

분해도를 이용한 조립순서 추론에 관한 연구

· 신 철근, 조 형석
한국과학기술원 정밀공학과

On The Generation of Robotic Assembly Sequences Using
Disassemblability Based on Separable Direction

C. K. Shin, H. S. Cho

Department of Precision Eng. and Mechatronics, KAIST

Abstract This paper presents a method for the automatic generation of assembly sequences based on the recursive extraction of a preferred part along with the verification of its disassemblability. To verify the disassemblability of the part we inference the geometric precedence constraints using a method of extracting separable directions for the part and determine the disassemblability cost by the separability and stability cost. The proposed method provides a local optimal solution of finding a cost effective assembly plan, and the feasibility of calculating robot motion programs by evaluating separable directions in flexible manufacturing application. A case study is given to illustrate the concepts and procedure of the proposed scheme.

1. 서 론

조립 공정을 자동화하기 위해서는 먼저 조립 대상품의 요구 기능과 각 부품의 조립 특성을 분석하여 이에 대한 적절한 조립순서의 결정이 선결되어야 한다. 즉 조립공정의 순서에 따라서 조립공정의 난이도, 고정구의 복잡도, 그리고 불량품의 발생률 및 생산량 등이 직 간접으로 영향을 받게 되고 이에 따라 제품의 생산단가가 좌우되기 때문이다. 조립 대상품의 조립 순서를 결정하기 위한 조립 특성 인자는 크게 부품간의 상호 연결(liaison)인자와 연결간의 선행 구속 조건(precedence constraint)인자로 나눌 수 있다. 이러한 연결 인자의 모델링과 선행 구속 조건의 추론 및, 그리고 이를 이용한 조립순서 결정 방식에는 "직접 결정방식"으로서 질의 응답 방식[1-2]과 지식 베이스 방식[3-4]이 있으며 "간접 결정방식"으로서 기하학적 추론 방식[5-6]과 간이 기하학적 방식[7-8]의 4가지 방식이 있어 왔다.

그러나 기존의 연구방법은 각기 다음과 같은 애로사항이 있었다. 즉 질의 응답 방식(Query and Answer)은 간편한 대신 구속조건 추론시 사용자에게 각 연결의 선행 및 후행조립의 가부 혹은 그 실제 연결을 질의해야 하므로 사용이 불편하고 착오의 원인이 되었으며 이에 반해 지식베이스(Knowledge base) 방식은 체계적인 제품의 모델링을 바탕으로 부품 그룹핑 혹은 부품 오더 계산을 통한 구속조건 및 조립순서의 자동 추론을 시도했으나, 규칙의 적용성에 제한이 있었다. 이에 비해 기하학적 추론방식(Geometric Reasoning)은 제품의 형상에 기초한 구속조건 및 조립순서의 자동추론을 위해서 기하학적

추론을 도입하였지만 이는 너무 방대한 CAD 데이터를 처리해야 하고 조립 기술상의 중요한 기술적 데이터도 얻기 어려웠다. 이의 해결을 위해 부품형상을 직육면체로 단순화시키고, 조립관계정보를 입력하는 단순화방법이 시도되었으나 아직도 구속조건의 추론이 부품의 기하학적 형상정보를 바탕으로 한 기하학적 추론에 의존하므로 그 기하학적 데이터 입력과 추론에 많은 시간과 노력이 소요되었으며, 복잡한 형상의 조립품에 있어서는 정보의 단순화에 따른 오차 발생의 가능성 또한 배제할 수 없었다.

본 논문에서는 이상과 같은 문제점들을 보완하기 위해서 계산량이 적고 기하학적 조립 구속 조건의 추출이 비교적 용이한 분해법에 의한 추론 방식을 이용하였다. 또한 기하학적 추론 방식의 단점인 방대한 입력 CAD data를 단순화 시키면서도 가능한 모든 조립 특성 인자를 추론 할 수 있도록 하였고 분해되는 부품의 분해 가능한 영역을 추론하여 실제 부품의 조립 작업시 로봇트 핸드의 접근 궤적에 대한 영역 산출이 가능하도록 함으로써 로봇트를 이용한 조립 작업과의 연결을 용이하도록 하였다.

2. 조립품의 모델링(Product Modeling)

<정의 1> 조립품의 구성 n개의 부품이 서로 결합되어 이루어진 조립품 A는 n개의 부품의 집합 P와 두 부품간의 연결의 집합 L로 구성되며, $A=(P,L)$ 로 나타낸다. 즉, 집합 P와 집합 L은 각기

$$P=\{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$$

$$L=\{l_{jk} | j, k=1, 2, 3, \dots, n, j \neq k\}$$

로 표현되며, 원소 l_{jk} 는 부품 P_j 와 부품 P_k 사이의 연결을 의미한다.

<정의 2> 조립부품의 연결방향 조립 부품의 연결방향은 대상 조립품을 기준으로 하는 3차원 극좌표상에서 크기가 1인 단위 벡터로 나타낸다. 여기서 극좌표상의 기준좌표 방향은 대상 조립품의 전방을 X, 좌측을 Y, 상방을 Z로 하여 나타낸다.

