

가중치를 고려한 자동차 서브프레임의 인증 알고리즘 구현

이광일*, 양승한#, 이영문**

Development of Registration Algorithm considering Coordinate Weights for Automobile Sub-Frame Assembly

Kwang-Il Lee*, Seung-Han Yang#, Young-Moon Lee**

ABSTRACT

Inspection and analysis are essential process to determine whether a completed product is in given specification or not. Analysis of products with very complicated shape is difficult to carry out direct comparison between inspected coordinate and designed coordinates. So process called as matching or registrations is needed to solve this problem. By defining error between two coordinates and minimizing the error, registration is done. Registration consists of translation, rotation and scale transformations. Error must be defined to express feature of inspected product. In this paper, registration algorithm is developed to determine pose of sub-frame at assembly with body of automobile by defining error between two coordinates considering geometric feature of sub-frame.

Key Words : Automobile Sub-frame(자동차 서브프레임), Registration(인증), Geometric Feature(기하학적 특징), Assembly(조립), Transformation(변환)

1. 서 론

완성된 자동차 부품에는 예상하지 못한 오차가 있으며, 완성된 자동차의 품질에 악영향을 미치고 많은 재원의 낭비를 가져온다. 현대 자동차 산업에서는 복잡한 형상의 모듈제품을 제작하며^[1,2], 차체와의 조립이 이루어지기전에 적절한 적부판단의 기준을 필요로 한다. 적부판단을 위해서는 제작된 모듈제품의 특징을 나타내는 점에 대한 측정이 이루어져야 한다^[3]. 또한 측정데이터와 설계데이터를 비교하기 위해 인

증작업을 수행해야 한다. 인증은 측정데이터와 설계데이터 사이에 오차를 정의하고, 정의된 오차를 최소화하는 과정이다.

자동차 프론트 샤시 모듈은 조향성능과 밀접한 관계에 있으며, 예상하지 못한 오차요소는 완성된 자동차의 품질에 악영향을 미친다. 프론트 샤시 모듈과 관련된 조향성능은 구성요소인 킹핀(king-pin)의 차체에 대한 상대적 위치에 의해 많은 영향을 받는다^[4]. 공간상에 존재하는 킹핀의 위치는 프론트 샤시 모듈의 구성요소인 서브프레임의 조립자세에 의해 결정된다. 서브프레임은 차체와의 조립시 물리적 접촉을 하는 4개의 지지부로 구성되며, 서브프레임 조립자세는 지지부의 위치에 의해 결정된다. 서브프레임의 조립자세를 결정하기 위해서는 측정데이터를 설계데이

* 경북대학교 대학원 기계공학과

교신저자 : 경북대학교 기계공학부

E-mail : syang@knu.ac.kr

** 경북대학교 기계공학부

터로 변환해야 한다. 하지만 서브프레임 지지부의 측정데이터는 많은 오차요소를 가지고 있으며, 정확하게 설계데이터와 일치하지 않는다. 측정데이터의 오차요소로는 서브프레임 자체가 가지는 제작상의 오차와 측정시 발생한 측정오차가 있다. 일치하지 않는 두 데이터군을 비교하기 위해서는 인증작업이 필요하다. 인증과 관련하여 많은 연구가 있으며, Arun^[5]과 Horn^[6]은 비정칙치 분해(singular value decomposition, SVD)를, Umeyama^[7]는 데이터가 심하게 왜곡된 경우를 고려하여 라그랑지 승수(Lagrange multiplier)를 이용하여 해를 제시하였다. 또한 Lee^[8~11]와 Samuel^[12]은 인증알고리즘을 서브프레임의 조립자세를 결정하기 위해 이용하였다. 하지만 서브프레임은 인증작업의 결과로 나온 최적화된 자세로 차체에 조립이 되지 않으며, 정확한 조립자세를 결정하기 위해서는 서브프레임과 차체와의 조립관계를 고려해야 한다. 조립과정에서 4개 지지부는 동시에 차체와 체결이 되지 않으며, 일정한 조립순서에 의해 체결된다^[13].

