (a)Closing, 3x3 kernel
(b) Closing, 5x5 kernel
(c) Opening, 3x3 kernel
(d) Opening, 5x5 kernel

이진화 처리는 객체와 배경을 명확하게 구분하기 위한 단계로 Otsu 이진화 기법을 사용해 최적의 임계 값을 결 정한다. 마지막으로, 윤곽선 추출[14]을 통해 객체의 형 태를 찾는다. 이렇게 추출된 윤곽선의 좌상단과 좌하단 좌표를 기준으로 계산된 각도는 0°에서 180° 사이의 값 을 갖도록 조정되며 이는 객체의 방향성에 대한 일관성 을 유지하고 정확하게 파악하기 위함이다.



Fig. 5. Image processing algorithm

클램프의 회전 변위는 50°에서 100°이며 클램프와 장 비의 고정부가 스프링으로 되어 있기 때문에 스프링의 텐션과 클램프 간 정렬이 유지되는 각도 범위를 측정하 였을 때, 각도가 80° 이상 100° 이하일 경우의 클램프의 상태는 'Lock'으로, 50° 이상 79° 이하일 경우의 클램프 의 상태는 'Unlock'으로 판별된다. 이 범위는 식(1)과 같 다.

Lock: 80° :	≤ a	ngle :	≤ 1	00°		
Unlock: 50°	$\leq$	angle	$\leq$	79°	(1	)

# 3. 실험

#### 3.1 Object Detection

학습을 위해 장비 구동 영상에서 프레임을 추출하여 1,456\*1,088 크기의 이미지를 수집하였다. 여기에 성능 을 향상하고 과적합 방지를 위해, 원본 영상을 변형해 입 력 데이터로 사용하는 Image Augmentation[15]을 적 용한 뒤, Lock case(Class 0), Unlock case(Class 1)로 레이블링해 학습 데이터로 사용하였다. 장비 내부 구성 요소의 상태를 탐지하기 때문에, 사용 영역이 제한되어 있으며 감지 작업은 일관된 위치에서 수행되므로 대량의 데이터셋이 필요하지 않다. 학습에 사용한 데이터의 수 는 총 728장으로 507장의 학습 이미지, 151장의 검증 이미지 및 70장의 테스트 이미지로 배치하였다. 학습은 Geforce RTX 4090 환경에서, epoch는 200, batch size는 80으로 하이퍼파라미터를 설정하여 진행한 결과, 총 2시간 42분이 소요되었고, 학습된 모델에 대해 정밀 도(Precision), 재현율(Recall), mAP를 평가 척도로 사 용하여[16] 성능을 확인하였을 때 정밀도 91%, 재현율 96.4%, mAP(0.5) 97.4%로 나타났다.

Table	2.	Precision, Recall, and mAP values across
		training epochs for the object detection
		model.

Epoch	Precision	Recall	mAP(0.5)
1	0.8442	0.34587	0.4455
100	0.9311	0.9456	0.9616
150	0.9424	0.9221	0.9612
200	0.9104	0.9649	0.9741



Fig. 6. Precision, Recall, and mAP graph across training epochs for the object detection model.



Fig. 7. Performance evaluation curves: (a) F1 score curve (b) Precision-Recall curve

이어서, 학습된 모델을 사용하여 객체 탐지를 진행한 후, 원본 이미지에서 객체의 1차 판별과 동시에 클램프 영역의 좌표를 얻는다.



Fig. 8. Object detection model test result

#### 3.2 이미지 프로세싱

이렇게 얻어진 객체 좌표를 이용해 관심 영역을 추출 한 뒤, 회전 각도를 계산하고 상태를 판별하는 2차 검증 단계를 진행한다.



