

조립순서 생성을 위한 새로운 방법

(A New Method for Generating Assembly Sequences)

朴種憲*, 鄭明振*

(Jong Hun Park and Myung Jin Chung)

要約

본 논문에서는 제품의 조립순서들을 구하기 위한 새로운 방법을 제시한다. 새로 제시된 방법에서는 조립에 필요한 구속조건을 서로 중복되지 않게 모두 구한 다음 이를 위반하지 않는 조립작업만을 탐색함으로써 불필요한 탐색없이 원하는 조립순서들을 생성한다. 이렇게 할 경우 기존의 방법으로는 탐색공간이 폭발적으로 증가하여 적용이 거의 불가능했던 복잡한 제품의 조립순서 까지도 구할 수 있다.

Abstract

This paper presents a new method for generating assembly sequences. The method acquires constraints on sequencing the assembly tasks without redundancy. Then it generates the assembly sequences without searching undesirable tasks by recursively searching all assembly tasks which do not violate the assembly constraints. Since the method does not search undesirable tasks, it can generate assembly sequences for complex products. Current available methods may not generate assembly sequences for the complex product since their search-space increases explosively as the number of parts rises.

1. 서론

제조업 전반에 걸쳐 제품의 전체 비용 중 조립이 차지하는 비중이 매우 클 뿐 아니라, 생산에 필요한 전체 노동력의 절반 이상이 조립작업에 소요되고 있다.¹⁾ 따라서 자동화를 위한 첫 대상으로 조립작업이 꼽히고 있으나 로봇의 기능과 가격뿐 아니라 사용상에 어려움 등으로 인하여 지금까지는 많이 이용되지 못하였다. 그러나 지속적인 임금인상과 로봇과 관련된 기술의 발달로 조립에서 로봇의 이용이 점차 증가

하는 추세에 있다.

다품종 소량생산을 특성으로 하는 현대 산업에서 제품은 끊임없이 변하고 발전하게 마련이다. 일반적으로 제품이 약간만 변하더라도 그 제품에 대한 조립순서와 로봇 프로그램은 전체적으로 수정되어야 하므로 제품이 바뀔 때 마다 조립순서를 새로 찾고 로봇 프로그램을 다시 작성한다는 것은 매우 번거로운 뿐 아니라 많은 노력과 경비를 필요로 한다. 한편 컴퓨터 산업의 발달과 CAD 기술의 발달로 근래에는 CAD 를 이용한 제품 설계가 보편적으로 이용되고 있다. 따라서 지금까지 엔지니어와 프로그래머에 의해서 계획되어 오던 작업들을 제품에 대한 CAD 정보를 이용하여 자동화하는 데에 많은 관심이 모아지고 있다.

*正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Electrical Eng., KAIST)
接受日字: 1992年 10月 15日

제품에 대한 컴퓨터 모델로 부터 조립순서를 자동으로 생성하는 연구는 지능로봇을 개발하는 데 기초가 되므로 인공지능을 연구하는 사람들에 의해 일찍 부터 관심의 대상이 되었다.^[2,3] 이러한 연구는 그림 1 과 같이 부품의 공급상태에 따라 제품의 조립순서가 바뀌어야 되는 작업환경에서 매우 중요하며, CAD 와 CAM 을 연결하기 위해서 필요할 뿐 아니라, 기존의 조립계획에 대한 평가나, 제품설계에 대한 평가, 조립라인의 밸런싱과 스케줄링 등에서도 많이 이용될 것이다.

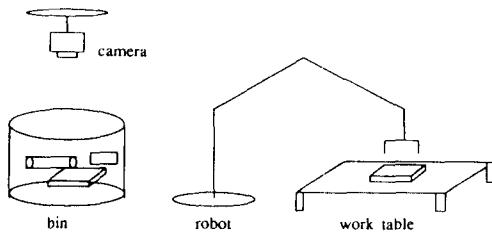


그림 1. 상황에따라 스케줄링을 수시로 해야 하는 조립 시스템

Fig. 1. An assembly system requiring opportunistic scheduling.

조립순서를 모두 구하고 이들을 간략하게 표현하기 위한 체계적인 방법이 많이^[4,9] 개발되었으나 이들 대부분은 자동화 하기에 부적합하거나^[4,6,9] 자동화할 수 있을지라도 제품이 복잡할 경우 탐색해야 할 공간이 지수적으로 증가해 이용이 거의 불가능^[7,8] 하므로 아직 널리 실용화되지 못하고 있다. 따라서 산업체에서는 대부분의 경우 설계자의 지식과 경험에 의하여 조립순서를 정하고 있다. 그러나 설계자의 경험과 직관에 의존하여 조립순서를 결정할 경우 제품이 복잡하거나 부품수가 많아지면 최적의 조립순서를 간과해 버릴 위험이 매우 많아 진다. 따라서 본 논문에서는 조립순서 생성시 효율을 높이기 위하여 조립 구속조건을 중복없이 구하고, 불필요한 조립작업들을 탐색하지 않으므로써 복잡한 제품에 까지도 적용할 수 있는 새로운 방법을 제시하고자 한다.

기술상의 편의를 위하여 2 절에서 우선 제품에 대한 컴퓨터 모델과 앞으로 자주 쓰일 용어들을 정의한 다음 기존 방법들을 분석한다. 3 절에서는 조립 구속조건들의 종류와 이들을 간략한 형태로 구하는 방법을 기술하고, 4 절에서는 조립 구속조건을 이용하여 조립순서를 구하는 방법을 소개한다. 5 절에서는 기존의 방법과 새로 제안된 방법의 탐색공간을 복잡도가 다른 세 제품에 대하여 비교한 다음 6 절에서 결론을 맺는다.

II. 기존 방법의 분석

조립순서를 찾기 위해서는 제품에 관한 기하학적 정보 이외에 부품간의 접촉상태와 접촉방법이 매우 중요하게 된다. 조립계획에 사용되는 제품의 모델은 저자마다 약간씩 내용과 표현이 다르긴 하나 근본적으로는 리에이종 그래프를 사용하고 있다.^[4-10] 리에이종 그래프에서 노드는 부품과 그 속성을 나타내고, 링크는 부품간의 연결관계와 그 속성을 나타낸다. 예를 들어 다섯개의 부품으로 이루어지는 그림 2-a 와 같은 전기 연삭기는 그림 2-b 와 같이 리에이종 그래프로 모델링 된다. 리에이종 그래프에서 용접이나 나사결합 등과 같이 매우 안정된 접촉관계를 나타내는 리에이종들은 굵은 실선으로 표시한다.

