

특정점 측정에 근거한 도어 장착 로봇의 위치 보정 시스템 개발: Part I-보정 알고리즘

김미경*, 강희준**, 김상명***

Development of Position Correction System of Door Mounting Robot Based on Point Measure: Part I - Algorithm

Mi Kyung Kim*, Hee Jun Kang**, Sang Myung Kim***

ABSTRACT

This work deals with finding a suitable position correction algorithm of industrial robot based on measuring particular points, which calculates two dimensional correction quantities and then must allow visually acceptable door-chassis assembly task. Three optimizing algorithms corresponding to three different error based performance indices are compared and selected to the best one, in terms of the predefined total uniformity, line uniformity and computational time. The selected algorithm(Total Error Minimization) is implemented for a simple door-chassis model to show its effectiveness.

Key Words : Position Correction(위치보정), Total Uniformity(전체 편평도), Line Uniformity(선 편평도), Total Error Minimization(전체 오차 최소화 방법), Relative Error Minimization(상대 오차 최소화방법), Error Variance Minimization(오차 분산 최소화 방법)

1. 서론

범용 산업용 로봇을 조립 작업에 이용하고자 할 경우에는 로봇에 의한 위치 오차 및 손목기구의 유격과 부품의 가공오차 등으로 인하여 조립 작업이 순조롭게 진행되기 어렵다. 이와 같은 문제를 극복하기 위하여, 로봇을 이용한 조립 작업에 관한 연구는 크게 다음의 3가지로 나눌 수 있다. 그것들은 RCC와 같은 유연 손목기구를 이용하

여 조립시 발생하는 조립 반력에 의하여 결합 부품간의 위치 오차를 보정하는 수동 조립법, 각종 센서에 의한 정보를 알고리즘에 제공하여 위치오차를 인식 보정하는 능동 조립법, 그리고 이들 두 방법을 결합한 능수동 조립법 등이다.^(1,2)

현재, 국내 자동차 생산 공장의 차체 조립 라인에서 사용중인 도어 장착 자동화 시스템은 도어 조작 로봇과 볼트 체결 로봇에 수동 콤포라이언스 기구를 장착하여 위치

* 울산 대학교 컴퓨터 공학과 대학원
 ** 울산 대학교 제어 계측 공학과
 *** 현대 자동차 생산 기술 개발부

오차를 보정하는 수동 조립법을 사용하고 있는데, 작업이 진행되는 중 볼트 체결 작업이 불가능하거나 볼트 체결 작업이 순조롭더라도 도어의 개폐가 매끄럽지 않는 등의 작업 불량이가 발생하고 있으며, 정상적으로 자동 장착 공정이 수행되더라도 차체의 조립 정밀도가 일정치 않게 되어, 차후 공정에서 제품 정도를 조정하는 수작업 공정이 부가되는 등의 문제점을 가지고 있다. 이와같은 문제점들의 발생 원인을 한마디로 말하면, 일련의 차체 조립 라인에서 불가피하게 발생하는 제품의 정도 오차를 보정하는 기능을 현 산업용 로봇 시스템에 부여하지 않았기 때문이다. 따라서, 본 연구의 목표는 능동적으로 오차 보정을 수행할 수 있는 산업용 로봇 시스템을 구축하는데 필요한 알고리즘을 개발하는 것이다.

