

# 여유 자유도 로봇의 제어

鄭完均

浦項工科大学校 機械工學科

## I. 서 론

### 1. 여유자유도 로봇의 필요성

현재 세계적으로 로봇의 응용분야는 크게 산업용과 극한 작업용으로 구별할 수 있다. 지금까지의 로봇의 연구는 최근까지 성력 및 표준화라는 관점에서 위치와 자세를 줄 수 있는 6자유도 이하를 갖는 산업용 로봇의 설계 및 제어에 관한 연구가 중점이 되어왔던 반면 최근 10년 동안은 소위 사람이 작업하기가 어려운 환경에서 작업을 수행해야 하는 극한 작업용 로봇에 대한 연구도 활발히 진행되어 왔다. 예를 들어 일본에서 1983년에서 1990년까지 추진된 극한 작업용 로봇 및 마이크로 로봇 개발, 미국 및 유럽의 우주용, 극한 작업용 로봇 개발 등을 들 수 있다. 이러한 로봇의 특징 중의 하나는 산업용 로봇과는 달리 형태가 구조적으로 좀 더 사람이나 동물의 형태에 가까우며 사람이 그러하듯이 많은 여유자유도를 가지고 있다는 점이다. 본 논문에서는 극한 작업용 로봇의 경우에 주로 많이 사용되는 여유자유도 로봇의 역사 및 그 제어기법에 대해 소개하고자 한다.

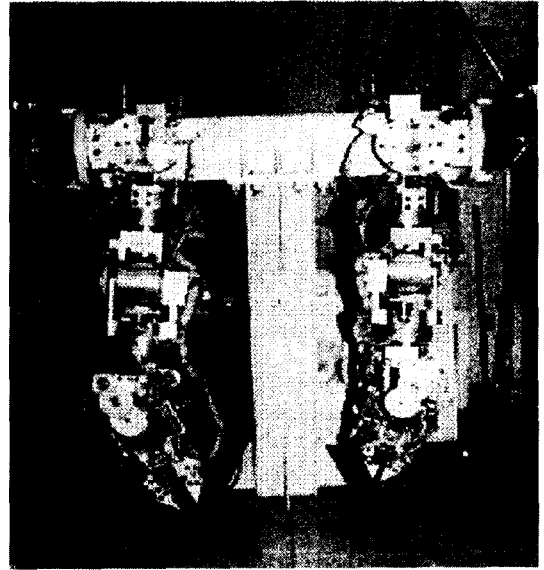
보통 위치(position)와 방향(orientation)까지 고려하는 공간상의 작업을 수행하기 위해서는 6자유도(degrees of freedom)가 필요하고, 작업에 필요한 자유도의 수보다 더 많은 자유도를 갖는 로봇을 “기구학적 여유자유도 로봇(kinematically redundant manipulator)”이라 부른다. 예컨대, 3차원 공간에서 로봇의 말단 장치를 움직이기 위해 일반적으로 6자유도가 필요하므로, 이 경우 7자유도 이상의 로봇은 여유 자유도를 갖는 로봇이 된다. 기존의 산업용 로봇들은 대부분이 6축 이하의 구조로 되어 있기 때문에 작업을 수행하는데 있어 유연성을 갖지 못한다는 단점이 있다. 즉, 로봇의 자세(configuration)를 바꿀 수 없으므로, 작업공간상에 다른 작업물이 산재해 있는 경우 충돌 없이 로봇을 동작시키는 것이 거의 불가능하다. 사람의 팔의 경우 7자유도 구조를 갖고 있으며 손의 자유도를 합하여 여분의 자유도를 이용함으로써 팔의 자세를 자유자재로 바꾸어가며 여러 가지 복

잡한 작업들을 능숙하고 유연하게 처리할 수 있다. 또한 사람의 팔이 그러하듯이 양팔 혹은 n개의 여유 자유도를 갖는 로봇이 서로 협동 혹은 협조함으로써 더욱 섬세한 작업으로의 확장이 가능하다. 이러한 구조를 병렬 여유 자유도 로봇이라고 하자. 두개의 팔이나 몇개의 손가락들이 하나의 물체를 다루는 시스템이나 또는 여러 다리로 걷는 로봇에 있어 이 시스템은 하나의 폐링크 구조(closed link mechanism)를 이루게 되고, 주어진 물체를 잡고 다루거나 걸을 때 있어 여분의 자유도가 생기게 된다. 예를 들어 3자유도인 3개의 손가락이 하나의 물체를 다룰 때, 이 폐링크 메카니즘은 9개의 액추에이터를 갖는 대신 물체의 운동은 6개의 독립변수로 나타내어질 수 있기 때문에 물체를 얼마나 세게 잡을 것인가, 어떻게 잡을 것인가를 결정하는데 있어 선택의 여유가 생기게 된다.

사람의 신체는 팔, 손가락, 다리 등 거의 모든 부분이 여유 자유도 시스템이며 이러한 여유 자유도를 갖는 시스템의 한 예로써의 로봇의 위치 및 힘 제어 기술의 개발은 고기능을 갖는 로봇 시스템 개발의 일환으로 능숙성을 갖는 다기능 손의 개발, 장애물 회피를 하면서 작업을 수행할 수 있는 로봇의 개발, 또는 고장에 좀 더 강건한 로봇 시스템 등의 연구에 가장 기본적인 요소가 된다. 극한 작업용 로봇 연구의 궁극적인 목표가 인간의 기능을 대신할 수 있는 수준으로 가정했을 때 수 없이 많은 여유 자유도를 능률적이고 효과적으로 이용할 수 있는 고기능의 로봇을 개발하는데 있어 이러한 여유 자유도의 이용에 관한 연구는 유용한 연구 자료가 될 것이다.

이런 여유자유도 로봇이 가질수 있는 장점은 다음과 같다.

- 로봇이 갖고 있는 기구학적 특이점을 회피할 수 있다.<sup>[1]</sup>
- 하드웨어적인 제한(관절각, 관절속도, 입력 토크 등의 제한)을 극복할 수 있다.<sup>[15]</sup>
- 외부환경과의 접촉시 발생하는 충격력을 완화할 수 있다.<sup>[2, 12]</sup>



〈그림 1〉 MELARM

- 작업공간에 산재한 장애물들을 피하면서 능숙하게 움직일 수 있다.<sup>[4]</sup>

위의 몇 가지 장점들은 흔히 적절한 성능지수(performance index)들을 통해서 정량적으로 표현이 가능하고, 이 지수들을 최대화(혹은 최소화)함으로써 그 장점들을 실현할 수 있다. 즉, 이러한 성능지수가 최대(혹은 최소)가 될 수 있는 로봇의 매개변수들을 구함으로써 요구되는 장점을 성취할 수 있는 것이다.

