

〈논 문〉

## 가변형상 트러스구조물의 자세제어

노태환\* · 김태익\*\* · 박현철\*\*\* · 권영두\*\*\*\*

(1996년 2월 21일 접수)

### Configuration Control of Variable-Geometry Truss Structures

Tae-Hwan Roh, Tae-Ik Kim, Hyun Chul Park and Young-Doo Kwon

**Key Words :** Adaptive Structure(적응구조), VGS(Variable Geometry Structure : 가변형상 구조물), VGTS(Variable Geometry Truss Structure : 가변형상 트러스구조물), Length-Variable Member(가변길이 멤버)

#### Abstract

The concept of variable-geometry truss structure(VGTS) is introduced as a class of actively controlled adaptive structure. VGTS can purposefully vary its geometric configurations by changing the lengths of some members of the structure. General kinematics and inverse kinematics of a statically determinate VGTS(variable geometry truss structure) are studied. The solution technique is based on the Jacobian matrix obtained via joint equilibrium equations. Pseudoinverse control method is applied to resolve the redundancy of a large VGTS. two types of actuator layout of octahedral type VGTS, VG truss and Stewart platform, are compared. Introducing the concept of performance index, Stewart platform based layout was found to have less consumption energy and manipulation time. A functional VGTS model with 3 octahedral modules is designed and manufactured for the laboratory demonstration. Six vertically located length- variable members are used to create general 6 d.o.f. motions.

#### 1. 서 론

최근 우주항공 연구분야를 중심으로 고정밀화된 보다 진보적인 형태의 구조물인 적응구조물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 적응구조물(adaptive structure)이란 일반적으로 외부의 환경이나 조작자의 의도에 따라 그 형태나 물리적 성질을 변화시킬 수 있는 구조물을 일컫는다. 가변형상 구조물(VGS : Variable Geometry Structure)은

이러한 적응구조물의 대표적인 형태로 필요에 따라 그 형상을 임의로 변화시킬 수 있는 구조물을 말한다. 가변형상구조물의 대표적인 예로서 Fig. 1과 같은 여러가지 우주구조물들을 들 수가 있다. 일반적으로 우주구조물의 경우 높은 정밀도를 필요로 하지만 그 크기가 방대하여 유연성이 크기 때문에 작은 열변형이나 기계적 변형도 능동적으로 보정해 주어야 하며 이를 위해서는 가변형상구조의 사용이 필요하다.

형상변형이 가능한 구조물의 가장 기본적인 형태는 통상적으로 로봇팔 등에 사용되는 것과 같은 직렬링크형태의 구조이지만 유연성이 커서 지지구조나 대형 정밀구조로의 사용에는 적합하지 않다. 이에 고유의 경량성과 강성을 가진 트러스형 구조물

\* (주) 삼성항공

\*\* 포항공과대학교 대학원

\*\*\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

\*\*\*\* 회원, 경북대학교 기계공학과

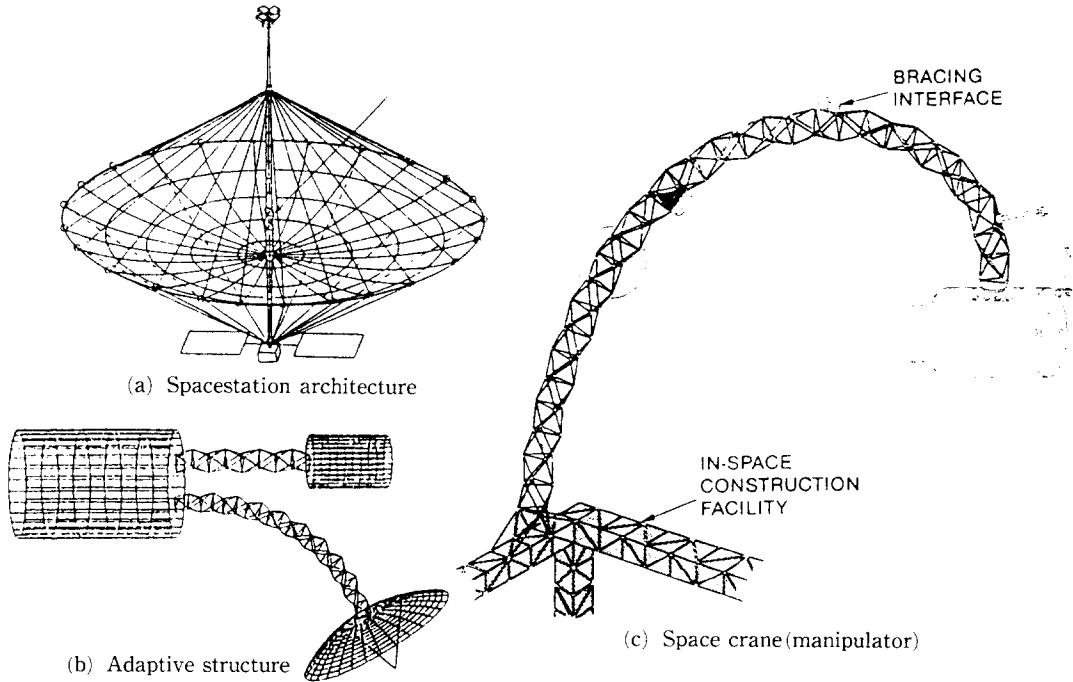


Fig. 1 Application of VGTS

려져 있다.<sup>(1)</sup>

VGT structure에 관한 연구는 Miura 등에 의해 일본에서 먼저 시작되었다. Miura는 팔면체구조의 VGT (Variable Geometry Truss)를 중심으로 그 형상과 구조적 어려 및 진동특성 등에 대한 기본적인 공식들을 제시하였다.<sup>(2,3)</sup> Hughes 등은 매니플레이터로서의 VGTS의 적합성에 대하여 연구하였고,<sup>(4)</sup> Chen과 Wada 또한 이와 유사하게 트러스 매니플레이터의 개념을 space crane에 적용하고자 하였다.<sup>(4~6)</sup> 한편 Naccarato와 Hughes는 보조형상곡선(reference shape curve)을 이용하여 다자유도 VGT 매니플레이터의 형상제어방법을 제시하였고<sup>(7,8)</sup> Das 등은 부정정구조를 포함한 일반적인 적응트러스구조를 대상으로 수학적 기초를 마련하였

에 가변성을 부여한 가변형상 트러스구조물 (VGTS : Variable Geometry Truss Structure)의 개념이 도입되었으며 이러한 구조물은 각 멤버의 길이를 변화시킴으로써 형상을 변화시킬 수 있다. 가변형상 트러스구조물은 경량성 및 강성과 더불어 수송시 저장부피를 극소화할 수 있고 매니플레이터로 응용시에는 복잡한 작업공간에서 높은 여유자유도의 동작을 구현할 수 있는 장점등이 있다.

