

논문 2023-18-15

# 특이값 분해를 이용한 치수측정 기반 디지털 트윈 알고리즘 경량화

## (Lightweight Algorithm for Digital Twin based on Diameter Measurement using Singular-Value-Decomposition)

이 승 민, 박 대 진\*  
(Seungmin Lee, Daejin Park)

**Abstract** : In the machine vision inspection equipment, diameter measurement is important process in inspection of cylindrical object. However, machine vision inspection equipment requires complex algorithm processing such as camera distortion correction and perspective distortion correction, and the increase in processing time and cost required for precise diameter measurement. In this paper, we proposed the algorithm for diameter measurement of cylindrical object using the laser displacement sensor. In order to fit circle for given four input outer points, grid search algorithms using root-mean-square error and mean-absolute error are applied and compared. To solve the limitations of the grid search algorithm, we finally apply the singular-value-decomposition based circle fitting algorithm. In order to compare the performance of the algorithms, we generated the pseudo data of the outer points of the cylindrical object and applied each algorithm. As a result of the experiment, the grid search using root-mean-square error confirmed stable measurement results, but it was confirmed that real-time processing was difficult as the execution time was 10.8059 second. The execution time of mean-absolute error algorithm was greatly improved as 0.3639 second, but there was no weight according to the distance, so the result of algorithm is abnormal. On the other hand, the singular-value-decomposition method was not affected by the grid and could not only obtain precise detection results, but also confirmed a very good execution time of 0.6 millisecond.

**Keywords** : Digital twin, Circle fitting, Diameter measurement, Laser displacement sensor, Singular value decomposition

### 1. 서 론

디지털 트윈은 현실세계의 정보를 바탕으로 디지털 세계에서 모델링을 통해 구현한 후, 디지털 세계에서 시뮬레이션을 통해 상태를 분석하고 결과를 예측할 수 있게 한다. 이를 통해 반복적인 시뮬레이션에 드는 비용 및 시간을 크게 절약하고, 적은 비용으로 오류를 수정할 수 있기 때문에 자동화 시스템에서 중요성이 더욱 각광받고 있다. 특히 독

일에서 발표한 4차 산업 혁명을 시작으로, 산업분야의 다양한 분야에서 기계학습 및 인공지능을 활용한 자동검출, 결함분석 등의 기법이 연구되고 있다.

디지털 트윈을 기반으로 자동화 제조 시스템 혹은 자동화 검사 시스템 등을 구축함에 있어서 가장 중요한 것은 현실세계의 물체에 대한 정확한 측정을 기반으로 디지털 모델링을 하는 것이다. 목시검사자에 의존한 기존 검사시스템은 검사자의 숙련도나 컨디션 등에 의해 검사결과가 상이하게 나타나며, 검사설비를 확장하는데 큰 한계를 가지고 있다. 또한 제조과정에서도 마찬가지로 작업자의 숙련도에 큰 영향을 받을 뿐만 아니라, 고정밀 부품의 제조과정은 더 이상 사람이 컨트롤할 수 있는 수준을 벗어났기 때문에 디지털 트윈 기반 자동화 제조 시스템의 수요는 지속적으로 증가하고 있다.

디지털 트윈에서 현실세계의 물체를 디지털화하기 위한 센싱방법 중 가장 대표적인 센싱 방식은 카메라를 이용한 영상신호 획득이다. 라인 카메라 혹은 에어리얼 카메라를 이용하여 획득된 물체의 영상정보를 바탕으로, 물체의 ROI (region of interest) 혹은 BLOB (binary large object)를 획득한 후, 이를 분석하여 물체가 가지는 특징값을 획득하는 방식이다. 이는 사람의 시각시스템을 모방하므로, 가장 직관적인 검사 및 분류 알고리즘을 구현할 수 있으므로 초기 디

\*Corresponding Author (boltanut@knu.ac.kr)

Received: Jan. 31, 2023, Revised: Mar. 2, 2023, Accepted: Apr. 25, 2023.

S. Lee: Kyungpook National University (Post Doc.)

D. Park: Kyungpook National University (Assoc. Prof.)

※ This study was supported by the BK21 FOUR project funded by the Ministry of Education, Korea (4199900113966), and the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2018R1A6A1A03025109, 30%, 2020R111A1A01072343, 10%, NRF-2022R111A3069230, 10%) and by MSIT (Ministry of Science and ICT) (2020M3H2A1078119) and MSIT, Korea, under the Innovative Human Resource Development for Local Intellectualization support program (IITP-2022-RS-2022-00156389, 10%) supervised by the IITP (Institute for Information & communications Technology Planning & Evaluation). This work was partly supported by an Institute of Information and communications Technology Planning and Evaluation (IITP) grant funded by the Korean government (MSIT) (No. 2021-0-00944, Metamorphic approach of unstructured validation/verification for analyzing binary code, 30%) and (No. 2022-0-01170, PIM Semiconductor Design Research Center, 10%). The EDA tool was supported by the IC Design Education Center (IDEC), Korea.

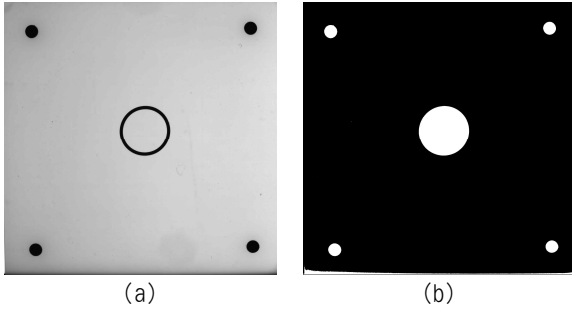


그림 1. 머신 비전 검사 시스템을 이용한 O링 치수 측정 예시: (a) 획득 영상, (b) 영상신호처리 결과

Fig. 1. Example of O-ring diameter measurement using machine vision inspection system:

(a) input image, and (b) image processing result

디지털 트윈 연구 과정에서 널리 활용된다. 그림 1은 머신 비전 검사 장치로 O링의 치수측정에 대한 예시이다 [1].

