

논문 2024-13-36

카테터 제조를 위한 토출영역 분할 기반 센터링 방향 분류 시스템

(Centering Direction Classification System for Discharge Area Segmentation based on Catheter Manufacturing)

손진영, 최지동, 김병학, 윤종필, 정승현*, 원홍인*

(Jin Yeong Son, Ji Dong Choi, Byeong Hak Kim, Jong Pil Yun, Seung Hyun Jeong, Hong-In Won)

Abstract : This paper proposes a vision-based centering direction inference system designed to enhance the accuracy of equipment alignment during the initial setup phase of catheter manufacturing. This system addresses the challenges of centering tasks that are prone to human error and variability, aiming to significantly improve the reliability and efficiency of the production process. Through the construction of a comprehensive catheter centering dataset, this study employs the advanced capabilities of the SAM2 (Segment Anything Model 2) to extract precise mask data from catheter material extrusion sequences. These masks provide detailed insights into the positional changes from the initial to the final frame, which are essential for inferring the accurate centering direction. The algorithm developed categorizes the centering direction into three distinct classes: 'Normal', 'Right', and 'Left'. It demonstrates robust performance with an accuracy of approximately 88.8% showcasing the system's effectiveness across different material types. This level of accuracy is crucial for ensuring the quality and consistency of catheter products. Moreover, the paper discusses the potential for future research to expand the application of the SAM2 algorithm to enhance centering precision for a broader range of materials and catheter shapes. The ongoing development of this technology is expected to further automate and refine manufacturing processes, pushing the boundaries of what is currently achievable in high-precision manufacturing environments. The implementation of such advanced manufacturing technologies not only streamlines production but also facilitates a shift towards smarter manufacturing practices.

Keywords : Catheter Manufacturing, Centering Direction Classification, Segmentation Anything Model 2, Vision-based Centering System, Data-Driven Manufacturing

1. 서론

의료 기기 제조 분야에서 많이 사용되고 있는 카테터 등 다양한 중요 의료기기의 생산은 높은 정밀도와 일관성을 요구한다 [1]. 현재 카테터 제조 공정에서의 작업 진행을 위하여 초기 설비 조정 단계에 정밀한 센터링 작업이 필수적이다. 센터링 작업은 카테터 튜브의 수지가 토출될 때 수지가 정면으로 토출되도록 하여 튜브의 두께가 균일하게 유지되게끔 장비를 세팅하는 작업을 의미한다. 기존의 센터링 방법들은 대부분 수동으로 이루어지고 있다. 이러한 수동 조

정 방식은 작업자의 숙련도와 주의력에 크게 의존하며, 이로 인해 생산 효율성과 제품 품질이 일관성을 유지하는 데 한계가 있다. 특히, 작업자의 피로나 주의력 저하가 직접적으로 제품의 결함으로 이어질 수 있는 심각한 위험을 내포하고 있다 [2, 3].

이러한 문제를 해결하기 위해 비전 센서를 활용하여 얻은 데이터를 기반으로 인공지능을 결합한 방법들이 연구되고 있다 [4]. 관련 연구로는 ERFLL (Edge-Region Focal Loss)에 기반한 의미 분할 방법을 사용하여 카테터 압출 공정에서 수지의 헤딩 각도를 추정하는 방법은 손실함수와 주성분 분석을 사용하여 압출 공정에서 수지 헤딩 각도를 추정함으로써 공정 상태에 대한 모니터링을 가능하게 하는 방법이다 [5]. 또 다른 연구로는 두 개의 카메라를 사용하여 카테터 튜브의 각도를 추정하기 위하여 합성곱 신경망을 이용하는 방법도 연구되고 있다 [6]. 이 방법은 획득 이미지에 합성곱 신경망을 통해 분할하고 주성분 분석을 적용하여 압출 각도를 추정하는 방법이다. 하지만 기존의 연구들은 카테터 압출 각도 추정에 주로 초점을 맞추고 있으며 카테터 소재의 토출 형태와 위치 변화를 종합적으로 분석하여 센터링 방향

*Corresponding Author (sh.jeong@koreatech.ac.kr, luvhaym@kitech.re.kr)

Received: Sep. 6, 2024, Revised: Sep. 27, 2024, Accepted: Oct. 31, 2024.

J. Y. Son, J. D. Choi: Korea Institute of Industrial Technology (Research Student)

S. H. Jeong: Korea University of Engineering and Education. (Assis. Prof.)

B. K. Kim, J. P. Yun, H. I. Won: Korea Institute of Industrial Technology. (Senior Researcher)

* This study has been conducted with the support of the Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). This research was conducted with the support of the Korea Institute of Industrial Technology under the Practical Application and Technology Support Project (KITECH-JA-240008). This research was supported by "Regional Innovation Strategy (RIS)" through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE) (2021RIS-004)

을 분류하는 것에는 한계가 있다. 본 논문에서는 비전 센서와 이미지 처리 기술을 통합한 센터링 방향 분류 시스템을 제안한다. 이 시스템은 작업자의 개입을 최소화 하는 것을 목적으로 두고 있으며 장비 센터링의 정밀도를 향상시켜 전체적인 제조 공정의 신뢰성과 효율성을 증가시키는 것을 목표로 한다. 특히, 이 시스템은 카테터 소재의 압출 시퀀스에서 보여지는 소재의 압출 형태와 위치 변화를 정밀하게 추적하고 분석하여 센터링의 방향을 분류할 수 있다.

