

서비스 로봇을 위한 모듈형 관절 메커니즘 설계

Design of a Modular Type Joint Mechanism for a Service Robot

이희돈¹, 한창수^{1,✉}

Hee Don Lee¹ and Chang Soo Han^{1,✉}

¹ 한양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.)

✉ Corresponding author: cshan@hanyang.ac.kr, Tel: 031-400-4739

Manuscript received: 2010.9.10 / Revised: 2011.4.6 / Accepted: 2011.8.19

Mechanisms of the robot system should be developed according to the task. In this study, we propose improving adaptability of the robot mechanism with the modularized joint mechanism. Adaptability is the measure of the system ability to cope with change or uncertainty. Modular type joint has been widely used in development of various robots including reconfigurable robots. To build robotic systems more flexibly and quickly with low costs of manufacturing and maintenance, we have designed a modular type joint with one degree of freedom for general purpose. This module is designed to be compact, light-weight and self-controlled. In this design, we consider the kinematics and dynamics properties of the modular type joint.

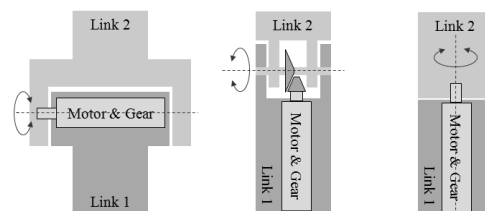
Key Words: Modular Type Joint (모듈형 관절), Joint Mechanism (관절 메커니즘), Service Robot (서비스 로봇), Joint Mechanism Design (관절 구조 설계)

1. 서론

로봇기술은 산업, 군사, 우주, 의료, 교육 등의 다양한 분야의 적용을 목적으로 다양한 형태로 개발되어 왔으며, 그 결과 로봇은 제조산업 분야를 포함한 일부 특정 분야의 적용에 있어 성공적인 성과를 이루었다. 최근에는 기존 제조업용으로 국한되던 로봇의 적용 분야가 개인 서비스 및 전문 서비스 분야로 확대되어짐에 따라 다양한 목적을 수행 할 수 있는 서비스 로봇들이 개발되고 있지만 사용자들의 기대치에 미치지 못하고 있다. 로봇의 다양한 응용을 제한하는 요인으로는 기능적 성능, 기계적 성능, 신뢰성, 인지능력, 가격 등이 있으며, 그 중에서 다양한 작업과 환경에 적용 가능한 유연성과 적응성을 갖는 로봇 시스템 구축을 위한 높은 비용이 가장 큰 요인이다.^{1,2}

기존의 로봇 설계방식을 살펴보면 정해진 작업

및 작업환경에 특화된 구조를 갖도록 관절 및 링크가 개발되기 때문에 작업 또는 환경이 변경될 경우 메커니즘 수정이 어렵다는 단점을 가진다. 따라서 이러한 로봇 시스템은 작업 및 환경이 변경 시 메커니즘 변경에 따른 개발 시간과 비용이 증가하며 그 중 관절 메커니즘은 설계를 위한 시간 및 제작비용이 가장 많이 소요되는 부분이다.



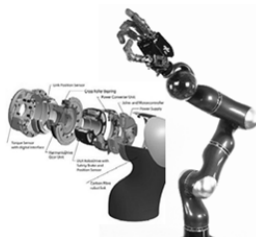
(a) Joint type A-1 (b) Joint type A-2 (c) Joint type B
Fig. 1 Revolute joint forms of traditionally designed robot system

Table 1 A comparison of general architecture with other existing architectures

Features	Components				Interactions					
	Joint		Link		Connection	Link/Joint	Connection	Link/Link	Connection	Joint/Joint
	Active	Passive	Multiple DOFs	Adjustment	Fixed	Changeable dim.	Single pattern	Multiple pattern	Single pattern	Multiple pattern
Literature										
[4]	○	○	○		○		○			
[5]	○				○			○		
[6]	○		○			○	○			
[7]	○				○		○			
[8]	○				○			○		○
[9]	○				○		○			
[10]	○		○		○		○			
[11]	○		○		○		○			
[12]	○	○	○		○		○	○		



