

대 확 식 조 립 체 모 델 링 을 위 한
전 산 기 원 용 설 계 시 스템

이 건 우
서울대학교 공과대학 기계설계학과

A CAD System for
Interactive Assembly Modeling

Kunwoo Lee

Department of Mechanical Design and Production Engineering, Seoul National University

Abstract

A technique is developed which allows a designer to interactively create an assembly of components by specifying mating conditions between the individual components. Once establishing the relationships between components via the mating conditions, each component's location and orientation in the final assembly is computed. The joint information for a kinematic and dynamic analysis can be derived from the mating conditions, therefore this work may be extended to incorporate this analysis.

Through this development it will no longer be necessary for a designer to specify cumbersome and error prone transformation matrices in order to create an assembly. The designer also will be able to perform a kinematic or a dynamic analysis directly from an assembly model if the joint information can be automatically derived.

1. 서 론

현재까지 전산기 원용 설계에 있어 연구의 방향은 Geometric Modeling System (GMS) 의 개발에 중점을 두어 왔다. GMS 이란 기계 각 부품을 모델링하고 각 부품 설계에 관계된 해석 프로그램들과 연결시켜 주고, 해석 결과에 따라 각 부품의 형상을 변형시키는 등의 역할을 하는 소프트웨어를 뜻한다. 그러나

실제 기계설계에 있어 각 부품의 해석도 중요하지만 이 부품들이 모여 이루어진 조립체의 성능해석 또한 매우 중요하다. 조립체의 성능해석을 위해서는, 부품의 해석을 위해 부품의 모델링이 필요하듯이, 조립체의 모델링이 필수적이라 하겠다.

현재 기존하는 GMS 에서는 다음과 같은 방법으로 조립체의 모델링을 행하고 있다. 우선 GMS 의 본래 기능인 부품 모델링 기능을 사용하여 조립체의 모든 부품을 모델링하여 컴퓨터 화면상에 나타낸다. 다음 사용자는 각 부품을 화면상에서 정확한 위치에 정확한 방향으로 옮겨 놓아야 한다. 이런 식으로 모든 부품을 정확한 위치, 방향으로 옮겨 놓으면 조립체의 모델링이 끝난다. 앞에 설명된 방법은 사용자에게 많은 시간을 요구하고 또한 정확성의 문제를 수반하게 된다. 또한 여러 부품중 한 부품의 크기가 변하여도 같은 과정을 처음부터 반복해야 되는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는, 사용자가 조립된 상태에서의 각 부품간의 만나는 조건만 입력 시키면, 각 부품의 정확한 위치와 방향이 자동으로 계산 됨으로써 조립체의 모델링이 행하여 지는 프로그램의 개발을 목표로 하였다. 이 경우 각 부품의 크기가 변하여도 만나는 조건만 같으면 새로운 조립체의 모델이 자동으로 얻어지고, 또한 조립이 불가능한 경우를 사전에 감지해 내는 장점이 있다.

앞에 설명된 프로그램의 개발을 위해서는 다음의 문제들에 대한 해결책이 제시되어야 하겠다.

- 조립체를 컴퓨터 내에 표시하기 위한 데이터

구조의 구축

- 조립된 상태의 만남 조건들로 부터 각 부품의 위치, 방향 계산

또한 조립체의 모델은 궁극적으로 조립체의 성능 해석을 위한 것이므로, 이 프로그램에 의해 형성된 조립체 모델로 부터 동력학 및 기구학적 해석프로그램으로의 연결에 대한 방법이 강구되어야 하겠다.

이 연구가 해석용 프로그램과의 연결 단계까지 완성되면 설계자는 그림 1에 표시되어 있는 과정을 통하여 성능에 기초를 둔 조립체의 설계를 용이하게 수행할 수 있을 것이다.

