

도어-차체 틈새 측정에 근거한 도어 장착 로보트의 위치 보정 알고리즘 개발

Position Correction Algorithm of Door Mounting Robot based on Door-Chassis Gap Measure

김 미경*(울산대원), 강 회준(울산대)

ABSTRACT : This work deals with finding a suitable position correction algorithm of industrial robot based on measuring gaps between door and chassis. The algorithm calculates correction quantities and then must allow visually acceptable door-chassis assembly task. The algorithm simulation is performed for a simple door-chassis model, and its effectiveness is addressed in terms of the predefined total uniformity, line uniformity. In addition, the error sensitivity analysis of the rotation center of door due to the mismatch of robot grasping is performed using the algorithm.

Key words : Position Correction algorithm(위치 보정 알고리즘), Gap Measure(틈새 측정)
Error sensitivity analysis(오차에 대한 민감도 해석)

1. 서론

차체 공장의 조립 라인은 차체의 기본 프레임의 설치 후, 도어의 장착 공정에 이르기까지 수 많은 프레스된 강재 패널 부품들을 산업용 로보트 용접으로 이어 맞추어 일체 구조식 차체를 만들어가는 수 많은 자동화 공정들로 이루어져 있다. 이 과정은 사용된 패널 부품의 근본 오차 및 용접중 발생하는 열에 의한 차체 및 도어의 변형 오차를 수반하게 된다. 이와같이 불가피하게 발생된 오차는 도어 자동 장착 공정에 심각한 영향을 미친다. 따라서, 발생된 오차에 능동적으로 대처할 수 있는 신뢰성 있는 도어 자동 장착 시스템을 개발하고자 한다. 이 개발 과제는 크게 3가지 작업으로 나눌 수 있는데, 그것들은 오차의 측정 기술, 측정된 오차에 근거한 최적 보정량 산출 알고리즘, 그리고, 통합 로보트 시스템의 구현 등이다.

위에서 언급한 차체의 물리적 변형 오차로부터 산업용 로보트의 최적 위치 보정량을 산출하는 알고리즘은 오차를 측정하고자 하는 측정 대상에 맞게 개발되어야 하는데 그 측정량은 두 가지 경우가 있다. 그 첫째는 변형된 차체의 특정점을 측정하는 경우이고, 그 두번째는 차체와 도어 사이에 발생하는 틈새(Gap)를 측정하는 경우이다. 그 선택에 따라 사용의 장점과 단점을 갖게 되고, 단계별 연구 내용도 달라지게 된다. 본 저자들의 기존 연구로서 특정점 측정에 근거한 위의 3가지 연구 과제를 수행하였는데^[1,2], 이 경우의 장점인 2차원 정보를 얻게 되어 최적의 보정량 산출이 용이한 반면, 도어의 변형을 고려 할 수 없는 단점을 갖게 되고, 특정점 추출시 비전만을 사용하기에 주변 조명 환경에 많은 영향을 받는다. 따라서, 본 연구는 도어와 차체 사이의 Gap 측정에 근거한 도어 장착 로보트의 위치 보정 알고리즘을 개발하고자 한다. Gap 측정은 반도체 레이저와 비전을 이용한 융합 센서를 고려함으로써^[3,4], 주변 환경 변화에 대한 측정의 신뢰성을 높이고자 하였다.

본 연구의 내용은 측정하여야 하는 Gap의 수를 결정하고, Gap 측정에 근거하여 실 조립 라인에서 얻어지는 생산 Know-How 를 가능한한 포함하는 최적 위치 보정 알고리즘을 개발한다.

부가적으로, 산업용 로보트가 도어을 잡을 때 불가피하게 발생하는 오차에 대한 개발 알고리즘의 도어 차체 결합의 성과(performance)의 민감도 해석을 통하여 개발 알고리즘의 사용 안정성에 대하여 설명하고자 한다.