부분조립품은 이를 구성하는 부품들로 이루어지는 리에이종 그래프의 연결 부분그래프 (vertex-induced connected subgraph)로 정의 한다. 그러나 부분조립품은 이를 구성하는 부품들의 집합에 의해 유일하게 표현되므로 그래프 표현과 함께 집합 표현을 서로 호환적으로 사용한다. 조립작업은 하나의 부분조립품을 다른 부분조립품에 결합하는 것으로 정의하고 조립작업에 의해 결합되는 두 개의 부분조립품 중 작업자나 로봇과 같은 조립자에 의해 운반되는 부분조립품을 결합-부분조립품, 작업대나 지그 (zig) 와 같은 고정자에 의해 지지되는 부분조립품을 베이스-부분조립품 이라 명명한다. 결합-부분조립품 M 을 베이스-부분조립품 B 에 결합하는 조립작업을 "M @ B" 로 표시한다.

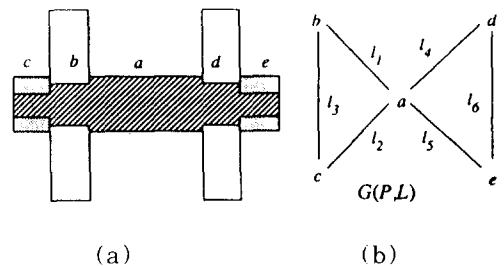


그림 2. 전기 연삭기 모델. 연삭날 b 와 d 는 볼트 c 와 e 에 의해 모터축 a 에 고정된다

Fig. 2. A model of an electric grinder. Grinder blades b and d are permanently fixed to motor shaft a by bolts c and e, respectively. (a) Shape, (b) Liaison graph model.

두 개의 부분조립품을 결합하는 조립작업이 항상 실질적으로 의미가 있는 것은 아니다. 조립되는 순서에 따라 조립작업은 부품의 크기, 위치, 모양과 같은 기하학적 원인에 의해 불가능해 지거나, 조립작업에 의해 새로 생성되는 부분조립품의 구성 부품들이 서로 접촉되어 있지 않아 contact coherence^[11] 가 없을 수 있다. 편의상 본 논문에서는 전자와 같이 부품의 기하학적 요인에 의해 야기되는 구속조건을 기하-구속조건 (G-constraint), 후자와 같이 조립순서의 contact coherence 를 유지하기 위해 가해지는 구속조건을 접촉-구속조건 (C-constraint)라 한다.

조립순서에 대한 구속조건은 크게 조립작업의 순서에 대한 제약과 조립작업 자체에 대한 제약으로 표현되는 데 지금까지는 주로 기하-구속조건을 수동으로 구하는 데 필요한 단계들을 단순화 하기 위한 연구^[4]^[5]와 기하-구속조건을 CAD 데이터로 부터 컴퓨터를 이용하여 구하기 위한 연구^[8]가 진행되었을 뿐 접촉-구속조건에 관한 구체적인 연구는 없었고 단지 접촉 구속조건은 조립작업이나^{[4][5]} 분해작업 (cut-set)^{[6][7]}을 모두 탐색하면서 이들 중 contact coherence 를 깨지 않는 작업들만을 선택함으로써 간접적으로 고려하였다. 그러나 이와 같이 소모적인 방법으로 접촉-구속조건을 구할 경우 부품 수가 조금만 증가하여도 그 수가 폭발적으로 증가하여 이들을 일일이 구하거나 열거하기 어렵게 된다. 뿐만 아니라 접촉-구속조건을 고려하지 않고 기하-구속조건을 구하기 때문에 이들 방법에 의해 구하여진 기하-구속조건 중에는 대부분이 접촉-구속조건과 중복되는 것들이며, 이러한 조립 구속조건의 중복은 조립순서 생성시 효율이 극히 나쁘게 만드는 직접적인 원인이 되고 있다.

한편 조립순서를 구하기 위한 방법으로 De Fazio와 Whitney^[5]는 기하학적으로 가능한 조립작업들을 모두 탐색하면서 그들 중 원하는 것만 선택하였으며, Homem de Mello와 Sanderson^[7]은 완제품과 부분조립품들을 분해하는 모든 cut-set 을 탐색하면서 이들 중 원하는 것만 선택하였다. cut-set 방법의 경우 분해순서의 역이 곧 조립순서가 된다는 가정이 필요하나 실제로 이러한 가정이 적용대상을 크게 제약시키지 않으므로^{[4][8]} 일반적으로 적용되고 있다.

그러나 이러한 기존의 방법들은 제품이 복잡해지거나 부품수가 많아지면 탐색공간이 폭발적으로 증가한다(최대 탐색공간은 $O(3^n)$). 이는 기존의 방법들이 조립 구속조건, 특히 접촉-구속조건, 을 간략한 형태로 구하여 효율적으로 사용하지 않고 완제품과 부분조립품들에 대한 조립작업이나 분해작업들을 모두 탐색하면서 이들 중 불가능하거나 contact coherence

가 없는 것들을 제거하기 때문이다. 따라서 제품이 복잡해지거나 부품수가 많아지더라도 사용될 수 있기 위해서는 조립 구속조건을 서로 중복이 없이 간략한 형태로 구한 다음 이를 위반하지 않는 조립작업들만 탐색함으로써 조립순서를 생성하는 효율적인 방법들이 개발되어야 한다.

Ⅲ. 조립 구속조건 생성 방법

본 논문에서는 조립작업을 통하여 완제품으로 될 수 있고 부품들이 나사체결이나, 용접, 리벳작업 등과 같은 체결작업들에 의해 고정되어 있어 단위 부품처럼 다룰 수 있는 부분조립품만을 결합-부분조립품으로 제한한다. 결합-부분조립품은 리에이종 그래프로 부터 그래프 탐색기법 (depth first search)^[14]를 이용하여 체결작업을 나타내는 리에이종들에 의해 부품들이 고정되어 있는 부분조립품을 모두 찾은 다음 이들 각각에 대해서 이와 기하학적으로 결합할 수 없는 부품들을 추가함으로써 얻어진다. 따라서 부품이 n 개이고 안전한 체결작업을 나타내는 리에이종의 수가 l 개인 제품의 경우 결합-부분조립품의 수 m 의 범위는 $n+l \leq m \leq n+2^l$ 이다. 여기서 n 은 하나의 부품만을 포함하는 결합-부분조립품을 의미하며, 2^l 은 체결작업들에 의해 구성부품이 고정되는 부분조립품의 최대 갯수를 나타낸다. 앞으로 언급되었으나 실제의 경우 제품설계가 잘못되지 않았다면 m 의 분포는 하한값인 $n+l$ 에 크게 치우쳐 있다.