개발 시스템이 보정해야 하는 오차로는 여러가지 패널로 구성되는 중심 차체의 용접시 작용하는 열에 의한 비틀림 및 조립 오차 등에 의한 차체 변형과 안쪽 패널과 바깥쪽 패널로 구성되는 도어를 상자 모양으로 점용접할 때 발생하는 도어 변형에 의한 정도 오차와 각 차체를 실은 지그(jig)가 도어 장착을 위해 정지했을 때 발생하는 정지 오차가 있다. 이러한 오차들을 모두 고려하여 시각적으로 만족할 만한 도어-차체 장착 공정(Door-Chassis Assembly Task)을 수행할 수 있는 로봇 시스템을 개발하기 위하여, 우선적으로 고려 사항은 어떤 오차량을 측정하느냐이다. 이 작업의 최종교시점(Teaching Point)에서 도어의 특징점들에 대한 도어와 차체 사이의 틈새를 측정하는 방법을 우선적으로 고려할 수 있으나, 이 경우 각 도어의 특징점에 일치하는 차체의 일치점을 찾을 수가 없을 뿐만 아니라, 단순히 전해진 방향으로의 1차원 정보만을 얻게 되어 많은 측정점을 요구하게 된다, 그 대안으로 고려할 수 있는 방법은 차체 Aperture 부분의 특징점을 조립작업이 수행되기 전에 측정함으로써, 기존의 교시점에서의 특징점과의 차이로 2차원 또는 3차원 오차 정보를 얻는 방법이다. 이 방법은 차체 Aperture의 특징점을 찾을 수 있고, 도어의 변형 오차가 전체 오차에서 차지하는 비중이 아주 작다는 점에서 타당성을 갖는다. 고려된 차체에서의 특징점은 차체 프레스 제작시 만들어진 여러개의 노치 및 볼트 구멍으로 선정된다. 그 특징점들의 인식은 Part II 논문에서 다루어진다. 이와 같이 자동차 조립 라인에서 측정 대상 및 측정 오차량에 따라 산업용 로봇의 오차 보정 알고리즘이 달라지게 되는데 이에 관련된 내용은 관련 참고 문헌⁽³⁻⁵⁾에 제시된다.

본 연구에서는 후자에 해당되는 2차원 오차 정보에 근거

하여 3가지 성능지수를 선정함으로써 얻어지는 위치 보정 알고리즘을 소개한다. 그것들은 전체 오차 최소화 방법, 상대 오차 최소화 방법 그리고 오차 분산 최소화 방법 등이다. 시각적으로 보기 좋은 결합을 정량화하기 위하여 전체 편평도와 선 편평도를 정의하고, 그에 따라 위 3가지 보정 알고리즘들을 평가하여 최종적으로 가장 적합한 방법으로 전체 오차 최소화 방법을 선정하였다. 선정된 전체 오차 최소화 방법을 주어진 오차량 조건하에서 현대 7602AP 로봇과 고무인으로 만든 축소 도어-차체 모델에 대하여 Implementation을 수행함으로써 개발 알고리즘의 효율성을 입증한다.

2. 최적 위치 보정 알고리즘

개발하고자 하는 알고리즘은 도어의 힌지 구멍과 차체의 너트 구멍 사이의 구속식을 만족하면서, 도어와 차체의 결합이 시각적으로 보기 좋아야 한다는 데 있다. 따라서, 시각적으로 보기좋은 결합을 나타낼 수 있는 정량화된 성능 지수가 필요하고, 이 성능 지수들이 2차원 보정을 수행한 후의 변환 오차로 표현된다면 바로 이 성능지수를 최적화함으로써 문제를 해결할 수 있다. 그러나 시각적으로 보기 좋은 결합을 변환 오차의 함수로 표현하는데에는 한계가 있어, 본문에서는 시각적으로 보기 좋은 결합을 위한 성능 지수를 정의하고, 앞으로 소개될 개발 알고리즘의 평가 척도로서 사용하고자 한다. 개발 알고리즘의 최적화 성능 지수들은 변환 오차의 함수로 표현 된다.

2.1 개발 알고리즘의 평가 척도

'최적'의 위치 보정을 수행하는 알고리즘 개발에서의 '최적'의 함축적 의미는 시각적으로 보기 좋은 결합을 나타내며, 그에 따른 성능 지수로서 전체 편평도와 선 편평도를 다음과 같이 정의한다.

• 전체 편평도(Total Uniformity): 도어와 차체 사이의 전체적인 오차 분포가 균일하면서 시각적으로 보기 좋을 것이므로, 보정후 발생하는 오차(newe)가 가장 큰 것 ($newe_{max}$)에서 가장 작은 것 ($newe_{min}$)을 뺀 양의 역수를 적용 알고리즘의 전체 편평도라 정의하고, 개발 알고리즘들 사이의 성능 비교를 한다. 비교 방법은 전체 편평도가 클수록 좋은 알고리즘이다.

$$Total\ Uniformity = \frac{1}{newe_{max} - newe_{min}} \quad (1)$$

• 선 편평도(Line Uniformity): 위에서 정의된 전체 편평도가 비록 크더라도, 도어와 차체 사이의 틈새의 정도가 균일하지 않으면 시각적으로 보기 싫어 제품의 질이 낮아지므로 이를 보완하기 위하여 선 편평도를 다음과 같이 정의한다. 선 편평도는 각 변의 기울기 차이 ($dif_{-\theta_k}, k=1..n$)를 제곱한 후 더해서 평균한 것의 역수로 선 편평도가 클수록 좋은 알고리즘이다.

$$Lin Uniformity = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (dif_{-\theta_k})^2} \quad (2)$$

위 두개의 지수를 고려할 때, 시각적으로 보기 좋은 결합을 위해서는 선 편평도가 전체 편평도보다 중요한 성능 지수이므로, 전체 편평도가 비록 작아지더라도 선 편평도가 크면 더 바람직한 알고리즘으로 고려한다.