(a) SCHUNK-LWR3



(b) DLR-LWR

Fig. 2 Modular robot using module type joint

서비스 로봇의 관절 메커니즘은 일반적으로 회전관절로 개발되며 Fig. 1 에서 보이는 것과 같이 링크 길이방향에 수직하는 회전축을 갖는 형태 (Joint type A)와 링크 길이방향과 동일 방향의 회전축을 갖는 형태(Joint type B)의 조합으로 구성된다. 일반적인 서비스 로봇의 관절에 사용되는 액츄에이터는 DC 또는 BLDC 모터가 사용되며, 저가형 모터를 사용할 경우 감속기를 포함한 축 방향 길이가 길어 관절 메커니즘 설계 시 어려움을 초래한다. Joint type A 의 경우 모터의 축 방향 길이로 인하여 Fig. 1(a)와 같이 외형이 커지거나 Fig. 1(b)와 같이 모터를 링크의 길이 방향으로 배치하기

위하여 워 기어 또는 베벨 기어와 같은 외부기어를 필요로 하기 때문에 구동효율을 낮아질 뿐만 아니라 설계 복잡도를 높임으로써 설계 및 제작 비용의 증가로 이어진다.

따라서, 서비스 로봇의 적용분야 확대를 위해서는 다양한 작업 및 환경에 대응 가능한 로봇 관절 메커니즘에 대한 연구가 필요하며 최근 관절 및 링크 메커니즘을 모듈화하여 상황에 따라 재조합 가능한 로봇 시스템을 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 로봇 메커니즘을 모듈화하여 개발할 경우 개발된 모듈들을 사용하여 작업과 환경에 적합한 새로운 로봇 시스템을 빠르게 구축할 수 있으며 관절모듈의 추가 또는 제거를 로봇 시스템의 자유도를 쉽게 변경할 수 있다. 따라서 로봇 개발을 위한 시간과 비용을 절감할 수 있으며, 유지 및 보수가 용이하다는 장점을 가진다.

Table 1 은 Z. M. Bi 이 기본모듈의 형태와 모듈간의 결합방식에 대하여 모듈형 로봇의 대표적인 연구사례들을 정리한 것이다.³ 연구사례들을 살펴보면 관절과 링크 단위로 모듈화가 되고 있으며, 그 중에서 구동관절의 메커니즘 개발에 집중되고 있음을 볼 수 있다.^{4,12} 그리고 관절모듈과 링크모듈을 사용하여 관절-링크, 링크-링크 및 관절-관절 조합이 가능하다. 그 중 관절-링크 조합 시 다수의 결합 패턴을 가지는 모듈화에 집중되고 있으며, 다수 패턴의 관절-링크 결합을 위하여 방안을 구동관절의 메커니즘을 제안하고 있다.^{5,7,8,11,12} 하지만, 이러한 모듈형 관절에 있어서도 사용되는 모터의 형상과 용량의 제약조건으로 인하여 Fig. 1 의 Joint type A 와 Joint type B 의 기능을 갖는 모듈을 각각 개발하여 사용하거나 링크-관절 결합패턴과 관절-관절 결합패턴에 따라 모듈을 달리 개발하여 사용하고 있다. 따라서 보다 범용적인 모듈형 관절에 대한 메커니즘 연구가 필요하다.

Fig. 2 는 모듈형 관절을 사용한 대표적인 사례를 나타낸 것이다. SCHUNK ^社의 LWR(Light-Weight Robot)3 과 DLR ^社의 LWR 로봇은 모터, 감속기, 제어기, 센서를 하나의 모듈로 개발한 관절들을 이용하여 로봇을 구성하였다. 하지만 이 모듈형 관절은 회전 축 방향 길이를 줄이기 위하여 고가의 박형 모터와 Harmonic 기어를 사용하였으며, 링크-관절 결합패턴만을 지원기 때문에 로봇 자유도 배치를 위하여 반드시 링크를 제작하여야 한다.

본 연구에서는 모터의 축 방향 길이가 긴 저가의 DC 모터와 유성 감속기를 사용한 서비스 로봇

용 모듈형 관절 메커니즘 개발을 목적으로 다양한 링크-관절 결합패턴과 관절-관절 결합패턴을 갖는 메커니즘을 제안한다.