이러한 점 때문에 국내외적으로 많은 곳에서 기구학적 여유 자유도에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다.<sup>[1, 2, 3, 4, 5, 9, 16]</sup> 그러나 여유 자유도 로봇의 경우, 비여유 자유도 로봇의 경우와 같은 잘 정립된 제어 기법의 개발이 아직은 미흡한 상태이고 특히 동력학을 고려한 여유자유도를 적절히 이용하는 제어 기법에 관한 연구는 소수에 지나지 않는다.<sup>[3, 5]</sup>

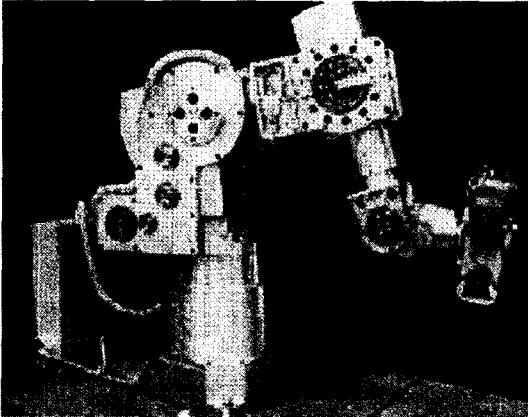
## 2. 여유자유도 로봇의 적용 실례

1970년대 이후 많은 여유자유도 로봇이 실제로 만들어졌으며 연구용 또는 산업용으로 쓰여지고 있다. 일본의 MITI<sup>1)</sup>의 MEL<sup>2)</sup>에서 만들어진 7자유도

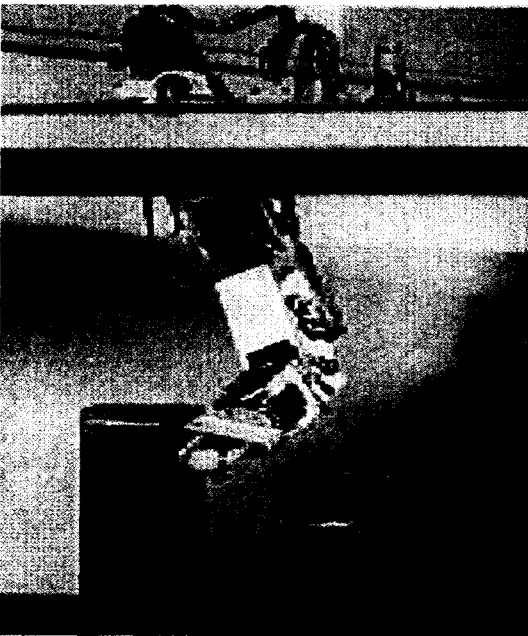
1) Ministry of International Trade and Industry

로봇인 MELARM(1974)은 electrohydraulic 액츄에이터로 구동되며 두개의 팔이 모두 인간형 구조로 되어 있다. 그림 1는 마스터-슬레이브(master-slave)<sup>3)</sup>로 실험중인 MELARM이다.

MEL에서는 또한 7자유도 직접구동 로봇(direct drive robot)(Arai, Yano, Hashimoto, and



〈그림 2〉 A 7-DOF direct-drive manipulator



〈그림 3〉 UJIBOT

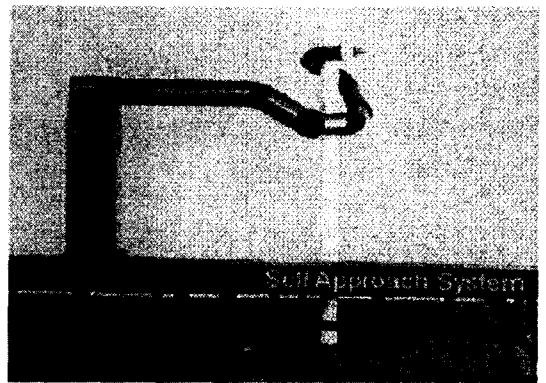
Nakano 1987)을 만들어 바느질 자동화에 응용한 바 있다.(그림 2)

인간형은 아니지만 7자유도를 가진 UJIBOT이라는 로봇(그림 3)이 1979년에 교토 대학에서 개발된 바 있으며 장애물 회피 실험에 많이 쓰였다.(Hanafusa, Yoshikawa, and Nakamura 1981)

이상의 로봇들이 주로 연구용으로 개발된 반면 실용성에 바탕을 둔 용접용 로봇이나 발전소나 우주공간에서 쓰이는 극한 환경에서 쓰이는 로봇도 있다. 이 외에도 작업의 유연성, 능숙성, 안정성 면에서 유리한 협조 작업이 가능한 양팔 작업 로봇(그림 7)이나 핸드(그림 11 Salisbury Hand 1982;그림 12, MIT/Utah Hand), 멀티레그(multi-leg) 매카니즘(그림 8 State Univ. 1986;그림 10 MEL) 등도 여유자유도를 가진 로봇으로 만들어진 바 있다. 이런 로봇을 유형별로 분류하면 다음과 같다.

#### 직렬형 여유자유도 로봇

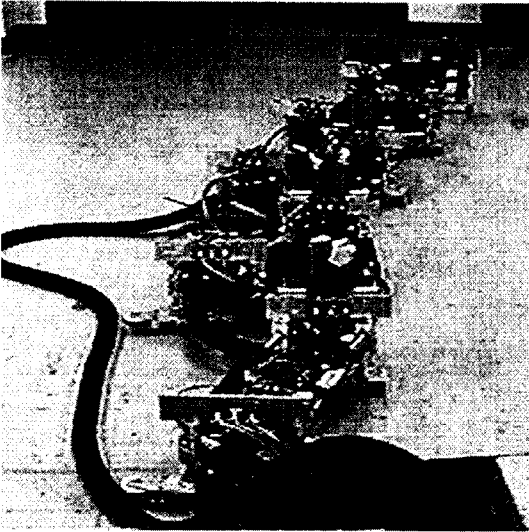
도시바(Toshiba Co.)에서 개발된 17자유도 로봇(그림 4 Asano, Obaman Arimura, Kondo, and Hitomi, Toshiba 1983)은 원자력 발전소의 내부 탐사용으로 만들어졌으며 여분의 자유도를 이용하여 뱀처럼 움직이는 운동이 가능한데 이는 주위의 복잡한 환경에서도 장애물을 피해가며 작업할 수



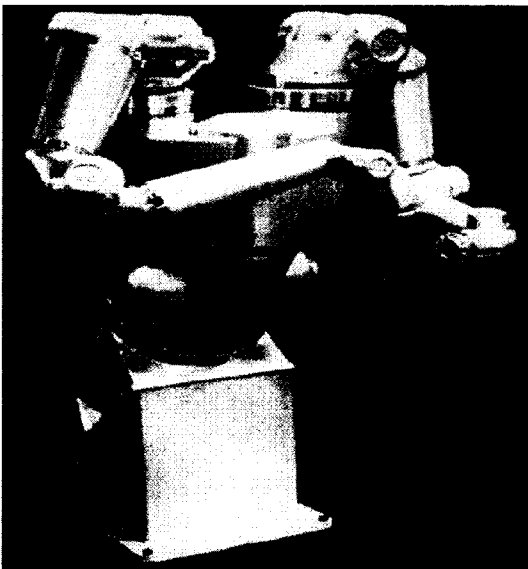
〈그림 4〉 A 17-DOF inspection robot(Toshiba Corp.)

