

## 모듈러 로봇의 기구학/동력학에 관한 연구

강희준\*

### Study on Kinematics and Dynamics of the Modular Robot

Hee-Jun Kang\*

#### ABSTRACT

In order to overcome the conventional robot's physical limitation to frequent changes in operational requirements, it is quite appealing to modularize its system components and allow them to be combined into various configurations to best suit the needs to a particular application. Several researchers have presented the concept of modular robot. In this paper, the kinematics and dynamics of modular robot are studied, which concretizes the concept of modular robot. This study includes the selection of individual module, the definition of their parameters and the development of module based manipulator analysis software package (MBMAP).

**Key Words :** The Concept of Modular Robot(모듈러 로봇의 개념), Kinematics and Dynamics of Modular Robot(모듈러 로봇의 기구학/동력학), MBMAP(모듈러 로봇의 해석용소프트웨어 패키지)

#### 1. 서론

현대 공업 사회가 요구하고 있는 산업용 로봇의 적용 범위는 'Pick and Place'와 같은 단순 작업으로부터 'Automatic Part Assembly'와 같은 고기능적 작업에 이르기까지 다양한 형태로 존재한다. 그러나, 위와 같은 다양한 작업 요구에 비추어 현재 사용중인 산업용 로봇들은 이 작업들을 충분히 만족할 만큼 이루어내는 데에는 다음과 같은 몇 가지 기능의 한계점들을 가지고 있다. 예를들면, 외부 부하를 견디는 능력(Load Bearing Capacity), 작업속도, 작업 정밀도 그리고 빈번한 작업 환경 변화에 따른 대처능력 등으로 요약될 수 있다. 본 연구에서는 열거된 로봇한계 기능 중 다품종 소량 생산의 현 유연 생산(Flexible Manufacturing) 철학에 따라 새롭게 부각되는, 산업용 로봇의 작업 환

경 변화에 따른 대처능력 향상을 모색하고자 한다.

작업 환경 변화에 따른 대처능력 향상을 위한 기존의 로봇 연구는 보다 성능이 좋은 다목적 로봇의 개발에 치중하고 있으므로, 단위 로봇의 가격 상승에 따른 경제성 문제가 제기 되고 있을 뿐만 아니라, 고려된 로봇의 물리적 구조(Physical Structure)가 고정됨에 따라 작업에 따른 대처 능력 또한 여전히 제한적 일수밖에 없다. 그것은 하나의 특정 로봇이 주어진 작업을 수행할 수 있으나 없느냐가 그 로봇의 제어 방법 뿐만 아니라 로봇의 기구학적/동력학적 구조에 따라서도 좌우되기 때문이다. 따라서 기존 로봇의 기구학적/동력학적 구조의 고정성을 극복하기 위하여, 로봇의 구성 요소들을 모듈화하고 특정한 작업 요구가 발생함에 따라 그 모듈화된 요소들을 결합하여 최적의 기구학적/동력학적 구조의 로봇(Reconfigurable Modular

2002년 1월 2일 접수  
\* 울산대학교 전기전자정보시스템공학부(제어자동화트랙)

Robot)을 완성하고자 하는 노력이 여러 연구자<sup>[1-8]</sup>에 의해서 행해졌다.

Tesar and Butler<sup>[1]</sup>는 Generalized Modular Robot Architecture 의 개념을 제시했는데, 여기서 그들의 로봇 분야나 고속도 생산 기계에서 사용되고 있는 다양한 기계 메커니즘을 소개하며 이 메커니즘들을 반드시 모듈화, 표준화되어 최적의 로봇 스트럭처로 종합될 수 있도록 해야 한다고 주장했다. 이 주장은 현재 진행되고 있는 메커니즘 분야의 발전이 시간의 지연없이 로봇 테크놀러지에 용해될 수 있다는 점에서 고무적이다. 이와 같은 모듈화 접근 방법은 정해진 모듈의 장단점을 파악함으로써, 로봇 시스템 구성의 Top-Down 설계 과정을 가능케 할 수 있어 로봇의 구성 요소인 액츄에이터, 제어 방법 그리고 센서의 설계 과정이 하나의 하위 모듈로서 현재 가능한 최첨단 기술을 용해하면서 독립적으로 수행될 수 있다. 더구나, 이렇게 설계된 로봇 하위 모듈들은 그 일련번호와 그에 따른 모든 정보(예를 들면, 기구학적/동력학적 정보)들을 전산화 하여 작업 요구에 따라 모듈들의 최적 선택 과정을 거쳐 바로 조립될 있다. 그러므로, 일반적으로 행해지는 새로운 로봇 시스템 개발에 소요되는 거액의 투자 경비와 Design-to-Market Time 의 감소뿐 아니라, 현재 사용중인 제반 설비가 새로운 모델 출현과 함께 파기되는 위험을 모듈러 로봇 연구를 통하여 제거할 수 있다.

