

# 고장에 견디는 공간형 여유자유도 매니플레이터의 최적설계에 관한 연구

김희국\*, 김동구\*, 이병주\*\*

## Study on Optimal Design of Fault-Tolerant Spatial Redundant Manipulators

Whee-Kuk Kim\* , Dong-Ku Kim\* , Byung-Ju Yi\*\*

### ABSTRACT

Optimal design of fault-tolerant, spatial type redundant manipulators is treated in this paper. Design objective is to guarantee three degree-of-freedom translational motions in the task space, upon failure of one arbitrary joint of 4 degree-of-freedom manipulators. Noticing the nonfault-tolerant characteristics of current, wrist-type industrial manipulators, five different fault-tolerant spatial-type manipulators which have 4 degree-of-freedom structures with one joint redundancy are suggested. Fault-tolerant characteristics of two redundant manipulators are investigated based on the analysis of the self-motion and the null-space elements. Finally, in order to maximize the fault-tolerant capability, optimal design is performed for a spatial-type manipulator with respect to the global isotropic index, and the performance enhancement of the optimized case is shown by simulation.

**Keywords :** Fault-Tolerant Manipulator(고장에 견디는 매니플레이터), Optimal Design(최적설계)

### 1. 서론

현존하는 유일한 Space 로봇(RMS)의 설계에서는 Fault Tolerance가 전혀 고려되지 않음으로 해서 우주 공간에서 모터, 구동시스템, 관절, 그리고 다양한 센서들의 고장을 경험해 왔다<sup>(1)</sup>. 또한 구소련 Chernobyl 원자력 발전소에서 핵방사선 유출시 청소목적으로 로봇들이 투입되었지만 고장으로 인해 작업을 성공적으로 수행하

지 못한 사실들을 주목해 볼 필요가 있다. 그러므로, 최근에 Fault Tolerance를 고려한 로봇 설계의 개념은 실제로 NASA/JSC를 중심으로 Space 분야와 DOE를 중심으로 Nuclear Reactor의 분야에서 중요한 연구과제로 부각되고 있다. 또한 생산 자동화 라인에서 사용되는 로봇 시스템에 고장이 발생하였을 경우, 모든 관련된 생산 라인의 중단으로 말미암아 생산 계획의 차질이 발생되며 이로 인해 큰 손실이 야기되므로 고장에 견디는 로봇에

\* 고려대학교 제어계측공학과  
 \*\* 한양대학교 제어계측공학과

대한 설계가 매우 필요하다고 판단된다.

현재까지 진행된 로봇의 Fault Tolerance와 관련된 연구들은 다음과 같다. Pradeel<sup>(6)</sup>은 Rhino XR-2와 Intellex 660 매니플레이터에서의 고장에 기인한 성능저하에 대한 분석을 하였고, 원래의 로봇 구조에 추가적인 자유도를 부여함으로써 고장에 견딜 수 있는 방법론에 대한 기초적인 조사를 수행하였다. 대부분의 경우에 있어서 베이스 관절에 고장이 일어날 경우, 활동구간이 현저하게 감소함을 알 수 있었다. Ting, et.al<sup>(8)</sup>은 로봇 시스템의 고장난 관절이 나머지 관절들로 보상될 수 있다는 가정하에서 여유구동/여유자유도의 로봇에서 임의의 관절에 고장이 발생한 경우 주어진 작업경로를 이탈하지 않고 지속적으로 작업을 수행할 수 있는 Fault Recovery 알고리즘을 제안하였다. Tosunoglu<sup>(9)</sup>는 로봇의 모듈러식(Modular) 설계방식과 Fault Tolerant 설계방식 간의 상반되는 성질에 대하여 논하였으며 Fault Tolerance가 Modular Mechanical Architecture에 도움이 된다는 것을 주장하였다. Sreevijayan<sup>(7)</sup>은 Fault Tolerance와 관련된 최근까지의 모든 연구에 대한 전반적인 조사 및 분석을 수행하였다. Maciejewski<sup>(3)</sup>는 여유자유도 로봇의 자코비안으로 가정되는 임의의 행렬에 대해서 Dexterity measure를 적용하여 최적의 Fault-Tolerant 형상에 대한 분석을 시도하였다. Lewis와 Maciejewski<sup>(2)</sup>는 여유자유도 매니플레이터의 임의의 관절에 고장이 발생한 경우에, 특이값(singular values)을 이용한 Fault Tolerant의 척도를 나타내는 지수(Index)를 제시하였고, Maciejewski<sup>(4)</sup>는 이 지수에 근거하여 영공간에서의 운동을 최대화 할 수 있는 작업지점에 대한 해석을 수행하였다. Paredis, et.al.<sup>(5)</sup>는 Fault Tolerant Workspace(FTW)에 대한 제정의 및 FTW를 최대로 하는 최적설계를 수행하였다. 본 연구자는 병렬형 여유 구동을 지닌 구형 3 자유도<sup>(10)</sup> 및 6 자유도<sup>(11)</sup> 병렬 메카니즘에서의 Fault Tolerance에 대한 분석을 수행하였는데, 하나의 임의의 관절에 고장이 발생한 상황하에서도 비여유구동된 경우에 비하여 만족할 만한 성능을 유지함을 보였다. 또한, 자코비안의 특이값들에 기준한 로봇 관절의 고장의 정도를 판단할 수 있는 지수들을 제시하였고, 하나의 여유 자유도를 지니는 평면형 직렬형 매니플레이터와 하나의 여유 구동을 지니는 평면형 병렬형 매니플레이터의 예를 통하여 기존에 제시된 지수와의 비교, 분석을 수행하였다<sup>(12)</sup>. 특별히 자코비안의 영공간 요소들이 임의의 관절의 고장시 특이 행태로 접근하는 경향을 쉽게 판단할

수 있는 중요한 정보가 됨을 알 수 있었다. 아울러, 로봇의 고장에 견디는 성능을 향상시키기 위하여 관절에 이중 액츄에이터를 부착한 경우를 조사하였는데, 고장에 견디는 성능을 최대화하기 위해서는 이중 액츄에이터의 부착 위치를 잘 선정해야 함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 기존의 6 자유도 산업용 매니플레이터의 고장에 견디는 성능에 대한 문제점들을 살펴보고, 임의의 관절 고장시 원하는 작업을 지속적으로 수행할 수 있는 4 자유도 공간형 여유자유도 매니플레이터의 최적 구조들을 제시한다. 또한 두 타입의 고장에 견디는 매니플레이터들에 대한 역기구학 해를 구하고, 자코비안의 영공간 요소들에 대한 해석을 통하여 고장에 보다 잘 견디는 타입을 선정하며, 하나의 타입에 대하여 전역등방성 비를 설계지수로 하는 최적설계를 수행하여 최적의 링크 파라미터들을 구한다. 최적화 결과는 최적화되지 않은 링크 파라미터들을 가지고 있는 경우와 비교하여 매우 향상된 등방성 특성을 지님을 시뮬레이션을 통하여 확인한다.