2) Mechanical Engineering Lab.

3) 한 로봇(master)에 명령을 내리면 다른 로봇(slave)이 그 명령을 추종하는 시스템



〈그림 5〉 Snakey(30 degree-of-freedom hyper-redundant robot)



〈그림 6〉 A 17-DOF robot system(Robotics Research Corp); dual 7-DOF manipulators & one 3-DOF torso

있게 된다.

그림 5는 CALTECH에서 개발된 “Snakkey”라



〈그림 7〉 Dexterous Arm Control for the Ranger Flight Experiment

는 30자유도를 가진 여유자유도 로봇이다.

**양팔 형태의 병렬형 여유자유도 로봇**

우주탐사를 목적으로 만든 Robotics Research사의 여유자유도 로봇(그림 6)은 양팔에 7자유도와 허리부분에 3자유도를 합하여 전체 17자유도를 가지고 있으며 우주에서 원격제어용으로 쓰인다.

그림 7 NASA<sup>4)</sup> 추진중인 레인저(ranger) 비행 실험에 쓰이고 있는 각 7자유도의 협조 로봇이다. JPL<sup>5)</sup>에서 개발된 Configuration Control을 이용하여 레인저의 베이스와 두팔 간의 최적자세 제어가 가능하고 온라인 충돌탐지와 회피 기능이 있다.

**병렬형 이동 로봇**

멀티플(multiple) 로봇팔의 경우와 마찬가지로 걷는 로봇에 있어서도 힘분산(load distribution) 문제가 중요하다. 원하는 운동을 하기 위해서 각 다리나 팔이 내야 하는 최적의 힘을 찾아야 하고 전체 시스템의 안정성을 깨뜨리지 않아야 한다.

그림 8는 1986년 오하이오 주립 대학(Ohio State University)에서 만든 6개의 다리가 달린 이동 로봇으로 적응현가(adaptive suspension) 장치를 갖고 있어서 오르막이나 내리막 길도 잘 갈 수 있다.

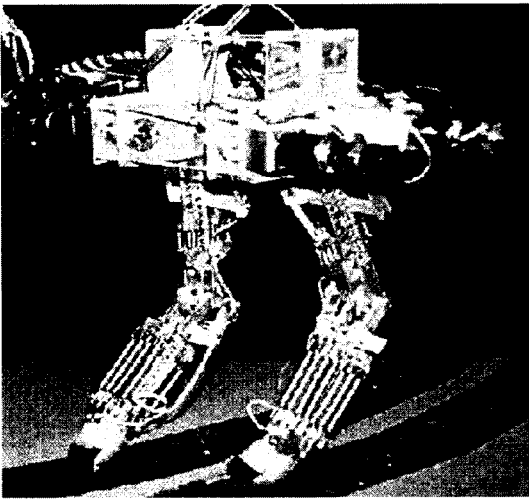
그림 9는 MIT에서 개발된 “Spring Turkey”(1994-1996)라는 두발로 걷는 로봇이다. 엉덩이와 무릎부분에 액츄에이터가 있고, 회전식 포텐서미터가 쓰인다.

4) National Aeronautics and Space Administration, 미국 항공 우주국

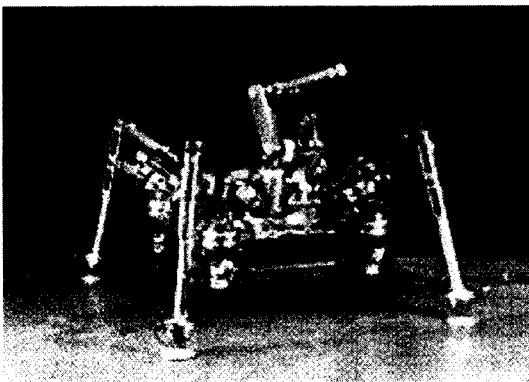
5) Jet Propulsion Laboratory, 제트 추진 연구소



〈그림 8〉 A 6-legged walking machine



〈그림 9〉 Spring Turkey(1994): a planar bipedal walking robot



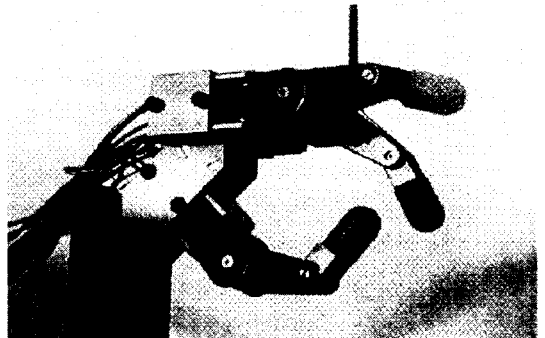
〈그림 10〉 Hybrid locomotion system

그림 10는 일본의 MEL에서 개발된 멀티레그

(multi-leg) 시스템으로서 자동 굴삭용으로 쓰인다. 4개의 다리와 2개의 crawler를 가지고 있으며 crawler는 다소 먼 거리를 빨리 이동하는데 쓰이고 4개의 다리는 작업을 하면서 천천히 움직이는데 쓰인다.

로봇 핸드

다지 핸드 시스템은 여러 손가락에 대한 Coordination과 협조운동에 관한 연구로 많이 쓰이며 로봇팔과 더불어 쓰일 경우 능숙성이 증가되고 다양한 작업을 할 수 있게 된다.



〈그림 11〉 Salisbury hand(MIT), 3-DOF fingers



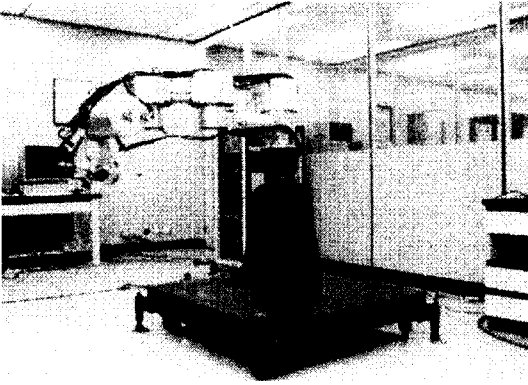
〈그림 12〉 MIT/Utah Hand

그림 11는 각 3자유도를 가진 손가락이 3개 있는 MIT<sup>6)</sup>에서 개발된 로봇 핸드이다.

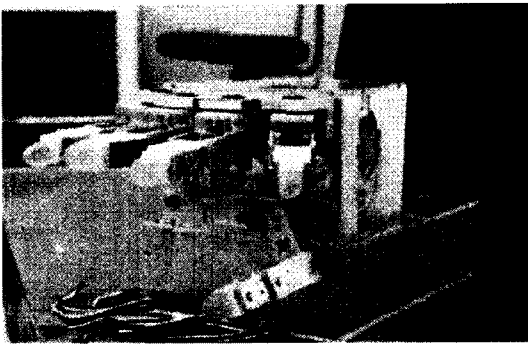
그림 12는 PUMA 로봇팔에 MIT/Utah Hand를 장착하여 비전제어로 전구를 소켓에 끼워넣는 장면이다. 이 핸드는 각 4자유도인 4개의 손가락을 가지고 있다.