본 논문에서는, 모듈러 로봇의 개념을 구체화 하는데 반드시 필요한 작업인 모듈러 로봇의 기구학 및 동력학적 알고리즘을 제안하고 그것을 기초로 하여 Module Based Manipulator Analysis Package (MBMAP)를 개발한다. 절 2 에서는 모듈의 선정과 모듈 파라미터를 정의하고 절 3 에서는 정의된 모듈로 구성된 모듈러 로봇의 기구학적/동력학적 알고리즘을 제시한다. 절 4 에서는 폐회로 구조를 가지고 있는 병렬 모듈을 절 3 에서 언급된 방법과 연계하여 모듈로 포함하는 방법을 설명하고 절 5 에서는 절 3 과 4 의 내용에 근거하여 개발된 모듈러 로봇 해석 패키지의 구조를 설명함으로써, 모듈러 로봇의 구성과 적용 예를 들도록 한다.

## 2. 모듈의 선정 및 모듈 파라미터 정의

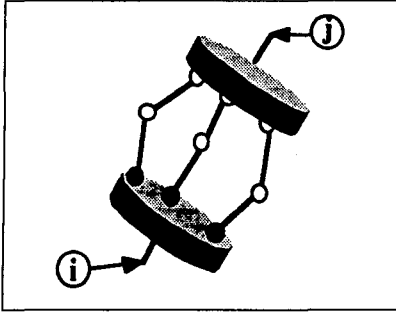
고려할 수 있는 모듈은 간단한 Revolute 또는 Prismatic 조인트로부터 기구학적으로 복잡한 복수

자유도의 Parallel 모듈에 이르기까지 다양하다. 이미 최적으로 정의된 Parallel 모듈의 예를 들면 Spherical Wrist, Shoulder<sup>[9]</sup>, 4 Legged Spherical Shoulder(Fault Tolerant Module), 6 DOF Micro-Manipulator<sup>[10]</sup> 등이 있다. 이 절에서는 지금까지 개발되거나 연구되고 있는 다양한 로봇 메커니즘에서 자주 발견되고 있는 메커니즘들을 기본 모듈로 선정하고, 그것들의 기구학적/동력학적 파라미터를 정의하고자 한다. 선정된 기본 모듈은 아래와 같고 Fig. 4-12 에 제시된다. 아래 제시된 모듈들의 일련번호는 모듈번호로서 차후에 모듈들로 매니플레이터 구성 시 사용된다.

1. Constant Link Module
2. Base Revolute Module
3. Prismatic Joint Module
4. Elbow Revolute Joint Module
5. 2 DOF Knuckle Module
6. 3 DOF Wrist/Shoulder Module
7. 1 DOF Parallel Elbow Module(seen in the Shiling Arm Titan 7F)
8. 2 DOF Five-Bar Module(seen in the ACB K robot)
9. 2 DOF Seven-Bar Module(seen in Cincinnati Milacron T<sup>3</sup>-756 and-776)
10. 3 DOF Spherical Shoulder Module

## 3. 모듈러 로봇의 기구학 및 동력학

모듈러 로봇의 기구학 및 동력학은 Recursive Newton-Euler Method 를 선정된 각 모듈에 맞게 표준화하고, 선정된 모듈 중 폐회로를 형성하는 경우 부가적으로 폐회로 메커니즘 동력학 개념<sup>[13]</sup>을 적용하여 개발된다. Recursive Newton-Euler Method 에서 제시된 로봇의 기본 좌표계로부터 로봇의 공구 좌표계의 속도/가속도 전파와 그 역방향으로 힘/모멘트 전파 개념을 이용하여 전체 모듈러 로봇 구조로부터 각 모듈을 분리하여 처리할 수 있다. 여기서 다른 모듈의 기구학적 동력학적 영향은 고려된 모듈의 Input 으로 나타나는 순방향 전파인 Input 속도/가속도와 역방향 전파인 Input 힘/모멘트에 의하여 고려될 수 있다. Fig. 1 은 병렬구조의 모듈을 이용하여 모듈러 로봇의 기구학적 동력학적 해석 개념을 요약한다. 먼저, 각 모듈의 연결에 대해서 고려하면, 각 모듈의 경계는 모듈의 양끝 단에 고정된 Input/Output 좌표계의 위치로



**Forward Evaluations**

Given :  $\underline{\omega}_i, \underline{\dot{\omega}}_i, \underline{\dot{v}}_i, \underline{\Phi}, \underline{\dot{\Phi}}_a, \underline{\ddot{\Phi}}_a$

Find :  $\underline{\omega}_j, \underline{\dot{\omega}}_j, \underline{\dot{v}}_j, \underline{\dot{v}}_c, \underline{F}, \underline{N}$

**Inverse Evaluation**

Given :  $\underline{f}_j, \underline{n}_j, \underline{\Phi}, \underline{\dot{\Phi}}_a, \underline{\ddot{\Phi}}_a$

Find :  $\underline{T}_a, \underline{f}_i, \underline{n}_i$

여기서 아래첨자  $a$  는 병렬 모듈의 활성관절을 의미한다.