본 논문에서는 제안하는 비전 기반 센터링 방향 분류 시스템은 다음과 같다. 이 시스템은 카테터 제조에 사용되는 다양한 재료 유형에 적용할 수 있도록 Foundation Model인 SAM2 (Segment Anything Model 2)를 사용한다 [7, 8]. Foundation Model을 사용하는 이유는 카테터 소재의 색상 및 종류가 다양하기 때문에 모든 경우에 대하여 학습을 진행 후 처리하는 것은 어려움이 있다. 따라서 학습에 대하여 자유롭고 다양한 소재의 시퀀스 이미지에 고성능 영역 분할이 가능한 SAM 2를 통해 분할된 압출 소재 데이터를 추출하여, 센터링 포지션에 따라 발생하는 압출 현상의 초기 프레임부터 최종 프레임까지 시간별 위치 변화를 분석하여 센터링 상태 진단을 가능하게 한다.

본 논문의 목적은 센터링 조정 작업시 작업자에 의한 수동적인 조정으로 인하여 편차가 발생하므로 비전 센서를 통해 카테터 제조 공정의 센터링 조정을 위한 데이터셋 구축과 SAM2 기반의 압출 영역 분할 활용한 센터링 방향 분류에 대하여 투명 소재 및 불투명 소재에 대한 분류 성능에 대해 정확도를 검증하기 위해 실제 데이터 라벨과 변화되는 mask의 변화량을 통해 추론한 방향 분류를 통해 정확도를 검증한다. 또한, 본 논문의 기여도는 다양한 소재에 대해서도 비전 센서를 통한 센터링 포지션별 압출 상태에 대하여 분류를 가능하게 함으로써 추후 제조 공정의 자동화에 기여하고, 이상 상태 진단을 통해 작업자의 개입을 최소화하여 생산 시간 및 비용을 줄이고, 제조 품질 향상 및 불량률 감소 등 생산 효율성 증가에 대하여 기여한다 [9-11].

II. 본 론

1. 데이터 셋 구성

카테터 제조 공정은 의료 기기 제조 분야에서 특히 높은 정밀도와 일관성을 요구한다. 카테터와 같은 생명을 지탱하는 의료 기기는 그 제조 과정에서의 미세한 오차조차 환자에게 심각한 영향을 줄 수 있기 때문에, 제조 초기 단계의 정확한 센터링은 제품의 안전성과 성능을 보장하는 데 결정적인 역할을 한다. 기존의 센터링 방법들이 수동으로 이루어지고 있는 현실은, 작업자의 숙련도 차이에서 발생하는 편차로 인하여 정밀성을 달성하기에는 한계가 있다.

본 논문에서는 이와 같은 공개된 데이터셋이 없기 때문에 표 1과 같이 투명 소재와 불투명 소재를 포함한 다양한 카테터 제조 공정에서 직접 데이터를 취득하여 새로운 데이터셋을 구성하였으며, 데이터 취득은 삼성전자의 갤럭시 X 커버

표 1. 카테터 제조 데이터셋 취득 및 구성

Table 1. Catheter manufacturing datasets acquisition and composition

Class	Material	Seq	Total Images	Image Size	Image Acquisition Device
Left	Transparency	10	30	660 x 660	Samsung Galaxy XCover 5
	Opacity				
Right	Transparency				
	Opacity				
Normal	Transparency				
	Opacity				

5를 사용하여 1080 x 1920 해상도의 고해상도 이미지를 획득함으로써 수행된다. 이 고해상도의 이미지는 센터링의 미세한 변화를 정밀하게 분석할 수 있는 기술적 기반을 제공한다.

데이터 셋은 투명 소재와 불투명 소재에 대해 센터링의 위치를 설정한 후, 압출되는 소재에 대하여 반복적인 압출 과정을 통해 취득된다. 이 과정은 각 소재에 대해 센터링이 정상(Normal), 오른쪽 치우침(Right), 왼쪽 치우침(Left)으로 구성되고 각 케이스마다 30장의 이미지로 구성된 10개 시퀀스로 1800장의 이미지를 타겟 중심으로 660 x 660 크기의 영역으로 잘라내어 센터링 분석 외의 정보를 제거하여 활용된다.

이렇게 구성된 데이터셋은 실제 제조 환경에서 발생할 수 있는 다양한 센터링 상황을 반영하며, 제안된 시스템이 센터링 방향을 자동으로 분류하고 최적의 제어를 가능하게 함으로써, 제조 공정의 자동화에 기여할 수 있다. 연구 결과는 제조업의 자동화와 능동적인 제어를 진행하는 것에 있어 실질적인 자료로 활용될 수 있으며, 제조 환경에서의 다양한 응용 시스템에 활용 가능할 것으로 기대된다.

2. SAM 2 (Segment Anything Model 2)

본 논문에서는 이미지뿐만 아니라 비디오 데이터의 세그먼트에도 적용 가능한 SAM 2가 사용된다. SAM 2는 시각적 세그먼트의 시공간적 범위를 결정하는 비디오 영역 분할을 위한 통합 모델로 이미지를 단일 프레임 비디오로 간주하여 확장한다 [12]. 이 모델은 비디오 도메인의 이미지 영역 분할을 일반화한 PVS (Promptable Visual Segmentation) 작업을 수행한다 [13]. PVS 작업은 비디오의 어느 프레임이나 point, box 또는 mask를 입력으로 받아 관심 있는 세그먼트의 시공간 mask인 masklet을 예측한다. 예측된 masklet은 추가 프레임에서 프롬프트를 제공함으로써 반복적으로 세분화될 수 있다.

