

조립부품의 분리도 및 불안정도를 이용한 Turning device의 선정

신 철 균*, 조 형 석**

Choice of Turning Devices for Robotic Assembly based on Separability and Instability

Chul Kyun Shin* and Hyung Suck Cho**

ABSTRACT

This paper presents a choosing method of turning devices for stable robotic assembly based on verification of a base assembly motion instability. In flexible assembly application, the base assembly needs to be maintained in its assembled state without being taken apart. This requires stability in motion while the base assembly is rotated or tilted. Therefore, the instability of the base assembly motion should be considered when determining the guide line of choosing turning devices by evaluating a degree of the motion instability of the base assembly. To derive the instability, first we inference collision free assembly directions by extracting separable directions for the mating parts and calculate the separability which gives informations as to how the parts can be easily separated. Using these results, we determine the instability evaluated by summing all the modified separabilities of each component part within base assembly.

Key Word : Modeling(모델링), Separability(분리도), Instability(불안정도), Turning device(회전용 치구)

1. 서 론

생산성 효율의 제고를 위하여, 조립공정의 자동화 작업은 산업혁명 이후 꾸준한 관심 속에 진행되어 왔다. 종래의 자동화는 제품의 규격화와 제품생산의 기계화를

통하여 싼 가격으로 대량 생산을 하는 데에 주안점이 주어졌다고 하면, 현재와 미래의 자동화 추세는 수요자의 기호가 다양해짐에 따라 다품종 소량 생산을 위한 소위 유연한 조립생산방식으로 옮겨가고 있다. 이와 같이 대량 생산을 위한 자동화 설계 및 설비가 다품종 소

* 삼성데이터 시스템 CIM 개발팀

** 한국과학기술원 정밀공학과

량 생산을 위한 시스템으로 바뀌어지고 있다. 따라서 부품의 조립라인이나 운반 및 분류하는 시스템에 유연성을 부여하는 일은 지금의 조립 자동화 작업에 중요한 일이 되어 있다. 이를 위해서 조립 로봇,^[1-3] 조립공구,^[4,5] 이송 시스템,^[6,7] 부품 공급기^[8,9] 등의 자동화에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으나 치공구 자동화에 대한 연구는 비교적 미미한 상태에 머물러 있었다.

일반적으로 치공구의 자동화는 조립되는 제품의 위치정도를 유지시켜 주면서 동시에 주변 조립장치의 조립 동작에 방해가 되지 않아야 하므로 대상제품의 조립형상 및 조립작업 특성에 절대적으로 영향을 받게 된다. 그러나 지금까지의 치공구 설계 작업은 주로 숙련된 경험자들의 경험치에 의존하는 경향이 있어 유연성 있는 조립 시스템의 구성시 주변 조립장치와의 조화를 이루는데 상당한 취약점을 내포하고 있었다. 이러한 취약점을 극복하기 위해서 Nee^[10]는 조립 대상제품의 형상을 CAD 데이터화하여 이를 이용한 치공구의 설계기법을 제시하였고 Huang^[11]은 치공구의 설계에 필요한 고려인자들을 모듈화하고 이를 이용한 치공구 설계용 expirt 시스템을 구상하였다. 또한 Pham^[12]은 이 두가지를 동시에 고려하여 조합하고 치공구의 응력해석에 유한요소법을 도입하는 등 보다 해석적이고 구체적인 설계 기법을 제안하였다. 그러나 치공구의 설계시 자동화 측면을 고려하기 위해서는 주변 조립장치와의 연계 동작까지도 함께 고려해야 한다. 즉 치공구가 부품의 조립방향을 방해하는 위치에 놓이게 되어 부품의 조립시 로봇 핸드의 접근을 어렵게 만든다면 이는 유연성을 갖는 조립 조립라인의 자동화 실현 차원에서 오히려 역효과를 가져오게 된다. 뿐만 아니라 베이스 조립체의 불안정도를 경우에는 복잡한 구조와 기능을 가진 치공구를 필요로 하게 되며 이에 따라 치공구의 제작 난이도와 제작 단가는 기하 급수적으로 증가하게 된다.

따라서 본 논문에서는 치공구의 복잡도를 최소화시키고 또한 치공구의 설치로 인한 주변 조립장치와의 간섭현상을 억제하는 방안의 일환으로써 turning device의 선정 기법을 제안하고자 한다. 즉 turning device를 이용, 베이스 조립체의 불안정도를 최소화시키며, 동시에 안정한 방향으로 베이스 조립체를 회전시켜줌으로써 치공구의 복잡도를 최대한으로 줄이고자 한다. 이를 위하여 먼저 조립 대상 부품의 조립 특성을 분석하여 베이스 조립체의 불안정도를 산정하는 방법을 제안하였고 그리고 산정된 베이스 조립체의 불안정도를 기준으로

이를 해소시킬 수 있는 치공구의 선정 기법을 제시하였다. 본 논문의 구성을 보면 먼저 2장에서는 Shin^[13]이 제안하였던 대상 부품의 모델링 기법과 이를 이용한 분리도의 추론 기법에 대해 요약하고, 3장에서는 추론된 분리도를 바탕으로 한 베이스 조립체의 불안정도 선정 기법에 대하여 논하기로 한다. 그리고 4장에서는 산출된 불안정도를 이용한 turning device의 설계방법과 동작구조에 대하여 기술하고 마지막으로 5장에서는 이들에 대한 결론을 언급하겠다.