2.2 보정에 따른 오차 변환

도어가 차체에 장착되면 도어와 차체 사이에는 틈새가 존재하지만, 도어와 차체의 변형의 정도가 같다면, 보정 후 도어와 차체는 정확히 일치한다고 가정해도 문제의 본질에는 변함이 없다. 따라서, 기본 차체의 특징점을 이와 일치하는 기본 도어 위의 점으로 달리 표현할 수 있으며, 이 점을 도어의 측정 위치점이라 하고, 정지 오차와 변형 오차를 포함하는 변형 차체의 특징점을 차체의 변형 위치점이라 한다. Fig. 1은 변형 차체에 기본 도어를 보정하지 않고 정착한 모습으로 기준 좌표계에 대한 n개의 도어 측정 위치점 $P_k(Px_k, Py_k, Pz_k)$ 과 차체의 변형 위치점 $Q_k(Qx_k, Qy_k, Qz_k)$ 및 변형 오차 $e_k(ex_k, ey_k, ez_k)$ 를 나타낸다(여기서, $k=1..n$). 도어 내부의 점 $O_k(Ox_k, Oy_k, Oz_k)$ 는 산업용 로봇의 말달점이며, 보정 시스템의 회전중심이다. 도어 측정 위치점과 차체의 변형 위치점 및 변형 오차에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} Qx_k \\ Qy_k \\ Qz_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Px_k \\ Py_k \\ Pz_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ex_k \\ ey_k \\ ez_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$e_k = ex_k^2 + ey_k^2 + ez_k^2$$

도어의 x, y, z 만큼 전이(Translation), 회전중심 O에 대해 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 만큼 회전(Rotation)하면 다음과 같은 변환 관계식⁶⁾이 성립되고,

$$\begin{bmatrix} newPx_k \\ newPy_k \\ newPz_k \end{bmatrix} = R_{ppy}(\theta_x, \theta_y, \theta_z) \begin{bmatrix} Px_k \\ Py_k \\ Pz_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,

$$R_{ppy}(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = \begin{bmatrix} \cos\theta_x & -\sin\theta_x & 0 \\ \sin\theta_x & \cos\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & \cos\theta_y & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_z & -\sin\theta_z \\ 0 & \sin\theta_z & \cos\theta_z \end{bmatrix}$$

이와 같은 보정에 따른 보정 오차는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} newex_k \\ newey_k \\ newez_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Qx_k \\ Qy_k \\ Qz_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} newPx_k \\ newPy_k \\ newPz_k \end{bmatrix}$$

$$newe_k = newex_k^2 + newey_k^2 + newez_k^2 \quad (5)$$

일반적으로, 도어와 차체의 이상적인 결합을 위해서는, 식 (3)-(5)에 설명된대로 도어 장착 로봇의 3차원 위치 보정이 바람직하다. 그러나, 3차원 오차 측정 비용의 증가에 따른 보정 효과가 충분하다고는 볼 수 없다. 현실적 대안으로 실제 사용되는 도어 장착 로봇은 불가피한 조립 공차를 극복하기 위하여 콤포라이언스 기구가 장착되므로 차체의 폭 방향 오차는 그것을 통해 보정이 가능하다. 따라서, 본 논문에서는 도어의 2차원 보정(x, y 그리고 θ_z)를 전제로 하여 소개하고자 한다.

