

오프라인 프로그래밍을 위한 3차원 레이저 스캐닝 시스템 기반의 로봇 캘리브레이션 방법 개발

김현수
울산과학기술대학교 기계공학부

Development of robot calibration method based on 3D laser scanning system for Off-Line Programming

Hyun-Soo Kim

School of Mechanical Engineering, Ulsan College

요약 로봇을 적용한 자동화 생산 라인에서 로봇 셋업 시 시뮬레이션을 통한 Off-Line Programming(OLP)과 로봇 캘리브레이션은 작업 시간을 단축하고 양산 전부터 생산 품질을 관리하기 위해 필수적이다. 본 연구에서는 상용 3D 스캐너를 사용하여 생산 라인의 CAD 데이터와 현장의 3차원 측정 스캔 데이터를 정합하는 로봇 캘리브레이션 방법을 개발하였다. 제안한 방법은 Iterative Closest Point(ICP) 알고리즘을 통해 두 개의 3차원 점군 데이터를 정합하여 로봇을 교정한다. 정합은 3단계로 수행한다. 먼저 CAD 데이터로부터 3개의 평면으로 연결된 꼭짓점을 특징점으로 추출한다. 추출한 특징점 주변에 위치한 스캔 점군데이터로부터 평면을 재구성하여 대응하는 특징점을 생성한다. 마지막으로 ICP 알고리즘을 통해 추출한 특징점들 간의 거리를 최소화하여 위치 변환 행렬을 계산한다. 자동차 차체 조립라인의 스팟용접 로봇 설치에 제안한 방법을 적용한 결과 스팟용접에서 일반적으로 요구하는 정밀도 1.5mm 수준으로 로봇의 위치 및 자세를 캘리브레이션 할 수 있었으며, 기존에 레이저 트래커를 사용하면 로봇 한 대당 5시간 이상 소요되던 셋업 시간은 40분 이내로 단축할 수 있었다. 개발한 시스템을 사용하면 차체 스팟 용접에 필요한 정밀도를 유지하면서 자동차 차체 조립 라인의 OLP 작업시간을 단축하여, 로봇 정밀 티칭 시간을 단축하여, 생산제품의 품질 향상 및 불량률을 최소화할 수 있다.

Abstract Off-line programming and robot calibration through simulation are essential when setting up a robot in a robot automation production line. In this study, we developed a new robot calibration method to match the CAD data of the production line with the measurement data on the site using 3D scanner. The proposed method calibrates the robot using 3D point cloud data through Iterative Closest Point algorithm. Registration is performed in three steps. First, vertices connected by three planes are extracted from CAD data as feature points for registration. Three planes are reconstructed from the scan point data located around the extracted feature points to generate corresponding feature points. Finally, the transformation matrix is calculated by minimizing the distance between the feature points extracted through the ICP algorithm. As a result of applying the software to the automobile welding robot installation, the proposed method can calibrate the required accuracy to within 1.5mm and effectively shorten the set-up time, which took 5 hours per robot unit, to within 40 minutes. By using the developed system, it is possible to shorten the OLP working time of the car body assembly line, shorten the precision teaching time of the robot, improve the quality of the produced product and minimize the defect rate.

Keywords : Robot Calibration, OLP, 3D Scanner, Iterative Closest Point, Point Cloud

*Corresponding Author : Hyun-Soo Kim(Ulsan College)

Tel: +82-10-4628-7963 email: hskim3@uc.ac.kr

Received February 11, 2019

Revised March 6, 2019

Accepted March 8, 2019

Published March 31, 2019

1. 서론

자동화 생산라인에서 로봇팔을 적용할 때 사이버 물리시스템과 디지털 트윈을 통해 시뮬레이션 후 로봇 작동 프로그램을 작성한다. OLP(Off Line Programming)는 가상공간에서 로봇과 현장 설비들 간의 설계 오류를 검토하여 실제 양산과정에서 사용할 수 있는 로봇 작동 프로그램을 구현하는 작업이다. 그러나 OLP 시뮬레이션을 통해 3D 가상환경에서 시뮬레이션을 통해 작성한 로봇 작동 프로그램과 현장 설비들의 설치 위치는 일반적으로 오차가 크기 때문에 오차를 최소화하게 조절하는 로봇 캘리브레이션 과정이 필수적이다. 캘리브레이션 작업은 OLP 프로그램과 로봇/설비의 절대 위치를 측정을 통해 보정하는 작업이다.