## 2. 고장에 견디는 지수

로봇 시스템의 고장에 견디는 정도를 파악하기 위하여 임출력 간의 관계를 나타내는 자코비안의 성질을 Singular Value Decomposition (SVD)의 기법을 통하여 조사하고자 한다. 출력 벡터 ( $\dot{u}$ ) 그리고 입력벡터 ( $\dot{\phi}$ )의 차원이 각각  $m$ 과  $n$ 일 때, 자코비안  $[J]$ 는  $m \times n$ 의 차원을 지니고, SVD기법<sup>(12)</sup>을 이용하면 다음과 같은 형태로 나타내어 진다.

$$\dot{u} = UDV^T \dot{\phi} \quad (1)$$

여기서,  $U$ 와  $V$ 는 각각  $m \times m$ 의 출력공간에 관계된 직교벡터(Orthogonal vector)로 구성된 행렬과  $m \times n$ 의 입력공간에 관계된 직교벡터로 구성된 행렬을 의미한다. 즉,

$$U = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m] \quad (2)$$

그리고

$$V^T = [R \ | \ N]^T, \quad (3)$$

여기서,  $R^T$ 와  $N^T$ 는 각각 순공간(range space)과 영

공간(null space)을 나타내며  $m \times n$  과  $(n-m) \times n$ 의 차원을 가지며 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} R^T \\ N^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1^T \\ v_2^T \\ \vdots \\ v_m^T \\ v_{m+1}^T \\ \vdots \\ v_n^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{2,1} & \dots & v_{n,1} \\ v_{1,2} & v_{2,2} & \dots & v_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{1,m} & v_{2,m} & \dots & v_{n,m} \\ v_{1,m+1} & v_{2,m+1} & \dots & v_{n,m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{1,n} & v_{2,n} & \dots & v_{n,n} \end{bmatrix} \cdot (4)$$

또한,  $D$ 는 다음과 같이 대각행렬의 형태로 이루어진다

$$D_{max} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_m & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot (5)$$

여기서  $\sigma_i$ 는 특이값(singular value)을 나타내며, 가장 작은 특이값 ( $\sigma_m$ )은 관절공간 속도로부터 작업공간 속도로의 전달이 가장 나쁜 경우를 의미한다.

Lewis와 Maciejewski는<sup>(2)</sup> 여유자유도 매니플레이터의 고장에 견디는 성능을 표현하기 위하여 각각의 고장난 관절에 해당하는 열을 시스템 자코비안에서 제거한 나머지에 해당되는 자코비안들에 대한 최소특이값들을 구하여 그 중에서 최소의 값을 고장에 견디는 성능지수 ( $kfm$ )로 삼았다. 이 성능지수는 아래의 식으로 표현된다.

$$kfm = \min(\sigma_m(FJ), f = \{1, \dots, n\}), (6)$$

여기서  $F \subset f$ 이고  $FJ$ 는  $F$ 의 셋에 해당하는 관절들이 고장난 경우에 시스템 자코비안으로부터 그 관절에 해당되는 열을 뺀 행렬에 해당된다. 본 논문에서는 여유자유도 매니플레이터의 고장에 견디는 성능을 표현하기 위하여 각각의 고장난 관절에 해당하는 열을 시스템 자코비안에서 제거한 나머지에 해당되는 자코비안들에 대한 최소, 최대 특이값의 비들을 구하여 그 중에서 최소의 값을 고장에 견디는 지수 ( $ikfm$ )로 정의하며 아래의 식으로 표현한다.

$$ikfm = \min\left(\frac{\sigma_{\min}(FJ)}{\sigma_{\max}(FJ)}, f = \{1, \dots, n\}\right) (7)$$

$ikfm$ 은 여유자유도 매니플레이터의 고장에 견디는 성능을 판단할 수 있을 뿐만 아니라 이 값이 크면 클수록 작업공간 상에서 모든 방향으로 속도 또는 힘 전달 특성이 균일함을 나타내므로  $kfm$ 보다 우수한 성능지수로 판단된다.

### 3. 공간형 고장에 견디는 매니플레이터

#### 3.1 고장에 견디는 공간형 4 자유도 매니플레이터의 구조

기존의 공간형 6 자유도 매니플레이터들은 공간에서 세 방향의 위치선정을 위하여 세 개의 관절로 이루어진 몸체 부분과 방위각을 선정하기 위하여 좌표계 원점들이 한점에서 일치하는 세 개의 관절들로 이루어진 손목부분으로 구성되어 있는데, 이러한 형태는 역기구학을 손쉽게 해주기 장점을 지니고 있으며 Stanford manipulator, Puma, Cincinnati Milacron 등의 매니플레이터들에서 찾아볼 수 있다. 그러나, 이러한 매니플레이터들은 임의의 관절에 고장이 발생한 경우에 대하여 전혀 고려하지 않음을 살펴볼 수 있다. Figure 1은 6 자유도 Puma 로봇을 나타내고 있는데 베이스로부터의 세 개의 관절은 매니플레이터의 위치를 선정하며, 마지막 세 개의 관절은 방위각을 선정하는 목적으로 쓰인다. 이러한 매니플레이터의 위치에 대한 순방향 기구학(forward kinematics)은 아래와 같이 주어진다<sup>(14)</sup>.