만약 각 결합-부분조립품에 대하여 기하학적 이유에서든 contact coherence 를 유지하기 위해서든 다른 부분조립품과 결합할 수 없는 조건이 모두 주어진다면 완제품과 부분조립품들로 부터 이러한 조건을 위반하지 않도록 결합-부분조립품들을 차례차례 분리해냄으로서 불필요한 탐색없이 조립순서를 생성해낼 수 있다. 따라서 효율적으로 조립순서를 생성하기 위해서는 우선 결합-부분조립품들을 모두 구한 다음 각 결합-부분조립품에 대하여 이와 결합할 수 없는 조립 불가능조건을 구하여야 한다. 편의상 결합-부분조립품 M 의 조립 불가능조건 "M은 부품의 집합 Q 를 포함하는 임의 부분조립품과 결합할 수 없다"를 " $M \notin Q$ "로 표시한다.

본 절에서는 기하-구속조건을 접촉-구속조건과 중복되지 않도록 구하는 방법을 먼저 제시한 다음 접촉-구속조건을 간략하게 구하는 방법을 제시한다. 이때 조립 구속조건을 조립 불가능조건으로 표현하기 위해서 다음과 같은 조립 불가능조건의 특성을 이용한다.

[특성 1] 부품의 집합 Q 를 포함하는 임의의 집합을 Q*라 할 때 결합-부분조립품 M 에 대한 조립 불가능조건 $M \not\subseteq Q^*$ 는 다른 조립 불가능조건 $M \not\subseteq Q$ 로도 충분히 표현된다.

[특성 2] 부품 p 가 부품들의 집합 Q 와 기하학적으로 결합할 수 없다면 p 는 반드시 Q 보다 먼저 조립되어야 한다. 따라서 Q 를 포함하되 부품 p를 포함하지 않는 모든 부분조립품은 조립작업을 통하여 완제품으로 될 수 없다.

특성 1은 가능하면 적은 조립 불가능조건으로 모든 조립작업의 가능 여부를 알아보기 위하여 사용된다. 가령 연삭기에서 {b}⊗{a,c}, {b}⊗{a,c,d}, {b}⊗{a,c,e}, {b}⊗{a,c,d,e} 와 같은 조립 불가능조건들은 특성 1 을 이용할 경우 하나의 불가능조건 {b}⊗{a,c} 로도 충분히 표현된다. 특성 2는 부분조립품이 조립작업을 통해 완제품으로 될 수 있는지 여부를 알아보는 데 유용한 성질일 뿐만 아니라 부품들을 차례차례 조립하는 선형 조립순서 (linear assembly sequence)^[11]를 구하는 데 필요하고 충분한 구속조건이다. 조립순서를 구할 때 조립작업을 통해서 완제품으로 될 수 없는 부분조립품들은 제외되어야 되므로 특성 2를 이용하여 완제품으로 될 수 없는 부분조립품들을 미리 제외시킬 경우 부분조립품들에 대한 조립 구속조건을 구하는 데 뿐 아니라 조립순서를 구하는 데도 시간과 노력을 크게 줄일 수 있다.

1. 기하-구속조건

조립작업은 결합-부분조립품을 베이스-부분조립품에 결합함으로써 수행되므로 베이스-부분조립품에 의해 결합-부분조립품의 경로가 모두 차단될 경우 그 결합-부분조립품은 기하학적으로 베이스-부분조립품과 결합할 수 없게 된다. 결합-부분조립품 M 의 경로를 유한 개라할 경우 M 은 각 경로를 가로막는 부품을 하나 이상 포함하는 부분조립품과 결합할 수 없

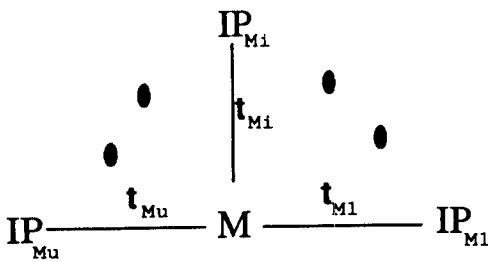


그림 3. 결합-부분조립품 M 의 간섭도
Fig. 3. The interference diagram for a mating subassembly M.

게 된다. 따라서 결합-부분조립품 M 의 조립 구속조건을 구하는 한 방법은 그림 3과 같이 M 의 모든 경로에 대해서 각 경로를 차단하는 부품들을 나열한 간섭도를 구하는 것이다.

결합-부분조립품 M 에 대한 간섭도로 부터 M 의 기하-구속조건은 $M \not\subseteq Q, Q = \{p_1, p_2, \dots, p_u\},$ for all $p_1 \in IP_{M1}, p_2 \in IP_{M2}, \dots, p_u \in IP_{Mu}$ 와 같이 조립 불가능조건으로 표현되나 간섭도로 부터 얻은 조립 불가능조건들 중 상당 부분은 접촉-구속조건과 중복되어 불필요한 것들이다. 가령 간섭도로 부터 얻은 조립 불가능조건 $M \not\subseteq Q$ 의 경우 Q 를 포함하면서 결합부분조립품 M 의 부품을 포함하지 않는 부분조립품이 없다면 이 조립 불가능조건은 필요없게 된다. 따라서 간섭도로 부터 구한 기하-구속조건은 접촉-구속조건과 중복되는 조립 불가능조건들을 제거함으로써 간략화 될 수 있다.

완제품에 대한 리에이종 그래프 G 가 주어질 경우 결합-부분조립품 M 에 대한 기하-구속조건을 접촉-구속조건과 중복이 없게 구하는 과정을 요약하면 다음과 같다. 우선 결합-부분조립품 M 이 취할 수 있는 경로의 집합을 $T_M = \{tm_1, tm_2, \dots, tm_u\}, u \geq 1,$ 이라 하자.

- (1) M을 완제품으로 부터 tm_i 방향으로 분리할 때 M 과 충돌이 일어나는 부품의 집합 IP_{Mi} 를 각 경로에 대하여 구함으로써 M에 대한 간섭도가 만들어진다. 만약 $IP_{Mi}, i = 1, \dots, u,$ 중 공집합이 있다면 M 의 기하-구속조건은 존재하지 않는다.
- (2) M에 대한 간섭도가 구해지면 M 의 각 분리방향 tm_i 에 대하여 리에이종 그래프 G 로 부터 M 을 제거하고 IP_{Mi} 의 원소쌍을 직접 연결하는 리에이종을 모두 제거했을 때 IP_{Mi} 의 원소들 중 tm_i 이외의 다른 모든 경로의 IP_{Mi} 원소와 적어도 한번 이상 연결되지 않은 고립된 부품들을 IP_{Mi} 에서 제거한 IP_{Mi} 를 구한다. 만약 $IP_{Mi}, i = 1, \dots, u,$ 중 공집합이 있다면 M 의 기하-구속조건은 접촉-구속조건과 중복되므로 필요없게 된다.
- (3) 전 단계에서 간소화된 각 집합 $IP_{Mi}, i = 1, \dots, u,$ 로 부터 부품을 하나씩 취하여 얻어진 부품의 집합 즉, 각 분리방향에서 M 의 분리를 막는 최소 부품들의 집합을 모두 구한다. 이때 구해진 집합들을 $CP_{M1}, CP_{M2}, \dots, CP_{Mv}, v \geq 0,$ 라 하면 M 의 기하-구속조건은 $M \not\subseteq CP_{Mi}, i = 1, \dots, v,$ 가 된다.

