

로봇 오프라인 프로그래밍을 위한 작업장에 고정된 공작물 교시 정보를 이용한 로봇작업장 보정

Robotic Workplace Calibration Using Teaching Data of Work-Piece Fixed in Robotic Workplace for Robot Off-line Programming

정준호¹, 국금환^{1,✉}
Jun Ho Jeong¹ and Kum Hoan Kuk^{1,✉}

¹ 경상대학교 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Engineering and ERI, Gyeong-sang National Univ.)
✉ Corresponding author: kkh@gnu.ac.kr, Tel: +82-55-772-1741

Manuscript received: 2012.10.5 / Revised: 2013.2.28 / Accepted: 2013.4.9

The robot calibration has greatly improved the absolute accuracy of the industrial robot. However, the accuracy of the relative positions of robotic tool-tip at work-points on a work-piece is only slightly corrected by the robot calibration since there has been no practical method to eliminate the elements of the setup position errors at a robotic workplace. A robotic workplace calibration is demonstrated in this paper to minimize the relative position errors between a robot tool-tip and the work-point on a work-piece. The existing teaching and playback method has been developed for the robotic workplace calibration. This paper uses the work-piece fixed in a robotic work-place as measurement equipment instead of a special robot measurement equipment for the robotic workplace calibration. The positive effect of the robotic workplace calibration is supported by the results of computer simulation on an ideal robotic workplace model and an experiment at the actual robotic workplace.

Key Words: Robot Calibration (로봇보정), Robotic Workplace Calibration (로봇작업장보정), Robot Identification (로봇인식), Teaching and Playback (교시재생), Off-line Programming (오프라인 프로그래밍)

1. 서론

국의 대표적인 제조업용 로봇 메이커들의 경우, 기존 제조업용 로봇 시장 확대가 한계에 달하자, 최근 새로운 시장 개척을 위한 500kg 이상 초중량물 핸들링 로봇개발을 통해 자동차 제조라인 및 일반 공작기계 가공라인의 물류혁신을 꾀하고 있다. 500kg 이상 초중량물 핸들링 로봇의 경우, 교시작업 중 중량 공작물의 이탈에 의한 안전사고로 인하여 위험한 교시작업을 오프라인(off-line)으로 수행하는 것이 바람직하다.¹

로봇 작업프로그램(work program) 생성을 위한,

작업장 내 실제 로봇을 이용한 온라인 교시(teaching) 작업을 컴퓨터 그래픽 모델을 이용한 오프라인 작업으로 대체하기 위해서는, 기본적으로 실제 로봇 기구부의 수학적 모델 인자 값(주로 Denavit-Hartenberg인자) 정확도뿐만 아니라 로봇 작업장 전체(작업 대상 공작물을 포함한 각종 주변기기 자체 및 로봇과 이들간의 상대 위치·자세)의 모델링 정확도가 요구 작업 정확도를 만족시킬 수 있는 수준으로 높아야 한다.

기존 로봇 보정작업처럼 로봇 자체만의 기구부 인자 값을 매우 높은 정도로 인식했다 하더라도, 이 로봇을 이용하여 실제 로봇작업장을 구축할 때

작업 대상 공작물 자체 오차 및 공작물과 공작물 고정구의 현장 로봇에 대한 고정·설치 오차, 로봇 공구 자체 및 고정 오차가 추가로 발생된다. 로봇 작업장 설치 시 추가 발생한 이러한 오차들로 인하여 로봇 작업부(end-effector) 선단의 실제 위치·자세와 공작물상 목표 위치·자세의 편차(상대오차)가 다시 커지게 되어, 결국 로봇 적용 작업에서 요구하는 정확도를 만족시키지 못하게 된다.

