

이 논문은 1987년도 문교부 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

비선형 효과 및 작업 공간을 고려한 로봇트 팔의 설계

이 상조*, 윤 영식**

Robot Arm Design with Nonlinearity and Workspace Consideration

Sang Jo Lee*, Young Sik Yoon**

ABSTRACT

Using the design parameters of multi-joint manipulator, workspace of the manipulator were evaluated analytically, and the relation between such design parameters and nonlinearity of the manipulator were presented dynamically.

The ratio of the volumes of a manipulator's workspace to the cube of its total link length presents a kinematic performance index [NVI] for the manipulator. It is possible to geometrically represent the manipulator dynamics with the generalized inertia ellipsoid (GIE). The relation between the GIE configuration and the characteristics of manipulator dynamics was analysed in terms of inertia and nonlinear forces (Coliolis and centrifugal forces). The nonlinearity caused by the change of the GIE configuration were affected by the difference between the major and minor axes length of the GIE.

The results of this investigation are applied to the optimal design of the manipulator.

* : 연세대학교 기계공학과 조교수

** : 연세대학교 기계공학과 대학원

NOMENCLATURE

<p>$[A]_i$: a homogeneous transformation which represents the geometrical relationship between the coordinate frames i and $i+1$</p> <p>a_i : the common normal between the axes Z_i and Z_{i+1}</p> <p>b_i : the axial offset distance of the joint $i+1$ on the i</p> <p>\underline{C} : orthonormal matrix which stands for the rotation of GIE</p> <p>\underline{D}_A : diagonal matrix whose elements are eigenvalues of \underline{G}_A</p> <p>\underline{F}_N : nonlinear force</p> <p>\underline{G} : generalized inertia tensor</p> <p>\underline{H} : inertia tensor</p> <p>\underline{I} : inertia tensor of the i-th link</p> <p>\underline{J} : Jacobian matrix</p> <p>L : total link length</p> <p>l_i : length of the i-th link</p> <p>l_{ci} : distance between the joint and the mass center</p> <p>m_i : mass of the i-th link</p> <p>NVI : normalized volume index</p>	<p>P_i : i-th principal axis</p> <p>\underline{Q} : generalized force including potential force</p> <p>q : generalized coordinate</p> <p>T : kinetic energy</p> <p>$u_{i,k}$: coefficient with respect to (w. r. t) $l_i l_i l_k$</p> <p>\underline{V}_{ci} : velocity vector of the centroid of the i-th link</p> <p>VI : volume index</p> <p>X_i, Y_i, Z_i : the coordinate axes of the frame i</p> <p>(x_n, y_n, z_n) : the coordinate of a point in workspace $W_n(H)$</p> <p>$W_i(H)$: workspace w. r. t the joint i</p> <p>α_i : the twist angle between the axes Z_i and Z_{i+1}</p> <p>β_i : the location angle of the link $i+1$ w. r. t the link i</p> <p>θ : joint coordinate</p> <p>λ : eigenvalue of matrix \underline{G}</p> <p>θ_i : rotational range of the joint i</p> <p>$\underline{\omega}_i$: angular velocity vector of the centroid of the i-th link</p>
--	---

1. 서 론

로봇 팔의 기구학 및 동력학적 제원 — 각 링크의 길이, 두 축 사이의 뒤틀림각, 축 방향의 오프셋(offset), 각 조인트(joint)의 형태(회전 조인트, 직진 조인트), 각 링크의 무게, 무게 중심의 위치, 관성 모멘트 등은 그 로봇의 제어 기법, 비선형도와 작업영역을 결정짓는 중요한 요소이다.

로봇은 점차 고속, 경량화 되는 추세에 있으며, 특히 전자제품의 조립이나, 정밀 가공과 같은 작업을 수행하는 로봇에서 링크 상호간에 작용하는 코리올리(Coriolis) 효과 및 원심력 등과 같은 비선형 특성은 로봇의 작업 능력을

결정한다.

로봇이 고속, 정밀 작업중에는 팔의 진동, 동적 불안정, 온-라인 제어(on-line control) 등의 문제가 발생하므로 정확한 기구학적, 동력학적 해석을 통하여 동적 안정성의 향상을 필요로 하게 된다.

1975년, Roth [1]가 로봇의 기하학적 형상과 작업 영역과의 관계를 처음으로 연구하였고, Kumar와 Waldron [2, 3]은 로봇의 작업영역의 경계면을 찾는 이론과 알고리즘을 개발하였다.

최근에는 Yang과 Lee [4, 5]가 작업 영역을 이론적으로 정의하고, 작업 영역의 크기를 정량적으로 구하는 연속식을 유도하였다.

또한, 로봇의 동력학적 해석은 Hollerbach [6]가 Lagrangian 방법으로, Luh [7] 등이 Newton-Euler 방법을 이용하여 알고리즘을 개발하였고, 링크 상호간의 작용이나 비선형 특성은 Asada [8]에 의하여 기하학적으로 연구된 바 있다.