2. 측정의 위치 및 갯수

최적 오차 보정량을 산출하는 오차 보정 알고리즘의 목적은 도어의 자동 장착을 보장하면서 장착된 모습이 시각적으로 보기 좋아야 한다. 이 목적을 수행하려면 우선적으로 도어의 힌지 구멍과 차체의 너트 구멍의 일치가 보장되어야 하고 조립된 차체와 도어 사이에 존재하는 Gap이 균일하여야 한다. 따라서, Gap의 측정 갯수는 많을수록 좋고, 차체의 너트 구멍의 측정이 필요하게 된다. 여기에서 조립 생산자의 제언을 고려하면 다음과 같다.

- ① 현재 사용되고 있는 자동 장착 공정에서 발생하는 오차의 정도는 $\pm 0.5\text{mm}$ 이고, 도어의 힌지 구멍과 차체의 너트 구멍 사이의 결합 공차를 고려할 때, 보정 알고리즘에서 힌지 및 너트 구멍을 고려할 필요는 없다.
- ② 도어 하단부와 차체 하단 Aperture Line을 가능한 한 평행하도록 만들고, 그 다음에 X축 보정을 한다면 시각적으로 보기 좋은 결합이 가능할 것임.

위에서 제시된 조립 정보를 고려하면 ①항에 의해서 차체의 너트 구멍의 측정이 생략되어 시스템 구성 비용을 절약할 수 있으며, 위치 보정 알고리즘에서는 구멍들 사이의 구속식을 제거 할 수 있다. 또한 실 시스템에서 너트 구멍 측정 위치는 차체에 볼트를 채결하는 볼트런너로 명명된 로보트의 동작 범위이므로 너트 구멍 측정 시스템을 설치하기 어렵다. ②항은 고려 된 보정 시스템에 사용되는 틈새 측정의 위치 및 갯수를 선정하는데 중요한 검토 사항이 된다. 일반적으로 각 차체 외곽선들의 중앙에서 틈새를 측정해야만 전체적으로 균일한 Gap Line을

결합임을 예로 들어 설명할 수 있다.

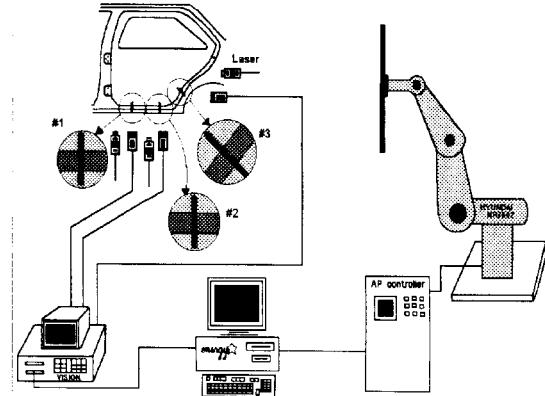


그림 1. 전체 시스템의 구성

보장할 수 있지만 실질적으로 도어의 상단부는 일반인들이 보기에 Gap Line을 확인할 수 없고, 하단부와 우하단부에서 일정한 Gap Line을 형성한다면 시각적으로 보기 좋은 결합을 할 수 있다. 따라서, 측정 센서의 위치와 갯수로 하단부 2개와 우하단부 2개를 선정하면 ②의 고려 사항을 만족시킬 수 있다. 그러나 우하단부에서 2개를 측정하는 것이 1개만을 측정한 것에 비하여 어느 정도 조립의 우월성이 있는가를 모의 실험을 통하여 검증한 결과 그 차이가 미미하여 우하단부의 측정 갯수를 1개로 결정하였다. 그러므로 측정 위치 및 갯수는 그림 1에 보여진 대로 하단부 2개와 우하단부 1개로 결정하였다.

3. Gap 측정에 근거한 위치 보정 알고리즘

3.1 알고리즘의 평가 척도

개발하고자 하는 알고리즘의 평가 척도로는 기존의 연구⁽¹⁾에서 제시된 전체 편평도와 선 편평도를 사용하는데, 그 Gap에 대한 전체 편평도는 전체에 대한 각면에서 발생하는 Gap의 균일함을 나타내고, 선 편평도는 각 단면에 발생하는 Gap의 균일성을 나타낸다. 그 정의는 다음과 같다.