Fig. 1 The Concept of Modular Robot Kinematics and Dynamics

수학적으로 정의되는데, 이 좌표계의 원점들은 그 주위 모듈들과의 연결점들이 된다. 두 개의 인접 모듈의 연결점에서 하위 모듈의 끝점에 정의된 Output 좌표계와 상위 모듈의 시작점에서 정의된 Input 좌표계 사이의 회전이 정의되어야 하는데, 본 논문에서는 두점의 자유로운 연결을 위하여 다음의 X-Y-Z euler angles 로 정의하였다.

$$[R]_{XYZ}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\beta c\gamma & s\beta s\gamma \\ c\alpha s\beta & c\alpha c\beta c\gamma - s\alpha s\gamma & c\alpha c\beta s\gamma - s\alpha c\gamma \\ s\alpha s\beta & s\alpha c\beta c\gamma + c\alpha s\gamma & -s\alpha c\beta s\gamma + c\alpha c\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $c\alpha = \cos\alpha$  그리고  $s\alpha = \sin\alpha$ .

Fig. 2 는 전단 모듈의 출력 좌표계인  $\{i_o\}$  좌표계와 후단 모듈의 입력 좌표계인  $\{j_i\}$  좌표계의 결합을 보여준다. 이 때  $\{i_o\}$  좌표계로 표현된 연결점 O 의 속도/가속도는 식(1)을 사용하여  $\{j_i\}$  좌표계에서의 속도/가속도로 다음과 같이 변환된다.

$${}^j_i \underline{\omega}_i = [{}^i_o R^j_i] {}^i_o \underline{\omega}_i \quad (2)$$

$${}^j_i \underline{\dot{\omega}}_i = [{}^i_o R^j_i] {}^i_o \underline{\dot{\omega}}_i \quad (3)$$

$${}^j_i \underline{\dot{v}}_i = [{}^i_o R^j_i] {}^i_o \underline{\dot{v}}_i \quad (4)$$

역으로, 연결점 O 에서  $\{j_i\}$  좌표계로 표현된 힘/모멘트는  $\{i_o\}$  좌표계로 다음과 같이 표현된다.

$${}^i_o \underline{f}_o = [{}^i_o R^j_i]^T {}^j_i \underline{f}_o \quad (5)$$

$${}^i_o \underline{n}_o = [{}^i_o R^j_i]^T {}^j_i \underline{n}_o \quad (6)$$

지금부터는 구조화된 모듈 내부의 고정된 Input 좌표계와 Output 좌표계 사이의 관계에 대해서 고려한다. 그 기구학적 관계는 3 가지로 정의 되는데 그것들은 constant link 연결, revolute 관절 연결 그리고 prismatic 관절 연결로 표현된다. Fig. 3 은  $i^{th}$  링크와  $j^{th}$  링크 사이의 기구학적 관계를 보여 준다.  $\{i\}$  좌표계와  $\{j\}$  좌표계 사이의 회전 행렬은  $j^{th}$  연결의 형태에 따라 결정된다. 두 개의 링크가

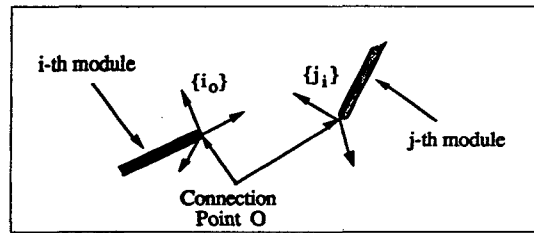


Fig. 2 Euler Angle Connection Between Two Contiguous Modules

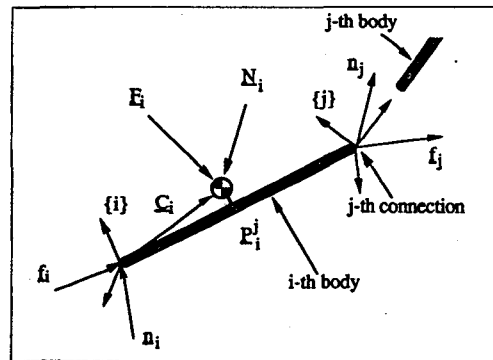


Fig. 3 Kinematic Connection between Two Contiguous Links and Force Balance, including Inertial Forces

revolute 관절 연결로 연결되었다면, 링크 twist angle 을 포함하는 회전형렬  $\{i\} \rightarrow \{j\}$  은 다음과 같다.

$${}^i R^j = [R_{XZ}](\alpha, \phi) = \begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ s\phi c\alpha & c\phi c\alpha & -s\alpha \\ s\phi s\alpha & c\phi s\alpha & c\alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

두 개의 링크가 constant link 연결 또는 prismatic 관절 연결로 연결되었다면, 링크 twist angle 을 포함하는 회전형렬  $\{i\} \rightarrow \{j\}$  은 다음과 같다.