위와 같은 방법으로 부품이 n 개이고 리에이종이 l

개인 제품의 기하-구속조건을 구할 경우 복잡도는 $O(m \cdot u \cdot n \cdot l)$ 이 된다. 여기서 m 은 결합-부분조립품의 수를 의미하고 $u \cdot n$ 은 각 결합-부분조립품의 간섭도를 구하는 데 복잡도를 의미하며 l 은 간섭도에서 고립된 부품을 채는 데 복잡도^[14]를 의미한다. 일반적으로 결합-부분조립품이 취할 수 있는 경로의 수 u 는 수개^[8]이며 리에이종의 수 l 은 최대 nC_2 이므로 기하-구속조건을 구하는 데 복잡도는 $O(m \cdot n^3)$ 이 된다.

2. 접촉-구속조건

조립작업에 의해 생성되는 부분조립품의 contact coherence 를 유지하기 위해 부가되는 접촉-구속조건은 조립작업에 의해 결합되는 두 개의 부분조립품이 리에이종 그래프 모델에서 반드시 하나 이상의 리에이종으로 연결되도록 하는 것이다. 따라서 접촉-구속조건을 구하기 위한 확실한 한 방법은 각 결합-부분조립품에 대하여 이를 분리할 경우 contact coherence 가 깨지는 부분조립품들을 모두 나열하는 것이나 이는 제품이 복잡해지고 부품이 많아지면 매우 많은 시간과 메모리를 필요로 하므로 다음과 같은 좀 더 효율적인 방법이 필요하다.

부분조립품 S 로부터 결합-부분조립품 M 을 분리할 경우 S 의 contact coherence 가 깨진다면 S 의 리에이종 그래프 모델로 부터 M 을 분리함으로써 서로 연결이 끊어지는 부품쌍이 적어도 하나 이상 존재한다. 그림 4 와 같이 결합-부분조립품 M 뿐만 아니라 M 과 접촉하고 있는 부품 x 와 y 를 포함하는 부분조립품 S 를 가정하자. 이 경우 만약 부품 x 와 y 사이에 M을 통과하지 않는 연결고리 (elementary chain)^[14] 가 없다면 S 로부터 M을 분리하면 S의 contact coherence 가 깨지게 된다. 따라서 부분조

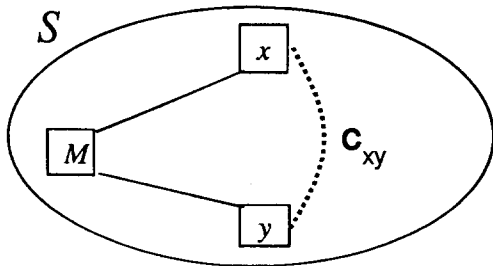


그림 4. 부분조립품 S 에서 결합-부분조립품 M 과 접촉된 부품 x, y 사이의 연결고리

Fig. 4. Elementary chains between the M's neighbor parts x and y in sub-assembly S.

립품 S 에서 결합-부분조립품 M과 부품 x와 y 사이의 접촉-구속조건은 다음과 같이 요약된다: “만약 M 과 {x,y}를 포함하는 부분조립품 S 에서 부품 x 와 y 사이의 연결고리 중 결합-부분조립품 M 을 통과하지 않는 것이 없다면 M은 S로부터 분리될 수 없다.”

리에이종 그래프 모델에서 부품간의 연결고리 존재 유무는 연결고리를 구성하는 부품들의 유무로 판단할 수 있으므로 기술상의 편의를 위하여 연결고리는 이를 구성하는 부품들의 집합으로 표현한다. 그림 4 의 부분조립품 S 내에서 결합-부분조립품 M 을 통과하지 않고 부품 x 와 y 를 연결하는 고리를 c_{xy}라 할 때 c_{xy}를 포함하는 임의의 연결고리 c_{xy}' 은 c_{xy}가 끊어지면 항상 끊어진다. 따라서 접촉-구속조건을 줄이기 위해서는 부품 x 와 y 사이의 연결고리 중 다른 연결고리에 포함되지 않는 것들만 필요하므로 이들의 집합을 C_{xy}라 하면 결합-부분조립품 M과 그와 접촉하고 있는 부품 x 와 y 사이에 접촉-구속조건은 다음과 같이 조립 불가능조건으로 표현된다.

$$M \notin (\{x,y\} \& \overline{C_{xy}}), \text{ for all } c_{xy} \in C_{xy} .$$

여기서 연산자 “&” 와 “—” 는 각각 “그리고” 와 “존재하지 않는다” 를 의미한다. 즉 $\overline{C_{xy}}$ 는 “연결고리 c_{xy}가 존재하지 않는다”를 의미한다.

결합-부분조립품의 접촉-구속조건 $M \notin (\{x,y\} \& \overline{C_{xy}})$ 는 기하-구속조건과 서로 중복되지 않게 할 경우 더욱 더 간략화 될 수 있다. 접촉-구속조건 $M \notin (\{x,y\} \& \overline{C_{xy}})$ 가 기하-구속조건과 중복되는 경우는 크게 다음과 같다.

[경우 1] 만약 기하-구속조건 때문에 결합-부분조립품 M 이 집합 {x,y} 와 결합할 수 없다면 접촉-구속조건 $M \notin (\{x,y\} \& \overline{C_{xy}})$, for all $c_{xy} \in C_{xy}$, 는 기하-구속조건과 중복되므로 불필요하다.

[경우 2] 만약 연결고리 c_{xy}를 구성하는 부품 p 가 집합 MU{x,y} 로부터 기하-구속조건 때문에 분리될 수 없다면 부품 p 가 제거됨으로서 연결고리 c_{xy} 가 끊어지는 경우는 없으므로 C_{xy}에서 p는 불필요하다.

[경우 3] 연결고리 c_{xy} ∈ C_{xy}가 끊어지기 위해서는 C_{xy}를 구성하는 부품 중 x와 y를 제외한 임의의 부품이 제거되어야 한다. 즉 접촉-구속조건 $M \notin (\{x,y\} \& \overline{C_{xy}})$ 에서 연결고리 c_{xy}의 시작과 끝에 있는 부품 x 와 y 는 불필요하다.

