

선체 수직 외벽 Papering 용 로봇 모듈의 조합 최적설계의 개념적 접근

정원자 (창원대 기계설계공학과 교수), 김성현^{*} (창원대 기계설계공학과 대학원),
김기정 (창원대 기계설계공학과 대학원), 김효곤 (창원대 기계설계공학과)

Conceptional Approach for Assembly Reconfiguration of Papering Robot Modules

W. J. Chung (Prof. Mechanical Design & Manufacturing. Eng. Dept. CNU), S. H. Kim^{*} (M.S. Mechanical Design & Manufacturing. Eng. Dept. CNU), K. K. Kim (M.S. Mechanical Design & Manufacturing. Eng. Dept. CNU), H. G. Kim (Mechanical Design & Manufacturing. Eng. Dept. CNU)

ABSTRACT

In this paper, we are willing to prepare the reasonable optimization, Combinatorial Optimization and Genetic Algorithm. Thus we define position status of end-effect (or terminative link module) using promised form, (G , $M(G)$, $A(G)$, and so on.). For this preparing step, the reorganizing procedure of Link and Joint Module is necessary, like as enumerating the kinematically identical assembly group of several links and joints. Thus, we draw a G , directed graph in a first step. Because, directed graph contains the path information between adjacent Link Module and Joint Module. From the directed graph, G , we can incite the Incidence Matrix, $M(G)$. The incidence matrix, $M(G)$, contains the contact information of the Link (Joint) Module, and the type of Link (Joint). At the end of this paper, we generalize the modular information as a matrix form, $A(G)$. From this matrix, we can make a population of assembly status. That is the final output of this paper.

Key Words : Modular Robot (모듈러 로봇), Assembly Reconfiguration (구조 조합)

1. 서론

최근 조선(造船) 분야는 과거 어느 때 보다 호황을 누리고 있는 사업이며, 세계 1 위를 자부하는 범 국가적인 국내 최대 사업이다. 과거 소형 선박 건조를 위한 Dock 는 현재 초대형화 된 해외 선박 건조 수주에 맞추어 점차 대형화되었고, 이는 곧바로 선박 건조공정을 인력으로 대응 할 수 없을 정도의 규모가 되었다. 이에 발 맞추어 조선 업계에서도 자동화를 위한 여러 형태의 지능형 로봇 시스템 구성을 점차적으로 진행하고 있다. 이는 곧 산업재해로 인한 인명피해도 줄일 수 있고, 주문자의 신뢰성 구축에도 일조 할 수 있을 것이기 때문이다. 하지만 자동화 100% 달성을 선박 건조 시스템 자체의 문제 등 여러 가지 이유로 어렵다. 그 대표적인 예로, 조선 주문 생산 방식을 들 수가 있는데, 대량 생산 공급의 산업 시스템이 아닌 소량 주문 생산 체제의 산업 자체의 특성을 가지고 있기 때문

이다. 이와 같은 산업 특성을 볼 때 지금까지의 전용로봇 개발과 같이 제한적이고 일회적인 자동화 시도는 조선 산업의 요구에 대응하기에는 여러 가지 어려움이 있다. 즉, 조선 산업의 자동화의 성향은 유연한 제 공급 시스템을 갖추어야 할 필요가 있다는 것이다. 즉, 수요자의 요구에 따라 즉흥적으로 반응할 수 있으며, 지금까지 사용한 전용 로봇의 한계를 극복할 수 있는 유연한 생산시스템을 구축하여야 한다. 이를 위해 본 논문에서 제안 하고자 하는 것은 여러 종류의 로봇에 혼용이 가능한 module set 을 형성, 이를 부품화 하여 용도에 맞는 대응이 언제든지 가능할 수 있도록 하는 것이다. 본 논문을 통해서 모듈화 하고자 하는 대상으로는 조선 자동화가 가장 미진한 분야인 도장 부분이며, 특히 선체 수직 외벽의 도장 전처리 공정 중 Papering 작업을 자동화 하기 위한 Modular Robot 을 구성하고자 한다. 이를 위해 모듈화 된 Link 와 Joint 조합으로 구성될 수 있는 조합 구성 집단을

확인하는 것이고, 최적 조합 조건을 찾기 위한 준비 단계에서 할 수 있는 Link 및 Joint 모듈에 대한 정의 그리고 Link 조합 형태와 Joint 조합 패턴 등에 대한 정의를 내리고자 한다.