<정의 3> 연결의 표현 연결 l_{jk} 는 부품 P_j 와 부품 P_k 사이의 연결을 의미하며 부품 P_j 를 기준으로 부품 P_k 가 어느 방향에 어떤 방법으로 연결되어 있는지를 접촉 연결군 $C_{jk}(\Theta, \Phi)$ 과 삽입연결 $f_{jk}[(\theta, \phi), \alpha, \beta]$ 를 사용하여

$$l_{jk} = liaison(P_j, C_{jk}(\Theta, \Phi), f_{jk}[(\theta, \phi), \alpha, \beta], P_k)$$

로 나타낸다. 여기서 접촉 연결군 $C_{jk}(\Theta, \Phi)$ 는 다음과 같이 모델링 되어진다.

$$C_{jk}(\Theta, \Phi) = \{C_{jk}(\theta_i, \phi_i) : i=1, 2, \dots, r\}$$

- (θ_i, ϕ_i) : 부품 P_j 를 기준으로 부품 P_k 의 i 번째 접촉 연결 방향
- r : 부품 P_j 와 P_k 간의 접촉연결 방향의 수

이때 C_{jk} 는 접촉연결 방법을 나타내며 평면접촉(pc)로 표시한다. 또한 삽입연결 $f_{jk}[(\theta, \phi), m, \beta]$ 는 다음과 같이 모델링 한다.

- (θ, ϕ) : 부품 P_j 를 기준으로 부품 P_k 의 삽입연결 방향
- m : 1방향 복수 삽입연결을 갖는 경우의 삽입봉의 수
- β : 삽입봉 단면의 형상 계수 ($\beta \leq 10$)
- <(예) 4각형($\beta=4$), 10각형이상($\beta=10$)>

이때 f_k 는 삽입연결의 방법을 나타내며 경사삽입(tf), 혈거운삽입(cf), 나사삽입(sw), 강제삽입(pf), 리벳삽입(ri) 등으로 표시한다.

3. 분리도(Separability)

3.1 분리가능 영역(Separable Directions)의 추론

3.1.1 단위 접촉방향의 분리가능 영역 추론

(그림 3-(a))에서와 같이 부품 P_k 가 접촉면 법선벡터 \vec{C}_{jk} 의 방향으로 부품 P_j 위에 마운팅되어 있다고 하자. 이때 부품 P_k 가 부품 P_j 로부터 분리될 수 있는 가능한 모든 방향은 (그림 3-(b))의 벡터 \vec{S}_{ujk} 로 나타낼 수 있으며 이 때 \vec{S}_{ujk} 를 단위 접촉 방향의 분리가능 영역(USDs)이라고 하고 식 (1)과 같이 정의한다.

$$\vec{C}_{jk} \cdot \vec{S}_{ujk} \geq 0 \quad \text{----- (1)}$$

즉 S_{ujk} 는 접촉면에 대한 법선벡터 \vec{C}_{jk} 와의 벡터 내적값이 항상 zero보다 크거나 같은 값을 가져야 하며 이들 \vec{S}_{ujk} 의 영역은 (그림 3-(b))에서와 같이 부품 P_j 상에 놓인 반구(hemi-sphere)의 표면적으로 나타낼 수 있다. 이와같이 임의 방향 \vec{C}_{jk} 에 대한 \vec{S}_{ujk} 는 구의 표면적에 대한 임의 방향을 중심으로 하는 반구 표면적으로 나타낼수 있으며 (θ, ϕ)축을 기준으로 하는 평면 좌표로 mapping하면 (그림 4)와 같이 된다.

\vec{S}_{ujk} 의 mapping 분리가능 방향 \vec{S}_{ujk} 의 방향 좌표들 (θ_s, ϕ_s)라고 하고 모델링된 연결관계 방향 데이터로부터 얻어지는 C_{jk} 의 방향 좌표들 (θ_c, ϕ_c)라 하면 이들의 직교 좌표는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} S_{ujk}(x_s, y_s, z_s) &= S_{ujk}(\cos \theta_s \cos \phi_s, \cos \theta_s \sin \phi_s, \sin \theta_s) \\ C_{jk}(x_c, y_c, z_c) &= C_{jk}(\cos \theta_c \cos \phi_c, \cos \theta_c \sin \phi_c, \sin \theta_c) \end{aligned} \quad \text{----- (2)}$$

식(1)을 식(2)를 이용하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_c x_s + y_c y_s + z_c z_s &\geq 0 \quad \text{이므로} \\ x_c(\cos \theta_s \cos \phi_s) + y_c(\cos \theta_s \sin \phi_s) + z_c(\sin \theta_s) &\geq 0 \end{aligned} \quad \text{----- (3)}$$