$${}^i R^j = [R_{XZ}](\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

$j^{\text{th}}$  링크 연결의 형태에 따라 Recursive Newton-Euler 알고리즘이 표준화된다.  $j^{\text{th}}$  링크 연결이 revolute 관절이라고 가정하자.  $i^{\text{th}}$  링크 연결점에서 정의된 속도 및 가속도는  ${}^i \underline{\omega}_i$ ,  ${}^i \dot{\underline{\omega}}_i$  그리고  ${}^i \underline{v}_i$  로 표현된다. 식(7)과 회전축에 대한 기구학을 이용하여  $\{j\}$  좌표계의 회전/병진 속도와 각가속도는 다음과 같이 표현된다.

$${}^j \underline{\omega}_j = [{}^i R^j]^T {}^i \underline{\omega}_i + \dot{\phi}_j {}^j \underline{Z}_j \quad (9)$$

$${}^j \dot{\underline{\omega}}_j = [{}^i R^j]^T {}^i \dot{\underline{\omega}}_i + ([{}^i R^j]^T {}^i \underline{\omega}_i) \times \dot{\phi}_j {}^j \underline{Z}_j + \ddot{\phi}_j {}^j \underline{Z}_j \quad (10)$$

$${}^j \underline{v}_j = [{}^i R^j]^T ({}^i \underline{v}_i + {}^i \dot{\underline{\omega}}_i \times {}^i \underline{P}_j + {}^i \underline{\omega}_i \times ({}^i \underline{\omega}_i \times {}^i \underline{P}_j)) \quad (11)$$

그리고  $i^{\text{th}}$  링크 질량 중심의 병진 가속도는 다음과 같다.

$${}^i \underline{v}_{C_i} = {}^i \underline{v}_i + {}^i \dot{\underline{\omega}}_i \times \underline{C}_i + {}^i \underline{\omega}_i \times ({}^i \underline{\omega}_i \times \underline{C}_i) \quad (12)$$

$i^{\text{th}}$  링크의 각속도, 각가속도와 질량중심의 병진 가속도를 구한 후,  $i^{\text{th}}$  링크의 관성력 그리고 관성 모멘트를 구하도록 적용된다.

$${}^i \underline{F}_i = m_i {}^i \underline{v}_{C_i} \quad (13)$$

$${}^i \underline{N}_i = [H_i] {}^i \dot{\underline{\omega}}_i + {}^i \underline{\omega}_i \times [H_i] {}^i \underline{\omega}_i \quad (14)$$

여기서  $[H_i]$ 는  $i^{\text{th}}$  링크의 관성력 그리고 관성 모멘트와 힘/모멘트 평형을 적용하여  $\{i\}$  좌표계 원점에 생성되는 반력  ${}^i \underline{f}_i$  과 반 모멘트  ${}^i \underline{N}_i$  를 구한

다.

$${}^i \underline{f}_i = [{}^i R^j] {}^i \underline{f}_j + {}^i \underline{F}_i \quad (15)$$

$${}^i \underline{n}_i = {}^i \underline{n}_j + \underline{C}_i \times {}^i \underline{F}_i + {}^i \underline{P}_j \times [{}^i R^j] {}^i \underline{f}_j + {}^i \underline{N}_i \quad (16)$$

순방향 계산(식(2)-(4) 그리고 (9)-(14))이 모듈러 로봇 기본 좌표계에서 끝단까지 수행된 후, 역으로 역방향 계산(식(5)-(6) 그리고 (15)-(16))이 수행된다. 그러므로  $\{j\}$  좌표계의 원점에 작용되는 반력  ${}^j \underline{f}_j$  과 반모멘트  ${}^j \underline{n}_j$  가 이미 계산되었으므로, 필요한 관절력은 그중의  ${}^j \underline{Z}_j$  방향 성분만을 취하면 된다.

$$(\underline{T}_\phi)_j = {}^i \underline{n}_j^T {}^j \underline{Z}_j \quad (17)$$

식(9)-(17)은 제안된 모듈러 개념에 따라 수정된 revolute 관절에 대한 Recursive Newton-Euler 방정식이다. 동일한 방법이 constant link 연결 또는 prismatic 관절 연결에 적용할 수 있는데,  $j^{\text{th}}$  연결이 constant 링크 연결일 때 관련식은 식(18)-(20)으로 표현된다.

$${}^j \underline{\omega}_j = [{}^i R^j]^T {}^i \underline{\omega}_i \quad (18)$$

$${}^j \dot{\underline{\omega}}_j = [{}^i R^j]^T {}^i \dot{\underline{\omega}}_i \quad (19)$$

$${}^j \underline{v}_j = [{}^i R^j]^T ({}^i \underline{v}_i + {}^i \dot{\underline{\omega}}_i \times {}^i \underline{P}_j + {}^i \underline{\omega}_i \times ({}^i \underline{\omega}_i \times {}^i \underline{P}_j)) \quad (20)$$

$j^{\text{th}}$  연결이 prismatic 관절 연결일 때 관련식은 식(21)-(23)으로 표현된다.