그림 13는 포항공대에서 개발된 7자유도의 직접 구동로봇(direct drive robot)으로 기구학 및 동력학적 제어가 가능하며 장애물 회피 실험에 응용된

6) Massachusetts Institute of Technology



〈그림 13〉 POSTECH 7-DOF Direct Drive Robot



〈그림 14〉 POSTECH Hand I

바 있다.

그림 14은 포항공대에서 개발된 다섯 손가락을 가진 로봇 핸드로 각 손가락은 네개의 관절을 가지고 있어 인간의 손과 상당히 닮은 형태이다.

이상의 여유자유도 로봇을 제어하기 위해서는 비여유자유도 로봇의 기구학적 해석과는 다른 해석 기법이 필요하게 된다. 다음 절에서는 이 문제를 소개하고 이를 또 쉽게 다룰 수 있는 관절공간 분해법에 대해 소개하고자 한다.

## II. 여유자유도 로봇의 기구학 및 동력학적 해석: 기구학적으로 분리된 관절공간 분해법

로봇이 수행해야 할 기본적인 작업은 대부분 작업 공간(task space)에서 주어지기 때문에, 관절 공간에서 구성된 제어기법을 이용하기 위해서는

맨 먼저 작업 공간에서 주어진 로봇의 말단 장치의 경로를 관절 공간으로 전환시키는 작업이 필요하게 된다.

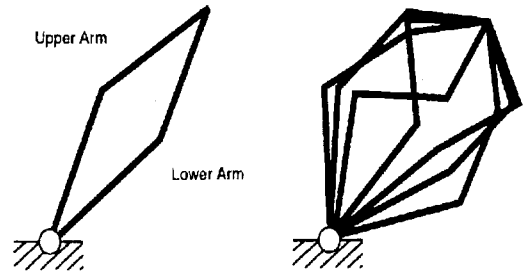
관절의 자유도가  $n$ 이고, 작업공간의 차원이  $m$ 인 여유자유도 로봇의 자세와 작업위치는 다음과 같은 비선형의 정기구학식에 의해 표현된다.

$$p = k(q), \quad p \in \mathbb{R}^m \text{ and } q \in \mathbb{R}^n \quad (1)$$

$$\dot{p} = J(q)\dot{q}, \quad J(q) = \frac{\partial k}{\partial q^T} \in \mathbb{R}^{m \times n} \quad (2)$$

$$p = J(q)\dot{q} + \dot{J}(q)q \quad (3)$$

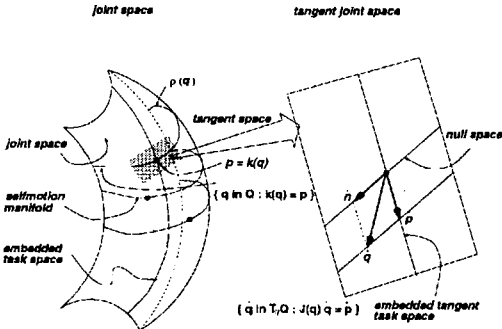
위식에서  $m \times n$ 차원의 행렬  $J$ 는 자코비안 행렬이라 부른다. 여유 자유도 로봇은 앞서의 정의처럼  $n$ 이  $m$ 보다 더 큰 경우를 말하고 이 때  $r (= n - m)$ 을 여유 자유도(degrees of redundancy)라 부른다. 이러한 여유자유도 때문에 주어진 공간좌표에서 주어진 작업위치에 대해서 그림 15와 같이 무한개의 역기구학 해가 존재하게 되며 이것을 자체운동(self motion)이라고 부른다.



〈그림 15〉 Inverse Kinematic solutions of Redundant and Nonredundant Robots

### 1. 기구학적 관점

작업위치를 고려하여 관절공간을 살펴보면, 관절공간은 어떤 작업위치  $p$ 에 대하여  $r$ 차원의 자체운동 매니폴드(self-motion manifold)의 집합으로 볼 수 있다. 그림 15를 수학적으로 표현하면 그림 16과 같다. 정기구학식(1)이 비선형이고 작업공간과 관절공간이 유클리드 공간(Euclidean Space)이 아님을 고려할때, 작업공간 그자체를 자체운동(null or self motion) 매니폴드로 분할하는 것은 실용적이지 못하다. 따라서 관절공간의 접공간



(그림 16) 관절공간을 자체운동 매니폴드로 분해

(tangent space)과 작업공간의 접공간사이의 선형화된 정기구학식(2)에 의해서 관절 속도 공간을 분할해보면 그림 16의 오른쪽 그림과 같이 생각할 수 있다. 즉, 어떤 자세  $q$ 에서 관절 속도  $\dot{q}$ 은 작업 속도  $\dot{p}$ 을 유발시키는 성분과 자체운동을 유발시키는 성분으로 분해할 수 있다.

여유자유도 매니퓰레이터의 경우 주어진  $\dot{p}$ 에서  $\dot{q}$ 을 구하는 기구학적 결정방법(kinematic resolutions of redundant manipulators)에 있어서  $J(q)$ 가 옆으로 긴 직사각형 행렬(rectangular matrix)이므로 우리가 알고 있는 역행렬에 대한 정보만으로는 부족하게 되고, 여기에 의사 역행렬(pseudo-inverse)이라는 일반적인 역행렬(generalized inverse)<sup>[14]</sup>의 개념이 도입된다.

주어진 말단 장치의 경로에 대해 관절 공간에서의 식(2)의 해는 일반적으로 다음식에 의해 구해진다.

$$\dot{q} = J^+ \dot{p} + (I_n - J^+ J) \dot{q}_h \quad (4)$$

위식에서  $\dot{q}_h$ 는 임의의  $n$ 차원 벡터이다.

여기서  $J^+$ 는  $J$ 의 의사역행렬을 의미하고,  $I_n$ 는  $n \times n$  단위행렬이다. 위의 의사역행렬은 다음의 성질(Penrose conditions)을 모두 만족하는 유일한 행렬을 말한다.

$$J J^+ J = J, \quad (5)$$

$$J^+ J J^+ = J^+, \quad (6)$$

$$(J^+ J)^T = J^+ J, \quad (7)$$

$$(J J^+)^T = J J^+ \quad (8)$$

작업공간에서의 속도벡터,  $\dot{p}$ 이  $J$ 의 열공간(column space or range space)에 존재할 때 위의 식(2)를 만족하는 해인  $\dot{q}$ 이 적어도 하나 존재하고  $J$

\*는 위의 Penrose 조건을 만족한다.