영상처리방식은 전처리 과정으로 카메라의 렌즈왜곡의 보정과 후처리로 원근 왜곡의 보정이 요구된다 [2]. 그리고 허용오차가 작아짐에 따라 요구되는 카메라의 분해능이 높아지게 되며, 그에 따른 영상의 크기는 제품으로 증가하게 된다. 따라서 요구되는 영상처리 데이터의 수와 수행시간은 기하급수적으로 증가하게 된다. 또한 물체와 카메라 간의 거리 (working distance)를 낮출 경우, 혹은 대상물체의 사이즈가 증가할 경우 한 영상으로 물체를 모두 측정할 수 없게 된다. 물체의 영상을 분할하여 획득할 경우, 이웃한 영상 간의 매칭을 통한 정합과정이 필요하며 이 때 영상 간의 조명방식의 미세한 차이로 인한 불연속성, 원근왜곡 등은 정합과정을 난해하게 하는 요소로 작용하여 알고리즘의 난이도가 급증하게 된다.

이와 같이 영상정보를 이용한 물체 인식에는 다양한 한계점과 비용문제가 발생한다. 이를 극복하기 위한 디지털 트윈 방식으로는 라이다 (LiDAR, light detection and ranging) [3, 4], 와전류 (eddy current) [5], 레이저 변위 (laser displacement) [6, 7] 등 다양한 센싱 방법이 도입되고 있다. 라이다 센서는 차량주행에서 물체의 외곽선을 탐지하고 물체를 분류함에 있어서 고속으로 데이터 처리가 가능하여 각광받고 있는 센싱 방식이다. 와전류 검사 시스템은 도체 물체에서 와전류의 발생을 유도하여 전압의 변화를 통해 물체의 결함 유무를 검사하는 시스템으로 영상신호가 획득 불가능한 영역의 특징정보를 획득하고 비파괴 검사라는 장점으로 2차 전지의 용접 결함 검사 등에 활용되는 방식이다. 레이저 변위 측정 방식은 레이저를 이용하여 물체의 변위를 측정하므로 영상신호와 같이 물체의 전체적인 윤곽선을 획득하기는 어려운 한계는 있다. 그러나 영상신호에서는 백라이트 조명을 이용한 영상신호 획득 시, 물체 내부의 윤곽이 드러나지 않는 한계점이 존재하는 반면, 레이저 변위 측정은 별도의 조명이 요구되지 않으므로 물체 내부의 복잡한 윤곽선까지 측정 가능한 장점을 가진다.

최근 하드웨어 기술의 발달에 따라, 3D 레이저 스캐너를 이용한 물체의 표면 정보를 디지털화하는 기술이 사용화

되고 있다. 그러나 3D 레이저 스캐너에 의해 획득된 깊이 정보로부터 원의 외곽선을 추출하고, 원의 중심 및 반지름을 계산하여 원을 정합하는 것은 영상신호처리와 같은 과정이 요구된다. 따라서 물체의 크기나 레이저 스캐너의 분해능에 따라 깊이 정보 데이터가 방대해질수록 이에 따른 전처리과정에 요구되는 메모리사용량 및 수행시간이 급격히 증가하고, 획득된 외곽샘플들로부터 원을 정합하는데 사용되는 RANSAC (random sample consensus) 알고리즘의 수행시간 또한 크게 증가하는 한계점을 가진다.

본 논문에서는 머신비전 기반 영상신호처리를 이용한 치수측정을 대신하여, 레이저 변위 측정 기반 원 정합 알고리즘을 이용하여 치수를 측정한다. 이 때, 물체의 크기나 레이저 센서의 분해능에 따른 공간복잡도의 증가를 최소화하고, 연산량을 최소화하여 경량화된 디지털 트윈을 구현하기 위해 네 방향의 변위를 측정하여 외곽점을 획득하고 이를 기반으로 물체의 치수를 측정한다.

레이저 변위 측정 장비를 이용하여 변위가 급격하게 변하는 지점을 외곽점으로 검출하고, 해당 측정 방식을 네 방향으로 진행하여 네 개의 외곽점에 대한 위치정보를 획득한다. 측정된 네 개의 외곽점에 대한 위치정보를 바탕으로, 원 정합을 통해 치수를 측정하며, 이에 적합한 원 정합 알고리즘을 비교분석한다. 그러나 원의 정합에 관한 문제는 직접적인 최소자승법 적용이 어렵다. 이는 정합된 원과 실제 데이터 간의 차이인 오차에 대한 해석이 명확하지 않기 때문이다.

본 논문에서는 크게 두 가지 원 정합 방식을 연구하였다. 첫 번째 방법은 그리드 탐색 방식 (grid search)이다. 그리드 탐색 방식은 원의 중심위치 및 반지름을 그리드 (grid)로 분할하고, 각 그리드 점에서 오차합계를 측정 후, 최소 오차합계를 가지는 지점을 검출한다. 그리드 탐색 방식은 직관적이며 그리드 간격이 좁을수록 오차범위가 좁아져 성능이 향상된다. 그러나 원의  $x, y$  중심좌표 및 반지름  $r$ 에 대한 그리드탐색은 그리드 범위 및 간격에 따라 높은 연산량의 증가로 인해 실시간 처리가 어려운 문제점을 가진다. 이를 개선하기 위한 두 번째 방법은 특이값분해 (SVD, singular value decomposition)를 이용한 방식이다. 특이값분해는 입력 데이터와 출력 데이터 간의 모델링에 활용될 뿐만 아니라, truncated SVD는 데이터의 압축에도 활용된다 [8, 9]. 본 논문에서는 원의 정합 문제를 최소자승법 (LSM, least square method) 문제로 보고, SVD를 이용하여 원의 파라미터를 계산하여 문제를 해결한다. SVD 방식은 수학적 모델링을 통해 문제를 해결함으로써, 높은 정밀도를 가진다. 또한 네 외곽점의 위치정보만을 입력값으로 사용하므로, ROI 및 그리드의 형성 과정이 불필요하여 루프문의 구성이 불필요한 장점을 가진다.