2. 모듈형 관절 개념설계

모듈형 로봇은 관절과 링크 모듈들의 다양한 조합을 통하여 시스템을 재구성 가능하여야 한다. 이를 위해서는 메커니즘의 수정없이 로봇의 자유도의 추가 및 제거가 가능하며, 로봇의 자유도 변경 시 관절의 회전축의 배치가 용이하여야 한다. 관절 메커니즘의 형상에 따라 로봇 기구학적 해석과 동역학적 해석 시 연산복잡도가 증가할 수 있기 때문에 설계 시 이를 고려하여 개발되어야 하며, 또한 로봇 제어를 위한 시스템 역시 자유도 변경에 대하여 확장이 용이하여야 한다. 로봇 관절의 추가 또는 제거에 의한 자유도 변경은 관절과 링크의 기구적인 설계만의 문제가 아니며, 모듈형 관절의 개념설계에 있어 메커니즘과 제어시스템에 대하여 함께 고려되어야 한다.

2.1 메커니즘 개념설계

모듈형 관절의 메커니즘 개념설계에서는 다양한 패턴의 링크-관절 및 관절-관절 결합구조와 모듈형 관절과 결합되는 링크설계의 편의성을 고려하였다.

Fig. 3 은 모듈형 관절의 메커니즘 개념을 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 것과 같이 모듈형 관절은 링크 1 에 결합되는 고정부와 링크 2 에 결합되는 회전부로 나누어진다. 회전부와 고정부는 각각 가로:세로:높이 길이를 1:1:1 의 비율로 함으로써 모터에 의한 회전 발생 부위를 모터의 축 방향 길이의 가운데에 위치하도록 하였으며 다양한 형태의 link-joint 결합 및 Joint-joint 결합이 가능하도록 하였다.

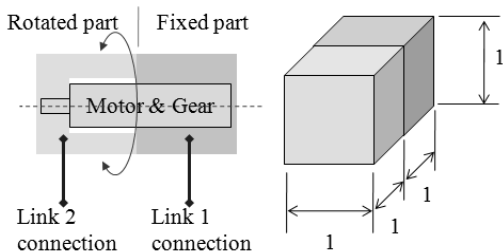
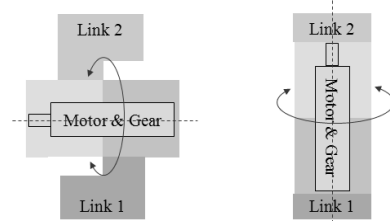
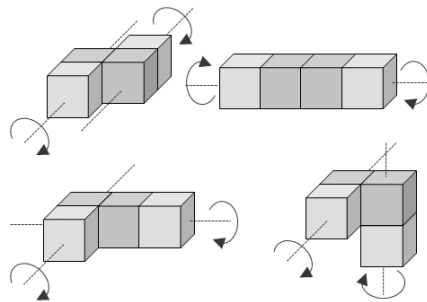


Fig. 3 Concept of the joint mechanism



(a) Link-joint connecting patterns



(b) Joint-joint connecting patterns

Fig. 4 Connection patterns of modular type joint

그 결과 별도의 복잡한 형상의 링크 설계 없이 Fig. 4(a)에서 보이는 두 가지 link-joint 결합패턴을 가능하게 하며, Fig. 4(b)와 같은 네 가지 형태의 Joint-joint 결합패턴으로 조합이 가능하기 때문에 로봇 관절 배치 시 별도의 연결 메커니즘없이 다양한 자유도 배치가 가능하다. 이는 로봇의 자유도 구성 시 Denavit-Hartenberg Table¹³의 인자들을 간소화 하기 위한 링크의 형상에 대한 설계 복잡도를 낮출 수 있음을 의미하며, 따라서 로봇의 링크 설계 시 관절에 사용되는 모터의 형상 및 사이즈에 대한 고려사항을 배제할 수 있어 설계 편의성이 향상된다. 또한 모듈형 관절의 회전부와 고정부의 크기를 동일하게 함으로써 설계 시 질량중심점을 모듈형 관절의 회전 발생 부위에 위치하도록 고려하기가 용이하며, 또한 질량관성 모멘트 분배를 고려한 설계가 용이하다.

