

3차원 측정 로봇셀 개발

박강, 조경래, 신현오\*, 김문상  
 한국과학기술연구원 로봇 및 유공압 연구실  
 \* 현대 자동차 (주) 생산기술 개발부

Development of 3-dimensional Measuring Robot Cell

Kang Park, Koung-Rae Cho, Hyun-Oh Shin\*, Mun-Sang Kim  
 Robotics and Fluid Power Control Lab. KIST  
 \* Hyundai Motor Co. Ltd.

ABSTRACT

Using industrial robots and sensors, we developed an in-line car body inspection system which proposes high flexibility and sufficient accuracy. Car Body Inspection(CBI) cell consists of two industrial robots, two corresponding carriages, camera vision system, a process computer with multi-tasking ability and several LDS's. As industrial robots guarantee sufficient repeatabilities, the CBI cell adopts the concept of relative measurement instead of that of absolute measurement. By comparing the actual measured data with reference data, the dimensional errors of the corresponding points can be calculated. The length of the robot arms changes according to ambient temperature and it affects the measuring accuracy. To compensate this error, a robot arm calibration process was realized. By measuring a reference jig, the differential changes of the robot arms due to temperature fluctuation can be calculated and compensated.

1. 서론

자동차 차체의 조립과정 중에 발생하는 차체의 형상 오차를 측정하기 위하여 일반적으로 열외(off-line)에서 레이아웃머신(Layout Machine)으로 측정하여 샘플링(sampling)에 의존하거나, 거대한 지그(Jig) 위에 레이저 거리 측정 센서(LDS: Laser Displacement Sensor) 등을 장착하여 생산 라인에서 직접 측정하는 방법이 이용되고 있다. 그러나 상기된 두 방법은 샘플링에 의한 데이터의 신빙성 문제, 또는 지그(Jig)에 장착한 측정 장치의 비유연성으로 인한 장비 가격의 고가와, 품종 변화에 대한 대응이 어렵다는 단점등이 지적되고 있다. 본 연구는 로봇시스템을 이용하여 측정 과정에 유연성을 부여하고 생산 라인에서 직접 측정을 수행함으

로써 전수 검사를 가능하게 하는 시스템을 구현하고 생산품의 검사과정을 개선하는데에 그 목표가 있다.

2. 시스템 구성

생산 라인에서의 측정과정은 사이클 타임(cycle time)이 중요하므로 이에 따라 로봇의 사용 대수와 측정 시스템의 결정이 선행되어야 한다. 또한 측정 데이터의 실시간 처리(real time process)를 위하여 다중처리(multi-tasking)가 되어야 한다. 본 시스템은 상기된 사항들을 고려하고 전수 검사와 전차종 검사를 수행할 수 있도록 2대의 로봇시스템을 주행축(carriage) 위에 장착하여 측정하도록 설계하였다. 고속 측정을 위하여 VISION 시스템과 LDS 센서를 이용하였고, 동시에 8개의 RS 232C port를 열 수 있는 RIC(Real-time Interface Co-processor) board(1)를 사용하여 다중처리를 구현하였다. 또한 로봇 팔 길이 보정을 위한 지그가 설치되었다. 그림 1은 전체 시스템의 구성도이다.