그림 2는 기존 머신비전에서 영상신호처리를 통한 원 정합 알고리즘 순서도와 레이저 변위 센서에서 SVD 기반 원 정합 알고리즘 순서도를 비교하여 나타낸다. 3D 레이저 스캐너의 경우 머신 비전에서 카메라 왜곡 보정 단계를 제외한다면 나머지 단계는 유사한 흐름을 가진다.

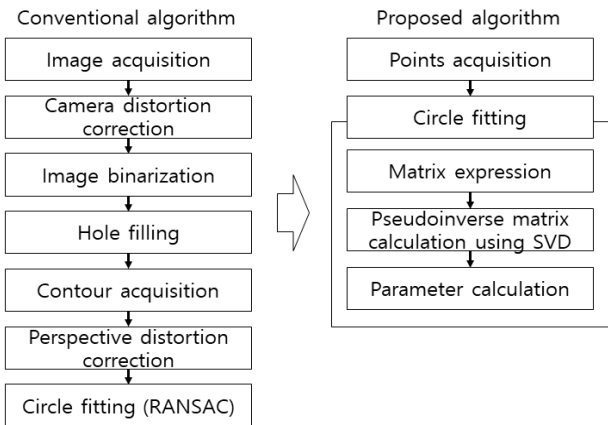


그림 2. 알고리즘 흐름도 비교  
Fig. 2. Comparison of algorithm flowchart

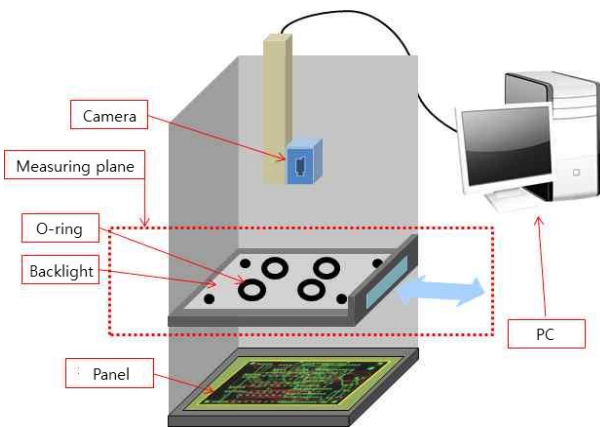


그림 3. O-ring 치수측정 머신비전 검사장비 구조  
Fig. 3. Structure of machine vision inspection equipment for O-ring diameter measurement

그림 2와 같이 제안한 방법은 별도의 왜곡 보정 단계를 거치지 않으며, 이진화 및 홀 채우기 등의 영상신호처리 없이 원의 정합이 이루어지므로 알고리즘 단계가 매우 간략하여 빠른 수행이 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존의 머신비전 기반 치수 측정 알고리즘과 문제점에 대해 서술한다. 3장에서는 레이저 변위 측정 기반 원 정합 알고리즘들을 서술한다. 4장에서는 의사데이터를 통한 실험을 바탕으로 원 정합 알고리즘들 간의 성능을 비교한다. 그리고 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 영상신호 기반 원 정합 알고리즘

### 1. 머신비전 검사장비 시스템의 구조

머신비전 검사장비는 일반적으로 물체를 놓는 패널 하단에 백라이트가 있으며, 패널 상부에 물체를 놓고, 상부에서 에어리얼 카메라를 통해 영상을 획득한다. 그림 3은 O-ring 치수측정 머신비전 검사장비의 구조에 대한 예시이다.

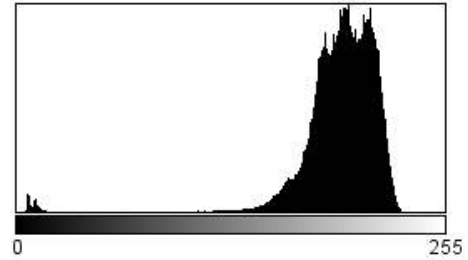


그림 4. 그림 1 (a)의 휘도 히스토그램  
Fig. 4. Histogram of intensity of Fig. 1 (a)

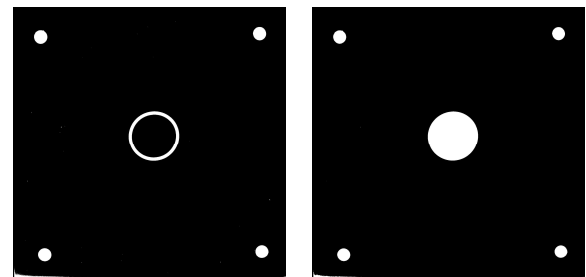


그림 5. 영상신호처리 과정 (a) 이진 영상, (b) 침식 후 홀채우기 영상  
Fig. 5. Image processing process: (a) binary image, (b) erosion and hole filling image

물체의 하단부에 백라이트를 비치한 것은 물체의 외곽을 명확히 하기 위해 물체와 배경 간의 휘도 차를 극대화하고, 그림자와 노이즈가 감소된 영상을 획득하기 위한 배치이다.

그레이스케일로 획득된 영상에서 배경은 255에 가까운 휘도분포를 가지며, 물체는 백라이트 조명의 빛을 투과하지 못 하므로 0에 가까운 휘도분포를 가지게 된다. 그림 4는 그림 1 (a)의 영상에 대한 히스토그램을 나타낸다.

### 2. 영상신호처리

그림 4로부터 배경과 물체의 휘도차이를 바탕으로 중간 지점의 휘도를 문턱값으로 설정함으로써 이진영상을 획득한다. 그리고 획득된 이진영상으로부터 3×3 마스크의 침식 (erosion) 연산을 통해 노이즈를 제거하고, 홀채우기 (hole filling) 기법을 사용하여 그림 5를 얻는다.

그리고 물체에 해당하는 BLOB에 대해, 4인접 이웃에 해당하는 화소 중 하나라도 배경에 속할 경우 윤곽선으로 검출함으로써 윤곽화소를 분리해낸다. 분리된 윤곽선 화소들로부터 RANSAC 알고리즘을 이용한 정합과정을 거쳐 직경을 측정한다.