VGTS는 가변길이멤버를 포함한 기본형태의 트러스 모듈을 반복적으로 조합하여 이루어지며, 트러스의 기본구조로는 Fig. 2에서와 같이 여러가지 형태를 들 수가 있다. 이 중에 Fig. 2(a)와 같은 팔면체형의 기본구조가 조인트의 설계나 여러가지 정적, 동적 특성에 있어서 가장 적합한 것으로 알

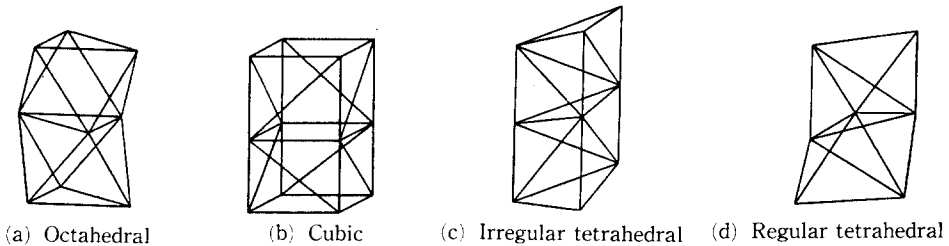


Fig. 2 Basic structures of VGTS

다.<sup>(9)</sup> 그밖에 Murotsu 등은 가변형상구조의 최적형상제어에 관한 연구를 수행하였고<sup>(10,11)</sup> Yokoi 등은 compliance control technique을 이용하여 다자유도 truss arm의 역기구 해를 구하는 또 다른 방법을 제시하였다.<sup>(12)</sup> 효과적인 가변길이멤버의 위치설정을 위하여 Chen 등은 simulated annealing 방법을,<sup>(13)</sup> Haftka 등은 integer programming 기법을 각각 도입하였다.<sup>(14)</sup>

본 연구에서는 기존의 연구자들<sup>(2,3,4,8)</sup>이 연구대상으로 삼았던 가변길이멤버의 배열과 다른 조종사의 모의훈련 등에 쓰이는 Stewart Platform을 대상으로 삼았다. Miura 등<sup>(2)</sup>에 의해서 VG truss로 이름이 붙여진 기존의 배열구조는 트러스 길이방향으로의 확장, 축소변형 능력이 뛰어난 장점이 있는 반면 축방향 비틀림변형에 대해서는 특이점을 가지고 있으므로 이에 이러한 특이점을 없애면서 Stewart Platform을 가변형상 구조물의 기본 단위로의 사용 가능성을 Jacobian matrix에 기초하여 VGTS의 기구학적 해석에 대한 고찰을 통해 알아모았다. 높은 여유자유도를 갖는 VGTS의 역기구해를 얻기 위해 일반적인 다자유도 매니퓰레이터의 해석에 많이 이용되고 있는 Pseudo-inverse controll method를 도입하였다. 구조물의 형상변형에 관한 몇가지 성능지수(performance index)를 설정하고 이로부터 팔면체 형태의 VGTS를 대상으로 멤버배열방식의 효율성을 비교할 수 있었다. 앞서 수행한 기구학적 해석을 바탕으로 여섯 개의 가변길이멤버를 포함한 기본형태의 VGTS 실험모델을 제작하여 가변형상 트러스의 기본단위로 사용할 수 있음을 검증하고 또한 구성멤버의 수를 2배로 하여 여유자유도를 크게 증가시킨 VGTS를 대상으로 형상제어 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. VGTS의 기구학적 해석

### 2.1 VGTS의 기구학적 해석

전체 트러스구조의 형상은 각 조인트의 위치벡터에 의하여 결정되므로 기구학적 해석은 이러한 조인트의 위치벡터를 기초변수로 하여 이루어진다. Fig. 3과 같이 좌표계를 설정하면 각 조인트의 위치벡터를 광역좌표계와 국부좌표계에 대하여 아래와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 3의 그림에서 2차원 일 경우의 한 조인트에서의 광역좌표계와 국부좌표계에 대한 변위벡터를 표시했다.

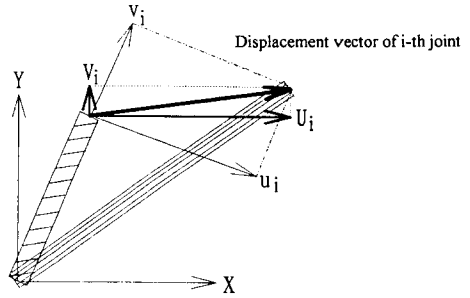


Fig. 3 Local and Global coordinate displacement vector of i-th joint

$\{u\}_i = [u_i v_i w_i]^T$  : 국부좌표계에서의 조인트변위벡터

$\{\xi\}_i = [U_i V_i W_i]^T$  : 광역좌표계에서의 조인트 변위벡터

임의의 두 조인트  $i$ 와  $j$ 사이에 위치한 멤버의 길이를  $v_k$ 라고 하면,  $v_k$ 는 다음과 같이 각 조인트의 위치벡터와 멤버의 방향코사인으로 나타낼 수 있다. 아래 식에서  $\cos \theta_1^k, \cos \theta_2^k, \cos \theta_3^k$ 는  $k$ 번째 멤버에 대한 광역좌표계에서의 방향코사인을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 v_k &= u_j - u_i & (1) \\
 &= (U_j - U_i) \cos \theta_1^k + (V_j - V_i) \cos \theta_2^k \\
 &\quad + (W_j - W_i) \cos \theta_3^k \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1^k & \cos \theta_2^k & \cos \theta_3^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ V_i \\ W_i \\ U_j \\ V_j \\ W_j \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

위의 관계식을 모든 멤버에 적용하여 이를 행렬 형태로 나타내면 아래와 같은 전체 구조물의 적합방정식(geometric compatibility equation)을 얻을 수 있다.

$$v = B^T \xi \tag{2}$$

$v$  :  $\{m \times 1\}$  부재길이 변화벡터

$\xi$  :  $\{n \times 1\}$  조인트변위벡터

$B^T$  :  $\{m \times n\}$  방향코사인 행렬

(각 부재의 방향에 의해 결정된다.)