자동차 차체 조립 라인에 로봇팔을 적용하는 초창기에는 시뮬레이션을 통한 OLP 작업의 필요성이 크지 않았으나 현재의 자동차 생산라인은 자동화 로봇의 역할이 커짐에 따라 공장의 증설 및 신규라인 구축시 발생하는 캘리브레이션 시행착오로 인한 시간을 단축하는 것이 중요해졌으며, 나아가 시뮬레이션을 통한 생산 부품의 품질, 목표 생산량을 사전에 예측하는 것이 필수적이다. 또한 로봇을 적용하기 위한 OLP 작업과 캘리브레이션은 자동차뿐만 아니라 반도체, 전자제품 등의 전자산업과 조선, 플랜트 등 중공업 산업까지 모든 자동화 제조 환경에 적용되고 있다. 본 연구에서는 CAD데이터와 3D 스캔 데이터의 비교를 통해 가상환경에서 시뮬레이션 후 로봇에 이식할 수 있는 로봇 작동 프로그램과 현장에 설치한 로봇/설비/기구의 절대위치 간의 오차를 최소화하는 범용 캘리브레이션 방법을 제안한다.

로봇 캘리브레이션 및 OLP와 관련하여 개발/응용한 연구 사례를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 로봇 캘리브레이션 분야에서는 산업용 로봇 캘리브레이션에 적용할 수 있는 소프트웨어[1]와 기구학적 파라미터에 의한 캘리브레이션 알고리즘[2]이 제안되었다. 또한 다관절 로봇의 성능 평가를 위한 포즈 정확도 측정을 위한 좌표계 캘리브레이션에 대한 연구[3]가 수행되었다. OLP와 관련하여 다음과 같은 연구가 수행되었다. 먼저 로봇 작동 프로그래밍을 계획하는 OLP 기반의 듀얼 압 로봇 동기 모션 계획[4] 방법이 연구되었다. OLP 기반의 자동화 시스템 개발 사례로는 스프레이건을 부착한 6축 로봇으로 폐기 지형 발전시스템에 사용하는 라디에이터를 균일한 두께

로 코팅하는 코팅로봇 자동화 시스템[5], 금형 열처리 작업 효율 향상을 위한 OLP 시뮬레이터 기반의 다이오드 레이저 열처리 로봇시스템[6], 해양/석유화학 플랜트에 사용되는 볼밸브용 볼의 육성 용접 자동화를 위한 OLP 기반 로봇육성 용접 시스템[7] 등이 개발되었다. 본 연구에서 수행한 로봇 캘리브레이션 방법의 연구 사례로는 교정물체 및 카메라를 이용한 비전기반의 로봇 캘리브레이션[8]이 있다. 비전 기반 로봇 캘리브레이션은 로봇 트래커 장비를 이용한 캘리브레이션의 단점인 트래커 설치와 가동에서 소요되는 셋업시간은 단축하였으나 기준이 되는 교정 물체와 영상측정을 위한 카메라가 추가적으로 설치되어야 한다.

