

두개의 로봇트의 협조에 의한 경로제어

(Coordinate Control of Two-Robots for the Trajectory Following)

李 赫 熙*, 徐 一 泓*, 徐 丙 高*, 金 庚 基*

(Hyeok Hee Lee, Il Hong Suh, Byung Seol Suh and Kyung Kee Kim)

要 約

본 논문에서는 5 개의 자유도를 가진 두대의 RHINO 로봇트(주, 부로봇트)가 지정된 경로를 따라서 한 물체를 이동시킬 때 각 로봇트들은 물체를 놓치지 않고도 end effector의 자세를 변화시킬 수 있다는 가정하에 두대의 로봇트중 한대는 나머지 한대를 보조해 주는 역할, 즉 물체를 받쳐 주는 역할만을 하며, 주어진 경로를 정확히 추적할 수 있는 제어방법을 제시한다. 또한 제시된 방법의 타당성을 computer simulation에 의해 보이고자 한다.

Abstract

A co-operative position control is proposed for two robots manipulation with five degrees of freedom to transfer an object following a specified trajectory, where each manipulator is assumed to change the posture of its end effector without releasing the object.

I. 서 론

현재 산업체에서 사용되어지고 있는 산업용 로봇트는 로봇트가 취급할 수 있는 대상물의 중량에 비하여 로봇트 자체 중량이 약 400배 정도로 크다는 취약점을 갖고 있다. 따라서 무게가 50kg중 밖에 안되는 대상물을 이동시키려해도 로봇트의 무게가 2ton이나 되어야 하므로 실제 제작 사용하기에는 적합하지가 않다. 또한 대상물의 길이가 길 경우에도 한대의 로봇트만을 이용하여 이동작업을 하기에는 부적합하다. 따라서 이러한 단점들을 보완하기 위해서는 다수 로봇트를 사용하여 주어진 과업을 수행하게 하는 협조 제어방법을

생각할 수 있으나 이에 대한 연구는 별로 없는 실정이다.^{1,2,3}

(1)에서는 로봇트 매니퓰레이터 두대를 조합해서 사용할 때 하나의 로봇트를 기준으로 하여 나머지 하나의 로봇트의 end effector의 위치제어를 수행하도록 하는 제어방법을 제안하였는바, 제시된 방법은 6 자유도를 갖는 로봇트만으로 제한되어 있다.

(2)에서는 두대의 매니퓰레이터를 협조제어 하는데에 각 로봇트의 end effector에 미치는 force를 제어하는 방법을 제시하였다. 여기서는 특히 같은 물체를 들고 움직이는 작업을 수행할 때, 두개의 로봇트에 상호 작용하는 힘을 보상하는데 중점을 두었다.

(3)에서는 5 축의 자유도를 갖는 RHINO와 같은 로봇트를 대상으로 end effector의 자세들을 고정시킨 상태에서 하나의 물체를 두대의 RHINO 로봇트가 원하는 경로에 가장 가까운 경로를 찾아 움직이도록 하는 위치 제어방법을 제시하였다.

본 논문에서는 (3)에서와 같이 산업용 로봇트로서

*正會員, 漢陽大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Hanyang Univ.)

**正會員, 漢陽大學校 電子通信工學科

(Dept. of Electro-Communications Hanyang Univ.)

接受日字: 1986年 12月 19日

많이 사용되어지고 있는, 손목부의 Yaw motion이 없는 5 자유도 수직관절형 로봇트 2 대를 이용하여 길이가 긴 물체를 주어진 경로를 따라 이동시키는 협조 제어방법을 기구학적 관점에서 제시하고자 한다. 특히 본 논문에서는 (3)에서와는 달리 로봇트의 손목부 자세를 변경시킴으로써 주어진 경로를 추적하도록 하는 방법을 제시하고자 한다.

II. 두대의 PHINO 로봇트를 이용한 협조제어 System

두대의 로봇트가 협조작업을 할 수 있는 system 은 그림 1 과 같이 구성할 수 있다.