2.2 제어시스템 구성

모듈형 로봇은 관절 자유도의 추가 및 제거 시 제어시스템의 확장이 용이하여야 하며, 이를 위해서는 명령신호 전달 및 전원공급을 위한 배선의 편리성이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 각 모듈형 관절의 내부에 모터제어를 위한 1 자유도 서보 제어기를 내장하고 상위제어기인 Host PC와 직렬통신이 가능한 분산제어 시스템을 구성하였다.

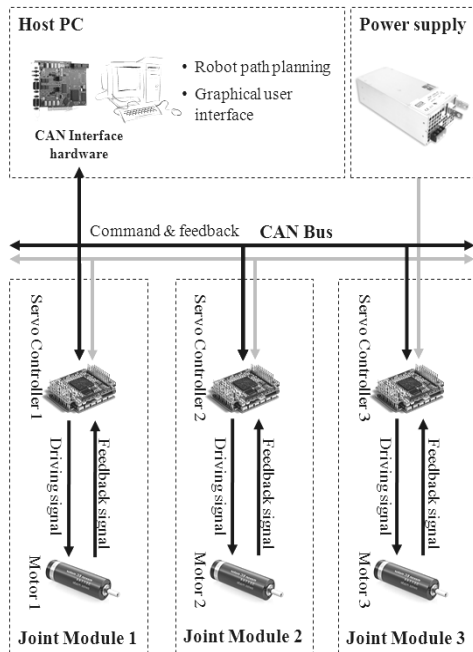


Fig. 5 The hardware architecture of the control system

Fig. 5 는 모듈형 관절을 사용하는 로봇의 제어 로봇시스템 구성을 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 것과 같이 상위 제어기인 Host PC, 전원공급장치 및 서보 제어기로 구성되며 Host PC 는 로봇의

상위 제어기로써 수행작업에 대한 경로계획을 통한 각 모듈형 관절에 대한 제어명령을 생성하고 사용자를 위한 GUI(Graphical User Interface)를 제공한다. 모듈형 관절의 서보 제어기는 Host PC로부터 통신으로 받은 제어명령신호와 모터의 Encoder 및 Hall 센서로부터 받는 피드백 신호를 사용하여 모터의 구동신호를 출력하기 위한 하위 제어를 담당한다. 또한, 상위 제어기와 모듈형 관절의 서보 제어기는 모터의 명령신호와 피드백 신호를 CAN 통신을 이용하여 교환한다. CAN 통신은 최대 1Mbps 로 데이터를 송수신 할 수 있기 때문에 상위 제어기에서 다수개의 모듈형 관절을 운영하기 적합하며, 또한 CAN Bus 통한 데이터 송수신을 하기 때문에 모듈형 관절의 추가 및 제거 시 프로그래밍 수정을 최소화 할 수 있으며 배선을 간소화할 수 있다.

3. 모듈형 관절 설계

본 연구에서 제안하는 모듈형 관절 설계는 개념설계에서 언급한 것과 같이 다양한 패턴의 링크-관절 및 관절-관절 결합구조를 가지며, 모듈형 관절의 메커니즘 설계 시 회전 축 방향 길이의 최소화하고 질량중심(center of mass)을 모듈의 중앙에 위치하도록 고려하였다.