특별한 경우로 연결고리 c_{xy}를 구성하는 부품 중 x, y 를 제외한 모든 부품이 기하-구속조건 때문에 집합 MU{x,y} 로부터 분리될 수 없다면 접촉-구속조건 $M \notin (\{x,y\} \& \overline{C_{xy}})$ 는 기하-구속조건과 중복되므로

불필요하게 된다. 뿐만 아니라 부분조립품 M과 이웃하고 있는 부품 x와 y가 리에이종으로 연결되었다면 x와 y사이의 연결고리 집합은 $\{x, y\}$ 이므로 집합 $\{x, y\}$ 는 포함하되 연결고리 $\{x, y\}$ 를 포함하지 않는 부분조립품은 없으므로 이때 접촉-구속조건은 존재하지 않는다.

따라서 M과 접촉하고 있는 부품 x와 y가 서로 리에이종으로 연결되어 있지 않을 경우 기하-구속조건을 위반하지 않고 연결고리 $C_{xy} \in C_{xy}$ 를 집합 $MU\{x, y\}$ 로부터 뺄 수 있다 면 접촉-구속조건 $M @ (\{x, y\} \& \bar{C}_{xy})$ 을 간략화하기 위해서는 연결고리 C_{xy} 로 부터 다음 조건을 만족하는 부품 p를 모두 제거해야 한다: 1) $p = x$. 2) $p = y$. 3) p는 집합 $MU\{x, y\}$ 로부터 기하-구속조건 때문에 분리할 수 없다.

부분조립품 S에 대한 조립 구속조건은 완제품 P에 대한 조립 구속조건 중 부분조립품 S에서 항상 "거짓"인 항들을 제거함으로써 쉽게 구할 수 있다. 따라서 완제품에 대한 조립 구속조건으로 부터 모든 부분조립품에 대한 조립 구속조건을 유도할 수 있으므로 완제품에서 부분조립품 M의 접촉-구속조건을 구하는 과정을 정리하기로 한다. M의 접촉-구속조건을 구하기 위해서는 완제품의 리에이종 그래프 G와 각 결합-부분조립품에 대한 기하구속조건이 주어졌다고 가정한다.

- (1) 리에이종 그래프 G로부터 결합-부분조립품 M과 접촉하고 있는 부품들을 찾는다. M과 접촉된 부품이 두개 미만이면 M의 응집-구속조건은 존재하지 않으므로 끝낸다.
- (2) 리에이종 그래프 G로부터 M과 접촉하고 있는 리에이종들과 M을 제거한 나머지를 G'이라 하자.
- (3) M과 접촉하고 있는 부품들의 각 쌍 (x, y)에 대하여,
 - 3.1) 중복이 없는 응집-구속조건을 구하는 데 필요한 것들은 버린다.
 - a) 부품 x와 y가 하나의 리에이종으로 연결되어 있다면 부품쌍 (x, y)를 버리고 다른 부품쌍을 선택한다. (경우 3)
 - b) 만약 M을 집합 {x, y}와 기하학적으로 결합할 수 없다면 부품쌍 (x, y)를 버리고 다른 부품쌍에 대하여 3.1부터 반복한다. (경우 1)
 - c) 부품 x와 y사이의 경로 C_{xy} 중 x와 y를 제외하고 기하-구속조건 때문에 C_{xy} 의 구성 부품들을 하나도 분리할 수 없는 것이 있다

면 부품쌍 (x, y)를 버리고 다른 부품쌍에 대하여 3.1부터 반복한다. (경우 2)

3.2) 부품 x, y사이의 연결고리의 집합 C_{xy} 를 그래프 G'에서 구한 다음

- a) 기하-구속조건 때문에 부분조립품 $MU\{x, y\}$ 로부터 분리할 수 없는 부품들을 집합 C_{xy} 에서 제거한다. (경우 2)
- b) 부품 x와 y를 집합 C_{xy} 에서 제거한다. (경우 3)

3.3) M과 접촉하고 있는 두 부품 x, y와 M사이의 응집-구속조건은 조립-불가능조건 $M @ (\{x, y\} \& C_{xy})$. $\forall C_{xy} \in C_{xy}$ 로 표현된다.

결합-부분조립품 M과 접촉하고 있는 부품쌍의 최대 수는 $\binom{n-3}{2} < \binom{n}{2} = O(n^2)$ 이며, 이들 부품쌍 중 불필요한 것들은 3.1 단계에서 모두 제거되는 데 이때 필요한 복잡도는 3.1 단계의 c)에 의해 결정되며 이 단계는 부분조립품 $MU\{x, y\}$ 로부터 기하-구속조건 때문에 분리할 수 없는 부품과 접촉하고 있는 리에이종들의 비용을 0 그렇지 않은 리에이종들의 비용을 1로 할 때 그래프이론에서 최단거리 탐색과 같으므로 3.1 단계의 복잡도는 $O(n^2)^{14)}$ 이 된다.

3.1 단계를 통하여 M과 접촉하고 있는 부품 쌍들 중 최소 접촉-구속조건을 구하는 데 필요없는 쌍들이 모두 제거되므로 3.2 단계에서 탐색되는 연결고리의 수는 최소로 되나 3.2 단계에서 탐색되는 연결고리의 이론적인 최대 수는 $\binom{n-3}{2} \ll 2^n$ 가 되므로 결합-부분조립품 M에 대한 접촉-구속조건을 구하는 데 필요한 복잡도는 이론적으로는 $O(n^2 \times (n^2 \times 2^n))$ 나 되나 실제의 경우 5장의 표 1에서 보이는 바와 같이 3.2 단계에서 탐색되는 연결고리의 수는 그 하한값인 0에 크게 치우쳐 있다.

IV. 효율적인 조립순서 생성방법

일단 기하학적 이유에서든 contact coherence를 유지하기 위해서는 각 결합-부분조립품에 대한 조립 불가능조건이 모두 구해지면 완제품과 부분조립품들로부터 이를 위반하지 않고 결합-부분조립품들을 차례차례 분리해냄으로서 불필요한 탐색없이 조립순서가 생성되게 된다. 제품 조립을 위한 가능한 순서는 매우 많으므로 이들을 간결하게 나타내기 위해 Homem de Mello와 Sanderson¹⁷⁾은 AND/OR 그래프를, De Fazio와 Whitney¹⁸⁾는 방향그래프를 사용하였다. 그러나 이러한 표현을 사용할 경우 M을 S에 결합하는 작업과, S를 M에 결합하는 작업, S와 M을

동시에 결합하는 작업들을 구분할 수 없게 된다. 따라서, 이들 표현은 조립순서를 평가하는 데 필요한 정보를 충분히 제공할 수 없으므로 본 논문에서는 조립작업에 의해 결합되는 두 부분조립품을 달리 표현할 수 있도록 방향그래프에 레이블을 달아 사용한다. 예를 들어 결합-부분조립품 M 을 베이스-부분조립품 B 에 결합하는 조립작업은 $M \cup B \xrightarrow{M} B$ 와 같이 레이블된 방향링크로 표현한다.