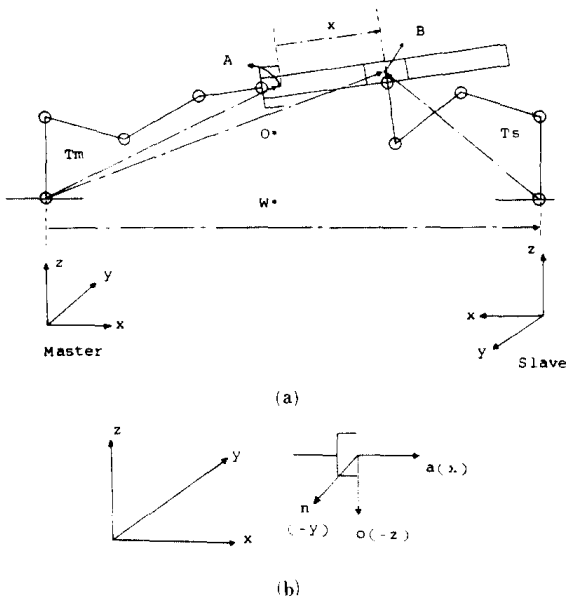


그림 1. (a) 두대의 로봇트의 Coordinate System
 (b) 로봇트 Tip에서의 Normal, Orientation and Approach의 3 방향성분
 Fig. 1. (a) Coordinate System of Two Robot Arms.
 (b) Normal, Orientation and Approach at the Robot Tip.

그림 1 에서 T_m 은 주(master)로봇트의 자세와 위치를 나타내는 4×4 Matrix 로써

$$T_m = \begin{bmatrix} R_m & P_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

R_m : 자세성분 (3×3 Matrix)
 P_m : 위치성분 (3×1 Matrix)

이며, T_s 는 부(slave)로봇트의 자세와 위치를 표시해주는 4×4 Matrix 로써

$$T_s = \begin{bmatrix} R_s & P_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

R_s : 자세성분 (3×3 Matrix)
 P_s : 위치성분 (3×1 Matrix)

이고, o^* 는 주로봇트의 base 좌표계에서, 부로봇트가 잡는 물체의 한점을 바라본 위치와 자세성분의 4×4 Matrix 로써

$$o^* = \begin{bmatrix} R_o & P_o \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

R_o : 자세성분 (3×3 Matrix)
 P_o : 위치성분 (3×1 Matrix)

이다. 또 x 는 주로봇트의 end effector의 끝점에서 부로봇트의 end effector 끝점까지의 주로봇트의 위치와 자세를 translation만 시킨 4×4 Matrix 로써

$$x = \begin{bmatrix} R_x & P_x \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

R_x : 자세성분 (3×3 Matrix)
 P_x : 위치성분 (3×1 Matrix)

이다. w^* 는 주로봇트의 base 좌표계를 부로봇트의 base 좌표계로 rotation 시킴으로써 구입할 수 있는 4×4 Matrix 로써 다음과 같다.

$$w = \begin{bmatrix} R_w & P_w \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

R_w : 자세성분 (3×3 Matrix)
 P_w : 위치성분 (3×1 Matrix)

이제 그림 1 과 같은 system을 구성함에 있어 다음과 같은 두가지 가정을 세우기로 한다.

가정 1 : 주로봇트와 물체와의 상대적인 자세는 고정되어 있다. 즉 주로봇트의 동작에 의해서만 기준 좌표계에 대한 물체의 자세의 변화가 생길 수 있다.

가정 2 : 부로봇트는 오직 물체를 받쳐 주는 동작만을 하며 따라서 물체에 대한 부로봇트의 base 좌표계에서의 자세의 변화가 있을 수 있다.

위와 같은 가정하에 본 논문에서 다루고자 하는 두대의 로봇트를 이용한 협조제어 문제는 다음과 같다. 이를 위하여 순응된 자세의 용어정의를 먼저 다음과 같이 하기로 한다.

정의 1 (순응된 자세) : 부로봇트의 end effector의 자세중 approach 벡터가 그림 1 의 점 B에서의 물체의 approach 벡터(주로봇트 end effector의 approach 벡터와 동일)와 수직하고 그림

1의 점B에서의 물체의 가상 end effector의 normal 벡터(주로봇 end effector의 normal 벡터와 동일)가 부로봇의 approach 벡터에 일치하도록 하는 것을 본 논문에서는 주로봇의 동작에 의해 변하는 물체의 자세에 대해 부로봇이 자세순응 되었다고 정의하기로 한다.