SAM 2는 이전 상호 작용 및 객체에 대한 정보를 저장하는 메모리를 갖추고 있어, 비디오 전반에 걸쳐 masklet 예측을 생성하고, 이전에 관찰된 프레임에서 객체의 저장된 메모리 컨텍스트 기반으로 이를 효과적으로 수정할 수 있다. 이 스트리밍 아키텍처는 비디오 도메인으로 SAM을 자연스럽게 일반화하며 한 번에 하나의 비디오 프레임을 처리하고 대상 객체의 이전 메모리에 주의를 기울이는 메모리 주의 모듈을 갖추고 있다. 이미지에 적용될 때는 메모리가 비어 있고 모델은 SAM처럼 동작한다.

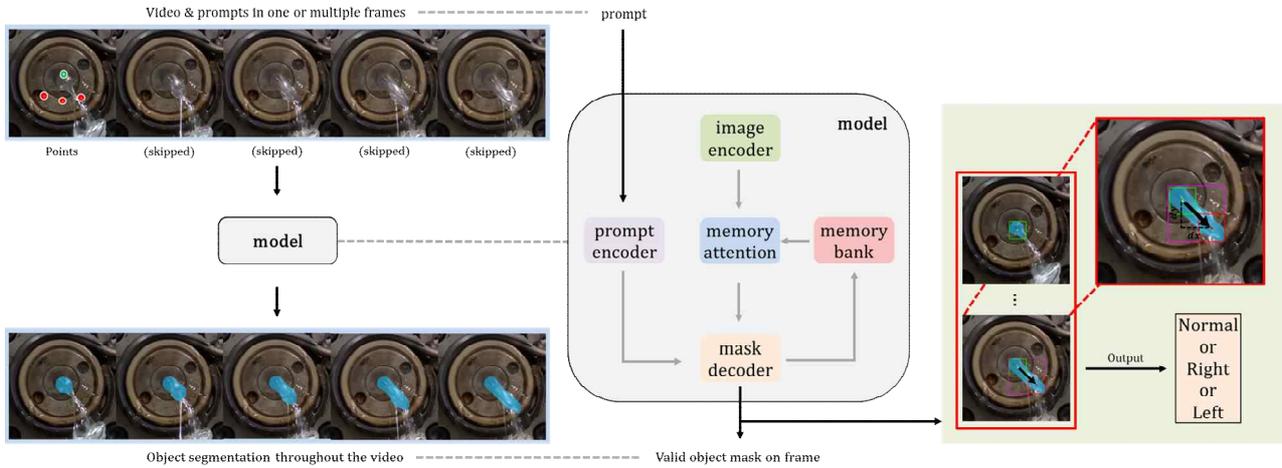


그림 1. 센터링 방향 분류 알고리즘 구조

Fig. 1. Centering direction classification algorithm architecture

기존 모델 지원 접근 방식과 비교하여 데이터 엔진은 SAM 2를 루프에 포함시킴으로써 8.4배 빠르면서 비슷한 품질을 제공한다. SAM 2는 기존 접근법보다 3배 적은 상호 작용을 사용하여 더 나은 영역 분할 정확도를 제공한다. 또한, 다양한 평가 설정에서 기존 비디오 객체 영역 분할 벤치마크를 능가하고 이미지 영역 분할 벤치마크에서 SAM보다 우수한 성능을 제공하며 6배 더 빠른 성능을 보여준다.

3. 센터링 방향 분류 알고리즘

카테터 제조 공정에서 정밀한 센터링은 제품의 품질과 일관성을 결정하는 핵심 요소이다. 현재 많은 제조 공정에서 센터링을 수동으로 조정하고 있으며 이는 작업자의 숙련도에 크게 의존한다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 비전 센서와 이미지 처리 기술을 활용한 센터링 방향 분류 시스템을 제안한다. 이 시스템은 기존의 분류 모델과는 다르게 하나의 이미지를 보고 분류하는 것이 아닌 토출되는 수지의 변화를 보고 방향을 분류하게 되는 알고리즘이다. 이와 같은 방법을 사용하는 이유는 기존 분류 모델은 학습을 통해 얻어진 이미지 feature를 통해 분류하므로 다양한 소재를 사용하는 카테터 제조 공정에는 적합하지 않아 foundation model인 SAM 2에서 얻어진 토출 수지의 변화 정보를 활용하여 분류하는 방법이 application에 적합하다.

그림 1은 본 논문에서 제안하는 센터링 방향 분류 알고리즘의 구조를 보여준다. 본 논문의 알고리즘 구조는 입력 및 프로세싱 단계, 모델 처리 단계, 출력 단계로 구성된다. 입력 및 프로세싱 단계는 직접 구축한 카테터 제조 공정 센터링 데이터 셋을 사용한다. 입력으로는 압출되는 과정의 시퀀스 이미지와 프롬프트로 point가 입력된다. point는 positive point와 negative point가 사용되며 positive point는 분할하고자 하는 객체에 대한 프롬프트 point, negative point는 분할하려는 대상이 아닌 제외될 영역에 대한 프롬프트 point이다. 본 논문에서는 그림 1에서 볼 수 있듯이 시퀀스 이미지의 첫 프레임에 positive point 1개, negative point가 3개 사용되었

으며 이후의 프레임에는 추가 프롬프트 없이 진행된다.