$${}^j \underline{\omega}_j = [{}^i R^j]^T {}^i \underline{\omega}_i \quad (21)$$

$${}^j \dot{\underline{\omega}}_j = [{}^i R^j]^T {}^i \dot{\underline{\omega}}_i \quad (22)$$

$${}^j \underline{v}_j = [{}^i R^j]^T ({}^i \underline{v}_i + {}^i \dot{\underline{\omega}}_i \times {}^i \underline{P}_j + {}^i \underline{\omega}_i \times ({}^i \underline{\omega}_i \times {}^i \underline{P}_j)) + 2([{}^i R^j]^T {}^i \underline{\omega}_i) \times \dot{d}_j {}^i \underline{d}_j + \ddot{d}_j {}^i \underline{d}_j \quad (23)$$

여기서  ${}^i \underline{d}_j$ 는 prismatic 관절 방향인데 이것은 늘  $\underline{Z}$  방향과 일치하지는 않는다.

$j^{\text{th}}$  연결이 prismatic 관절 연결일 때의 필요 관절력 계산은 다음과 같다.

$$(T_\phi)_j = {}^j \underline{f}_j^T {}^i \underline{d}_i \quad (24)$$

#### 4. 병렬 모듈의 기구학 및 동력학

앞 절에서 제시된 모듈러 로봇의 기구학 및 동력학 알고리즘에 폐회로 구조를 가지고 있는 병렬 모듈을 포함시키고자 폐회로 메카니즘의 기구학 및 동력학을 고려한다. 여기서 병렬 모듈의 고려는 선정된 모듈 중 Figs. 11-14 에서 볼 수 있듯이 그 자체 구조에 존재하는 폐회로에 의한 구속(Holonomic Constraints) 조건이 존재하고, 그에 따른 적용 예는 Fig. 14 의 Spherical Shoulder Module 의 예로 설명하고자 한다. Fig. 4 와 같이 폐회로 메카니즘을 가상으로 절단하여 개회로 나뉘가지구조(Open Tree Structure)로 만든 후 개회로에 대한 기구학 및 동력학을 적용하여 개회로 운동에 필요한 토크( $T_\phi$ )를 구하고, 폐회로 모듈의 활성 관절(Active Joint,  $\Phi_a$ )과 비활성 관절(Passive Joint,  $\Phi_p$ ) 사이의 속도관계를 나타내는 자코비안( $[J_a^p]$ )은 폐회로 구속식인 Holonomic Constraint로부터 구하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\Phi}_p = [J_a^p] \dot{\Phi}_a \quad (25)$$

식 (25)를 이용하여 폐회로 메카니즘의 활성관절과 모든 관절과의 자코비안( $[J_a^p]$ )을 구성한 후,

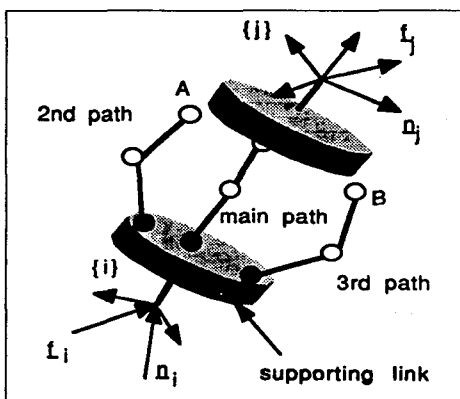


Fig. 4 An Open-Tree Structure of the Parallel Module

개회로와 폐회로 사이의 동력학적 연결은 Principle

of Virtual Work 을 적용함으로써 식 (26)에 의해서 얻어진다.

$$\underline{T}_a = [J_a^\phi]^T T_\phi \quad (26)$$

자세한 과정은 참고 문헌[12]에 언급되어 있다.

#### 5. 모듈러 로봇의 구성 예와 그 해석 프로그램

절 2 에서 선정된 모듈들과 절 3-4 에서 제시된 모듈러 로봇의 기구학 및 동력학 방법론에 따라 모듈러 로봇의 해석 프로그램인 MBMAP(Module Based Manipulator Analysis Program)가 개발되었다. MBMAP 는 다음의 6 주요 프로그램 모듈들로 구성된다.

- 1)'Setup\_robot',
- 2)'Memory\_allocation',
- 3)'Kinematic\_input',
- 4)'Dynamic\_input',
- 5)'Robot\_model',
- 6)'Module\_math'.