식(4)를  $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ 을 좌표값으로 가지는 좌표공간에서  $(\dot{p}^T, \dot{q}_h^T)^T \in \mathbb{R}^{m+n}$ 을 좌표값으로 가지는 새로운 좌표공간으로의 좌표변환으로 생각해볼때, 위식은 새로운 좌표공간을 정의하는데 있어서 불필요한 좌표값들을 가지고 있다. 다시말하면, 식(4)의 첫번째 항인 특정해(particular solution)들이 이루는 집합은  $m$ 차원이고, 둘째항인 동질해(homogeneous solution)들이 이루는 집합은  $r$ 차원의 선형벡터공간을 구성함을 인식할때, 동질해들의 공간을 표현함에 있어서 여분의 좌표값을 정의했음을 알 수 있다. 이를 해결하기 위한 하나의 방법으로서 기구학적으로 분리된 관절공간 분할법<sup>[18]</sup>(kinematically decoupled joint space decomposition)을 이용하는 것이 매우 편리하며, 그 식은 아래와 같다.

$$\dot{q} = R(JR)^{-1} \dot{p} + N(ZN)^{-1} \dot{n} \quad (9)$$

위 식에서  $Z \in \mathbb{R}^{r \times n}$ 행렬은  $J$ 행렬을

$$J = [J_m \ J_r]$$

와 같이 나눌때, 다음과 같이 -기호적으로(symbolically) 또는 수치적으로(numerically) - 표현된다.

$$Z = [J_r^T \text{adj}\{J_m\} - \det\{J_m\}I] \quad (10)$$

이때,  $\text{adj}\{\cdot\}$ 과  $\det\{\cdot\}$ 은 그 행렬의 adjoint 행렬과 determinant 값을 의미한다. 또한  $R \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 과  $N \in \mathbb{R}^{n \times r}$ 행렬은  $J^T J$ 의 고유치 분해로부터 다음과 같이, 수치적으로 구한다

$$J^T J = [R \ N] \begin{bmatrix} \Sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [R \ N]^T \quad (11)$$

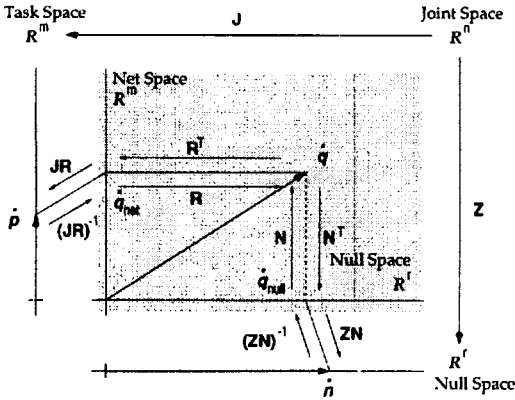
이때,  $\Sigma \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 은  $J$ 의 특이치(singular value)를 대각요소로 가지는 대각행렬(diagonal matrix)이다.

**Remark 1** 식(4)와 (9)는

$$\dot{n} = Z \dot{q} = Z \dot{q}_h$$

로 됨으로써 완전히 동등(equivalent)하다. 따라서  $\dot{n} \in \mathbb{R}^r$ 은  $\dot{q}_h \in \mathbb{R}^n$ 의 최소인수 표현(minimal parametrization)이다.

**Remark 2** 그러므로 위 관절공간 분해법은 다음과 같은 작업공간 확장 방법(task space extension method)와 동등하다고 말할 수 있다.



(그림 17) 기구학적으로 분리된 관절공간 분해법

$$\begin{aligned} \dot{p} &= J\dot{q} \\ \dot{n} &= Z\dot{q} \end{aligned} \quad (12)$$

위의 기구학적으로 분리된 관절공간 분해법을 그림으로 나타내면 그림 17과 같다.

식 (9)의 첫번째 항은 식(2)의 특정해(particular sol.) 또는 최소노름 해(minimul-norm sol.)로서 말단장치의 순운동(net motion)에 해당하고, 두번째 항은 매니플레이터의 자코비안의 영공간(null space)에 존재하는 관절속도 성분으로서 말단 장치의 작업공간에서의 속도를 유발시키지 못한다(영운동<sup>7)</sup>)

이와 같은 관절공간 분해방법은 기존의 여유자유도 로봇 제어시 가장 큰 어려움이었던 순운동(net motion)과 영운동(null motion)을 간단히 분해함으로써 보다 쉽게 여유자유도를 이용할수 있는 방법을 제공한다. 이를 기본으로 하면 다루기 힘들었던 동역학 문제와 제어문제는 매우 단순해지는데 다음 절에 간단히 그 결과를 정리하였다.

### 2. 동력학적 관점

앞절의 기구학적으로 분리된 관절공간 분해법을 다시 쓰면

$$\dot{q} = [R(JR)^{-1} \ N(ZN)^{-1}] \begin{pmatrix} \dot{p} \\ \dot{n} \end{pmatrix}$$

와 같다. 그러면 다음과 같이 표현되는 로봇의 동력학은 어떻게 분해되는지 살펴보자.

$$\tau = M(q)\dot{q} + h(q, \dot{q}) + \tau^{EXT} \quad (13)$$

위 동력학식에서  $M(q) \in R^{n \times n}$ 은 로봇의 관성행렬(inertia matrix)이고,  $\tau^{EXT}$ 은 로봇의 운동을 구속하려는 외부 토크이며,  $h(q, \dot{q})$ 은 관성 토크와 외부 토크를 제외한 비선형 토크, 즉 코리올리 토크와 원심 토크, 또는 중력에 의한 토크등을 내포한 항이라고 하자.

우선 관절 가속도  $\dot{q}$ 은 식(9)를 미분함에 의해서 다음과 같이 분해된다.

$$\dot{q} = [R(JR)^{-1} \ N(ZN)^{-1}] \begin{pmatrix} \dot{p} - J\dot{q} \\ \dot{n} - Z\dot{q} \end{pmatrix} \quad (14)$$

이 때, 식(12)의 비선형성에 의해서  $J\dot{p}$ 과  $Z\dot{q}$ 과 같은 가속도가 나타난다. 이 식을 대입해서 정리하면 최종적으로 기구학적으로 분리된 동력학식

$$\tau = M[R(JR)^{-1} \ N(ZN)^{-1}] \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{p} - J\dot{q} + JM^{-1}h \\ \dot{n} - Z\dot{q} + ZM^{-1}h \\ + JM^{-1}J^T f^{EXT} + JM^{-1}Z^T \eta^{EXT} \\ + ZM^{-1}J^T f^{EXT} + ZM^{-1}Z^T \eta^{EXT} \end{pmatrix}$$

을 얻게 된다.<sup>8)</sup>

위 식은 로봇의 관절 제어입력  $\tau$ 를  $(q^T, \dot{q}^T)^T$ 상태에서  $(f^{ext, T}, \eta^{ext, T})^T$ 의 외력 아래서의 작업 가속도와 영가속도 사이의 관계를 기술한다.