로봇 오프라인 프로그래밍이 여러 장점을 가진에도, 그 동안의 연구는 주로 실제 로봇 작업장과 분리된 로봇 자체만의 기구정수 인식 및 보정을 위한 로봇 모델링 방법 개선과 고효율 저비용 로봇 측정기 개발에 집중되었다.^{2,3} 구체적으로 간단한 원형 지그(jig)와 핸드아이 레이저 로봇 시스템⁴ 응용연구, 특수 제작한 전용 지그(jig) 응용연구⁵를 들 수 있다. 이러한 연구사례는 기존 고가의 레이저 응용 3D 로봇측정기 응용보정⁶에 비해 보다 실용적인 경우이다.

그러나 실제 로봇 작업장 설치 시 추가 도입된 여러 오차 때문에, 현재 국내·외 산업현장에 설치된 로봇의 작업 프로그램 생성은 대부분 기존 교시재생 방식에 의존하고 있다.^{9,10} 대기업의 경우도 기도입한 ROBCAD, IGRIP 과 같은 고가 상용 패키지를 주로 로봇 작업장 레이아웃 설계용으로 사용하고 있는 실정이다.

물론, 로봇 자체 기구 인자의 정확한 인식·보정은 기존 교시재생 방식을 이용하는 경우에도 중요하다. 왜냐하면, 기 교시된 2~3개 점들을 이용하여 직선·원호 보간 명령을 하는 경우, 역기구학을 이용하여 계산된 직선·원호 궤적 정확도가 로봇 제어기에 내장된 로봇 기구 인자 값 정확도에 직접 의존하기 때문이다.

본 논문에서 기존 로봇 보정개념을 로봇작업장 보정으로 확대하여, 별도의 전용 로봇측정장치 없이 로봇작업장 내부요소인 작업대상 공작물만을 이용하여 로봇 작업점에서의 상대오차를 줄이기 위한 하나의 실용적인 방법을 제시한다.

먼저 오프라인 프로그래밍 실용화 관점에서 로봇 자체의 절대오차 개선을 위한 기존 로봇 자체 보정 방법의 취약점을 도출한다. 나아가 도출된 취약점 개선을 위해 목표 작업 점에서의 상대오차(로봇 선단 위치와 목표 작업점 위치) 개선을 위한 공작물 교시 정보를 이용하는 실용적인 로봇 작업장 보정 방법을 제안한다. 이어서 제안한 로봇 작

업장 보정 방법을 정량적으로 검증하기 위해, 먼저 이상적인 로봇 작업장 모델과 simulation을 통해 로봇 작업장 요소들의 인자 인식 정확도와 상대오차 개선효과를 보인다. 더불어 로봇 작업장 요소들 자체의 모델링 오차와 목표 작업점에서의 상대오차의 관계를 보인다. 끝으로 제안한 로봇 작업장 보정 방법을 실제 로봇 작업장에서 실험 한 결과를 제시한다.

2. 로봇 작업장 보정 방법 도출

2.1 기존 로봇 보정 방법의 취약점

기존 로봇 오프라인 프로그래밍 관련 연구와 로봇 작업프로그램의 오프라인 작성 방법들(외계 센서 병용 제외)을 실제 로봇 작업장 적용 가능성 관점에서 분석한 결과는 그림 1과 같다.^{4,8}

그림 1을 보면, 그 동안 로봇 오프라인 프로그래밍 시스템의 실제 현장을 가로막는 일반적인 병목(bottleneck)은 통상 ③, ④, ⑤ 이었다. 최근 로봇 자체 보정(calibration)과 공작물 가공 정도 향상으로 ④와 ⑤는 상대적으로 크게 개선되었으나,^{4,7} 병목 ③은 여전히 개선되지 못한 상태이다.⁸⁻¹⁰ 가장 큰 이유는, 기존 교시재생방법 경우 작업대상 공작물(work-piece)상 로봇 목표 작업점들에 대한 정확한 수식모델(③)이 필요 없었기 때문이다.