협조제어문제 : 물체에서 주로봇이 잡는 한점을 점A라 할 때 점A에서의 물체의 자세와 위치중 위치의 경로가 주어졌을때, 점A가 주어진 위치 경로를 추적하도록 하는 주로봇 자세와 부로봇의 자세 및 위치를 찾고, 이와 같은 자세와 위치를 만족하는 각 로봇트들의 각각의 관절각도들을 찾아라.

이제 위와 같은 협조제어 문제를 해결하기 위하여 기구학적 관계식을 세우면 식(1)과 같다.

$$T_m(t) \cdot x = o^*(t) = w^* \cdot T_s(t) \quad (1)$$

식(1)에서 점A의 경로인 $T_m(t)$ 는 $0 < t < T$ 에서 $T_m(0)$ 를 알고 있으므로 jacobian으로 각 구간마다 $T_m(t)$ 를 구할 수 있다. 따라서, $o^*(t)$ 는 다음의 식(2)로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} o^*(t) &= T_m(t) \cdot x \\ &= T_m(t) \cdot \text{Trans}(K \cdot \cos \theta_z \cdot \cos \theta_x, \\ &\quad K \cdot \cos \theta_z \cdot \sin \theta_x, \\ &\quad K \cdot \sin \theta_z) \end{aligned} \quad (2)$$

(단, $K=L/2$; L 은 물체의 길이)

식(2)에서 θ_x 와 θ_z 는 그림 2에서와 같이 구할 수 있다.

한편 $T_s(t)$ 는 식(1)의 우변, 즉

$$T_s(t) = (w^*)^{-1} \cdot o^*(t) \quad (3)$$

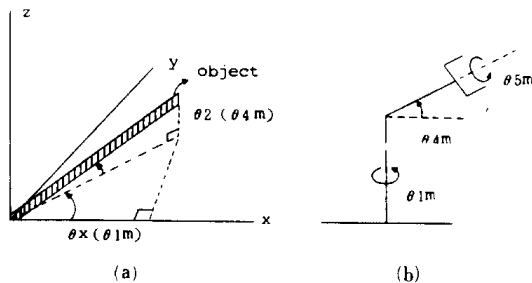


그림 2. (a) θ_z, θ_x 의 그림
(b) RHINO 로봇트의 자세를 결정하는 3개의 관절들

Fig. 2. (a) Figure of θ_z, θ_x .
(b) 3 Joints for Defining the Orientation of the RHINO Robot.

로부터 구할 수 있다.

여기서 $T_s(t)$ 중 $P_s(t)$ 만을 사용하며 $R_s(t)$ 는 사용하지 않는다. 그 이유는 식(3)에서 구한 $R_s(t)$, 즉 부로봇의 자세는 주로봇이 임의의 위치에서 임의의 자세를 취할 때, 본 논문에서 대상으로 하는 5개의 자유도를 가진 로봇트(RHINO 부로봇트)로는 불가능한 자세일 경우가 많기 때문이다. 따라서 식(3)에서 $o^*(t)$ 항의 자세를 rotation 행렬곱을 이용하여 새로운 자세, 즉 언제든지 부로봇트가 취할 수 있는 자세항을 가진, $T_{s3}(t)$ 로 변경하고, 변경된 $T_{s3}(t)$ 를 work space 내에서 부로봇트가 취할 수 있는 자세와 위치를 가진 4×4 Matrix $T_{s4}(t)$ 로 변환시키기 위한 관계식을 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$T_{s4}(t) = (w^*)^{-1} \cdot T_{s3}(t) \quad (4)$$

이제 다음 절에서 $T_m(t)$ 에 대한 주로봇트의 각 관절 각도와 $T_{s3}(t), T_{s4}(t)$ 및 이에 대한 주, 부로봇트들의 관절각들을 구하는 방법을 제시하기로 한다.

III. 경로 및 자세제어

1. 경로에 따른 주로봇트의 위치제어

주로봇트의 end effector가 주어진 경로를 따라 동작할 때 주로봇트의 각 관절모타에서 소요되는 energy를 최소로 하기 위하여 위치만을 고려한 3×5 jacobian을 이용하고자 한다.