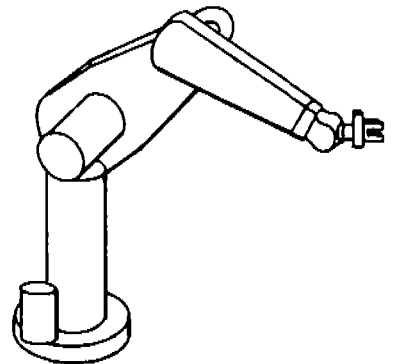


Fig. 1 Wrist-type Robot Manipulator

$$P_x = c_1(a_{23}c_2 + a_{34}c_{23} - d_{44}s_{23}) - d_{33}s_1, \quad (8)$$

$$P_y = s_1(a_{23}c_2 + a_{34}c_{23} - d_{44}s_{23}) + d_{33}c_1, \quad (9)$$

$$P_z = -a_{34}s_{23} - a_{23}s_2 - d_{44}c_{23}. \quad (10)$$

여기서  $P_x, P_y, P_z$ 는 각각 마지막 세 개의 관절 좌표계의 공통 원점의 위치를 나타내며,  $a_{23}, d_{33}$ 과  $d_{44}$ 는 Denavit-Hartenberg 파라미터를 나타낸다. 윗 식에서 살펴본 바와 같이 매니플레이터 끝점의 위치는 롤(roll)을 나타내는 네번째 관절의 각도와는 무관하므로 베이스로부터 세 개의 관절중 어느 하나의 관절 고장시 그 역할을 보상할 수 없음을 알 수 있다. 따라서, 이러한 매니플레이터는 역기구학이 손쉬운 장점을 지니고 있으나 세 개의 '치명적 관절'(critical joint)을 가지고 있으므로 고장에

에 견디는 매니플레이터의 형태에 적합하지 않은 설계임을 알 수 있다. 여기서 치명적 관절이란 임의의 관절에 고장이 발생한 경우에 공간상에서 3 자유도 위치선정이 불가능하게 하는 관절을 칭한다.

Pradeel<sup>(6)</sup> 등은 XR-2로봇과 Intelledex 660 로봇에 대하여 하나의 관절에 고장이 발생한 경우에 작업공간에서 세 방향으로 동작가능한 특성에 관하여 조사하였다. 본 연구에서는 임의의 하나의 관절에 고장이 발생한 경우에도 공간상에서 세 방향으로 원하는 병진운동을 유지할 수 있는 다양한 매니플레이터의 구조에 대하여 살펴본다. Figure 2는 여덟 개의 4자유도 매니플레이터들을 나타내고 있으며, 어느 하나의 관절이 고장난 상황 하에서도 공간 상에서 3 자유도의 병진운동을 할 수 있는 매니플레이터 타입을 선택하고자 한다. Figure 2의 매니플레이터 타입 A에서 축간의 거리  $a_{12}$ 가 없다고 가정하면, 이러한 매니플레이터의 구조는 Rhino XR-2로봇의<sup>(6)</sup> 베이스로부터의 네 개의 관절의 형태와 동일하며, 매니플레이터 끝점의 위치에 대한 순방향 기구학은 아래와 같이 주어진다.

$$P_x = c_1(a_{23}c_2 + a_{34}c_{23} + a_{45}c_{234}), \quad (11)$$

$$P_y = s_1(a_{23}c_2 + a_{34}c_{23} + a_{45}c_{234}), \quad (12)$$

$$P_z = a_{23}s_2 + a_{34}s_{23} + a_{45}s_{234}. \quad (13)$$

그러나 매니플레이터 타입 A의 베이스 관절은 다른 세 개의 관절들과 서로 수직(orthogonal)의 형태로 배치되어 있으므로 이 관절의 고장시 다른 관절들로 그 역할이 보상될 수 없음을 쉽게 알 수 있으므로 한 개의 치명적 관절을 가지고 있음을 나타내고 있다. 매니플레이터 타입 G도 이와 같은 현상을 가진다. 매니플레이터 타입 H는 Z 방향의 운동을 정의할 수 없으므로 고장에 견디는 매니플레이터 타입으로는 적합하지 않다.

매니플레이터 타입 B, C, D, F는 현존하는 매니플레이터에서는 찾아볼 수 없는 구조들이며, 매니플레이터 타입 E는 축간의 거리  $a_{12}$ 가 없다고 하면 Intelledex 660 매니플레이터의<sup>(6)</sup> 베이스에 인접한 네 개의 관절이 이러한 형태를 지니고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 고장에 견디는 공간형 4 자유도 매니플레이터의 역기구학 해

Figure 2의 B, C, D, E, F 타입 매니플레이터들은 어느 관절에 고장이 발생한 상황에서도 모든 역기구학 해가

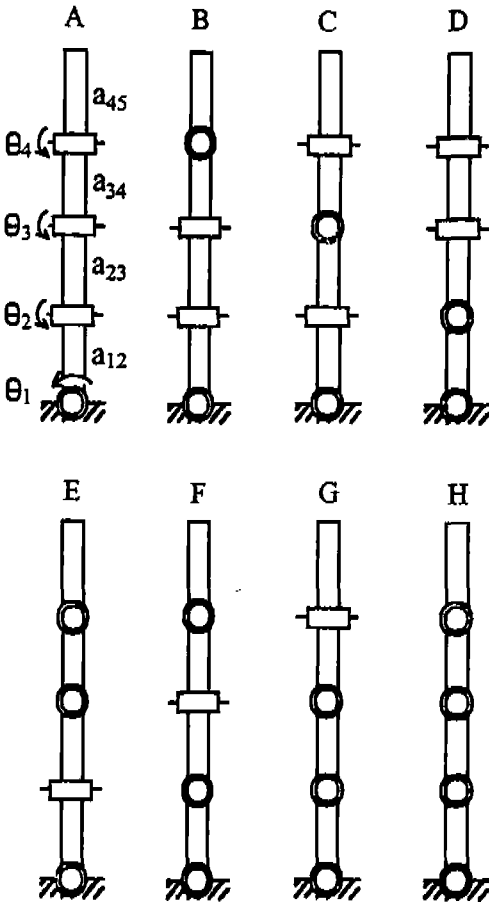


Fig. 2 4 DOF Spatial Manipulators

쉽게 구해지는 구조들이며 본 절에서는 타입 C와 E에 대해서 살펴보도록 한다.

매니플레이터 타입 E의 순방향 기구학은 아래와 같이 구해진다.

$$p_x = Ac_1 - Bs_1, \quad (14)$$

$$p_y = As_1 + Bc_1, \quad (15)$$

$$p_z = [(a_{23} + a_{34}c_3) + a_{45}c_{34}]s_2, \quad (16)$$

여기서

$$A = [(a_{23} + a_{34}c_3 + a_{45}c_{34})c_2], \quad (17)$$

$$B = [(a_{34}s_3 + a_{45}s_{34})]. \quad (18)$$

각 관절이 고장난 경우의 역기구학 해는 다음과 같이 구해진다.