본 연구에서는 수행한 로봇 캘리브레이션은 로봇을 설치할 현장 로봇, 지그, 기구물의 3D 점군 데이터를 획득하여 가상환경의 용접제조공정의 OLP 시뮬레이션에 사용하는 현장 CAD 데이터와 정합하여 로봇의 설치 위치/방향을 보정하는 과정이다. 이를 위해 먼저 신규 차체 조립라인 증설시 고정밀 3차원 스캐너를 통해 신규생산라인 3차원 점군 데이터를 측정하였다. 측정된 3차원 점군 데이터는 현장 Layout의 CAD 도면에서 추출한 3차원 점군데이터와 실시간으로 비교한다. 현장 CAD 데이터는 로봇뿐만 아니라 용접을 위한 차체 판넬과 고정지그 및 프레임 모두 포함한다. 캘리브레이션을 위해 로봇, 판넬, 지그, 프레임의 특징형성 중 12개 포인트를 추출하여 캘리브레이션 대상 포인트를 선정한다. 소프트웨어는 Windows 10 64비트 환경에서 Visual C++를 사용하여 구현하였으며, 캘리브레이션 과정을 3차원으로 표현할 수 있는 시각화 모듈과 3D 데이터 처리 모듈로 구성하였다. 스캔한 3차원 스캔데이터는 샘플링, Outlier 제거 등의 전처리 알고리즘과 정합을 위한 Iterative Closest Point(ICP) 알고리즘을 포함한다. 대용량 3차원 점데이터를 처리하기 위해 병렬처리 프로그래밍 기법을 활용하여 시스템의 계산 시간을 최소화할 수 있도록 구현하였다. 개발한 캘리브레이션 시스템은 스캔데이터와 CAD데이터간의 오차와 현장에서 로봇 1대당 셋업에 걸리는 캘리브레이션 시간을 측정하여 성능을 평가하였다.

2. 본론

2.1 3D 점군 데이터 획득

측정장비를 활용한 국부 캘리브레이션은 와이어, 레

이저 트래커, 비전 센서, 기타 측정장비를 사용한다. 이 중 레이저 트래커 방식이 정밀도가 가장 높고 데이터 수집이 용이하지만 장비가 고가이고 장비 운영 인력과 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 본 연구에서는 자동차 차체 용접라인 자동화 로봇에 필요한 정밀도를 유지하면서 측정시간을 단축할 수 있는 3D 스캐너를 활용한 캘리브레이션 방법을 제안한다.

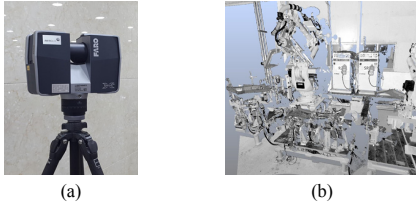


Fig. 1. 3D Scanner and point cloud data
(a)Commercial scanner (b)Pointcloud of a worksite

레이저 트래커를 사용하는 캘리브레이션은 기준이 되는 포인트 위치를 지정하기 위하여 로봇 끝단에 반사경을 설치하지만 제안하는 방식은 자동차 차체 판넬과 고정구를 직접 측정하여 기준 포인트를 추출한다. 3D 스캐너를 사용하여 캘리브레이션하기 위해서는 현장에서 스캔한 3D 점군 데이터와 CAD 데이터로부터 추출한 점군 데이터가 필요하다. 먼저 현장의 스캔 데이터는 10m 떨어진 10% 반사율을 갖는 표면에 대해 최대 0.4mm이 내의 거리오차(range error)와 0.009° 각도 분해능을 갖는 상용 3차원 레이저 스캐너(Fig. 1 (a))를 사용하여 Fig. 1 (b)와 같은 고정밀 대용량 3차원 현장 데이터를 획득하였다. Fig. 2는 스캔 데이터와 CAD 데이터를 실시간으로 비교하는 작업을 보여준다.



Fig. 2. Point cloud comparison between scan data set and its 3D CAD model

2.2 점군 데이터 정렬

현장 스캔 점군 데이터와 CAD 데이터에서 추출한 점군 데이터는 Iterative Closest Point(ICP) 알고리즘을 통

해 정합하여 위치 오차를 최소화 한다. ICP 알고리즘은 다음과 같이 수행한다.