구체적으로 jacobian을 이용한 최소에너지 제어법칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta(n+1) &= \theta(n) + J^+(n) (x_d(n+1) - x_a(n)) \\ n &= 1, 2, 3 \dots k \quad (k : \text{상수}) \end{aligned} \quad (5)$$

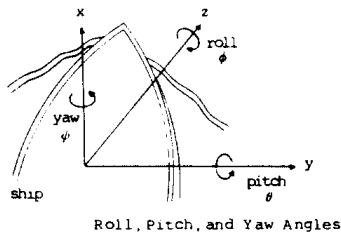
여기서 $x_d(n+1)$ 은 $n+1$ 번째 desired position 이며 $x_a(n)$ 은 n 번째 actual position이다. 또한 $J^+(n)$ 은 n 번째 관절위치에서 position만 고려한 3×5 jacobian 행렬의 pseudo inverse이다. 이와 같은 방식으로 구한 주로봇트의 관절각도 벡터 값들은 자세를 고려하지 않은 주로봇트가 물체를 잡은 임의의 점에서의 위치만을 고려한 값들이며 미소구간 변화에 따른 연속적인 값들이다.

2. 주로봇트의 위치와 자세에 순응하는 부로봇트의 위치와 자세제어

식(5)에서 구한 주로봇트의 각 관절각들은 자세를 고려하지 않은 값들이므로 주로봇트는 임의의 자세를 취하게 된다.

따라서 2 절에서는 주로봇트가 물체를 고정되게 잡은 상태에서 물체의 한점에 대해 주어진 경로를 추적하도록 하는 주로봇트의 임의의 자세 및 위치에 대

한 부로보트의 관절각들을 구하고자 한다. 그러나 그림(3)과 같이 부로보트가 자체의 운동범위 내에서 임의의 방향과 위치를 취할 수 있으려면 6 개의 자유도 (degree of freedom)가 필요하다. 자세를 결정하는 3 개의 자유도와 위치를 결정해 주는 3 개의 자유도이다. RHINO 로봇이 갖고 있는 자유도는 5 개로써 자세를 결정해 주는 Roll, Pitch, Yaw의 3 개성분중 Yaw에 해당하는 link가 걸림되어 있는 상태이기 때문에 완전하게 위치와 자세를 제어할 수 없다.



Roll, Pitch, and Yaw Angles

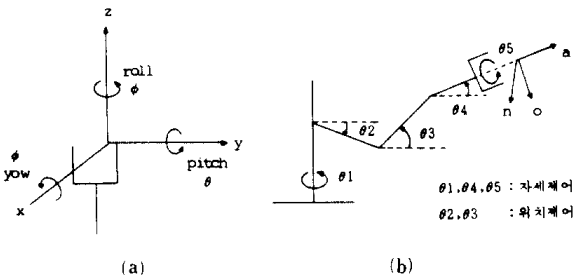


그림 3. (a) Roll, Pitch, Yaw Coordinates for a Manipulator.
 (b) RHINO 로봇의 5 개 관절각
 Fig. 3. (a) Roll, Pitch, Yaw Coordinates for a Manipulator.
 (b) 5 Joint Angles of RHINO Robot.

따라서 부로보트가 임의의 위치에서 임의의 자세를 언제나 취할 수 있게 하려면 Yaw의 동작을 보상해 주어, Yaw의 동작없이도 가정 2의 조건을 만족시킬 수 있는 부로보트의 자세와 위치의 함수 $T_s(t)$ 를 찾아야 한다. 이를 위하여 먼저 $o^*(t)$ 의 값을 다음과 같이 표시하면

$$o^*(t) = \begin{bmatrix} No_x & Oo_x & Aox & Pox \\ No_y & Oo_y & Aoy & Poy \\ No_z & Oo_z & Aoz & Poz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [\vec{n}_o \quad \vec{o}_o \quad \vec{a}_o \quad \vec{p}_o] \quad (6)$$

식(6)의 $o^*(t)$ 의 값은 주로보트와 자세(n, o, a)는 같고 위치는 그림 1의 점A를 점B로 위치만 translation

시킨 값이다.

이제 이 값을 이용하여 위치는 $o^*(t)$ 의 위치와 같고 자세는 언제나 부로보트가 취할 수 있는 4×4 Matrix인 $T_{s3}(t)$ 를 구하여 부로보트의 자세순응이 된 $T_s 4(t)$ 및 이에 대한 부로보트의 각 관절각들을 다음의 STEP 1에서 STEP 4의 과정을 통해 구할 수 있다.