(1)  $\theta_1$ 이 고장난 경우

$\theta_2$ 는 다음의 관계식으로부터 구해진다.

$$p_x^2 + p_y^2 = A^2 + B^2 \\ = (p_z c_2 / s_2)^2 + (-p_x s_1 + p_y c_1)^2, \quad (19)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[ \frac{p_z}{\pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - (-p_x s_1 + p_y c_1)^2}} \right] \quad (20)$$

식 (14)-(16)로부터, 다음의 두 관계식이 구해지며

$$a_{34}c_3 + a_{45}c_{34} = p_z / s_2 - a_{23}, \quad (21)$$

$$a_{34}s_3 + a_{45}s_{34} = -p_x s_1 + p_y c_1. \quad (22)$$

두 식을 제공하여 더한 결과로부터  $\sin \theta_4$ 와  $\cos \theta_4$ 를 아래와 같이 각각 구한다.

$$c_4 = \frac{(p_z / s_2 - a_{23})^2 + (-p_x s_1 + p_y c_1)^2 - a_{34}^2 - a_{45}^2}{2a_{34}a_{45}}, \quad (23)$$

$$s_4 = \pm \sqrt{1 - c_4^2}, \quad (24)$$

이에 따라서,

$$\theta_4 = A \tan 2(s_4, c_4). \quad (25)$$

식 (21)과 (22)를  $\theta_3$ 에 대하여 정리하면

$$(a_{45}c_4 + a_{34})c_3 - (a_{45}s_4)s_3 = p_z / s_2 - a_{23}, \quad (26)$$

$$(a_{45}c_4 + a_{34})s_3 + (a_{45}s_4)c_3 = -p_x s_1 + p_y c_1. \quad (27)$$

식 (26)-(27)로부터  $\theta_3$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_3 = A \tan 2(KN - LM, KM + LM) \quad (28)$$

여기서

$$K = a_{45}c_4 + a_{34}, \quad (29)$$

$$L = a_{45}s_4, \quad (30)$$

$$M = p_z / s_2 - a_{23}, \quad (31)$$

$$N = -p_x s_1 + p_y c_1. \quad (32)$$

(2)  $\theta_2$ 가 고장난 경우

식 (16)과 (19)로부터

$$A = p_z c_2 / s_2, \quad (33)$$

$$B = \pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - (p_z c_2 / s_2)^2} = -p_x s_1 + p_y c_1 \quad (34)$$

이 구해지며, 식 (34)로부터  $\theta_1$ 이 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_1 = A \tan 2(-p_x, p_y) \pm A \tan 2(p_z c_2 / s_2, \pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - (p_z c_2 / s_2)^2}) \quad (35)$$

$\theta_3$ 와  $\theta_4$ 는  $\theta_1$ 이 고장난 경우와 같은 방식으로 구한다.

(3)  $\theta_3$ 가 고장난 경우

식 (14)-(16)를 각각 제공하여 모두 더한 다음 정리하면

$$p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 = (a_{34}s_3)^2 + a_{45}^2 + (a_{23} + a_{34}c_3)^2 + 2a_{34}a_{45}s_{34} + 2(a_{23} + a_{34}c_3)a_{45}c_{34} \quad (36)$$

여기서,  $\theta_4$ 는 아래와 같이 구해진다.

$$\theta_4 = A \tan 2(M, L) \pm A \tan 2(\sqrt{L^2 + M^2 - N^2}, N) - \theta_3. \quad (37)$$

여기서

$$L = 2(a_{23} + a_{34}c_3)a_{45}, \quad (38)$$

$$M = 2a_{34}a_{45}s_3, \quad (39)$$

$$N = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - (a_{34}s)^2 - a_{45}^2 - (a_{23} + a_{34}c_3)^2. \quad (40)$$

또한, 식 (16)으로부터

$$s_2 = p_z / (a_{23} + a_{34}c_3 + a_{45}c_{34}), \quad (41)$$

$$c_2 = \pm \sqrt{1 - s_2^2}. \quad (42)$$

따라서,  $\theta_2$  다음과 같이 구해진다.

$$\theta_2 = A \tan 2(s_2, c_2). \quad (43)$$

(4)  $\theta_4$ 가 고장난 경우

식 (35)로부터  $\theta_3$ 는 아래와 같이 구해진다.

$$\theta_3 = A \tan 2(M, L) \pm A \tan 2(\sqrt{L^2 + M^2 - N^2}, N) \quad (44)$$

여기서

$$L = 2a_{23}a_{34} + 2a_{23}a_{45}c_4, \quad (45)$$

$$M = -2a_{23}a_{45}s_4, \quad (46)$$

$$N = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - a_{23}^2 - a_{34}^2 - a_{45}^2 - 2a_{34}a_{45}c_4. \quad (47)$$

$\theta_1$  과  $\theta_2$  는  $\theta_3$  가 고장난 경우와 같다.

매니플레이터 타입 C를 살펴보면, 축간의 거리  $a_{12}$ 가 없다고 가정할 때 순방향 기구학은 아래와 같이 구해진다.

$$p_x = Ac_1 - Bs_1, \quad (48)$$

$$p_y = As_1 + Bc_1, \quad (49)$$

$$p_z = [a_{23} + (a_{34} + a_{45}c_4)c_3]s_2 + (a_{45}s_4)c_2 \quad (50)$$

여기서

$$A = (a_{23} + (a_{34} + a_{45}c_4)c_3)c_2 - (a_{45}s_4)s_2, \quad (51)$$

$$B = (a_{34} + a_{45}c_4)s_3. \quad (52)$$

각 관절이 고장난 경우의 역기구학 해는 타입 C의 경우와 마찬가지로 방식으로 구해진다<sup>(15)</sup>.

### 3.3 고장에 견디는 4 자유도 매니플레이터의 영공간 해석

다음은 영공간을 이용하여 여유 자유도 로봇의 고장에 견디는 기능을 지니기 위한 충분조건에 관하여 간략하게 기술한다. 우선, 자코비안이 랭크(rank)  $m$ 을 가지는 경우 (즉,  $(\sigma_i \neq 0, i = 1 \dots m)$ )에 식 (1)은 다음과 같이 표현된다

$$U^{-1}\dot{u} = DV^T\dot{\phi}$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_m & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^T \\ N^T \end{bmatrix} \dot{\phi}. \quad (53)$$

여기서  $R$ 과  $N$ 은 각각 순공간(range space)과 영공간(null space) 행렬을 나타내며, 순속도 벡터 ( $\dot{\phi}_{net}$ )와 영속도 벡터 ( $\dot{\phi}_{null}$ )는 아래와 같이 정의된다.<sup>(13)</sup>

$$\dot{\phi}_{net} = R^T \dot{\phi}, \quad (54)$$

$$\dot{\phi}_{null} = N^T \dot{\phi}. \quad (55)$$

식 (55)를 다시 표현하면

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_{null_1} \\ \dot{\phi}_{null_2} \\ \vdots \\ \dot{\phi}_{null(n-m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1,m+1} & \dots & v_{i,m+1} & \dots & v_{n,m+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{1,n} & \dots & v_{i,n} & \dots & v_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \vdots \\ \dot{\phi}_i \\ \vdots \\ \dot{\phi}_n \end{bmatrix}. \quad (56)$$

식(56)  $i$  번째 열의 요소들인  $v_{i,m+1}, \dots, v_{i,n}$ 가 모두 0 이라면 관절  $i$ 의 속도 변수  $\dot{\phi}_i$ 가 영공간에 속하지 않음을(즉, 자가 운동에 기여하지 않음을) 의미한다. 이것은 관절  $i$ 의 속도 변수  $\dot{\phi}_i$ 가 0이 되는 경우(잠겨지는 경우)에 현재의 형상에서 영공간에 속한 관절들은 이러한 관절의 고장 발생으로 인한 출력속도 부분의 손실에 대한 보상이 가능하지 않음을 나타낸다.