{M,S} 를 Rd 벡터공간에 있는 유한 개수의 점군데이터라고 가정하면, ICP 알고리즘은 M과 S간 거리를 최소화하는 좌표변환 행렬을 구하는 문제를 푸는 방법이다. S를 위치가 고정된 점군(point cloud)라고 하고, 점군 M을 좌표 변환하는 행렬을 T라고 하면, 좌표변환 행렬은 T(M)으로 표현 할 수 있다. S와 T(M)으로 표현할 수 있다. S와 T(M)의 유클리드 거리 $dist(T(M),S)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$dist(T(M),S) = \sum_{m \in T(M)} \sum_{s \in S} (m-s)^2 \quad (1)$$

알고리즘은 Eq. (1)을 최소화하는 least squares problem으로 정의할 수 있으며 Eq. (1)이 최소화되는 좌표변환행렬은 점군 M과 S간의 거리를 최소화하는 T(M, Θ)이다.(Θ 는 행렬의 회전, 이동, 확대/축소하는 매개변수)

```

 $\Theta := \Theta_0$ ( $\Theta$  is a parameter)
while not registerd
  X :=  $\Theta$ (X is a affine transform)
  for  $m_i \in T(M, \Theta)$ 
     $s_j :=$  closest point in S to  $m_i$ 
    X := X+ $\langle m_i, s_j \rangle$ 
   $\Theta :=$  least squares(X)
return  $\Theta$ 
    
```

Fig. 3. Pseudocode of ICP Algorithm

2.3 로봇 캘리브레이션 알고리즘

로봇 캘리브레이션은 로봇 끝에 설치하는 툴의 위치 좌표 및 로봇자세의 측정값과 목표값 간의 오차를 최소화하는 방식으로 구현한다. 이를 위해 측정값과 목표값 사이의 최단거리를 위치별로 최소화하는 알고리즘을 ICP[9] 알고리즘을 통해 적용한다. ICP알고리즘을 통해 측정값과 목표값 간의 오차가 최소화되는 이동/회전(Affine Transform) 행렬이 구해지면 로봇 기구학에 의해 로봇의 위치와 자세를 계산하여 OLP작업의 파라미터로 입력한다. 캘리브레이션 결과는 자동차 용접 라인에서 활용하는 로봇의 API와 인터페이스를 공유하여 파라미터를 통신한다.

캘리브레이션 순서(Fig. 3)는 다음과 같다. 먼저 스캔한 점군 데이터와 CAD데이터를 사용자가 비교하여 특정 포인트를 추출한다. 추출한 특정 포인트로부터 ICP 알고리즘에 의해 각 매칭점간의 3차원 좌표와 매칭점간 거리를 계산하고 특정 포인트 간 오차를 최소화하는 Affine Transform을 결과로 출력한다.

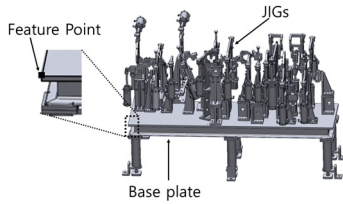


Fig. 4. Feature point selection

2.4 소프트웨어 개발 환경 및 인터페이스

본 연구에서 개발한 로봇 캘리브레이션 알고리즘은 다음과 같은 구동 환경에서 작동하는 소프트웨어 플랫폼으로 구현하였다. 개발한 소프트웨어는 Windows 10 64bits 환경에서 구동하고, 3D 데이터처리, 3D 시각화 뷰어, 사용자 인터페이스의 3가지 모듈로 구성하였다. 먼저 3D 데이터 처리는 Point Cloud Library를 기반으로 커스텀화하고 데이터 입출력, ICP 알고리즘, 좌표변화를 담당한다. 시각화 모듈은 OpenGL 기반으로 구현하였으며 기준 점군과 이동점군을 서로 다른 색상으로 구분한다. 사용자 인터페이스(GUI)는 MFC기반으로 구현하고 기준/이동 점군데이터 선택 및 이동/회전 줌을 담당한다. 오프라인 입출력이 가능하도록 특징점 및 캘리브레이션을 파일을 통해 읽고 저장할 수 있으며, 파일 입출력은 대용량 스캔 데이터를 실시간으로 읽기 위해 OpenMP를 통한 병렬처리기법을 적용하였다. 캘리브레이션 결과는 다이얼로그와 로그창에 표시하며 로그창의 결과는 파일로 저장이 가능하다.

