

< 논문 >

## 유연조립 시스템에서의 Jig/Fixture 설계에 관한 연구

신 철 균\*

(2006년 1월 24일 접수, 2006년 11월 22일 심사완료)

### Design Guidance of Jig/Fixture for Flexible Manufacturing System

Chul Kyun Shin

**Key Words:** Jig/Fixture(치공구), Base Assembly(베이스조립체), Instability(불안정도), Separable Directions(분리방향), Flexible Manufacturing(유연생산),

#### Abstract

This paper presents a design guidance of jig/fixture for flexible manufacturing system based on the verification of a base assembly motion instability. In flexible assembly system, 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 handled or tilted. Therefore, the instability of the base assembly motion should be considered when determining the guide line of designing jig/fixture 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.

#### 기호설명

$l_{jk}$  : 부품  $p_j$ 와 부품  $p_k$ 간의 연결  
 $C_{jk}$  : 부품  $p_j$ 와 부품  $p_k$ 간의 접촉연결  
 $F_{jk}$  : 부품  $p_j$ 와 부품  $p_k$ 간의 삽입연결  
 $E_i$  : 베이스조립체의 불안정도  
 $\overline{SU}_{jk}^i$  : 부품  $p_k$ 가 가상부품  $p_j^i$ 로부터 분리될 수 있는 가능한 모든 방향

$\overline{S}_{jk}$  : 부품  $p_k$ 가 부품  $p_j$ 로부터 분리될 수 있는 가능한 모든 방향  
 $R_{sp}(p_k)$  : 부품  $p_k$ 의 분리가능도  
 $R_{IS}(p_k)$  : 부품  $p_k$ 의 불안정도  
 $C(\theta_c, \phi_c)$  : 위치변환 회전중심축  
 $q(\theta, \phi)$  : 위치변환 전 베이스조립체의 좌표  
 $q_t(\theta_t, \phi_t)$  : 위치변환 후 베이스조립체의 좌표

#### 1. 서론

종래의 자동화는 제품의 규격화와 제품생산의 기계화를 통하여 대량생산을 하는 데에 주안점이 주어졌었다. 그러나 현재와 미래의 자동화 추세는 수요자의 기호가 다양해짐에 따라 다품종 소

\* 회원, 로열컨설팅 대표, 한국의국어대학교  
 산업정보시스템공학부 겸임교수  
 E-mail : shinphd@freechal.com  
 TEL : (018)217-1419 FAX : (02)2040-7401

량생산을 위한 유연조립 생산방식으로 옮겨가고 있다. 이와 같이 대량생산을 위한 조립라인이 다 품종 소량생산을 위한 조립라인으로 바뀌어감에 따라 작업의 유연성을 부여하는 일은 조립 자동화 작업에 매우 중요한 일이 되었다. 이를 위해서 조립로봇,<sup>(1)</sup> 조립기구,<sup>(2)</sup> 이송시스템<sup>(3)</sup> 등의 유연자동화에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으나 치공구(jig/ fixture)의 자동화에 대한 연구는 상대적으로 미미한 상태에 머물러 있는 실정이다.

일반적으로 치공구의 자동화는 조립되는 제품의 위치정도를 유지시켜 주면서 동시에 주변 조립장치의 조립동작에 방해를 주지 않아야 한다. 따라서 대상제품의 조립형상 및 조립작업 특성에 절대적으로 영향을 받게 되나 지금까지의 치공구 설계 작업은 주로 숙련된 경험자들의 경험치에 의존하는 경향이 있어 왔다. 이에 따라 유연성 있는 조립 시스템의 구성시 주변 조립장치와의 조화를 이루는데 상당한 취약점을 내포하고 있었다. 이러한 취약점을 극복하기 위해서 Nee<sup>(4)</sup>는 조립대상 제품의 형상을 CAD 데이터화하여 이를 이용한 치공구의 설계기법을 제시하였고 Huang<sup>(5)</sup>은 치공구의 설계에 필요한 고려인자들을 모듈화하여 치공구 설계용 expert 시스템을 구상하였다. 또한 Pham<sup>(6)</sup>은 이 두 가지를 동시에 고려하여 조합한 후 치공구의 응력해석에 유한요소법을 도입하는 방안을 제안하였고 Kim I.H.<sup>(7)</sup>은 공정계획과 고정계획(fixture planning) 연계를 위한 프로토타입을 개발하였다. 그리고 최근 들어서는 Kim J.D.<sup>(8)</sup>이 원격제어 로봇을 위한 가상환경의 구축에 지그를 기준으로 한 센서보정 방법을 제시하는 등 보다 해석적이고 구체적인 설계기법을 제안하였다.

그러나 치공구의 설계시 유연생산 시스템에서의 자동화 측면을 고려하기 위해서는 주변 조립장치와의 연계동작까지도 함께 고려해야 한다. 즉 치공구가 부품의 조립방향을 방해하는 위치에 있어 부품의 조립시 로봇 핸드의 접근을 어렵게 만든다면 이는 유연성을 갖는 조립라인의 자동화 실현 차원에서 오히려 역효과를 가져오게 된다. 뿐만 아니라 베이스조립체의 불안정도가 클 경우에는 복잡한 구조와 기능을 가진 치공구를 필요로 하게 되며 이에 따라 치공구의 제작난이도는 기하급수적으로 증가하게 된다.