본 연구에서는 다관절 로봇의 작업 영역과 비선형도를 비교함으로써, 실제 로봇의 설계에 응용하고자 함을 목적으로 한다.

2. 이론해석

2.1 로봇 팔의 작업공간

n 개의 회전 조인트를 갖는 로봇에서 팔끝의 위치를 정의하기 위하여 n 개의 좌표(coordinate)가 필요한데, 좌표축을 Fig. 1과 같이 Z 축은 조인트의 회전축 방향, X 축은 링크의 길이(common normal) 방향으로 한다. 링크 i 는 조인트 i 에 연결되어 있으며, Z_i 축은 고정된 기준 좌표계에 붙어있고, 맨 마지막 링크는 로봇의 손이나, 엔드 이펙터(end effector)에 해당한다.

두 관절 사이의 기하학적 관계를 설명하기 위한 인자(parameter)는 다음과 같이 정의한다.

- a_i , 두 축 Z_i 와 Z_{i+1} 사이의 거리;
- α_i , 두 축 사이의 뒤틀림 각(twist angle);
- b_i , 조인트 i 에 대한 조인트 $i+1$ 의 오프셋(axial offset);
- β_i , 링크 i 에 대한 링크 $i+1$ 의 상대 회전각.

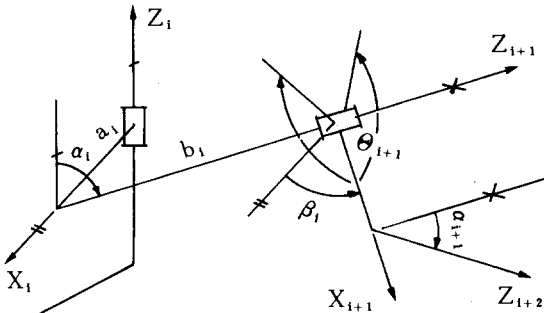


Fig. 1 Geometrical relationship between limited revolute joint.

로봇의 작업영역은 맨 마지막 팔 끝단의 중앙이 도달할 수 있는 구역으로 정의한다. 작업 영역 $W_i(H)$ 는 H 점이 닿을 수 있는 영역을 나타내며, 이는 i 축을 고정시키고, 조인트 $i, i+1, \dots, n$ 을 회전시켜서 얻을 수 있다.

팔 끝단의 중앙점 $H(x_n, y_n, z_n)$ 는 조인트 n 을 θ_n 만큼 회전한 지점이므로,

$$\begin{aligned} x_n &= r_n \cos \theta_n \\ y_n &= r_n \sin \theta_n \\ z_n &= b_n \cos \alpha_n \end{aligned} \quad (1)$$

$$r_n = \sqrt{a_n^2 + (b_n \sin \alpha_n)^2} \quad (2)$$

이고, n 좌표계에서 $n-1$ 좌표계로의 제차 변환(homogeneous transformation) $[A]_n$ 은 다음과 같다.

$$[A]_n = \begin{bmatrix} \cos \beta_{n-1} & -\sin \beta_{n-1} & & & & \\ \cos \alpha_{n-1} \sin \beta_{n-1} & \cos \alpha_{n-1} \cos \beta_{n-1} & & & & \\ -\sin \alpha_{n-1} \sin \beta_{n-1} & -\sin \alpha_{n-1} \cos \beta_{n-1} & & & & \\ 0 & 0 & & & & \\ 0 & a_{n-1} & & & & \\ \sin \alpha_{n-1} & b_{n-1} \sin \alpha_{n-1} & & & & \\ \cos \alpha_{n-1} & b_{n-1} \cos \alpha_{n-1} & & & & \\ 0 & 1 & & & & \end{bmatrix} \quad (3)$$

그런데, $W_{i-1}(H)$ 는 식 (1), (2)로 표시되는 원을 Z_{i-1} 축에 대하여 회전시킨 결과이므로,

$$\begin{aligned} x_{n-1} &= r_{n-1} \cos \theta_{n-1} \\ y_{n-1} &= r_{n-1} \sin \theta_{n-1} \\ z_{n-1} &= z_{n-1}^* \end{aligned} \quad (4)$$

$$r_{n-1} = \sqrt{x_{n-1}^{*2} + y_{n-1}^{*2}} \quad (5)$$

이 된다. 식 (1), (3), (4)로부터 작업영역에 대한

다음과 같은 연속식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i &= r_i \cos \theta_i \\ y_i &= r_i \sin \theta_i \\ z_i &= z_i^* \end{aligned} \quad (6)$$

$$r_i = \sqrt{x_i^{*2} + y_i^{*2}} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_i^* = [A]_{i+1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{i+1} \quad (8)$$

$$[A]_{i+1} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \beta_i & -\sin \beta_i & 0 & a_i \\ \cos \alpha_i \sin \beta_i & \cos \alpha_i \cos \beta_i & \sin \alpha_i & b_i \sin \alpha_i \\ -\sin \alpha_i \sin \beta_i & -\sin \alpha_i \cos \beta_i & \cos \alpha_i & b_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