2. 분리도의 추론

2.1 조립품의 모델링(Product Modeling)

조립품의 모델링은 조립품의 조립상태를 표현하기 위하여 필요한 특성항목으로 나타낸다. 이때 특성항목은 각 조립 부품의 조립방법과 조립방향을 결정할 수 있는 조립특성 정보와 부품간의 기하학적 위치 정보를 포함하고 있어야 한다.^[13-15] 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

$$P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\} \quad (1)$$

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

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

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 접촉연결 C_{jk} 과 삽입연결 F_{jk} 를 사용하여

$$l_{jk} = liaison(P_j, C_{jk}, F_{jk}, P_k) \quad (3)$$

로 나타낸다. 여기서 접촉 연결 C_{jk} 는 부품 P_j 와 부품 P_k 사이에 q개의 접촉면이 존재할 때 다음과 같이 모델링 되어진다.

$$C_{jk} = [C_{jk}^i(\theta_i, \varphi_i) | i = 1, 2, \dots, q] \quad (4)$$

이때 C_{jk}^i 는 접촉연결 방법을 나타내며 평면접촉(pc)으로 표시하고, (θ_i, φ_i) 는 Fig. 1(a)에 보는바와 같이 부품 P_j 에 대한 부품 P_k 의 i번째 접촉면의 법선 벡터로서 \vec{C}_{jk}^i 로 나타낸다. 반면에 삽입연결 F_{jk} 는 다음과

같이 모델링 되어진다.

$$F_{jk} = [f_{jk}(\theta, \varphi), m] \quad (5)$$

이때 f_k 는 삽입연결의 방법을 나타내며 경사삽입(tf), 헐거운삽입(cf), 나사삽입(sw), 강제삽입(pf), 리벳삽입(ri) 등으로 표시하고, (θ, φ) 는 Fig. 1(b)에 보는바와 같이 부품 P_j 에 대한 부품 P_k 의 삽입연결 방향으로서 \vec{f}_{jk} 로 나타낸다. 그리고 m 은 1방향 복수 삽입연결을 갖는 경우의 삽입연결의 수를 표시한다.

모델링 사례: Fig. 2에서의 부품 P_1 과 P_2 간의 연결

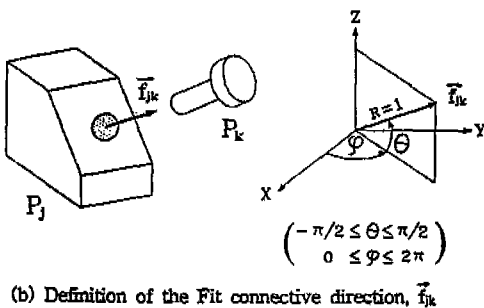
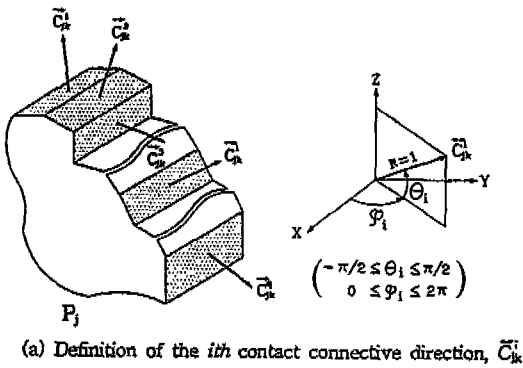
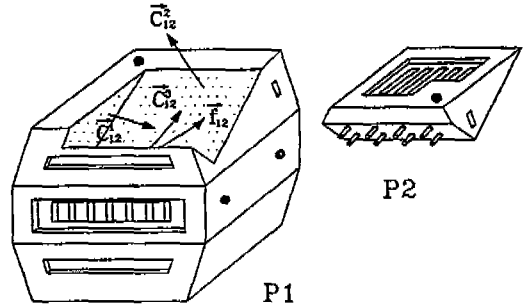


Fig. 1 Connective directions in spherical coordinates

관계를 연결 l_{12} 로 모델링 하면 다음과 같다.

$$l_{12} = liaison(P_1, [pc(-20^\circ, 90^\circ), pc(60^\circ, 0^\circ), pc(45^\circ, 180^\circ)], [cf(45^\circ, 135^\circ), 8], P_2)$$



$$C_{12}^1(\theta_1, \varphi_1) = PC(-20^\circ, 90^\circ)$$

$$C_{12}^2(\theta_2, \varphi_2) = PC(60^\circ, 0^\circ)$$

$$C_{12}^3(\theta_3, \varphi_3) = PC(45^\circ, 180^\circ)$$

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

Fig. 2 An example of liaison modeling between the parts P_1 and P_2 in the assembly of the CD laser generator

2.2 분리도(Separability)

임의 대상 부품의 분리가능 영역은 모델링된 연결관계 데이터의 접촉 및 삽입 방향 값들로부터 산출되어지며 산출된 분리가능 영역값으로부터 대상부품에 대한 분리도를 얻을 수 있게 된다.

2.2.1 분리가능 영역(Separable Directions)의 추론

(1) 단위 접촉방향의 분리가능 영역 추론

Fig. 3에서 보는 바와 같이 부품 P_k 가 부품 P_j 와 2방향의 접촉연결을 이루고 있다면 부품 P_j 가 갖는 2개의 접촉면은 각각 가상의 부품 P_{j1} 과 P_{j2} 가 이루는 2개의 단위 접촉면으로 분해될 수 있으며 이와같이 다방향 접촉면으로부터 분해된 개개의 단위 접촉면에 대한 분리가능 영역은 다음과 같이 얻을 수 있다.

Fig. 4(a)는 부품 P_k 가 분해된 임의의 가상 부품 P_j^i

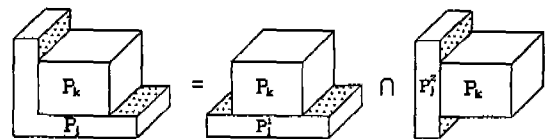


Fig. 3 An example of decomposition of multiple contact connection

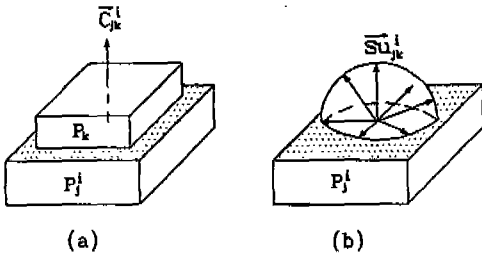


Fig. 4 Unit separable direction, \vec{sU}_{jk}^i for the given contact normal vector, \vec{C}_{jk}^i