따라서 본 논문에서는 치공구의 복잡도를 최소

화시키고 동시에 치공구의 설치로 인한 주변 조립기구와의 간섭을 극소화하는 방안을 제안하였다. 그 일환으로서 (1)유연 조립기구와의 간섭을 최대한 억제할 수 있는 치공구의 치구 범위를 산출하고, 더 나아가 (2)베이스조립체의 안정도를 높이기 위한 치공구의 위치변환(tilting) 메카니즘을 제시하였다. 즉 위치변환 치공구를 이용, 베이스조립체의 불안정도를 최소화하는 위치를 찾아 줌으로써 별도로 고정 자유도의 추가없이 베이스조립체의 안정도를 높일 수 있었다. 본 논문의 구성을 보면 먼저 2장에서는 Shin C.K.<sup>(9)</sup>가 제안하였던 벡터해석을 이용한 조립품의 모델링 기법에 대해 요약하고 이를 이용하여 간섭이 없는 치공구의 치구 범위를 산출한다. 3장에서는 베이스조립체의 불안정도를 산정하는 기법을 제시한 후 4장에서는 산출된 베이스조립체의 불안정도를 이용, 유연조립 시스템에 적합한 위치변환 치공구의 설계방법과 동작구조에 대하여 제안하기로 한다. 그리고 5장에서는 이들에 대한 결론을 기술하겠다.

## 2. 치공구의 치구 범위 산출

본 논문에서는 유연조립 계획수립의 필수 정보인 조립가능 영역의 해석을 통하여 실제 복잡한 형상을 갖는 베이스조립체의 치구 범위를 구하고자 한다. 이를 위하여 조립 대상부품의 기하학적 조립특성을 구좌표를 이용한 연결벡터를 이용하여 나타냄으로써, 기하학적 모델링 방식<sup>(10)</sup>의 단점인 방대한 CAD 입력 데이터를 단순화시키면서도 모든 조립가능 영역을 벡터해석법을 통해 추론해내는 기법을 제안하였다.

### 2.1 조립품의 모델링

조립품의 모델링(Product modeling)은 조립품의 조립상태를 표현하기 위하여 필요한 특성항목으로 나타낸다. 이때 특성항목은 각 조립부품의 조립방법과 조립방향을 결정할 수 있는 조립 특성 정보와 부품간의 기하학적 위치정보를 포함하고 있어야 한다.<sup>(11)</sup> 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 각각

$$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\} \quad (1)$$

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

로 표현되며,  $l_{jk}$ 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

$$l_{jk} = \text{Liaison}(p_j, C_{jk}, F_{jk}, p_k) \quad (3)$$

로 나타낸다. 여기서 접촉연결  $C_{jk}$ 는 부품  $p_j$ 와 부품  $p_k$  사이에  $q$ 개의 접촉면이 존재할 때 다음과 같이 모델링 되어진다.

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

이때  $c_{jk}^i$ 는 접촉연결 방법을 나타내며 기하학적 면접촉(pc)으로 표시하고,  $(\theta_i, \phi_i)$ 는 Fig. 1(a)에 보

는 바와 같이 부품  $p_j$ 에 대한 부품  $p_k$ 의  $i$ 번째 접촉면의 법선 벡터로서  $\vec{c}_{jk}^i$ 로 나타낸다. 반면에 삽입연결  $F_{jk}$ 는 다음과 같이 모델링 되어진다.

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

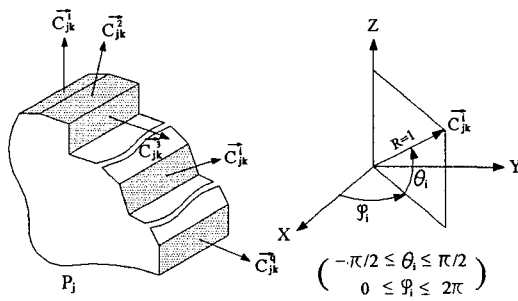
이때  $f_{jk}$ 는 삽입연결의 방법을 나타내며 경사삽입(tf), 헐거운삽입(cf), 나사삽입(sw), 강제삽입(pf), 리벳삽입(ri) 등으로 표시하고,  $(\theta, \phi)$ 는 Fig. 1(b)에 보는바와 같이 부품  $p_j$ 에 대한 부품  $p_k$ 의 삽입연결 방향으로서  $\vec{f}_{jk}$ 로 나타낸다. 그리고  $m$ 은 1방향 복수삽입연결을 갖는 경우의 삽입연결의 수를 표시한다.

모델링 사례 : Fig. 2에서 부품  $P_1$ 과 부품  $P_2$ 간의 연결관계를  $l_{12}$ 로 모델링하면 다음과 같다.