고려된 모듈로 구성될 수 있는 로봇 구조에 MBMAP 를 적용함으로써 위에 언급된 프로그램 모듈의 기능과 모듈러 로봇의 구성 과정을 함께 간략히 설명하고자 한다. Fig. 15 는 Cincinnati Milacron T<sup>3</sup>-776 Manipulator 이다. 이 로봇을 구성하기 위한 모듈은 Base Revolute -2 DOF Seven Bar -3 DOF wrist (모듈 번호 : 2 8 5)모듈들을 순차적으로 선택하게 되면 Fig. 16 과 같이 Cincinnati Milacron T<sup>3</sup>-776 Manipulator 를 나타내는 로봇을 구성하게 된다. 이 과정에서 'Setup-robot'은 사용자에게 기존의 로봇 데이터 파일을 사용하는지 또는 새로운 데이터 파일을 지정하는지를 묻게 되고, 다음 전체 시스템의 자유도 및 모듈 순서를 묻게된다. 사용자가 '2 8 5'의 모듈 순서를 입력하면, 'Memory\_allocation'은 구성 모듈러 로봇에 필요한 모든 파라미터에 알맞은 메모리를 할당하게 되고, 각기 다른 모듈에 대하여 독립적으로 작성된 'Kinematic\_input'과 'Dynamic\_input'의 부프로그램에 의하여 선택된 모듈들의 정보를 입력할 수 있다. 이 경우 각 모듈의 입력 정보가 하나의 파일로 지정되어 있다면 그것을 자동적으로 새로운 입력 파일에 추가시킬 수 있다. 추가적으로 'Setup\_robot'은 각 모듈 사이의 연결을 나타내는 연결 파라미

터, 로봇 베이스의 속도와 가속도, 그리고 로봇 끝단에 작용하는 Pay Load 를 사용자가 프로그램에서 제시하는 프라프트에 따라 입력토록 함으로써 로봇 디자이너가 원하는 새로운 형태의 로봇 구성과 그 작업 조건을 입력할 수 있다. 프로그램의 출력을 위하여 'Robot\_model'은 디자이너가 주어진 환경에서 가장 최적의 로봇 구조를 선택하는데 필요한 로봇의 기구학적/동력학적 파라미터들을 제공한다. 특히 병렬 모듈이 포함되어 있는 경우에는 비활성 관절과 활성관절의 속도 및 가속도 관계식에 관련된 파라미터도 제공하여 각각의 파라미터에 관련된 로봇 해석이 가능하도록 하였다. 또한, 적절한 적분 루틴과 연결하여 궤적에 대한 동력학적 시뮬레이션이 가능하도록 하였다..

### 6. 결론

본 논문에서는 모듈러 로봇의 개념을 구체화하는데 반드시 필요한 작업인 모듈의 선정, 모듈의 기구학적/동력학적 파라미터의 표준화 그리고 각 모듈사이의 연결 관계 등을 정의함으로써 모듈러 로봇의 기구학적인 구성 방법을 보이고, 모듈의 자유로운 결합을 통하여 얻어진 모듈러 로봇의 기구학 및 동력학적 알고리즘을 Iterative Newton-Euler Algorithm 을 기초로 하여 제시하였다. 그리고, 제시된 알고리즘을 바탕으로 하여 Module Based Manipulator Analysis Program 을 개발하였다.

개발된 소프트웨어는 새로운 모듈을 고려할 때, 그 모듈의 입출력 관계를 제시된 방법에 따라 정의하면 쉽게 본문에서 제시된 모듈들과 자유로운 결합이 가능하므로, 기구학적으로 복잡할지라도, 성능이 우수한 모듈들을 로봇 구조에 쉽게 포함시킬 수 있는 장점이 있다.