### 3. 한계점

고정밀 치수측정으로 인해 허용오차가 낮아질 경우, 이에 대응되는 카메라의 높은 분해능이 요구된다. 영상의 해상도가 높아짐에 따라 획득되는 영상의 크기는 제곱으로 증가하게 되며, 이는 메모리 사용량과 처리시간을 급증시키는 요인이 된다. 실시간 처리를 어렵게 만들 뿐만 아니라, 물체가

한 영상 안에 획득되지 않을 경우, 부분영상 촬영으로 인해 영상획득 시간이 급증하며, 획득된 부분영상을 통합하여 분석해야하므로, 통합과정에 대한 프로세스가 증가하는 문제점이 발생한다. 이와 같이 치수측정의 정밀도가 향상될수록 머신비전 기반 검사시스템의 한계점이 드러나게 된다.

또한 백라이트 조명으로 영상을 이진화하게 되므로, O링과 같은 단순한 구조가 아닌 추가적인 내부 치수 정보가 필요한 경우 이를 측정할 수 없는 한계점을 가진다. 그리고 원 정합에 사용되는 RANSAC 알고리즘은 불확실성을 가지고 있으며, 배경과 물체의 경계선상에 존재하는 화소들의 휘도분포가 모호할 경우, 임계값에 따른 이진화 결과가 상이하게 나타나 신뢰있는 원 정합이 어려운 문제를 가진다.

### III. 변위 기반 원 정합 알고리즘

#### 1. 레이저 변위센서

레이저를 이용하여 깊이, 길이, 높이 등 치수를 측정하는 장치는 산업전반에 널리 활용되고 있다. 빠른 측정과 높은 정밀도, 그리고 비접촉식 측정의 장점을 가진 특징으로 널리 활용된다.

레이저 변위센서는 삼각측량을 응용한 방식으로, 투광소자 (emitting element)에서 발생한 레이저는 투광렌즈 (beam-emitting lens)를 통해 집광되어 물체에 투사된다. 투사된 레이저는 물체에서 반사되어 수광렌즈 (beam-receiving lens)를 통해 선형 이미지센서 (PSD, position sensitive device) 상에 맺히게 되고, 그 위치변화를 검출하여 물체의 거리를 산출할 수 있다.

그림 6은 레이저 변위센서 구조를 나타낸다. 레이저 변위센서를 이용하여 물체의 좌우측에서 변위를 측정함으로써 그 차이값을 통해 물체의 외경을 측정할 수 있다. 그러나 이는 센서와 물체가 정확히 일직선상에 놓였을 경우 정확한 외경이 측정된 제약이 존재한다. 따라서 자동화검사장비에서 검사대상의 위치 및 각도 등이 일정함이 보장될 경우, 측정물체의 모델링 정보와의 비교를 통해 검사가 가능하다. 그러나 일정함을 보장할 수 없는 경우, 변위센서를 통해 외곽점 정보를 획득하고 원의 중심 및 반지름의 정합을 통한 치수측정 과정이 요구된다.

레이저 변위센서를 이용하여 측정된 깊이 정보가 급격히 변하는 지점이 원통형 물체의 외곽점이 된다. 3D 레이저 스캐너를 이용할 경우, 물체의 표면의 깊이정보를 정밀하게 획득가능하다. 그러나 물체뿐만 아니라 배경의 모든 깊이정보를 획득하는 것은 외경측정을 위한 외곽점 검출에 불필요한 내부 정보 및 배경 정보를 다수 획득하여 메모리 사용량 및 데이터 획득 시간을 크게 증가시킨다.

본 연구에서는 네 방향의 외곽점을 검출하여 원 정합을 하여 치수를 측정하는 것을 목표로 한다.

그림 7은 네 방향 외곽점 검출 방식을 나타내는 도식이며 편의상 45도 회전하여 네 외곽점이 사분면에 각각 나타나도록 하였다.

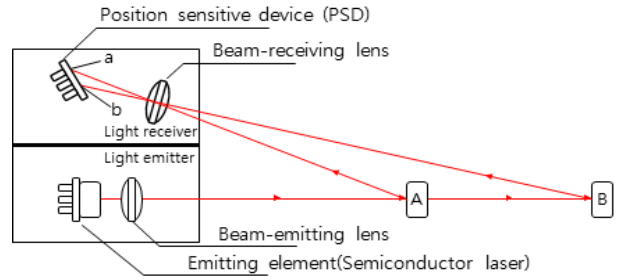


그림 6. 레이저 변위센서 구조  
Fig. 6. Structure of laser displacement sensor

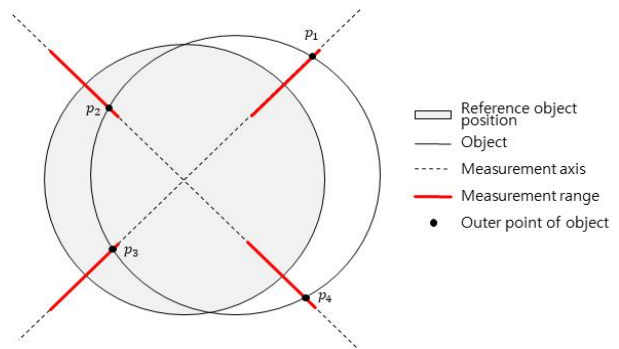


그림 7. 레이저 변위 센서 기반 외곽점 검출  
Fig. 7. Detection of outer point of object using laser displacement sensor

원통형 물체가 이상적으로 놓였을 경우 중심과 외곽선의 위치정보를 바탕으로 네 축 방향의 일부 구간을 4개의 레이저 변위센서를 이용하여 높이를 측정하고 높이가 급격히 변하는 지점을 원통형 물체의 외곽점으로 결정한다.

획득된 네 방향의 외곽점을 이용하여 원통형 물체의 중심과 반지름을 산출하여 치수를 측정한다. 본 논문에서는 크게 그리드 탐색 방식 원 정합 알고리즘과 특이값분해 방식 원 정합 알고리즘을 이용하여 치수를 측정된 결과를 비교하여 최적 알고리즘을 결정한다.