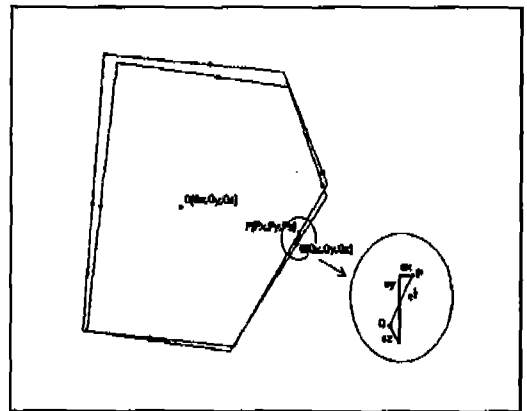


Fig. 1 측정 위치점과 변형 위치점

2.3 성능지수

개발 알고리즘의 성능 지수는 절 2.2에서 제시된 2차원 보정에 따른 변환 오차의 함수로 구성되고, 그것을 최소

화하여 알고리즘의 평가 척도인 전체 편평도와 선 편평도를 증가시키고자 고려된다. 다음의 3가지 최소화 방법들을 고려하여, 최적 성능 지수를 선정하고자 한다.

• 전체 오차 최소화 방법(Total Error Minimization): 일반적으로 전체량을 최대화시키거나 최소화시킬 경우 구성 요소값들이 균일해지는 경향이 있으므로 식 (5)의 변환 오차 $newe_k$ 의 합으로 표현되는 전체 오차량을 최적 성능 지수로 삼는다. 2차원 보정 변수 x, y 그리고 θ 의 함수로 표현되는 최적 성능 지수 $f(x, y, \theta)$ 는 다음과 같다.

$$f(x, y, \theta) = \sum_{k=1}^n newe_k \quad (6)$$

• 오차 분산 최소화 방법(Error Variance Minimization): 각 변환 오차값들의 차이를 가능한 한 줄이기 위하여 각 변환 오차값들의 분산을 최적 성능 지수로 둔다. 이 경우, 분산값은 개발 알고리즘의 평가 척도인 전체 편평도로 대치될 수도 있겠으나, 시각적으로 보기 좋은 결합을 나타내는데에는 위에서 정의된 전체 편평도가 바람직하다고 생각해 이것을 개발알고리즘의 한 방법으로 고려한다. 전체 편평도보다는 선 편평도가 보다 중요한 평가 척도이므로 특별한 검증없이 이같은 고려가 가능하리라 생각된다.

$$f(x, y, \theta) = \frac{\sum_{k=1}^n (newe_k)^2}{n} - \left(\frac{\sum_{k=1}^n newe_k}{n} \right)^2 \quad (7)$$

• 상대 오차 최소화 방법(Relative Error Minimization): 전체 편평도의 정의에 따라 보정후에 발생하는 각 오차값들의 차이를 가능한 한 줄인다면 전체 편평도는 증가한다. 이와 같은 고려를 최적 성능 지수에 직접 포함시키기 위하여 n개의 변환 오차들이 같다고 가정하면, 다음의 n-1개의 식을 얻을 수 있다.

$$newe_1 = newe_2 = \dots = newe_n \quad (8)$$

일반적으로 보정해야 할 변수의 수보다 측정 위치의 수에 의한 상대 오차 방정식의 수가 더 많기 때문에 위의 식을 만족하는 해는 존재하지 않지만, 가능한 한 근접하게 위의 식을 만족하도록 이 상대 오차들의 합을 최적화 성능 지수로 삼는다.

$$f(x, y, \theta) = \sum_{k=1}^{n-1} (newe_k - newe_n)^2 \quad (9)$$

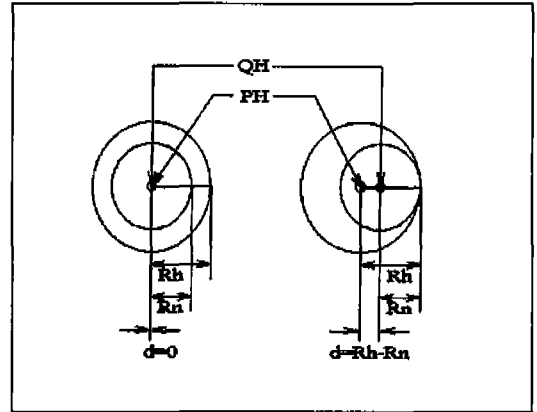


Fig. 2 힌지 구멍과 너트 구멍 사이의 공차

2.4 힌지 구멍과 너트 구멍의 고려

전체 편평도, 선 편평도와 더불어 알고리즘에서 고려해야 하는 또 하나의 문제는 다수의 도어의 힌지 구멍들과 차체의 너트 구멍들을 한계 공차 내에서 일치시키는 문제인데, 이것은 각 구멍의 중심 사이의 거리와 각 구멍의 반지름 사이의 관계식을 고려함으로써 해결할 수 있다. 도어의 힌지 구멍의 반지름이 차체의 너트 구멍의 반지름보다 큰 점을 이용하여 두 구멍의 중심이 정확하게 일치하지 않더라도, 차체의 너트 구멍이 도어의 힌지 구멍의 내부에 위치하여 볼트 체결이 가능하게 한다.