모델 처리 단계는 SAM2를 사용하며 이미지 인코더, 메모리 어텐션, 프롬프트 인코더, 메모리 인코더, 메모리 뱅크로 구성된다. 이미지 인코더는 각 프레임을 나타내는 토큰을 생성하며 이는 MAE (Masked AutoEncoder)로 사전 학습된 계층적 Hiera 이미지 인코더에 의해 처리되어 디코딩 중에 Multi-Scale feature를 사용할 수 있도록 한다 [14, 15]. 메모리 어텐션은 transformer block을 쌓아 구성되며, 각 block은 현재 프레임의 이미지 인코딩을 입력으로 받아 self-attention과 메모리 뱅크에 저장된 정보에 대한 cross-attention을 수행한다 [16, 17]. 이를 통해 과거 프레임의 feature와 예측하게 된다. 프롬프트 인코더는 points, box, mask로 프롬프트되어 주어진 프레임에서 객체의 범위를 정의할 수 있도록 한다. 이는 기존의 SAM과 동일한 방법이며, 입력된 프롬프트는 임베딩과 위치 인코딩으로 표현된다. 메모리 인코더는 convolutional module을 사용하여 출력 마스크를 다운샘플링하고, 이를 이미지 인코더의 컨디셔닝되지 않은 프레임 임베딩과 결합한 다음 가벼운 convolutional layer들을 통해 정보를 융합하여 메모리를 생성한다. 메모리 뱅크는 최대 입력된 시퀀스 이미지 프레임 수의 최근 프레임에 대한 메모리 FIFO queue를 유지하며 프롬프트된 프레임에 대한 정보를 저장한다 [18]. 이 구조는 과거 예측 정보와 시간적 위치 정보를 활용하여 모델이 단기적인 객체의 움직임을 표현할 수 있도록 한다.

출력 단계는 마스크 디코더와 센터링 방향 분류로 구성된다. 마스크 디코더는 모델 처리 단계에서 처리된 데이터를 통해 객체인 압출되는 카테터에 대해 영역 분할 mask를 생성한다. 센터링 방향 분류 부분은 초기 프레임의 mask에서 bounding box를 생성하고 중심점을 추출한다. 이후 마지막 프레임까지 얻어진 압출 변화에 대한 mask를 분석하여 변화가 발생한 압출 영역 끝단에 초기 프레임에서 얻은 크기의 bounding box를 적용 후 중심점을 얻고 시간별 발생하는 mask 변화량 비교를 통해 변화 특성에 따라 센터링 방

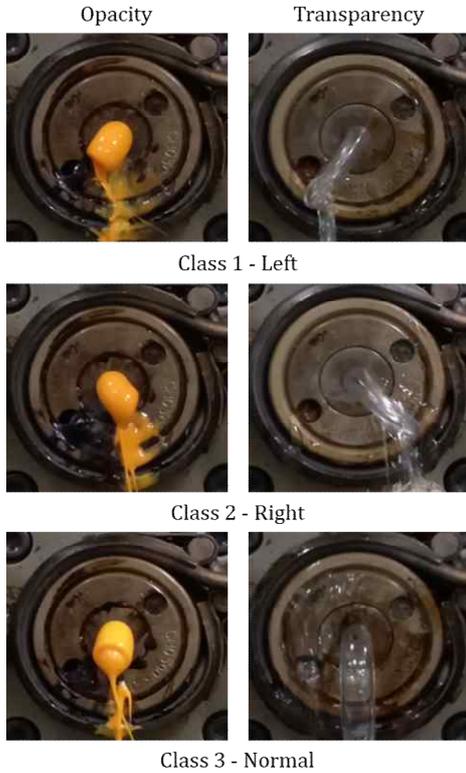


그림 2. 센터링 방향 분류 소재별 클래스 예시 (소재: 좌 - 불투명, 우 - 투명)
Fig. 2. Centering direction classification example by material class (material: left - opacity, right - transparency)

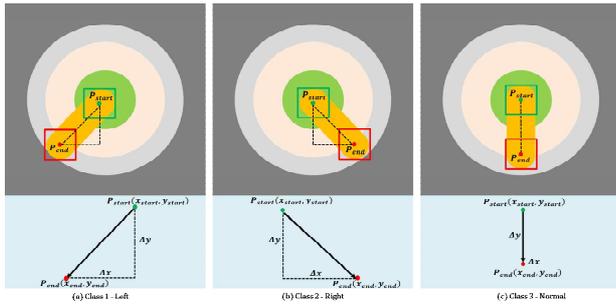


그림 3. 센터링 방향 분류 알고리즘 분류 기준
Fig. 3. Criteria for centering direction classification

향 분류를 하게 된다.

본 논문에서 센터링 방향 분류 알고리즘의 클래스는 그림 2에서 볼 수 있듯이 Left, Right, Normal 3가지 클래스로 분류한다. 분류 방법은 그림 3과 같다. P_{start} 는 x_{start} 와 y_{start} 로 구성되며 초기 프레임에서 얻은 mask의 bounding box 중심점을 의미한다. P_{end} 는 x_{end} 와 y_{end} 로 구성되며 변화가 발생한 mask의 끝단에 bounding box 중심점을 의미한다.

Class 1은 Left로 이미지 좌표 기준 x 변화량 감소, y 변화량 증가하는 경우이며 변화량은 수식 (1)과 같으며 센터링 방향이 중심축에서 왼쪽으로 치우쳐진 이상 상태이다.

$$\Delta x = (x_{end} - x_{start}), \Delta x \leq -5$$

$$\Delta y = (y_{end} - y_{start}), \Delta y > 0$$
(1)

Class 2는 Right로 수식 (2)와 같이 x 와 y 변화량이 증가하고 센터링 방향이 오른쪽으로 치우쳐진 이상 상태이다.

$$\Delta x = (x_{end} - x_{start}), \Delta x \geq 5$$

$$\Delta y = (y_{end} - y_{start}), \Delta y > 0$$
(2)

Class 3은 Normal로 수식 (3)과 같이 5 px (pixel) 미만의 x , y 변화량이 발생하는 경우이며 카테터 소재가 중심축을 따라 정확하고 균일하게 압출되는 정상 상태로 분류된다. x 변화량에 대해 5 px (pixel) 미만의 변화량으로 설정한 것은 미세한 변동에 대한 오차 범위로 정상 데이터 셋 공정에서 얻은 x 변화량의 평균 오차 값으로 임계값을 선정한다.

$$\Delta x = (x_{end} - x_{start}), -5 < \Delta x < 5$$

$$\Delta y = (y_{end} - y_{start}), \Delta y > 0$$
(3)

III. 실험 및 결과

1. 실험 설계

본 논문에서는 제안한 센터링 방향 분류 알고리즘의 정확성을 검증하기 위해 카테터 제조 공정에서 실시간으로 수집된 다양한 소재와 센터링 위치별 데이터 셋을 구축하였으며, 데이터 셋은 투명, 불투명 소재와 센터링의 정상, 이상 상태의 데이터를 클래스별로 레이블링하여 분류한다.