2. 조립체 데이터 구조

기계 각 부품을 컴퓨터내에 표시하는 방법은 이미 많이 연구 되어 왔고 실제로 기존 GIS 에서 이미 쓰이고 있다. 그러나 조립체를 컴퓨터 내에 표시하는 방법, 즉 조립체에 포함되는 모든 부품과 그 부품들 간의 관계를 표시하는 방법은 아직 확립되어 있지 못한 상태이다. Liberman (1), Wesley (2),

Eastman (3), Tilove (4) 등에 의해 제안된 방법은 모두 각 부품의 조립된 상태의 위치 및 방향을 표시해 주는 4x4 변환행렬 (Transformation matrix)을 사용자 하여금 입력하게끔 요구하고 있다. 각 부품의 위치 및 방향에 해당되는 변환행렬을 입력시키는 방법은 많은 시간을 요하고 또한 실수를 저지르기 매우 쉬운 단점이 있다. Lee (5)에 의해 제안된 조립체 데이터 구조는 각 부품의 변환행렬 대신, 각 부품간의 조립된 상태에서의 만남조건만을 요구하므로 사용자의 역할을 극소로 하는 장점이 있어, 이 연구에서는 Lee 의 조립체 데이터 구조를 택하였다.

Lee 의 조립체 데이터구조는 그림 2에 표시된 바와 같이, 조립체는 몇몇의 부조립체로 형성되고 각 부조립체는 다시 몇몇의 부조립체 또는 부품으로 형성되어 표시된다. 그림에서 특기할 것은 'Virtual Link' 라는 것인데 이는 각각 만나는 부품이나 부조립체간의 만남 조건을 집합체라고 생각하면 된다. 이 연구에서 고려된 만남조건은 'Against' 와 'Fits' 로서 그림 3,4 에 표시되어 있다. 즉 Against 는

두 평면 사이에 서로 마주 닿는 조건이고 Fits 는 두 물체의 중심선이 한 직선상에 놓이는 조건이다.

Lee 의 조립체 데이터 구조를 쓸 경우, 사용자는 각 부품간의 만남조건을 입력시켜주면 이 만남조건들이 각각의 Virtual Link 를 형성하게 되고, 이 Virtual Link 들이 결국 각 부품간의 조립된 상태에서의 관계를 나타내어 주게 된다.

3. 만남조건으로 부터 각 부품의 위치, 방향 계산

각 부품의 위치 및 방향을 나타내는 가장 기본적인 방법은, 우선 각 부품에 고정된 좌표계를 설정하고 이 좌표계의 위치 및 방향을 그림 5에서와 같이 어느 한 기준 좌표계에 대하여 4x4 변환행렬을 이용하여 나타내는 방법을 들 수 있겠다.

각 부품의 변환행렬은 아래 식에서와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

따라서 각 부품의 위치 및 방향은 각 부품의 행렬 중 12개의 변수를 계산해 냄으로써 얻어질 수 있다(6). 그러나 이 방법은 필요 이상으로 변수가 많은 단점이 있어 각 부품의 변환행렬을 다음식으로 나타냄으로써 변수의 수를 여섯개로 줄일 수 있다.

$$T = \text{TRANS}(P_x, P_y, P_z) \text{ROT}(z, \phi) \text{ROT}(y, \theta) \text{ROT}(x, \psi)$$

즉 각 부품의 위치 및 방향은 $P_x, P_y, P_z, \phi, \theta, \psi$ 의 6개의 변수를 계산해 냄으로써 얻어진다. 위의 식에서 TRANS 와 ROT 는 각각 이송 및 회전 변환행렬이다.

각 부품의 6개의 변수는 주어진 만남조건을 만족하게끔 계산되는 것이므로, 두 가지 만남조건인 Against 와 Fits 각각에 대해 만족시켜야 할 식들을 유도하겠다.

3.1 Against 조건을 만족시키기 위한 식

그림 3의 Against 조건을 살펴보면 Against 조건을 만족시키기 위해서는 다음과 같은 식들이 성립

하여야 함을 알 수 있다.