3. 결과 및 고찰

개발한 로봇 캘리브레이션 소프트웨어의 성능은 2가지 항목으로 평가하였다. 먼저 Point 당 캘리브레이션 정밀도는 개발한 소프트웨어의 교정 결과 값이 자동차 용접라인 정밀도 기준이 매칭점 간 거리가 5mm이하인지 확인하였다. 두 번째 평가항목으로 로봇 셋업시간으로 로봇 1대당 셋업시간을 기존 레이저 트래커를 사용할 때와 비교하였다. 2가지 항목의 테스트는 4가지 모델의 시험로봇을 선정하여 각 모델마다 10번씩 셋업할 때 발생한 정밀도와 설치 시간을 측정하여 평가하였다.

3.1 캘리브레이션 정밀도 분석

Point 당 캘리브레이션 정밀도는 캘리브레이션 작업

후 매칭점 간 최대 거리가 5mm 이내로 들어오는지 총 40개의 측정데이터에 대한 캘리브레이션 결과값을 측정하였다. 먼저 CAD 데이터로 부터 12개의 특징점을 갖는 기준데이터를 로봇 모델마다 추출한 후, 로봇의 셋업 위치를 변경하면서 모델 별로 10번의 현장 측정 데이터를 획득한다. 특징점은 차체 용접 작업시 판넬을 지지하는 지그와 기구물의 CAD 모델에서 꼭지점으로 선택이 가능한 3개의 평면이 만나서 꼭지점이 되는 점을 12개 선정하였다. 12개의 특징점은 지그를 지지하는 베이스 플레이트에서 스캐닝 시 가림이 없으면서 가장 큰 바운딩박스를 만들도록 4개를 추출하고, 같은 방식으로 로봇에서도 4개의 특징점을 선정한 후, 지그에서 정밀도 확인을 위해 4개의 점을 추가로 추출하였다. CAD모델로부터 획득한 특징점에 대한 기준데이터를 로딩하고 스캔한 점군데이터에서 CAD 모델에서 선정한 각 CAD 특징점(P1) 주위를 3개의 평면으로 피팅하여 정합을 위한 스캔 특징점(P2)을 계산한다. 캘리브레이션 알고리즘은 매칭점(P1, P2) 간 거리를 계산하여 12개의 매칭점에서 거리오차 최대값이 5mm 이하인지 분석한다. 각 모델별로 10번의 캘리브레이션 한 결과값의 표준 편차가 6시그마 기준으로 5mm 이내인지 평가한다. 캘리브레이션 정밀도 결과값은 Table 1에 표기하였다.

3.2 캘리브레이션 작업 속도 분석

기존의 레이저 트래커를 사용하는 경우 캘리브레이션 작업 속도는 평균적으로 로봇 대당 셋업시간이 5~6시간 정도 소용된다[10]. 제한한 방식을 사용하는 경우 4가지 모델의 로봇을 각 10번씩 40번 셋업하여 로봇 모델별로 작업시간 평균값과 최대 작업시간을 현장 관리자가 측정하여 Table 2에 표기하였다.

Table 1. Precision comparison before and after calibration (d1: Maximum distance(mm) between scan data and cad before calibration, μ_1 : Average of d1, d2: Maximum distance(mm) between scan data and cad after calibration, μ_2 : Average of d2, σ : standard deviation of d2)

Robot 1						
Sample No.	Before calibration		After calibration			
	d1 (mm)	μ_1 (mm)	d2 (mm)	μ_2 (mm)	σ (mm)	$6*\sigma$ (mm)
1	34.202	24.607	1.361	1.303	0.144	0.865
2	40.724		1.406			
3	74.331		1.551			

Sample No.	d1 (mm)	$\mu 1$ (mm)	d2 (mm)	$\mu 2$ (mm)	σ (mm)	$6*\sigma$ (mm)
4	25.552		1.056			
5	38.442		1.383			
6	38.487		1.309			
7	41.893		1.236			
8	23.531		1.372			
9	20.947		1.219			
10	52.896		1.137			

Robot 2						
Sample No.	Before calibration		After calibration			
	d1 (mm)	$\mu 1$ (mm)	d2 (mm)	$\mu 2$ (mm)	σ (mm)	$6*\sigma$ (mm)
1	11.177	7.597	1.444	1.348	0.182	1.090
2	8.612		1.202			
3	12.957		1.339			
4	11.726		1.498			
5	10.026		1.467			
6	10.690		1.168			
7	16.811		1.104			
8	16.629		1.493			
9	10.005		1.621			
10	11.363		1.141			