트러스가  $N$ 개의 조인트와  $L$ 개의 멤버로 구성되

어 있다고 할 때, 각 멤버의 길이는 조인트의 위치 벡터에 대한 구속요건(constraint)으로 작용하므로 구조물의 형상변형에 입력으로 사용될 수 있는 변수로 정의되는 형상변수(configuration variable)의 갯수는 멤버의 수와 같은  $L$ 개이다. 왜냐하면 부재의 길이변화로서 형상을 변화시킨다면 형상 변수의 수는 부재의 수가 되기 때문이다. 여기에 전체 구조물의 공간상의 위치와 회전에 관한 6개의 구속요건을 포함하면 형상변수의 총 갯수는  $L+6$ 개가 된다. 각 조인트마다 세 개의 독립변수를 가지므로 전체 구조물의 독립변수의 갯수는  $3N$ 개이고, 정정구조(statically determinate structure)인 경우 다음의 조건을 충족시킨다.

$$3N=L+6 \tag{3}$$

정정구조인 경우 (no. of truss member=no. of unconstrained joint degree of freedom)  $B^T$ 는 비특이정방행렬(nonsingular square matrix,  $m=n$ )이며, 역행렬  $[B^T]^{-1}=J$ 가 존재한다.

$$\xi=Jv \quad (J: \text{Jacobion 행렬}) \tag{4}$$

실제 구조물을 움직이는데 있어서는 한정된 갯수의 멤버 길이변화를 통해 한정된 갯수의 응답(예를 들면 구조물 끝단부분의 위치벡터)을 얻고자 하는 것이므로, 식 (4)는 다음과 같이 부분화시킬 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \xi_p \\ \xi_o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{pq} & J_{po} \\ J_{oq} & J_{oo} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v' \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{5}$$

- $\xi_p$ : 목적지가 주어진  $p$ -자유도의 좌표변수
- $\xi_o$ : 나머지의 주어지지 않은 좌표변수
- $v'$ : 역기구학으로 결정되어야 할  $q$ 개의 작동기 길이변화

$$\xi_p=J_{pq}v' \tag{6}$$

6개의 가변길이멤버로 6자유도의 형상을 제어할 경우( $p=q=6$ ),  $J_{pq}$ 는  $6 \times 6$ 의 비특이정방행렬(nonsingular square matrix)이므로 역행렬  $J_{pq}^{-1}$ 가 존재한다.

$$v'=J_{pq}^{-1}\xi_p \tag{7}$$

식 (7)로부터 얻은 멤버길이변화  $v'$ 를 식 (4), (5)에 다시 대입함으로써 모든 조인트의 위치벡터, 즉 전체 구조물의 형상을 구할 수 있다.

## 2.2 여유자유도를 가진 VGTS의 역기구학

VGTS는 일반적으로 여러개의 모듈들로 이루어지므로 많은 가변길이멤버를 포함하게 되고 이로부터 높은 여유자유도의 형태변화가 가능하게 된다. 이러한 다자유도의 형상제어를 위해서는 여분의 자유도를 효과적으로 이용할 수 있는 방법이 필요하다.

가변길이멤버의 수가 제어하고자 하는 형상의 자유도보다 큰 경우, 식 (5)은  $p>q$ 로 유일해가 존재하지 않는다. 그러나 여분의 자유도를 임의의 최적요건을 만족시키는데 사용함으로써 적절한 해를 얻을 수 있다. 일반적으로 다자유도 매니퓰레이터의 해석에 많이 사용되고 있는 의사역행렬법, 운동분해법, 확정된 Jacobian법 등은 이렇게 임의의 최적요건을 도입한 역기구해이다.<sup>(15)</sup> 그 밖에 보조형상곡선(reference shape curve)이나,<sup>(7,8)</sup> 유연성제어법(compliance control technique) 등의 개념을 도입한<sup>(12)</sup> 여유자유도의 VGTS 해석방법도 있다.

여기서는 다자유도 매니퓰레이터의 해석에 많이 사용되고 있는 의사역행렬법이 도입하였다. 의사역행렬법에서는 아래와 같은 최적요건을 도입함으로써 새로운 구속조건을 부가시킨다.

$$\text{Minimize } C = \frac{1}{2} v^T A v \tag{8}$$

$A$ : 대칭 양정정 가중행렬

여기서,  $C$ 는 각 멤버길이 변화량의 제곱값들을 적절한 가중치를 두고 합한 값이므로 이를 최소화 시킴으로써 특정멤버의 길이가 지나치게 커지는 것을 방지하고, 각 멤버들 간의 길이편차를 최소화할 수 있다. 직렬링크 형태의 매니퓰레이터인 경우 이러한 최적요건은 특이조건(singular condition)을 억제하는 역할을 한다.

식 (6)과 식 (8)에 Lagrange multiplier를 도입하여 다음과 같이 Lagrange function  $L(v)$ 를 정의한다.

$$L(v) = \frac{1}{2} v^T A v + \lambda^T (\xi - Jv) \tag{9}$$

$\lambda$ :  $p$ -차원 Lagrange multiplier 벡터

$L(v)$  값이 정점(stationary point)에 있을 때

$$\left( \frac{\partial L}{\partial v} \right)^T = A v - J^T \lambda - O_v \tag{10}$$

$$\left( \frac{\partial L}{\partial \lambda} \right)^T = \xi - Jv - O_p \tag{11}$$

$O_p, O_v$ :  $p$ -,  $q$ -차원 영벡터

식 (10), (11)은 국부 최적화(local optimality)의 필요조건으로  $J$ 가 full rank를 가질 때 아래와 같은  $v$ 의 최적해를 갖는다.

$$v = J_A^+ \xi \tag{12}$$

$A$  행렬 가중된 pseudoinverse 행렬

$$J_A^+ = A^{-1} J^T (J A^{-1} J^T)^{-1}$$

$A$ 를 단위행렬로 하면  $J_A^+$ 는  $J$ 의 Pseudo-inverse matrix, 즉  $J^+$ 이다.  $J^+ = J^T (J J^T)^{-1}$  그리고 행렬  $J^+$ 는 식 (6)의 가능한 모든 해 중에서  $\|v\|(\|\cdot\|: \text{Euclidean norm})$ 를 최소화시키는 해임을 알 수 있다.