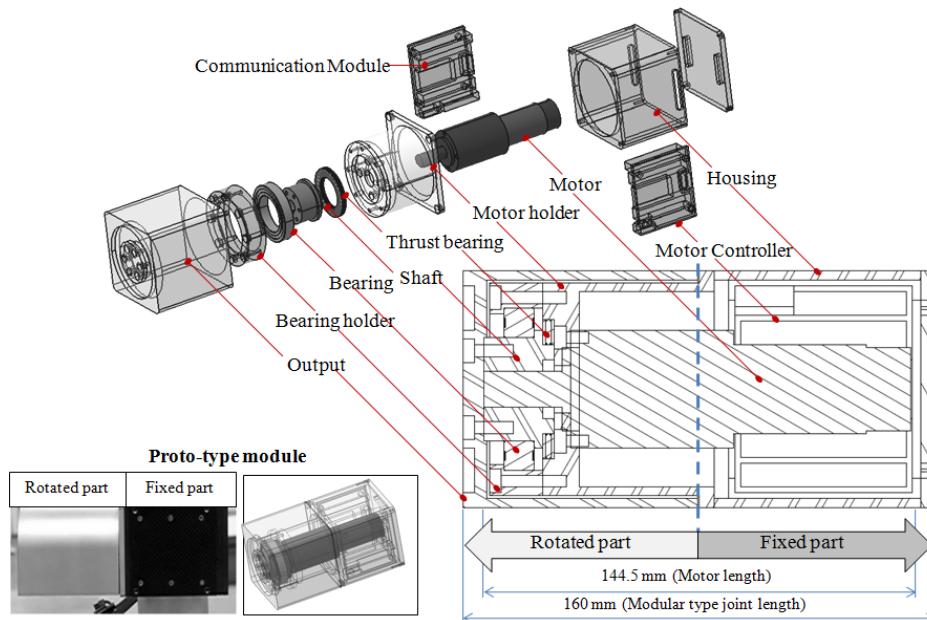


Fig. 6 The mechanism design of the modular type joint

로봇 관절의 회전 축은 로봇의 자세에 따라 회전 토크 이외의 외부 부하에 의한 축 방향 하중과 굽힘 하중 등을 받는다. 이 하중에 의한 힘이 모터 축에 전달되면 모터의 구동효율이 낮아질 뿐만 아니라 파손의 우려가 있으며, 이를 해결하기 위해서는 베어링을 이용한 축 하중을 지지할 수 있는 구조를 메커니즘 설계 시 반영하여 한다. 하지만 이러한 메커니즘은 관절의 축 방향 길이를 증가시키는 요인이 된다. 따라서, 본 연구에서는 모듈형 관절의 축 방향 길이를 최소화하며 외부하중의 지지가 가능한 메커니즘을 제안한다. Fig. 6 에서 보이는 것과 같이 모터 축을 감싸는 외부 Shaft 에 Ball bearing 과 Thrust bearing 을 장착하고 Bearing holder 를 사용하여 Motor holder 에 고정함으로써 축 방향 길이의 증가없이 회전축 토크를 제외한 외부하중을 Motor holder 에서 지지할 수 있도록 메커니즘을 설계하였다.

그리고 모듈형 관절의 질량중심을 모듈의 중앙에 위치하고 Inertia matrix 가 대각행렬을 이루게 하기 위하여 구성품 중 가장 질량이 큰 모터와 감속기의 질량중심을 모듈의 중앙에 위치하도록 하였으며 회전부의 베어링 및 결합 메커니즘에 의한 질량 불균형을 해결하기 위하여 고정부에 서보 제어기와 통신용 모듈을 배치하였다.

Fig. 7 은 실제 설계된 모듈형 관절의 질량중심의 위치를 나타낸 것이다. 이때 메커니즘을 구성하는 부품들 중 모터, 감속기, 베어링 및 제어용 보드는 실제 부품들과 동일하거나 유사한 재질을 반영하였으며, 그 외 메커니즘을 구성하는 부품들은 Al6061 로 설계 시 반영하였다. 여기에서 Reference frame 은 모듈형 관절의 중앙에 위치하며, 모듈의 질량중심은 x 축 25.182 mm, y 축 0 mm, z 축 -0.005 mm 에 위치함을 볼 수 있다. 모듈형 관절의 총 길이가 160 mm 임을 감안한다면 질량중심은 중앙에 위치한다고 볼 수 있다.