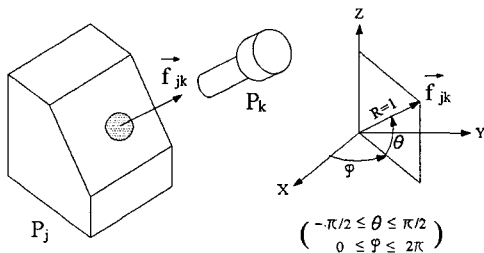
$$l_{12} = \text{liaison}(p_1, [pc(-20^\circ, 90^\circ), pc(60^\circ, 0^\circ), pc(45^\circ, 180^\circ)], [cf(45^\circ, 135^\circ), 8], p_2)$$

2.2 분리가능(조립가능) 영역의 추론

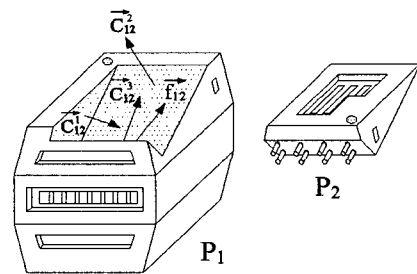
조립 대상부품의 조립가능 영역은 모델링된 연결관계 데이터의 접촉 및 삽입방향 값들을 이



(a) Definition of the contact connective directions,  $\vec{C}_{jk}^i$



(b) Definition of the fit connective direction,  $\vec{f}_{jk}$



$$\begin{aligned} C_{12}^1(\theta_1, \phi_1) &= pc(-20^\circ, 90^\circ) \\ C_{12}^2(\theta_2, \phi_2) &= pc(60^\circ, 0^\circ) \\ C_{12}^3(\theta_3, \phi_3) &= pc(45^\circ, 180^\circ) \\ [f_{12}(\theta, \phi), m] &= [cf(45^\circ, 135^\circ), 8] \end{aligned}$$

Fig. 2 An example of liaison modeling between the parts  $p_1$  and  $p_2$  in the assembly of the CD generator

Fig. 1 Connective directions in spherical coordinates

용한 분리가능 영역(분해법 적용)으로부터 산출되어지며, 산출된 분리가능 영역은 대상부품의 조립시에 필요한 유연조립기구의 접근영역, 즉 조립가능 영역과 일치한다.

### 2.2.1 단위 접촉방향의 분리가능영역 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  $p_j^1$ 과  $p_j^2$ 가 이루는 2개의 단위 접촉면으로 분해될 수 있다. 이와 같이 다방향 접촉면을 갖는 경우의 분리가능 영역(separable directions)은 분해된 개개의 단위 접촉면에 대한 분리가능 영역의 교집합으로 얻을 수 있게 된다.

Fig. 4(a)는 부품  $p_k$ 가 분해된 임의의 가상 부품  $p_j^i$ 에 대하여 접촉면 법선벡터  $\vec{c}_{jk}^i$ 의 방향으로 단위접촉연결을 이루고 있는 예를 보여 준다. 이때 부품  $p_k$ 가 가상 부품  $p_j^i$ 로부터 분리될 수 있는 가능한 모든 방향은 Fig. 4(b)에서와 같이 벡터  $\overline{SU}_{jk}^i$ 로 나타낼 수 있는데 이때  $\overline{SU}_{jk}^i$ 는 가상 부품  $p_j^i$ 의 접촉면상에 놓여진 반구(hemi-sphere)의 표면적 방향으로 진행되는 벡터의 집합이 되며 이를 벡터이론을 이용하여 수학적으로 나타내면 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\vec{c}_{jk}^i \cdot \overline{SU}_{jk}^i \geq 0 \quad (6)$$

즉,  $\overline{SU}_{jk}^i$ 와 접촉면에 대한 법선벡터  $\vec{c}_{jk}^i$ 와의 벡터 내적값이 항상 zero보다 크거나 같은 값을 가져야 하며 이들  $\overline{SU}_{jk}^i$ 의 영역은 Fig. 4(b)에서와 같이 부품  $p_j$ 상에 놓인 반구의 표면적으로 나타낼 수 있다.

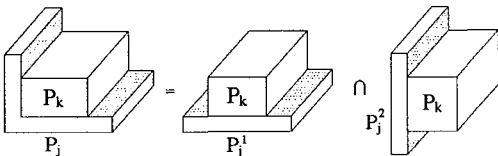


Fig. 3 An example of decomposition of multiple contact connections

### 2.2.2 실제 분리가능 영역의 추론

부품과 부품간의 연결은 일반적으로 1방향 이상의 복합연결관계를 가지며 이와 같이 복합연결관계를 갖는 부품의 분리가능한 영역은 앞에서 구한 단위 접촉면에 대한 분리가능 영역들을 중첩함으로써 구할 수 있다. 즉 부품  $p_k$ 가 접촉하고 있는 인접 부품군  $p_j$ 로부터 분리될 수 있는 가능한 모든 방향은 벡터  $\overline{S}_{jk}$ 로 정의하며 이때  $\overline{S}_{jk}$ 를 실제 분리가능방향이라 한다. 이는 식 (7)과 같이  $p_k$ 가 인접 부품군  $p_j$ 와 갖는 모든 단위 접촉면의 분리가능방향  $\overline{SU}_{jk}^i$ 를 AND 연산한 값으로 구해지며 Fig. 5는 본 연산원리를 간단한 예를 들어 보여주고 있다.

$$\overline{S}_{jk} = \bigcap_{i=1}^q \overline{SU}_{jk}^i \quad (7)$$

( $q$ :  $p_j$ 와  $p_k$ 간의 모든 접촉법선 방향의 수)

이때  $\overline{S}_{jk}$ 가 공집합 $\{\emptyset\}$ 인 경우는 부품  $p_k$ 가 부품  $p_j$ 로부터 분리가능한 영역이 없음을 의미하고, 두 부품간에는 분리 또는 조립이 불가능하게 된다.