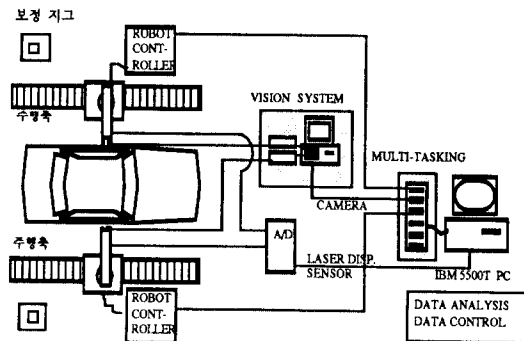


그림 1. 전체 시스템의 configuration

### 3측정 방법의 특징

#### 3.1 측정 개념

일반적으로 산업용 로봇 시스템은 기준 좌표계에 대한 절대정확도(absolute accuracy)는 떨어지지만 교시(teaching)된 지점에서의 반복정도(repeatability)는 높은 특성을 가지고 있다. 본 연구는 이러한 특성을 이용하여 CAD 데이터와 실차 사이에 표준모델(master model)을 설정하고 표준모델과 실차와의 상대오차만을 측정하므로써 궁극적으로는 CAD 데이터와 실차간의 형상 오차를 구하는 시스템을 구현하였다. 즉 표준모델을 측정하는 측정기의 절대정확도와, 로봇의 반복정확도를 이용하여 차체의 형상오차를 구하였다. 그림 2는 이러한 과정을 보여주고 있다.

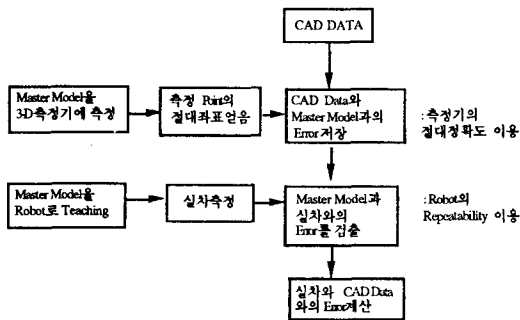


그림 2. CAD 데이터와 실차 사이의 오차 산출과정

#### 3.2 오차의 분류

오차의 종류에는 표준 모델에 대한 오차와 시스템의 측정오차가 있다. 시스템의 측정 오차에는 그림 3과 같이 센서의 오차, 로봇의 오차, 보정 오차 등이 있을 수 있다. 온도 변화에 따른 로봇의 측정 오차가 크므로 온도 변화에 따른 로봇의 팔길이 변화에 대한 보정이 필요함을 알 수 있다.

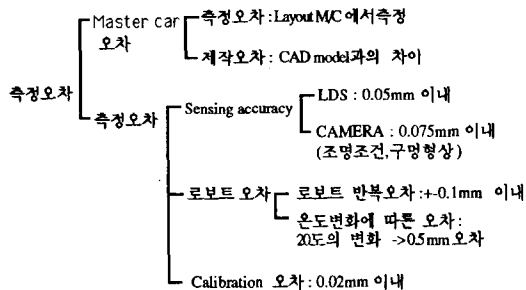


그림 3. 오차의 분류

### 3.3 측정 방법

Cycle time 내의 측정을 위하여 1000 여개의 point 들은 그룹(group)으로 나누고 최대 12point를 한 그룹으로 정하여 그룹별로 측정이 수행되도록 하였다.

VISION 시스템은 2차원(x,y) 측정을 LDS는 1차원(z) 측정을 수행할 때 이용되며, 3차원의 측정은 그림 4와 같이 LDS와 VISION 시스템을 조합함으로써 수행된다.