에 대하여 접촉면 법선벡터 \vec{C}_{jk}^i 의 방향으로 단위 접촉 연결을 이루고 있는 예를 보여 준다. 이때 부품 P_k 가 가상 부품 P_j 로부터 분리될 수 있는 가능한 모든 방향은 Fig. 4(b)에서와 같이 벡터 \vec{sU}_{jk}^i 로 나타낼 수 있는데, \vec{sU}_{jk}^i 는 가상 부품 P_j 의 접촉면에 놓여진 반구(hemi-sphere)의 표면적 방향으로 진행되는 벡터의 집합이 되며 이를 벡터이론을 이용하여 수학적으로 나타낸다면 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\vec{C}_{jk}^i \cdot \vec{sU}_{jk}^i \geq 0 \quad (6)$$

즉 \vec{sU}_{jk}^i 는 접촉면에 대한 법선벡터 \vec{C}_{jk}^i 와의 벡터 내적값이 항상 zero보다 크거나 같은 값을 가져야 하며 이들 \vec{sU}_{jk}^i 의 영역은 Fig. 4(b)에서와 같이 부품 P_j 상에 놓인 반구의 표면적으로 나타낼 수 있다. 단위 접촉면의 분리가능 방향을 나타내는 표면적 값을 수학적으로 계산하기 위하여 \vec{C}_{jk}^i 와 \vec{sU}_{jk}^i 의 직교 좌표값 $X_c\hat{i} + Y_c\hat{j} + Z_c\hat{k}$ 와 $X_s\hat{i} + Y_s\hat{j} + Z_s\hat{k}$ 를 각각 구좌표계의 (θ_s, φ_s) 와 (θ_c, φ_c) 의 항으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (X_s, Y_s, Z_s) &= (\cos\theta_s \cos\varphi_s, \cos\theta_s \sin\varphi_s, \sin\theta_s) \\ (X_c, Y_c, Z_c) &= (\cos\theta_c \cos\varphi_c, \cos\theta_c \sin\varphi_c, \sin\theta_c) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_c X_s + Y_c Y_s + Z_c Z_s &\geq 0 \quad \text{또는} \\ X_c(\cos\theta_s \cos\varphi_s) + Y_c(\cos\theta_s \sin\varphi_s) + Z_c(\sin\theta_s) &\geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)을 이용하여 θ_s - φ_s 평면상의 φ_s 에 대한 θ_s 의 식으로 다시 정리하면 \vec{sU}_{jk}^i 를 반구 표면상의 영역으로 나타낼 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \theta_s &\geq \tan^{-1}[-1/Z_c(X_c \cos\varphi_s + Y_c \sin\varphi_s)], \text{ if } Z_c \geq 0 \\ \theta_s &< \tan^{-1}[-1/Z_c(X_c \cos\varphi_s + Y_c \sin\varphi_s)], \text{ if } Z_c < 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$(-\pi/2 \leq \varphi_s \leq \pi/2, 0 \leq \theta_s < 2\pi)$

(2) 실제 분리가능 영역의 추론

부품과 부품간의 연결은 일반적으로 1방향 이상의 복합 연결관계를 가지며 이와 같이 복합 연결관계를 갖는 부품의 분리 가능한 영역은 앞 절에서 구한 단위 접촉면에 대한 분리가능 영역들을 중첩함으로써 구할 수 있다. 즉 부품 P_k 가 접촉하고 있는 인접 부품군 P_j 로부터 분리 될 수 있는 가능한 모든 방향은 벡터 \vec{s}_{jk} 로 정의하며 이때 \vec{s}_{jk} 를 실제 분리가능 방향(ASD)이라 한다. 이는 식 (10)과 같이 P_k 가 인접 부품군 P_j 와 갖는 모든 단위 접촉면의 분리가능 방향 \vec{sU}_{jk}^i 를 AND 연산한 값으로 구해지며 Fig. 5는 본 연산 원리를 간단한 예를 들어 보여주고 있다.

$$\vec{s}_{jk} = \bigcap_{i=1}^q \vec{sU}_{jk}^i \quad (q: P_k \text{와 } P_j \text{간의 모든 접촉방향의 수}) \quad (10)$$

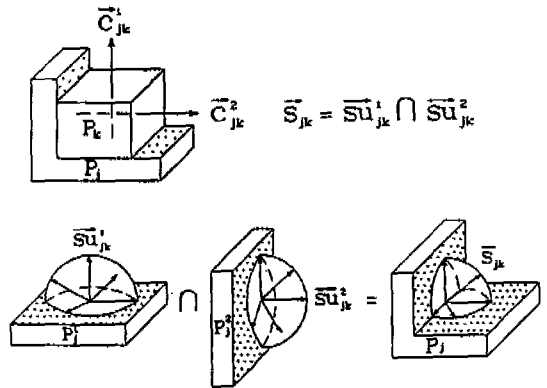


Fig. 5 Principle of the algorithm for extracting admissible separable direction (ASD)

ASD의 추론예: Fig. 2에서 모델링된 부품 P_1 과 P_2 의 연결관계는 3방향의 접촉연결과 1방향의 삽입연결을 가지며 이를 구좌표상에서의 방향 벡터로 도시하면 Fig. 6(a)와 같다. 이들중 3방향의 접촉연결에 대한 \vec{sU}_{12}^i ($i=1, 2, 3$)를 θ_s - φ_s 평면상에 도시하고 이들의 교집합인 ASD, \vec{sU}_{12} 를 구해보면 Fig. 6(b)의 빛금친

영역과 같다. 이상의 그림에서 보듯이 접촉연결만 고려하였을 경우에는 부품 P₂가 부품 P₁으로부터 빗금친 영역의 방향으로 분리가 가능하며 이때 삽입연결 \vec{f}_{12} 까지 고려하면 식 (10)에 의해 부품 P₂는 삽입연결 방향 \vec{f}_{12} 방향으로 분리가 가능하게 된다.