### 3. 가변길이부재의 배열

VGTS는 많은 수의 멤버들로 구성되지만 실제 가변길이부재(length-variable member)로 사용되는 것의 갯수는 한정적이므로 많은 부재들 중 어떤 것들을 가변길이화 시킬 것인가에 대한 문제가 생긴다. 실제로 같은 갯수의 가변길이부재로 같은 구조물의 형상을 제어하는데 있어서도 그 부재의 배열방법에 따라 에너지 소모량, 변형시간, 전체 구조물의 강성변화, 형태의 복잡성 등 다양한 차이가 있을 수 있다.

팔면체 형태 VGTS의 경우 Fig. 4와 같이 대략 세가지 형태의 배열방법을 생각할 수 있다. 여기서 (a) 배열방법은 기존의 연구자들이 대상으로 삼았던 VG truss<sup>(2)</sup>이고 (b)는 Stewart Plat Form을 기본단위로 삼은 배열이다. (c)의 경우 (a), (b)에

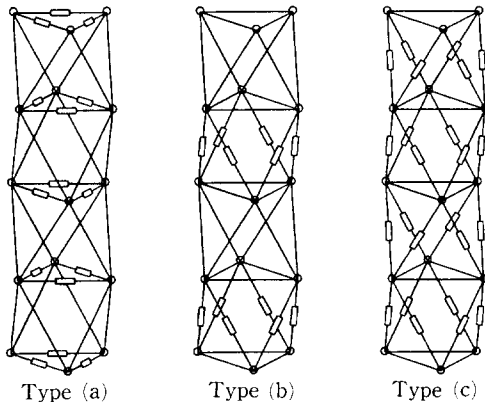


Fig. 4 Layouts of variable-length members in octahedral VGTS

비해 작동기가 두배로 필요하는 단점이 있으므로 우선 제외 시킨다.

(a)와 (b)의 가장 큰 차이는 (a)의 경우는 길이 방향으로의 축소 능력이 뛰어나서 가변길이부재가 비가변길이부재의  $\sqrt{3}$ 배만큼 늘어날 수 있다면 (완벽한 3차원 핀조인트를 가정하는 경우) 부재의 완벽한 접힘이 가능하다는 것이고, (b)의 경우는 접힘이 제한된다는 것이다. 그러나 (a)의 경우 비틀림변형에 대해 특이점이 존재하므로 (b)형태의 도입으로 이러한 특이점을 없앨 수 있는지를 확인하고자 한다. 이에 (b)형태를 (a)와 혼합으로 사용 또는 단독으로 사용시 전체 트러스의 기구학적 성능에 어떠한 영향을 미치는지를 세가지의 성능지수(performance index)를 설정하고 각 형상변화에 따른 성능지수값의 비교를 통해 알아보았다. (여기서,  $L_{ini,i}$ 와  $L_{fin,i}$ 는 각각  $i$ 번째 가변길이부재의 처음길이와 변화후의 길이를 나타낸다.)

- (i) 모든 가변길이멤버들의 길이변화량을 합한 값 (시스템이 준정적운동을 할 때 소비에너지는 작동기의 길이변화에 비례하므로 동적하중을 무시하는 준정적운동이라면 이 값은 운동에 필요한 총 소비에너지에 비례한다.)

$$f_1 = \sum_{i=1}^n |L_{fin,i} - L_{ini,i}|$$

- (ii) 가변길이멤버들의 길이변화량중 최대값 (역시 준정적운동이고 모든 가변길이멤버가 같은 속도로 구동된다고 볼 때 가장 길이변화를 많이하는 작동기가 가장 마지막으로 작동을 마치는 작동기이므로 이 값으로 동작에 소모되는 시간을 알 수 있다.)

$$f_2 = \max_{i=1}^n |L_{fin,i} - L_{ini,i}|$$

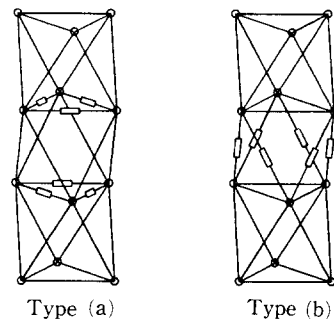


Fig. 5 Two models for performance comparison

(iii) 멤버길이 변화량들의 Euclidean norm  
(멤버길이변화를 탄성변형으로 가정할 때 이 값은 탄성에너지의 제공근값에 비례한다.)

$$f_3 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (L_{fin,i} - L_{ini,i})^2}$$

Fig. 5와 같이 두 가지 서로 다른 배열방식의

**Table 1** Performance index values of the models

(a)  $f_1 = \sum_{i=1}^n |L_{fin,i} - L_{ini,i}|$

Motion	Type (a)	Type (b)
Dx=10	29.87	19.99
Dy=10	34.56	23.15
Dz=10	73.09	48.97
Rx=5	36.96	24.71
Ry=5	31.85	28.41
Rz=5	—	15.09

(b)  $f_2 = \max_{i=1}^n |L_{fin,i} - L_{ini,i}|$

Motion	Type (a)	Type (b)
Dx=10	7.48	5.00
Dy=10	11.43	5.79
Dz=10	16.43	8.16
Rx=5	15.39	6.18
Ry=5	10.62	7.10
Rz=5	—	2.52

(c)  $f_3 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (L_{fin,i} - L_{ini,i})^2}$

Motion	Type (a)	Type (b)
Dx=10	14.93	9.99
Dy=10	16.46	10.03
Dz=10	31.58	19.99
Rx=5	18.47	12.36
Ry=5	16.78	12.30
Rz=5	—	6.16

(Units : mm, degree)

\*Initial member length=100 mm

VGTS를 대상으로 여러가지 형상변형시 각 성능지수의 크기를 비교하여 보았다. 각 대상 모델은 6개의 가변길이멤버를 포함하며 멤버의 초기상태 길이는 100 이고 1.5배까지 팽창가능함을 가정했다. 계산 결과는 앞 절에서 고찰한 이론에 기초하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻었으며 Table 1과 같다. 표에서  $D_x$ 는  $x$ 축방향 변형길이(translation)를,  $R_x$ 는  $x$ 축 중심의 회전량(rotation)을 나타내며(단위 : degree), 각 동작의 기준이 되는 곳은 구조물 맨 윗 부분의 삼각평면이다.