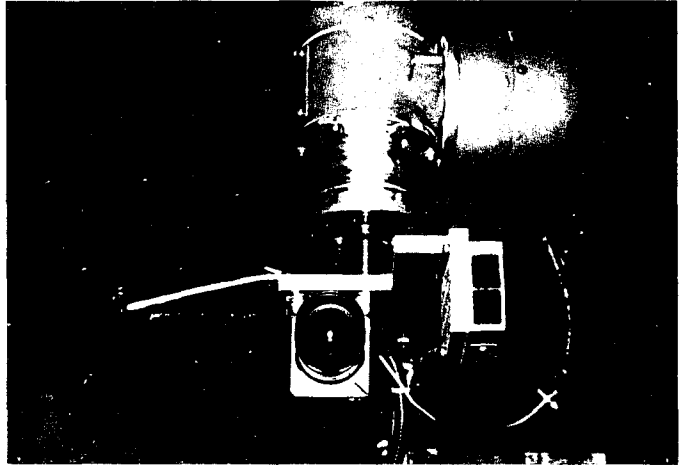


그림 4. 센서 시스템

### 4. 소프트웨어의 구성

시스템 초기화 모듈, 업로드(upload) 모듈, Teach-in 모듈, 측정 모듈, 보정 모듈, 데이터 분석 모듈로 나누어 질 수 있다. 시스템에는 17개의 화일을 가지며 각 모듈은 그림 5와 같은 흐름을 가지고 유기적으로 실행하게 된다. 데이터의 구별이 용이하도록 기본적으로 셀별, 차종별, 그룹별로 화일 이름을 결정한다. 그림 6은 시스템의 메뉴화면을 보여주고 있다.

#### 4.1 시스템 초기화 모듈

시스템을 시작하기 전에 반드시 수행해야 한다. 측정할 차종에 대한 정보, 측정할 부분에 대한 정보와 해당하는 로봇 프로그램에 대한 정보 등을 화일 형태로 저장되어진다.

#### 4.2 업로드(Upload) 모듈

각 로봇 프로그램에 대한 조인트(joint) 정보를 얻는다.

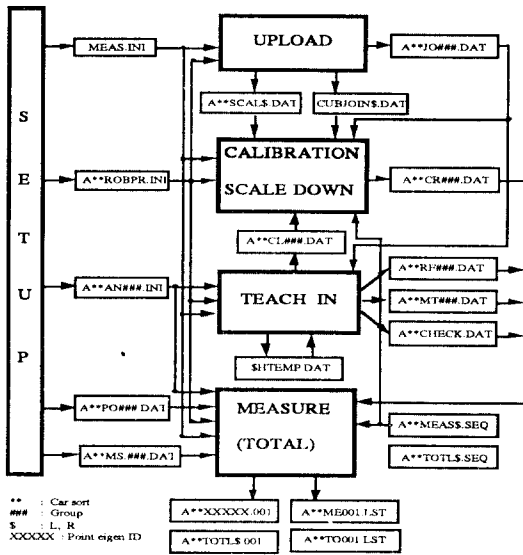


그림 5.시스템의 화일 IO

INITIALIZE	DISPLAY	CALIBRATION	TEACH IN	MEASURE	TOTAL MEASURE	QUIT
MEAS INI	MEAS INI		Upload	Make LH Seq File	Make LH Seq File	
A**AN###.INI	A**AN###.INI		Execute	Make RH Seq File	Make RH Seq File	
A**ROBPR.INI	A**ROBPR.INI			Execute		
A**MT###.DAT	A**MT###.DAT					
A**PO###.DAT	A**PO###.DAT					
	A**MEAS.SEQ					
	A**TOTL.SEQ					

그림 6.시스템의 메뉴

### 4.3 Teach-in 모듈

열외에서 그룹별로 표준 모델에 대한 참조 데이터(reference data)를 얻는 동시에 보정 지그에 대한 참조 데이터를 얻는다. 참조 데이터는 실차와의 상대오차를 구하기 위한 기준 데이터가 된다.

### 4.4 보정 모듈

로봇 팔 길이 변화에 따른 측정 에러를 보정하는 데이터를 각 point 별로 생성한다. 이 모듈은 측정을 수행하는 도중에 자동으로 할 수도 있다.

### 4.5 측정 모듈

먼저 측정 순서가 결정되어야 하며 생산 라인에서 측정을 수행하여 CAD 데이터와 실차와의 형상 에러를 산출하는 시스템의 주모듈이다. 산출된 데이터는 point 별로 화일에 저장된다. 점심 시간이나 휴일에 원하는 전 point 측정도 가능하다.

### 4.6 측정 데이터의 분석 모듈

측정된 데이터 화일들을 이용하여 측정 point 별 그룹별로 분포도, 표준편차 등으로 데이터의 분석이 가능하며 데이터쉬트를 만든다.