제품 P 를 조립하는 데 필요한 결합-부분조립품과 각 결합-부분조립품에 대한 조립 불가능조건이 모두 주어진 상태에서 제품 P 에 대한 조립순서를 모두 구한 다음 이들을 레이블된 방향그래프로 표현하는 과정을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 루트노드 P 만을 포함하는 레이블된 방향그래프 LDG를 생성한 다음 완제품 P를 다음의 (2)에서 (6)까지 단계를 재귀적으로 (recursively) 반복하면서 조립순서를 구하여 LDG에 기록한다.
- (2) 현재 분해될 부분조립품 S가 공집합이거나 S를 나타내는 노드가 LDG에 있다면 S에 대한 조립순서 생성과정은 끝난다.
- (3) S를 나타내는 노드를 LDG에 새로 추가하고 S의 parent를 POS라 하자.
- (4) 부분조립품 S의 결합-부분조립품과 이들에 대한 조립 구속조건을 구한다. S의 결합-부분조립품과 조립 구속조건은 POS의 결합-부분조립품과 조립 구속조건 중 S에 포함된 것들만 선택함으로써 얻어진다.
- (5) 부분조립품 S의 결합-부분조립품 중 구속되지 않은 각 결합-부분조립품 M에 대하여 조립작업 $M @ (S-M)$ 을 LDG에 기록한다.
- (6) 전 단계에서 새로 생긴 각 부분조립품에 대해 부품 수가 많은 것부터 (2)단계로 재귀해서 분해한다.

위와 같은 방법으로 조립순서를 생성할 경우 부가적인 메모리를 필요로 하지만 조립 구속조건을 위반하는 조립작업을 탐색하지 않으므로 다른 어느 방법보다 탐색공간을 최소화 할 수 있다.

V. 적용 예

본 절에서는 지금까지 제시한 방법들을 그림 2의 전기 연삭기에 적용하여 조립 구속조건과 조립순서를 생성하는 과정을 요약한다.

1. 기하-구속조건

전기 연삭기의 부품 a에 대한 기하-구속조건을 구하는 과정은 다음과 같다. 우선 부품 a의 경로를 왼쪽과 오른쪽으로 가정하자. 부품 a를 왼쪽으로 분리할 때 이를 방해하는 부품들로는 $IP_{a1} = \{b, c\}$ 가 있고, 오른쪽으로 분리할 때 이를 방해하는 부품들로는 $IP_{a2} = \{d, e\}$ 가 있다. 그러나 리에이종 그래프 모델로부터 부품 a를 제거하고 부품 b와 c, 부품 d와 e 사이의 리에이종을 제거하면 부품 b, c, d, e가 서로 고립되므로 이들을 각각 IP_{a1}' 와 IP_{a2}' 에서 제외시키면 IP_{a1} 과 IP_{a2} 는 공집합이 된다. 따라서 부품 a의 기하-구속조건은 다른 조립 구속조건 즉, 접촉-구속조건과 중복되므로 구할 필요가 없다.

$\{b, c\} \leftarrow \{a\} \rightarrow \{d, e\}$	$\{ \} \leftarrow \{a\} \rightarrow \{ \}$
$\{c\} \leftarrow \{b\} \rightarrow \{a, d, e\}$	$\{c\} \leftarrow \{b\} \rightarrow \{c\}$
$\{ \} \leftarrow \{c\} \rightarrow \{a, b, d, e\}$	$\{ \} \leftarrow \{c\} \rightarrow \{ \}$
$\{a, b, c\} \leftarrow \{d\} \rightarrow \{e\}$	$\{a\} \leftarrow \{d\} \rightarrow \{e\}$
$\{a, b, c, d\} \leftarrow \{e\} \rightarrow \{ \}$	$\{ \} \leftarrow \{e\} \rightarrow \{ \}$
$\{ \} \leftarrow \{a, b, c\} \rightarrow \{d, e\}$	$\{ \} \leftarrow \{a, b, c\} \rightarrow \{ \}$
$\{b, c\} \leftarrow \{a, d, e\} \rightarrow \{ \}$	$\{ \} \leftarrow \{a, d, e\} \rightarrow \{ \}$

(a)

(b)

그림 5. 전기 연삭기의 결합-부분조립품들에 대한 간섭도

(a) 간섭도 (b) 간략화된 간섭도

Fig. 5. Interference diagrams for mating subassemblies of the grinder.

(a) Interference diagrams.

(b) Simplified interference diagrams.

같은 방법으로 부품 b의 경로를 왼쪽과 오른쪽으로 가정하자. 부품 b를 왼쪽으로 분리할 때 이를 방해하는 부품으로는 $IP_{b1} = \{c\}$ 가 있고, 오른쪽으로 분리할 때 이를 방해하는 부품들로는 $IP_{b2} = \{a, d, e\}$ 가 있다. 한편 리에이종 그래프 모델로부터 부품 b를 제거하고 부품 a, d, e 사이의 리에이종을 제거하면 부품 d와 e가 고립되므로 이들을 IP_{b2}' 에서 제거하면, $IP_{b1} = \{c\}$ 와 $IP_{b2} = \{a\}$ 가 된다. 따라서 IP_{b1} 와 IP_{b2} 의 부품들 하나씩 포함하는 집합은 $\{a, c\}$ 밖에 없으므로 부품 b에 대한 기하-구속조건은 $\{b\} @ \{a, c\}$ 가 된다. 같은 방법으로 부품 d에 대해서 기하-구속조건을 구하면 $\{d\} @ \{a, e\}$ 가 된다. 그 밖에 부품 c와 e는 각각 다른 부품과 충돌없이 분리될 수 있는 경로를 갖고 있으므로 이들에 대한 기하-구속조건은 없다.

일단 각 부품에 대한 기하-구속조건이 구해지면 이로부터 조립 불가능조건인 특성 2 를 이용하여 각 부분조립품이 조립작업을 통하여 완제품으로 될수 있는지를 알 수 있다. 따라서 구성부품들이 체결작업에 의해 결합되어 있는 부분조립품들 중 조립작업을 통하여 완제품으로 될 수 있는 것들만 결합-부분조립품으로 선택하면 전기 연삭기의 결합-부분조립품은 {a}, {b}, {c}, {d}, {e}, {a,b,c}, 와 {a,d,e} 가 된다. 그 밖의 부분조립품 이를테면 {a,c,d,e} 나 {a,b,c,e} 등은 완제품으로 될 수 없고 {a,b,d} 나 {a,b,c,d} 등은 고정되지 않은 부품을 포함하므로 부품공급이나 로봇과 같은 장비들에 의해 다루어지기 위해서는 부품들을 고정시키기 위한 특별한 배려가 필요하므로 결합-부분조립품으로 적합하지 않다.

전기 연삭기의 경우 단위 부품으로 이루어진 것 이외의 결합-부분조립품 {a,b,c} 와 {a,d,e} 는 각각 다른 부품과 충돌없이 분리될 수 있는 경로가 있으므로 이들에 대한 기하-구속조건은 없다.