- 전체 편평도(Total Uniformity) : 보정 후 발생하는 Gap ($newg$) 중 가장 큰 것($newg_{\max}$)에서 가장 작은 것($newg_{\min}$)을 뺀 양의 역수에 도어의 대각선 길이(D)를 곱한 양을 전체 편평도라 정의하고, 그 양이 클수록 좋은 결합을 나타낸다. 여기서, D를 곱하여 이 양을 무차원화함으로써 대상 도어 모델의 크기에 따라 이 양의 의미가 변하지 않도록 하였다.

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

- 선 편평도(Line Uniformity) : 위에서 정의된 전체 편평도가 비록 크더라도, 도어와 차체 사이의 Gap 정도가 균일하지 않으면 시각적으로 보기싫어 제품의 질이 낮아지므로 이를 보완하기 위하여 선 편평도를 다음과 같이 정의한다. 선 편평도는 각 변의 기울기 차이(dif_theta_k , $k = 1 .. n$)의 제곱을 더한 것의 역수로 선 편평도가 클수록 좋은 결합을 나타낸다. 여기서, 기울기 차이의 제곱을 취한 이유는 두면을 고려할 경우 기울기의 차가 각각 1 발생한 것이 0과 2 발생한 것보다 좋은

$$Line Uniformity = \frac{1}{\sum_{k=1}^n (dif_theta_k)^2} \quad (2)$$

위 두개의 지수를 고려할 때, 시각적으로 보기좋은 결합을 위해서는 선 편평도가 전체 편평도보다 중요한 성능 지수이므로, 전체 편평도가 비록 작아지더라도 선 편평도가 크면 더 바람직한 결합이라 할 수 있다.

3.2 모델 설정 및 보정에 따른 Gap 변화

최적의 보정 작업을 수행하려면 우선, 도어 하단부 및 우하단부 3 위치의 Gap 측정을 통하여 현재의 도어-차체 결합 상태를 정확히 인지할 필요가 있다. Gap 측정 위치점과 방향은 world Coordinate에 대하여 설정되어, 도어의 위치및 변형 오차가 없는 경우 도어의 각 위치점 $R_k(Rx_k, Ry_k)$ 에 일치되도록 되어 있다(여기서, $k=1..3$). 그러나, 도어의 위치및 변형 오차가 있는 경우라도 보정 작업이 차체와의 상대 위치를 조정하는 것이기때문에 기준 위치가 필요하므로 각 측정 위치점들은 그림 2에 보여진대로, 도어의 $R_k(Rx_k, Ry_k)$ 에 일치하는 것으로 가정한다. 이 가정에 따라 발생 가능한 보정 결과의 변화는 후에 민감도 해석에서 언급하고자 한다. 기준 도어의 $R_k(Rx_k, Ry_k)$ 에서 측정한 Gap g_k 를 이용하여 추정된 차체의 변형 및 정지 오차들에 의한 변형 위치점을 $S_k(Sx_k, Sy_k)$ 라 하고, 산업용 로보트의 말단점에 해당하는 도어의 회전 중심을 도어 내부의 점 $O(Ox, Oy)$ 라 한다. 이때 도어의 우하단부의 측정 위치점 R_1 에서 X축에 대하여 특정각(α)의 방향으로 측정한 Gap g_1 을 이용하여 차체의 우하단부 위의 한 개의 점 S_1 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Sx_1 = Rx_1 + g_1 * \cos(\alpha), \quad Sy_1 = Ry_1 - g_1 * \sin(\alpha) \quad (3)$$

도어의 하단부의 두 개의 측정 위치점 R_2, R_3 에서도 X축과 수직한 방향으로 측정한 Gap g_2, g_3 을 이용하여 차체의 하단부 위의 두 개의 점 S_2, S_3 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Sx_2 &= Rx_2, \quad Sy_2 = Ry_2 - g_2 \\ Sx_3 &= Rx_3, \quad Sy_3 = Ry_3 - g_3 \end{aligned} \quad (4)$$