기존 로봇 자체 보정 방법의 경우, 로봇 전용 측정기 용도는 별도 로봇 측정 공간에서의 로봇

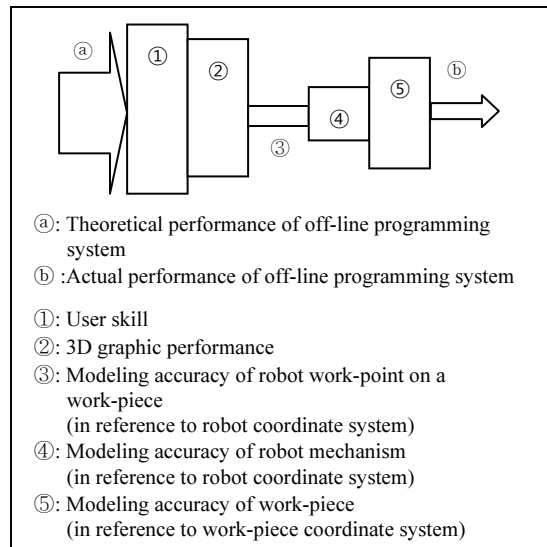


Fig. 1 Bottleneck of off-line programming system

선단부 절대 위치 및 자세 측정용이다. 실제 로봇 작업장이 완전히 구축된 후 로봇 자체와 로봇 작업대상 공작물 간의 정확한 위치 및 자세 인식용으로 로봇 측정기를 사용하지 않는다.

2.2 로봇 작업장 보정 방법

그림 1의 병목③을 개선하기 위해서는 로봇 작업장 요소 전체의 수식 모델 정확도가 서로 비슷해야 한다. 모두 비슷한 수식 모델 정확도를 얻기 위해, 기존 로봇 작업장 요소 중 하나인 로봇에 치우친 ‘로봇 자체 보정’ 개념을 ‘로봇 작업장 보정’ 개념으로 확대해야 한다. 로봇 보정 작업은 통상 모델링(modeling), 측정(measurement), 인식(identification), 적용(implementation) 4개의 세부절차로 이루어진다. 이 4개의 절차에 대한 통상적 ‘로봇 자체 보정’ 개념을 ‘로봇 작업장 보정’ 개념으로 확대한 하나의 방법은 표 1과 같다.

표 1 첫째 절차 중 ‘ $4 \times N + 6$ ’의 ‘ $4 \times N$ ’은 로봇 자체의 전체 D-H (Denavit-Hartenberg)인자를, ‘6’은 전용 로봇 측정기의 위치·자세 인자를 의미한다. ‘ $2 \times N + 6$ ’의 ‘ $2 \times N$ ’은 로봇 자체 D-H 인자 4개 중 관절변수와 링크길이 2개 인자만 고려함을 의미하고, ‘6’은 공작물 자체의 위치·자세 인자를 의미한다. 링크 트위스트 인자를 고려하지 않는 이유는 보정작업 시 실시간으로 역기구학 계산을 하기 위함이다.

기존 로봇 자체 보정의 경우, 표 1 둘째·셋째 절차는 다음 그림 2(a)와 같이 로봇 자체 보정을 위해 별도로 설치한 로봇 측정 시스템에서 로봇

end-effector 선단 점 Q에 도달하는 두 경로, 로봇 기구부를 통과한 경로 R과 3차원 레이저 측정기를 통과한 경로 M, 사이의 상대오차가 최소가 되도록 $4 \times N + 6$ 개 인자값을 결정하는 절차이다.

반면, 제안한 로봇 작업장 보정 방법은 그림 2(b)와 같이 실제 로봇 작업장 내부에 고정된 작업대상 공작물 자체를 이용한 로봇 작업장 인자 인식을 수행한다. 즉 그림 (a)의 전용 로봇 측정기 기능을 로봇이 작업할 대상 공작물(공작물 자체의 정확한 치수정보)로 대체하였다.