로봇 팔의 작업영역을 구하기 위하여 $W_i(H)$ 를 X_i Z_i 면으로 자른 단면을 먼저 구하면, 식 (1)로부터 $\theta_i = 0^\circ$ 또는 180° 일 때이고, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_i &= \pm r_i \\ z_i &= z_i^* \end{aligned} \quad (10)$$

$x_i = r_i$ 인 경우는 Z_i 축의 우측 단면을 나타내고 $W_i^R(H)$, $x_i = -r_i$ 인 경우는 좌측 단면을 나타내며 $W_i^L(H)$ 로 표시한다. $W_i^R(H)$ 는 조인트 각 $\theta_n, \theta_{n-1}, \dots, \theta_{i+1}$ 을 순차적으로 변화시켜 얻을 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} x_i &= r_i = f(\theta_{i+1}, \theta_{i+2}, \dots, \theta_n) \\ z_i &= z_i^* = g(\theta_{i+1}, \theta_{i+2}, \dots, \theta_n) \end{aligned} \quad (11)$$

이며, 수치적으로 구하는 알고리즘은 Fig. 2 와 같다.

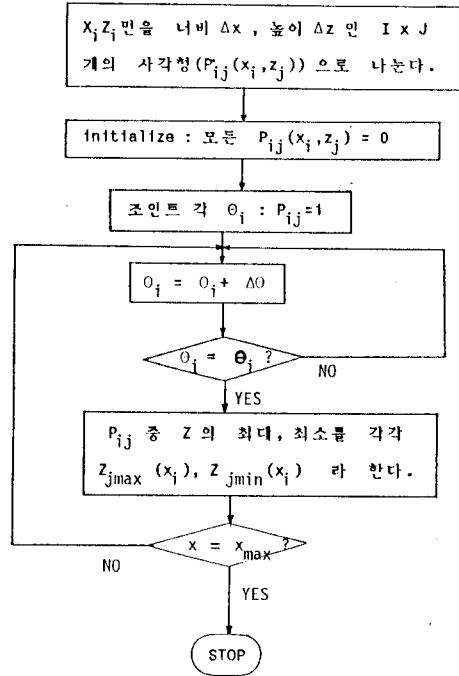


Fig. 2 Flow chart of workspace calculation

위의 과정으로 $W_i^R(H)$ 를 구한 후, 다음식으로부터 $W_i(H)$ 를 계산할 수 있다.

$$W_i(H) = \sum_{x_{min}}^{x_{max}} \begin{cases} \theta \times [(z_{max}(x) - z_{min}(x)) \Delta x] \\ \theta \times [(z_{max}(x) - z_{min}(x) + z_{2max}(x) - z_{max}(x)) \Delta x] \end{cases} \quad (12)$$

n 개의 회전 조인트를 갖는 로봇 팔의 길이는 고정된 값이기 때문에 다른 팔 길이의 비로 표시할 수 있다. 모든 팔 길이를 마지막 팔 길이의 비로 표시하면, 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} l_1 &= s_1 & l_n \\ l_2 &= s_2 & l_n \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ l_{n-1} &= s_{n-1} & l_n \end{aligned} \quad (13)$$

여기에서 s_i 는 비례계수이다.

식 (13)을 이용하여 공간상에서 로봇트의 작업영역을 표시하면 다음과 같다.

$$W = \sum_{i,j,k} u_{ijk} \ell_i \ell_j \ell_k = \sum_{i,j,k} u_{ijk} \ell_n^3 (s_i s_j s_k) \\ = |S| \ell_n^3 \quad (14)$$

$$|S| = \sum_{i,j,k} u_{ijk} s_i s_j s_k = \text{constant}$$

전체 팔 길이 L 은

$$L = \ell_1 + \ell_2 + \dots + \ell_n = \ell_n (s_1 + s_1 + \dots + s_n + 1) = |R| \ell_n \quad (15)$$

$$|R| = (s_1 + s_2 + \dots + s_n + 1) = \text{constant}$$

이다.

식 (14), (15)로부터 작업 영역 W 와 전체 팔 길이 L 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{W}{L^3} = \frac{|S| \ell_n^3}{|R|^3 \ell_n^3} = \frac{|S|}{|R|^3} = VI \quad (16)$$

VI 를 로봇트의 Volume Index라 하고, 작업 영역에 대한 팔 길이의 효능을 나타내며, 이를 최대 작업 영역으로 나누어서 표준화(normalize)시킬 수 있다.

로봇트의 최대 작업 영역은 반경이 링크 전체 길이 L 이고, 중심이 조인트 1에 있는 구(sphere)이므로, 최대 VI 는

$$\frac{4\pi L^3 / 3}{L^3} = \frac{4\pi}{3} \simeq 4.1888 \quad (17)$$

이 된다.

VI 를 이 값으로 나눈 성능지수를 NVI (normalized volume index)라 하며, 0에서 1사이의 값을 갖는다. 이 NVI 는 작업 영역에 기초를 둔 기구학적 성능지수이며, 앞의 알고리즘을 써서 효율적으로 구할 수 있다.