와 같이 나타낼 수 있으며 이들 식으로부터 연결관계 방향 데이터에서 얻어진 임의의 \vec{C}_{jk} 벡터에 대한 \vec{S}_{ujk} 의 영역을 mapping된 (θ, ϕ)좌표상에서 구현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_s &> \tan^{-1}[-1/z_c(x_c \cos \phi_s + y_c \sin \phi_s)], \quad \text{if } z_c > 0 \\ \theta_s &\geq -\pi/2 && \text{if } z_c = 0 \\ \theta_s &< \tan^{-1}[-1/z_c(x_c \cos \phi_s + y_c \sin \phi_s)], \quad \text{if } z_c < 0 \\ &(-\pi/2 \leq \phi_s \leq \pi/2, \quad 0 \leq \theta_s < 2\pi) \end{aligned} \quad \text{----- (4)}$$

USDs의 추론에 (그림 2)에서 모델링된 부품 P_1 과 P_2 의 접촉연결 데이터중 방향좌표 ($-20^\circ, 90^\circ$)를 \vec{C}_{jk} 의 방향벡터값으로 하면 식(2),(4)로부터 $\theta_s \leq \tan^{-1}[2.748 \sin \phi_s]$ 와 같이 얻어질 수 있으며 이를 mapping된 (θ, ϕ)좌표상에서 나타내면 (그림 5)와 같다.

삽입연결의 USD 추론 삽입연결은 축 방향 이외의 모든 방향에 대해서 운동의 제한을 받는 연결이므로 삽입연결의 분리방향은 주어진 삽입연결 데이터의 좌표방향만이 가능하게 된다.

3.1.2 복합 접촉방향의 분리가능 영역

부품과 부품간의 연결은 일반적으로 1방향 이상의 복합 접촉방향을 가지며 이와 같이 복합 접촉 방향을 갖는 부품의 분리 가능한 방향은 단위 접촉 방향의 USDs를 AND 연산한 값으로 구해진다. 즉 부품 P_k 가 접촉하고 있는 인접 부품군 P_j 로부터 분리될 수 있는 가능한 모든 방향은 벡터 \vec{S}_{jk} 로 정의하며 이때 \vec{S}_{jk} 를 복합접촉 방향의 분리가능영역(CSDs)이라 한다. 이는 식(3-7)과 같이 P_k 가 인접 부품군 P_j 와 갖는 모든 USDs를 AND 연산한 값으로 구해진다.

$$\vec{S}_{jk} = \bigcap_m \vec{S}_{ujk} \quad (m : P_k \text{와 } P_j \text{간의 모든 접촉 방향의 수}) \quad \text{-- (5)}$$

식(5)를 설명하기 위하여 (그림 6)과 같이 부품 P_k 가 부품 P_j 에 대하여 y 축과 z 축 방향의 2방향 직교접촉을 갖는 간단한 예를 들어 보기로 하자. 그림에서 보듯이 mapping된 (θ, ϕ)좌표평면을 기준으로 할 때 벡터 \vec{S}_{jk} 는 $0 \leq \theta \leq \pi/2, 0 \leq \phi \leq 2\pi$ 의 영역을 가지며 벡터 \vec{S}_{jk} 는 $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2, 0 \leq \phi \leq \pi$ 의 영역을 갖는다. 이를 식(5)를 이용하여 AND 연산된 \vec{S}_{jk} 를 구해보면 $0 \leq \theta \leq \pi/2, 0 \leq \phi \leq \pi$ 의 영역을 갖게되고 이 결과로부터 복합 접촉관계를 가지고 있는 부품 P_k 가 부품 P_j 로부터 분리될 수 있는 방향은 (θ, ϕ)좌표 평면상에서 중복된 빛금으로 표시된 영역임을 알 수 있게 된다.

CSDs의 추론에 (그림 2)에서 모델링된 부품 P_1 과 P_2 의 연결관계는 3방향의 접촉연결과 1방향의 삽입연결을 가지며 이를 공간좌표상에서의 방향 벡터로 도시하면 (그림 3-5)의 (a)와 같다. 이들중 3방향의 접촉연결에 대한 \vec{S}_{12} 를 mapping된 (θ, ϕ)좌표상에서 도시하고 이들의 교집합인 CSDs, \vec{S}_{12} 를 구해보면 (그림3-5) (b)의 빛금친 영역과 같다. 이상의 그림에서 보듯이 접촉연결만 고려하였을 경우에는 부품 P_2 가 부품 P_1 으로부터 빛금친 영역의 방향으로 분리가 가능하며 이 때 삽입연결 \vec{f}_{12} 의 USD가 빛금친 영역안에 존재하므로 부품 P_2 는 삽입연결 방향 \vec{f}_{12} 방향으로 분리가 가능하게 된다.