3. 로봇 작업장 보정 simulation

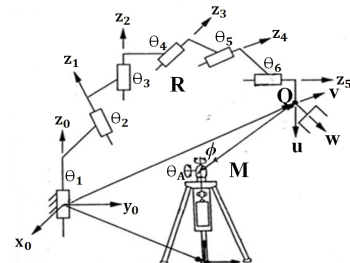
로봇 작업장 보정 방법의 타당성을 정량적으로 확인하기 위해 먼저 로봇과 공작물 인자의 참값 확인이 용이한 로봇 작업장 보정 simulation 방법을 이용한다. 로봇 작업장 보정 simulation은 로봇 보정 3번째 절차인 measurement에서 실제 measurement를 measurement simulation로 대체 하여 구현할 수 있다.

3.1 로봇 기구정수 및 공작물 위치 인식

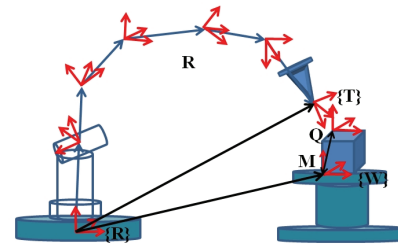
그림 3은 제안한 로봇 작업장 보정 절차 중 표 1의 3번째 identification 단계에 해당된다. 구체적으로 로봇 작업공간에 설치된 공작물 고정구상 공작

Table 1 Comparison of robot calibration and robotic workplace calibration

	Robot Calibration	Robotic Workplace Calibration
Modeling	- fine robot model - unknown variable: $4 \times N + 6$ (N: D.O.F. of robot)	- simplified robot and work-piece model - unknown variable: $2 \times N + 6$ (N: D.O.F. of robot)
Measurement	- special system for robot - fine measurement System	- actual robotic workplace - work-piece and robot in an actual robotic workplace
Identification	- local identification of robot - bottle-neck of identification: absolute setup position error of robotic workplace elements	- global identification of robotic workplace - elimination of bottle-neck: minimization of relative fixing error
Implementation	- thousand times relative error at work-points on work-piece (compared to teaching and playback)	- ten times relative error at work-points on work-piece (compared to teaching and playback)



(a) Robot calibration



(b) Robotic workplace calibration

Fig. 2 Robot calibration and robotic workplace calibration

물 자체를 측정기로 이용한 방법으로, 기구정수 인식은 선형화한 오차함수(그림 3 속 error)에 반복 최소 자승법을 적용하거나 비선형 오차함수에 최적화 알고리즘을 적용한다.

그림 3에서 ‘선형화 오차함수를 이용한 반복 최소 자승법’은 인식 대상 인자값의 오차가 작은 경우에 수렴이 보장된다. 그렇지 않는 경우에는 최적화 알고리즘 중 하나인 비선형 최소화 알고리즘을 적용해야 한다.

3.2 2D 로봇 작업장 인식 simulation

먼저 로봇 작업장 보정simulation을 통해 로봇

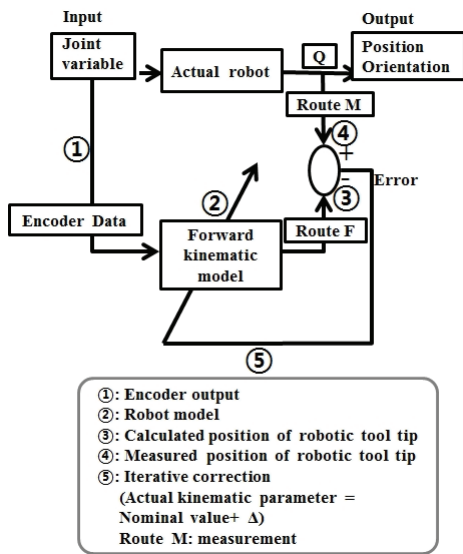


Fig. 3 Identification of robotic workplace

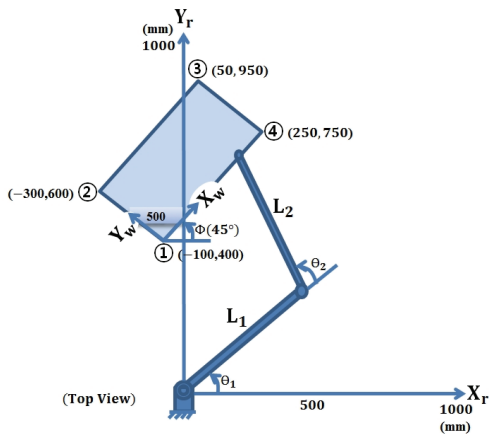


Fig. 4 Identification simulation of robotic workplace

작업장 보정 방법의 유용성을 제시하고자 한다.