결과를 보면 우선 (a) 형태의 구조는  $z$ 축방향 회전에 대하여 특이성(singularity)을 가지기 때문에 이러한 형태변환이 불가능한 단점이 있다. 그러나 그 밖의 다른 모든 경우의 동작에 대하여 (b) 형태의 VGTS가 더 작은 성능지수값을 가지므로 (b) 형태의 구조가 에너지나 시간 등 모든 면에 있어서 더 효율적이라고 할 수 있다.

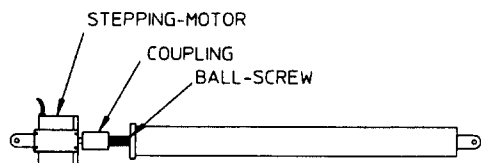
그 밖에 두가지 배열구조의 작업공간을 위의 모델을 사용해서 비교하면 굽힘각도와 압축길이의 경우 (a)배열이 각각 2.2배, 3.8배로 우수하지만 회전의 경우 특이성을 가진다.

#### 4. VGTS 모델의 제작 및 수치모사

##### 4.1 VGTS 모델의 제작

팔면체 형태의 트러스모델 세 개에 여섯 개의 가변길이멤버를 Fig. 5 (b)의 형태로 배열하여 6자유도의 형상변화를 구현할 수 있도록 VGTS 실험모델을 제작하였다.

가변길이멤버는 Fig. 6과 같이 스텝모터(steping motor)에 볼나사(ball-screw)를 직렬연결하여 모터의 회전운동을 직선운동으로 변환시킴으로써 길이를 변화시킬 수 있도록 설계하였다. 스텝모터는 개회로(open loop)방식의 제어로도 정확한 위치제어가 가능하므로 시스템이 복잡해 지는 것을 피할 수 있다. 사용된 모터의 최대정지토크는 2.9 kg·cm, 스텝각도(step angle)은 1.8°이며, 볼나사

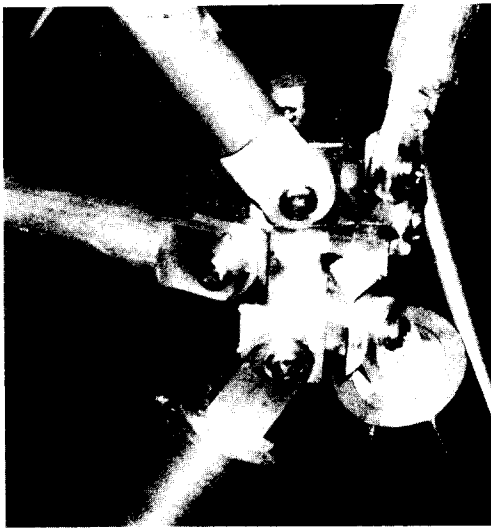


**Fig. 6** Length-variable member

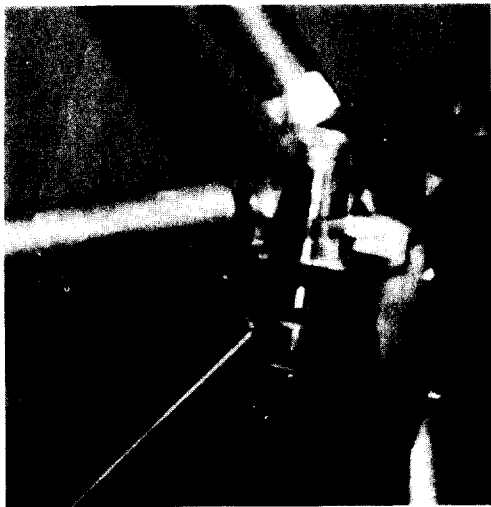
는 유효직경 10 mm, 리드(lead) 2 mm의 소형 전조 볼나사를 사용 하였다. 가변길이멤버는 500~750 mm 범위내에서 그 길이를 변화시킬 수 있도록 하였고, 그 외의 다른 모든 고정멤버들의 길이는 500 mm로 하였다. 조인트는 각 멤버의 길이가 변화하더라도 조인트에서의 압힘 응력이 발생하지 않도록 충분한 자유도를 가져야 하므로 이상적인 형태의 조인트는 각 멤버의 축이 한 점에서 만나는 구형조인트(spherical joint)이다. 그러나 실제로 여섯 개의 자유축을 갖는 구형조인트를 설

계하기는 거의 불가능하므로 가능한 조인트간극(gap displacement)을 최소화하여 Fig.7과 같은 형태로 설계하였다.

전체 구조는 Fig.8과 같이 크게 VGTS, 모터구동기(motor driver), PC와 신호처리장치를 포함한 중앙처리장치로 나뉘어져 있다. 앞서 수행한 기구학적 해석을 바탕으로 VGTS가 원하는 형상으로 변화하는 데 필요한 각 멤버의 길이변화량을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 계산하였다. 사용된 가변길이멤버가 여섯 개이고 6자유도의 형태를 제어하고자 하므로 Jacobian 배열로부터 직접 역기구해를 구할 수 있다. 가변길이멤버의 길이변화량은 모터에 공급되는 펄스신호의 갯수에 의해 정해지며 PCL-718 LabCard를 신호처리장치로 사용하여 필요한 양의 펄스를 공급하였다. 모터의 한 스텝 각도가 1.8이고 모터에 연결된 볼나사의 리드가 2 mm이므로 제어할 수 있는 멤버길이의 분해성능(resolution)은  $2 \text{ mm} \times 1.8/360 = 0.01 \text{ mm}$ 이다.



(a)



(b)

Fig. 7 Joint design

#### 4.2 실험모델의 검증

제작된 VGTS의 실효성을 검증하기 위하여 여러 가지 형상으로 변형시켜 보았다. 실험결과 기본단위의 모델을 통하여 Fig.9와 같은 원할한 6자유도의 형상변형이 가능함을 분 수 있었다. 여기서 형상변형의 기준은 맨 윗 단 삼각평면의 중심점으로 하였다. 구조물의 변형을 정량적으로 측정하기 위하여 아래와 같은 방법을 사용하였다.