STEP 1. ($\theta 1$ 의 motion)

자세순응의 정의로부터

$$o^*(t) = T_m(t) \cdot x$$

위 식에서 $o^*(t)$ 의 approach 벡터인 \vec{a}_o (주 로봇의 approach 벡터와 동일)가 $T_{s3}(t)$ 의 normal 벡터 \vec{n}_{s3} 가 되고, \vec{a}_o 와 수직인 벡터가 \vec{a}_{s3} 가 되도록 하여야 한다(\vec{n}_{s3} , \vec{a}_{s3} : 자세순응된 부로보트의 end effector의 normal과 approach 벡터). 단, 이와 같이 구한 $T_s 3(t)$ 에 대한 부로보트의 관절각도가 반드시 존재해야 한다.

그러므로 \vec{n}_{s3} 가 \vec{r}_a 와 $-\vec{r}_a$ 중 어느것인지를 결정해야 하고 \vec{a} 와 수직인 무수히 많은 벡터 중에서 로봇의 관절각이 존재하도록 하는 벡터를 선정해야 한다.

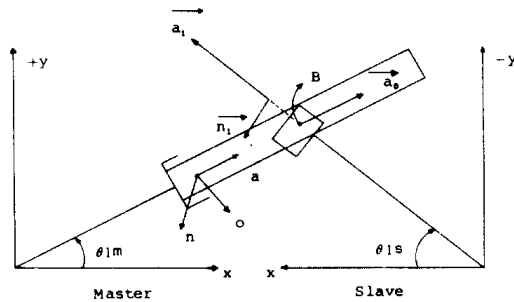


그림 4. Upper View.
 Fig. 4. Upper View.

그림 4에서 보는 바와 같이 부로보트가 반드시 취할 수 있는 자세를 만들기 위하여, 부로보트의 1 축 관절 각을 회전시킴으로써 얻을 수 있는 자세를 1 차적으로 선정한다. 구체적으로 $o^*(t)$ 의 중점 B와 부로보트의 base 좌표계의 원점을 잇는 선상에 부로보트의 approach 벡터가 존재하도록 하고 부로보트의 normal 벡터와 동일 선상에 수직이 되도록 한다. 이제 이상과 같이 점B에 선정된 새로운 좌표계를 가상 기준 좌표계라 하고 다음과 같이 표시한다.

$$T_{s1}(t) = o^*(t) \cdot Rot(y, \theta 1s) = [\vec{n}_1 \quad \vec{o}_1 \quad \vec{a}_1 \quad \vec{p}_1]$$

STEP 2 : ($\theta 4$ 의 motion)

STEP 1에서 구한 \vec{a}_1 는 아직까지 순응된 자세에서 정의한 것과 같은 \vec{a}_0 와 수직관계에 놓여있지 않다. 그러므로 두 벡터 \vec{a}_0, \vec{a}_1 이 수직관계를 갖도록 하기 위해서는 가상 기준좌표계의 \vec{n} 을 중심으로 회전시켜 \vec{a}_0 와 수직이 되도록 하여야 한다.

이를 수식적으로 표현하면, 부로봇트가 최종적으로 취할 approach 벡터는 \vec{n}_1 과 \vec{a}_0 에 수직이므로 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{a}_2 &= \vec{a}_0 \times \vec{n}_1 \\ \vec{n}_1 &= Ax + By + Cz \\ \vec{a}_0 &= Dx + Ey + Fz \end{aligned} \quad (8)$$

(A, B, C, D, E, F : 상수)

따라서

$$\vec{a}_2 = (BF - CE)x + (CD - AF)y + (AE - BD)z \quad (9)$$

이제, 식(8)이 만족되도록 하는 \vec{n}_1 을 중심으로한 회전각 θ_{k2} 는

$$\begin{aligned} T_{s2}(t) &= T_{s1}(t) \cdot \text{Rot}(x, \theta_{k2}) \quad (10) \\ &= \begin{bmatrix} Nx1 & Ox1 & Ax1 & Px1 \\ Ny1 & Oy1 & Ay1 & Py1 \\ Nz1 & Oz1 & Az1 & Pz1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{k2} & -\sin \theta_{k2} & 0 \\ 0 & \sin \theta_{k2} & \cos \theta_{k2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Nx2 & Ox2 & Ax2 & Px2 \\ Ny2 & Oy2 & Ay2 & Py2 \\ Nz2 & Oz2 & Az2 & Pz2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