여기서 $\max(A_{sp})$ 는 부품간의 간섭이 전혀 없는 자유상태 부품인 경우의 분리가능영역이며 단위 구(unit sphere)의 전체 표면적 4π 로 나타낼 수 있다.

3. 불안정도의 추론

실제 로봇트를 이용한 조립작업에 있어서 부품의 불안정도는 중력에 대한 영향을 크게 받게 된다. 예를 들어 Fig. 7에서 보듯이 그림(a)와 (b)는 식 (11)의 계산에 의하면 같은 분리도 값, $R_{sp}=0.25$ 를 갖게 되지만 그림(a)는 그림(b)에 비해 중력에 대해 훨씬 안정한 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 즉 각각의 분리영역을 나타내는 $\theta_s - \varphi_s$ 좌표계에서 좌표값 φ_s 의 경우는 그림(a)와 (b)가 같은 분리 범위를 나타내지만, θ_s 의 경우는 그림(a)가 양(+)의 분리범위를 갖는 반면 그림(b)는 음(-)의 분리범위를 가진다. 이와 같이 부품의 불안정도는 θ_s 의 좌표값에 직접적인 영향을 받게 되며 이는 중력의 영향에 의해 θ_s 의 범위가 음(-)의 범위로 갈수록 부품의 불안정도가 상대적으로 커지게 됨을 알 수 있다.

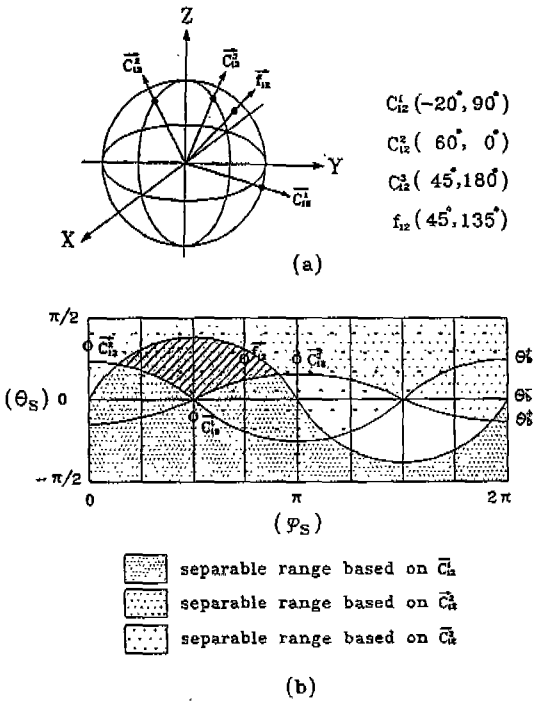


Fig. 6 An example of actual separable direction, on the plane(θ_s, φ_s)

2.2.2 분리도(Separability)의 정의

앞 절에서 임의의 부품 P_k가 분리될 수 있는 영역을 구(sphere)좌표평면으로 나타내었으며 이를 통하여 mapping된 빗금친 영역이 크면 클수록 분리가 용이하다는 것을 알 수 있었다. 이때 부품 P_k가 분리되기 쉬운 정도를 수치화한 값으로 계산한 것이 부품 P_k의 분리도이며 부품 P_k의 분리도는 자유상태 부품의 최대 분리영역, $\max(A_{sp})$ 에 대한 부품 P_k의 분리 가능영역, A_{sp} 의 비율로 정의된다.

$$R_{sp}(P_k) = \frac{A_{sp}}{\max(A_{sp})} = \frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos\theta_s d\theta_s d\varphi_s}{\int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\theta_s d\theta_s d\varphi_s} \quad (11)$$

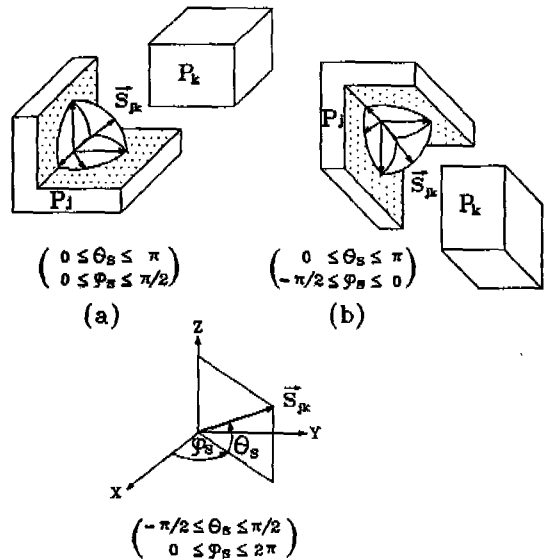


Fig. 7 Gravity effect to separability

따라서 이와 같은 중력의 영향을 불안정도 계산에 고려하기 위하여 중력가중치 함수를 선정하여 줄 필요가 있게 된다. 즉 Fig. 8과 같이 (θ_s, φ_s) 좌표상의 분리가능 영역에 중력가중치 함수 $\exp(-a\theta_s)$ 를 곱함으로써

중력 가중치를 θ_s 값에 따른 지수함수로 나타내었다.^[16] 이렇게 함으로써 θ_s 값이 음(-)의 값을 가질수록 중력의 영향에 따른 부품의 불안정도가 현격하게 커지게 된다. 이때 $\exp(-a\theta_s)$ 의 a 값은 중력 비례상수이며 a 값이 커지면 커질수록 부품의 불안정도는 중력에 대한 영향을 상대적으로 더 크게 받게 된다.