### 2.3 치구 범위의 산출

Fig. 2의 부품  $p_1$ 에 대한 부품  $p_2$ 의 실제 분리가능 영역을 좌표표상에서의 방향 벡터로 도시하면 Fig. 6(a)와 같다. 이들 중 3방향의 접촉연결에 대한  $\overline{SU}_{12}^i(i=1,2,3)$ 를  $\theta_s$ - $\phi_s$  평면상에 도시하고 이

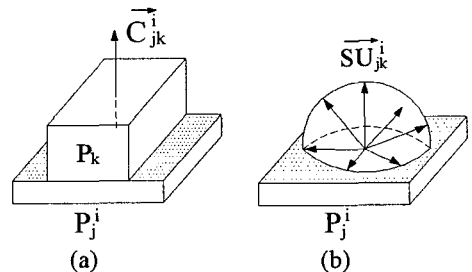


Fig. 4 Unit separable direction,  $\overline{SU}_{jk}^i$  for the given contact normal vector,  $\vec{c}_{jk}^i$

들의 교집합인  $\vec{S}_{12}$ 를 구해보면 Fig. 6(b)의 빗금친 영역과 같다. 이상의 그림에서 보듯이 접촉연결만 고려하였을 경우에는 식 (7)에 의해 부품  $p_2$ 는 부품  $p_1$ 으로부터 빗금친 영역의 방향으로 분리가 가능하며, 이때  $p_1$ 을 고정하고 있는 치공구는 빗금친 영역을 제외한 모든 영역이 간섭이 없는 치구 범위가 될 수 있다. (단 삽입연결  $\vec{f}_{12}$ 까지를 고려할 경우 실제 조립단계에서는 삽입연결의 조립방향이 다른 조립 가능한 방향에 우선한다. 하지만 최종 삽입조립 전단계까지의 접근 가능영역은 접촉연결만을 고려한 빗금친 영역과 동일하게 된다.)

이상과 같이 추론된 분리가능 영역으로부터 유연조립기구가 접근하는 조립영역을 효과적으로 추론해내고 이로부터 조립영역을 제외한 치공구의 치구 영역을 정확히 산출해냄으로써 유연조립기구와의 간섭이 없는 치공구의 동작범위를 추론할 수 있게 된다.

### 3. 베이스조립체의 불안정도 추론

치공구 설계의 주요 고려인자는 조립기구와의 간섭을 억제하면서도 동시에 베이스조립체가 흐트러짐 없이 정확한 위치를 유지하도록 하는 것이다. 즉 베이스조립체가 흐트러질 수 있는 불안정도를 미리 산정하여 이를 최소화하는 안정한

방향으로 베이스조립체의 위치를 잡아줌으로써 베이스조립체의 안정도를 높이고 동시에 치공구의 복잡도를 최대한 줄일 수 있다. 따라서 본 장에서는 앞에서 구한 분리가능 영역  $\vec{S}_{jk}$ 로부터 부품이 분리될 수 있는 분리가능도를 정의(3.1절)하고, 이를 이용하여 부품의 불안정도를 추론하였다(3.2절). 그리고 이로부터 치공구 핸들링의 기준이 되는 베이스조립체의 불안정도를 도출하는 방안을 제시하였다(3.3절).

#### 3.1 분리가능도의 정의

앞에서 임의의 부품  $p_k$ 가 분리될 수 있는 영역을 구(sphere)좌표평면으로 나타내었으며 이를 통하여 mapping된 영역(빗금침 영역)이 클수록 분리가 용이하다는 것을 알 수 있었다. 이때 부품  $p_k$ 가 분리되기 쉬운 정도를 수치화한 것이 부품  $p_k$ 의 분리가능도이며, 이는 자유상태 부품의 최대 분리 영역,  $\max(A_{sp})$ 에 대한 부품  $p_k$ 의 분리가능 영역,  $A_{sp}$ 의 비율로 정의된다.

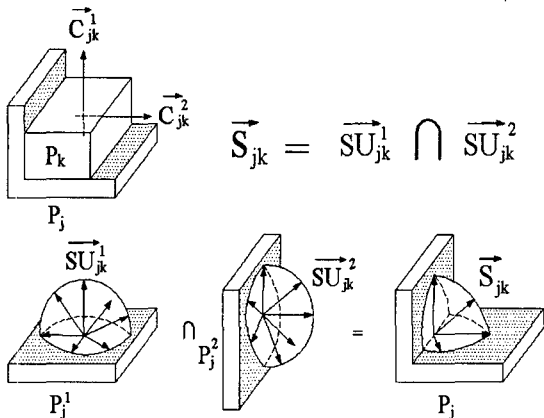
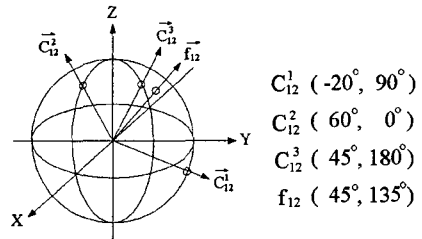
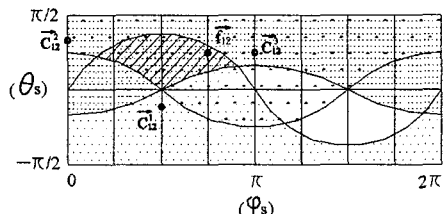


Fig. 5 Principle of the algorithm for extracting admissible separable direction



(a)



(b)

- separable range based on  $\vec{C}_{12}^1$
- separable range based on  $\vec{C}_{12}^2$
- separable range based on  $\vec{C}_{12}^3$

Fig. 6 An example of actual separable direction on the plane( $\theta_s, \phi_s$ )

$$R_{sp}(p_k) = \frac{A_{sp}}{\max(A_{sp})} = \frac{\int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos\theta \, d\theta \, d\phi}{4\pi} \quad (8)$$

여기서  $\max(A_{sp})$ 는 부품간의 간섭이 전혀 없는 자유상태의 분리가능 영역이며 단위 구(unit sphere)의 전체 표면적  $4\pi$ 로 나타낼 수 있다.