## III. 여유자유도 로봇의 제어기 설계

### 1. 기구학적 제어기

만일 매니플레이터의 동역학에 있어서의 비선형성과 상호결합성(coupling)이 거의 없고, 외력도 존재하지 않으며, 관절구동기(actuator)가 속도 제어형일 경우 원래의 동역학식(13)와 기구학식(1)로 표현되는 매니플레이터 시스템은 다음과 같

7) 로봇의 말단장치의 작업속도에는 영향을 주지못하고 자세 변환 등 관절 자체의 내부운동과 관계되는 운동을 말하며 internal motion 또는 self motion이라고도 한다.  
8) 위 식의 자세한 유도 과정과 증명은 논문들[17]을 참조하기 바람



은 단순화된 기구학적 시스템으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{q} &= u \\ p &= k(q) \end{aligned} \quad (16)$$

이 때  $u \in R^n$ 을 구동기의 제어 입력으로 생각하자. 이 경우 작업 경로(trajectory)  $p_d(t)$ 가 주어졌을 때, 여유자유도 로봇이 그 경로를 추종하도록 제어입력  $u$ 를 결정하는 것은 역기구학 문제로 단순화된다.

여유자유도의 유효한 이용을 위해서는 자체운동을 고려하여 제어해야 한다. 자체운동을 이용하는 방법은 여러가지가 있지만, 본 논문에서는 기구학적인 여러가지 제한들, 즉 특이점이나 작업공간의 장애물 등을 극복하는 문제를 다루고자 한다. 이러한 목적을 이루기 위해서는 그러한 기구학적인 제한을 수치화할 수 있는 어떤 성능지수를 정의하여, 그 성능지수의 최적화를 통하여 원하고자하는 자체운동을 구현할 수 있다. 즉, 어떤 성능지수  $m(q)$ 가 주어졌을 때,  $m(q)$ 를 최적화하기 위해선 그 지수의 최고 경사(steepest gradient)방향으로 로봇을 움직여야한다. 이때, 작업공간의 운동을 유발시키지 않기 위해서는 그 경사를 영공간으로 투영한 만큼의 속도를 영속도로 정의하면 되는데, 다음과 같은 식으로 구체화된다.

$$\dot{n}_d = kZ \nabla m, \nabla m = \left( \frac{\partial m}{\partial q^T} \right)^T \quad (17)$$

위 식에서  $k$ 는 경사 이득-gradient gain)으로서 양수인 경우 최대화를 의미하며, 최소화가 의미가 있을 경우 음수를 써야한다. 또한 그 값이 클수록 빠른 시간내에 최적화를 이룰 가능성이 크다.<sup>9)</sup>

이제 작업공간과 영공간의 추종하고자하는 경로가 생성되었으므로 관절 속도 제어 입력  $u$ 는 식(9)를 고려할 때, 다음과 같이 생성한다.

$$u = [R(JR)^{-1} N(ZN)^{-1}] \begin{pmatrix} \dot{P}_{ref} \\ \dot{n}_{ref} \end{pmatrix} \quad (18)$$

이때,  $\dot{P}_{ref}$ 와  $\dot{n}_{ref}$ 는 각 운동의 참조 경로(reference trajectory)로써, 각 운동 오차의 선형 폐환(linear feedback)에 의해

$$P_{ref} = P_d + K_{p,v}e_p + K_{p,p} \int e_p$$

$$e_p = p_d - p \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{n}_{ref} &= \dot{n}_d + K_{n,v} \dot{e}_n + K_{n,p} \int \dot{e}_n \\ \dot{e}_n &= \dot{n}_d - \dot{n} \end{aligned} \quad (20)$$

로 정의된다.

## 2. 모델에 근거한(model based) 자유 운동 (free motion) 제어기

앞절과는 달리, 만약 동력학식의 비선형성과 결합성을 무시할 수 없다고 가정하고, 관절 구동기가 토크제어 능력이 있을 경우의 제어기를 설계해보자. 한편 외력은 여전히 존재하지 않는다고 가정하자.

이 경우 로봇 동력학식(16)는 다음과 같이 단순화된다.

$$\begin{aligned} \tau &= M[R(JR)^{-1} N(ZN)^{-1}] \\ &\quad \begin{pmatrix} \ddot{p} - J\dot{q} + JM^{-1}h \\ \ddot{n} - Z\dot{q} + ZM^{-1}h \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

이 때, 참조 가속도 (reference acceleration)를

$$\ddot{p}_{ref} = \ddot{p}_d + K_{p,v} \dot{e}_p + K_{p,p} e_p \quad (22)$$

$$\ddot{n}_{ref} = \ddot{n}_d + K_{n,v} \dot{e}_n + K_{n,p} e_n \quad (23)$$

와 같이 결정하자. 이때, 식(17)를 미분하면

$$\ddot{n}_d = kZ \nabla m + kZHm q, Hm = \frac{\partial \nabla m}{\partial q^T} \quad (24)$$

를 얻는다. 따라서 로봇의 제어입력을

$$\begin{aligned} \tau &= M[R(JR)^{-1} N(ZN)^{-1}] \\ &\quad \begin{pmatrix} \ddot{p}_{ref} - J\dot{q} + JM^{-1}h \\ \ddot{n}_{ref} - Z\dot{q} + ZM^{-1}h \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

와 같이 결정한다. 위의 식들에서 보다시피 앞 절에서의 소개한 기구학적 관절공간 분해법으로  $\ddot{p}_{ref}$ 와  $\ddot{n}_{ref}$ 를 분리할 수 있었다.

## IV. 접촉 운동(compliant motion) 제어기

접촉 운동이란 로봇의 일부가 외부의 구속 토크를 발생시키면서 운동을 하는 그런 작업들을 일컫는다. 다시말하면, 선반 작업(milling operation)같

9) 경사 이득  $k$ 의 크기를 결정하는 것은 여러가지를 고려하여 이루어져야 한다.

은 경우 접촉운동을 고려하여 제어를 하는 경우 그 효율성과 안정성을 보장할 수 있다. 이와 같은 경우 로봇의 말단 장치를 제어하는 방법으로

- 하이브리드 위치/힘 제어방법(hybrid position/force control method)<sup>[7,8]</sup>
- 임피던스 제어방법(impedance control)<sup>[8]</sup>

등이 제안되었다. 하이브리드제어 방법은 말단 장치의 위치와 힘을 서로 독립적으로 제어할 수 있다는 장점이 있으나, 외부 환경에 대한 정확한 위치, 형상 등에 대한 사전 지식이 필요하게 되며, 위치 제어에서 힘 제어로, 또는 힘 제어에서 위치 제어로의 천이과정에서 제어기법의 전환이 필수 불가결하게 된다. 반면에 임피던스 제어방법은 하이브리드제어 방법과 같은 제어방식 전환은 불필요하지만 정확한 임피던스를 포함한 외부환경의 정보가 없이는 정밀한 힘을 제어하는 것이 어렵다. 또 위의 방법들은 주로 비여유 자유도 로봇의 경우에 대한 연구에 국한되어 있고, 여유 자유도 로봇의 경우는 주로 비여유 자유도 로봇에 대해 개발된 위치 및 힘 제어를 RAC(Resolved Acceleration Control) 방법이나 자세 제어(Configuration Control) 방법을 결합하여 사용하고 있으며, 여유 자유도를 다루는 방법이나 작업공간과 영공간의 비간섭화(decoupling)에 대한 연구는 깊게 되어있지 않다.<sup>[10,11,12,13]</sup>

본 논문에서 고려하는 접촉운동은 작업공간의 외력만이 존재하는 경우에 한정한다. 또한, 그러한 작업공간의 접촉을 하게되는 표면의 기하학적인 모델이 알려져있다고 가정한다.