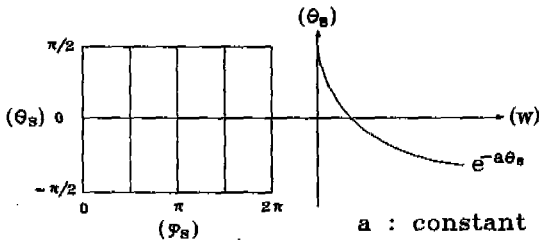


Fig. 8 Weighting factor of instability in consideration of gravity

3.1 부품의 불안정도 (R_{IS}) 계산

임의의 부품 P_k 의 중력을 고려한 불안정도는 자유상태 부품의 최대 불안정값, $\max(I_{IS})$ 에 대한 임의의 부품 P_k 의 불안정값, I_{IS} 로 나타낼 수 있다. 이때 각 불안정값은 식 (11)의 분리도 계산식에 중력 가중치, $\exp(-a\theta_s)$ 를 곱함으로써 얻을 수 있다.

$$R_{IS}(P_k) = \frac{I_{IS}(P_k)}{\max(I_{IS})} = \frac{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \exp(-a\theta_s) \cos \theta_s d\theta_s d\varphi_s}{\max(I_{IS})} \quad (12)$$

여기서 불안정값 $\max(I_{IS})$ 는 아무런 접촉도 갖지 않고 공중에 떠 있는 상태인 자유상태 부품이 가질 수 있는 최대의 불안정값을 의미하며 그 값은 단위 구(unit sphere)의 전체 표면적을 구하는 계산식에 중력 가중치, $\exp(-a\theta_s)$ 를 곱함으로써 다음과 같이 계산되어진다.

$$\begin{aligned} \max(I_{IS}) &= \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(-a\theta_s) \cos \theta_s d\theta_s d\varphi_s \\ &= \pi[-a \exp(-a\theta_s) \cos \theta_s]_{-\pi/2}^{\pi/2} \\ &\quad + \pi[a \exp(-a\theta_s) \sin \theta_s]_{-\pi/2}^{\pi/2} \end{aligned}$$

$$= 2\pi a \operatorname{hyp}[\cos \pi a / 2] \quad (13)$$

3.2 베이스 조립체의 불안정도 (E_i) 계산

실제 조립이 진행될 때 조립 치공구 및 turning device의 특성을 결정하는 중요한 인자는 그때까지 조립된 베이스 조립체가 갖는 불안정도이며 이는 앞절에서 구한 부품의 불안정도 계산식을 이용하여 구한다.

<정의 1> 베이스 조립체: 베이스 조립체 BA_i 는 조립이 진행되는 i 번째 단계에서의 현재 조립된 부품의 집합체를 의미한다.

$$BA = \{BA_1, BA_2, \dots, BA_i, BA_n\}$$

(n : 조립 부품의 총수)

여기서 BA_i 란 n 개의 부품으로 이루어진 대상 조립품에서 i 개의 부품이 조립완료된 베이스 조립체를 의미한다.

매 조립공정에서의 베이스 조립체가 갖는 불안정도는 베이스 조립체를 고정하는 고정용 치공구의 설계에 주요 고려인자가 되며 이때 베이스 조립체 BA_i 의 불안정도 E_i 는 베이스 조립체를 이루는 i 개의 부품들이 갖는 불안정도의 총합이 된다.

$$E_i = \sum_{j=1}^i R_{IS}(P_j) \quad (14)$$

(i : 베이스 조립체를 이루는 부품 P_j 의 갯수)

4. Turning device의 선정

4.1 베이스 조립체의 안정성 판별

매 조립공정에서 베이스 조립체에 대상 부품이 조립되어질 때 베이스 조립체의 안정도가 크기 않으면 이미 조립된 베이스 조립체내의 부품들이 흐트러질 가능성이 높아지는데 이를 방지하기 위해서는 베이스 조립체내의 부품들중 베이스 조립체 본체로부터 분리될 가능성이 있는 부품들을 미리 파악하고 이를 치공구를 이용하여 고정시켜 주어야 한다. 그러나 이때 치공구의 고정 자유도가 많아지면 많아질수록 치공구의 제작 난이도와 제작 단가가 기하 급수적으로 증가될 뿐만 아니라 주변 조립장치의 조립동작을 방해하는 경우도 발생하게 된다. 따라서 중력에 대해 비교적 안전한 상태의 부품들은 가급적 치공구에 의한 고정을 줄임으로써 위의 문제

점에 대한 해결 방안을 제시하고자 한다. 즉 매 조립공정에서 베이스 조립체내의 분리가능한 부품들중 중력에 대해 불안정한 부품이 하나라도 존재하면 우선 별도의 고정 치공구를 사용하지 않고 turning device만을 이용, 이들의 분리가능 영역을 중력에 대해 안정한 영역으로 바꾸어 줌으로써 베이스 조립체의 안정도를 높여 준다. 그러나 중력에 대해 안정한 부품이라 할지라도 조립 외력에 의해 쉽게 흐트러질 가능성이 있는 부품들은 별도의 고정 치공구를 이용하여 안정도를 높여 주어야 하며 이의 판별 기준은 식 (14)에서 구한 베이스 조립체의 불안정도 값을 이용해야 한다.

<규칙 1> 베이스 조립체의 안정성 판단식:

○ 베이스 조립체내의 구성 부품들이 갖는 분리가능 영역의 $\min(\theta_s)$ 값이 어느 하나라도 조립부품의 조립특성 및 마찰계수 등을 고려하여 결정한 $Limit(\theta_s)$ 값보다 작아서는 안 된다.

$$\min(\theta_s) > Limit(\theta_s) \quad (15)$$

○ 위 조건을 만족하는 베이스 조립체일지라도 추론된 불안정도 E_{TS} 가 주변 작업요건 및 치공구 성능 등을 고려하여 결정한 한계 불안정도, $Limit(E_{TS})$ 보다 작아야 한다.

$$E_{TS} < Limit(E_{TS}) \quad (16)$$

여기서 식 (15)는 Turning device의 선정기준이 되고 식 (16)은 고정용 조립치공구의 선정기준이 되며 본 논문에서는 식 (15)를 기준으로 하는 turning device 선정안을 연구하고자 한다. 이를 위해서 베이스 조립체내의 부품들 중 분리될 가능성이 있는 부품들의 분리영역을 기초로 하는 turning device의 회전각도 및 회전중심축의 계산 방법을 제안한다. 그리고 turning device가 회전하게 되면 이로 인해 베이스 조립체내의 각 부품들이 갖는 연결 데이터의 방향 좌표값들이 변하게 되는데 이는 회전 후 단계에서 베이스 조립체의 조립형상 및 조립특성을 나타내는 중요 정보가 되므로 이의 변환 방법에 대해서도 언급하기로 한다.