Robot 3						
Sample No.	Before calibration		After calibration			
	d1 (mm)	$\mu 1$ (mm)	d2 (mm)	$\mu 2$ (mm)	σ (mm)	$6*\sigma$ (mm)
1	8.816	12.648	1.315	1.320	0.099	0.593
2	10.508		1.316			
3	21.905		1.184			
4	27.331		1.218			
5	28.540		1.543			
6	9.831		1.358			
7	23.558		1.357			
8	16.856		1.307			
9	16.003		1.249			
10	8.948		1.353			

Robot 4						
Sample No.	Before calibration		After calibration			
	d1 (mm)	$\mu 1$ (mm)	d2 (mm)	$\mu 2$ (mm)	σ (mm)	$6*\sigma$ (mm)
1	12.946	17.776	1.351	1.315	0.084	0.502
2	19.459		1.277			
3	18.505		1.470			
4	36.169		1.298			
5	22.648		1.303			
6	16.513		1.199			
7	32.670		1.269			
8	36.870		1.220			
9	32.568		1.414			
10	26.104		1.351			

3.3 고찰

캘리브레이션 성능평가를 요약하면 다음과 같다.

먼저 Point당 캘리브레이션 정밀도는 실험을 수행한 자동차 용접라인의 목표정밀도 5mm이하 대비

Table 2. Measurement of setup time(t_1 : setup time per each robot(min))

Robot 1			
Sample No.	t_1 (min)	average of t_1 (min)	maximum of t_1 (min)
1	32	34	39
2	26		
3	29		
4	39		
5	37		
6	39		
7	28		
8	34		
9	34		
10	39		

Robot 2			
Sample No.	t_1 (min)	average of t_1 (min)	maximum of t_1 (min)
1	33	31	38
2	26		
3	26		
4	35		
5	37		
6	34		
7	25		
8	38		
9	26		
10	27		

Robot 3			
Sample No.	t_1 (min)	average of t_1 (min)	maximum of t_1 (min)
1	40	32	40
2	29		
3	25		
4	25		
5	39		
6	35		
7	27		
8	35		
9	28		
10	39		

Robot 4			
Sample No.	t_1 (min)	average of t_1 (min)	maximum of t_1 (min)
1	26	31	38
2	29		
3	36		
4	26		
5	37		
6	28		
7	38		
8	27		
9	34		
10	26		

6시그마 표준편차를 적용하였을 때 총 40번의 로봇 셋업 모두 2.5mm 이하로 제한하는 방식이 현장에서 실제 필요로 하는 캘리브레이션 정밀도를 충족함을 확인할

수 있었다. [11]에서는 캘리브레이션 후 로봇의 절대위치 정밀도는 로봇의 크기나 파라미터에 따라 달라지지만 자동차 스팟용접로봇의 경우 절대위치 오차가 1.5mm 이내의 결과를 얻었다고 하였다. 제안한 방법은 40번의 로봇 셋업 중 38회가 1.5mm 이내로 수행되었으며, 2회의 셋업 실패는 경우 재작업을 수행하면 1.5mm 이내 정밀도로 캘리브레이션 할 수 있었다. 로봇 셋업 시간은 기존 로봇 캘리브레이션 작업시 로봇 1대당 5~6시간 정도 소요되는 반면 제안하는 방식은 최대 작업시간이 40분 이내로 단축할 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서 제안한 레이저 스캐너를 사용한 로봇 캘리브레이션 방법에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 자동차 차체 조립라인 용접로봇 설치 현장에서 요구하는 캘리브레이션 정밀도 1.5mm 수준을 확보하여 제안하는 방법이 실제 현장에 충분히 사용 가능하다. 캘리브레이션 결과는 6시그마 기준으로 평가하였으므로 자동차 용접로봇에 대해서는 실제 현장에 적용할 수 있다. 하지만 더 높은 정밀도를 요구하는 전자산업 등에 적용하기 위해서는 각 생산라인 요구정밀도에 부합하는 스캔데이터를 확보할 수 있는 3D 스캐너의 적용이 필요하다.
- 2) 개발한 캘리브레이션을 사용하는 경우 기존에 대당 평균 5시간 이상 걸리던 로봇 셋업 작업을 40분 이내로 단축하여 로봇 셋업에 걸리는 시간과 경제적 비용을 절감할 수 있다.
- 3) 제안한 방법이 기존 레이저 트래커를 사용하는 방식을 대체할 수 있다. 하지만 여전히 로봇 셋업에 들어가는 수작업과 숙련된 사용자의 경험을 필요로 하기 때문에 향후 캘리브레이션 작업에 대한 빅데이터를 확보하여 딥러닝 기반의 측정 자동화 최적화에 대한 추가 연구가 필요하다.