이를 위해 그림 4와 같이 직관적 이해와 로봇 작업장 인식 simulation이 용이한 이상적인 2자유도 평면로봇(기준계: X_r, Y_r)과 이상적인 직사각형 평면 공작물(기준계: X_w, Y_w)로 구성된 2D 로봇 작업장을 구축하였다.

표 2는, 동일한 로봇 링크길이 오차($\Delta L_1:5; \Delta L_2:5$)와 동일한 관절변수 offset($\Delta\theta_1:-2; \Delta\theta_2:+2$)을 부여한 경우에 대해, 주어진 공작물의 치수 정보를 이용하여 로봇 작업장 인식 방법에 따라 10회 반복계산 (그림 3 하부 그림의 경로⑤)으로 구한 로봇 기구정수 인식 결과이다. 표 2에서, 링크길이 오차 및 관절변수 offset 값 인식 결과는 로봇작업장내 공작물 위치 및 자세에 무관함을 알 수 있다.

제안한 방법을 상기 simulation대신 실제 현장에 적용하는 경우, 로봇 작업장 인식은 크게 2단계로 이루어진다. 첫 단계에 기 구축된 로봇 작업장내 실제 로봇을 이용한 공작물상 목표 작업점들의 교시 정보를 이용하여 로봇 기준좌표계{R}에 대한 실제 공작물 기준좌표계{W}의 원점·위치 자세(${}^R_W T$: 4x4 균질변환 행렬) 계산한다. 제 2단계에 공작물상 목표 작업점들의 위치정보(계{W} 기준)와 ${}^R_W T$ 정보를 이용하여 그림 3의 방법으로 공작물 상 목표 작업점에서 상대오차를 최소로 만드는 로봇 기구정수를 인식·보정한다.

로봇 작업대상인 기 가공된 공작물 경우, 공작물 기준좌표계{W}에 대한 공작물상 목표 작업점들의 위치는 공작물 자체의 치수 및 형상오차에 의하여 일정 값의 오차를 갖게 된다. 표 3은 공작물(그림 4) 자체 가로·세로 치수 오차(표 3 제1 열)와 인식한 기구정수 오차의 관계를 보인다. 제시된 로봇과 공작물 경우, 로봇 기구정수 인식 정확도는 공작물 치수 오차(로봇 측정기 자체의 측정오차에 대응)에 거의 비례함을 알 수 있다. 공작기계에서 정밀 가공된 공작물 경우, 가공 정도가 통상 산업용 로봇의 반복위치정도(repeatability:

Table 2 Identification of link parameters

	Nominal kinematic parameter				Identified kinematic parameter			
	L_1	L_2	$\Delta\theta_1$	$\Delta\theta_2$	L_1	L_2	$\Delta\theta_1$	$\Delta\theta_2$
A	500	500	0	0	505	495	-2	2
B	500	500	0	0	505	495	-2	2

(A: Original position and orientation of work-piece;
B: Arbitrary 2nd position and orientation of work-piece;
Length unit: mm; Angle unit: °)

1/100mm 수준) 이상이기때문에, 본 논문에서 제안한 방법으로 구한 로봇 기구정수 인식 정확도는 공작물 자체의 치수 정확도 보다는 교시작업자의 목적 교시 정확도(약 1/10 mm 수준)에 더 큰 영향을 받게 된다.