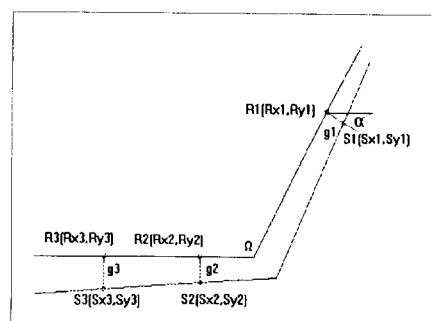


그림 2. 측정에 따른 모델 설정

식 (4)에서 얻어진 차체의 하단부 두 점 S_2 , S_3 를 직선으로 연결하여 현 조립 상태에서 차체의 하단면으로 인식하고, 도어의 하단면과 우하단면 사이의 각(Ω)과 차체의 하단면과 우하단면 사이의 각은 변형이 없다고 가정함으로써 인식된 차체의 하단면과 인식하고자 하는 우하단면 사이의 기울기가 결정된다. 이것은 현 시스템이 우하단부에서는 한 곳만을 측정함에 따른 불가피한 가정으로, 우하단부에서 두 곳을 측정할 경우에는 불필요한 가정이 된다. 이 가정은 도어와 차체의 실 변형을 고려하면 어느정도 타당성을 갖는다. 인식된 기울기와 우하단부 측정점 S_1 을 이용하여 우하단부 직선을 만들게 되고, 현 도어 차체의 결합 상태를 나타내는 보정전의 결합 모델을 인식하게 된다.

위와같이 Gap 측정에 의해 설정된 차체 모델에 대하여 기본 도어를 x, y 만큼 전이(translation), 회전 중심 O 에 대하여 θ 만큼 회전(rotation)하였을 때, 도어의 측정 위치점들은 식 (5)에 의하여 새로운 위치으로 변환되고, 식 (6)과 같이 그 점으로부터 차체에 수직선을 내려가서 만난 점까지의 거리를 구함으로써, 새로운 변환 Gap값이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} newRx_k \\ newRy_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Rx_k \\ Ry_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$newg_k = \frac{|Sa_k * newRx_k - newRy_k + Sb_k|}{\sqrt{Sa_k^2 + (-1)^2}} \quad (6)$$

여기서, Sa_1 과 Sb_1 은 각각 변형 차체의 우하단부의 기울기와 y 절편이며, Sa_2 와 Sb_2 는 각각 변형 차체의 하단부의 기울기와 y 절편이다. Sa_3 와 Sb_3 는 각각 Sa_2 와 Sb_2 와 같고 그 값들의 계산식은 다음과 같다.

$$Sa_2 = \frac{Sy_3 - Sy_2}{Sx_3 - Sx_2}, \quad Sb_2 = Sy_2 - Sa_2 \cdot Sx_2 \quad (7)$$

$$Sa_1 = \tan(\pi - \Omega + \tan^{-1}(Sa_2)), \quad Sb_1 = Sy_1 - Sa_1 \cdot Sx_1 \quad (8)$$

3.3 위치 보정 알고리즘

절 2.2의 식(5)-(6)에서 나타낸 2차원 보정후에 얻어진 변환 Gap을 이용하여, 전체 편평도와 선 편평도를 증가시키는 최적 오차 보정 알고리즘을 구하고자 다음의 2가지 방법을 고려한다.

3.3.1 틈새 오차 최소화 방법(Gap Error Minimization Method)
차체와 도어 사이의 Gap을 균일하게 하기위하여 보정후의 차체의 우하단부와 도어의 우하단부와의 Gap($newg_1$)과 요구 Gap(g_d)과의 차와 차체의 하단부와 도어의 하단부와의 Gap($newg_2$, $newg_3$)과 요구 Gap(g_d)과의 차의 합, 즉 틈새 오차들의 합을 최적 성능 지수로 삼는다. 그것은 2차원 보정 변수 x, y, θ 로 표현되어 그 성능 지수를 최소화함으로써 최적 위치 보정량을 산출하게 된다.

$$\text{Min}(\mathcal{J}(x, y, \theta)) = \sum_{k=1}^3 (newg_k - g_d)^2$$

이 성능 지수를 최소화하는 작업은 Davidon-Fletcher-Powell variable metric method^(4,5)를 이용하여 NLP(Non Linear Programming) 문제를 풀어 최적해를 구한다.