#### 2. 그리드 탐색 기반 원 정합 알고리즘

그리드 좌표 상의 모든 좌표쌍은 최적점의 후보가 되며, 각 좌표 상에서의 오차를 계산하여 최적점을 검출한다. 모든 좌표쌍에 대해 검증하는 전역적 탐색 기법은 그리드 간격이 좁아지고 탐색 범위가 증가할수록 수행시간이 길어지는 단점을 가진다. 이를 개선하기 위한 지역적 탐색기법은 임의의 초기점 및 제약조건을 시작으로 다음 단계의 최적점 탐색과 제약조건 갱신을 반복하여 수렴하는 지역적 최적점을 탐색한다 [10]. 이는 소수의 연산을 통해 빠른 수행속도를 가능하게 하나, 데이터가 복잡해질 경우 지역적 최적점과 전역 최적점 간의 차이가 크게 발생할 수 있는 문제점을 가진다. 본 연구에서는 물체 중심위치가 레퍼런스로부터 일정 범위 내에 존재함을 가정하여 탐색범위를 최소화한 후, 전역 탐색을 통해 오차를 최소화한 중심점을 탐색하고자 한다.

그리드 탐색 기반 원 정합 알고리즘은 원의 중심좌표  $a$ ,  $b$  그리고 반지름  $r$ 에 대한 그리드를 분할하고, 각 그리드 지점에서 네 개의 외곽점에 대한 오차를 계산한 후, 오차합계가 가장 작게 되는 파라미터를 계산한다. 여기서  $i$ 번째 외곽점  $p_i = (x_i, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, 4$  와 정합된 원과의 오차  $e_i$ 는 (1)과 같이 계산한다.

$$e_i = \sqrt{(a-x_i)^2 + (b-y_i)^2} - r = d_i - r. \quad (1)$$

즉, 기하학적으로 볼 때, 오차  $e_i$ 는 정합된 원의 중심점  $(a, b)$ 와 외곽점  $(x_i, y_i)$  사이의 거리오차  $d_i$ 에서 반지름의 길이  $r$ 을 뺀 값으로, 오차가 양수일 경우 정합된 원의 바깥에 외곽점이 있으며, 음수일 경우 정합된 원의 내부에 외곽점이 있음을 의미한다.

이와 같이 각 외곽점에 대한 오차를 계산한 후, 오차합계를 계산하여 최소 오차합계를 가지는 중심점 및 반지름을 검출하게 된다. 이 때, 가장 널리 오차합계를 계산하는 방법들 중 하나인 평균제곱근오차 (RMSE, root mean square error)와 평균절대오차 (MAE, mean absolute error)를 각각 적용하여 결과를 비교해 본다 [11, 12].

### 2.1 RMSE 기반 오차합계 측정

RMSE는 가장 일반적으로 사용되는 오차합계 계산 방식으로 (2)와 같이 계산된다.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2 / n}. \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 데이터의 개수로 본 논문에서는 네 개의 외곽점을 입력 데이터로 사용하므로 4가 된다.

RMSE는 오차크기에 따른 가중치가 적용되므로, 입력 데이터들 간의 오차가 비교적 균등하게 분포되어 안정적인 정합이 가능하다. 그러나 중심좌표 및 반지름에 대한 그리드 탐색을 모두 적용하므로, 알고리즘 복잡도가 매우 높은 문제점을 가진다.

### 2.2 MAE 기반 오차합계 측정

다음으로 원과 외곽점 사이의 오차들을 RMSE가 아닌 오차들의 절대값에 대한 평균값인 MAE를 오차합계로 이용한다. MAE는 (3)과 같이 계산한다.

$$MAE = \sum_{i=1}^n |e_i| / n = \sum_{i=1}^n |d_i - r| / n. \quad (3)$$

MAE를 이용할 경우, 최적 반지름을 산출하는 과정이 크게 단축이 가능해진다. 먼저 원의 중심이 주어졌을 때, 중심점과 네 개의 외곽점 사이의 거리오차가  $d_1 \geq d_2 \geq d_3 \geq d_4$ 의 관계가 있으며, 반지름의 길이가  $r$ 로 주어졌다고 가정한다.  $r$ 값의 범위에 따라 MAE는 다음과 같은 특징을 가진다.

- ①  $r \geq d_1$ 일 때:  $r$ 이  $x$ 만큼 감소하면 각 오차는  $x$ 만큼씩 감소하므로, 오차합계는  $4x$ 만큼 감소하게 된다.

- ②  $d_1 \geq r \geq d_2$ 일 때:  $r$ 이  $x$ 만큼 감소하면  $e_1$ 은  $x$ 만큼 커지나,  $e_2, e_3, e_4$ 는  $x$ 만큼씩 감소하므로, 오차합계는  $2x$ 만큼 감소하게 된다. 반면  $r$ 이  $x$ 만큼 증가되면 오차합계는  $2x$ 만큼 커지게 된다.

- ③  $d_2 \geq r \geq d_3$ 일 때:  $r$ 이 변화할 때,  $e_1, e_2$ 의 변화량은  $e_3, e_4$ 의 변화량과 상쇄가 되므로, 오차합계는 변하지 않는다.

- ④  $d_3 \geq r \geq d_4$ 일 때:  $r$ 이  $x$ 만큼 증가하면  $e_4$ 는  $x$ 만큼 커지나,  $e_1, e_2, e_3$ 는  $x$ 만큼씩 감소하므로, 오차합계는  $2x$ 만큼 감소하게 된다. 반면  $r$ 이  $x$ 만큼 감소하면 오차합계는  $2x$ 만큼 커지게 된다.

- ⑤  $d_4 \geq r$ 일 때:  $r$ 이  $x$ 만큼 증가하면 각 오차는  $x$ 만큼씩 감소하므로, 오차합계는  $4x$ 만큼 감소하게 된다.

따라서  $r$ 값이  $d_2$ 와  $d_3$  사이에 있을 때 오차 합계가 최소가 되며 본 논문에서는 (4)와 같이  $r$ 을  $d_2$ 와  $d_3$ 의 평균값으로 결정한다.

$$r = \frac{d_2 + d_3}{2}, \quad d_1 \geq d_2 \geq d_3 \geq d_4. \quad (4)$$

이와 같이 MAE를 이용하게 되면 반지름의 길이에 대한 그리드 분할 및 탐색 과정이 생략가능하며 반지름에 대한 알고리즘 복잡도를 한 단계 낮출 수 있게 된다.