### 3.2 부품의 불안정도 추론

유연조립 상태에서의 실질적인 부품의 불안정도를 산정하기 위해서는 식(8)의 분리가능도 함수에 중력가중치를 함께 고려하여야 한다. 이를 위하여 Fig. 7과 같이 중력의 영향이 나타나는  $\theta_s$  좌표값에 지수함수  $\exp(-a\theta_s)$ 를 곱함으로써 중력가중치를  $\theta_s$ 값에 따른 지수함수<sup>(12)</sup>로 나타내었다(이때  $a$ 는 중력 비례상수). 이로부터 부품  $p_k$ 의 중력을 고려한 불안정도  $R_{IS}(p_k)$ 는 자유상태 부품의 최대 불안정도  $\max(A_{IS})$ 에 대한 부품  $p_k$ 의 불안정도  $I_{IS}(p_k)$ 로 나타낼 수 있다.

$$R_{IS}(p_k) = \frac{I_{IS}(p_k)}{\max(I_{IS})} = \frac{\int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \exp(-a\theta_s) \cos\theta_s \, d\theta_s \, d\phi_s}{\max(I_{IS})} \quad (9)$$

여기서 최대 불안정도  $\max(A_{IS})$ 는 아무런 접

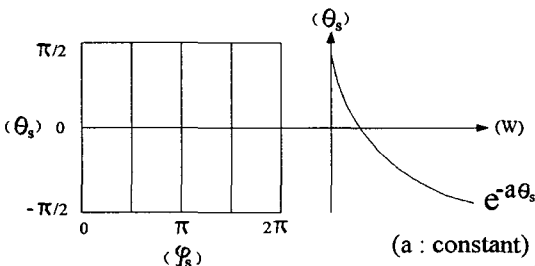


Fig. 7 Weighting factor of instability in consideration of gravity

촉이 없는 자유상태 부품이 가질 수 있는 최대의 불안정값을 의미하며 그 값은 단위 구(unit sphere) 전체 표면적을 구하는 계산식에 중력가중치  $\exp(-a\theta_s)$ 를 곱함으로써 다음과 같이 계산되어진다.

$$\begin{aligned} \max(A_{IS}) &= \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp(-a\theta_s) \cos\theta_s \, d\theta_s \, d\phi_s \\ &= \pi [-a \exp(-a\theta_s) \sin\theta_s]_{-\pi/2}^{\pi/2} + \\ &\quad \pi [a \exp(-a\theta_s) \cos\theta_s]_{-\pi/2}^{\pi/2} \\ &= 2\pi a \operatorname{hyp}[\cos a/2] \end{aligned} \quad (10)$$

### 3.3 베이스조립체의 불안정도 추론

실제 조립이 진행될 때 치공구의 동작특성을 결정하는 중요한 인자는 그때까지 조립된 베이스조립체가 갖는 불안정도이며 이는 식 (9)에서 구한 부품의 불안정도 계산식을 이용하여 구한다.

<정의>베이스조립체: 베이스조립체  $BA_i$ 는 조립이 진행되는  $i$ 번째 단계에서 현재까지 조립된 부품의 집합체라고 정의한다.

$$BA = \{BA_1, BA_2, \dots, BA_i, \dots, BA_n\} \quad (n : \text{조립부품의 총수})$$

즉  $BA_i$ 는  $n$ 개의 부품으로 이루어진 대상 조립품에서  $i$ 개의 부품이 조립완료된 베이스조립체를 의미한다.

매 조립공정에서 베이스조립체가 갖는 불안정도는 베이스조립체를 고정하는 고정용 치공구의 설계에 주요 고려인자가 되며 이때 베이스조립체  $BA_i$ 의 불안정도  $E_i$ 는 베이스조립체를 이루는  $i$ 개의 부품들이 갖는 부품 불안정도의 총합이 된다.

$$E_i = \sum_{j=1}^i R_{IS}(p_j) \quad (i \text{는 베이스조립체를}$$

이루는 부품  $p_j$ 의 수) (11)

#### 4. 위치변환 치공구의 설계

부품이 조립되어질 때 베이스조립체가 불안정 하면 베이스조립체 내의 부품들이 흐트러질 가능성이 높아지므로 이를 방지하기 위해서는 치공구를 이용하여 고정시켜 주어야 한다. 그러나 이때 치공구의 고정 부위가 많아지면 많아질수록 치공구의 제작 난이도와 제작 단가가 기하급수적으로 증가될 뿐만 아니라 유연조립 시스템에서의 유연성과 대응성을 떨어뜨리게 된다. 따라서 베이스조립체 내의 부품들이 중력에 대해 안정한 상태에 위치할 수 있도록 치공구의 치구위치를 변환하여 위의 문제점에 대한 해결방안을 제시하고자 한다.