Fig.2에 보여진대로 m개의 도어의 힌지 구멍과 차체의 너트 구멍이 있을때, 도어의 힌지 구멍의 중심을 $PH_j(phx_j, phy_j)$, 변형된 차체의 너트 구멍의 중심을 $QH_j(qhx_j, qhy_j)$ 라한다(여기서 $j = 1..m$). 위치 보정 로봇 시스템의 도어 조작에 의하여, x,y만큼의 전이와 회전 중심 O에 대한 θ 만큼의 회전으로 위치 보정하면, m개의 도어의 힌지 구멍의 중심은 다음과 같이 PH_j 에서 $newPH_j(newphx_j, newphy_j)$ 가 된다.

$$\begin{bmatrix} newphx_j \\ newphy_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} phx_j \\ phy_j \end{bmatrix} \quad (10)$$

이때의 변형된 차체의 너트 구멍의 중심 QH_j 와 오차 보정후의 도어의 힌지 구멍의 중심 $newPH_j$ 간의 거리 d_i 는 다음과 같다.

$$d_j = \sqrt{(newphx_j - qhx_j)^2 + (newphy_j - qhy_j)^2} \quad (11)$$

따라서, 두 구멍의 중심이 일치하지 않음에도 불구하고 볼트 체결이 가능한 경우는 각 구멍의 중심간의 거리가 한지구멍의 반지름(R_h)과 너트 구멍의 반지름(R_n)의 차이보다 작거나 같을 때이다. 그 관계식은 다음과 같다.

$$\sqrt{(newphx_j - qhx_j)^2 + (newphy_j - qhy_j)^2} \leq R_h - R_n \quad (12)$$

2.5 최적 성능 지수의 선정

최적 성능 지수를 선정하는 작업은 Fig. 3에 보여진 형태의 단순 도어-변형 차체 모델에 대하여 5개의 구멍에 대한 식 (12) 형태의 m부등 구속식들을 만족하면서 식 (6)-(9)에서 보여진 성능지수들을 최소화하는 NLP(NonLinear Programming)문제를 풀어 식 (1)-(2)의 평가 척도에 비추어 각 알고리즘들을 비교하는 작업으로 요약된다. NLP문제를 풀기 위하여 Penalty방법⁽⁷⁾을 사용하였는데, 고려된 성능 지수들과 구속식을 Infinite Barrier Penalty를 이용하여 비구속 비선형 Penalty 함수로 나타내고, 이에 대한 최적해를 구하기 위해서는 Davidon-Fletcher-Powell Variable Metric Method⁽⁸⁾를 이용하였다.

우선적으로, 각 성능 지수의 경향을 파악하기 위하여 구속식을 배제하고, Random Number Generator에서 만들어지는 50개의 변형 오차 세트에 대하여 3가지 성능 지수들의 최소화 작업을 행했다. 각 성능 지수의 적용 결과로서 전체 편평도와 선 편평도를 Fig.4-5에 각각 나타내었다. Fig.4에 따라 전체 편평도의 좋은 정도는 오차 분산 최소화 방법(EVM), 상대 오차 최소화 방법(REM), 전체 오차 최소화 방법(TEM)순이었다. 이 결과는 고려된 성능 지수에서 바로 예상할 수 있는데, TEM은 전체 편평도를 위한 간접적인 방법인데 반하여, EVM이나 REM은 직접적인 방법으로 이해될 수 있다.

각 성능 지수는 보다 중요한 평가 척도인 선 편평도를 직접적으로 고려하지 않으므로 선 편평도에 대한 효과를 미리 예상하기 어려우나, Fig.5의 결과에 따르면 좋은 정도는 TEM, EVM, REM순이었다. Fig. 4-5의 결과를 놓고 고려하면 전반적으로 TEM이나 EVM이 FEM에 비하여 우수함을 알 수 있다.