Fig. 9. Image processing test result (a) 97.1° (Lock case) (b) 90.6° (Lock case) (c) 83.1° (Lock case) (d) 78.6 (Unlock case) (e) 64.5 (Unlock case) (f) 53.6 (Unlock case)

# 4. 실험 결과 및 분석

실험은 'Lock case' 150개 'Unlock case' 150개 총 300개의 데이터를 대상으로 진행하였다. 1차 검증은 YOLOv7 전이 학습을 통해 학습된 Object Detection 모델을 사용해 실시하였으며, 전체 테스트 케이스를 평 균 0.531s/image의 속도로 100% 검출하였고, 장비 내 클램프의 상태와 정확히 일치하는 결과를 보여주었다. 2 차 검증은 이미지 프로세싱을 통해 실시되었으며, 평균 처리시간은 0.0018s/image이며, 'Lock case'의 최소 회전 각도와 최대 회전 각도는 각각 83.54°와 99.52°, 평균 회전 각도는 93.68° 표준편차는 2.99로 측정되었 고, 'Unlock case'의 최소 회전 각도와 최대 회전 각도 는 각각 51.29°와 78.91°, 평균 회전 각도는 65.62°, 표 준편차는 8.86으로 측정되었다. 해당 각도 범위는 클램 프 상태 판정 기준 범위 내에 속하며 식(2)과 같이 표현 할 수 있다.

Lock:  $(83.54^{\circ} \le angle \le 99.52^{\circ}) \le (80^{\circ} \le angle \le 100^{\circ})$ Unlock: $(51.29^{\circ} \le angle \le 78.91^{\circ}) \le (50^{\circ} \le angle \le 79^{\circ})$ (2)

비전 기반 검증 시스템은 개별 이미지에 대해 0.532s/image의 속도로 처리했으며, 전체 데이터 셋에 대한 1차, 2차 검증 결과와 장비 내 실제 클램프의 상태 와 정확히 일치하며 이는 Object Detection 모델과 이 미지 프로세싱을 사용한 검증 방식이 신뢰성 있음을 보 여준다.



Fig. 10. Distribution of data

Table 3. Vision-based verification system result

	Lock	Unlock
Average	93.68	65.62
Standard deviation	2.99	8.86

#### 5. 결론

대용량 통합형 전자동 분자 진단 시스템은 다수의 샘 플을 한꺼번에 진단하는 만큼 샘플 혼선이나 손실 발생 시 진단 결과에 영향을 줄 수 있어, 잠재적 오류 가능성 에 대한 대비가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 문제점 을 방지하기 위한 접근 방법으로 비전 기반 검증 시스템 을 제안하며, 의료기기라는 특수성을 고려하여 Object Detection과 이미지 프로세싱을 통한 이중 검증 방식을 채택하였다. 본 시스템의 검증시간은 0.53s/image이며, 'Lock case'는 평균 회전 각도 93.68°, 표준편차 2.99 로, 'Unlock case'는 평균 회전 각도 65.62°, 표준편차 8.86으로 측정하였다. 전체 데이터의 검증 각도는 상태 판정 범위 안에 포함되고, 클램프의 실제 상태와 검증 결 과는 100% 일치한다. 이 결과는 Object Detection 모 델과 이미지 프로세싱 방식을 사용하여 클램프의 상태를 판단하는 방법이 기준 범위 내에서 신뢰할 수 있음을 보 여준다.

해당 논문을 통해 이 시스템이 분자 진단 장비의 준비 상태를 정밀하게 식별함으로써, 오류에 대한 신속한 대 응을 가능하게 하는데 기여할수 있음을 확인했으며, 이 는 검체 표본의 교차 오염과 샘플 손실 위험을 감소시켜 진단 결과에 대한 신뢰성 향상 및 분자 진단의 안전성, 진단 프로세스의 효율성을 한 단계 향상할 것으로 기대 된다.

### References

- G. Poste, "Molecular diagnostics: a powerful new component of the healthcare value chain", Expert Rev Mol Diagn, vol. 2001, pp. 1-5.
- [2] S. V. Mullegama, M. O. Alberti, C. Au, Y. Li, T. Toy, V. Tomasian, R. R. Xian, "Nucleic acid extraction from human biological samples", in Biobanking: Methods and Protocols, Springer, 2019, pp. 359–383. DOI: <u>https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8935-5\_30</u>
- [3] S. A. Deepak, K. R. Kottapalli, R. Rakwal, G. Oros, K. S. Rangappa, H. Iwahashi, G. K. Agrawal, "Real-time PCR: revolutionizing detection and expression analysis of genes", Current Genomics, vol. 8, no. 4, 2007, pp. 234-251. DOI: https://doi.org/10.2174/138920207781386960
- [4] H. Yoon, J. Lee, "PCB component classification algorithm based on YOLO network for PCB inspection", Journal of Korea Multimedia Society, vol. 24, no. 8, 2021, pp. 988-999. DOI: <u>https://doi.org/10.9717/kmms.2021.24.8.988</u>
- [5] M. H. Kang, "Detecting the screw-assembly state of a valve-body using the AR method", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 22, no.1, 2021, pp. 24-30. DOI: <u>https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.1.24</u>
- [6] H. Lee, J. Sa, H. Shin, Y. Chung, D. Park, H. Kim, "Separation of occluding pigs using deep learningbased image processing techniques", Journal of Korea Multimedia Society, vol. 22, no. 2, 2019, pp. 136-145.