3-2. 분리도(Separability)의 정의

앞 절에서 임의의 부품 P_k가 분리될 수 있는 영역을 구 (sphere)의 표면적으로 mapping하여 나타내었으며 이를 통하여 mapping된 표면적의 영역이 크면 클수록 분리가 용이하다는 것을 알 수 있었다. 이때 이를 이용한 분해순서를 찾기 위해서는 분리 가능한 여러 부품들 중 어떤 부품의 분리가 가장 용이한가를 판정하는 판정기준이 요구되며 이를 위하여 부품 P_k가 분리되기 쉬운 정도를 수치화한 값으로 계산함으로써 실제 부품 P_k의 분리도를 알기 쉽게 표현할 필요가 있게 된다.

접촉연결에 대한 분리 가능 영역의 표면적(A_{sp}^c)계산

각 접촉 연결의 USDs에 대한 분리가능 영역을 (θ, φ)좌표상에서 식(4)를 이용하여 구한 후 이들에 대한 복합영역(CSDs)을 (θ, φ)좌표를 기준으로 한 구의 표면적으로 계산하면 다음과 같다.

$$A_{sp}^c = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta \, d\theta d\phi \quad \text{----- (6)}$$

여기서 식(4)의 분리 가능영역에 대한 경계 좌표값 (Boundary Separable Directions), θ_b를 φ_s, 0 ≤ φ_s ≤ 2π에 대한 식으로 나타내면 식(7)과 같으며

$$\theta_b = \tan^{-1}[-1/z_c(x_c \cos \phi_s + y_c \sin \phi_s)] \quad \text{----- (7)}$$

$$= \begin{cases} \theta_b^+ & \text{if } z_c \geq 0 \\ \theta_b^- & \text{if } z_c < 0 \end{cases}$$

이를 이용하여 식(6), 적분식의 상하한값 φ₂, φ₁, θ₂, θ₁을 구할 수 있다. 복합접촉방향에 대한 분리 가능 영역의 계산은 도식적으로는 (그림 7-(b))와 같이 구할 수 있으나 이를 구의 표면적 값으로 환산하는데는 약간의 기교를 필요로 한다. (그림 7-(b))에서 접촉 연결의 Z ≥ 0인 경우는 C₁₂(45°, 0°), C₁₂(60°, 180°)의 2경우가 존재하며 이에 대한 (θ_b⁺, φ_s)좌표값들과 Z < 0인 경우의 C₁₂(-20°, 90°)에 대한 (θ_b⁻, φ_s)좌표값들로 부터 복합 접촉 방향에 대한 식(6)적분식의 상하한값을 구하게 된다. 즉 각 φ_s에 대한 (그림 7-(b))의 min(θ_b⁻) - max(θ_b⁺) ≥ 0 인 구간만이 분리가능 영역이 되며 이 구간의 φ_s의 초기치 및 최종치가 각각 φ₁과 φ₂가 되고 이 구간내의 각 값에 대한 min(θ_b⁻)와 max(θ_b⁺)값이 각각 θ₁, θ₂가 된다.

삽입 연결에 대한 분리 가능 영역의 표면적(A_{sp}^f)계산

삽입연결의 분리가능 방향 USD에 대한 A_{sp}^f는 구의 표면적 상에 1개 점으로 나타나며 이는 모델링 입력 좌표의 resolution과 직접 관계를 갖는다.

$$A_{sp}^f = r^2$$

$$= 3.046 \times 10^{-4} \quad (\text{when } r = 1 \text{ deg} = \pi/180 \text{ rad}) \quad \text{--- (8)}$$

접촉 연결에 대한 분리도(R_{sp}^c)의 정의

부품간의 1방향 접촉을 이루고 있을 때가 분리가능 영역의 표면적이 2π로 가장 크게 되며 이 최대값을 max(A_{sp})라고 할 때 R_{sp}는 식(6)으로부터 다음과 같이 정의된다.

$$R_{sp}^c = \frac{A_{sp}^c}{\max(A_{sp})} = \frac{\int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta \, d\theta d\phi}{2\pi} \quad \text{---- (9)}$$

임의의 대상부품 P에 대한 분리 가능성은 식 (9)로 부터 계산된 R_{sp}^c값이 클 수록 높게 된다.

4. 분해도(Disassemblability)를 이용한 조립순서의 추론

대상 제품의 조립 순서를 추출하기위한 방법으로서 부품이 조립되어지는 순서를 하나하나 직접 찾아나가는 직접추론방식(Direct Assemble)과 완제품 상태에서 분해가능한 부품의 분해 우선순위를 추론하여 이의 역순을 조립순서로 결정하는 분해법을 이용한 추론방식(Assembly by disassembly)[9]로 크게 나눌 수 있다. 본 논문에서는 분해가능한 후보부품의 Separability Cost 및 Stability Cost 를 고려하여 부품의 분해도(Disassemblability)를 계산하고 이중 분해도가 가장 큰 부품을 선정하여 분해해 나가는, 분해법을 이용한 추론 방식을 채택하였다.