Figure 2와 같은 매니플레이터들은 공간상에서 세 방향으로의 위치 선정에 있어서 하나의 여유자유도를 가지므로

식 (55)에서  $N^T$ 은 오직 하나의 행으로 구성된다. 어느 하나의 관절에 고장이 발생한 경우에도 고장에 견디는 특성을 가지려면 식 (55)의 영공간의 요소들이 모두 0이 아닌 값을 가져야 한다.

타입 A는 베이스 관절의 속도 변수  $\dot{\phi}_1$ 가 영공간에 존재하지 않기 때문에 식 (55)의 행렬에서 첫번째 열의 모든 요소들이 0이 됨을 알 수 있다. 타입 G는 타입 A와 마찬가지로 현상을 지닌다. 따라서, 이러한 현상을 방지하기 위해서는 유효자유도가 로봇의 구조에 적절히 배치되어야 한다.

타입 B, C, D, E, F의 경우들은 어느 임의의 관절 고장시 다른 관절들로 그 역할이 보상될 수 있는 배열을 가지고 있는데, 특별히 타입 E와 타입 C의 영공간의 요소들을 통하여 고장에 견디는 성능을 알아보려고 한다. 이러한 매니플레이터는 하나의 여유자유도를 지니므로 하나의 파라미터에 대하여 자가운동을 나타낼 수 있다. Figure 3은 E와 C 타입 매니플레이터의 공간상의 고정된 한점  $(P_x, P_y, P_z) = (0, 1.5, 1.0)$ 에 대하여, 첫번째

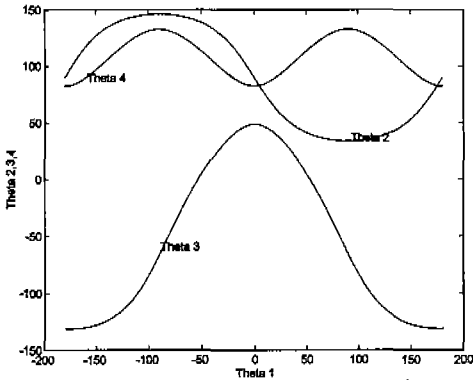


Fig. 3(a). Self-Motion Space of E-type Manipulator

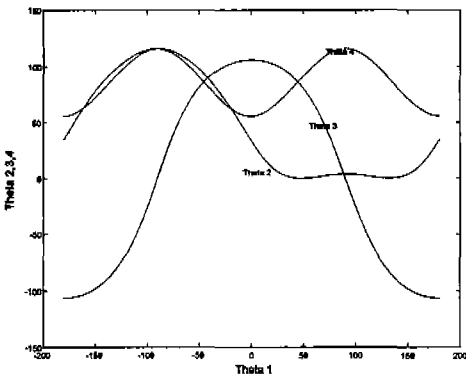


Fig. 3(b). Self-Motion Space of C-type Manipulator

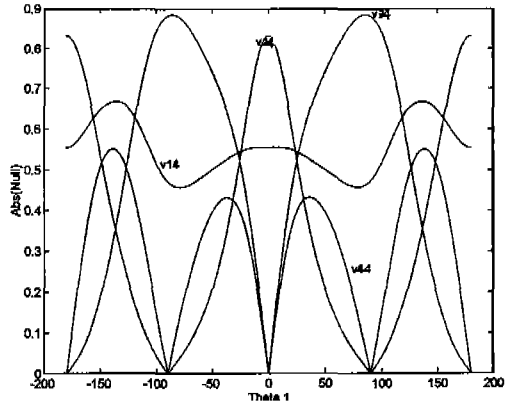


Fig. 4(a). Null-Space Characteristic of E-type Manipulator

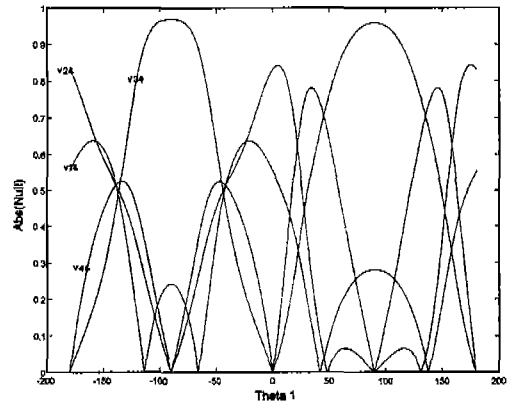


Fig. 4(b). Null-Space Characteristic of C-type Manipulator

관절을 파라미터로 한 다른 관절들의 관절공간 상에서의 자가운동을 나타낸다. 이 그림은 첫번째 관절이 임의의 각도에서 고장이 발생한 경우에 나머지 관절들이 이러한 역기구학 해를 가지고 있다고 해석될 수 있다.

Figure 4는 같은 하나의 작업점에 대하여 첫번째 관절 각을 파라미터로 정한 경우의 영공간 요소들을 나타내는데, 식 (55)의 해석 결과로부터 알 수 있듯이 어느 하나의 요소가 0인 경우는 첫번째 관절의 고장시 다른 관절들로 고장을 극복할 수 없음을 의미한다. 또한, 이러한 경우는 식 (7)에서 정의된 고장에 견디는 지수  $ikfm$ 가 0인 경우와 일치한다. 따라서, Fig. 3에서와 같이 임의의 관절 고장시 역기구학 해가 존재한다고 할지라도 반드시 고장에 견디는 특성을 가진다고 할 수 없다. 타입 E는 타입 C의 경우보다 적은 특이영역을 가지고 있음을 알 수 있다. Figure 5는 타입 E 매니플레이터가 X-방향으로 직선