2. 접촉-구속조건

전기 연삭기에 있는 부품 a 의 접촉-구속조건을 구하는 과정은 다음과 같다. 부품 a 와 접촉하고 있는 부품들로는 b, c, d, 와 e가 있다. 따라서 이 부품들의 쌍으로는 (b,c), (b,d), (b,e), (c,d), (c,e), 와 (d,e) 가 있다. 이들 쌍 중 부품 b 와 c, d와 e는 각각 리에이종 l₃ 와 l₆ 으로 연결되어 있으므로 경우 3 에 의해 버린다. 그외의 쌍 (b,d), (b,e), (c,d), 와 (c,e)을 이루는 부품 사이의 연결고리는 항상 부품 a 를 통과하므로 리에이종 그래프에서 a 를 지우면 이들 사이에 연결고리가 존재하지 않게 된다. 따라서 부품 a 의 접촉-구속조건은 {a}⊗{b,d}, {a}⊗{b,e}, {a}⊗{c,d}, 와 {a}⊗{c,e}가 된다.

부품 b 의 경우 이와 접촉하고 있는 유일한 부품쌍 (a,c)는 리에이종 l₂에 의해 연결되어 있으므로 b 의 접촉-구속조건은 없다. 마찬가지로 부품 c와 접촉하고 있는 유일한 부품쌍 (a,b), 부품 d와 접촉하고 있는 유일한 부품쌍 (a,e), 부품 e와 접촉하고 있는 유일한 부품쌍 (a,c), 결합-부분조립품 {a,b,c}와 접촉하고 있는 유일한 부품쌍 (d,e), 결합-부분조립품 {a,d,e}와 접촉하고 있는 유일한 부품쌍 (b,c)는 각각 리에이종 l₁, l₅, l₄, l_{6}, l₃ 에 의해 연결되어 있으므로 부품 c, d, e와 결합-부분조립품 {a,b,c}와 {a,d,e}의 접촉-구속조건은 없다. 따라서 전기 연삭기에 대한 조립-구속조건을 모두 요약하면 다음과 같다.}

- {a}⊗{b,d}, {a}⊗{b,e}, {a}⊗{c,d}, {a}⊗{c,e},
- {b}⊗{a,c}, {d}⊗{a,e}.

그러나 Homem de mello와 Sanderson^[7] 이나 Baldwin 등^[6] 의 cut-set 방법으로 전기 연삭기의 조립-구속조건을 구할 경우 표 1 에서 보이는 바와 같이 새로 제시된 방법에 비해 중복되는 것이 많다. 표 1 에서는 비교를 위해 그림 2 의 전기 연삭기 이외에 De Fazio 와 Whitney 가 예제로 사용한 AFI^[5] 와 Nof^[12] 의 자동차용 발전기를 적용 대상으로 하여 cut-set 방법과 새로 제시된 방법으로 각각 조립-구속조건을 구하였다. 이로부터 다음과 같은 두 가지 중요한 사실을 알 수 있다. 첫째, cut-set 방법에 의해 구한 조립-구속조건 간에는 중복이 많으며 중복되는 정도는 부품이 많아지거나 제품이 복잡해질 수록 급격히 증가한다. 둘째, 새로 제안된 방법에서와 같이 조립-구속조건 간에 중복을 제거할 경우 부품이 많아지거나 제품이 복잡해지더라도 조립-구속조건은 크게 증가하지 않는다.

표 1. Cut-set 방법과 본 논문에서 새로 제안한 방법에 의해 구한 제품에 따른 조립-구속조건의 수. Cut-set 방법에서 접촉-구속조건의 수는 cut-set 의 수를 의미하고, 기하-구속조건의 수는 cut-set 에 의해 탐색된 조립작업 중 기하학적으로 불가능한 것들의 수를 의미한다. 또한 새로 제안된 방법에서 조립-구속조건의 수는 간략화된 조립-불가능조건 수를 의미한다

Table 1. The number of assembly constraints for three products. C-constraints and G-constraints of the cut-set method indicate cut-sets and geometrically infeasible assembly tasks, respectively. The number of assembly constraints of the proposed method indicate the number of the simplified infeasibility conditions.

제품명	부품수	cut-set 방법		제안된 방법	
		기하구속조건	접촉구속조건	기하구속조건	접촉구속조건
연삭기	5	6	26	2	4
AFI	11	842	1063	27	62
발전기	13	604	949	37	35

3. 조립순서 생성

지금까지는 전기 연삭기의 각 부품에 대한 기하-구속조건을 모두 구한 다음 이를 이용하여 리에이종 그래프로 부터 결합-부분조립품을 구하고, 여러 부품들

로 이루어진 결합-부분조립품들의 기하-구속조건과, 모든 결합-부분조립품들에 대한 접촉-구속조건을 구하였다.

조립 구속조건을 구한 다음 전기 연삭기에 대한 조립순서를 모두 찾아 이를 레이블된 연결그래프 LDG로 표현하는 작업은 연삭기를 나타내는 노드를 LDG에 생성함으로써 시작된다. 연삭기의 결합-부분조립품 중 조립 불가능조건에 의해 구속되지 않는 것으로 {c}, {e}, {a,b,c}와 {a,d,e}가 있다. 그밖에 다른 결합-부분조립품은 조립 불가능조건 때문에 연삭기로부터 분리될 수 없다. 따라서 연삭기에 대한 조립작업은 {c}@{a,b,d,e}, {e}@{a,b,c,d}, {a,b,c}@{d,e}, 와 {a,d,e}@{b,c}가 있으며 이 작업들은 그림 6의 첫번째 레벨과 같이 표현된다. 연삭기를 분해하는 과정에서 부분조립품 {c}, {e}, {a,b,c}, {a,d,e}, {a,b,d,e}, {a,b,c,d}, {d,e}, 와 {b,c}가 새로 생기며 이들 중 부품수가 가장 많은 {a,b,c,d}가 다음 분해대상으로 선택된다.

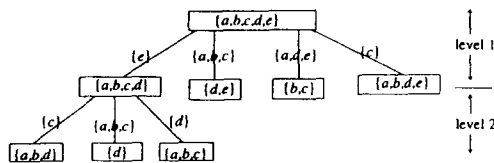


그림 6. 전기 연삭기와 부분조립품 {a,b,c,d}에 대한 조립작업

Fig. 6. Assembly tasks for the grinder and subassembly {a,b,c,d}.