본 논문에서 제안한 로봇작업장보정 방법 경우, 공작물상 직접 교시된 목표 작업점에서의 상대오차정확도는 교시제생 정확도와 같다. 반면 공작물상 목표 작업점(또는 주축 대표점) 교시정보로 계산한 R_{WT} 와 인식된 실제 기구정수로 구한(off-line) 로봇 선단의 공작물상 임의의 작업점(교시 작업점 이외의 점)에서의 상대오차 정확도(RMS: Root Mean Square)는 표 4와 같다. 표 4에서 공작물 치수 오차는 현실보다 비교적 큰 경우이고, 공작물 위치 및 자세 오차는 비교적 작은 경우이다.

표 4에 의하면, 직접 교시된 목표 작업점이 아닌 공작물상 임의의 목표 작업점에서의 상대오차는 로봇 반복위치 정도보다는 크지만, 표1의 기존 로봇자체 보정 방법에 비해 높은 상대위치 정확도를 얻을 수 있다.

만약 공작물 상 목표 작업점들의 직접적 교시 정보를 이용하여 비교적 정확한 R_{WT} 정보를 구할

수 있는 경우, 즉 공작물상 직접 교시점들의 위치 정확도가 높고 교시작업이 용이한 위치인 경우, 실제 현장 로봇에 다운로드 할 수 있는(로봇 작업 공정의 요구 정도에 의존) 로봇 작업프로그램의 off-line 생성작업이 가능하다.

4. 로봇 작업장 보정 실험

4.1 공작물 위치와 자세 결정

로봇기준계({R})에 대한 공작물기준계({W})의 위치·자세인 R_{WT} 는 로봇작업장에 고정된 공작물(그림 5 좌측 형상으로 실험용으로 별도 제작)상 목표 작업점(①~⑩)(그림 5 우측 평면도)의 교시정보(x, y, z값)를 이용하여 다음과 같이 결정된다.

$$R_{WT} = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & x_1 \\ u_y & v_y & w_y & y_1 \\ u_z & v_z & w_z & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- u_x : 시작점①, 끝점⑥인 벡터의 단위벡터 x성분(그림 5의 x축 방향)
- u_y : 동일 단위벡터 y성분(그림 5의 y축 방향)
- u_z : 동일 단위벡터 z성분
- v_x : 시작점①, 끝점③인 벡터의 단위벡터 x성분(그림 5의 x축 방향)
- v_y : 동일 단위벡터 y성분; v_z : 동일 단위벡터 z성분
- $w_x = u_y \cdot v_z - u_z \cdot v_y$; $w_y = u_z \cdot v_x - u_x \cdot v_z$; $w_z = u_x \cdot v_y - u_y \cdot v_x$
- x_1 : 점① 교시값의 x성분; y_1 : 동 y성분; z_1 : 동 z성분

로봇기준(기저)좌표계({R})에 대한 공작물상 각 목표 작업점 위치는 상기 R_{WT} 정보와 공작물 기준계({W})에 대한 각 작업점의 위치정보(x_k, y_k, z_k ($k=1\sim 11$)): 실험을 위해 계 {W}에 대한 정확한 위

Table 3 Effect of work-piece dimension error

	Identified errors of kinematic parameter (mm)			
	ΔL_1	ΔL_2	$\Delta \theta_1$	$\Delta \theta_2$
Width(+1.0), Length(+0.5)	5.7908	-4.3023	-1.9559	1.9472
Width(+0.5), Length(+0.25)	5.3956	-4.6514	-1.9779	1.9735
Width(+0.2), Length(+0.2)	5.2207	-4.8388	-1.9966	1.9880
Width(+0.1), Length(+0.1)	5.1107	-4.9195	-1.9983	1.9940

(Length unit: mm ; Angle unit: °)

Table 4 Relative error at working points

	Teaching and playback	Robotic Workplace calibration		Robot calibration	
		A	B	C	D
Relative error	0.01	0.2257	0.4473	1.4142	1.606

(A: Width (+0.2 mm), Length (+0.2 mm);
 B: Width (+0.5 mm), Length (+0.25 mm);
 C: Position error of work-piece (+1.0 mm, +1.0 mm);
 D: Position error of work-piece (+1.0 mm, +1.0 mm) and Orientation error of work-piece (+0.2°))