4.1 분해도(Disassemblability)의 계산

<정의 4> 분해도(Disassemblability)

분해 가능한 부품의 분해도(W_d)는 대상 부품이 얼마나 용이하게 분리될 수 있는가를 나타내는 Separability Cost (X_{sp})와 대상 부품이 분해되고 난 후 잔여 조립 부품들이 갖는 Stability Cost (X_{st})와의 관계식으로 나타낼 수 있으며 식 (11)과 같이 정의 된다.

$$W_d = \gamma_1(\alpha X_{sp} + (1-\alpha)X_{st}) \quad \text{----- (11)}$$

여기서, 0 ≤ α ≤ 1, 0 ≤ W_d, X_{sp}, X_{st} ≤ 1

$$\gamma_1 = \begin{cases} 0 & \text{if } X_{sp} = 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{이다.}$$

이때 X_{sp} 와 X_{st}는 앞장에서 구한 분리도(Separability)의 함수로 이루어지며 이에 대한 각각의 정의는 다음과 같다.

4.1.1 Separability Cost (X_{sp})

Separability cost, X_{sp}는 분리 가능한 후보 부품이 현재 조립되어 있는 부품의 집합으로부터 얼마나 용이하게 분리될 수 있는가를 나타내는 수치이다. 여기서 현재 조립되어 있는 부품의 집합을 베이스 조립체라고 정의한다.

<정의 5> Separability Cost, X_{sp}

분리가능한 후보부품의 Separability Cost, X_{sp}는 후보부품의 분리도, R_{sp} 및 삽입 연결에 대한 각종 고려 인자들의 함수로 정의된다.

$$X_{sp} = \gamma_2(R_{sp}^c + R_{sp}^f) C_M^{(m/\log_{10} \beta)} \quad \text{----- (12)}$$

$$\gamma_2 = \begin{cases} 0 & \text{if 접촉연결이 존재하지만} \\ & \text{접촉연결의 분리도 } R_{sp}^c=0 \text{ 일 경우} \\ & \text{if 2방향 이상의 삽입연결이 존재할 경우} \\ 1 & \text{Otherwise} \end{cases}$$

R_{sp}^c : 접촉연결에 대한 분리도

R_{sp}^f : 삽입연결에 대한 분리도

m : 1방향 복수 삽입연결을 갖는 삽입봉의 수

β : 삽입봉 단면의 polygon 형상계수

(예) 3각형 (β= 3), 5각형 (β= 5)

12각형 (β=10), 원 (β=10)

C_M : 삽입결합 방법에 따른 분리 용이도 계수

(<표 1> 참조)

4.2.2 Stability Cost (X_{st})

Stability Cost, X_{st} 는 임의의 부품 P_k 가 베이스 조립체 BA_i 로부터 분리될 때 발생하는 베이스 조립체간의 상대적 안정도이다. 즉 임의의 부품 P_k 가 분리되고 난 후 부품 P_k 의 분리로 인해 잔류 부품들의 불안정도가 증가한다면 이는 베이스 조립체의 안정도 관점에서 부품 P_k 의 분해는 결코 바람직하지 못하다. 따라서 부품 P_k 의 분해에 따른 베이스 조립체의 불안정도 증가가 작을수록 좋다.

<정의 6> 불안정 엔트로피 베이스 조립체의 총 불안정도는 베이스 조립체내의 각 구성부품이 갖는 Separability Cost, X_{sp} 의 총합이며 이 때 베이스 조립체 BA_i 가 갖는 총 불안정도를 BA_i 의 불안정 엔트로피 E_i 라고 정의한다.

<정의 7> Stability Cost, X_{st}

분리 가능한 후보부품의 Stability Cost, X_{st} 는 임의의 후보 부품 P_k 가 분해되기 전, 부품 P_k 를 포함한 베이스 조립체 BA_i 가 갖는 불안정 엔트로피, E_i 와 P_k 가 분해되고 난 후, 베이스 조립체 BA_{i-1} 이 갖는 불안정 엔트로피, E_{i-1} 과의 상대적 안정도로 정의된다.

$$X_{st} = \frac{1}{1 + \exp(\Delta E/T)} \quad (13)$$

$$\Delta E = E_{i-1} - E_i \quad (2 \leq i \leq n) \quad (14)$$

여기서 T는 jig/Fixture의 quality에 비례하는 상수로서 (그림 8)에서 보는 바와 같이 T의 값이 클수록 ΔE 의 값에 대해 X_{st} 가 민감하게 변화하게 된다. 즉 T의 값의 증가는 베이스 조립체 BA_i 의 불안정도에 대한 가중치를 증가시킴으로써 식(11)의 분해도, W_d 에서 Stability Cost, X_{st} 의 비중을 높게 된다.