부분조립품 {a,b,c,d}의 결합-부분조립품, {a}, {b}, {c}, {d}, {a,b,c}, 는 연삭기의 결합-부분조립품 중 부품 e를 포함하는 것들을 제거함으로써 얻어진다. {a,b,c,d}의 결합-부분조립품 중 조립 불가능조건에 의해 구속되지 않는 것으로 {c}, {d}, 와 {a,b,c}가 있다. 여기서 부품 d는 조립 불가능조건 {d}@{a,e} 때문에 연삭기로부터 분리할 수 없었으나 부분조립품 {a,b,c,d}에서는 부품 d에 대한 구속조건이 존재하지 않으므로 분리할 수 있다. 따라서 전기 연삭기에 대한 조립작업은 {c}@{a,b,d}, {d}@{a,b,c}, 와 {a,b,c}@{d}가 있으며 이 작업들은 그림 6의 두번째 레벨과 같이 표현된다.

같은 방법으로 모든 부분조립품들이 완전히 분해될 때 까지 위 과정을 반복하면 전기 연삭기에 대한 조립순서가 그림 7과 같이 레이블된 방향그래프로 표현된다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 6개의 부품으로 이루어진

어린 제품일지라도 조립순서는 무려 42개나 된다. 이렇게 많은 조립순서 중 어느 것이 가장 좋은 것인지는 주변 여건에 따라 달라질 수 있으나 적절한 평가항목과 평가함수를 개발한 다음 A^* [13]와 같은 그래프 탐색기법을 이용하여 찾을 수 있다.

표 2는 사용된 방법과 제품에 따라 조립순서를 구하는 데 탐색되는 조립작업의 수가 어떻게 변하는지를 구체적으로 보여준다. 탐색공간의 비교를 위하여 조립 구속조건을 구할 때와 마찬가지로 그림 2에서 소개한 전기 연삭기 이외에 AFI와 자동차용 교류발전기를 사용하였다. 이 예로부터 새로 제안된 방법이 기존 방법에 비해 탐색공간이 현저하게 적으며 이러한 현상은 제품이 복잡해지거나 부품이 많아질수록 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다.

표 2. Homem de Mello^[7]의 방법, De Fazio^[5]의 방법과, 새로 제안된 방법에 의해 세 제품의 조립순서를 생성하기 위해 탐색되는 작업 수

Table 2. The number of tasks searched by the method of Homem de Mello and Sanderson, the method of De Fazio and Whitney, and the proposed method, respectively, to generate assembly sequences for three products.

제품	Homem de Mello 방법	De Fazio 방법	제안된 방법
연삭기	26	34	8
AFI	1063	2604	154
발전기	949	3619	123

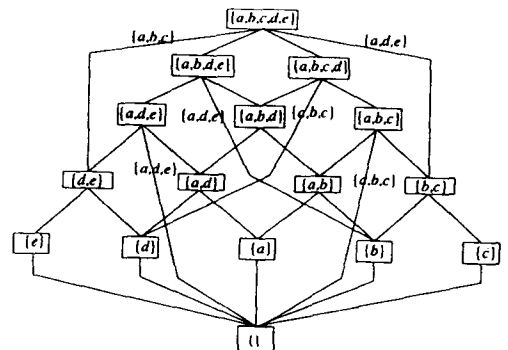


그림 7. 전기 연삭기에 대한 조립순서의 간략한 표현
Fig. 7. Compact representation of assembly sequences for the grinder.

V. 결 론

제품의 조립순서는 부품수가 증가하거나 제품이 복잡해지면 폭발적으로 증가하므로 조립순서를 구할 때는 그 방법의 효율이 매우 중요하게 된다. 따라서 본 논문에서 조립순서를 찾는 데 효율을 높이기 위한 방법들을 제시하였다.

새로 제시된 방법에서는 각 결합-부분조립품에 대한 조립 불가능조건을 서로 중복이 없이 간략한 형태로 구한 다음 이를 이용하여 완제품과 부분조립품들로부터 조립 불가능조건을 위반하지 않는 결합-부분조립품만을 반복해서 분리함으로써 조립순서를 생성한다. 이렇게 할 경우 기존 방법들에 비해 탐색공간을 현저히 줄일 수 있어 기존의 방법으로는 부품이 많거나 제품이 복잡해서 적용이 거의 불가능 했던 제품들에도 적용할 수 있게 되었다.

參 考 文 獻

- [1] U. Rembold and R. Dillmann. "Computer-Aided Design and Manufacturing Methods and Tools". *Springer-Verlag*. 1986. pp.35-36.
- [2] S.E. Fahlman. "A planning system for robot construction tasks". *Artificial Intell.*, vol.5, 1974. pp.1-49.
- [3] R.E. Fikes *et al*. Learninging and executing general robot plans'. *Artificial Intell.*, vol.3, 1972. pp.251-288.
- [4] A. Bourjault. "Contribution a une approche méthodologique de l'assemblage automatisé: Elaboration automatique des sèquences opèratoires". *These d'Etat, Université de Besancon Franche-Comté*, 1984.
- [5] T.L. De Fazio and D.E. Whitney. "Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences". *IEEE Trans. on Robotics and Automation*id. vol.3, no.6. pp.640-658. 1987: corrections, *ibid.*, vol.4, no.6, 1988. pp.705-708.
- [6] D.F. Baldwin et al. "An Integrated Computer Aid for Generating and Evaluating Assembly Sequences for Mechanical Products". *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.7, no.1, 1991. pp.78-94.
- [7] L.S. Homem de Mello and A.C. Sanderson. "A Correct and Complete Algorithm for the Generation of Mechanical Assembly Sequences". *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.7, no.2, 1991. pp.228-240.
- [8] Y.F. Huang and C.S.G. Lee. "An Automatic Assembly Planning System". *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1990. pp.1594-1599.
- [9] T.O. Prenting and R.M. Battaglin. "The Precedence Diagram : A Tool for Analysis in Assembly Line Balancing". *J. Ind. Eng.* vol.XV, no.4, 1964. pp. 208-213.
- [10] J.H. Park, M.J. Chung, and K.Y. Lim. "Acquisition of Assembly Constraints Without Redundancies". *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1993. vol.2. pp.56-62.
- [11] J.D. Wolter. "A Combinatorial Analysis of Enumerative Data Structures for Assembly Planning". *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1991. pp. 611-618.
- [12] S. Y. Nof ed., Handbook of Industrial Robotics, *John Wiley & Sons*. pp.1043, 1985.
- [13] P.H. Winston, Artificial Intelligence, *Addison Wesley*, 1984. pp.87-113.
- [14] R. Gould, Graph Theory, *The Benjamin/Cummings Publishing Company Inc.*, 1988.

— 著 者 紹 介 —



朴 種 憲(正會員)

1986年 고려대학교 전자공학과 (학사). 1988年 한국과학기술원 전기및전자공학과 (석사). 현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 (박사과정). 금전산전(주) 선임연구원. 주관심분야는 조립계획, 로

봇 프로그래밍 시스템, 엘리베이터 시퀀스제어 등임.

鄭 明 振(正會員)

현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수