## 5. 온도 변화에 따른 로봇 팔 길이의 보정

### 5.1 개요

셀 주변의 온도 변화에 따른 로봇 팔 길이가 변화는 측정 에러를 유발시킨다. 따라서 주위의 온도 변화에 관계없이 정확한 측정을 수행하기 위해서는 팔길이 변화량을 계산하여 측정 에러에 보정하여 주는 과정이 필요하다. (2) 본 알고리즘(algorithm)은 먼저 Teach-In 단계에 측정된 보정용 지그의 참조 데이터와 온도 변화가 있는 후에 측정된 지그 측정 데이터를 비교하여 팔길이 변화량을 산출한다.

이 때 팔길이 변화량 데이터는 로봇 팔의 값의 변화와 팔의 뒤틀림과는 무관하다고 가정한다. 그러므로 지그 측정 에러 데이터는 각 팔의 길이 방향으로의 팔길이 변화량만의 함수이다. 지그 측정 에러 데이터와 팔길이 변화량과의 관계식은 자코비안(Jacobian)과 최소자승법(Least square method)를 이용하여 선형 방정식으로 만들어진다. 이 방정식에서 계산된 팔길이 변화량을 이용하여 차체의 각 측정 point 마다의 로봇 forward kinematic을 계산하면 팔길이 변화량 때문에 발생한 각 측정 point의 측정 에러를 구할 수가 있다. 시스템은 이 에러를 각 측정 point 마다 보정함으로써 팔길이 변화가 배제된 정확한 측정값을 얻고자 한다. 보정용 지그는 그림 7과 같이 직육면체 2개를 겹쳐 놓은 듯한 형상을 하고 있으며 그 표면에 부착된 검은 원의 중심점을 측정함으로써 팔길이 변화량을 구한다. 이 때 로봇트는 최대한 다양한 자세로 원을 측정해야 한다.

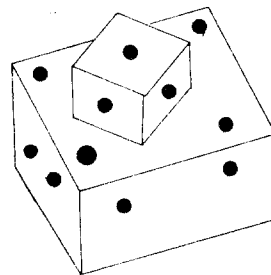


그림 7. 보정용 지그

### 5.2 보정데이터의 생성

### 1) 자코비안의 정의

본 연구에서는 로봇트의 팔 길이가 변화량이  $\Delta l$  끝의  $x, y, z$  좌표에 어떠한 영향을 미치는지를 나타내는 자코비안을 정의한다. 즉  $\Delta l$  끝의 좌표  $X(x, y, z)$ 가 팔 길이  $(l_1, l_2, \dots, l_8)$ 들만의 함수일 때

$$\Delta X = f(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, l_8)$$

$$\Delta X = \frac{\partial f}{\partial l_1} \Delta l_1 + \frac{\partial f}{\partial l_2} \Delta l_2 + \frac{\partial f}{\partial l_3} \Delta l_3 + \frac{\partial f}{\partial l_4} \Delta l_4 + \frac{\partial f}{\partial l_5} \Delta l_5 + \frac{\partial f}{\partial l_6} \Delta l_6 + \frac{\partial f}{\partial l_7} \Delta l_7 + \frac{\partial f}{\partial l_8} \Delta l_8 \quad (1)$$

가 되어, 자코비안 매트릭스는

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial l_1} & \frac{\partial x}{\partial l_2} & \frac{\partial x}{\partial l_3} & \frac{\partial x}{\partial l_4} & \frac{\partial x}{\partial l_5} & \frac{\partial x}{\partial l_6} & \frac{\partial x}{\partial l_7} & \frac{\partial x}{\partial l_8} \\ \frac{\partial y}{\partial l_1} & \frac{\partial y}{\partial l_2} & \frac{\partial y}{\partial l_3} & \frac{\partial y}{\partial l_4} & \frac{\partial y}{\partial l_5} & \frac{\partial y}{\partial l_6} & \frac{\partial y}{\partial l_7} & \frac{\partial y}{\partial l_8} \\ \frac{\partial z}{\partial l_1} & \frac{\partial z}{\partial l_2} & \frac{\partial z}{\partial l_3} & \frac{\partial z}{\partial l_4} & \frac{\partial z}{\partial l_5} & \frac{\partial z}{\partial l_6} & \frac{\partial z}{\partial l_7} & \frac{\partial z}{\partial l_8} \end{bmatrix} \quad (2)$$