ΔE 값의 근사화 베이스 조립체 BA_i 내의 임의의 분해 후보 부품 P_k 가 분해되면 P_k 와 접해 있던 부품들의 Separability Cost, X_{sp} 값들이 P_k 가 분해됨에 따라 변화되게 된다. 이때 P_k 와 직접 접하지 않는 부품들도 P_k 의 분해에 의해 간접적인 영향은 받을 수 있으나 큰 변화는 발생하지 않으므로 추론에 필요한 계산량을 줄이기 위하여 그 크기는 무시할 수 있다고 가정한다. 이 가정에 의하여 베이스 조립체 BA_i 가 부품 P_k 의 분해로 인해서 받게되는 엔트로피 E_i 의 변화는 부품 P_k 와 직접 인접해 있는 부품들의 총 X_{sp} 값 변화량으로 나타낼 수 있게 된다. 따라서 식(14)의 ΔE 는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\Delta E \approx \left[\sum_{j=1}^l X_{sp}(P_j) \right]_{i-1} - \left[\sum_{j=1}^l X_{sp}(P_j) \right]_i \quad (15)$$

(l : 부품 P_k 와 연결관계를 갖는 부품 P_j 의 갯수)

$\left[\sum_{j=1}^l X_{sp}(P_j) \right]_{i-1}$: P_k 가 분해되고 난 후, 베이스조립체 BA_{i-1} 부품들중 P_k 와 인접관계를 가졌던 부품 P_j 들의 X_{st} 총합

$\left[\sum_{j=1}^l X_{sp}(P_j) \right]_i$: P_k 가 분해되기 전, 베이스 조립체 BA_i 내의 부품들중 P_k 와 인접관계를 가지고 있는 부품 P_j 들의 X_{st} 총합

4.1 조립순서의 추론

본 장에서는 (그림 1)의 컴팩트 디스크 카세트 데크용 레이저 발생기를 대상제품으로 하여 앞 장에서 제시한 조립순서 추론 알고리즘에 대한 적용성을 검토하였다. 본 제품은 총 10개의 부품으로 구성되어 있으며 조립이 완료된 완제품의 형상은 (그림 1)의 우측 하단에 보는 바와 같다. 먼저 분해도, W_d 를 구하는 식(11)에서 X_{sp} 와 X_{st} 의 비를 결정하는 가중치, α 값을 0.5로 주고 또한 이때 stability cost, X_{st} 를 구하는 식(4-3)에서 Jig/Fixture의 quality를 결정하는 비례상수, T의 값을 0.1로 한 상태에서 조립순서를 추론하였다. 이상의 조건에 대해 (그림 9)의 결과에서 나타난 바와 같이 완제품 상태인 베이스 조립체, BA_{10} 에서 분해 가능한 분해 대상부품은 P4, P6, P10 등이며 이중에서 separability cost, X_{sp} 의 값이 가장 큰 부품은 screw부품인 P6, P10 등이다. 그러나 이들 screw부품들은 이들의 분해시 베이스 조립체의 불안정도를 증가시키는 결과를 가져오며 이에따라 부품 P4에 비해 현저히 낮은 stability cost, X_{st} 를 갖게 된다. 따라서 3개의 분해 가능 부품중 식(4-1)에 의하여 구한 분해도, W_d 의 값은 부품 P4의 경우가 가장 크게되며 이에따라 부품 P4가 가장 먼저 분해된다. 마찬가지로 방법에 의해 부품 P4가 분해되고 난 베이스 조립체, BA_9 의 분해 가능 부품은 P6, P10 등의 screw부품이며 이들중 stability cost, X_{st} 의 값이 보다 큰 부품 P6가 더 큰 분해도, W_d 의 값을 갖게되어 먼저 분해되게 된다.

이와같은 방식에 의해 매 단계에서 추론된 분해순서는 P4-P6-P5-P3- P10-P9-P8-P7-(P1, P2)의 순이 되며 따라서 조립순서는 분해순서의 역순인 (P1, P2)-P7-P8-P9-P10-P3-P5-P6-P4의 순이 된다. 이때 베이스 조립체, BA_2 의 남은 두 부품 P1, P2는 다른 부품으로부터의 영향이 전혀없이 서로간의 연결관계에 의한 영향만 존재하므로 같은 분해도값을 갖게 되며 조립시 어떤 부품을 먼저 조립하여도 상관이 없는 것으로 나타난다. 그러나 실제 조립 작업시에는 부품의 형상에 따른 tooling 및 fixing 등의 작업난이도와 특히 부품의 조립 위치에 따른 중력의 영향등이 큰 변수로 등장하게 되며 따라서 본 논문에서는 이들 중력에 대한 영향에 대해서 향후 연구과제로 다루기로 하겠다.

5. 결 론

조립 자동화에 있어 중요한 고려 인자인 자동 조립순서 추론에 대하여 다음과 같이 연구하였다. 먼저 기하학적 추론 방식의 단점인 방대한 입력 데이터를 최소화시키면서도 기하학적 구속조건 추론에 필요한 가능한 모든 조립 특성인자를 나타낼 수 있도록 하기 위하여 구성 부품간의 연결관계를 구 좌표상의 방향 벡터로 표현하였다. 또한 부품의 매 분해 단계마다, 분해 가능한 후보부품중 부품의 분리도 및 베이스 조립체의 안정도가 높은 분해부품을 선정함으로써 unique한 local optimal 조립순서를 추론하였고 이에따라 부품수가 많은 조립품에 대해서도 현저한 계산량의 감소로 인하여 조립순서의 추론이 용이하도록 하였다. 그리고 분해되는 부품의 분해 가능한 영역을 추론하여 실제 조립작업시에 필요한 로봇트 핸드의 접근궤적 영역을 산출함으로써 로봇트를 이용한 조립작업과의 연결을 용이하도록 하였다.