2. 모듈의 정의

2.1 단순화된 모듈의 형태

본 논문은 Modular robot 의 조합 구성을 할 수 있는 집단에 주안점을 두고 있기 때문에 기계 설계와 제어 부분에 초점을 맞추고자 한다. 그래서 제한된 Link 와 Joint 모듈을 제시하여 이를 기구학적 접근을 통해 구성될 수 있는 조합 집단을 생성한다. 여기서 단순화되어 제시된 모듈 집단에 국한되는 문제는 아니므로 다른 모듈에 대한 접근 역시 유연하게 적용 가능하다.

2.1.1 Joint Modules

여기서 제안하는 Modular robot 에는 다음과 같은 Joint Module Type 을 사용한다.

Revolute Joint, R, 1 자유도를 갖는 두 Link 간 회전 운동을 부여하는 Joint 모듈.

Prismatic Joint, P, 1 자유도로 인접한 두 Link 간에 직선 운동을 부여하는 Joint 모듈.

Cylindrical Joint, C, 2 자유도를 갖는 Joint 로 두 Link 사이에서 회전과 회전 축을 따라 직선 운동을 부여하는 Joint module.

2.1.2 Link and Connector Modules

종래의 로봇은 하나의 Link 의 양쪽에 서로 두 개의 Joint 로 연결되어 있는 것이 일반적이다. 하지만 Modular robot 에서는 접촉되어 있는 Port 상태에 따라 하나의 Link 에도 많은 수의 Joint 가 붙을 수 있다. 접속될 수 있는 Port 의 다양성에 의해 Joint 접속 위치와 방향에 대한 정의를 유연하게 표현할 수 있다. 이러한 특성에 의해, Link module 은 접촉 Port 의 분포와 형상이 꼭 대칭의 구조로 된 Rigid Body 로 가정한다. 각각의 Module 에 대하여, Body Attached Frame, Module 좌표계를 부여하고 그 원점은 Link 의 대칭 중심점에다 둔다. 이러한 조건 하에서 Link module 은 다음과 같이 정의 한다.

Square Prism, L, 접촉 Port 수가 10 개이고 각각의 면에 Fig. 1(a)와 같이 대칭 위치에 Port 위치를 부여한 Link module. 즉, 10 개의 동일한 Type 의 Joint 나 서로 다른 Type 의 Joint 가 어떤 것이든 조합될 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 Square prism 의 Link module 의 원점은 Prism 의 대칭 중심점에 있다.

Cubic Box, B, 접촉 Port 수가 6 개이고, Fig. 1(b)

와 같이 각 면에 하나의 Port 가 할당된 Link module 이다. Cube 원점은 Cube 의 중심에 있다.

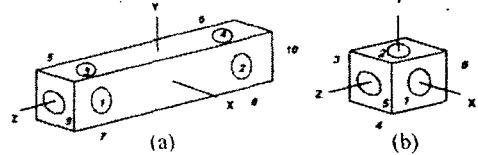


Fig. 1(a) Square Prism Link, (b) Cubic Box Link module

Connector Module은 각 Module 을 결합시켜주는 매개 Module 이며 각 Connector 는 각 Module 군에 대응하는 각각의 Component 들이 있다. 하지만 이는 실제 Link 와 Joint module 의 기구학적 정의 간에는 길이 보상을 통한 결속 여부만 결정하는 Factor 이므로 실제 고려 대상에서 제외하도록 한다.

3. Link 와 Joint 조합 열거법

여러 Link 에 대한 결합 패턴을 구성하는 것에 대하여 논하기 전에, 하나의 Link 에 Joint module 이 접속될 수 있는 조합 패턴에 대한 언급을 먼저 하자 한다. 하나의 링크에도 10 개 혹은 6 개의 Port 가 할당이 되어 있기 때문에 회전(Rotation)되거나 치환(Permutation)된 구조를 먼저 확인한 후에 각 Link module 을 조합 할 수 있는 일반성을 구하기 위한 것이다.