그리고 모듈형 관절 설계 시 대칭성을 가지도록 함으로써 질량의 분포를 고려하였으며 Table 2 는 모듈형 관절의 Inertia matrix 를 나타낸 것이다. Inertia matrix 의 요소 중 I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} 항을 제외한 모든 항이 매우 작은 것을 볼 수 있다. 이는 모듈의 중량이 1.45kg 임을 감안하였을 때 Inertia matrix 는 대각 행렬로 가정할 수 있다. 이와 같이 모듈형 관절을 설계할 때 질량중심과 Inertia matrix 를 고려함으로써 동특성을 고려한 로봇 메커니즘 설계 시 관절과 링크의 Dynamic parameter 들을 분리할

수 있다. 이는 링크 설계 시 관절을 구성하는 모터 또는 메커니즘의 형상과 관계없이 링크의 Dynamic parameter 만 고려하여 설계 가능함을 의미하며, 링크 형상의 단순화 및 설계 편의성이 항상에 도움을 준다. 이를 통하여 로봇 동적 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 모듈형 로봇의 동역학 모델링 시 수식의 간소화를 통한 제어기 연산부하를 줄일 수 있다.¹⁴

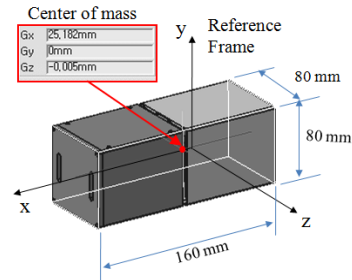


Fig. 7 Center of gravity of the modular joint

Table 2 Inertia matrix of the modular type joint

0.001	$-5.683e^{-14}$	$-2.997e^{-7}$
$-5.683e^{-14}$	0.005	$3.607e^{-18}$
$-2.997e^{-7}$	$3.607e^{-18}$	0.005

Unit: kgm²

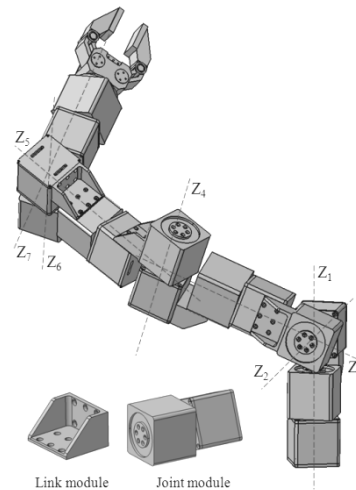


Fig. 8 Example of the 7-DOF manipulator using the modular type joints and simple links

또한 모듈형 관절을 사용하여 로봇을 구성할 때는 조건에 따라 각 관절의 토크 및 속도와 같은 모터 사양이 변경되어야 한다. 본 연구에서 설계

한 모듈형 관절 메커니즘은 사용하는 모터의 크기에 따라 고정부와 회전부의 비율을 유지하며 길이 변경이 가능하기 때문에 시리즈화하여 개발하기 용이하다.

Fig. 8 은 기구학적 자유도 배치의 용의성을 보여주기 위한 로봇 암을 구성한 예이다. 단일 모듈형 관절과 간단한 형상의 링크를 이용하여 7 자유도 로봇 암을 구성하였으며, Z_1 - Z_7 은 각 관절의 회전 축을 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 것과 같이 Z_1 - Z_3 , Z_3 - Z_5 , Z_5 - Z_7 이 한 점에 교차하고 있음을 볼 수 있으며 이는 로봇 기구학적 또는 역기구학적 해를 구하기 위한 연산 부하를 줄일 수 있다. 뿐만 아니라 링크의 길이와 형상 및 링크-관절 결합패턴을 변경가능 하기 때문에 로봇의 적용 목적에 맞게 각 모듈들의 재조합을 통한 새로운 로봇 시스템의 구성이 용이하다.