3.3.2 틈새 오차 감소 방법(Gap Error Reduction Method)

차체와 도어 사이의 Gap을 균일하게 하기위하여 먼저 도어를 회전시켜 차체의 하단부와 도어의 하단부를 평행하게 맞춘 후, 이때 차체와 도어간의 우하단부 및 하단부에서 발생하는 Gap과 요구 Gap과의 차이를 감소시키는 도어의 전이량을 산출함으로써 틈새 오차를 줄이는 방법이다. 차체와 도어의 하단부를 평행하게 맞추는 회전의 중심 O 에 대한 회전량 θ 는 다음과 같다.

$$\theta = \tan^{-1}(Sa_2) \quad (10)$$

도어의 기본 Gap 측정 위치점은 회전의 중심 O 에 대하여 θ 만큼 회전(rotation)하여 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{bmatrix} tempRx_k \\ tempRy_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Rx_k \\ Ry_k \end{bmatrix} \quad (11)$$

그림 3은 그림 2의 도어를 회전 중심 O 에 대하여 θ 만큼 회전한 후의 모습이고, 차체의 우하단부와 도어의 우하단부 사이의 Gap과 요구 Gap과의 차이(I_1)와 차체의 하단부와 도어의 하단부 사이의 Gap과 요구 Gap과의 차이(I_2)는 다음과 같다.

$$I_1 = \frac{|Sa_1 * tempRx_1 - tempRy_1 + Sb_1|}{\sqrt{Sa_1^2 + (-1)^2}} - g_d \quad (12)$$

$$I_2 = \frac{|Sa_2 * tempRx_2 - tempRy_2 + Sb_2|}{\sqrt{Sa_2^2 + (-1)^2}} - g_d \quad (13)$$

그림 3에서 보여진대로, 도어의 하단부와 우하단부가 만나는 점으로부터 요구 Gap 라인(차체 라인으로부터 요구 Gap을 만드는 한 라인)의 하단부와 우하단부가 만나는 점까지의 거리(I_1 은 도어가 전이되어야 하는 양을 나타낸다. I_2 과 I_1 이 이루는 각을 θ_1 , I_1 과 I_2 가 이루는 각을 θ_2 라고 하면 다음과 같은 식이 성립한다.

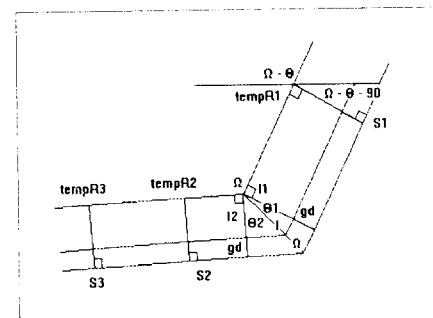


그림 3. 회전 보정후의 도어 차체 결합 모습

$$l_1 = l \cdot \cos \theta_1, \quad l_2 = l \cdot \cos \theta_2 \quad (14)$$

여기서, 도어의 하단부와 우하단부가 이루는 각이 차체의 하단부와 우하단부가 이루는 각(Ω)과 같다는 가정으로부터,

$$\theta_1 + \theta_2 = 180 - \Omega \quad (15)$$

따라서,

$$\begin{aligned} \cos \theta_2 &= \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_1) \\ &= -\cos(\Omega + \theta_1) \\ &= -(\cos \Omega \cdot \cos \theta_1 - \sin \Omega \cdot \sin \theta_1) \end{aligned} \quad (16)$$

식 (14)와 식 (16)을 연립하여 풀면,

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(-\frac{l_2 + l_1 \cdot \cos \Omega}{l_1 \cdot \sin \Omega}\right) \quad (17)$$