이러한 힘제어 문제에 있어서도 앞의 관절공간 분해방법의 개념을 이용하여 쉽게 문제를 정리할 수 있다.

### 1. 접촉 물체의 모델링

접촉운동 제어를 설계하기 이전에 우선 접촉하게 되는 대상의 모델에 대해서 생각해보자. 일반적으로 접촉 대상의 표면은 다음과 같이 기하학적으로 표현된다. 접촉하는 대상이 구속시키는 자유도를  $k(\leq m)$ 라고 할 때,  $k$ 차원의 변수  $r_F$ 를

$$r_F = \phi(p) = \begin{pmatrix} \phi_1(p) \\ \vdots \\ \phi_k(p) \end{pmatrix} \quad (26)$$

라고 정의할때, 그 표면은  $r_F=0$ 로, 그 내부는  $r_F < 0$ 으로, 그 외부는  $r_F > 0$ 으로 되도록  $k$ 개의 새로운 좌표값  $r_F$ 를 정의할 수 있다. 그러한 경우, 그 접촉면의 자코비안행렬을  $J_\phi \in \mathbb{R}^{k \times m}$ 이라고 두면

$$\dot{r}_F = J_\phi(p) \dot{p} \quad (27)$$

이다. 앞서의 가정에 따라,  $\phi(p)$ 와  $J_\phi(p)$ 는 주어졌다고 가정한다.

식 (26)의  $p$ 와  $r_F$ 사이의 관계를, 여유자유도 로봇의 기구학식(1)의  $q$ 와  $p$ 사이의 관계와 비교해보면, 형태에 있어서의 유사성을 발견하게된다. 그 유사성에 따라서 작업속도  $\dot{p} \in \mathbb{R}^m$ 을 힘방향 속도  $\dot{r}_F \in \mathbb{R}^k$ 와 운동방향속도  $\dot{r}_p \in \mathbb{R}^l (l=m-k)$ 로 분해할 수 있다. 그 분해식은

$$\dot{p} = [E_F (J_\phi E_F)^{-1} E_P (Z_\phi E_P)^{-1}] \begin{pmatrix} \dot{r}_F \\ \dot{r}_p \end{pmatrix} \quad (28)$$

로 나타난다. 위 식에서  $Z_\phi \in \mathbb{R}^{l \times m}$ 은 식(10)를 이용하여 구하면 된다. 또한  $E_F \in \mathbb{R}^{m \times k}$ 와  $E_P \in \mathbb{R}^{m \times l}$ 행렬은  $J$ 의 경우의  $R$ 과  $N$ 행렬의 역할과 같다. 다시 말하면

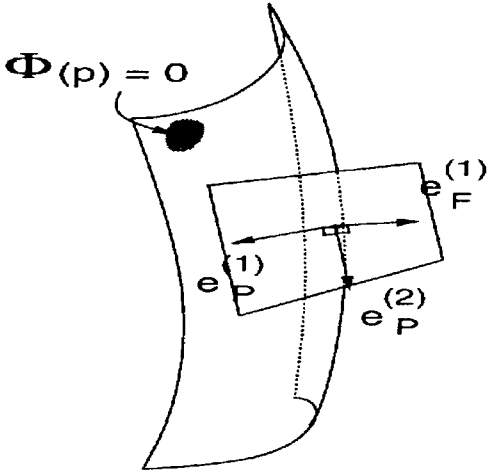
$$[E_F \ E_P]$$

행렬은  $J_\phi^T J_\phi$ 행렬의 고유벡터(eigenvector) 행렬이 된다.

**Remark 3** 힘방향속도와 위치방향 속도라는 이름은 다음의 예를 보면 잘 나타난다. 예를 들어 3차원 위치 공간(regional space)속에 하나의 구속식

$$\phi(p) = 0 \text{ for } p \in \mathbb{R}^3$$

이 주어진 경우, 이 식은 3차원 위치공간 상에 하나의 면(surface)를 정의하게 된다. 그림 18와 같이, 이 경우  $\dot{r}_F \in \mathbb{R}^1$ 은  $E_F \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 방향의 작업속도 성분이고,  $\dot{r}_p \in \mathbb{R}^2$ 은  $E_P \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ 방향의 성분이다. 그림에서 보이듯이  $\dot{r}_F$ 는 그 구속면에 수직인 방향이므로 만약 이 방향으로의 속도가 존재한다면, 로봇은 구속하고자 하는 힘을 받게된다. 그래서 이 방향 속도를 힘방향 속도라고 이름을 붙였다. 한편  $\dot{r}_p$ 는 그 구속면에 접하는 속도이므로, 이 방향의 속도는 마찰력 이외의 어떤 구속면에 의한



(그림 18) 3차원 위치공간 상의 구속면

힘을 받지 않는다. 그러므로 이 방향을 위치방향 속도라고 이름을 붙였다. 이름이 나타내듯이 각각의 속도 성분은 그 방향으로 어떤 것이, 즉 힘인가 위치인가를 제어되어야 하는지의 관점을 나타내준다.

2. 기구학적, 기하학적으로 분리된 로봇의 동력학식

이제 로봇의 관절 속도  $\dot{q}$ 을  $(\dot{r}_F^T, \dot{r}_P^T, \dot{n}^T)^T$ 로 분할하는 변환식을 구할 수 있다. 식(9)의  $\dot{p}$ 에 식(28)를 대입하면

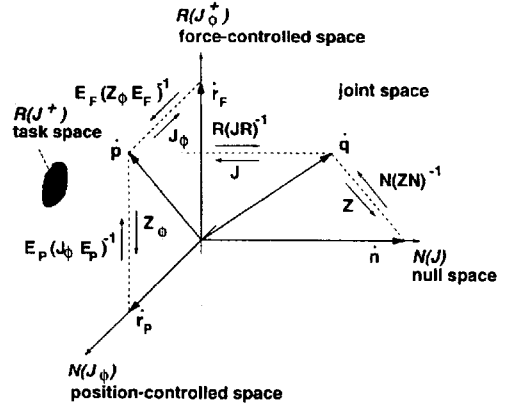
$$\dot{q} = [R(JR)^{-1} N(ZN)^{-1}] \begin{bmatrix} [E_F(J_\phi E_F)^{-1} E_P(Z_\phi E_P)^{-1}] & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{r}_F \\ \dot{r}_P \\ \dot{n} \end{pmatrix} \quad (29)$$

를 얻게 된다. 위식의 역관계를 취함으로써

$$\begin{aligned} \dot{r}_F &= J_\phi J \dot{q} \\ \dot{r}_P &= Z_\phi J \dot{q} \\ \dot{n} &= Z \dot{q} \end{aligned} \quad (30)$$

를 얻게 된다. 위 두식을 일컬어서 기구학적, 기하학적으로 분리된 관절공간 분해법이라 부른다. 이 분해법을 그림으로 표시하면 그림 19와 같다.