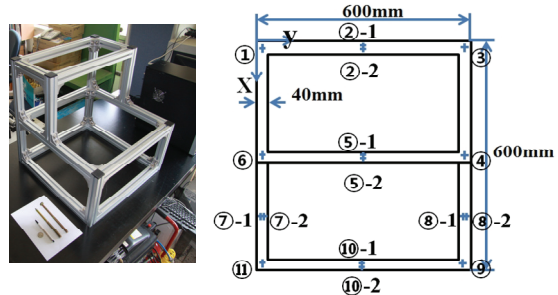


Fig. 5 Work-piece

치(pmx, pmy, pmz)는 3차원 측정기(Global152210)를 이용 기 측정) 활용하여 다음과 같이 계산한다.

$$pmx = ({}^R_W T \cdot P_k)(1,1); pmy = ({}^R_W T \cdot P_k)(2,1); pmz = ({}^R_W T \cdot P_k)(3,1) \text{ (단, } P_k = [x_k, y_k, z_k]^T \text{)}$$

4.2 중량물 로봇의 순기구학 모델링

제한한 로봇작업장보정 방법을 검증하기 위해 활용한 로봇의 주요 치수는 그림 6(a)(이엠코리아 (주) 개발) 와 같다. 그림 5 공작물 상 각 목표 작업점(①~⑪)을 직접 교시하기 위해 로봇 선단 원형 플랜지에 그림 6(b)(그림 속 위 2번째 봉)와 같은 실험용으로 제작한 뾰족한 봉을 부착하였다.

뾰족한 봉 끝에 부착한 공구좌표계({T}) 원점의 로봇기준(기저)좌표계({R}) 에 대한 위치(px, py, pz)는 다음 같다.

$$px = {}^R_T(1,4); py = {}^R_T(2,4); pz = {}^R_T(3,4) \text{ (단, } {}^R_T = {}^R_1 T \cdot {}^1_2 T \cdot {}^2_3 T \cdot {}^3_4 T \cdot {}^4_5 T \cdot {}^5_6 T \cdot {}^6_T \text{)}$$

4.3 로봇 작업장 보정과 상대오차

공작물 각 목표 작업점(11개 중 8개 점의 정보만 이용: 13개 기구정수 인식에 충분)에서의 상대오차에 해당되는 오차함수(그림 3의 error)는 앞 절의 결과를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\text{오차함수} = (px_1 - pmx_1)^2 + (px_2 - pmx_2)^2 + (py_1 - pmy_1)^2 + (py_2 - pmy_2)^2 + (pz_7 - pmz_7)^2 + (pz_8 - pmz_8)^2$$

(px_1 : 점 ①의 교시정보(엔코더 값)을 이용한 로봇 순기구학 계산값 x성분; pmx_1 : 점 ①의 공작물상 계산값 x성분)

그림 3 경로 ⑤의 반복계산(MATLAB Optimization Tool)에 의해 위 오차함수를 최소화하는 로봇 기구정수를 구한 후 공칭기구정수를 보정하였다. 보정된 기구정수에 의해 다음 표 5와 같이 공작물 상 목표 작업점에서의 상대오차(RMS)가 개선되었다. 표 5의 경우 1은(case 1: 넓은 전체 작업점 정보 이용) 8개 목표 작업점(①, ③, ④, ⑥, ⑦-1, ⑧-1, ⑨, ⑪) 에서의 교시 정보를 이용한 경우이고, 경우 2는(case 2: 좁은 절반의 작업점 정보 이용) 4개 목표 작업점(①, ③, ④, ⑥) 에서의 교시 정보를 이용한 경우로써, 로봇작업영역(대상 공작물 영역)이 작은 경우 상대오차도 작아짐을 알 수 있다.