우선 점 P_1 과 P_2 는 한 평면상에 있어야 하므로

$$(V'_{1x}, V'_{1y}, V'_{1z}) \left\{ \begin{matrix} P'_{1x} \\ P'_{1y} \\ P'_{1z} \end{matrix} \right\} - \left\{ \begin{matrix} P'_{2x} \\ P'_{2y} \\ P'_{2z} \end{matrix} \right\} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V'_{1x} \\ V'_{1y} \\ V'_{1z} \\ 0 \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} V_{1x} \\ V_{1y} \\ V_{1z} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P'_{1x} \\ P'_{1y} \\ P'_{1z} \\ 1 \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} P_{1x} \\ P_{1y} \\ P_{1z} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V'_{2x} \\ V'_{2y} \\ V'_{2z} \\ 0 \end{bmatrix} = T_2 \begin{bmatrix} V_{2x} \\ V_{2y} \\ V_{2z} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P'_{2x} \\ P'_{2y} \\ P'_{2z} \\ 1 \end{bmatrix} = T_2 \begin{bmatrix} P_{2x} \\ P_{2y} \\ P_{2z} \\ 1 \end{bmatrix}$$

여기서 T_1, T_2 는 부품 1 및 2의 기준 좌표계로 부터의 변환행렬이고 T_1 은 $P_{1x}, P_{1y}, P_{1z}, \phi_1, \theta_1, \psi_1$ 의 함수이고, T_2 는 $P_{2x}, P_{2y}, P_{2z}, \phi_2, \theta_2, \psi_2$ 이다.

또한 두 평면의 법선 벡터는 반대방향이어서야 하므로

$$V'_{1x} = -V'_{2x} \quad (2)$$

$$V'_{1y} = -V'_{2y} \quad (3)$$

$$V'_{1z} = -V'_{2z} \quad (4)$$

따라서 한개의 Against조건으로 부터 4개의 식이 유도 됨을 알 수 있다.

3.2 Fits 조건을 만족시키기 위한 식

그림 4의 Fits조건을 살펴보면 다음의 식들이 성립하여야 함을 알 수 있다.

즉 점 P_3 가 직선 $P_1 P_2$ 상에 있어야 하므로

$$\frac{(P'_{3x} - P'_{1x})}{(P'_{2x} - P'_{1x})} = \frac{(P'_{3y} - P'_{1y})}{(P'_{2y} - P'_{1y})} = \frac{(P'_{3z} - P'_{1z})}{(P'_{2z} - P'_{1z})} \quad (5)$$

또한 점 P_4 가 직선 $P_1 P_2$ 상에 있어야 하므로

$$\frac{(P'_{4x} - P'_{1x})}{(P'_{2x} - P'_{1x})} = \frac{(P'_{4y} - P'_{1y})}{(P'_{2y} - P'_{1y})} = \frac{(P'_{4z} - P'_{1z})}{(P'_{2z} - P'_{1z})} \quad (6)$$

여기서 $P'_{1x}, P'_{1y}, P'_{1z}, P'_{2x}, \dots$ 등은 앞의 Against 조건에서와 같은 방법으로 정의 되었다.

식(5), (6)으로 부터 각각의 Fits 조건당 6개의 식을 유도해 내었음을 알 수 있다.

3.3 자유 회전하는 부품

기계 조립체를 살펴보면, 핀, 볼트등의 부품과 같이 회전대칭축을 갖는 부품은 대칭축을 중심으로 자유로이 회전하여도 주어진 만남조건을 만족시키는 부품들이 있다. 다시 말해서 이러한 부품들은 무수히 많은 변환행렬을 가질 수 있으므로 인공적인 구속을 가하지 않으면 수치해석적 방법에 의해 해를 구할 때 해가 수렴하지 못하게 하는 요인으로 작용할 수 있다. 그림 6의 볼트를 보면, 볼트는 회전축인 z축을 축으로 임의로 회전할 수 있으므로 z 축 방향으로의 회전을 구속시킬 필요가 있다. 이는 다음의 식을 추가함으로써 가능하여 진다.

$$\phi = 0 \quad (7)$$

자유로 회전하는 부품의 회전대칭축이 z 축과 일치하지 않을 경우는 그 부품의 회전축이 z 축이 되도록 먼저 좌표 변환을 시키면 (7)식을 그대로 사용할 수 있다.