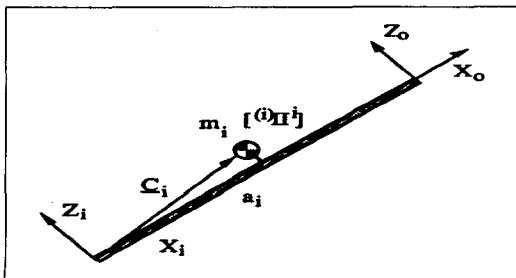


Fig. 5 Constant Link and its Parameters

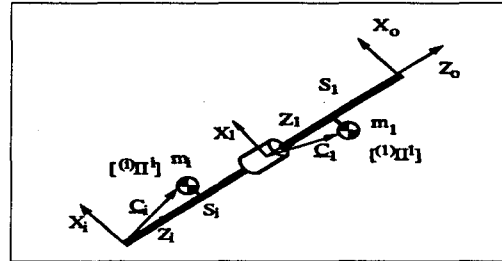


Fig. 6 Base Joint Module and its Parameters

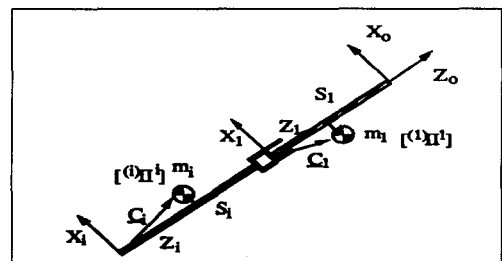


Fig. 7 Prismatic Joint Module and its Parameters

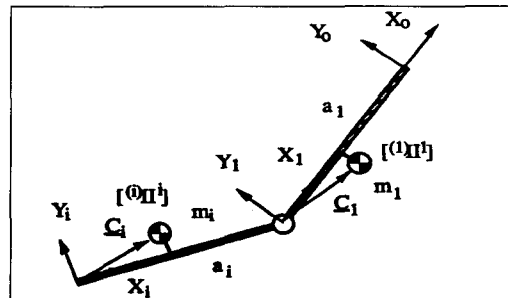


Fig. 8 Elbow Joint Module and its Parameters

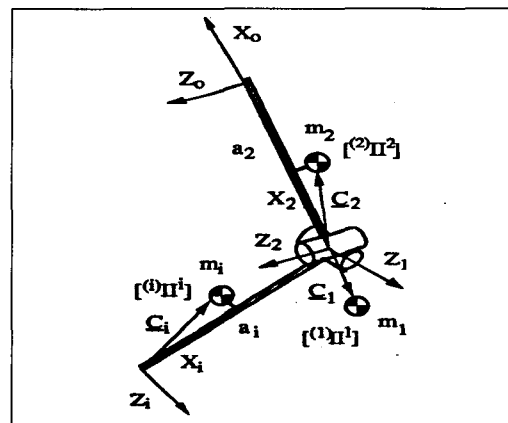


Fig. 9 2-DOF Knuckle Module and its Parameters

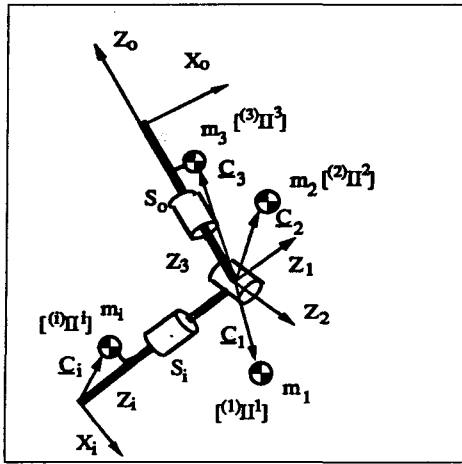


Fig. 10 3-DOF Wrist/Shoulder Module and its Parameters

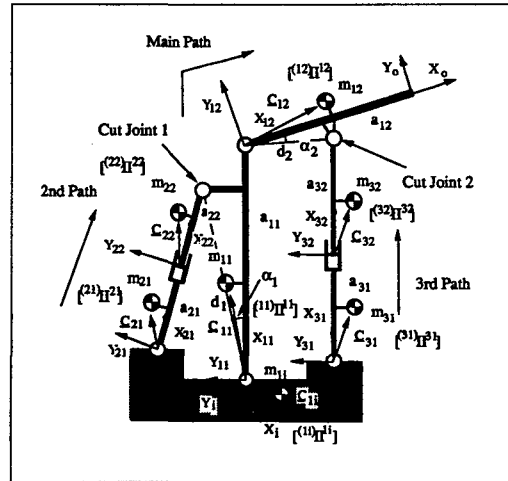


Fig. 13 2DOF Seven-Bar Module and its Parameters

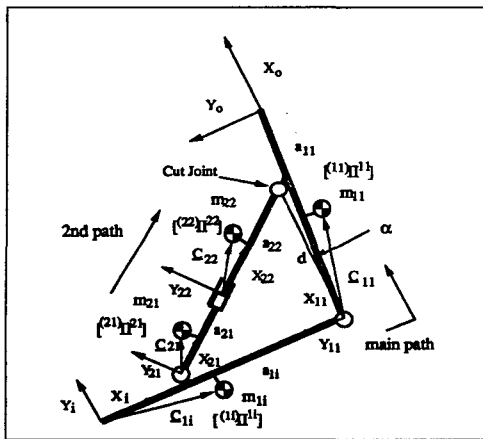


Fig. 11 1-DOF Parallel Elbow Module and its Parameters

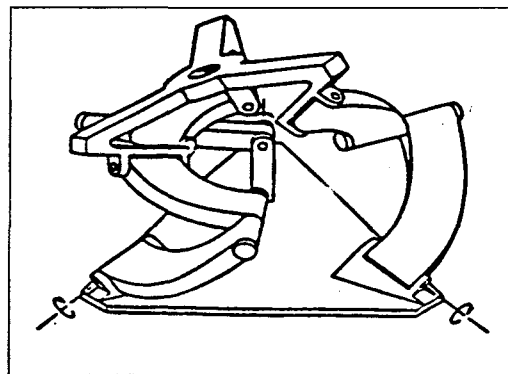


Fig. 14 Spherical Shoulder Module

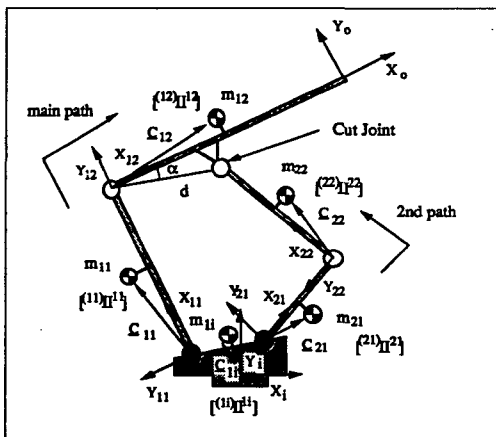


Fig. 12 2-DOF Five-Bar Module and its Parameter

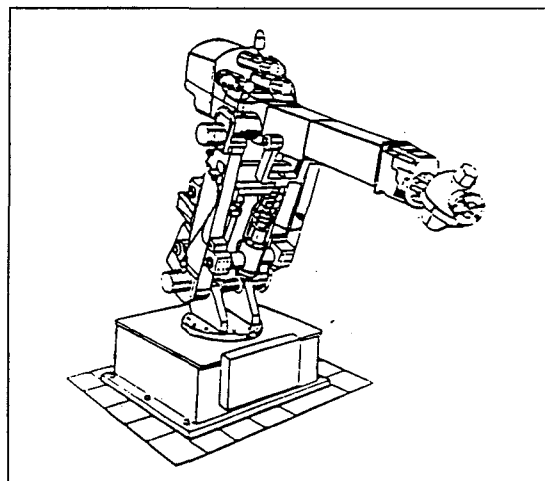


Fig. 15 The Cincinnati Milacron T<sup>3</sup>-766 Manip

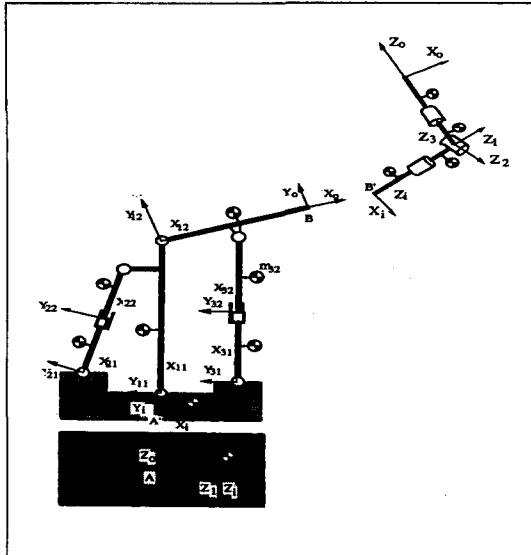


Fig. 16 The Modular Robot representing the Cincinnati Milacron T<sup>3</sup>-766

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 네트워크기반 자동화 연구센터(RRC)의 지원에 의해 수행되었으며 지원에 대해 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Tesar, D. and Buler, M., "A Generalized Modular Architecture for Robotic Structures," Trans. ASME Manuf. Rev., Vol. 2, No. 1, pp. 16-25, March 1989.
2. Benhabib, B., Zak, G. and Lipton, M. G., "A Generalized Kinematic Modeling Method for Modular Robots," Journal of Robotis System, 6(5), pp. 547-571, 1989.