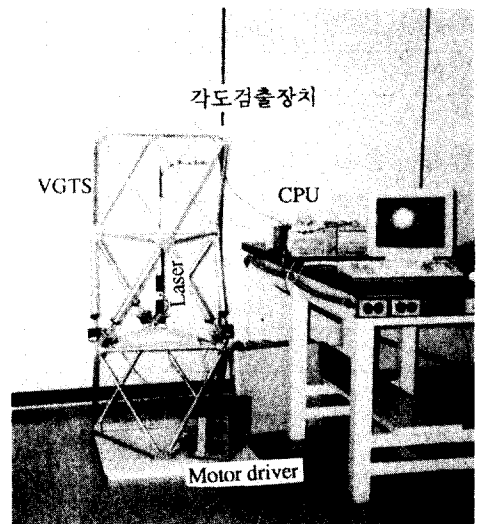


Fig. 8 Functional model VGTS

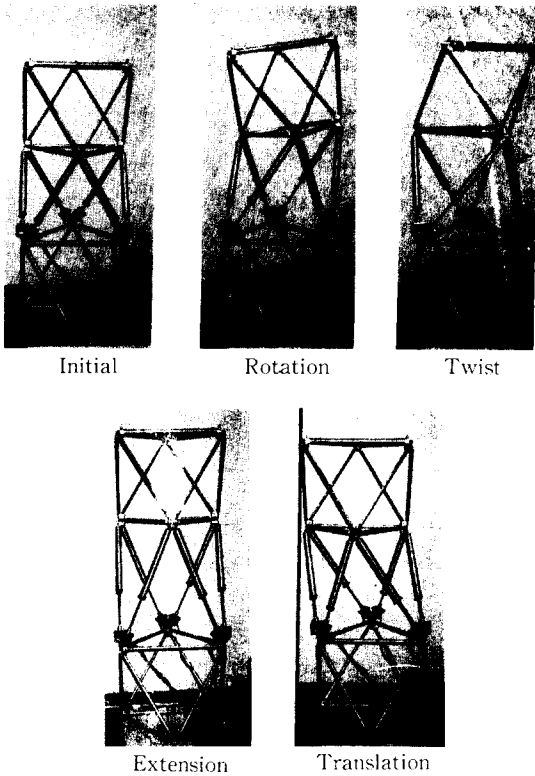


Fig. 9 Basic motions of the functional model VGTS  
Initial Rotation Twist  
Extension Translation

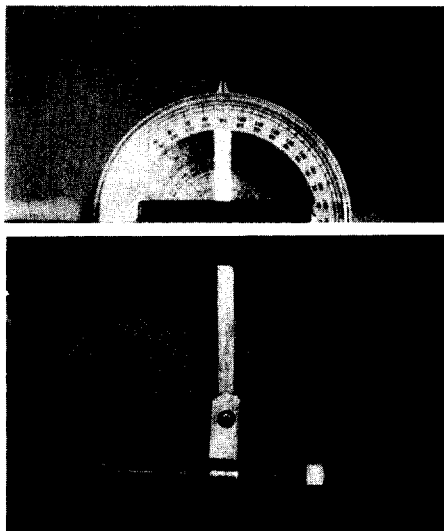


Fig. 10 Angle-measurement device

첫째,  $x$ 방향 및  $y$ 방향으로의 위치변형 : 구조물 상단의 중심위치로부터 레이저를 수직으로 내려 설치하고 하단에 투영된 레이저의 궤적을 관측함으로써

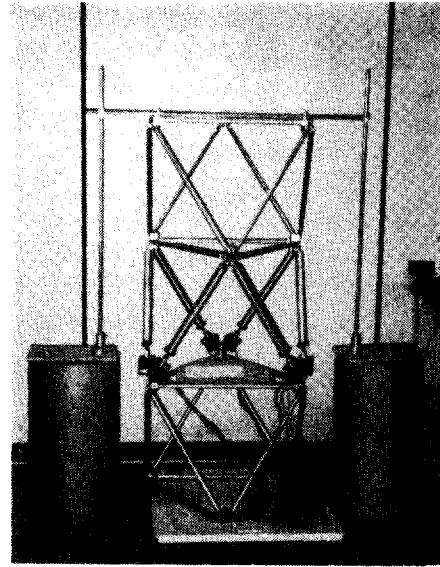


Fig. 11 Measurement of translation and rotation about z-axis

서  $x$ ,  $y$ 방향으로의 변형정도를 측정하였다. (Fig. 8 참조)

둘째,  $x$ 축 및  $y$ 축 방향 회전각도 : Fig. 10과 같은 각도검출장치를 설계하여 이것을  $x$ ,  $y$ 축에 각각 수직하게 구조물 상단에 고정하고 구조물이 추의 방향과 이루는 각도를 측정하였다.

셋째,  $z$ 축 방향의 변형 : Fig. 11과 같이 구조물 상단에 상하로 자유로이 움직일 수 있는 슬라이드바 (slide bar)를 설치하여 막대의 수직높이변화로부터  $z$ 축 방향의 위치변형을 측정 하였고 구조물과 막대가 이루는 각도로부터 회전량을 측정 하였다.

#### 4.3 실험결과 및 고찰

제작된 VGTS 모델을 여러가지로 형상변형시킨 후 앞서 설명한 방법으로 이를 측정하여 모델의 정확도 및 응용가능성을 살펴 보았다. 우선 각 방향에 대한 단순변형을 수행하고 측정된 결과를 Table 2(a), (b)에 정리하였다. 각 방향으로 10 mm, 30 mm, 50 mm 변형시켰을 때와 각 방향 축을 중심으로 3°, 6°, 10° 변형시킨 결과를 측정하였다. 그리고 Table 2(c)에는 몇 가지 복합변형에 대한 결과를 정리하였다.