4. 결론

본 연구는 로봇 시스템을 구성하는 관절과 링크 중 관절 메커니즘의 모듈화 함으로써 로봇 개발 시 필요한 시간과 비용을 절감하고자 하였다. 모듈형 관절을 이용한 모듈형 로봇 구성 시 보다 유연한 메커니즘 자유도 구현하기 위하여 다양한 조합이 가능하도록 회전부와 고정부는 각각 가로:세로:높이 길이를 1:1:1 의 비율로 함으로써 설계 변경 없이 2 가지 링크-관절 체결 패턴과 4 가지 관절-관절 체결 패턴을 가지는 모듈형 관절의 메커니즘 구조를 제안하였다. 모듈형 관절의 설계 시 회전 축 방향 길이 증가를 최소화하며 외부하중에 의한 힘을 베어링을 통해 지지할 수 있는 메커니즘을 제안하고 모듈형 관절의 회전발생 위치를 중앙에 위치 하도록 함으로써 간단한 형상의 링크를 사용하여 기구학적 축 정렬이 쉽게 되도록 하였다. 모듈형 관절의 질량중심이 중앙에 위치하며 inertia matrix 가 대각행렬이 되도록 설계함으로써 동특성을 고려한 로봇 구성 시 링크의 설계 편의성을 향상시켰다. 이를 통하여 구성된 로봇 암의 동적 성능을 향상 시킬 수 있을 뿐만 아니라 기구학적 및 역기구학적 해를 구하기 위한 수학적 연산 복잡도를 줄여 제어기의 연산부하를 줄일 수 있다.

또한, 로봇 관절의 추가 및 제거에 의한 자유도 변경에 따라 제어시스템의 확장이 용이하도록 모듈형 관절의 고정부에 모터 제어를 위한 1 자유

도 서보 제어기를 내장하여 상위 제어기인 Host PC 와 CAN 통신을 이용한 데이터 송수신이 가능하도록 하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 고기능 매니플레이션 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2011-(C7000-1001-0002)).

참고문헌

1. Lee, H. D. and Han, C. S., "Development of the Modular Type Joint for Service Robot," Proc. of the KSPE Spring Conference, 337-338, 2010.
2. Kaneko, K., Kajita, S., Kanehito, F., Yokoi, K., Fujiwata, K., Hitata, M. and Isozumi, T., "Desing of Advanced Leg Module for Humanoid Robotics Project of METI," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 38-45, 2002.
3. Bi, Z. M. and Lang, S. Y. T., "General Modular Robot Architecture and Configuration Design," Proc. of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, pp. 268-273, 2005.
4. Tesar, D. and Butler, M., "A generalized Modular architecture for robot structures," Manufacturing Review, Vol. 2, pp. 91-117, 1989.
5. Schmitz, D. E., Khosla, P. K. and Kanada, T., "The CMU Reconfigurable Modular Manipulator System," Proc. 19th Int. Symp. Exp. Rob., pp. 473-488, 1989.
6. Nielsen, E. and Huppi, R., "MODRO: A Modular Concept for an Application Adapted Robotics System," Proc. 23rd International Symposium on Industrial Robots, pp. 495-500, 1992.
7. Matsumaru, T., "Design and control of the Modular Robot Systems: TOMMS," IEEE Int. Conf. On Robotics and Auto., pp. 2125-2131, 1995.
8. Chan, I.-M., "Theory and Applications of Modular Reconfigurable Robotic Systems," Division of Engineering and Applied Science, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, 1994.
9. Walischmiller, W. and Frager, O., "TELBOT-a Modular Tele-robot System with Infinite Rotational Motions of any Joint, Open control System

- Architecture and Integrated 3-D On-Offline Simulation,” Proc. of the 25th International Symposium on Industrial Robots, pp. 627-633, 1994.
10. Pritschow, G. and Wurst, K. H., “Modular Robots for Flexible Assembly,” Proc. of the 28th CIRP International Seminar on Manufacturing System, pp. 153-158, 1996.
 11. Benhabib, B., Cohen, R., Lipton, M. G. and Dai, M. Q., “Conceptual Design of a Modular Robot,” ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 114, No. 1, pp. 117-125, 1996.
 12. Chen, I.-M., “Rapid Response Manufacturing through a Rapidly Reconfigurable Robotic Workcell,” Robotics and Computer integrated manufacturing, Vol. 17, No. 3, pp. 199-213, 2001.
 13. Denavit, J. and Hartenberg, R. S., “A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices,” ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 22, pp. 215-221, 1955.
 14. Zhang, Y., Gruver, W. A. and Gao, F., “Dynamic Simplification of Three Degree of Freedom Manipulators with Closed Chains,” Robotics and Autonomous System, Vol. 28, No. 4, pp. 261-269, 1999.