본 연구에서는 서브프레임과 차체와의 조립관계를 고려하여 측정데이터와 설계데이터 사이의 인증 알고리즘을 구현하였다. 서브프레임 조립순서의 영향은, 인증 결과로 나온 최적화된 자세와 설계상의 이상적인 자세 사이의 오차가 재분배되는 것으로 이해된다. 오차의 재분배를 위해, 우선 최적화된 자세를 결정하고 조립순서에 따른 가중치를 주어 최적화된 자세와 이상적인 자세사이에 다시 인증작업을 수행한다.

2. 조립관계를 고려한 서브프레임 인증

2.1 프런트 샤시 모듈 및 서브프레임

자동차 프런트 샤시 모듈은 Fig. 1과 같이 코너모듈, 프런트 로우어 암 그리고 서브프레임으로 이루어진다. 프런트 샤시 모듈의 조립자세를 결정하는 서브프레임은 4개의 지지부로 구성되며 Fig. 2와 같다. 서브프레임의 지지부는 원통형으로 구성되며, 설계데이터는 원통형 상단원의 중심점을 나타낸다. 공간상에 존재하는 중심점은 원호상의 세 점을 이용해 측정한다^[8].

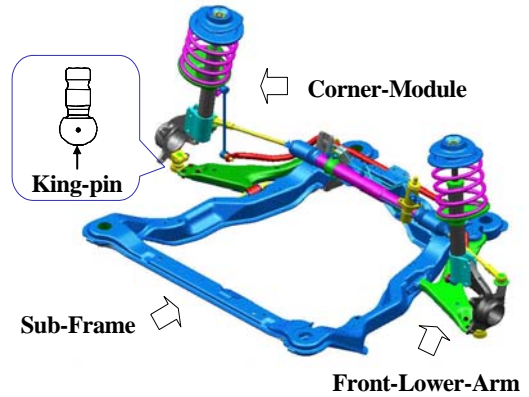


Fig. 1 Front-chassis-module

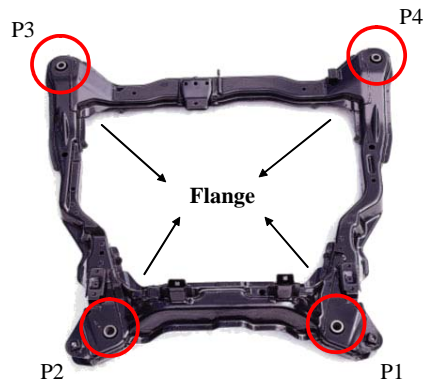


Fig. 2 Sub-frame and flange

2.2 서브프레임의 인증

차체와의 조립관계를 고려해 서브프레임의 조립자세를 결정하기 위해서는 Fig. 3과 같이 측정데이터를 설계데이터로 변환하고, 두 데이터군 사이의 오차를 조립순서에 따른 가중치로 재분배해야 한다. 인증에서 두 데이터군 사이의 오차는 비교 대상 점의 거리 제곱 합(P2-norm)으로 정의하며, 식 (1)과 같다.

$$e(R, T) = \sum_{i=1}^4 |y_i - (R \times x_i + T)|^2 \quad (1)$$

여기서,

e : 두 데이터군 사이의 오차,

y_i : 3×1 설계데이터,

x_i : 3×1 측정데이터,
 R : 3×3 회전변환 행렬,
 T : 3×3 병진변환 행렬을 나타낸다.