그리고,

$$l = \frac{l_1}{\cos \theta_1} \quad (18)$$

그러므로, 식 (10)의 회전 보정량 θ 와 더불어 회전후 차체와 도어간의 우하단부 및 하단부에서 발생하는 Gap과 요구 Gap과의 차이를 감소시키는 도어의 전이량 x 와 y 는 다음과 같다.

$$x = l \cdot \cos(\Omega - \theta - \frac{\pi}{2} + \theta_1) \quad (19)$$

$$y = -l \cdot \sin(\Omega - \theta - \frac{\pi}{2} + \theta_1) \quad (20)$$

4. 알고리즘의 평가

절 3.2에서 제시된 두 알고리즘을 평가하기 위하여, 단순 도어 장착 모델에 대하여 실제 크기의 1% 오차 내에서 Random하게 만들어지는 50개의 변형 오차 세트에 대한 위치 보정 작업을 수행하였다. 더불어 우하단부 측정을 두 위치에서 행하였을 때의 알고리즘(GEM4)도 수행하였다. 그 수행 결과를 전체 편평도와 선 편평도로 정량화하여 그림 4와 5에 각각 나타내었다. 그림 4와 5에 따르면 Gap 오차 최소화 방법(GEM) 및 Gap 오차 감소화 방법(GER)이 같은 결과를 보임을 알 수 있다. 그 이유는 차체 우하단부에서 한 곳만을 측정하기 때문으로, 모델 설정시 도어와 차체의 하단부와 우하단부가 이루는 각이 동일하다고 가정하고 3개의 Gap 측정량을 사용할 경우, GER 알고리즘의 조립 성과가 Gap 사이의 오차를 최소화하는 GEM의 결과와 같아짐을 알 수 있다. 우하단부 2곳을 측정하는 GEM4의 경우 GEM에 비교하여 예상되로 전체 편평도와 선 편평도가 증가됨을 알 수 있고, 그 증가에 따른 도어 차체 결합의 개선이 가능하다. GEM이나 GER의 보정 결과가 현 도어 장착 시스템의 목적을 충분히 만족시키므로 우하단부에서는 1곳 측정을 선정하였다. 또한, GEM은 최적화 과정을 거쳐 최적해를 구하는 방법으로 공식에 의한 방법인 GER에 비해 더 많은 시간(486DX33에서 1초 이상)이 요구된다. 계산 시간의 절감은 Just-In-Time 자동화 시스템의 아주 중요한 사항이므로, 본 평가 척도의 검토 결과로서 GER이 다른 방법에 비해 우수하다고 할 수 있다. 따라서 GER을 개발하는 산업용 로보트의 위치 보정 알고리즘으로 채택한다.

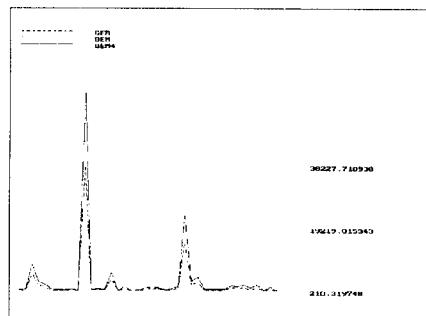


그림 4. 전체 편평도에 따른 각 알고리즘 비교

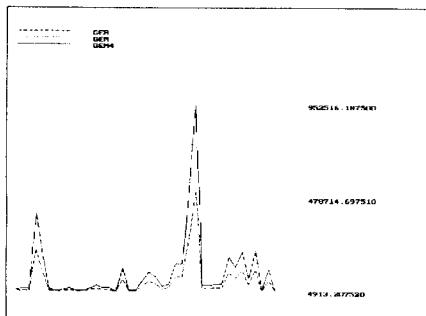


그림 5. 선 편평도에 따른 각 알고리즘 비교

5. 회전 중심 오차에 대한 조립 결과의 민감도 해석

산업용 로보트가 도어를 조작하려면 도어를 교시된대로 정확하게 잡을 수 있도록 정밀 Jig 시스템 및 말단 유효기의 제작이 요구된다. 따라서, 요구 정밀도에 따라 Jig 시스템의 가격의 상승 및 제작의 어려움이 따른다. 그러므로, 선정된 GER 알고리즘의 조립 성과가 산업용 로보트가 도어를 잡을 때 발생하는 회전 중심의 전이 오차와 회전 오차에 대하여 어느 정도 영향을 받는지를 조사하기 위한 민감도 해석을 수행하였다.