4.2 Turning device의 회전각도 계산 및 회전중심축 선정

turning device의 회전각도 및 회전중심축은 베이스 조립체의 분리가능 부품들이 갖는 분리가능 영역 (ASD)에 의해 결정된다. 즉 식 (15)로부터 베이스 조

립체 내의 각 구성 부품들이 갖는 분리영역의 $\min(\theta_s)$ 값이 기준 $Limit(\theta_s)$ 값보다 작은 값이 하나라도 존재하게 되면 이 베이스 조립체는 불안정한 상태가 되며 이를 해소시키기 위해서는 베이스 조립체의 $\min(\theta_s)$ 값이 기준 $Limit(\theta_s)$ 값보다 커지는 방향으로 변환시켜 주어야 한다. 이때 베이스 조립체의 불안정되는 Fig. 7과 Fig. 8로부터 θ_s 의 좌표값에 직접적인 영향을 받게 되며, 즉 중력의 영향에 의해 θ_s 의 범위가 음(-)의 범위로 갈수록 베이스 조립체의 불안정도가 상대적으로 커지게 됨을 알 수 있다. 이로부터 베이스 조립체를 회전시키기 위한 회전 중심축은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 X-Y 평면상에 존재하게 되며 따라서 $Limit(\theta_s)$ 보다 작은 값인 $\min(\theta_s)$ 를 유발하는 연결벡터 \vec{C}_k 의 좌표값 (θ, φ) 가 결정되면 이를 안정한 영역으로 변환시키기 위한 회전중심축, $C(\theta_c, \varphi_c)$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{cases} \theta_c = 0 \\ \varphi_c = \varphi - \pi/2 \text{ if } \alpha > 0 \\ \varphi_c = \varphi + \pi/2 \text{ if } \alpha < 0 \end{cases} \quad (17)$$

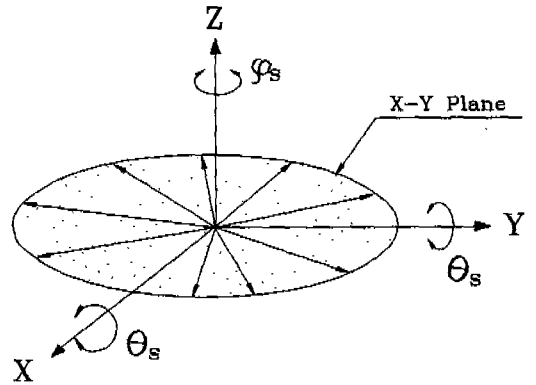
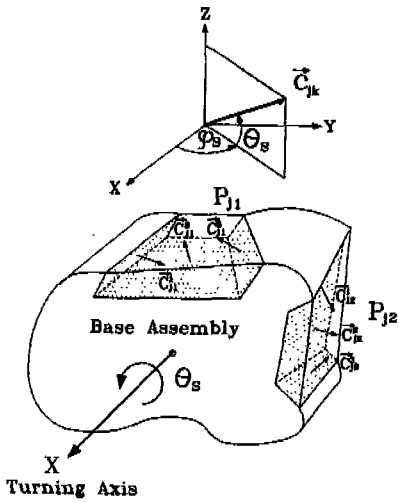


Fig. 9 Turning axes on X-Y plane

예를 들어 Fig. 10과 같이 베이스 조립체 본체로부터 분리가능한 부품들이 P_{j1} 과 P_{j2} 라 하면 이들이 베이스 조립체 본체와 이루는 연결 벡터값들은 식 (4)에 의해 Fig. 10의 아래와 같이 표기된다. 이에 대한 각 부품의 분리영역(ASD)을 도시해 보면 Fig. 11의 (a)와 같이 구해진다.

이때 조립품의 조립특성 및 마찰계수 등을 고려하여



$$C_{j1}(\theta_{j1}, \varphi_{j1}) = PC[(-20^\circ, 90^\circ), (70^\circ, 0^\circ), (30^\circ, 270^\circ)]$$

$$C_{j2}(\theta_{j2}, \varphi_{j2}) = PC[(-60^\circ, 120^\circ), (-10^\circ, 80^\circ), (45^\circ, 90^\circ)]$$

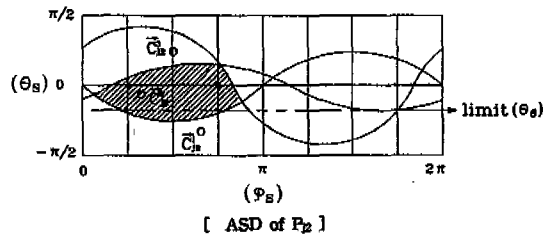
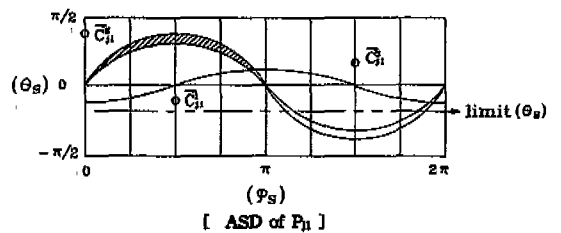
Fig. 10 An example of a base assembly on turning device