3.4 비선형 연립방정식의 해법

앞에서 보았듯이, N 개의 부품으로 이루어지고 조립체에 대해 $6x(N-1)$ 개의 변수의 해를 구하여야 함을 알 수 있다. 왜냐하면 N 개의 부품중

어느 한 부품의 좌표 계를 기준좌표 계로 잡을 수 있고, 나머지 (N - 1)개의 좌표 계의 위치 및 방향은 각각 6개의 변수로 결정되기 때문이다.

또한 주어진 만남조건으로 부터 얻어지는 수식의 수는 4x(Against 만남조건 수)+6x(Fits 만남조건 수)+1x(자유회전하는 부품의 수)가 됨을 알 수 있다.

위의 결과를 토대로 많은 조립체를 분석해 본 결과 수식의 수가 항상 변수의 수보다 많음이 입증되었다. 따라서 비선형 수식의 수가 변수의 수보다 많은 연립 방정식을 푸는 수치해석적 방법이 강구되어야 하겠다. 이를 위해 Newton-Raphson iteration 방법과 Least Square 방법(7)이 결합되어 사용되었으며, 아래와 같이 요약할 수 있다.

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, m \quad m \leq n)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ -f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ -f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{즉 } [A]_i \{\Delta X\}_i = \{R\}_i \quad (9)$$

여기서 $\{\Delta X\}_i$ 는 i번째 iteration 에서 각 변수에 수정해 줘야 할 값이고 이 값만 계산되면 다음 iteration 으로 진행할 수 있다. 식(9)에서 $[A]_i$

는 m x n 행렬로 역행렬을 구할 수 없으므로 양변에 $[A]_i^t$ 를 곱함으로써 역행렬을 가능하게 할 수 있다.

$$\text{즉 } [A]_i^t [A]_i \{\Delta X\}_i = [A]_i^t \{R\}_i \quad (10)$$

$$\text{따라서 } \{\Delta X\}_i = \{[A]_i^t [A]_i\}^{-1} [A]_i^t \{R\}_i \quad (11)$$

앞의 식(9)와 (11)에 의해 iteration 이 진행되고, $\{R\}$ 의 모든 요소가 0 에 가까와 질때 iteration 은 중지되고 해가 구해진다.

4. 응용예

그림 7, 8, 9에서 보는 바와 같이 두가지 조립체에 대해 만남조건을 정의하고 그로부터 각 부품의 위치 및 방향을 계산해 보았다. 그림 7에서는 같은 조립체에 대해 종전의 Lee 와 Andrew 의 방법 계산시간과 비교 시킴으로써 새 방법의 우수성을 입증 하였다. 그림 8과 9에서는 부품 13개를 가진 조립체에 대해 40 CPU 초 정도의 계산시간이 소요됨을 보임으로써 본 프로그램의 실용화 가능성을 보여주었다.

5. 결론

이 연구의 결과인 조립체 모델링 프로그램은 다음과 같은 장점을 갖고 있다. 첫째, 종래의 조립체 모델링의 방법보다 훨씬 쉬운 방법으로 조립체를 모델링 할 수 있게 되었다. 둘째, 조립될 수 없는 부품으로 조립체의 모델링을 시도할 경우 미리 감지해 내는 기능이 추가 되었다. 왜냐하면 조립 불가능할 경우 각 부품의 위치 및 방향계산이 불가능하므로 조립체의 모델이 형성되지 않기 때문이다. 셋째, 조립체를 형성하고 있는 부품중 어느 한 부품 또는 여러 부품의 크기가 변해도 만남조건만 같으면 자동으로 새로운 조립체를 모델링하는 기능이 있다.