참고문헌 (References)

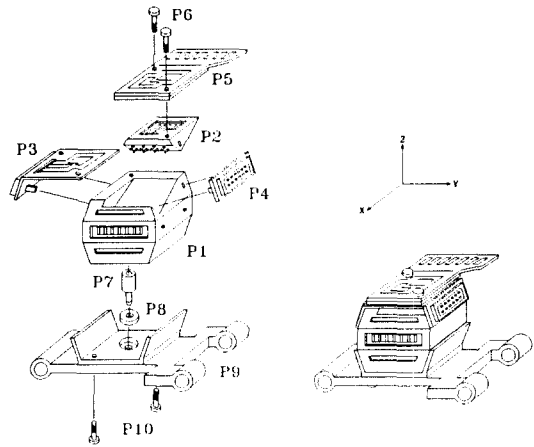
- [1] A. Bourjault, "Contribution a' une approche methodologique de l'assemblage automatise' : elaboration automatique des se'quences ope'ratoires", The'sis d' Etat, Universite' de Besancon Franche-Comte', 1984.
- [2] T.L.De Fazio, D.E.Whitney, "Correction to Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences", IEEE Journal of Robotics and Automations, Vol. 4, No. 6, 1988, pp705-708.
- [3] A. Gairola, "Design Analysis for Automatic Assembly", Toward the Factory of the Future, edited by H.J.Bullinger and H.J.Warnecke.
- [4] H.Sekiguchi, T.Kojima, K.Inoue, T. Honda, H.Takeyama, "Study on Automatic Determination of Assembly Sequences", Annals of the CIRP, Vol. 32/1/1983, pp371-374.
- [5] L.S.Homem De Mello, A.C.Sanderson, "A Correct and Complete Algorithm for the Generation of Mechanical Assembly Sequences", IEEE Tr. on Robotics and Automation, Vol.7 No.2 Apr. 1991, pp228-240.
- [6] Y.F. Huang and C.S.G. Lee, "A Framework of Knowledge-Based Assembly Planning", Proc. of the 1991 IEEE Int. Conf. Rob. Autom. Apr. 1991. pp599-604.
- [7] A.DelChambre and A.Wafflard, "An Automatic, Systematic and User-Friendly Computer-Aided Planner for Robotized Assembly", Proceedings of the 1991 IEEE International Conference of Robotics and Automation, 1991, pp592-598.
- [8] C.Masclé and J.Figour, "Methodological Approach of Sequences Determination using the Disassembly Method", Proceedings of Rensselaer's Second International Conference on Computer Integrated Manufacturing, Troy, May, 1990, pp483-490.
- [9] S.H.Lee, "Assembly Planning based on Subassembly Extraction", Tr. on Robotics and Automation, Special Issue on Manufacturing Systems : Design, Planning, Scheduling and Real-Time Control, April 1990.

삽입연결에 대한 분리도(R_{sp}^f)의 정의

삽입 연결에 대한 분리도(R_{sp}^f)는 식(3-10)으로부터 다음과 같이 계산된다.

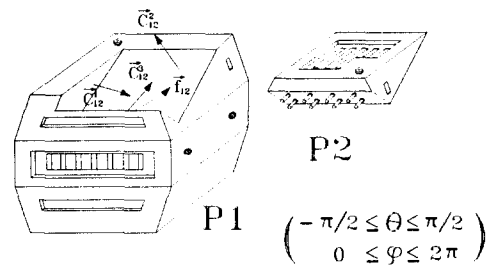
$$R_{sp}^f = \frac{r^2}{\max(A_{sp})} \quad \text{----- (10)}$$

$$= 4.848 \times 10^{-5} \quad (\text{when } r = 1 \text{ deg} = \pi/180 \text{ rad})$$



- | | |
|--------------------------|-----------------|
| P1 main body | P6 screw set_1 |
| P2 CPU head | P7 laser gun |
| P3 left connector | P8 spacer |
| P4 right connector | P9 carrier |
| P5 printed circuit board | P10 screw set_2 |