식 (1)을 최소화하는 회전변환 행렬을 구하기 위해 서는, 두 데이터군은 같은 중심을 가져야 하며^[14], 이를 고려한 목적함수는 식 (2)와 같다. 라그랑지 승수와 라그랑지 승수 행렬은 직교행렬인 회전변환 행렬의 특징을 구속조건으로 나타내기 위해 사용한다.

$$F = |A - R \times B|^2 + \text{trace} L(R^T R - I) + g \det(R) - 1 \quad (2)$$

여기서,

μ_x : 측정데이터의 중심 위치벡터, $\sum_{i=1}^4 x_i / 4$,

μ_y : 설계데이터의 중심 위치벡터, $\sum_{i=1}^4 y_i / 4$,

A : 3×4 설계데이터- μ_y ,

B : 3×4 측정데이터- μ_x ,

L : 3×3 라그랑지 승수 대각행렬,

g : 라그랑지 승수를 나타낸다.

위해 식 (3)과 같이 R , L 그리고 g 로 편미분한다. 식 (3)을 정리하고 식 (4)와 같이 L' 을 정의한다. 식 (4)과 AB^T 의 비정칙치 분해를 이용하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial R} &= -2AB^T + 2RBB^T + 2RL + gR = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial L} &= R^T R - I = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial g} &= \det(R) - 1 = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$RL' = AB^T, \text{ where } L' = BB^T + L + \frac{1}{2} gI \quad (4)$$

$$\begin{aligned} L'^2 &= BA^T AB^T (\because AB^T = UDV^T) = VD^2V^T \\ L' &= VDSV^T (\because L', L'^2 \text{ are commutative}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$S = \begin{cases} I & \text{if } \det(AB^T) > 0 \\ \text{diagonal}(1, 1, \dots, -1) & \text{if } \det(AB^T) < 0 \end{cases}$$

식 (2)를 최소화하는 병진변환 행렬과 회전변환 행렬은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} R &= USV^T, \\ T &= \mu_y - R\mu_x \end{aligned} \quad (6)$$

최적화된 측정데이터와 설계데이터 사이의 오차를 조립순서에 따라서 재분배하기 위해 식 (7)과 같이 각 지지부의 설계데이터를 가중치로 정의하였다. 즉 측정데이터가 가지고 있는 오차를 각 지지부에 분배하는 경우, 조립 순서가 앞서는 지지부에 대해 오차를 적게 분배함으로써 조립순서를 고려한다. 가중치 벡터(ψ)는 Table 1과 같다.

Table 1 Weight vector for flange

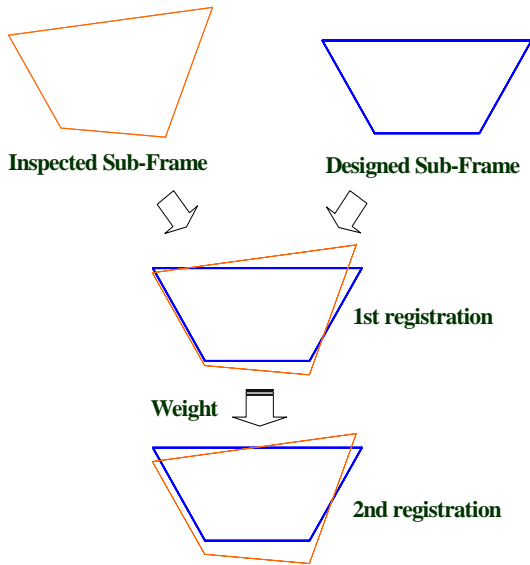


Fig. 3 Registration considering assembly

목적함수를 최소화하는 회전변환 행렬을 구하기

	P1 & P2	P3 & P4
Weight vector.x	$\frac{ P1.x }{\sum_{i=1}^4 (II.x + II.y + II.z)}$	$\frac{ P3.x }{\sum_{i=1}^4 (II.x + II.y + II.z)}$
Weight vector.y	$\frac{ P1.y }{\sum_{i=1}^4 (II.x + II.y + II.z)}$	$\frac{ P3.y }{\sum_{i=1}^4 (II.x + II.y + II.z)}$
Weight vector.z	$\frac{ P1.z }{\sum_{i=1}^4 (II.x + II.y + II.z)}$	$\frac{ P3.z }{\sum_{i=1}^4 (II.x + II.y + II.z)}$

	X	Y	Z
P1	438.0	318.0	-3.0
P2	438.0	-318.0	-3.0
P3	-622.0	-494.0	93.0
P4	-622.0	494.0	93.0

$$e(R', T') = \sum_{i=1}^n |\Psi_i \cdot y_i - (R' \times x_i' + T')|^2 \quad (7)$$

여기서,

Ψ_i : 설계데이터로 이루어진 가중치 벡터,
 x_i' : 설계데이터로 변환된 측정데이터를 나타낸다.