로 정의되어지며 (1)식은 다음과같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} \sum \frac{\partial x}{\partial l_i} \cdot \Delta l_i \\ \sum \frac{\partial y}{\partial l_i} \cdot \Delta l_i \\ \sum \frac{\partial z}{\partial l_i} \cdot \Delta l_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \vdots \\ \Delta l_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Jacobian} \\ 3 \times 8 \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 2) 팔 길이가 변화량의 계산

지그 상의 point가 15개 이므로 (3)식은 (4)식으로 바뀌고 최소자승법으로 팔 길이가 변화량을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_{15} \\ \Delta y_{15} \\ \Delta z_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 45 \times 8 \\ J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \\ \vdots \\ \Delta l_7 \\ \Delta l_8 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$J^T \Delta X = J^T J \Delta l$$

$$\therefore \Delta l = [J^T J]^{-1} J^T \Delta X$$

### 5.3 보정 결과

그림 8은 실제 보정의 결과를 보여주고 있다. 실험 당시의 온도 변화는 약 0.1mm 정도의 오차를 유발하고 있는데 50번의 측정이 이루어진 후 보정이 수행된 결과이다. 그래프에서 알 수 있는 바와 같이 약  $\pm 0.05$ mm 이내로 보정 이후 에러가 감소하였다. 여러번의 실험을 거친 결과 순수한 온도 변화에 따른 측정 오차를 약  $\pm 0.05$ mm 이내로 보정이 가능하며, 잔류오차는 보정을 위한 지그 측정시 측정오차 그리고 측정 point의 다양성에서 야기되는 오차로 사료된다. 좀더 정확한 보정이 이루어지기 위해서는 보정용 지그의 재질을 온도 변화에 둔감한 재료로 가공하여야 하며 지그의 설치에 있어 세심한 주의가 요구된다. Teach-in 당시의 온도와 새로이 보정을 수행할 때의 온도차가 클수록 보정 정확도에 영향을 끼치나 무시할 수 있다. 일교차가 심한 경우 정기적인 보정이 필요하고 계절 변화에 따른 평균 온도가 심하게 변하는 경우 표준 모델의 재설치를 통한 새로운 Teach-in 이 유리하다.