민감도 해석의 방법은 다음과 같다. 우선, 회전 중심의 전이 및 회전의 오차가 없는 경우에 3개의 측정량에 균형하여 GER을 수행하여 보정량을 구하고 그에 따른 조립 성과를 전체 편평도와 선 편평도로 정량화한다. 도어 Grasping에 따른 회전 중심의 전이 및 회전의 오차가 발생하는 경우에 측정량도 따라서 변하게 되므로 그 변한 측정 결과를 고려하여 오차가 없는 회전 중심에 대한 위치 보정량을 구하고 그 보정량을 오차가 발생된 실 도어 중심에 대하여 적용하여 조립 성과를 구한다. 모델에 대한 50 개의 변형 오차 Set과 50개의 회전 중심의 전이 및 회전 오차 Set를 전체 도어 크기의 1% 이내에서 발생시켜 위에서 설명된 두 가지 경우에 대하여 GER 알고리즘을 적용하고 그 결과를 그림 6과 7에 각각 제시하였다. 그림 7에 따르면 GER 알고리즘은 회전 중심의 전이 및 회전 오차에 대하여 선 편평도에 대한 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 그림 6에 의하면 회전 중심의 전이 및 회전 오차에 의하여 전체 편평도는 어느 정도 영향을 받게 되는데, 그 영향은 다음과 같이 평가할 수 있다. 그림 6에서 사용된 도어 차체 모델의 경우 식 (1)의 D값이 142mm이고 그것의 1% 이내에서 도어의 회전 중심의 위치 오차가 발생하므로 그 위치 오차는 최대 1.42mm이

며, 최악의 경우 전체 편평도 값이 105이므로 식 (1)을 이용하면 보정 후의 Gap 크기의 최대 차이는 1.35mm 정도가 된다. 그 러므로 도어 회전 중심의 위치 오차에 따라 최대 최소 Gap 크기의 차이가 동일한 Order로 발생되므로 가능한한 회전 중심의 위치 오차를 줄여야 한다. 하지만 이는 최악의 경우이고, 전체 편평도보다는 선 편평도가 도어와 차체의 조립의 시각적 모습을 좌우하게 되므로, 회전 중심의 전이 및 회전 오차에 대한 조립 알고리즘의 민감도는 작다고 고려된다. 이해를 돋기 위하여 그림 8-10을 제시하였다. 그림 8은 보정전의 도어 차체 결합 모습이고 그림 9는 회전 중심 위치에 대한 오차가 없는 경우의 조립 모습이며, 그림 10은 그 오차가 있는 경우의 조립 모습이다. 그림 9와 그림 10에 따르면, 오차에 따른 전체 편평도 값은 민감하게 변함을 알 수 있고, 선 편평도는 거의 같음을 알 수 있으나, 전체적인 조립 모습은 전체 편평도의 민감도 변화에 비해 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

6. 결론

도어와 차체의 Gap 측정에 근거한 산업용 로보트의 위치 보정 알고리즘을 제시하였다. Gap 측정이 이루어지는 위치 및 갯수는 조립 생산자의 제언과 전산 모의 실험에 근거하여 하단부에 2곳과 우하단부 1곳을 측정 위치 및 갯수로 선정하였다. 3곳 측정시에는 Gap 오차 최소화 방법(GEM)과 Gap 오차 감소화 방법(GER)이 동일한 보정을 수행하므로 계산 시간이 적은 GER 방법을 기본 보정 알고리즘으로 선정하고, 산업용 로보트가 도어를 Grasping할 때 발생하는 회전 중심의 전이 및 회전 오차에 대한 알고리즘의 민감도를 해석한 결과, 조립의 전이량에는 위치 오차만큼의 영향을 주고 회전량에는 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 향후 과제로 측정 오차에 대한 조립 결과의 민감도 해석을 고려하고 있다.