##### 4.1 베이스조립체의 안정성 판별

<규칙> 베이스조립체의 안정성 판단식  
 베이스조립체를 구성하는 부품들이 갖는 분리가능 영역의  $\min(\theta_s)$  값이 어느 하나라도 조립부품의 조립특성 및 마찰계수 등을 고려하여 결정한  $\text{Limit}(\theta_s)$  값보다 아래에 위치해서는 안 된다.

$$\min(\theta_s) > \text{Limit}(\theta_s) \quad (12)$$

위 조건을 만족하는 베이스조립체일지라도 추론된 불안정도  $E_i$ 가 주변 작업요건 및 치공구의 성능 등을 고려하여 결정한 한계 불안정도,  $\text{Limit}(E_i)$ 보다 작은 값이어야 한다.

$$E_i < \text{Limit}(E_i) \quad (13)$$

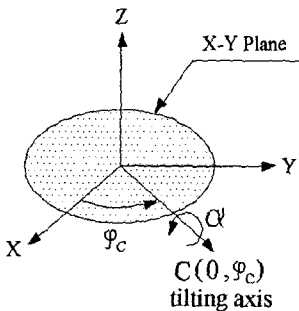
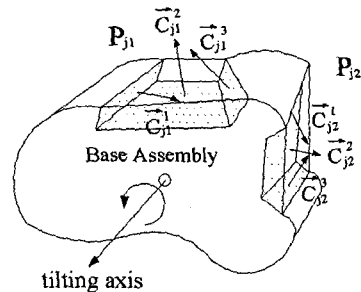


Fig. 8 Tilting axis on X-Y plane

여기서 식 (12)는 위치변환 치공구의 선정 기준이 되고 식 (13)은 치공구 고정자유도의 선정기준이 되며 본 논문에서는 식 (12)를 기준으로 하는 위치변환 치공구의 선정기법에 대하여 구체적인 방안을 제시하고자 한다. 즉 베이스조립체를 구성하는 부품들의 분리영역을 기초로 하여 위치변환 치공구의 회전각도 및 회전중심축의 계산방법을 제안한다. 그리고 위치변환 치공구가 회전하게 되면 이로 인해 베이스조립체 내의 각 부품들이 갖는 방향 좌표값들이 변하게 되는데 이는 회전 후에 베이스조립체의 조립형상 및 조립특성을 나타내는 주요 정보가 됨으로 이의 변환 방법에 대해서도 기술하기로 하겠다

##### 4.2 위치변환 치공구의 회전중심축 선정 및 회전각도 계산

위치변환 치공구의 회전각도 및 회전중심축은 베이스조립체를 구성하는 부품들이 갖는 분리가능 영역에 의해 결정된다. 즉 식 (12)로부터 베이스조립체를 구성하는 부품들이 갖는  $\min(\theta_s)$  값이 기준  $\text{Limit}(\theta_s)$ 보다 작은 값이 하나라도 존재하게 되면 이 베이스조립체는 불안정한 상태가 된다. 따라서 이를 해소하기 위해서는 베이스조립체의  $\min(\theta_s)$  값이 기준  $\text{Limit}(\theta_s)$  값보다 커지는 방향으로 위치를 변환시켜 주어야 한다. 이때 베이스조립체를 회전시키기 위한 회전중심축은 Fig. 8에서 보는 바와 같이  $\theta_c=0$  인 X-Y 평면상



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

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

Fig. 9 An example of a base assembly on tilting device

에 존재하게 되며, 이로부터 회전중심축,  $C(\theta_c, \phi_c)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_c &= 0 \\ \phi_c &= \phi - \pi/2 \quad \text{if } \alpha > 0 \\ &= \phi + \pi/2 \quad \text{if } \alpha < 0 \\ (\alpha: \text{위치변환 회전각}) \end{aligned} \quad (14)$$

예를 들어 Fig. 9와 같이 베이스조립체로부터 분리가능한 부품들이  $p_{j1}$ 과  $p_{j2}$ 라 하면 이들이 베이스조립체와 이루는 연결 벡터값들은 식 (4)에 의해 Fig. 9의 아래와 같이 표기된다. 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 각 부품의 분리영역을 도식해 보면 Fig. 10과 같이 구해진다. 이때 조립품의 조립 특성 및 마찰계수 등을 고려하여 결정한  $\text{Limit}(\theta_s)$ 의 값을  $-30^\circ$ 라고 하면,  $p_{j1}$ 의 경우 분리가능(빛금친 영역)한 영역이  $\min(\theta_s) = 0^\circ$ 로서  $\text{Limit}(\theta_s)$ 보다 위에 위치하지만,  $p_{j2}$ 의 경우는 분리가능한 영역이  $\min(\theta_s) = -45^\circ$ 가 되어  $\text{Limit}(\theta_s)$ 보다 아래의 위치에 놓이게 된다. 따라서 베이스조립체를  $|\text{Limit}(\theta_s) - \min(\theta_s)| = 15^\circ$  값보다 큰 회전각  $\alpha$ 만큼 회전시켜줌으로써 베이스조립체를 안정화시켜야 한다. 이때 부품  $p_{j2}$ 의  $\min(\theta_s)$ 를 유발하는 접촉연결 방향은 Fig. 10에