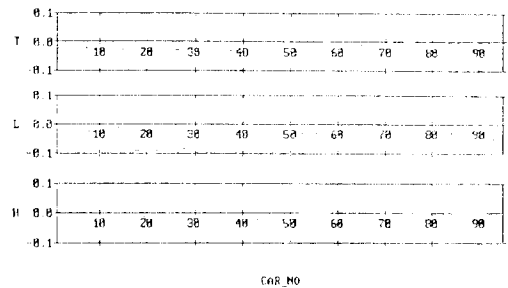


그림 8. 실제 보정의 결과

### 6 결론

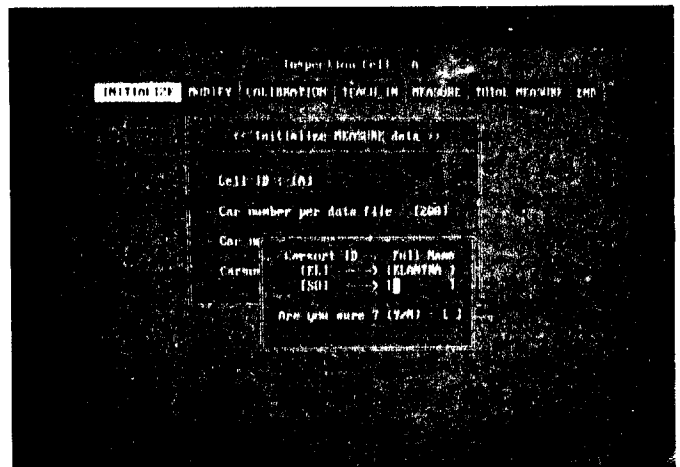


그림 9. 시스템 초기화 데이터의 입력 화면

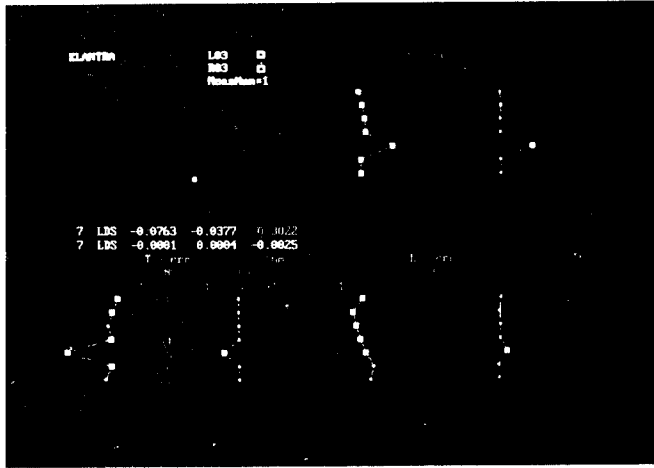


그림 10. 감시(monitoring) 화면

로봇 시스템을 이용하여 생산라인에서의 3차원 측정 시스템을 개발하였다. 그림 9는 시스템 초기화 단계에서의 데이터 입력과정이며 그림 10은 측정과정에서의 감시(monitoring) 화면이다. 그림 11은 데이터 분석 화면을 보여준다.

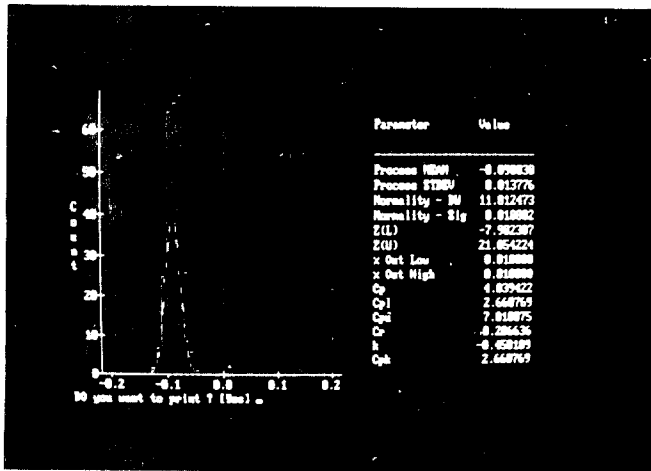


그림 11. 데이터 분석 화면

구축된 시스템은 생산 라인상에서의 측정을 통한 불량률의 획기적인 감소, 도어(door) 측정 라인 등과의 데이터 통신을 통한 실시간적인 에러 보정, 측정 데이터의 저장 및 분석을 통한 측정 라인 상의 로봇 프로그램 및 지그의 수정, 금형 수정을 위한 기본 데이터의 제시가 가능하다. 또한 온도 변화에 의한 로봇 팔길이 변화의 보정 모듈이 개발되었기 때문에 다른 조립라인으로의 적용이 가능하다.

시스템의 소프트웨어는 C 언어로 프로그래밍 되었으며 분석용으로는 시스템의 확장을 고려하여 RS/1 패키지(package)를 이용하였다.

## 7.참고 문헌

- (1) "Introduction to Industrial Computer & ARTIC", 한국아이비엠 주식회사
- (2) 김 문상 "Off-line programming system 을 위한 로봇트 운동계의 calibration", KACC, pp.511-517, 1988
- (3) "RS/1 users guide", BBN software products corporation, 1990