마지막으로, 조립체 모델로부터 기구학 및 동역학적 해석 프로그램과의 연결이 가능하므로 조립체에 대한 성능해석을 용이하게 하였다.

6. 참고 문헌

1. Liberman, L. I. and Wesley, M. A., "AUTOPASS: An Automatic Programing System for Computer Controlled Mechanical Assemblies", IBM J. Res Develop, pp321-333, July 1982.
2. Wesley, M. A., Lozano-Perez, T., Liberman, L. I., Lavin, M. A., and Grossman, D. D., "A Geometric Modeling System for Automated Mechanical Assembly", IBM J. Res Develop, Vol.24, No.1, pp64-74, January 1980.
3. Eastman, C. M., "The Design of Assemblies",

In SAE Technical Paper Series, Society of Automotive Engineers, Inc., 1981.

4. Tilove, R.B., "Extending Solid Modeling Systems for Mechanism Design and Kinematic Simulation", IEEE Computer Graphics & Applications, Vol.3, No.3, pp9-19, May 1983.
5. Lee, K. and Gossard, D. C., "A Hierarchical Data Structure for Representing Assemblies : Part 1", Computer Aided Design, Vol.17, No.1, 1985.
6. Lee, K. and Andrews, G., "Inference of the Positions of Components in an Assembly : Part 2", Computer Aided Design, Vol.17, No.1, 1985.
7. Lawson, C. L. and Hanson, R. J., Solving Least Squares Problems, Prentice-Hall, 1974.

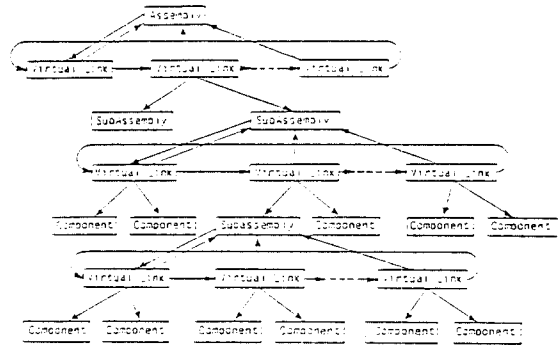


그림 2 조립체의 데이터 구조

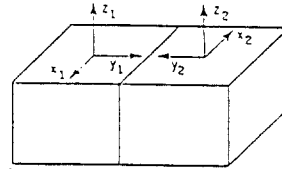
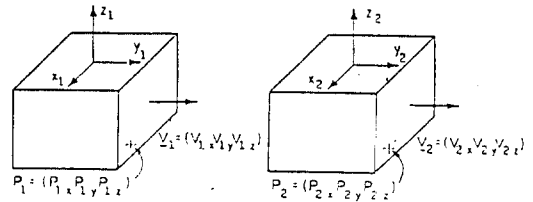