의 3 번째 행 벡터와 식(9)가 같게 되도록 하여 구할 수 있다. 이러한 θ_{k2} 는 부로봇트의 각 θ_{4s} 와 같은 역할을 한다. 또한 θ_{k2} 를 식(10)에 다시 넣어 구한 $T_{s2}(t)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_{s2}(t) = [\vec{n}_2 \ \vec{o}_2 \ \vec{a}_2 \ \vec{p}_2]$$

STEP 3 : (θ_5 의 motion)

본 STEP에서는 \vec{a}_2 를 중심으로 \vec{n}_2 를 회전시켜서 \vec{a}_0 와 일치되도록 하는 회전각 θ_{k3} 를 구하고자 한다. 구체적으로

$$\begin{aligned} T_{s3}(t) &= T_{s2}(t) \cdot \text{Rot}(z, \theta_{k3}) \quad (11) \\ &= \begin{bmatrix} Nx2 & Ox2 & Ax2 & Px2 \\ Ny2 & Oy2 & Ay2 & Py2 \\ Nz2 & Oz2 & Az2 & Pz2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} \cos \theta_{k3} & -\sin \theta_{k3} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{k3} & \cos \theta_{k3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Nx3 & Ox3 & Ax3 & Px3 \\ Ny3 & Oy3 & Ay3 & Py3 \\ Nz3 & Oz3 & Az3 & Pz3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

의 첫번째 행 벡터인 \vec{n}_3 를 \vec{a}_0 와 일치되도록 하여 구할 수 있다. 따라서

$$\vec{a}_0 = \pm \vec{n}_3 \quad (12)$$

식(11)과 (12)를 연립해서 풀면 θ_{k3} 를 구할 수 있다.

이러한 θ_{k3} 는 부로봇트의 각 θ_5 와 같은 역할을 하며, 이렇게 구해진 θ_{k3} 를 식(11)에 다시 대입해서 풀면 부로봇트가 취할 수 있는 자세를 가진, 즉 순응된 자세를 가진 $T_{s3}(t)$ 를 구할 수 있다.

STEP 4: 이제 식(11)의 $T_{s3}(t)$ 를 식(4)에 넣어 $T_{s4}(t)$ 에 대한 5 자유도 부로봇트의 관절각도들을 역기구학적해(inverse kinematics)를 이용하여 구할 수 있다.

여기서 상기해야 할 것은 $T_{s4}(t)$ 는 STEP 1에서 STEP 3를 통하여 5 자유도 로봇트가 반드시 취할 수 있는 위치 및 자세가 되도록 조절한 것이므로 반드시 해가 존재한다.

IV. Simulation 결과

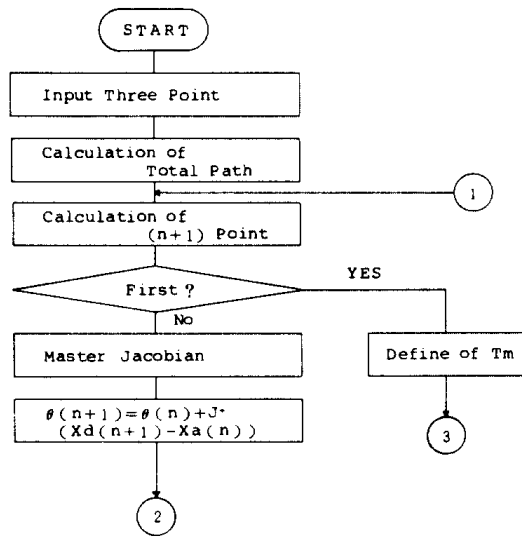
본 논문에서는 5 자유도를 가진 RHINO 로봇트 두대를 이용 그림(1)과 같은 system에서의 점A가 주로봇트의 Y-Z 평면에서 0.5inch 원을 그리는 작업을 simulation 해보았다.

그림 1에서의 주로봇트의 동작에 따라 부로봇트가 정렬1과 같이 순응된 자세를 유지하며 자유도가 부족한 5 관절 로봇트라도 언제든지 물체를 잡을 수 있는 자세를 취하게 하였다. 그 결과 주, 부로봇트의 각 관절 각도를 그림6과 같이 연속적인 값으로써 얻을 수가 있었다. 따라서 본 논문이 제시한 방법으로 5 관절 로봇트들이 협동작업을 continuous하게 동작할 수 있음을 제시하였다.