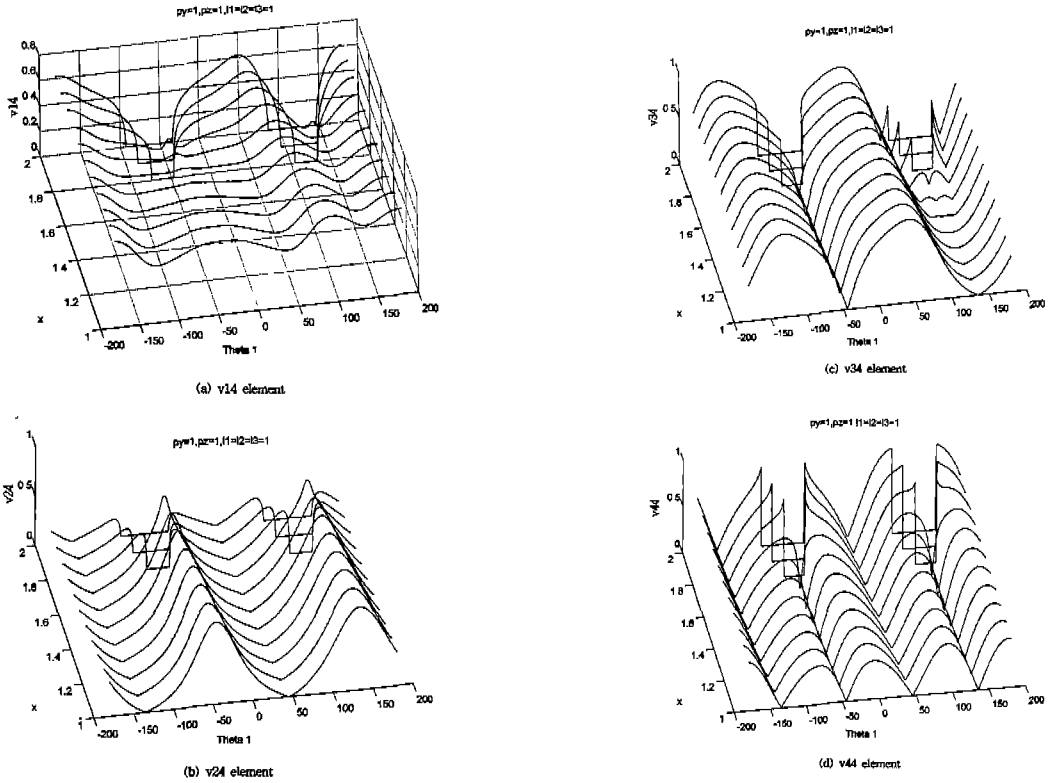


Fig. 5 Null-Space Characteristic of E-type Manipulator Along the X-Directional Translational Motion

운동을 할 경우의 *ikfm* 을 나타낸다. 그림에서 *x*가 1.8에서 2.0까지의 평면한 구간은 매니플레이터가 도달할 수 없는 형상을 나타낸다. 이 그림의 단편적인 예를 통하여 살펴볼 수 있듯이 전체 작업구간에서 *ikfm* 이 0이 되는 지점은 거의 변동치 않음을 시뮬레이션을 통하여 살펴볼 수 있다. 따라서 E 타입이 C 타입의 경우보다 전체 작업 공간에서 보다 우수한 고장에 견디는 특성을 가지고 있다고 판단된다.

다음으로는 E 타입 매니플레이터의 고장에 견디지 못하는 특이형태에 대한 해석을 하고자 한다. Figure 6은 E 타입 매니플레이터의 첫번째 관절의 각도가  $-90^\circ$  일 때의 매니플레이터의 형상을 나타내며 이 때의 영공간은 식 55로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{\phi}_{null_1} = [0.47 \ 0.0 \ 0.88 \ 0.0] \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{bmatrix}, \quad (57)$$

여기서 살펴볼 수 있듯이 두번째 관절과 네번째 관절은 영공간에 속하지 않음을 알 수 있다. 또한 이 경우의 시스템 자코비안은 아래와 같으며

$$J = \begin{bmatrix} -1.5 & 0.0 & 0.8028 & 0.4014 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & -0.7621 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & -0.5081 \end{bmatrix} \quad (58)$$

이로부터 두번째 관절과 네번째 관절에 해당되는 열들이 서로 연관관계를 가짐을 알 수 있으며, 이러한 사실은 현재의 위치에서 작업공간 상에서 같은 방향으로 운동을 초래하게 되므로 하나의 운동자유도를 상실한다. 따라서, 첫번째 또는 세번째 관절에 고장이 발생한 경우에는 고장이 발생하지 않은 두번째와 네번째 관절과 함께 작업공간 상에서 세 방향으로의 운동을 제어할 수 없게 된다. 이러한 현상은 Fig. 7의 평면형 여유자유도 매니플레이터의 경우로 쉽게 설명된다<sup>(12)</sup>. 세번째 관절과 두번째 관절에



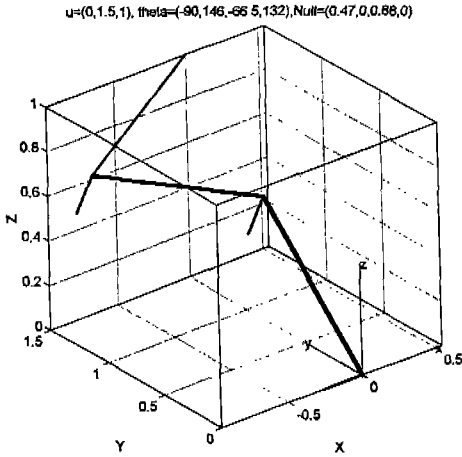


Fig. 6 A Nonfault-Tolerant Configuration of E-type Manipulator at  $\theta_1 = -90^\circ$

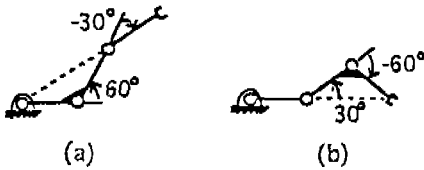


Fig. 7 Nonfault-Tolerant Configurations of Planar 2-DOF Manipulator

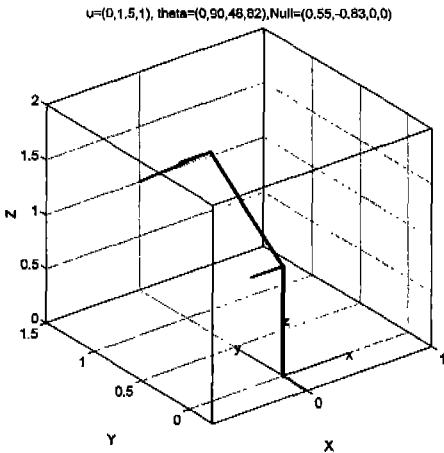


Fig. 8 A Nonfault-Tolerant Configuration of E-type Manipulator at  $\theta_1 = 0^\circ$

각각 고장이 발생한 경우에 그 관절을 잠그면 나머지 두 개의 관절은 작업공간에서 같은 방향으로만 제어가능하므로 특이한 형태가 된다.