분류된 데이터 기반으로 센터링 방향 분류 성능 비교를



그림 4. 타원 중심점을 기반 방향 분류 방법 기준
Fig. 4. Criteria for elliptical centering direction classification

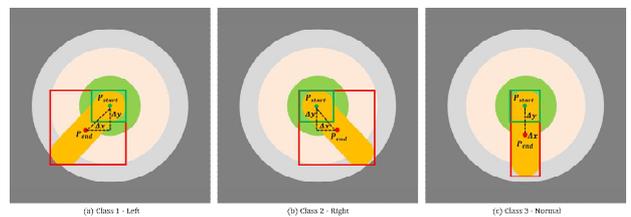


그림 5. 변형 영역 중심점 기반 방향 분류 방법 기준
Fig. 5. Criteria for transformed area centering direction classification

위하여 제안 알고리즘과 다른 2가지 방법을 비교한다. 첫 번째 방법으로 타원 적용 기반 변화량 분류 방법은 그림 4에서 볼 수 있듯이 추론된 mask에 이진화 작업 진행 후 ellipse를 적용하여 초기 중심점과 변화되는 mask의 중심점 변화량을 통해 분류하는 방법이다 [19, 20]. 두 번째 방법으로 변형 영역 중심 분류 방법은 그림 5에서 볼 수 있듯이 SAM 2를 통해 추론된 압출 영역의 mask의 bounding box를 생성하고 초기 중심점과 변화되는 mask의 중심점 변화량을 통해 분류하는 방법이다. 위 두가지 방법을 제안 알고리즘과 비교한 이유는 두 방법이 모두 변화량을 기반으로 한 중심점 추적을 통해 분류하는 방법을 수행하기 때문이다. 그로 인하여 제안된 알고리즘과의 비교를 통해 성능의 우수성을 분석할 수 있다.

다음과 같은 방법들의 성능을 검증하기 위한 평가 매트릭으로 정확도 (Accuracy)를 사용한다. 위 평가 매트릭으로 분류 알고리즘의 성능을 평가할 때 많이 사용하는 이유는 다양한 성능 측면을 포괄적으로 반영하기 때문이다.

정확도는 수식 (4)와 같으며 전체 시퀀스 이미지 데이터 내에서 올바르게 예측된 이미지 데이터의 비율을 나타내며 전체 데이터에 대한 모델의 일반적인 정확성을 평가하는데 유용하다.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (4)$$

수식 (4)에서 TP (True Positive)는 모델이 positive라고 예측하고 ground truth도 positive인 경우, FP (False Positive)는 모델이 positive라고 예측했으나 ground truth가 negative인 경우, TN (True Negative)는 모델이 부정으로 예측하고 ground truth도 negative인 경우, FN (False Negative)는 모델이 부정으로 예측했으나 ground truth가 positive인 경우를 나타낸다.

2. 실험 과정

본 실험은 카테터 제조 센터링 데이터 셋에서 세 가지 분류 방법의 정확도를 평가하기 위해 수행된다. 실험에 사용된 데이터 셋은 투명, 불투명 소재의 Left, Right, Normal 세 가지 클래스로 구분되며, 그림 6, 그림 7과 같이 각 클래스마다 5개의 시퀀스 이미지 데이터로 구성된다. 센터링 방향 분류를 위해 변형 영역 중심점 기반 분류 방법, 타원 중심점 기반 분류 방법, 제안하는 방향 분류 알고리즘을 동일한 시퀀스 이미지를 통해 방향 분류 성능을 비교한다.

3. 실험 결과

본 실험에서는 세 가지 방향 분류를 위한 방법을 사용하여 투명, 불투명 소재의 각 클래스에 대한 실험에서 사용된 성능 평가 지표로는 Accuracy, Precision, Recall이 사용된다. 그러나 결과 분석 과정에서 Accuracy와 Recall은 모든 방법에서 서로 동일한 값을 보였고, Precision은 각 분류 방법에서 1.00의 결과를 보여준다. 위와 같은 결과의 데이터