식 (7)을 최소화하는 회전변환 행렬과 병진변환 행렬은 식 (2) ~ 식 (5)를 이용하여, 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} R' &= U' S' V' T', \\ T' &= \mu_y' - R' \mu_x' \end{aligned} \quad (8)$$

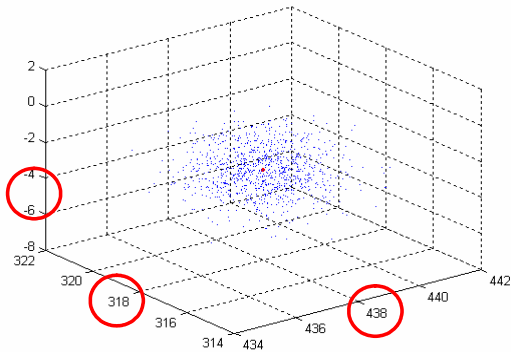


Fig. 4 Generated data for P1

Table 2 Design data for flange (unit: mm)

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션

조립관계를 고려한 인증 알고리즘을 평가하기 위해 Fig. 4과 같이 서브프레임의 각 지지부에 1000개의 데이터를 생성하였다. 시뮬레이션에 이용된 서브프레임 지지부의 데이터는 Table 2와 같다. 조립관계를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 결과를 비교하기 위해 각각의 경우에 대해 인증작업을 수행하였으며, 결과는 Table 3 및 Table 4와 같다.

Table 3 Error of simulation result (unit: mm²)

	Average	Standard deviation
Initial data	12.0153	4.9281
Result data	6.0394	3.4501
Result data with weight	6.0889	3.4767

Table 4 Effect of weight at result (unit: mm²)

		With weight	Without weight
P1	Average	1.7794	1.6325
	S.D.	1.4616	1.3671
P2	Average	1.8301	1.6786
	S.D.	1.5026	1.4043
P3	Average	1.2173	1.3416
	S.D.	1.1410	1.1963
P4	Average	1.2621	1.3866
	S.D.	1.2789	1.3261

시뮬레이션 결과인 Table 3의 경우, 가중치를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우 모두 오차와 표준편차

가 줄어들 것을 알 수 있다. 이는 초기 측정데이터를 설계데이터로 변환한 1st 인증작업의 결과이다. 가중치를 고려한 경우의 평균과 표준편차가 가중치를 고려하지 않은 경우보다 높은 것을 알 수 있으며, 이는 오차를 최소화하도록 최적 변환된 데이터를 조립관계를 고려하여 다시 변환한 2nd 인증작업의 영향이다. 2nd 인증작업은 최적화된 데이터가 가지는 오차를 조립관계에 의해 재분배한다.

가중치의 영향을 나타내는 Table 4에서, 가중치를 고려한 경우 P1과 P2의 평균과 표준편차는 증가하고 P3과 P4의 평균 및 표준편차는 감소한 것을 알 수 있다. 오차를 재분배하는 인증작업에서 P3과 P4에 더 큰 가중치를 주어서 상대적으로 작은 오차가 분배되도록 한 결과이다.



Fig. 5 Inspection system for sub-frame

3.2 실험

제작된 서브프레임의 조립자세를 결정하기 위해, Fig. 5의 서브프레임용 측정 장비를 이용하여 50회 측정을 하였다. 측정데이터를 이용한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5 Average value of flange with considering assembly (unit: mm)

	X	Y	Z
P1	436.754	317.708	-3.236
P2	437.995	-318.249	-2.632
P3	-621.213	-493.049	92.768
P4	-621.616	493.565	93.111

인증작업의 결과로 나온 Table 5의 데이터는 설계 데이터와 상당한 차이를 가지며, 측정에 이용한 서브프레임이 많은 오차를 가지는 것으로 분석된다.