2.2 다관절 로봇트의 동력학

기단에서 끝단까지 n 개의 연속된 강체로 이루어진 로봇트에서 \underline{V}_{ci} , $\underline{\omega}_i$ 를 각각 링크 i 의 무게중심 선속도, 회전각 속도라 하면, 운동에너지는 다음과 같다.

$$T_i = \frac{1}{2} m_i \underline{V}_{ci}^T \underline{V}_{ci} + \frac{1}{2} \underline{\omega}_i^T \underline{I}_i \underline{\omega}_i \quad (18)$$

여기에서 m_i 는 질량이고, \underline{I}_i 는 관성 텐서 행렬이며, 상첨자 T 는 치환을 나타낸다. 식 (18)을 자코비안(Jacobian) 행렬을 이용하여 다시쓰면,

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (m_i \dot{\underline{\theta}}^T \underline{J}_L^{(i)} \underline{J}_L^{(i)} \dot{\underline{\theta}} + \dot{\underline{\theta}}^T \underline{J}_A^{(i)} \underline{I}_i \underline{J}_A^{(i)} \dot{\underline{\theta}}) = \frac{1}{2} \dot{\underline{\theta}}^T \underline{H} \dot{\underline{\theta}} \quad (19)$$

이 된다. 여기에서 대칭행렬 \underline{H} 는 다음식이 되며, 관성 텐서라 한다.

$$\underline{H} = \sum_{i=1}^n (m_i \underline{J}_L^{(i)} \underline{J}_L^{(i)} + \underline{J}_A^{(i)} \underline{I}_i \underline{J}_A^{(i)}) \quad (20)$$

식 (19)의 운동에너지는 일반화된 좌표계 q_i 에서 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \dot{\underline{q}}^T \underline{G} \dot{\underline{q}} \quad (21)$$

위 식에서 \underline{G} 는 대칭 행렬로서 다관절 로봇트의 일반화된 관성텐서(generalized inertia tensor)이다.

$$\underline{G} = (\underline{J}^{-1})^T \underline{H} \underline{J}^{-1} \quad (22)$$

식 (22)에서 정의된 일반화된 관성 텐서의 주축을 구하는 문제는 행렬 \underline{G} 의 고유치 문제가 된다. λ 를 \underline{G} 의 고유치라 하면 다음식이 성립한다.

$$\underline{G} \underline{q} = \lambda \underline{q} \quad (23)$$

위 식의 양변에 각각 \underline{q}^T 를 곱하고, 정리하면,

$$\underline{q}^T \underline{G} \underline{q} = \lambda \underline{q}^T \underline{q} = 1 \quad (24)$$

이 된다. 그런데, 로보트는 정지상태를 제외하면, 운동에너지는 항상 양수값이므로 \underline{G} 는 양정수행렬(positive definite matrix)이다. 따라서 식 (24)는 타원체를 나타낸다. 이를 연결된 강체에 대한 일반화된 관성타원(generalized inertia ellipsoid, GIE)이라 한다. 식 (24)로부터 GIE의 장, 단축의 크기는 \underline{G} 의 고유치의 제곱근의 역수가 된다.

로보트의 비선형 힘을 GIE를 이용하여 기하학적으로 설명하기 위하여 작업영역 내의 한 점 A를 생각하자. 점 A에서 GIE의 주축을 좌표축으로 하면, 이 축에 대한 관성텐서는 대각행렬(diagonal matrix)이 되며, 이 대각행렬의 요소는 \underline{G} 의 고유치이다. 이 경우 운동 에너지는,

$$T = \frac{1}{2} \dot{\underline{p}}^T \underline{D}_A \dot{\underline{p}} \quad (25)$$

이 되므로, 운동 방정식은 아래와 같다.

$$\underline{Q} - \underline{D}_A \ddot{\underline{p}} + \underline{F}_N = 0 \quad (26)$$

식 (26)에서, 첫째항 \underline{Q} 는 중력의 영향을 포함한 일반화된 힘을 나타내고, 두번째항은 관성력을 나타내며, \underline{F}_N 은,

$$\underline{F}_N = \frac{1}{2} \left[\dot{\underline{p}}^T \frac{\partial \underline{D}_A}{\partial p_1} \dot{\underline{p}}, \dots, \dot{\underline{p}}^T \frac{\partial \underline{D}_A}{\partial p_n} \dot{\underline{p}} \right]^T - \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial \underline{D}_A}{\partial \dot{p}_i} \dot{p}_i \right) \dot{\underline{p}} \quad (27)$$

이다. \underline{F}_N 은 속도의 곱에 비례하므로 비선형 힘이고, 식 (27)에서 우변의 첫번째, 두번째항은 각각 원심력, 코리올리 힘에 해당한다.