그러나 여전히 원의 중심점 탐색을 위한 이중 루프문의 그리드 분할 및 탐색 과정이 남아 있는 한계점이 존재한다. 또한 MAE는 거리에 따른 오차가중치가 없어 오차 하나를 극대화하는 방향이 전체 오차합계를 최소화하여 원치 않는 방향의 원 정합 결과를 발생시킬 수 있다.

## 3. SVD 기반 원 정합 알고리즘

그리드 탐색 방식 알고리즘이 갖는 한계점을 해결하기 위해 대수적으로 문제를 해결하는 방법을 이용한다. 최소사승법 문제에서 추정치와 실제 측정치 간의 차이를 최소로 만드는 파라미터 벡터를 구하는 방법으로 아래 과정을 통해 원 정합을 진행할 수 있다.

먼저 반지름이  $r$ 이고 중심이  $(a, b)$ 인 원의 식은 일반적으로 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (x-a)^2 + (y-b)^2 &= r^2, \\ x^2 + y^2 - 2ax - 2by + a^2 + b^2 - r^2 &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 상수항을  $c = a^2 + b^2 - r^2$ 으로 대입한 후,  $a, b, c$ 에 대해 정리하면 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$-2ax - 2by + c = -x^2 - y^2. \quad (6)$$

주어진 네 개의 외곽점  $(p_i = (x_i, y_i), i = 1, \dots, 4)$ 를 대입하여 (7)과 같이 행렬 형태로 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2x_4 & -2y_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_1^2 & -y_1^2 \\ \vdots & \vdots \\ -x_4^2 & -y_4^2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

특이값 분해를 통해 의사역행렬을 획득하고, 의사역행렬을 (7)의 양변에 곱해줌으로써 식 (8)와 같이  $a, b, c$ 의 값을 획득한다.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2x_4 & -2y_4 & 1 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} -x_1^2 & -y_1^2 \\ \vdots & \vdots \\ -x_4^2 & -y_4^2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

여기서  $^+$ 는 의사역행렬을 나타낸다.

식 (8)을 통해 원의 중심좌표 ( $a, b$ )을 획득하고, 반지름  $r$ 은  $r = \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}$ 의 관계식을 통해 획득할 수 있다.

#### IV. 실험 및 고찰

실제 실험에 사용된 원통형 2차 전지의 반지름은 38.5mm이며, 각 방향에서 측정된 네 점의 위치오차는 약  $38.5\text{mm} \pm 0.3\text{mm}$  이내로 나타난다. 표 1은 10번 반복하여 측정된 실제 네 점의 좌표정보와, 이에 대한 SVD 방법의 원 정합을 통한 반지름 계산 결과를 나타낸다. 여기서 각 점의 좌표정보는 센서 축의 중심부로부터 반지름에 해당하는 38.5mm 떨어진 지점을 기준으로, 외곽점이 측정된 지점까지의 오차를 나타낸다. 이 때 양수 오차는 외부방향, 음수 오차는 내부 방향의 오차거리를 나타낸다.

측정된 반지름의 오차범위는 2차 전지의 반지름 38.5mm에 비해 0.1% 수준으로 매우 작은 수준이다. 이는 그리드 탐색 방법과 SVD 방법의 원 정합 결과 간의 오차를 비교하기 어려운 문제점이 존재한다.

표 1. 측정 외곽점 데이터 좌표

Table 1. Coordinates of measured outer point data

Test	$p_1$ (mm)	$p_2$ (mm)	$p_3$ (mm)	$p_4$ (mm)	$r$ (mm)
1	0.034	-0.030	-0.032	0.032	38.5010
2	-0.010	-0.767	-0.013	0.672	38.4739
3	-0.050	-0.106	0.044	0.148	38.5091
4	0.010	-0.796	-0.130	0.650	38.4347
5	0.148	-0.907	-0.209	0.787	38.4596
6	0.089	0.105	-0.073	-0.088	38.5084
7	-0.020	-0.643	0.023	0.591	38.4902
8	-0.180	-0.030	0.043	-0.137	38.4241
9	-0.020	-0.885	-0.160	0.698	38.4124
10	0.235	-0.688	-0.273	0.695	38.4958

표 2. 의사 외곽점 데이터 좌표

Table 2. Coordinates of pseudo outer point data

Data	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
$x$ (mm)	30.7591	-26.5165	-28.6378	30.0520
$y$ (mm)	30.7591	26.5165	-28.6378	-30.0520

알고리즘 간의 차이를 명확히 비교하여 분석하기 위해 레퍼런스과 오차가 크게 발생하는 임의의 의사데이터를 구성하여 실험결과를 비교하였다. 실험에 사용된 의사데이터는 반지름이 38.5 mm인 원을 가정하여, 각 방향으로 임의의 오차를 가지는 네 개의 좌표들로 구성하였다. 오차를 강조하기 위해 각각 5mm, -1mm, 2mm, 4mm의 오차를 가지도록 네 점  $p_1, p_2, p_3, p_4$ 를 생성하였으며, 생성된 각 점의  $x, y$  세부좌표는 표 2와 같다.

주어진 네 개의 점  $p_1, p_2, p_3, p_4$ 를 입력 데이터로 사용하여, 적용한 세 개의 원 정합 알고리즘에 의해 생성된 원 정합 결과는 그림 8과 같다.

그림 9는 그림 8의 각 사분면에서 외곽점을 중심으로 확대하여 나타낸 그림이다.