4. 결 론

본 연구에서는 서브프레임의 정확한 조립자세를 수치적으로 제시하기 위해, 차체와 서브프레임의 조립관계를 고려하여 인증작업을 수행하였다. 조립관계를 고려한 인증작업에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 서브프레임의 조립자세를 결정하기 위해서는 측정 데이터와 설계데이터 사이에 오차를 정의하고, 정의된 오차를 최소화하는 인증작업을 수행해야 한다.
2. 조립관계를 고려하여 서브프레임의 조립자세를 결정하는 경우, 서브프레임은 최적화된 자세로 차체에 조립이 되지 않는다. 최적화된 측정데이터의 조립자세가 가지는 오차를 조립순서를 고려한 가중치를 이용하여 재분배해야 한다.
3. 지지부의 측정데이터와 조립관계에 따른 영향을 고려한 인증알고리즘을 이용하여, 보다 정확한 서브프레임의 조립자세를 수치적으로 제시하고 적부 판단의 기준을 제시한다.

참고문헌

1. Sheng, W., Xi, N., Song, M., Chen, Y., Rankin III, J. S., "Automated CAD-guided automobile part dimensional inspection," Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA 00. IEEE International Conference., 2, pp. 1157-1162, 2000.

2. Zetterstrom, S., "Electromechanical steering, suspension, drive and brake modules," Proceedings of IEEE 56th Vehicular Technology Conference-2002 (VTC-2002, Fall), Vol. 3, 2002.
3. Kondo, M., Tachiki, S., Ishida, M., "Automatic measuring system for body fit on the automobile assembly line," Robotics and Automation, 1995 Proceedings, IEEE International Conference, 1, pp. 538-543, 1995.
4. Ozdalyan, B., Blundell, M. V., Phillips, B., "Comparison of suspension rig measurements with computer simulation," International Conference on SIMULATION, No. 457, pp. 133-139, 1998.
5. Arun, K. S., Huang, T. S., and Blostein, S. D., "Least-squares fitting of two 3-D point sets," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. PAMI-9, pp. 698-700, 1987.
6. Horn, B. K. P., "Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices," J. Opt. Soc. Am. Ser. A, Vol. 5, pp. 1127-1135, 1988.
7. Umeyama, S., "Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. 13, pp. 376-380, 1991.
8. Lee, D. M., Lee, K. I., Yang, S. H., "The development of the machine vision system to inspect the front-chassis module of an automobile," Proceedings of the KSMTE spring conference 2003, Vol. 1, pp. 245-250, 2003.
9. Lee, D. M., Lee, K. I., Yang, S. H., "Development of the machine vision system for inspection the front-chassis module of an automobile," Transactions of KSMTE, Vol. 13, No. 3, pp. 84-90, 2004.
10. Lee, D. M., Yang, S. H., "Dimensional analysis for the front chassis module in the auto industry," Journal of the KSPE, Vol. 21, No. 8, pp. 50-56, 2004.
11. Lee, K. I., Yang, S. H., "Development of analysis algorithm by considering normal vector for an automobile sub-frame," Proceedings of the KSPE spring annual meeting, pp. 1212-1215, 2004.
12. Samuel, G. L., Yang, S. H., "Determination and mapping of measurement and design coordinate systems using computational geometric techniques," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Accepted, 2003.
13. Lee, K. I., Yang, S. H., Lee, Y. M., "Development of registration algorithm considering coordinate weights for automobile sub-frame assembly," Proceedings of the KSMPE spring conference, pp. 104-107, 2004.
14. Eggert, D. W., Lorusso, A., Fisher, R. B., "Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms," Machine Vision and Application, Vol. 9, No. 5-6, pp. 290, 1997.