3.1 대칭 회전과 치환

3.1.1 대칭 회전(Symmetric Rotation, 블)

만약 Fig. 1(a)와 같이 Port 10 개의 Square prism Link module 에 2 가지 Type({0,R,H})의 Joint module 을 적용하고자 한다면, 조합 가능한 경우의 수는 90 가지 ($10 \cdot 9 = 90$)이다. Fig.4 는 그 중 3 가지를 나타낸 것이다.

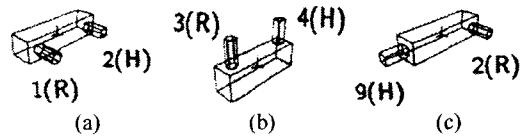


Fig. 2 Three assembly configurations

위의 그림에서, 만약 Fig. 2(a) 링크를 z-방향으로 90° 회전(Rotation)시키면 Fig. 2(b) 와 동일한 형태가 되어 버린다. 이런 구조를 등가(Equivalent)조합 구조라고 한다. 같은 방법으로 180°, 270° 회전 결과 역시 마찬가지이다. 이와 같은 등가 조합 구조는 나중에 전체 로봇에 기구학적으로 같은 효과를 가져오게 되므로 처음부터 이러한 등가 조합 구조를 회피하여 독립적인 Link-Joint module 조합을 구하는 것이 합리적이다. 그러면 90 가지 조합 집단 중에 독립적인 것을 간추려내면 Fig. 3 과 같이 12 가지 종류의 조합 집단을 구성 할 수 있다.

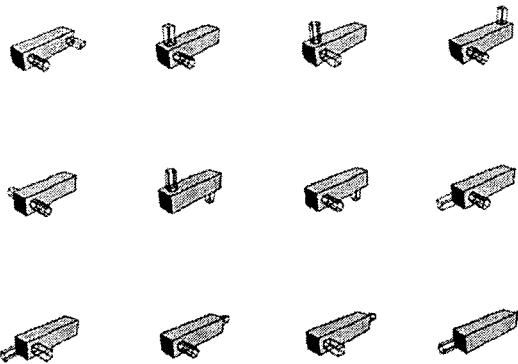


Fig. 5.12 Distinct states of a prism with 2-different type of Joint modules

위 과정과 같이 등가의 회전 성분집합을 대칭 회전 그룹(Symmetric Rotation group, 블)이라 한다. Link module 을 대칭 구조인, 블로 표현하면, 대칭 회전, φ 에 대해 블은 자기 자신의 형태를 갖는다 ($\text{블} = \{\varphi \in \text{블} | \varphi(\text{블}) = \text{블}\}$). 또한, 대칭 회전이 갖는 의미는 링크의 위치가 바뀌는 것이 아니라 접촉되는 포트의 위치가 바뀌는 것으로 해당 포트 번호만 상호 치환되어 나타난 결과에 의한 등가 형태라는 것이다.

3.1.2 치환 그룹(Permutation Group, S)

대칭회전(R)에서 살펴본 바를 다시 고찰하여 보면, Fig. 1(a)링크를 z-방향으로 90°회전시킨 후의 포트 번호의 변화는 다음과 같다.

$$\pi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ \downarrow & \downarrow \\ 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 1 & 2 & 9 & 10 \end{pmatrix} \quad (1)$$

같은 의미의 표기법으로 간단히 다음과 같이 나타낸다.

$$\pi = (3,4,5,6,7,8,1,2,9,10) \quad (2)$$

이를 치환 과정이라 하는데, (1)식과 (2)식은 임의의 치환성분이 되며 이를 다시 치환집단으로 구성하면 치환 그룹(Permutation Group, S)을 형성 한다.

각 포트의 치환 관계는 $\pi : \text{PORT} \rightarrow \text{PORT}$ 로 각 치환 정보는 반복 구조로 정리가 된다. 즉 특정한 치환 패턴이 일정하게 유지가 되어 반복양상을 갖게 된다. 반복길이(Cycle length={1~n}, n=PORT 수)에 의해 치환패턴을 정리해 보면 결과적으로 앞 절에서 살펴 본 대칭회전의 결과와 포트 번호의 치환 관계는 서로 특정한 관계를 가지며, 유사한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. Square prism link module, L,의 경우 R_L 과 S_L 에 대한 결과는 다음 표와 같다.