References

- [1] Y. H. Lee, N. H. Nham, H. J. Kang, H. K. Lim, D. H. Kim, "Development of a Robot Calibration Software", *Proceeding of Korea Society for Precision Engineering 2008 Fall Conference*, pp. 485-486, 2008. Available From: <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE01183181>
- [2] H. J. Kang, S. W. Shin, Y. S. Ro, Y. S. Such, H. K. Lim, D. H. Kim, "Robot Calibration with Joint Stiffness Parameters for the Enhanced Positioning Accuracy", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 14, No. 4 pp. 406-410, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2008.14.4.406>
- [3] K. T. Park, J. W. Lee, T. H. Lee, J. W. Woo, "Coordinate system calibration for performance evaluation of multi-joint manufacturing robots accuracy", *Proceeding of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 2017 Conference*, p. 72, 2017. Available From: <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07285384>
- [4] S. B. Lee, T. W. Kim, S. W. Baek, D. S. Yun, Y. J. Lee, "Study on Synchronized Motion Planning for Dual Arm Robot based on OLP", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 9 pp. 45-52, 2009.
- [5] S. J. Kim, J. H. Lee, T. J. Lho, "Development of Coating Robot Automation System Based on OLP for Radiators in PPS", *Journal of the Korea Academia-industrial cooperation Society*, Vol. 14, No. 2 pp. 585-591, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.2.585>
- [6] K. J. Park, S. H. Yoon, "Development of the Diode Laser Heat Treatment Robot System Based on OLP Simulator", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, No. 5 pp. 8-14, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.14775/ksmpe.2015.14.5.008>
- [7] J. S. Jang, S. H. Hwang, T. J. Lho "A study on Implementation of Robot Overlay Welding System Based on OLP for Ball of Ball Valves", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 17, No. 12 pp. 446-452, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.12.446>
- [8] J. K. Oh, D. S. Kim, H. K. Lim, "Development of Vision-based Zero Positioning System for Industrial Robot", *Proceeding of Institute of Control, Robotics and Systems 2018 Conference*, pp. 295-295, 2018.
- [9] S. Rusinkiewicz, M. Levoy, "Efficient Variants of the ICP Algorithm", *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 145 - 152, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1109/IM.2001.924423>
- [10] M. C. Han, "A study on the calibration method for the improvement of the off-line programming absolute position accuracy of car body automation line robot", Master's thesis, p. 67, University of Ulsan, pp. 2005
- [11] J. H. Borm, "Efficient Digital Manufacturing in Automotive Manufacturing Industry/Robot OLP System and Application Cases", *Communications of the Korean Institute of Information Scientists and Engineers* Vol. 27, No. (6) pp. 67-74, 2009. Available from : <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE01208957>

김 현 수(Hyun-Soo Kim)

[종신회원]



- 2002년 2월 : 광주과학기술원 기
전공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 광주과학기술원 기
전공학과 (공학박사)
- 2010년 9월 ~ 2014년 2월 : 삼성
SDI 생산기술연구소 책임연구원
- 2014년 3월 ~ 현재 : 울산과학대
학교 기계공학부 교수

<관심분야>

CAD, Graphics, 생산자동화, 로봇, 인공지능