결정한 $Limit(\theta_S)$ 의 값을 -30° 라고 하면 P_{j1} 의 경우는 Fig. 10과 같이 분리가능 영역(빋금친 영역)의 $\min(\theta_S) = 0^\circ$ 이 $Limit(\theta_S)$ 보다 크지만 P_{j2} 의 경우는 분리가능 영역의 $\min(\theta_S) = -45^\circ$ 가 $Limit(\theta_S)$ 보다 작게 된다. 따라서 P_{j2} 에 대해 $|Limit(\theta_S) - \min(\theta_S)| = 15^\circ$ 값보다 큰 회전각 α 만큼 $+\theta_S$ 방향으로 베이스 조립체를 회전시켜 줌으로써 베이스 조립체를 안정화 시켜야 한다. 이때 베이스 조립체를 θ_S 방향으로 α 만큼 회전시키기 위한 중심축, $C(\theta_c, \varphi_c)$ 는 항상 $\theta_c = 0^\circ$ 인 값을 갖는 평면상에 존재하게 되므로 Fig. 11의 (a)에서 보는 바와 같이 부품 P_{j2} 에 분리가능 영역에서 $\min(\theta_S)$ 를 유발하는 연결 벡터는 식(9)에 의해 C_{j2} 【좌표값 $(\theta_S, \varphi_S) = (45^\circ, 90^\circ)$ 】임을 알 수 있으며 이를 기준으로 식(17)로부터 회전 중심축, $C(\theta_c, \varphi_c)$ 의 좌표값을 구하면 $\theta_c = 0^\circ, \varphi_c = 0^\circ$ 가 각각 얻어진다. Fig. 11의 (b)는 P_{j2} 의 분리가능 영역에 대한 $\min(\theta_S)$ 값을 $Limit(\theta_S)$ 값보다 크게 하기 위하여 식(17)을 이용해 구한 회전중심축, $(0^\circ, 0^\circ)$ 축을 중심으로 베이스 조립체를 $\alpha = 17^\circ$ 만큼 회전시킨 후의 P_{j1}, P_{j2} 에 대한 분리가능 영역을 도시한 것이다. 여기서 알 수 있듯이 P_{j1} 의 안정도는 조금 나빠졌으나 P_{j2} 의 불안정한 상태를 해소시킴으로써 전체적으로 안정한 부품의 조립 상태를 유지하고 있다. 그러나 만약 P_{j2} 의 불

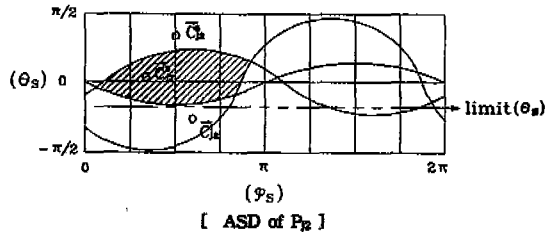
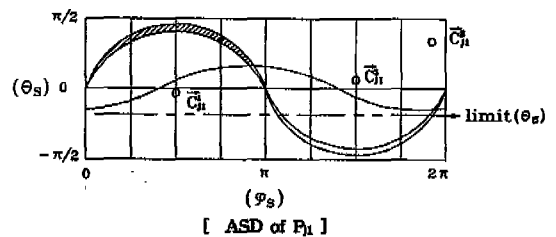
안정한 상태를 해소시키기 위하여 베이스 조립체를 회전시켰을 때 P_{j1} 이 오히려 불안정하여지는 경우가 발생할 수 있는데 이때에는 별도의 고정용 치공구를 이용하여 P_{j2} 의 불안정한 상태를 해소시켜야 한다.

4.3 Turning에 의한 베이스 조립체의 좌표 변환

본 연구에서는 대상 조립체의 조립형상 및 조립특성



(a) An unstable base assembly before turning



(b) A stable base assembly after turning

Fig. 11 ASDs of the parts in base assembly

을 추론하기 위하여 2.1절의 모델링 기법을 도입하였고 또 이를 이용, 베이스 조립체내의 부품들이 갖는 분리 가능 영역 및 분리도 그리고 불안정도 등을 산출하였다. 그러나 베이스 조립체가 임의의 회전중심축, $C(\theta_c, \varphi_c)$ 를 중심으로 α 만큼 회전하고 나면 Fig. 1의 기준좌표계를 바탕으로 모델링되었던 각 연결벡터 ($\hat{C}_{jk}, \hat{f}_{jk}$) 값들은 새로 변환된 값들을 갖게 되며 따라서 이 값들을 계산해 줄 필요가 있게 된다. 이때 임의의 회전중심축, $C(\theta_c, \varphi_c)$ 는 $\theta_c=0^\circ$ 인 평면상에 존재함으로 다음과 같이 z방향 벡터값이 0인 직교 좌표값으로 나타낼 수 있다.

$$C(\theta_c, \varphi_c) = \hat{C}_x \hat{i} + \hat{C}_y \hat{j} \quad (18)$$

2.1절의 모델링 데이터에서 주어진 연결벡터 $\hat{C}_{jk}, \hat{f}_{jk}$ 등의 대표 좌표값을 $q(\theta, \varphi)$ 라 표기하면 이를 회전중심축, $C(\theta_c, \varphi_c)$ 를 중심으로 α 만큼 외전시킬 경우의 변환된 좌표 $q_t(\theta_t, \varphi_t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q(\theta_t, \varphi_t) = R_\alpha(C(\theta_c, \varphi_c), \alpha) \cdot q(\theta, \varphi)$$

$$= \begin{bmatrix} C_x^2 \text{vers}(\alpha) + \cos \alpha & C_x C_y \text{vers}(\alpha) & C_y \sin \alpha \\ C_x C_y \text{vers}(\alpha) & C_y^2 \text{vers}(\alpha) + \cos \alpha & -C_x \sin \alpha \\ -C_y \sin \alpha & C_x \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot q(\theta, \varphi) \quad (19)$$

여기서 $\text{vers}(\alpha) = (1 - \cos \alpha)$ 이다.