실험결과 RMSE를 이용한 그리드 탐색 방법과 SVD를 이용한 특이값분해 방법의 원 정합 결과에서는 각 사분면에

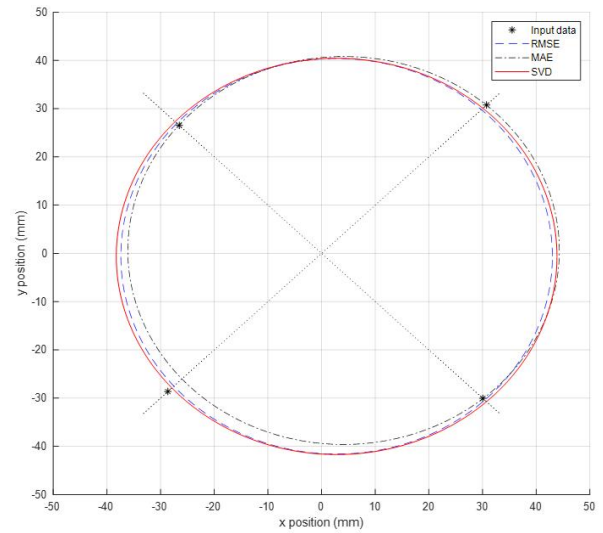


그림 8. 알고리즘에 따른 원 정합 결과 비교

Fig. 8. Comparison of circle fitting results according to the algorithm

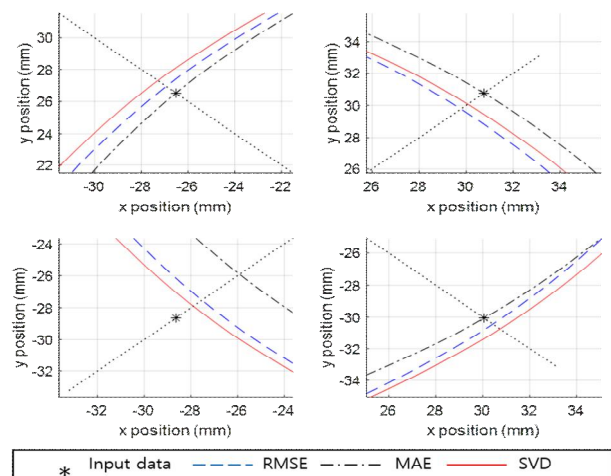


그림 9. 그림 8의 세부 결과

Fig. 9. Detailed result of Fig. 8

표 3. 알고리즘 결과 비교 (0.1 mm)  
Table 3. Comparison of algorithm results (0.1 mm)

	Algorithm		
	RMSE based Grid search	MAE based Grid search	SVD
Grid range (interval)	-5 mm ~ 5 mm (0.1 mm)		-
Grid search parameter	$a, b, r$	$a, b$	-
$d_1$ (mm)	1.0132	0.0449	0.9722
$d_2$ (mm)	1.0655	0.0950	1.0986
$d_3$ (mm)	1.1243	3.6854	1.0434
$d_4$ (mm)	0.8740	0.0449	0.9678
$(a, b)$ (mm)	(2.8, -0.6)	(4.1, 0.6)	(2.8073, -0.6356)
$r$ (mm)	41.0000	40.2078	41.0627
Processing time (sec)	0.0345	0.0062	0.0006

표 4. 알고리즘 결과 비교 (0.01 mm)  
Table 4. Comparison of algorithm results (0.01 mm)

	Algorithm		
	RMSE based Grid search	MAE based Grid search	SVD
Grid range (interval)	-5 mm ~ 5 mm (0.01 mm)		-
Grid search parameter	$a, b, r$	$a, b$	-
$d_1$ (mm)	0.9864	0.0032	0.9722
$d_2$ (mm)	1.0810	0.0032	1.0986
$d_3$ (mm)	1.0552	3.8412	1.0434
$d_4$ (mm)	0.9601	0.0095	0.9678
$(a, b)$ (mm)	(2.81, -0.64)	(4.19, 0.65)	(2.8073, -0.6356)
$r$ (mm)	41.05	40.1525	41.0627
Processing time (sec)	10.8059	0.3639	0.0006

서 원과 외곽점들 간의 거리가 비교적 균등함을 확인할 수 있다. MAE를 이용한 그리드 탐색 방법의 결과는 1, 2, 4 사분면의 외곽점과 원과의 거리는 매우 가까워졌으나, 3사분면에서는 매우 먼 거리를 가지게 되어, 한쪽으로 치우쳐진 형태로 원이 정합된다.

이에 대한 보다 상세한 분석을 표 3과 4에서 진행하였다. 먼저 표 3은 원의 중심좌표  $a, b$  와 반지름  $r$ 에 대해 레퍼런스의 -5 mm ~ 5 mm 범위에 대해, 그리드 간격을 0.1 mm로 분할하여 그리드탐색을 진행한다.

다음 표 4는 그리드 간격을 1/10인 0.01 mm로 좁혔을 경우 그리드탐색의 수행시간의 증가량과 검출 결과를 추가적으로 나타낸다.

먼저 수행시간의 경우, RMSE를 이용한 그리드 탐색 알고리즘은 원의 중심좌표  $a, b$  및 반지름  $r$ 에 대한 그리드 탐색을 모두 진행하므로 가장 오랜 시간이 걸렸으며, MAE를 이용한 그리드 탐색 알고리즘은 알고리즘 복잡도가 반지

름에 대한 그리드 분할이 불필요하게 되어 중심좌표  $a, b$ 만 검출하면 되므로, RMSE를 이용한 경우에 비해 개선된 수행 시간을 확인할 수 있었다. 특히, 그리드 간격이 줄어들어 따라, RMSE는 급격한 수행 시간의 증가로 실시간 처리가 어려운 수준이나 MAE는 0.3639 sec로 수행시간 증가폭이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 그림 9와 표 3, 표 4에서 확인할 수 있듯이,  $p_1, p_2, p_4$  오차는 매우 작으나,  $p_3$ 의 오차가 매우 큰 값을 가지는 문제점을 확인할 수 있다. 이는 오차 크기에 따른 가중치가 적용되지 않은 MAE 기반 오차 측정 기법의 한계점으로,  $p_3$ 에 대한 오차를 증가시키고  $p_1, p_2, p_4$ 의 오차를 감소시키는 것이, 전체 오차 합계를 감소시키는 결과를 얻기 때문이다. 이와 같이 MAE를 이용할 경우 의도하지 않은 형태의 원 정합 결과를 발생시키는 문제점이 있음을 확인할 수 있다.