Rotations Axis	Angle	Permutations on PORTS(L)										Type
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Identity		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	[10, 5, 6, 0, 9, 0, 0, 0, 0, 0]
x	90°	5	4	9	6	7	8	1	2	3	10	[1, 9, 0, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
y	120°	5	6	7	8	1	2	3	4	9	10	[1, 9, 0, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
z	220°	7	8	1	2	3	5	6	9	10	[1, 9, 0, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0]	
x	180°	2	1	8	7	6	5	4	3	10	9	[0, 8, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
y	120°	6	5	2	3	4	1	8	7	10	9	[0, 8, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
z	180°	4	3	5	6	7	8	9	10	1	2	[0, 8, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
x+y	180°	8	7	5	4	3	2	1	10	9	10	[0, 8, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
x+z	180°	8	7	5	4	3	2	1	10	9	10	[0, 8, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

Table 1 R_L and S_L of a prism L.

이 결과는 Link 와 Port 정보를 포함하고 있으며 대칭 회전과 치환정보를 동시에 갖고 있다. 이는 중복되는 등가 형상의 대표 집단을 찾아 볼 수 있으며, Polya's counting theorem⁽¹⁾을 통해 Link module 1 개에 관심 Joint module 개수를 중복 없이 배열할 수 있는 횟수를 찾아 낼 수 있다. 앞 절에서 구한 하나의 Prism link 에 2 종류의 Joint module 을 채결할 수 있는 경우의 수는 90 가지, 그 중 중복되는 등가 구조를 제외한 12 가지가 유일한 가능한 조합 패턴이 된다.

3.2 Modular Robot

앞 절에서 구한 단일 Link module 에서 구한 여러 정보들을 바탕으로 Modular Robot 을 구성하기 위한 일반화 과정을 수행 한다.

3.2.1 기구학적 그래프(Kinematic graph, G)

Kinematic graph 를 사용하여 Link module 과 Joint module 간의 접촉 관계를 묘사 할 것이다. $G=(V, E)$ Kinematic graph 에서 V 는 Link 를 나타내며, E 는 Joint 를 나타낸다. 이와 같은 표기는 기구학적 연결 구조를 나타내며, 기계설계에 자주 쓰는 방법이다.

3.2.2 빈도 행렬(Incidence Matrix, M(G))

Vertex(v : Link)-Edge(e : Joint)간의 빈도를 나타내는 행렬로 Kinematic graph, G 에서 유도된다. 인접하면 해당되는 행렬자리에 1 을 할당한다. 빈도행렬의 정보는 G 에서 얻어지기 때문에 G 의 기하학적 등가구조에서는 하나의 링크의 경우처럼 동일 빈도 행렬집단이 형성된다. 이를 자기동형그룹(Automorphism group, 블(G))라 한다.

3.2.3 조합 빈도 행렬(Assembly Incidence Matrix, A(G))

Modular robot 을 표현하기 위해서는 반드시 사용된 모든 Joint 가 접촉되어 있는 Link 의 각 PORT 정보가 필요하다. 하지만, 빈도 행렬은 단지 접촉 빈도에 대한 정보만 있고 몇 번째 PORT 가 할당되어 있는지에 대한 정보가 없다. 따라서 빈도행렬에 필요한 PORT 번호를 빈도행렬에 추가하여 수정하면, 조합 빈도 행렬(Assembly Incidence Matrix, A(G))을 구성 할 수 있다. 즉, M(G)의 행렬 값이 1 이면 연결된 PORT 번호를 넣어 주고, 0 인 경우에는 수정하지 않는 방법으로 Modular robot 의 정보가 모두 포함된 행렬, A(G) 가 완성된다.

4. 선체 수직외벽 Papering 용 Robot Module

선체 수직 외벽 Papering 용 Robot Module 을 구성하기 위해 하나의 구상 안을 하나 준비 하였다.

$$Link = \{L, L, B\} \quad (3)$$

$$Joint = \{0, R, R\} \quad (4)$$

Link module(3)은 prism 2 개와 cubic 1 개를 사용하였으며, Joint module(4)은 Revolute joint 2 개를 사용하였다.