GIE의 변화는 주축길이의 변화와, 주축 방향의 변화로 나눌 수 있다. B점에서, GIE의 방향의 변화를 나타내는 직교행렬을 \underline{C} , 모양의 변화를 나타내는 대각행렬을 \underline{D}_B 라 하면, 관성

텐서의 변화 $\delta \underline{D}_A$ 는 다음과 같다.

$$\delta \underline{D}_A = \underline{G}_B - \underline{D}_A = \begin{bmatrix} \delta \lambda_1 & (\lambda_1 - \lambda_2) \delta \phi_{12} & \dots & (\lambda_1 - \lambda_n) \delta \phi_{1n} \\ (\lambda_1 - \lambda_2) \delta \phi_{12} & \delta \lambda_2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\lambda_1 - \lambda_n) \delta \phi_{1n} & \cdot & \dots & \delta \lambda_n \end{bmatrix} \quad (28)$$

팔이 주축 P_i 를 따라서 움직인다면 속도 벡터는 $\underline{P}_i = [0, \dots, P_i, \dots, 0]^T$ 이므로, 식 (27)의 비선형 힘은,

$$\underline{F}_N | \dot{\underline{p}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda_1}{2 \partial p_1} - (\lambda_1 - \lambda_i) \frac{\partial \phi_{1i}}{\partial p_1} \\ \vdots \\ -\frac{\partial \lambda_i}{2 \partial p_i} \\ \vdots \\ \frac{\partial \lambda_i}{2 \partial p_n} - (\lambda_n - \lambda_i) \frac{\partial \phi_{ni}}{\partial p_i} \end{bmatrix} \dot{p}_i^2 \quad (29)$$

이 된다. 여기에서 $\partial \lambda_i / \partial p_i$ 는 주축길이의 변화율을, $\partial \phi_{ij} / \partial p_i$ 는 주축 방향 변화의 곡률을 나타낸다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

앞 절의 이론 해석을 토대로 공간 3조인트 로보트에 대하여 비선형성과 NVI를 수치적으로 비교하였다.

Fig. 3은 공간 3조인트 로보트의 구조를 보여 주며, 그림에서 ℓ_{ci} 는 조인트 i에서부터 링크 i의 무게 중심까지의 길이를 나타낸다.

parameter	link		
	1	2	3
b (m)	0	0	0
α (deg)	90	0	0
β (deg)	-60	90	90
Θ (deg)	240	120	120

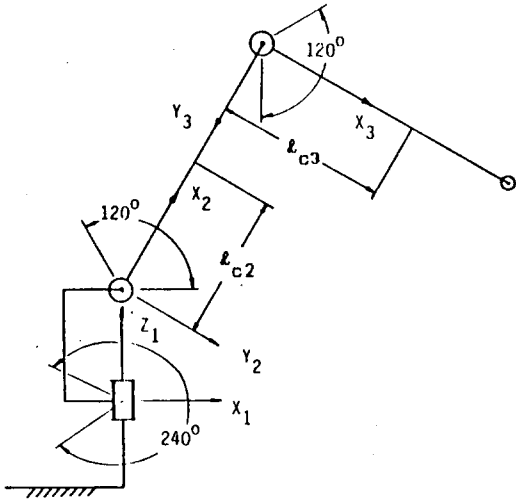


Fig.3 Structure of spatial 3 revolute joint robot.

첫번째 조인트와 두번째 조인트 사이의 거리는 작업 영역의 크기에는 영향이 없고, 단지 Z 축을 따라 상대높이를 이동시키는 역할만 하므로 $a_1 = 0$ 라 하였다.

조인트 좌표계에서 나타낸 관성 텐서 H 는

$$H = \begin{bmatrix} I_2 + m_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 & m_3 l_2 l_{c3} \cos(\theta_2 - \theta_3) \\ m_3 l_2 l_{c3} \cos(\theta_2 - \theta_3) & I_3 + m_3 l_{c3}^2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

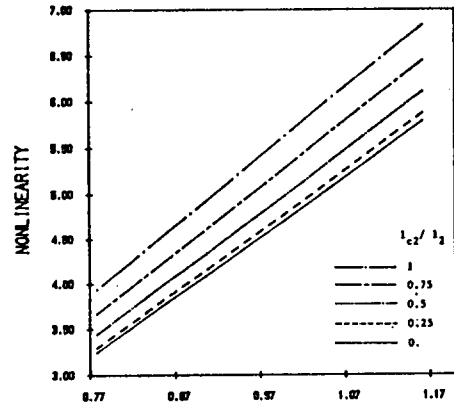
이고, 자코비안 행렬 J 는 다음과 같다.

$$J = \begin{bmatrix} -l_2 \sin \theta_2 & -l_3 \sin \theta_3 \\ l_2 \cos \theta_2 & l_3 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (31)$$

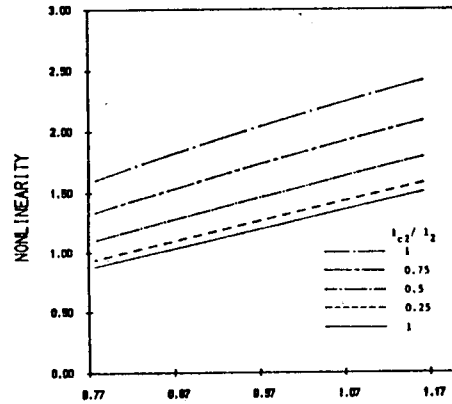
식 (30)과 (31)을 이용하면 X, Z 단면에서의 비선형성을 평면 2 자유도계로 해석할 수 있다.