그림 3 Against 만남 조건

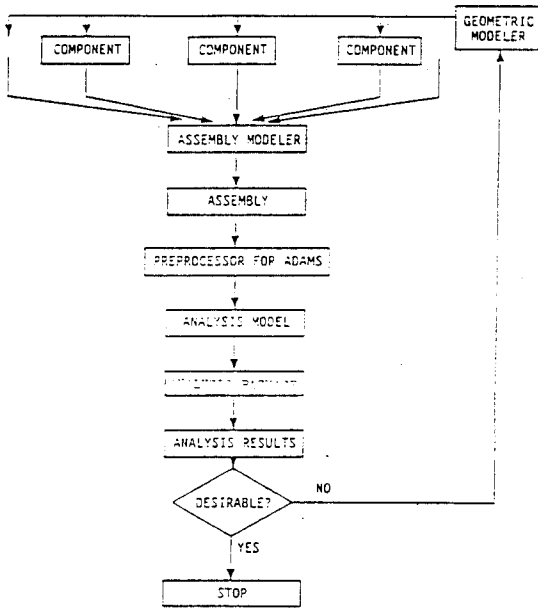


그림 1 조립체의 설계 과정

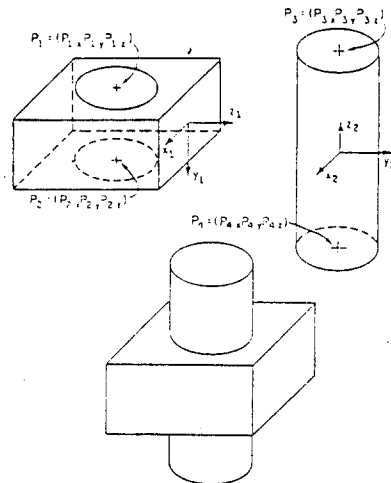


그림 4 Fits 만남 조건

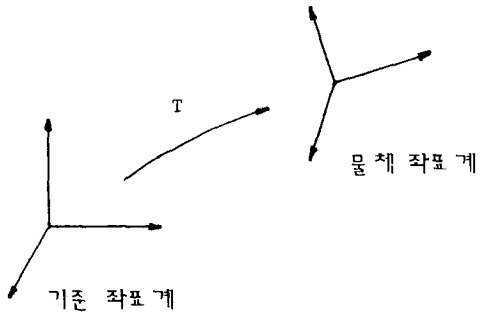


그림 5 물체 좌표계의 변환행렬

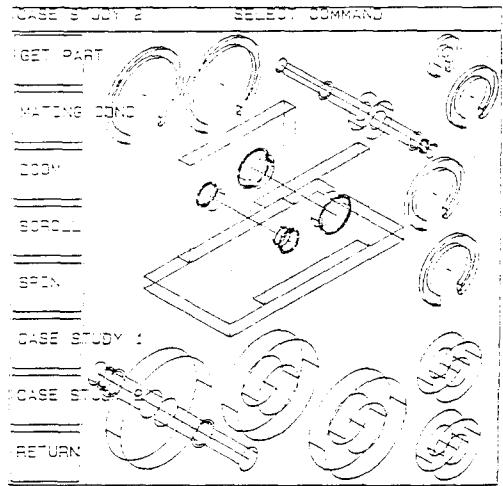


그림 8 응용예 II 의 초기조건

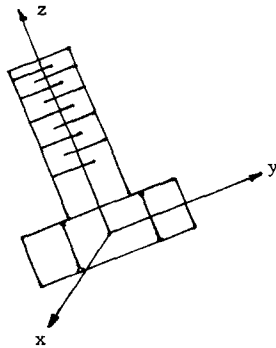


그림 6 자유 회전 부품

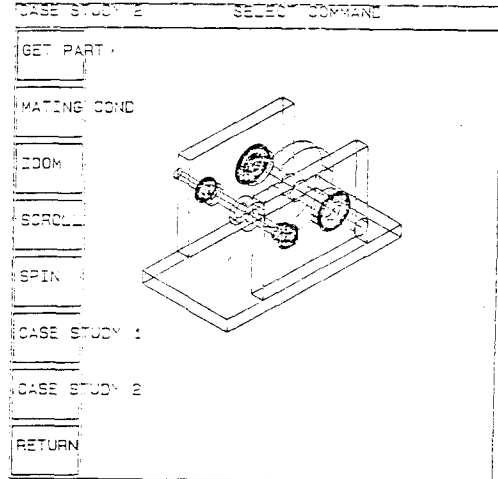


그림 9 응용예 II 의 결과

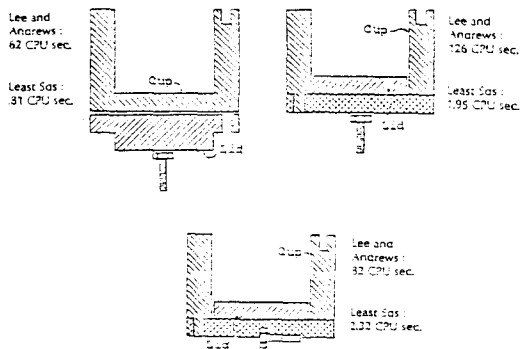


그림 7 응용예 I