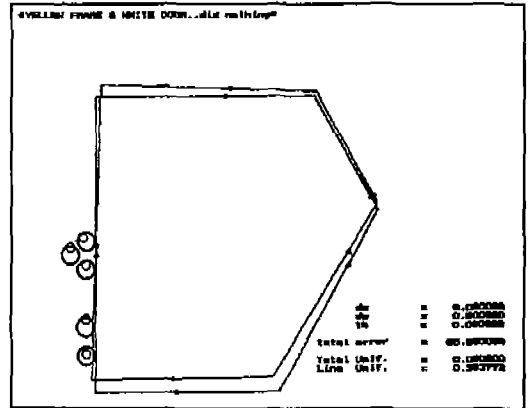


Fig. 3 조립이 되지 않은 단순 도어 차체 모델

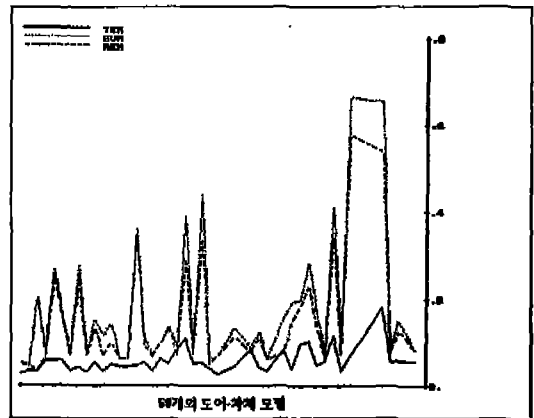


Fig. 4 전체 편평도 비교(구속식 배제)

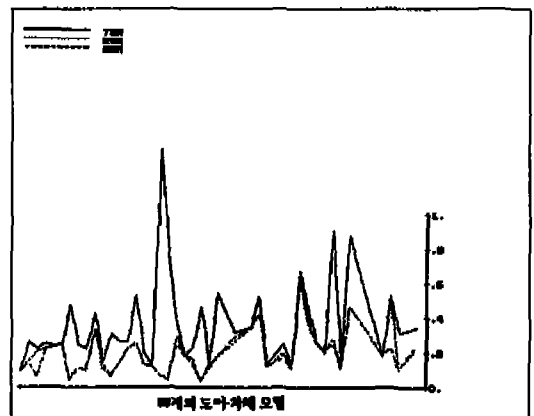


Fig. 5 선 편평도 비교(구속식 배제)

위의 결과가 구속 부등식이 있을 경우에도 유효한지를 확인하기 위하여 동일한 오차 조건에 대하여 5개의 구속 부등식을 첨가한 NLP문제를 풀었다. 그 적용 결과를 Fig. 6-7에 나타내었다.

결과에 의하면 구속식을 첨가한 경우에는 구속식을 배제한 경우와 같은 일관적인 결과는 얻기 힘들지만, 전체 편평도는 Fig. 6에 따르면 구속식을 배제한 경우와 다르게 TEM이 다른 방법과 대등하거나 더 좋음을 알 수 있고, 또 모든 경우에 EVM이 REM보다 우수함을 알 수 있다. Fig. 7에서 보여진 선 편평도에서도 Fig. 6의 결과와 유사함을 알 수 있다. 전체적인 평가로서는 TEM이 훨씬 단순하고 그에 따라 NLP문제를 해결하는 시간도 짧다(486PC, 0.11초). 계산 시간의 절감은 이와 같은 Just-In-Time 자동화 시스템의 아주 중요한 사항이므

로, 본 평가 척도의 검토 결과로서 TEM이 다른 방법에 비해 우수하다고 할 수 있어, 개발하는 산업용 로봇의 위치 보정 알고리즘으로 채택한다. 이 알고리즘의 전산 모의 실험은 차체의 변형이 아주 심한 경우와 변형이 적은 경우에 대해서 각각 Fig. 8과 9에 각각 제시되었는데, 예상대로 차체의 심한 변형에도 불구하고 구멍의 구속식을 만족하며 시각적으로 보기 좋은 결합이 이루어졌다.