3. Cohen, R., Benhabib, B. and Zak, G., "Kinematic Modeling of Modular Robots with non-Parallel and Near-Parallel Axes Units," IEEE, Proc. of Int. Conf. Ono Robotics and Automation, pp. 147-152, 1990.
4. Legnani, G. and Riva, R., "Kinematics of Modular Robots," Proc. of World Congress on Mechanisms and Machine Theory, pp. 1159-1162, 1987.
5. Kelmar, L and Khosla, P. K., "Automatic Generation of Kinematics for a Reconfigurable Modular

- Manipulator System," IEEE, Proc. of Int. Conf. of Robotics and Automation, pp. 663-668, 1988.
6. Balch, T. and Hybinette, M., "Social Potentials for Scalable Multiple Robot Formations," IEEE, Proc. of Int. Conf. of Robotics and Automation, pp. 73-80, 2000.
7. Lipson, H. and Pollack, J.B., "Towards Continuously Reconfigurable Self Designing Robotics," IEEE, Proc. of Int. Conf. of Robotics and Automation, pp. 1761-1766, 2000.
8. Unsal, C. and Khosla, P.K., "Mechatronic Design of a Modular Self-Reconfiguring Robotic system," IEEE, Proc. of Int. Conf. of Robotics and Automation, pp. 1742-1747, 2000.
9. Cox, D. J., "The Dynamic Modeling and Command Signal Formulation For Parallel Multi\_Parameter Robotic Devices," MS Thesis, Univ. of Florida, 1981.
10. Han, C. S., "The Optimum Design and Manufacturing of a 6 DOF Fully-Parallel Micromanipulator for Enhanced Robot Accuracy," Ph. D Dissertation, The Univ. of Texas, Dec. 1989.
11. Ambrose, R., "Design, Construction and Demonstration of Modular, Reconfigurable Robots," Ph. D Thesis, The Univ. of Texas, August 1991.
12. Kang, H. J. and Freeman, R. A., "Evaluation of Loop Constraints for Kinematic and Dynamic Modeling of General Closed-Chain Robotic Systems," KSME Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 115-126, 1994.