측정결과에서 볼 수 있는 변형오차의 요인으로는 여러 가지가 될 수 있겠지만 우선 가장 큰 요인은



**Table 2** Planned and actual motions of the functional model VGTS

(a) Translation (unit : mm)							(b) Rotation (unit : degree)						
Planned motion	Actual motion						Planned motion	Actual motion					
	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz		Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Dx=10	10	-0.5	0	0	0	0	Rx= 3	0.3	-1	0	3	0	0
30	29.5	0.8	0	0	0	0	6	0.5	-3.3	0	6	0	0
50	48.5	1	0	0	0	0	10	0.8	-6.8	0	10	0	0
Dy=10	0.3	9.8	0	0	0	0	Ry= 3	0.3	0	0	0	3	0
30	-0.5	29.5	0	0	0	0	6	0.5	-1.8	0	0	6	0
50	-1.5	49.5	0	0	0	0	10	-3.5	-2.5	0	0	10	0
Dz=10	0	0	10	0	0	0	Rz= 3	0	0	0	0	0	3
30	0	0	30	0	0	0	6	0	0	0	0	0	6
50	0	0	50	0	0	0	10	0	0	0	0	0	10

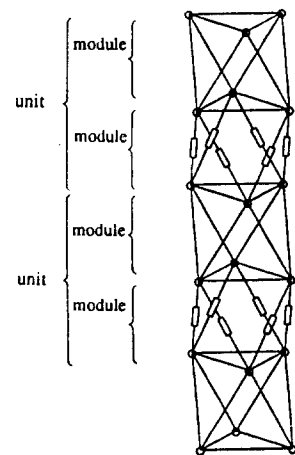
(c) Complex motions (unit : mm, degree)						
Planned motion	Actual motion					
	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Dx=30, Dy=30	29.5	29	0	0	0	0
Dx=30, Dz=30	29.5	1	30.5	0	0	0
Dx=30, Rx=7	33	-4	0	7	0	0
Dx=30, Rz=7	30	-2	0	0	0	7
Dx=30, Dy=30, Rz=7	29.5	26.5	0	0	0	7
Dx=30, Ry=7, Dz=30	31	2	0	0	7	30

조인트에서 비롯된 것으로 추측된다. 앞서 언급한 바와 같이 이상적인 형태의 조인트는 구형조인트이나 실제 사용된 조인트에는 어느정도 간극이 존재하므로 구조물의 해석에 포함되지 않은 이러한 변수가 오차를 유발시킨 것으로 보인다. 그 밖에 구조물 제작시에 발생하는 가공상의 오차들과 변형측정시에 발생하는 측정오차 등도 이러한 오차의 원인으로 보여진다.

실험결과 전체적으로 높은 정밀도는 아니었지만 기본적으로 요구되는 임의의 구조 변형이 가능하여 충분한 응용가능성을 볼 수 있었다.

**4.4** 여유자유도를 가진 VGTS의 형상제어 시뮬레이션

VGTS의 응용분야는 그 특성상 규모가 크고 복



**Fig. 12** Redundant VGTS model for numerical simulation

잡한 구조를 필요로 하므로 대부분 많은 수의 가변 길이멤버를 포함하게 된다. 가변길이멤버의 수가 많아지면 여유자유도가 크게 증가하여 역기구해를 얻기 위해서는 앞서 서술한 바와 같이 여분의 자유도를 해소시키는 과정을 거쳐야 한다.

여기서는 앞서 고찰한 의사역행렬법을 도입하여 다자유도 VGTS의 형상을 제어하고 이를 시뮬레이

션해 보았다. Pseudo-inverse 방법은 앞서 설명한 바와 같이 식 (8) 식과 같은 최적요건을 도입하여 멤버들의 길이 변화량을 구하는 방법이다. 여기서는 각 멤버들에 균일한 가중치를 할당하기 위하여 행렬 A를 단위행렬로 하였다. 따라서 주어진 문제는 다음과 같이 수식화될 수 있다.

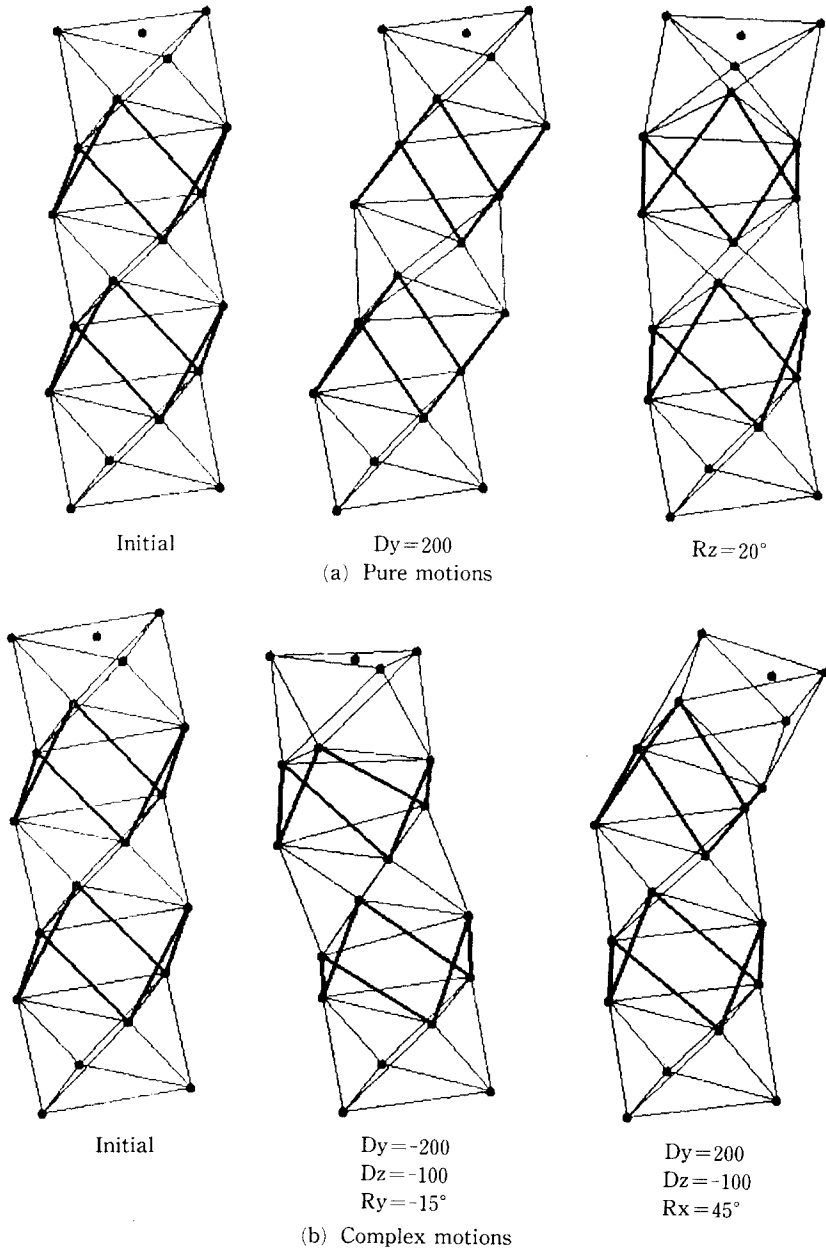


Fig. 13 Configuration changes of the redundant VGTS model

Find  $v$   
to minimize

$$C(v) = \frac{1}{2} v^T v \quad (\text{or } \|v\|)$$

subject to  $\xi = Jv$

여기서,

$J$  : 자코비안행렬  $\{p \times q\}$   $p > q$

$v$  :  $\{p \times 1\}$  부재의 길이변화

$\xi$  :  $\{q \times 1\}$  케적에 연관된 조인트의 변위

그리고 조건을 만족시키는 해는 다음과 같이 Jacobian matrix의 Pseudo-inverse matrix로부터 얻어진다.