참고문헌

1. 김 미경, 변 성동, 강 희준, 김 상명, "도어 장착을 위한 산업용 로보트의 위치 보정 알고리즘", 대한기계학회 '94 추계학술 대회 논문집, pp. 608-612, 1994.
2. 변 성동, 김 미경, 강 희준, 김 상명, "도어 장착을 위한 산업용 로보트의 위치 보정 시스템 개발", 한국정밀공학회 '95 춘계학술대회 논문집, pp. 504-509, 1995.
3. M. Kondo, S. Tachiki, M. Ishida and K. Higuchi, "Automatic Measuring System for Body Fit on the Automobile Assembly line", IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 538-543, 1995.
4. S. S. Rao, *Optimization : theory and applications*, John Wiley & Sons, Inc., 1984.
5. David G. Luenberger, *Linear and Nonlinear Programming*, Addison-Wesley, 1984.

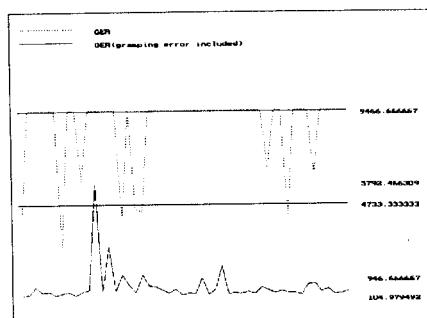


그림 6. 전체 편평도 비교

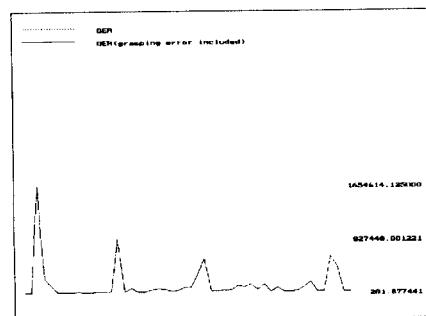


그림 7. 선 편평도 비교

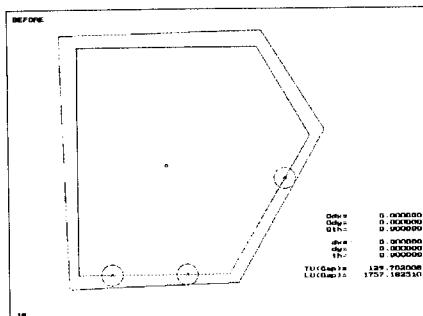


그림 8. 보정전의 도어 차체 결합

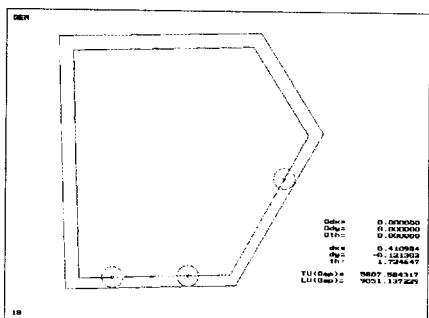


그림 9. 보정 후 결합(회전 중심 위치 오차 없는 경우)

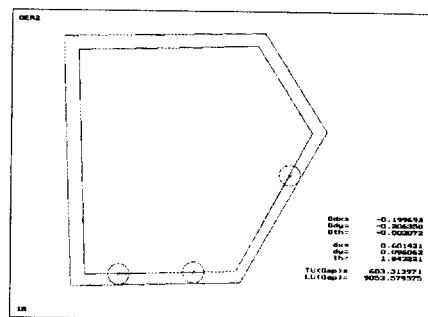


그림 10. 보정 후 결합(회전 중심 위치 오차 있는 경우)