Fig. 4 (a)는 $L=0.8m$, $l_{c3}=0$ 로 하고, l_2 에 대한 l_3 의 비를 변화시키면서, 세번째 팔의 무게 중심의 위치에 따른 비선형성을 비교한 그림이다. l_3/l_2 의 값이 클수록, 즉, l_3 가 l_2 에 비

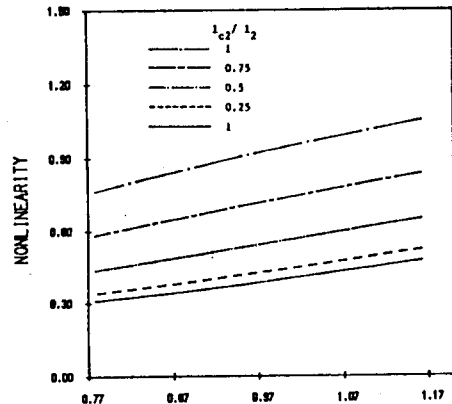
해 상대적으로 길어질수록 비선형성은 증가함을 알 수 있다. 또, 두번째 팔의 무게중심이 그 팔의 끝단으로 갈수록 비선형성은 점차 증가한다.



(a) l_3/l_2



(b) l_3/l_2



(c) l_3/l_2

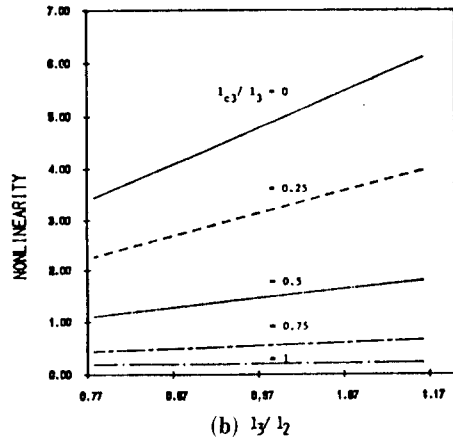
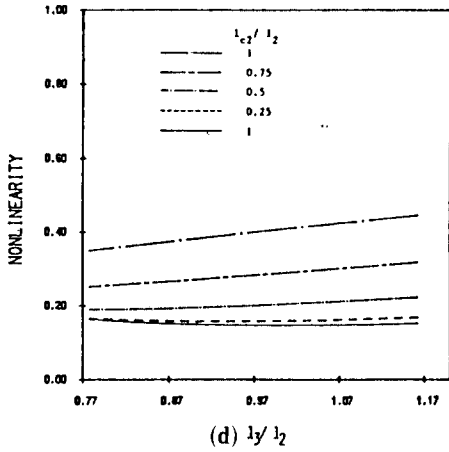


Fig. 4 Nonlinearity with variations of link length ratio.

Fig. 4(b), (c), (d)는 l_{c3}/l_3 의 값이 각각 0.5, 0.75, 1일 때의 그림이다. Fig. 4(a)의 경우와 같이 l_3 의 값이 커질수록 비선형성은 증가하고, 무게중심이 두번째 팔의 끝단으로 갈수록 증가하나, (a)의 경우에 비해 비선형성이 완만하게 증가하므로, 세번째 팔의 무게중심이 그 팔의 끝단으로 갈수록 l_{c3} 의 비선형성에 대한 영향은 감소함을 보여준다.

$l_{c3}/l_3 = 1$ 인 경우에는(Fig. 4(d)) l_3/l_2 가 증가하여도 비선형성은 거의 변화하지 않고, $l_{c2} = 0$ 일 때는 오히려 감소함을 보인다.