4.1 Kinematic Graph

제시된 Papering 용 modular robot 의 각 Module 은 Kinematic graph, G 로 표현 할 수 있으며 Kinematic graph에 Module type을 명시한 이종의 독립 조합 집단을 나타내는 Specialized graph는 Fig. 6 과 같이 두 가지로 나타낼 수 있다.

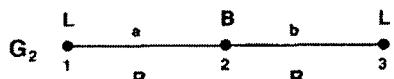
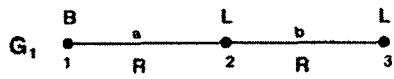


Fig. 6 2 Non-isomorphic specialized graphs

이 경우, 3 Vertices(link)로 구현할 수 있는 독립 조합 집단은 Serial 타입으로만 나타낼 수 있다.

G_1 의 경우 독립 조합 개체군 중 1 번 Cubic link 의 포트 6 개의 각각에 연결될 수 있는 조인트 수는 1 개로 등가 조합을 세워한 경우의 수는 Polya counting theorem에 의해 구해 보면,

$$y_0^6 + y_0^5 y_1 + 2 y_0^4 y_1^2 + 2 y_0^3 y_1^3 \dots \quad (5)$$

(5)와 같은 Counting 결과를 구할 수 있다. 여기서 구하고자 하는 경우의 패턴은 $y_0^5 y_1$ 의 계수에 해당 되므로 ? 이 해당 경우의 수가 된다. 같은 방법으로 G_1 의 나머지 두 Link 경우도 유도할 수 있다. 각 Link module 의 PORT 에 할당된 Joint 경우의 수의와 곱이 해당 G_1 의 조합 할 수 있는 독립 조합의 경우의 수는 다음과 같다.

$$N_{G1} = 1 \times 12 \times 2 = 24 \quad (6)$$

$$N_{G2} = 2 \times 2 \times 2 = 8 \quad (7)$$

이와 같은 방법으로 G_2 의 경우도 유도하면 (7)이 된다. 그런데 2 번 Link 를 중심으로 양쪽이 대칭관계를 이루는 자기동형 문제가 2 가지 발생하므로 실재적인 조합 수는 6 가지가 된다. 이렇게 유도

된 두 Graph 에서 도출된 결과들을 합하여, 최종적으로 조합 할 수 있는 경우는 30 가지가 된다. 30 가지 Module 조합패턴의 결과는 Fig. 7에 나타내었다.

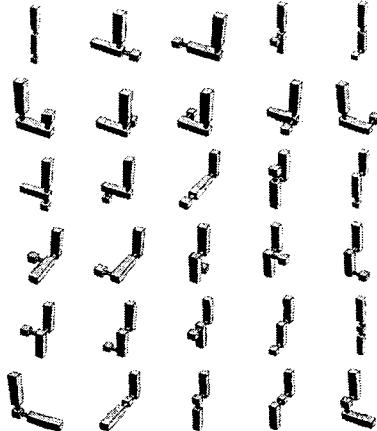


Fig. 7 Distinct configurations of Papering Module Robot

5. 결론

마지막 장에 제시한 Modular 조합 패턴은 등가 항 제거후의 모습으로 조합 가능한 패턴의 경리에 만 그치는 것이 아니라, 조합 최적화의 모집단으로 사용되게 된다. 이 연구의 결과로 Modular Robot 조합최적화의 개념적 접근을 위한 준비과정을 마치게 된다. 본 초기 모집단을 바탕으로 기구학적 구속조건과 해당 접근성에 대한 목적함수 부여 등의 조합 최적화 알고리즘을 통하여 가장 강력히 추천된 Module 조합 구성을 찾을 수가 있다.

후기

본 연구는 창원대학교 공작기계기술연구센터, 산업자원부 지방기술혁신사업(RT104-01-03) 지원으로 수행되었습니다. 본 과제는 산업자원부의 출연금 등으로 수행한 지역전략산업 석. 박사 연구인력 양성사업의 연구 결과입니다.

참고문헌

- Chen, I. M., Burdick, J.W., "enumerating Non-Isomorphic Assembly Configurations of a Modular Robotic System," International Journal of Robotics Research, Vol. 17, No. 7, pp702-719, 1998.
- 임동희, 김석일, "Development of a Basic Structure Design System for Machine Tools by Modular Construction Method," 한국 정밀공학회지, 제 5 권, 제 2 호, pp. 136-143, 2000.