이 분해법에 따라서 로봇의 동력학식을 표현해 보면



(그림 19) 기구학적, 기하학적으로 분리된 관절공간 분해법

$$\tau = M[R(JR)^{-1} N(ZN)^{-1}] \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} [E_F(J_\phi E_F)^{-1} E_P(Z_\phi E_P)^{-1}] & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{r}_F - (J_\phi J + J_\phi J)q + J_\phi J M^{-1}h \\ \ddot{r}_P - (Z_\phi J + Z_\phi J)q + Z_\phi J M^{-1}h \\ \ddot{n} - Z \dot{q} + Z M^{-1}h \\ + J_\phi J M^{-1} J^T J_\phi^T f_F^{EXT} + J_\phi J M^{-1} J^T Z_\phi^T f_P^{EXT} \\ + Z_\phi J M^{-1} J^T J_\phi^T f_F^{EXT} + Z_\phi J M^{-1} J^T Z_\phi^T f_P^{EXT} \\ + Z M^{-1} J^T J_\phi^T f_F^{EXT} + Z M^{-1} J^T Z_\phi^T f_P^{EXT} \\ + J_\phi J M^{-1} Z^T \eta^{EXT} \\ + Z_\phi J M^{-1} J^T Z_\phi^T f_P^{EXT} + Z_\phi J M^{-1} Z^T \eta^{EXT} \\ + Z M^{-1} Z^T \eta^{EXT} \end{pmatrix} \quad (32)$$

와 같다. 조금 복잡해 보이지만 동력학 식이  $\ddot{r}_F$ ,  $\ddot{r}_P$ 과  $\ddot{n}$ 으로 구분되어 표현되어 있다. 이를 기본으로 하면 지금까지 제안되어 왔던 혼합제어(hybrid control), 임피던스 제어(impedance control) 등의 제어기법을 쉽게 여유자유도 로봇의 제어에 응용할 수가 있게 되며 그 제어식도 매우 간단히 표현되게 된다.

V. 결 론

인간의 팔과 같이 유연하고 능숙한 작업을 수행할 수 있는 여유 자유도 로봇에 대한 연구는 지금

까지의 산업용 로봇이 할 수 있는 단순한 작업에 비교할 때 충분히 더 연구할 만한 가치가 있을 것이라 생각된다. 본 논문에서는 지금까지의 여유자유도 로봇 개발의 예를 검토하였고, 여유자유도로 생기는 복잡한 문제를 관절공간 분해방법을 소개하여 어떻게 순운동(net motion)과 영운동(null motion)으로 분리할 수 있는지를 살펴 보았다. 이 방법은 기구학적 문제 뿐만 아니라 동력학을 고려한 제어기 개발에도 응용될 수 있으며 매우 일반적인 형태이므로 n자유도 여유자유도 로봇을 제어할 때도 매우 유용하게 사용되어질 수 있으리라 생각된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] T. Yoshikawa, "Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy," *1-st Symp. on Robotics Research*, M. Brady and R. Paul Eds., pp. 745-748.
- [2] L. D. Walker, "The Use of Kinematic Redundancy in Reducing Impact and Contact Effects in Manipulation," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 434-439, 1990.
- [3] O. Khatib, "A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators : The Operational Space Formulation," *IEEE J. of Robotics and Automation*, vol. RA-3, No. 1, pp. 43-53, Feb., 1987.
- [4] J. Baillieul, "Kinematic Programming Alternatives for Redundant Manipulators," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 722-728, 1985.
- [5] H. Seraji, "Configuration Control of Redundant Manipulators : Theory and Implementation", *IEEE Trans. on Robotics and Automation* vol. 5, No. 4, pp. 472-490, Aug., 1989.
- [6] M. H. Reibert and J. J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," *Trans. of the ASME J. of Dyn. Syst., Meas. and Contr.*, vol. 102, pp. 126-133, 1981.
- [7] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Hybrid Impedance Control of Robotic Manipulators," *IEEE J. of Robotics and Automation*, vol. 4, No. 5, pp. 549-556, Oct., 1988.
- [8] N. Hogan, "Impedance Control : An Approach to Manipulation," Part I-III, *Trans. of the ASME J. of Dyn. Syst., Meas. and Contr.*, vol. 107, pp. 1-24, 1985.
- [9] P. Hsu, J. Hauser and S. Sastry, "Dynamic Control of Redundant Manipulators," *J. of Robotic Systems*, 6(2), pp. 133-148, 1989.
- [10] Z. X. Peng and N. Adachi, "Compliant Motion Control of Kinematically Redundant Manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, No. 6, pp. 831-837, Dec., 1993.
- [11] W. S. Newman and M. E. Dohring, "Augmented Impedance Control : An Approach to Compliant Control of Kinematically Redundant Manipulators," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and automation* pp. 30-35, 1991.
- [12] Z. C. Lin, R. V. Patel and C. A. Balafoutis, "Impact Reduction for Redundant Manipulators Using Augmented Impedance Control," *J of Robotic Systems*, 12(5), pp.301-313, 1995.
- [13] R. Lozano and B. Brogliato, "Adaptive Hybrid Force-Position Control for Redundant Manipulators," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 37, No. 10, pp. 1501-1505, Oct., 1992.

- [14] Penrose, R., "A Generalized Inverse for Matrices", *Proc. Cambridge Phil. Soc.*, Vol. 51, pp. 406-413, 1955.
- [15] C. A. Klein, C.-H. Huang, "Review of Pseudoinverse Control for Use with Kineamically Redundant Manipulators," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, 13 (2), pp.245-250, 1983.
- [16] B.W. Choi, J.H. Won, and M.J.Chung, "Evaluation of Dexterity Measure using Measure Constraint Locus," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 2, pp. 282-285, 1995.
- [17] J. Park, W.-K. Chung, and Y. Youm, "Specification and Control of Motion for Kinematically Redundant Manipulators", *Proc. 1995 IEEE/RSJ Int'l conf. on Intelligent Robots and Systems* (Pittsburgh, USA), pp.89-94, 1995.
- [18] J.Park, W.-K.Chung, and Y.Youm, "Weighted Decomposition of Kinematics and Dynamics of Kinematically Redundant Manipulators," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 480-486, 1996.
- [19] J. Park, W.-K. Chung, and Y. Youm, "Design of Compliant Motion Controllers for Kinematically Redundant Manipulators", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3538-3544, 1996.

## 저자 소개



鄭完均

1959年 2月 24日生

1981年 2月 서울공대 기계설계학과 학사

1983年 2月 KAIST 기계공학과 석사

1987年 2月 KAIST 생산공학과 박사

1987年 4月~1993年 3月 포항공대 기계과 조교수

1988年 3月~1989年 2月 CMU, Robotics Institute 방문교수

1995年 3月~1996年 2月 U. C. Berkeley, 방문교수

주관심 분야: 원격제어, 로봇 hand, 여유자유도 로봇의 제어