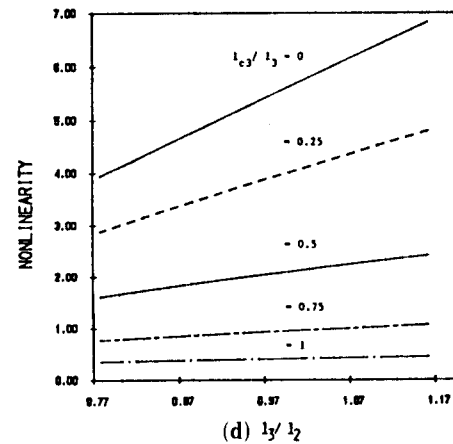
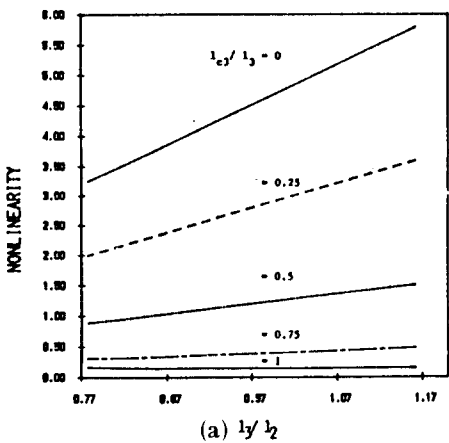
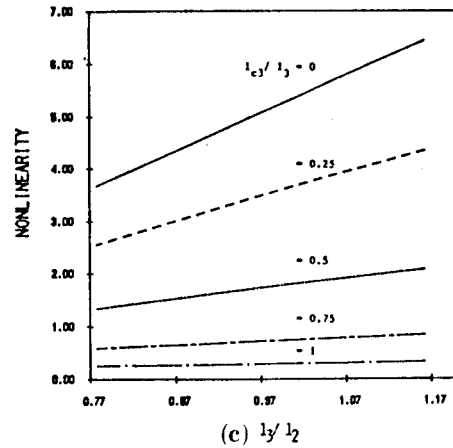


Fig. 5 Nonlinearity with variations of link length ratio.

Fig. 5 (a)는 $L=0.8m$, $l_{c2}=0$ 일 때의 비선형성을 l_3/l_2 의 변화에 대하여 비교한 그림이다. l_3 의 길이가 l_2 에 비해 길어질수록 비선형성은 증가하나, 세번째 팔의 무게중심이 그 팔의 끝단으로 갈수록 비선형성에 미치는 영향이 감소함을 보여준다.

그런데, Fig. 4 (a)의 경우와는 반대로 세번째 팔의 무게중심이 그 팔의 끝단으로 갈수록 오히려 비선형성은 급격히 줄어들고, l_3 가 길어질수록 그 정도는 더 커짐을 보여준다.

Fig. 5 (b), (c), (d)는 l_{c2}/l_2 가 각각 0.5, 0.75, 1인 경우의 그림이고, Fig. 5 (a)의 경우와 같은 결과를 보여준다.

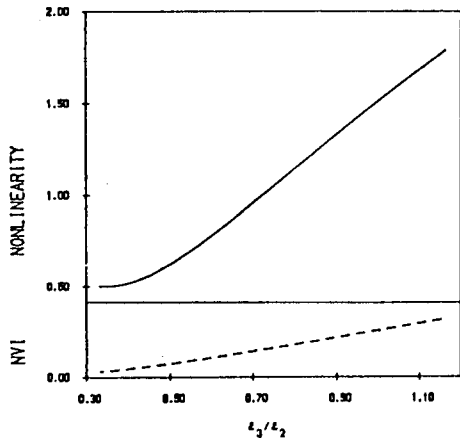


Fig. 6 Nonlinearity and NVI with variations of link length ratio.

Fig. 6는 전체 팔 길이가 0.8m이고, 각 팔의 무게중심은 그 팔의 중앙에 있는 경우 l_3/l_2 의 변화에 따라 NVI와 비선형성을 비교한 그림이다. l_3 가 커질수록 NVI와 비선형성은 모두 증가함을 보여준다. 특히 두번째 팔 길이가 세번째 팔 길이의 2배가 될 때부터 비선형성은 급격히 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7은 두번째, 세번째 팔 길이가 같고, 무게중심은 각 팔의 중앙에 있는 경우 작업 영역 내에 GIE를 그린 그림이다. 점선으로 표시된 곡선은 작업 영역을 나타내며, 작업 영역의 경

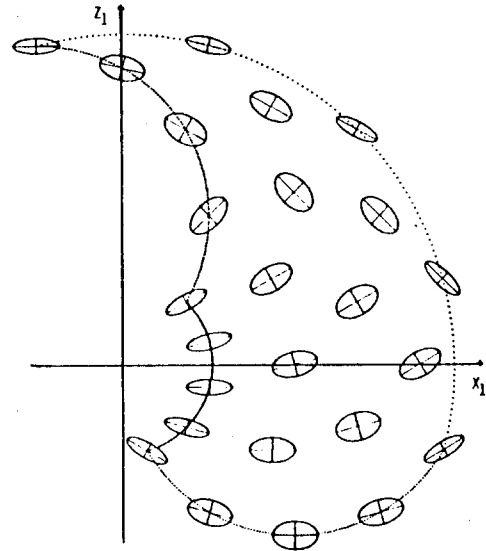


Fig. 7 Generalized inertia ellipsoid on the X_1Z_1 plane

계부분으로 갈수록 GIE의 형상은 납작해지는데, 이는 비선형성이 커짐을 나타낸다. 중심부에서는 비선형 힘이 줄어들어 장, 단축의 차이가 경계부분보다 작아짐을 보여준다.