따라서 식 (19)로부터 회전 변환된 좌표 θ_t, φ_t 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\theta_t = \sin^{-1}[-X C_y \sin \alpha + Y C_x \sin \alpha + Z \cos \alpha]$$

$$\varphi_t = \tan^{-1} \left[\frac{X C_x C_y \text{vers}(\alpha) + Y W - Z C_x \sin \alpha}{X W + Y C_x C_y \text{vers}(\alpha) + Z C_y \sin \alpha} \right] \quad (20)$$

여기서 $W = C_y^2 \text{vers}(\alpha) + \cos \alpha$,

$$\begin{cases} X = \cos \theta \cos \varphi \\ Y = \cos \theta \sin \varphi \\ Z = \sin \theta \end{cases} \quad \text{이다.}$$

이상과 같이 베이스 조립체가 turning device에 의해 회전되면 원래 주어진 모델링 데이터와는 다른 변환된 연결벡터 $\hat{C}_{jk}, \hat{f}_{jk}$ 값들이 새롭게 계산되어 지며 이들 값들이 회전된 베이스 조립체의 조립형상 및 조립특성을 나타내는 모델링 데이터로서 사용되게 된다. Fig. 12는 Fig. 10에서 주어진 베이스 조립체를 회전중심

축, $(0^\circ, 0^\circ)$ 방향축을 중심으로 $\alpha=17^\circ$ 만큼 회전시킨 이후의 외관 형상이며 Fig. 12의 아래에는 식 (18)-(20)을 이용하여 새롭게 계산된 모델링 데이터의 연결벡터 값들을 나타내고 있다.

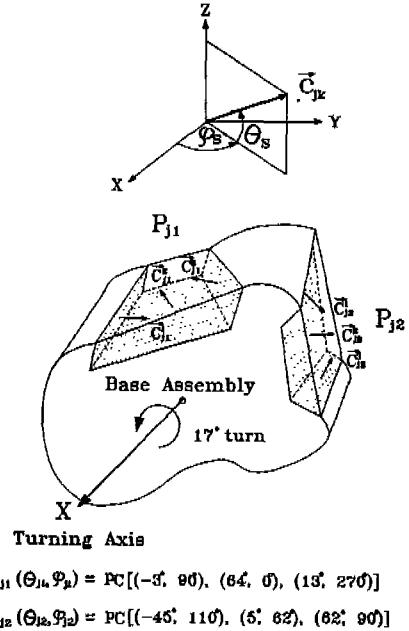


Fig. 12 A turned base assembly on turning device

5. 결론

일반적으로 유연 자동조립시에 베이스 조립체의 불안정도를 해소하기 위해서는 복잡한 구조와 기능을 가진 치공구를 필요로 하게 되며 이때 치공구의 고정 자유도가 많아지면 많아질수록 제작이 어려워지고 제작비는 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 고정용 치공구의 고정 자유도를 최소화시키고 구조의 단순화에 따른 조립작업의 고속화를 기하기 위하여 베이스 조립체의 조립상태를 간단한 벡터값으로 모델링하고 이를 이용, 베이스 조립체의 불안정도를 기하학적으로 추론하는 기법을 제안하였다. 그리고 이들 불안정도를 고정 치공구가 아닌 turning device를 이용하여 해소시킬 수 있는 방안을 제시함으로써 유연 조립라인의 원활한 조립작업을 가능하게 하고 전체 조립라인의 제작단가를 낮출 수 있게 하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 연구과제의 일부로서 수행되었으며, 이에 재단과 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. R. Goldman, "Design of an Interactive Manipulator Programming Environment", UMI Research Press, Ann Arbor, Mich., 1985.
2. B.K.Kim and K.G.Shin, "Minimum-time Path Planning for Robot Arms and Their Dynamics", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 15-2, 1985.
3. T.H.Park and B.H.Lee, "An Approach to Robot Motion Analysis and Planning", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, sacramento, CA, pp.70-75, 1991.
4. J.L.Joseph and T.Lozano-perez, "Planning Two-Fingered Grasps for Pick-and Place Operation on Polyhedra", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.683-688, 1990.
5. H.Maekawa, K.Yokoi, K.Tanie and M.Kaneko, "Position/Stiffness based Manipulation by Three-fingered Robot Hand", Proc. ISART, March 5-7, pp.597-603, 1991.
6. S.W. Holland, L.Rossal and M.R.Ward, "CONSIGHT-1: A vision Controlled Robot System for Transferring parts from belt conveyors", Computer Vision and Sensor Based Robots, the Plenum press, 1979.
7. W.E.Wilhelm, "Conveyor Tracking", Int. Encyclopedia of Robotics: Applications and Automation, R. C. Dorf, Ed, New York: John Wiley & Sons, Inc., pp.283-298, 1988.
8. J.L.Goodrich and G.P.Maul, "Programmable Part Feeders", Industrial Engineering, pp.28-33, May 1983.
9. L.E.March and G.Boothroyd, "On-Off Control Parts Feeding", Automation, pp.32-34, August 1970.
10. A.Y.C.Nee and A.N.Poo "Expert CAD Systems for Jigs and Fixture in Artificial Intelligence in Design(edited by D.T.Pham)", IFS/Springer, London, 1990.
11. Y.F.Huang and C.S.G.Lee, "A Framework of Knowledge-based Assembly Planning", Proc. of the 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, California, pp.599-604, April 1991.
12. D.T.Pham and A.Sam Lazaro, "Autofix-A Expert CAD System for Jigs and Fixtures" Int. Journal of Machine and Tools Manufacturing, Vol.30, No.3, pp.403-411, 1990.
13. C.K.Shin and H.S.Cho, "On the Generation of Robotic Assembly Sequences based on Separability and Assembly Motion Stability", Robotica (to appear).
14. D.Y.Cho and H.S.Cho, "Inference on Robotic Assembly Precedence Constraints Using Part Contact Level Graph", Robotica, Vol. 11, pp.173-183, 1993.
15. D.Y.Cho, D.K.Shin and H.S.Cho, "Automatic Inference on Stable Robotic Assembly Sequences based upon the Evaluation of the Base Assembly Instability", Robotica, Vol. 11, pp.351-362, 1993.
16. 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.