3. 단순 모델에 대한 실도어 장착 실험

선정된 위치 보정 알고리즘(TEM)이 전산 모의 실험에서 얻어진 결과와 같이 산업용 로봇을 이용하여 성공적으로 위치 보정이 수행됨을 보여 주기 위하여, 현대 7602AP 산업용 로봇과 고무인으로 축소 제작된 단순 도

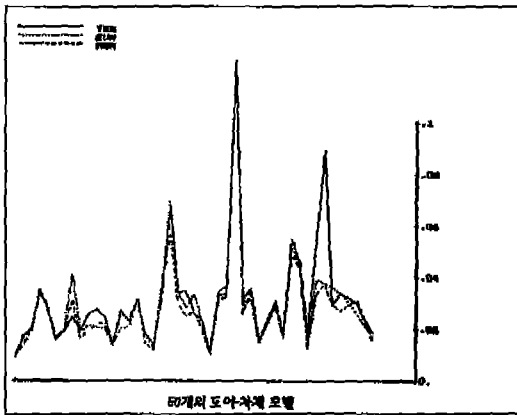


Fig. 6 전체 편평도 비교(구속식 첨가)

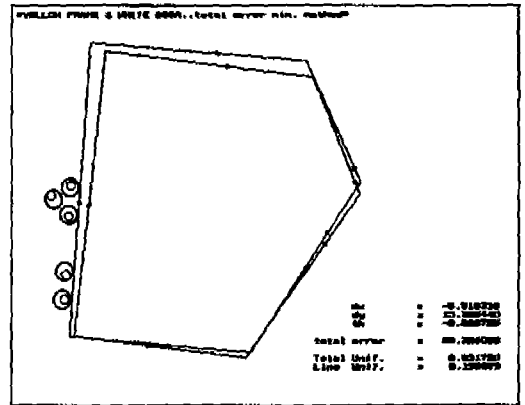


Fig. 8 모의 실험 결과(변형이 큰 경우)

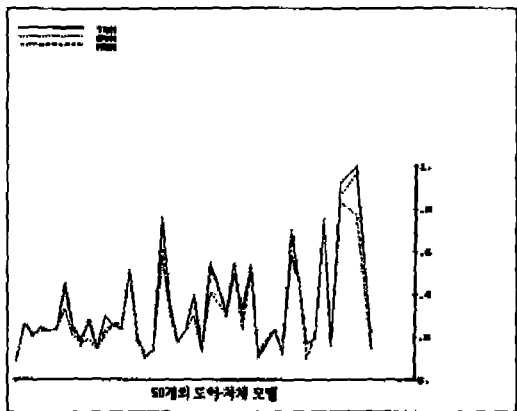


Fig. 7 선 편평도 비교(구속식 첨가)

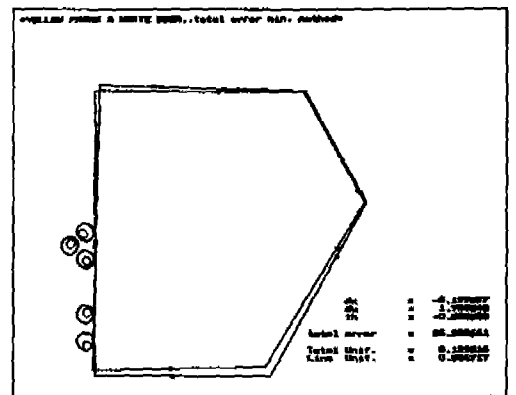


Fig. 9 모의 실험 결과(변형이 작은 경우)

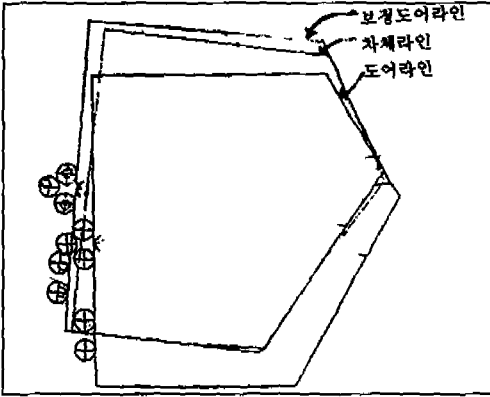


Fig. 10 실 실험 결과(변형이 큰 경우)

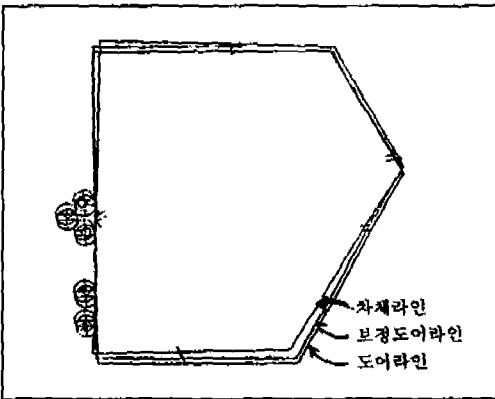


Fig. 11 실 실험 결과(변형이 작은 경우)

어 및 변형 차체 모델을 이용하여 다음과 같은 방법으로 실험을 행하였다.