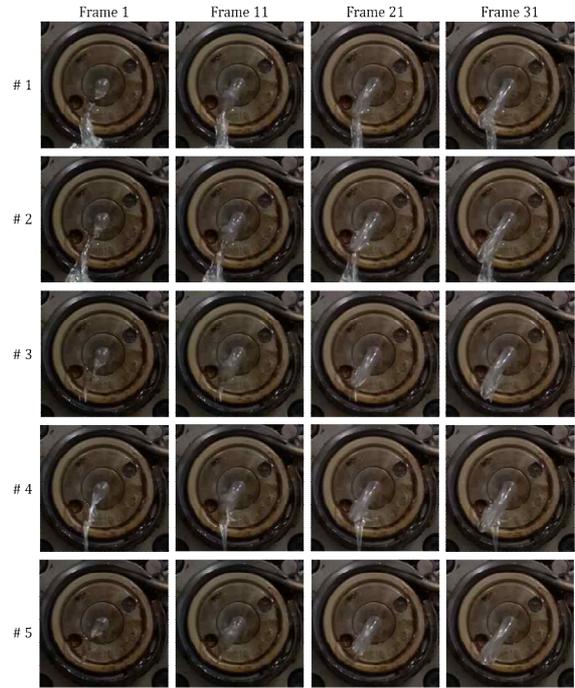


그림 6. 투명 소재 시퀀스 이미지 데이터
Fig. 6. Transparent material sequence image data

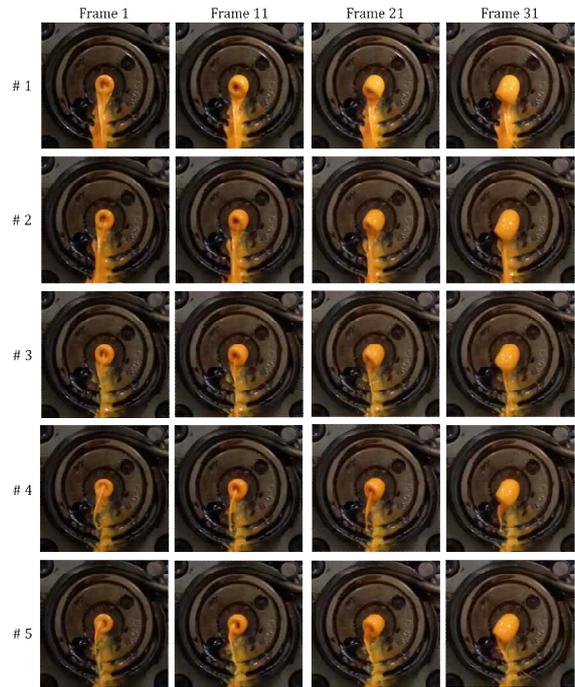


그림 7. 불투명 소재 시퀀스 이미지 데이터
Fig. 7. Opaque material sequence image data

분포 분석 결과 TP와 FN에만 데이터가 분포하며 TN과 FP는 데이터 분포가 없는 결과가 나타난다. FP에 대한 데이터가 없으므로 Precision의 모든 경우에서 1.00이라는 결과가 나오게 된 이유이다. 이러한 결과를 바탕으로 Precision 지표가 추가적인 정보 제공에 있어 유의미하지 않다는 것을

표 2. 방향 분류 알고리즘 성능 비교

Table 2. Performance comparison of direction classification algorithm

Class	Material	Method	Accuracy				
			#1	#2	#3	#4	#5
Left	Opacity	Method 1	0.61	0.68	0.67	0.52	0.64
		Method 2	0.59	0.62	0.61	0.38	0.58
		Proposed Method	0.87	0.88	0.88	0.84	0.88
	Transparency	Method 1	0.94	0.90	0.81	0.87	0.87
		Method 2	0.90	0.90	0.90	0.93	0.87
		Proposed Method	0.97	0.97	0.94	0.87	0.87
Right	Opacity	Method 1	0.48	0.28	0.21	0.52	0.48
		Method 2	0.54	0.71	0.43	0.62	0.42
		Proposed Method	0.76	0.84	0.75	0.76	0.72
	Transparency	Method 1	0.87	0.90	0.52	0.84	0.97
		Method 2	0.87	0.90	0.87	0.90	0.97
		Proposed Method	0.87	0.94	0.97	0.87	0.97
Normal	Opacity	Method 1	0.12	0.52	0.12	0.48	0.52
		Method 2	0.17	0.42	0.43	0.62	0.62
		Proposed Method	0.88	1.00	0.83	1.00	0.92
	Transparency	Method 1	0.16	0.11	0.16	0.16	0.13
		Method 2	0.74	0.15	0.73	0.13	0.17
		Proposed Method	1.00	0.64	0.94	1.00	1.00

보여준다. 따라서, 본 실험 결과에서는 성능을 비교하는 주요 지표로 Accuracy만을 표기한다. 이는 실험 결과의 핵심적인 성능 차이를 명확하게 드러내기 위함이며 그 결과는 표 2에서 보여준다. 변형 영역 중심점 기반 방향 분류 방법에 대한 결과는 투명 소재에서 Right 클래스에 대해 높은 정확도는 최대 0.87을 보였으나 다른 클래스와 소재에서는 상대적으로 낮은 성능을 보여주며, 불투명 소재의 경우 Right 클래스의 정밀도가 다른 클래스에 비해 상대적으로 높은 결과를 보여준다. 타원 중심점 기반 방향 분류 방법에 대한 결과는 Right 클래스의 투명 소재에 대해 높은 정확도는 최대 0.97을 보여주었으나 Normal 클래스에서는 투명 소재에 대한 정확도가 낮은 결과를 보여준다.

제안하는 센터링 상태 분류 알고리즘은 전체적인 클래스에서 다른 방법 1, 2와 비교하여 높은 성능을 보여준다. 이와 같은 이유로는 방법 1, 2는 토출 영역 전체에 대하여 중심점의 변화량을 구하기 때문에 형태 변화에서 얻어지는 중심점의 변화량이 작다. 반면에 제안하는 알고리즘은 초기 위치에서 얻어진 정보를 기반으로 변화된 마지막 끝단의 토출 영역과의 비교를 통해 변화량을 구하기 때문에 중심점의 변화량이 방법 1, 2와 비교하여 큰 값을 보여주며 센터링 상태 분류하기에 좋은 결과를 보여준다.

위 결과를 바탕으로 방법 1과 방법 2는 특정 조건에서 좋은 결과를 보여주긴 하지만 케이스별 일관성이 떨어지는 경향을 보여준다. 그에 비해 제안하는 알고리즘은 다른 방향 분류 알고리즘보다 특히 Normal 클래스에서 안정적이고 높은 성능을 보여주었으며 그 외의 클래스에서 높은 성능을 보여준다.