$$v = J^+ \xi$$

$$J^+ : \text{Pseudo-inverse of } J, \quad J^+ = J^T (JJ^T)^{-1}$$

시뮬레이션 대상 모델은 다섯 개의 모듈로 구성된 팔면체 형상의 VGTS로 12개의 가변길이멤버를 Fig. 12와 같이 배열하였다. 형상변형의 기준은 앞에서와 같이 구조물 맨 윗단 평면의 중심점으로 설정하였고, 각 멤버의 초기길이는 500으로 하였다.

시뮬레이션 결과 얻은 형상변형의 예를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13(a)에는 몇 가지 단순변형 모습을, Fig. 13(b)에는 복합변형형상을 나타내었으며 의도했던 바와 같이 각 멤버들 간의 길이편차가 작게 나타남을 볼 수 있었다.

## 5. 결 론

가변형상 트러스구조물(VGTS: Variable Geometry Truss Structure)의 형상제어에 대한 이론 및 실험적 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, Jacobian matrix의 개념을 도입하여 가변형상 트러스구조물의 기본적인 기구학적 해석방법에 대하여 고찰하고, 다자유도의 VGTS를 포함한 일반적인 가변형상 트러스구조물의 역기구 해석을 수행하였다.

둘째, VGTS의 형상변형에 소요되는 에너지와 시간등을 나타내는 몇 가지 성능지수를 정의하고 이를 기초로하여 두 가지 배열방법의 효율성을 비교하였다. 비록 축방향 접힌성에서는 Stewart Platform 배열이 성능이 떨어지지만 특이점이 없고 작동시간과 소비에너지 측면에서 우수한 면이 있다.

셋째, 6개의 가변길이멤버를 배열하여 이로부터 6자유도의 동작을 구현할 수 있도록 기본형태의 VGTS를 설계 제작하고 이를 검증함으로써 응용가능성을 확인하였다.

넷째, 다자유도 VGTS의 형상제어를 위해 의사역행렬법을 도입하고 이로부터 각 멤버들의 길이편차를 최소화하는 역기구해를 찾았다. 아울러 12개의 가변길이멤버를 가지는 VGTS 모델의 해석에 이를 적용하고 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다.

## 후 기

이 논문은 1995년도 교육부지원 기계공학분야 학술연구 조성비에 의하여 연구되었다.

## 참고문헌

- (1) Hughes, P. C., 1990, "Trussarm-A Variable Geometry-Truss Manipulator," *The 1st U. S./Japan Conf. on Adaptive Structures*, pp. 715~725
- (2) Miura, K. and Furuya, F., 1988, "Adaptive Structure Concept for Future Space Application," *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 8, pp. 995~1002.
- (3) Miura, K., 1992, "Adaptive Structures Research at ISAC 1984~1990," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 3, pp. 54~74
- (4) Chen, G.-S. and Wada, B. K., 1990, "On an Adaptive Truss Manipulator Space Crane Concept," *The 1st U. S./Japan Conf. on Adaptive Structures*, pp. 726~742.
- (5) Utku, S., Ramesh, A. V., Das, S. K., Wada, B. K. and Chen, G. S., 1991, "Control of a Slow-Moving Space Crane as an Adaptive Structure," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 6, pp. 961~967.
- (6) Das, S., Utku, K. S. and Wada, B. K., 1990, "Inverse Dynamics of Adaptive Structures Research Used as Space Cranes," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 1, pp. 50~75.
- (7) Naccarato, F. and Hughes, P., "Inverse

- Kinematics of Variable-Geometry Truss Manipulators," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 8, No. 2, 1991, pp. 249~266.
- (8) Naccarato, F. and Hughes, P., 1991. "Redundancy Resolution in Variable-Geometry Truss Manipulators Using Reference Shape Curves," *The 2nd U. S./Japan Conf. on Adaptive Structures*, No. 4 1.
- (9) Das, S. K., Utuku, S., Chen, G.-S. and Wada, B. K., 1990, "A Mathematical Basis for the Design and Design Optimization of Adaptive Trusses in Precision Control," *The 1st U. S./Japan Conf. on Adaptive Structures*, pp. 660~688.
- (10) Murotsu, Y., Senda, K. and Hisaji, K. 1990, "Optimal Configuration Control of an Intelligent Truss Structure," *The 1st U. S./Japan Conf. on Adaptive Structures*, pp. 157~175.
- (11) Murotsu, Y. and Shao, S., 1990, "Some Approaches to the Optimal Adaptive Geometries of Intelligent Truss Structures," *The 1st U. S./Japan Conf. on Adaptive Structures*, pp. 743~771.
- (12) Yokoi, K., Komoriya, K. and Tanie, K., 1991, "A Method for Solving Inverse Kinematics of Variable Structure Truss Arm with High Redundancy," *The 2nd U. S./Japan Conf. on Adaptive Structures*, No. 6-5,
- (13) Chen, G.-S., Bruno, R. J. and Salama, M., "Optimal Placement of Active/Passive Members in Truss Structures Using Simulated Annealing," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 8, 1991, pp. 1327~1334.
- (14) Hafka, R. and Adelman, H., 1985, "Damping and Control of Space Craft Structures : Selection of Actuator Location for Static Shape Control of Large Space Structures by Heuristic Integer Programming," *Computers and Structures*, Vol. 20, No. 1-3, pp. 575~582.
- (15) Robotics Lab. POSTECH/RIST, 1992, *Redundant Manipulators Kinematic and Dynamic Control*,
- (16) Tzou H. S. and Anderson, G. L., 1992. *Intelligent Structural Systems*, Kluwer Academic Publishers.