- 1) 전산 모의 실험에 사용된 같은 크기의 무변형 도어 모델을 고무판에 새겨 산업용 로봇의 공구 끝단에 설치한다.
- 2) 산업용 로봇의 교시점에는 종이에 인쇄된 변형된 차체 모델을 설치한다.
- 3) 산업용 로봇의 공구의 끝단의 도어 모델에 잉크를 먹인 후 교시점에서 눌러 찍는다.
- 4) 2)의 변형된 차체 모델과 3)의 변형이 없는 도어 모델 사이의 발생한 각 측정점의 오차량 e_x, e_y 를 눈금자로 측정한다.
- 5) 개발된 위치 보정 알고리즘을 이용하여 위치 보정량 x, y, θ_z 를 계산한다.
- 6) 위치 보정량을 산업용 로봇 제어기에 전송하여 위치

보정하여 눌러 찍는다.

위의 방법으로 전산 모의 실험에서 행해진 두가지 경우에 대하여 산업용 로봇 실험을 수행하였다. Fig. 10-11은 Fig. 8-9에 상응하는 실험 결과인데, 본 알고리즘의 실제 시스템 구현성을 입증한다.

4. 결 론

자동차 도어 장착 공정에서의 작업의 불량률을 감소시키고 제품의 질을 높이고자하는 본 연구의 목적에 따라 전체 편평도 및 섀시 편평도를 개발 알고리즘의 평가 척도로 설정하고, 이를 높이기 위하여 전체 오차 최소화 방법, 오차 분산 최소화 방법 및 상대 오차 최소화 방법등의 여러 성능 지수들을 고려한 결과, 문제의 구성이 쉽고 3차원으로서의 확장이 용이하며 연산 속도와 연산 결과 또한 우수한 전체 오차 최소화 방법이 최적 성능 지수로 선정되었다. 선정된 최적 성능 지수에 힌지와 너트 구멍에 대한 구속식을 첨가하여 구속 비선형 문제로 수식화하고 Infinite Barrier Penalty를 이용하여 비구속 비선형 문제로 재구성하였다. 비구속 비선형 문제의 최적해 x, y, θ_z 를 구하기 위하여 고려된 최적화 기법으로는 최적해로의 수렴성이 좋은 Davidon-Fletcher-Powell Variable Metric Method를 선정하였다. 이때 요구되는 미분값은 Central difference에 의해 수치적으로 계산된 값을 이용하였다. 단순 도어 모델을 이용하여 전산 모의 실험을 수행하고, 고무인자로 축소 제작한 단순 도어 모델을 산업용 로봇에 적용하여, 볼트 체결이 가능하면서 전체 오차를 최소화하는 위치 보정값 x, y, θ_z 를 구하는 알고리즘의 효율성을 입증하였다.

후 기

본 연구는 현대 자동차와의 산학 협동에 의한 것으로 현대 자동차 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. H. S. Cho, H. J. Warnecke and D. G. Gweon, "Robotic Assembly: a Synthesizing Overview", robotica, Vol. 5, pp. 153-165, 1987
2. N. A. Aspragathos, "Assembly Strategies for

- Parts with a Plane of Symmetry". *Robotica*, Vol. 9, pp. 189-195, 1991
3. K. Higuchi, O. Ozeki and S. Yamamoto, "Dimension Inspection System Automotive Panel Using 3-D Vision Semsor", *T. IEE Japan*, pp. 112-117, 1992.
 4. M Kondo, S Tachiki, M. Ishida and K. Higuchi, "Automatic Measuring System for Body Fit on the Automobile Assembly Line", *Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 538-543, 1995.
 5. A. Watanabe and T. Arimatsu, "3-D Positional Compensation System with Image Processing System", *ROBOT No. 95 JIRA*, pp. 62-66, 1993.
 6. Richard P. Paul, *Robot Manipulators*, MIT Press, 1980.
 7. S. S. Rao, *Optimization: theory and applications*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 256-431, 1984.
 8. David G. Luenberger, *Linear and Nonlinear Programming*, Addison-Wesley, 1984.