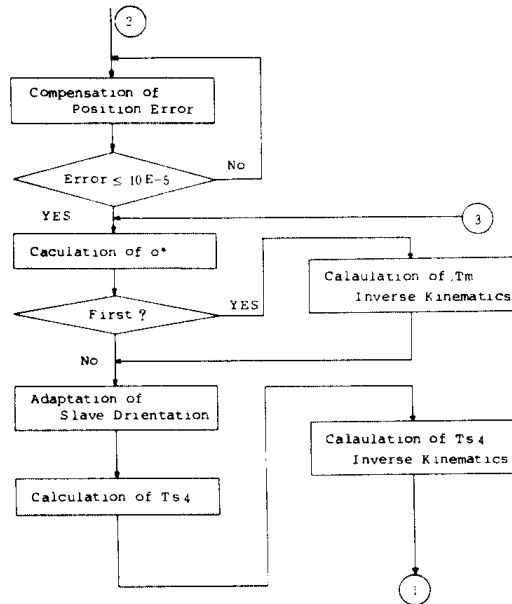
Program 전과정을 그림 5에 흐름도로써 나타내었다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존의 방법으로는 현재 산업체에서 많이 사용되는 5 자유도 로봇트가 특정한 경로 외에는 부로봇트가 물체를 고정되게 잡은 상태에서는 협동작업시 연속동작을 할 수 없다는 단점을 5 자유도 RHINO



(a)



(b)

그림 5. (a) 흐름도 a
(b) 흐름도 b

Fig. 5. (a) Flow Chart a.
(b) Flow Chart b.

로봇 2 대를 이용 로봇의 손목부가 물체를 잡은 상태에서 로봇들은 물체를 떨어뜨리지 않고 협동 작업을 할 수 있다는 가정하에 임의의 정해진 경로를 추적하도록 하는 협조제어 방법을 제시하였다. 이러한 본 논문의 방법은 현재 산업체에서 많이 사용되고 있는 5 자유도 로봇들의 협동 작업시의 한정된 작업영역을 확장시킬 수 있을 것으로 생각한다. 따라서 상기 가정이 유효하기 위한 방법들이 추가로 연구되어야 할 것이다. 즉 주로봇은 jacobian을 이용 최소의 에너지

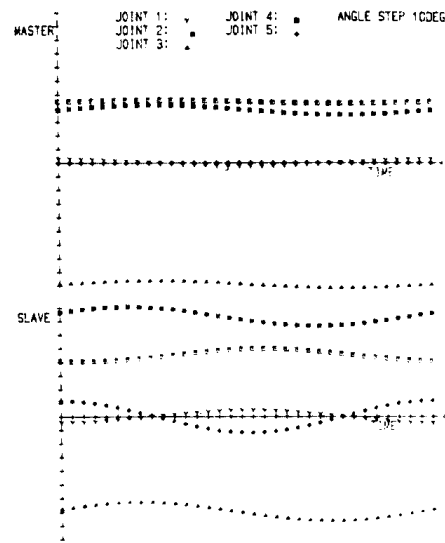


그림 6. 주, 부로봇들의 각 관절각들
Fig. 6. Each Joint Angles of Master, Slave Robots.

지로서 제어되지만 그에 따르는 부로봇은 최소의 에너지로 제어되지 못하므로 주로봇의 미세한 움직임에 대해 부로봇은 많은 움직임을 필요로 할 경우가 생긴다. 따라서 이러한 경우에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

參 考 文 獻

- [1] D. Dauchez and R. Zupath, "Coordinated control of two cooperative manipulators; use of kinematic model", *15th ISIR*, vol.2, pp.641-648, 1985.
- [2] C.O. Alford and S.M. Belyeu, "Coordinate control of two robot arms", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.468-473, 1985.
- [3] J.H. Lim, "Cooperative control of two robot arms", *Ph.D. dissertation*, The University of Iowa, 1986.
- [4] T. Yoshikawa, "Analysis and control of robot manipulator with redundancy", *ROBOTICS RESEARCH*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp.735-748, 1984.
- [5] R.P. Paul, *Robot Manipulators*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1981.
- [6] D.E. Whitney "The mathematics of coordinated control of prosthetic arms and manipulators", *Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, pp.303-309, December 1982.*