Figure 8은 첫번째 관절의 각도가  $0^\circ$ 일 때의 매니플레이터의 형상을 나타내며 이 때의 식 (55)는 다음과 같으며

$$\phi_{null_1} = [0.55 \quad -0.83 \quad 0.0 \quad 0.0] \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{bmatrix}, \quad (59)$$

여기서 살펴볼 수 있듯이 세번째 관절과 네번째 관절은 영공간에 속하지 않음을 알 수 있다. 또한 이 경우의 시스템 자코비안은 아래와 같으며

$$J = \begin{bmatrix} -1.5 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.6614 \\ 0.0 & 0.0 & 1.5 & 0.75 \end{bmatrix} \quad (60)$$

이로부터 두번째 관절과 세번째 관절에 해당되는 열들이 서로 연관관계를 가짐을 알 수 있으며, 이러한 사실은 현재의 위치에서 작업공간 상에서 같은 방향으로 운동을 초래하게 되므로 하나의 운동자유도를 상실한다. 따라서, 첫번째 또는 네번째 관절에 고장이 발생한 경우에는 고장이 발생하지 않은 두번째와 네번째 관절과 함께 작업공간 상에서 세 방향으로의 운동을 제어할 수 없게 된다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 실제의 여유자유도 매니플레이터를 사용한 작업에서는 Fig. 5에 나타난 특이한 형상을 회피하는 자가운동 알고리즘이 개발되어야 하며, 여유자유도 매니플레이터의 설계에 있어서는 이러한 경우들을 최소화 하도록 설계가 지향되어야 할 것이다. 그러나, 단지 하나의 여유자유도를 지니는 타입에서는 고장이 발생한 관절에 따라서 작업구간이 크게 감소하거나, 경우에 따라서 특이한 지점들을 회피하지 못하는 형태가 발생하므로 보다 향상된 고장에 견디는 특성을 지니기 위해서는 관절을 추가로 부착한 5 자유도 또는 6 자유도 여유자유도 매니플레이터 구조에 대한 연구가 진행되어야 하며, E 타입 또는 C 타입 매니플레이터의 끝 부분에 하나의 관절을 마지막 관절에 수직하게 또는 평행하게 배치한 형

태가 될 것이다. 본 연구에서 수행된 4 자유도 매니플레이터에 대한 연구결과는 이러한 연구의 기반이 되리라 판단된다.

3.4 고장에 견디는 4 자유도 매니플레이터의 최적설계

본 절에서는 정해진 작업공간에 대하여 식 (7)의 고장에 견디는 지수 (*ikfm*)를 설계지수로 한 최적설계를 본 타입에 대하여 수행한다. 식 (7)에 대한 전역설계지수는 아래와 같이 정의된다.

$$gkfm = \frac{\int ikfmdW}{\int dW} \quad (61)$$

여기서 W는 3차원 작업공간과 각 작업위치에서의 자가운동 공간을 포함한 공간을 나타낸다. 3차원 작업공간은 x, y, z 방향으로 각각 다음과 같이 주어진다.

$$-2.4 \leq x, y \leq 2.4, \quad (62)$$

$$0.8 \leq z \leq 2.4. \quad (63)$$

자가운동 공간은 이러한 3차원 공간의 각 위치에서 자가운동을 가능케 하는 공간을 의미한다. 시뮬레이션에서 사용한 격자간격은 x, y, z 방향으로 각각 0.1, 0.1, 0.8로 하였으며, 자가운동 공간에서는 자가운동의 파라미터로 삼은  $\theta_1$ 에 대하여 5°의 격자간격을 주었다. 식 (61)의 *gkfm*은 이러한 모든 격자들(W)에 대하여 계산된 *ikfm*의 평균값을 의미한다.

Figure 9는 매니플레이터의 전체 링크 길이를 3으로 고정하고 각 링크의 길이를 0.5과 2.0 사이의 값으로 제한한 경우에 첫번째 링크 길이 ( $a_{23}$ )와 두번째 링크 길이 ( $a_{34}$ )에 대한 *gkfm*의 등고선도를 나타낸다. 이 그림으로부터 최적의 링크 파라미터들은 아래와 같이 판별된다.

$$(a_{23}, a_{34}, a_{45}) = (1.1, 1.2, 0.7). \quad (64)$$

최적설계의 결과를 점검하기 위하여, 식 (64)의 경우와  $(a_{23}, a_{34}, a_{45}) = (0.75, 0.75, 1.5)$ 인 경우를 작업공간 상의 등방성지수의 분포를 대하여 비교하고자 한다. Figure 10과 11은 각각 z를 1.5로 고정한 x-y평면상의

각 위치에서 자가운동 공간에서의 평균 *ikfm*의 등고선도를 나타낸다. Figure 10에서 구한 최적 링크파라미터에 대한 결과는 Figure 11의 최적화되지 않은 임의의 링크파라미터에 대한 결과에 비하여 매우 향상된 등방성 특성을 지니고 있음을 쉽게 확인할 수 있다.