(그림 1) CD 레이저 발생기의 분해도



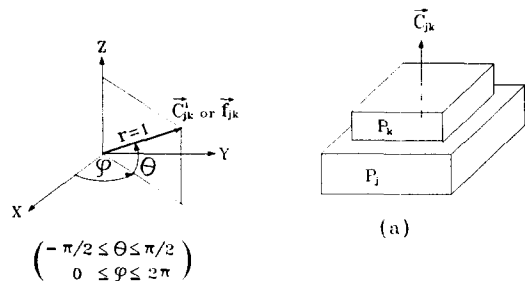
$$C_{12}^*(\theta_1, \varphi_1) = PC(-20^\circ, 90^\circ)$$

$$C_{13}^*(\theta_2, \varphi_2) = PC(60^\circ, 0^\circ)$$

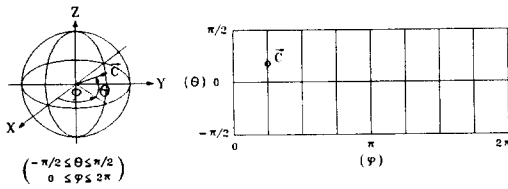
$$C_{14}^*(\theta_3, \varphi_3) = PC(45^\circ, 180^\circ)$$

$$f_{12}[(\theta, \varphi), m, \beta] = cf[(45^\circ, 135^\circ), 8, 10]$$

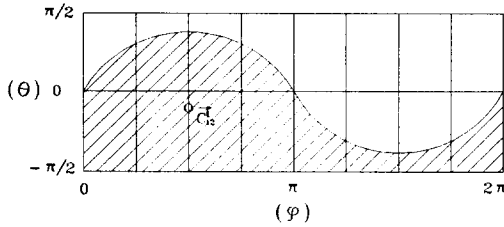
(그림 2) 부품 P1, P2간의 모델링 예



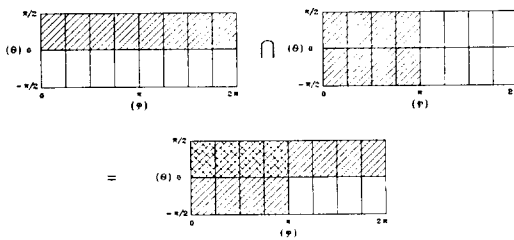
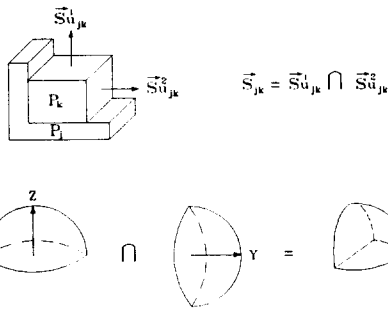
(그림 3) 단위 접촉방향에 대한 분리가능 영역



(그림 4) 구좌표의 평면좌표계로의 Mapping



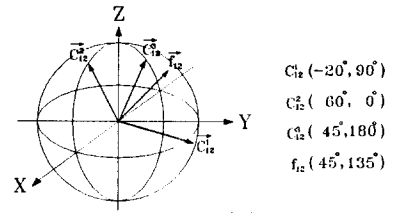
(그림 5) 접촉연결 $C_{12}(-20^\circ, 90^\circ)$ 의 USDs 추론 예



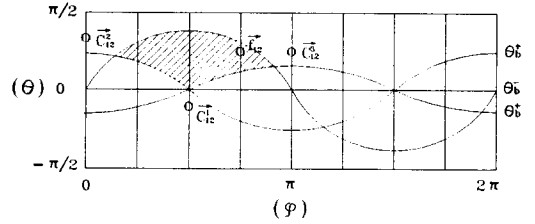
(그림 6) 복합 접촉방향에 대한 분리가능 영역

결합방법	No fit	tf	cf	sw	pf .	ri
C_M	1.0	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01

<표 1> 삽입결합 방법에 따른 분리용이도 계수(C_M)

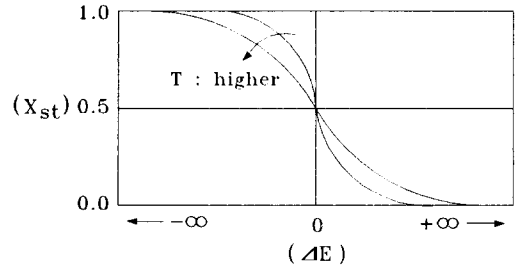


(a)

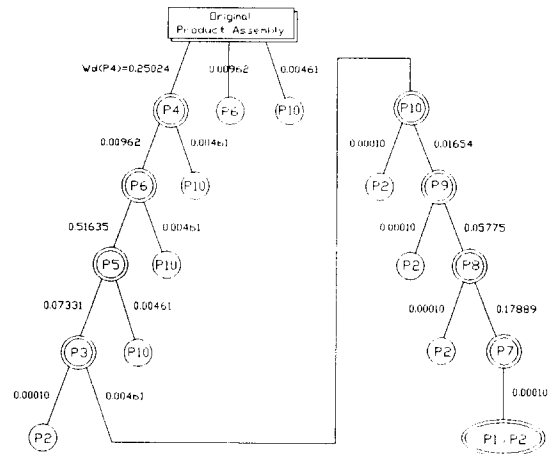


(b)

(그림 7) 부품 P1, P2간의 CSDs 추론 예



(그림 8) Jig/Fixture의 Quality 비례상수 T와 ΔE 의 관계도



- A part to be disassembled with maximal disassemblability
- Candidate parts to be disassembled

(그림 9) 조립순서의 추론 예