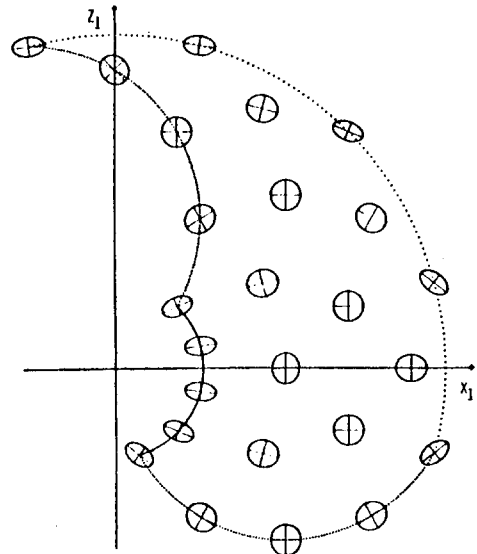


Fig. 8 Modified GIE configuration 1 on the X_1Z_1 plane.

Fig. 8은 무게중심의 위치를 이동시켜서 비선형성이 개선된 결과를 보여준다. 즉, 두번째 팔의 무게중심은 그 팔의 조인트부에 있고, 세번째 팔의 무게중심은 그 팔의 끝단에 있을 때, GIE는 Fig. 7보다 작업영역의 전부분에서 거의 원에 가까운 경향을 보인다. 또, 팔의 형상을 변화시켜서 좀 더 개선된 결과는 Fig. 9이다. 작업 영역의 중심부에서는 GIE가 원이 되며 경계 부분에서도, GIE가 원에 가까운 모양을 보여준다.

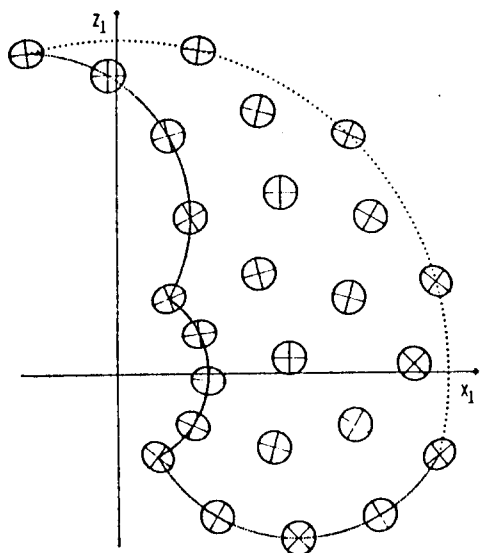


Fig. 9 Modified GIE configuration 2 on the X_1Z_1 plane.

4. 결 론

다관절 로봇의 설계 인자를 이용하여 수치 해석적으로 작업영역을 규명하고, 이러한 설계 인자와 로봇의 비선형성과의 관계를 동력학적으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 작업영역을 전체 팔 길이의 3 승으로 나누고 이를 표준화 시킨 값을 성능지수 (NVI) 로

하여 작업영역에 대한 팔 길이의 효율을 나타내며, 비선형성은 일반화된 관성타원 (GIE)의 장단축의 길이의 차를 비교하여 정량적으로 해석할 수 있다. 이러한 NVI와 GIE를 이용하여 작업영역과 비선형성을 고려한 로봇 팔의 최적설계에 응용할 수 있다.

2. 3 자유도계 로봇를 시뮬레이션한 결과 세번째 팔의 무게중심은 그 팔의 끝단으로 갈수록, 두번째 팔의 무게중심의 위치를 변화시켰을 때와는 반대로 비선형성은 감소하나 l_3 에 대한 l_{c3} 의 비가 0.75 이상인 경우에는 팔 길이의 비에 거의 영향을 받지 않는다.

〈참 고 문 헌〉

1. Roth, B., "Performance Evaluation of Manipulators from a Kinematic Viewpoint", NBS Special Publication No. 459, Performance Evaluation of Programmable Robots and Manipulators, 1975, pp 39-61.
2. Kumar, A., and Waldron, K. J., "The Workspaces of a Mechanical Manipulator," ASME. J. of Mechanical Design, Vol. 103, July, 1981, pp 665-672.
3. Kumar, A., and Waldron, K. J., "The Dextrous Workspace," ASME. paper 80-DET-108, 1980.
4. Yang, D. C. H., and Lee, T. W., "On the Workspace of Mechanical Manipulators," ASME. J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 105, March, 1983, pp 62-69.
5. Lee, T. W., and Yang, D. C. H., "On the Evaluation of Manipulator Workspace," ASME. J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 105, March, 1983, pp 70-77.
6. Hollerbach, J. M., "A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and

- Comparative Study of Dynamics Formulation Complexity," IEEE. Transaction on System, Man, and Cybenetics, Vol. SMC-10, No. 11, 1980, pp 730-736.
7. Luh, J. Y. S., Walker, M. W., and Paul, R. P. C., "On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators," ASME. J. of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol. 102, No. 2, 1980, pp 69-76.
 8. Asada, H., "A Geometrical Representation of Manipulator Dynamics and Its Application to Arm Design," ASME. J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 105, September, 1983, pp 131-142.