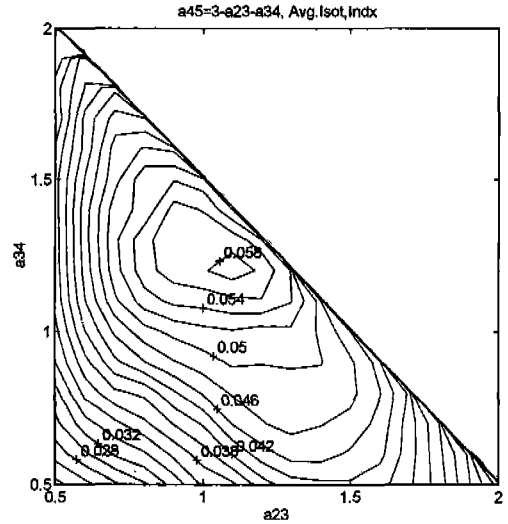


Fig. 9 Plot for *gkfm*

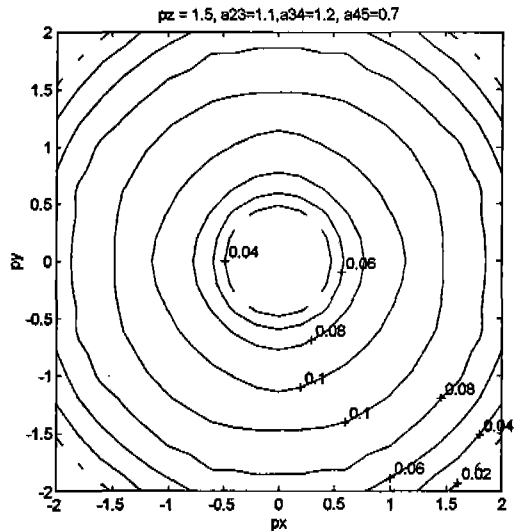


Fig. 10 Plot for *ikfm* in Case of Optimized Case

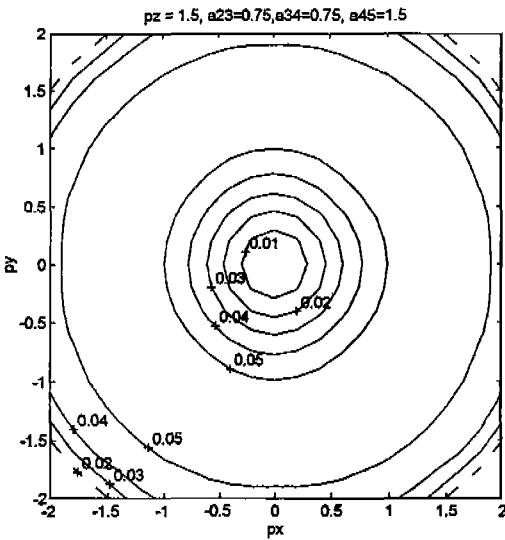


Fig. 11 Plot for *ikfm* in Case of Nonoptimized Case

#### 4. 결 론

기존의 산업용 매니플레이터들의 설계에 있어서는 임의의 관절에 고장이 발생한 경우에 대한 고려가 전혀 되어 오지 않았다. 로봇의 용도가 다양화 됨에 따라서, 수리 및 점검이 어려운 작업에서는 고장에 견디는 로봇 구조에 대한 연구가 필요하다. 이에 관련하여 기존에는 평면형 여유자유도/여유구동 매니플레이터에 대한 연구가 수행되었으며<sup>(12)</sup>, 본 논문에서는 3 차원 작업공간에서 세 방향으로 병진운동 가능하며 임의의 관절 고장시, 구조적으로 이러한 고장에 견디는 하나의 여유자유도를 지니는 4 자유도 매니플레이터 구조들을 제시하였고, 이에 대한 고장에 견디는 특성에 관한 해석 및 최적설계를 수행하였다.

• 기존의 6 자유도 Wrist 타입 매니플레이터들은 고장에 견디지 못하는 구조를 지니고 있음을 살펴보았고

• 임의의 관절에 고장이 발생한 경우, 작업공간에서 세 방향으로 원하는 위치를 정할 수 있는 다섯 형태의 공간형 4 자유도 여유자유도 매니플레이터의 타입들을 제시하고,

• 두 타입에 대한 역방향 기구학을 수행하였으며, 자코비안의 영공간 요소의 해석을 통하여 보다 우수한 고장에 견디는 타입을 제시하였고,

• 또한 E 타입 매니플레이터 구조에 대하여 전역등방성 지수를 설계지수로 하는 최적설계를 수행하였고 항상

된 성능을 점검하였다.

• 보다 향상된 고장에 견디는 특성을 지니기 위해서는 관절을 추가로 부착한 5 자유도 또는 6 자유도 여유자유도 매니플레이터 구조에 대한 연구가 진행되어야 하며, 본 연구에서 수행된 4 자유도 매니플레이터에 대한 연구 결과는 이러한 연구의 기반이 되리라 판단된다.

#### 5. 후 기

본 연구는 '94년도 학술진흥재단 지방대육성과제 학술연구 조성비의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

#### 6. 참고문헌

1. Chladek, J.T., 1990, "Fault Tolerance for Space Based Manipulator Mechanisms and Control System," First International Symposium on Measurement and Control in Robotics.
2. Lewis, C. and Maciejewsky, A., 1994, "Dexterity Optimization of Kinematically Redundant Manipulators in the Presence of Joint Failures," Computer Elect. Eng Vol. 20, No. 3, pp. 273-288.
3. Maciejewski, A., 1990, "Fault Tolerance of Kinematically Redundant Manipulators," Proc. of IEEE Robotics and Automation Conf., pp. 638-642.
4. Maciejewski, A., 1994, "An Example of Failure Tolerant Operation of a Kinematically Redundant Manipulator," Proc. of IEEE Robotics and Automation Conf., pp. 1380-1387.
5. Paredis, C.J.J., Au, W.K.F., and Khosla, P., 1994, "Kinematic Design of Fault Tolerant Manipulators," Computer Elect. Engng Vol. 20, No. 3, pp. 211-220.
6. Pradeep, A.K., et.al. 1988, "Crippled Motion in Robots," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 2-13.

7. Sreevijayan, D., 1992, "On the Design of Fault-Tolerant Robotic Manipulator Systems," Master Thesis, Dept. of Mechanical Eng., The Univ. of Texas at Austin.
8. Ting, Y., Tosunoglu, S., and Tesar, D., 1993, "A Control Structure for Fault-Tolerant Operation of Robotic Manipulators," Proc. of IEEE Robotics and Automation Conf., pp. 684-690.
9. Tosunoglu, S., 1993, "Fault Tolerance for Modular Robots," Proc. of IECON '93, pp. 1910-1914.
10. 이 병주, 김 희국, 1994, "고장에 강인한 구형 3 자유도 모듈의 기구학적 해석," 대한기계학회논문집 제18권, 제11호, pp. 2846-2859.
11. Yi, Byung-Ju and Kim, Whee-Kuk, 1994, "Optimal Design of a Redundantly Actuated 4-Legged Six Degree of Freedom Parallel Manipulator Using Composite Design Index," KSME Journal, Vol. 8, No. 4, pp. 385-403.
12. 이병주, 김희국, 김동구, 1995, "고장에 견디는 여유 구동/자유도 매니플레이터의 성능에 대한 해석," 대한기계학회논문집 제19권, 제11호, pp. 2927-2938.
13. 박종훈, 정완균, 염영일, 1995, "여유자유도 매니플레이터의 동력학 특성과 동력학적 제어기의 설계에 관하여," '95대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 902-907.
14. Craig, J.J., 1986, Introduction to Robotics, Addison Wesley.
15. 이 병주, 김희국, 김동구, 1995, "매니플레이터의 고장에 견디는 성능 해석," 한국자동제어학술회의 논문집, 제2권, pp. 185-188.