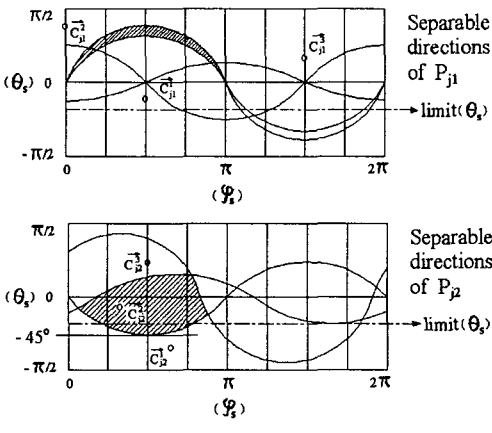


Fig. 10 An unstable separable directions before tilting

서 보는 바와 같이 식 (6)에 의해 좌표값  $(\theta_s, \phi_s) = (45^\circ, 90^\circ)$ 임을 알 수 있다. 그리고 이를 기준으로 베이스조립체를  $\alpha$ 만큼 회전시키기 위한 중심축,  $C(\theta_c, \phi_c)$ 을 구하면, 식 (14)로부터  $\theta_c = 0^\circ$ ,  $\phi_c = 0^\circ$ 가 각각 얻어진다. Fig. 11은 앞에서 구한 회전중심축을 중심으로 베이스조립체를  $\alpha = 17^\circ (> 15^\circ)$ 만큼 회전시킨 후의  $p_{j1}$ ,  $p_{j2}$ 에 대한 분리가능 영역을 도식한 것이다. 여기서 알 수 있듯이  $p_{j1}$ 은 여전히 안정된 상태를 유지하면서 동시에  $p_{j2}$ 의 불안정도를 해소함으로써 베이스조립체는 안정한 상태를 유지하게 된다.

4.3 위치변환에 의한 베이스조립체의 좌표 변환

본 연구에서는 대상 조립체의 조립형상 및 조립특성을 추론하기 위하여 2.1절의 모델링 기법을 도입하였고, 이를 이용하여 베이스조립체의 부품이 갖는 분리가능 영역 및 분리가능도 그리고 불안정도 등을 산출하였다. 그러나 베이스조립체가 회전중심축,  $C(\theta_c, \phi_c)$ 를 중심으로  $\alpha$ 만큼 회전하고 나면 Fig. 1의 기준좌표계를 바탕으로 모델링되었던 각 연결벡터  $(\vec{c}_{jk}^T, \vec{f}_k)$  값들은 새로 변환된 값들을 갖게 되며 따라서 이 값들을 다시 계산해 주어야 한다. 이때 회전중심축,  $C(\theta_c, \phi_c)$ 는  $\theta_c = 0^\circ$ 인 평면상에 존재하므로 다음과 같이 Z

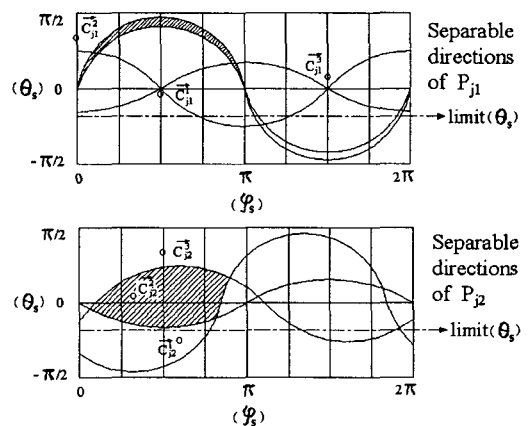


Fig. 11 A stable separable directions after tilting



방향 벡터값이 0인 직교좌표값으로 나타낼 수 있다.

$$C(\theta_c, \phi_c) = C_x \hat{i} + C_y \hat{j} \quad (15)$$

2.1절의 모델링 데이터에서 주어진 연결벡터  $\vec{c}_{jk}^i, \vec{f}_{jk}$  의 대표값을  $q(\theta, \phi)$ 라고 할때 이를 회전 중심축,  $C(\theta_c, \phi_c)$ 를 중심으로  $\alpha$ 만큼 회전시킬 경우의 변환된 좌표  $q_t(\theta_t, \phi_t)$ 는 다음과 같이 구해진다.

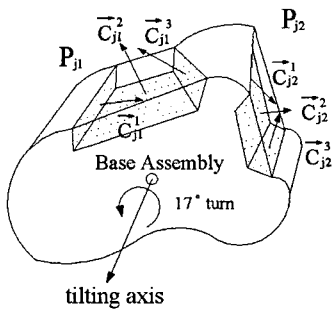
$$q_t(\theta_t, \phi_t) = R_{ot} [C(\theta_c, \phi_c), \alpha] \cdot q(\theta, \phi) \quad (16)$$

$$= \begin{pmatrix} C_x^2 vers(\alpha) + \cos\alpha & C_x C_y vers(\alpha) & C_y \sin\alpha \\ C_x C_y vers(\alpha) & C_y^2 vers(\alpha) + \cos\alpha & -C_x \sin\alpha \\ -C_y \sin\alpha & C_x \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \cdot q(\theta, \phi)$$