5. 결론

지금까지 발표된 대부분의 로봇보정 관련 논문은 로봇 자체의 절대정도 향상을 위한 것이었다. 본 논문에서 제시한 내용은 ‘기존 교시재생 방법에서 출발한 공작물 이용 로봇작업장보정’을 통해 공작물상 목표 작업점에서의 상대오차 최소화 방법이며, 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존 방법에 비해 별도의 로봇 전용 3차원 측정기 없이 로봇작업장에 기 고정된 공작물 자체 정보를 이용하여 보정작업을 할 수 있다.
- 2) 보정작업을 위한 별도의 측정작업 없이 공작물 상 목표 작업점의 교시정보를 그대로 이용할 수 있다.
- 3) 기존 로봇자체보정 방법 경우 로봇작업장 구축 시 수반되는 로봇 및 공작물 고정 오차로 인한 공작물 상 목표 작업점에서의 큰 상대오차를 피할 수 없다. 그러나 로봇작업장보정 방법은 이러한 개별 로봇 작업장 요소들의 고정오차와 무관하게 기 구축된 로봇작업장내 공작물 상 목표 작업점에서의 상대오차를 최소화할 수 있다. 그러나 상대오차 최소화는 공작물 상 작업영역 내부에서의 국지적 최소화(local minimization) 이다.

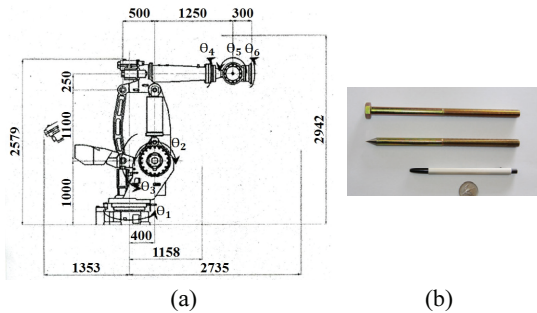


Fig. 6 Main dimension of handling robot

Table 5 Relative error at work-points

	Before robotic workplace calibration	After robotic workplace calibration: case 1	After robotic workplace calibration: case 2
RMS of error function values (mm)	220.9508	0.4737	0.2489

후 기

이 연구는 2010년도 경상대학교 연구년제 연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었습니다.

Programming System for Heavy-duty Handling Robot," Proc. of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp. 457-458, June 2008.

참고문헌

1. Kim, D. H., "Development of Technology on Analytic Design and Control for Heavy Duty Handling Robot," Ministry of Knowledge Economy, Research Report No. 70000656, pp. 106-107, July 2008.
2. Mooring, B. W., Roth, Z. S., and Driels, M. R., "Fundamentals of Manipulator Calibration," John Wiley & Sons, pp. 23-104, 1990.
3. Bernhardt R. and Albright, S. L., "Robot Calibration," Chapman & Hall, pp. 57-76, 1993.
4. Kim, J. D., Cho, Y. S., and Lee, L. W., "Virtual Space Calibration for Laser Vision Sensor Using Circular Jig," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 12, pp. 73-79, 2003.
5. Borm, J. H., "An Efficient Calibration Procedure of Arc Welding Robots for Offline Programming Application," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 131-142, 1996.
6. Newman, W. S., Birkhimer, C. E., Horning, R. J., and Wilkey, A. T., "Calibration of a Motoman P8 Robot Based on Laser Tracking," Proc. of the 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation San Francisco, CA, pp. 3597-3602, April 2000.
7. Kircanski, M., "Symbolic Singular Value Decomposition for Simple Redundant Manipulators and Its Application to Robot Control," The Int. Journal of Robotics Research, Vol. 14, No. 4, pp. 382-398, August 1995.
8. Kim, Y. H., Jeong, J. W., Kim, S. H., and Kwak, Y. K., "Relative Error Compensation of Robot Using Neural Network," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 66-72, 1999.
9. Jeong, J. H., Kuk, K. H., and Kim, D. H., "Robot Identification and Calibration by Teaching Data of a Workpiece," Proc. of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp. 609-610, June 2009.
10. Jeong, J. H., Kuk, K. H., and Kim, D. H., "Off-line