IV. 결론

본 논문에서는 카테터 제조 공정의 초기 설비 조정 단계에서 장비 정렬의 정확성을 향상시키기 위해 비전 기반 센터링 방향 분류 시스템을 제안한다. 이 시스템은 작업자의 오류와 변동성에 취약한 센터링 작업에 대응하여 생산 과정의 신뢰성과 효율성을 향상시키는 것을 목표로 한다. 본 연구를 통해 구축된 카테터 센터링 데이터 셋을 바탕으로 SAM2를 활용하여 카테터 소재 압출 시퀀스에서 정밀한 mask 데이터를 추출한다. mask는 초기 프레임부터 최종 프레임까지의 정보를 기반으로 센터링 방향 분류에 기여한다.

제안하는 알고리즘은 Left, Right, Normal 세 가지 센터링 방향으로 분류를 진행하며 투명 및 불투명 소재에 대하여 정확도 88.8%의 결과를 보여준다. 또한, SAM 2 알고리즘을 활용하여 다양한 소재에서도 제한없이 영역 분할을 가능하게 하고 얻어진 mask를 통해 방향을 분류할 수 있도록 한다. 본 시스템이 지속적인 개발을 통해 제조 공정의 자동화와 정밀한 제조 환경을 구성할 수 있을 것이라 기대된다.

그러나 본 연구에는 몇가지 한계점이 존재한다. 첫 번째 한계점은 데이터 셋의 제한성이다. 본 연구에서 사용된 데이터 셋은 특정 소재와 환경에 맞춰 수집되었으므로 다양한 카테터 소재나 복잡한 제조 환경에서의 성능 검증이 부족하다. 두 번째 한계점은 압출 영역에 대한 분할 성능에 의존성이 강한 부분이다. 압출 영역에 대하여 SAM2를 통해 mask 정보를 얻게 된다. 따라서 mask 정보가 정확하지 않다면 변화량이 왜곡되고 잘못된 방향 추론으로 이어지게 된다.

위와 같은 한계점을 극복하기 위하여 향후 연구에서는 SAM2 알고리즘의 적용 범위를 확장하여 더 넓은 범위의 소재와 카테터 형태에 적용할 계획이며 압출되는 카테터 소재의 경로에 대한 변화를 분석하는 알고리즘 고도화 및 최적화를 목표로 하며 실시간 데이터 처리 능력의 향상을 통해 복잡한 제조 환경에서의 적용성을 검증할 예정이다. 이러한 발전은 제조 공정의 효율성을 더욱 증가시키고, 작업자 개입을 최소화하여 생산 시간 및 비용을 절감할 수 있을 것이라 예상된다. 본 논문에서 개발된 시스템은 제조 공정의 자동화에 크게 기여하며 제조 품질의 향상 및 불량률 감소 등 생산 효율성을 증가시키는 데 중요한 역할을 할 것이라 기대된다.

References

- [1] M. Jolaei, "Design, Development and Force Control of a Tendon-driven Steerable Catheter with a Learning-based Approach," Doctoral Dissertation, Concordia University, 2020.
- [2] M. Bożek, A. Kujawińska, M. Rogalewicz, M. Diering, P. Gościński, A. Hamrol, "Improvement of Catheter Quality Inspection Process," In MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, Vol. 121, No. 05002, 2017.
- [3] W. A. Hyman, "Manufacturing Defects," Biomedical Safety &