여기서  $vers(\alpha) = (1 - \cos\alpha)$ 이다. 그리고 식 (16)으로부터 회전 변환된 좌표  $(\theta_t, \phi_t)$ 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\theta_t = \sin^{-1}[-XC_y \sin\alpha + YC_x \sin\alpha + Z\cos\alpha]$$

$$\phi_t = \tan^{-1} \left( \frac{XC_x C_y vers(\alpha) + YW - ZC_x \sin\alpha}{XW + YC_x C_y vers(\alpha) + ZC_y \sin\alpha} \right)$$



$$C_{j1}(\theta_{j1}, \phi_{j1}) = pc[(-3^\circ, 90^\circ), (64^\circ, 0^\circ), (13^\circ, 270^\circ)]$$

$$C_{j2}(\theta_{j2}, \phi_{j2}) = pc[(-45^\circ, 110^\circ), (5^\circ, 62^\circ), (62^\circ, 90^\circ)]$$

Fig. 12 Tilted base assembly on tilting device

여기서  $W = C_y^2 vers(\alpha) + \cos\alpha$

$$X = \cos\theta \cos\phi$$

$$Y = \cos\theta \sin\phi$$

$$Z = \sin\theta \quad (17)$$

이상과 같이 베이스조립체가 위치변환 치공구에 의해 회전되면 변환된 연결벡터  $\vec{c}_{jk}^i, \vec{f}_{jk}$  값들이 새롭게 계산되어지며 이들 값들이 회전된 베이스조립체의 조립형상 및 조립특성을 나타내는 모델링 데이터로서 사용되게 된다. Fig. 12는 Fig. 9에서 주어진 베이스조립체를  $\alpha=17^\circ$  만큼 회전시킨 후의 조립형태이며 Fig. 12의 아래에는 식 (17)로부터 새롭게 계산된 모델링데이터의 연결벡터 값들을 나타내었다.

### 5. 결론

일반적으로 유연 자동조립시에 베이스조립체의 불안정도를 해소하기 위해서는 복잡한 구조와 기능을 가진 치공구가 필요하다. 그러나 치공구의 고정 자유도가 많아지면 많아질수록 제작이 어려워지고 제작비는 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 고정용 치공구의 고정 자유도를 최소화하고 구조의 단순화에 따른 조립작업의 고속화를 기하고자 하였다. 즉 베이스조립체의 조립상태를 간단한 벡터값으로 모델링하고 이를 이용, 치공구의 치구 영역 및 베이스조립체의 불안정도를 기하학적으로 추론하는 기법을 제안하였다. 그리고 별도의 고정 자유도 추가 없이 위치변환을 통한 안정된 치구영역을 산출하는 방안을 제시함으로써, 유연조립 시스템의 원활한 조립작업을 가능하게 하고 전체 조립라인의 제작단가를 낮출 수 있는 이론적인 설계 방법론을 제시하였다.

### 참고문헌

- (1) Park, T. H. and Lee, B. H., 1991, "An Approach to Robot Motion Analysis and Planning," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, sacramento, CA*, pp. 70~75.
- (2) Maekawa, H., Yokoi, K., Tanie, K. and Kaneko, M., 1991, "Position/Stiffness based

- Manipulation by Three-fingered Robot Hand," *Proceedings of ISART, March 5-7*, pp. 597~603.
- (3) Wilhelm, W. E., 1988, "Conveyor Tracking," *Int. Encyclopedia of Robotics: Applications and Automation*, R.C.Dorf, Ed, New York: John Wiley & Sons, Inc., pp. 283~298.
- (4) Nee, A. Y. C. and Poo, A. N., 1990, "Expert CAD systems for Jigs and Fixture in Artificial Intelligence in Design (edited by D.T.Pham)," *IFS/Springer, London*.
- (5) Huang, Y. F. and Lee, C. S. G., 1991, "A Framework of Knowledge-based Assembly Planning," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, sacramento, CA*, pp. 599~604.
- (6) Pham, D. T. and Sam Lazaro, A., 1993, "Autofix-Expert CAD System for Jigs and Fixtures," *International Journal of Machine and Tools Manufacturing*, Vol.30, No.3, pp. 403~411.
- (7) Kim, I. H., Cho, K. K., Oh, J. S. and Lee, S. H., 1995, "Integration of Fixture Planning for machining Processes," *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol.21, No.1, March, pp. 51~65.
- (8) Kim, J. D., Cho, Y. S. and Lee, J. W., 2003, "Virtual Space Calibration for Laser Vision Sensor Using Circular Jig," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol.20, No.12, December, pp. 73~79.
- (9) Shin, C. K. and Cho, H. S., 1994, "On The Generation of Robotic Assembly planning based on Separability and Assembly Motion Stability," *Robotica*, Vol.12, pp. 7~15.
- (10) Homem de Mello, L. S. and Sanderson, A. C., 1990, "AND/OR Graph Representation of Assembly Plans," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.6, No.2, pp. 188~199.
- (11) Cho, D. Y. and Cho, H. S., 1993, "Inference on Robotic Assembly Precedence Constraints Using Part Contact Level Graph," *Robotica*, Vol.11, 173~183.
- (12) Lee, S. H., 1990, "Assembly Planning based on Subassembly Extraction," *IEEE Transaction on Robotics and Automation, Special Issue on Manufacturing Systems: Design, Planning, Scheduling and Real-Time Control*, pp. 1~30.