특이값분해 기반 원 정합 알고리즘은 가장 우수한 결과임을 확인할 수 있다. 그리드 탐색 방식과 달리 ROI와 그리드 간격 등에 대한 정보 없이 최소오차를 찾기 위한 최소자승법 문제를 대수적으로 해결할 수 있으므로, 검출된 원의 중심 좌표 및 반지름 등의 값이 신속하고 정밀하게 결정되며, 외곽점들과의 오차가 균등하게 분포되어 중심점이 잘 결정됨을 확인할 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 기존 머신비전 장비에서 영상신호처리를 통한 원통형 물체의 치수측정 방식 대신, 레이저 변위 센서를 이용하여 네 개의 외곽점을 검출하여 원을 정합함으로써 치수를 측정하는 알고리즘을 적용하였다. 의사 데이터에 대해 그리드 탐색 방식과 특이값 분해 방식을 적용하여 실험 결과를 비교한 결과, 원 정합 알고리즘에는 특이값분해를 이용한 대수적 문제 해결방안이 가장 우수한 성능을 가짐을 확인하였다. 특히 실시간 고정밀 영상처리를 위해 메모리와 요구되는 프로세서의 성능이 기하급수적으로 증가하는 영상 처리와 달리, 레이저 변위 측정 방식의 안정적인 메모리 사용량과 수행속도는 차후 디지털 트윈을 위한 경량화된 임베디드 센싱에 적합한 방식임을 확인하였다.

본 논문에서 SVD 기반 대수적 접근 방식을 통한 원 정합 알고리즘이 치수측정에 효과적임을 확인하였다. 차후 타원 정합에 관한 연구로 확장하여 원통형 물체의 타원 정합 후 치수측정 결과 분석을 통해 타원형 불량 발생 여부를 판별함으로써, 이차전지 등 원통형 물체의 타원형 불량 검출 혹은 O링의 외경 및 내경의 타원 정합을 통한 두께 측정을 통한 불량 검출에 대한 자동화 검사 장비에 활용가능할 것으로 기대한다. 또한 MAE 방식의 경우, 오차거리의 크기에 따른 가중치가 주어지지 않아 원치 않는 형태의 정합이 발생하는 문제점을 보였다. 그러나 측정치 중 outlier가 다수 발생하는 경우, 큰 오차값을 가지는 outlier에 가중치가 적용되지 않아 outlier에 대한 영향을 최소화하는 방향으로 활용이 가능할 것으로 예상된다.

## References

- [1] Y. Jung, K. H. Park, "O-ring Size Measurement Based on a Small Machine Vision Inspection Equipment," *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, Vol. 19, No. 4, pp. 41-52, 2014 (in Korean).
- [2] S. Hong, D. Park, "Lane Detection Based on Inverse Perspective Transformation and Machine Learning in Lightweight Embedded System," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, Vol. 17, No. 1, pp. 41-49, 2022 (in Korean).
- [3] S. Lee, D. Park, P. Choi, D. Park, "Efficient Power Consumption Technique of LiDAR Sensor for Controlling Detection Accuracy Based on Vehicle Speed," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, Vol. 15, No. 5, pp. 215-225, 2020 (in Korean).
- [4] T. Chong, D. Park, "Efficiency Low-Power Signal Processing for Multi-Channel LiDAR Sensor-based Vehicle Detection Platform," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 25, No. 7, pp. 977-985, 2021 (in Korean).
- [5] J. García-Martín, J. Gómez-Gil and E. Vázquez-Sánchez, "Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing," *Sensors*, Vol. 11, pp. 2525-2565, 2011.
- [6] H. Yang, C. Zhu, L. Lv, Y. Du, "Light Energy Distribution Based on Ideal Detected Surface for Laser Displacement Sensor," *2022 IEEE 2nd International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA)*, pp. 267-270, Dalian, China, 2022.
- [7] K. M. Cheon, B. C. Shin, G. H. Shin, J. I. Go, J. H. Lee, J. W. Hur, "Classification of the Rusting State of Pipe Using a Laser Displacement Sensor," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 21, No. 5, pp. 46-52, 2022 (in Korean).
- [8] A. Mai, L. Tran, L. Tran, N. Trinh, "Vgg Deep Neural Network Compression via svd and cur Decomposition Techniques," in *2020 7th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)*, pp. 118 - 123, 2020.
- [9] M. K. Alam, A. A. Aziz, S. A. Latif, A. A. Aziz, "Error-control Truncated svd Technique for In-network Data Compression in Wireless Sensor Networks," *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 13829 - 13844, 2021.
- [10] Y. Shi, G. Zhao, M. Wang, Y. Xu, "An Adaptive Grid Search Algorithm for Fitting Spherical Target of Terrestrial LiDAR," *Measurement*, Vol. 198, pp. 111430, 2022.
- [11] T. Chai, R. R. Draxler, "Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)?-Arguments Against Avoiding RMSE in the Literature," *Geosci. Model Dev*, Vol. 7, No. 3, pp. 1247 - 1250, 2014.
- [12] W. Wang, Y. Lu, "Analysis of the Mean Absolute Error (MAE) and the Root Mean Square Error (RMSE) in Assessing Rounding Model," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 324, No. 1, pp. 012049, 2018.

### Seungmin Lee (이 승 민)



2010 Mathematics from Kyungpook National University (B.S.)  
 2012 Mathematics from Kyungpook National University (M.S.)  
 2018 School of Electrical Electronics Engineering from Kyungpook National University (Ph.D.)

2018~Post. Doc. from Kyungpook National University  
 Field of Interests: Image processing, Bio-signal processing  
 Email: lsm1106@knu.ac.kr

### Daejing Park (박 대 진)



2001 School of Electronics Engineering from Kyungpook National University (B.S.)  
 2003 School of Electronics Engineering from KAIST (M.S.)  
 2014 School of Electronics Engineering from KAIST (Ph.D.)

2016~School of Electronics Engineering from Kyungpook National University (Associate Professor)  
 Career:  
 2003~2014 Research Engineer, SK Hynix/ Samsung  
 Field of Interests: Low-power SoC Design, Robust Embedded Systems  
 Email: boltanut@knu.ac.kr