- Standards, Vol. 49, No. 11, pp. 81-83, 2019.
- [4] O. O. Vergara-Villegas, V. G. Cruz-Sánchez, H. de Jesús Ochoa-Domínguez, M. de Jesús Nandayapa-Alfaro, Á. Flores-Abad, "Automatic Product Quality Inspection Using Computer Vision Systems," *Lean Manufacturing in the Developing World: Methodology, Case Studies and Trends from Latin America*, pp. 135-156, 2014.
- [5] S. H. Lee, M. Y. Kim, M. W. Woo, H. C. Lee, H. I. Won, S. H. Jeong, "Predicting the Heading Angle of Resin During Extrusion Using Semantic Segmentation Based on Edge-region Focal Loss," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024.
- [6] S. H. Jeong, S. H. Lee, H. I. Won, "Development of Microcatheter Tube Extrusion Angle Estimation System Using Convolutional Neural Network Segmentation," *Scientific Reports*, Vol. 13, No. 1, pp. 18468, 2023.
- [7] N. Ravi, V. Gabeur, Y. T. Hu, R. Hu, C. Ryali, T. Ma, H. Khedr, R. Rädle, C. Rolland, L. Gustafson, E. Mintun, J. Pan, K. V. Alwala, N. Carion, C. Y. Wu, R. Girshick, P. Dollár, C. Feichtenhofer, "Sam 2: Segment Anything in Images and Videos," *arXiv:2408.00714*, 2024.
- [8] R. Bommasani, D. A. Hudson, E. Adeli, R. Altman, S. Arora, S. von Arx, M. S. Bernstein, J. Bohg, et al. "On the Opportunities and Risks of Foundation Models," *arXiv:2108.07258*, 2021.
- [9] F. A. Lievano-Martínez, J. D. Fernández-Ledesma, D. Burgos, J. W. Branch-Bedoya, J. A. Jimenez-Builes, "Intelligent Process Automation: An Application in Manufacturing Industry," *Sustainability*, Vol. 14, No. 14, pp. 8804, 2022.
- [10] R. Cioffi, M. Travagliani, G. Piscitelli, A. Petrillo, F. De Felice, "Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Smart Production: Progress, Trends, and Directions," *Sustainability*, Vol. 12, No. 2, pp. 492, 2020.
- [11] J. Xu, M. Kovatsch, D. Mattern, F. Mazza, M. Harasic, A. Paschke, S. Lucia, "A Review on AI for Smart Manufacturing: Deep Learning Challenges and Solutions," *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 16, pp. 8239, 2022.
- [12] A. Kirillov, E. Mintun, N. Ravi, H. Mao, C. Rolland, L. Gustafson, T. Xiao, S. Whitehead, A. C. Berg, W. Y. Lo, P. Dollár, R. Girshick, "Segment Anything," In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, pp. 4015-4026, 2023.
- [13] H. Li, H. Liu, D. Hu, J. Wang, I. Oguz, "PRISM: A Promptable and Robust Interactive Segmentation Model with Visual Prompts," *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 389-399, 2024.
- [14] K. He, X. Chen, S. Xie, Y. Li, P. Dollár, R. Girshick, "Masked Autoencoders are Scalable Vision Learners," In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 16000-16009, 2022.
- [15] C. Ryali, Y. T. Hu, D. Bolya, C. Wei, H. Fan, P. Y. Huang, V. Aggarwal, A. Chowdhury, O. Poursaeed, J. Hoffman, J. Malik, Y. Li, C. Feichtenhofer, "Hiera: A Hierarchical Vision Transformer Without the Bells-and-whistles," In *International Conference on Machine Learning*, PMLR, pp. 29441-29454, 2023.
- [16] H. Zhang, I. Goodfellow, D. Metaxas, A. Odena, "Self-attention Generative Adversarial Networks," In *International Conference on Machine Learning*, PMLR, pp. 7354-7363, 2019.
- [17] Z. Huang, X. Wang, L. Huang, C. Huang, Y. Wei, W. Liu, "Ccnets: Criss-cross Attention for Semantic Segmentation," In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, pp. 603-612, 2019.
- [18] M. Bramson, "Instability of FIFO Queueing Networks. The Annals of Applied Probability," Vol.4, No. 2, pp. 414-431, 1994.
- [19] Y. Xie, Q. Ji, "A New Efficient Ellipse Detection Method," In *2002 International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 957-960, IEEE, 2002.
- [20] A. Fitzgibbon, M. Pilu, R.B. Fisher, "Direct Least Square Fitting of Ellipses," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 21, No. 5, pp. 476-480, 1999.

Jin Yeong Son (손진영)



2022 School of Department of Future Automotive and IT Convergence from Kyungpook National University, Republic of Korea (M.S.)

2023~School of Electronic and Electrical Engineering from Kyungpook National University, Republic of Korea (Ph.D. Candidate)

Career:

2022~2023 Researcher, Korea Electronics Technology Institute
Field of Interests: Computer Vision, Anomaly Detection, Deep-learning algorithm for manufacturing
Email: sony0416@kitech.re.kr

Ji Dong Choi (최지동)



2022 School of Department of Future Automotive and IT Convergence from Kyungpook National University, Republic of Korea (M.S.)

2023~School of Electronic and Electrical Engineering from Kyungpook National University, Republic of Korea (Ph.D. Candidate)

Career:

2022~2023 Researcher, Korea Electronics Technology Institute
Field of Interests: Computer Vision, Pose Estimation, Object Detection, Camera Trajectory
Email: jdchoi@kitech.re.kr

Byeong Hak Kim (김 병 학)

2015 School of Electronic Engineering from Kyungpook National University, Republic of Korea (M.S.)

2020 School of Electronic Engineering from Kyungpook National University, Republic of Korea (Ph.D.)

2020~Korea Institute of Industrial Technology (Senior Researcher)

Career:

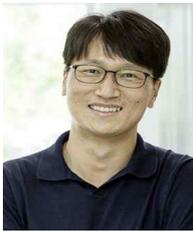
2007~2015 Engineer at the SAMSUNG THALES, Korea.

2016~2019 Engineer at the Hanwha Systems, Korea.

Field of Interests: IR and 3D Imaging Systems, Visual Object

Tracking, ML/DL Object Detection, 3D Laser Radar, Counter Drone Systems, and Gesture Recognition

Email: bhkim81@kitech.re.kr

Jong Pil Yun (윤 종 필)

2003 Electronic and Electrical Engineering from Kyungpook National University (B.S.)

2009 Electrical Engineering from POSTECH (Ph.D.)

2016~Korea Institute of Industrial Technology (Principal Researcher)

Career:

2009~2016 Senior Researcher, POSCO

Field of Interests: Deep Learning, Computer Vision, Image Processing, Defect inspection, Fault Diagnosis, Medical Image Analysis

Email: rebirth@kitech.re.kr

Seung Hyun Jeong (정 승 현)

2008 Mechanical Engineering from Hanyang University (B.S.)

2014 Mechanical Engineering from Hanyang University (Ph.D.)

2022~KOREATECH (Assis. Prof.)

Career:

2016 Senior Researcher, Hyundai Heavy Industries

2022 Chief Researcher, KITECH

Field of Interests: Deep-learning algorithm for manufacturing

Email: shjeong@koreatech.ac.kr

Hong-In Won (원 흥 인)

2012 Mechanical Engineering from Hanyang University (B.S.)

2017 Mechanical Design Engineering from Hanyang University (Ph.D.)

2019~Korea Institute of Industrial Technology (Senior Researcher)

Career:

2017~2019 Postdoctoral Researcher, TU Dresden

Field of Interests: Digital Twin, Augmented Reality, Industry Automation, Machine Learning, Haptic, Noise and Vibration

Email: luvhayym@kitech.re.kr