DOI: https://doi.org/10.9717/kmms.2019.22.2.136

- [7] S.-Y. Lee, T.-C. Huynh, J.-H. Park, J.-T. Kim, "Bolt-loosening detection using vision-based deep learning algorithm and image processing method", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, vol. 32, no. 4, 2019, pp. 265-272. DOI: <u>https://doi.org/10.7734/COSEIK.2019.32.4.265</u>
- [8] Z. Zhang, H. Shang, "Low-cost solution for vision-based robotic grasping", 2021 International Conference on Networking Systems of AI (INSAI), Shanghai, China, 2021, pp. 54-61. DOI: https://doi.org/10.1109/INSAI54028.2021.00022
- [9] Y. Kwon, J. Youn, K. Choi, "Feature matching framework in low-light environment for moving object localization", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 24, no. 10, 2023, pp. 535-542. DOI: <u>https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.10.535</u>
- [10] C. Y. Wang, A. Bochkovskiy, H. Y. M. Liao, "YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors", in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023, pp. 7464-7475. DOI: <u>https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.02696</u>
- K. Y. Wong, "YOLOv7", GitHub repository, 2023. Available from: <u>https://github.com/WongKinYiu/yolov7</u> (accessed Nov. 1, 2023).
- [12] Da-Eun Song, Dong-Been Jeon, Tae-Sung Ha, Hyung Won Lee, kim kyoung yee, "Comparison of Korean facial expression classification performance between deep learning-based image filters", Journal of Nextgeneration Convergence Technology Association, vol. 6, no. 5, 2022, pp. 767-774. DOI: https://doi.org/10.33097/JNCTA.2022.06.05.767
- [13] H. J. A. M. Heijmans, C. Ronse, "The algebraic basis of mathematical morphology I. Dilations and erosions", Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 50, no. 3, 1990, pp. 245-295. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/0734-189x(90)90148-0</u>
- [14] S. Suzuki, "Topological structural analysis of digitized binary images by border following", Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 30, no. 1, 1985, pp. 32-46. DOI: https://doi.org/10.1016/0734-189x(85)90136-7
- [15] C. Shorten, T. M. Khoshgoftaar, "A survey on image data augmentation for deep learning", Journal of Big Data, vol. 6, no. 1, 2019, pp. 1-48. DOI: https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0
- [16] M. Everingham, S. A. Eslami, L. Van Gool, C. K. Williams, J. Winn, A. Zisserman, "The PASCAL visual object classes challenge: A retrospective", International Journal of Computer Vision, vol. 111, 2015, pp. 98-136. DOI: <u>https://doi.org/10.1007/s11263-014-0733-5</u>

[정회원]



- 2022년 8월 : 충남대학교 전자전 파정보통신공학과 (공학석사)
  2022년 9월 ~ 현재 : 충남대학교
- 전파정보통신공학과 (박사과정) • 2023년 3월 ~ 2024년 3월 : (주)바이오니아 주임연구원

〈관심분야〉 영상처리, 컴퓨터비전

### 은 창 수(Changsoo Eun)

#### [정회원]



학과 (공학석사) • 1995년 12월 : 텍사스 오스틴대학

• 1987년 2월 : 서울대학교 전자공

교 전기공학과 (공학박사)

<관심분야> 통신회로,디지털 신호처리, 통신신호 처리

박 종 원(Jongwon Park)

[정회원]



- 1981년 2월 : 카이스트 전산학과 (공학석사) • 1001년 8월 : 카이스트 전산학과
- 1991년 8월 : 카이스트 전산학과 (공학박사)

<관심분야> 고속영상처리, 의학영상처리, 다중접근기억장치