

직렬 · 병렬 혼합구조의 휴머노이드 상체로봇의 기구학 해석 및 움직임 구현

Kinematic Analysis and Motion Implementation of a Humanoid Robot with a Serial and Parallel Structure

배 영 겐, 정 슬*
(Yeong Geol Bae and Seul Jung)

Abstract: This article presents a combined structure of serial and parallel mechanisms for a humanoid robot. The 3 DOF parallel structure is designed and added to the waist of the humanoid robot arm to give flexible bending and rotating motions. Forward and inverse kinematics of a serial and parallel robot have been analyzed to generate motions. Simulation studies of verifying kinematics solutions of the parallel robot have been done. Experimental studies of mimicking shake-hands motion have been conducted to show the feasibility and usability of the combined structure.

Keywords: parallel and serial robot, kinematics, motion following task

I. 서론

최근 지능형 로봇에 대한 관심이 증가하면서 휴머노이드 로봇에 대한 연구 개발도 활발해져 많은 연구 기관에서 다양한 형태의 휴머노이드 로봇을 속속 발표하고 있다. 현재 활발히 연구되고 있는 휴머노이드 로봇의 연구 경향을 살펴보면 인간의 다리와 팔의 기능에 중점을 두어 2족으로 얼마나 안정성 있게 걷는가와 로봇의 팔을 이용하여 얼마나 안정된 작업을 수행할 수 있는가 등에 초점을 맞추어 연구되고 있다. 이러한 두 가지 기능은 인간에게서 찾아 볼 수 있는 가장 큰 장점이며 가장 큰 특징이라고 할 수 있다. 하지만 사람의 움직임을 살펴보면 대부분의 경우 허리를 굽히거나 몸을 돌리는 허리 부분의 움직임이 항상 동반된다. 그러나 휴머노이드 로봇에 대한 연구의 대부분이 앞서 말한 바와 같이 보행 및 매니플레이션에 중점을 두고 있어 허리의 굽힘이나 회전과 같은 움직임을 중심으로 연구하는 경우는 많지 않다. 특히 허리부분의 움직임은 상체의 무게를 지지한 상태로 움직여야 하는 구조적인 문제를 갖고 있어 쉽게 접근할 수 없는 것이 사실이다.

본 논문에서는 인간의 허리구조를 로봇에 적용하여 보다 인간의 움직임에 가까운 로봇의 동작을 구현하고자 한다. 인간의 허리의 움직임을 표현하기 위한 최소 자유도는 좌우, 앞뒤의 굽힘 그리고 회전의 3자유도가 필요하다. 본 논문은 이러한 3자유도의 표현을 직렬형이 아닌 병렬형 구조의 시스템으로 개발하고자 하였다. 직렬형 구조는 비록 구조는 간단하나 구동기 하나하나에 로봇 상체의 무게가 각각 걸리게 되어 모터가 감당해야 하는 부하가 크고 각각 구동기의 오차가 누적될 수 있다는 일반적인 문제점을 안고 있어 로봇 허리의 3자유도 모션을 표현하기에 부적절하

다고 판단된다. 이에 반해 여러 개의 구동기를 병렬형 구조로 구성하는 경우에는 무게의 분산 효과를 볼 수 있으며 구동기의 오차도 평균화되어 제어의 안정성 및 정밀성을 높이고 로봇의 3자유도 모션을 표현함에서도 유연한 동작을 나타낼 수 있다. 따라서 병렬형의 허리 구조를 직렬형 로봇에 적용하여 직렬 구조와 병렬 구조를 혼합하여 새로운 개념의 휴머노이드 로봇의 상체 시스템을 구현하고자 한다.

하지만 병렬 구조는 구속조건이 많아 기구학 및 동역학 해석이 매우 어렵다. 정기구학의 경우 해가 정해지지 않아 수치해석적인 방법[1]이나 센서에 의존하는 방법 그리고 학습을 통한 매핑에 의존하는 방법[2]들이 사용되고 있다.

특히, 병렬형 로봇과 직렬형 로봇이 혼합된 구조의 로봇의 경우는 사례가 드물고 기구학 해석이 어렵다. 본 논문에서는 병렬로봇의 정기구학 해석은 수치해석의 방법을 사용하여 구했으며[1,8], 직렬 로봇팔의 기구학 해석은 선행연구를 통해 구해졌고 검증되었다[9-11]. 두 로봇의 접목을 통해 기구학 해석을 하였으나 역기구학의 경우 전체 시스템을 한 번에 해석하는 것이 매우 어려우므로 병렬시스템과 직렬시스템의 또 다른 직렬 구조의 개념으로 생각하여 작업 공간을 고려한 비율로 해석하는 방법을 선택하였다.

또한 혼합구조의 시스템을 설계 및 제작하고 실제로 허리를 굽혀 악수하는 움직임을 나타내는 실험을 통하여 기구학 해석을 검증하였다. 비록 병렬로봇의 작업공간이 작았지만 PD제어기를 이용하여 원하는 움직임을 성공적으로 구현하였다.

II. 병렬형 허리 구조

본 논문에서는 인간의 허리의 움직임을 표현하기 위해 그림 1과 같은 x축, y축, z축을 중심으로 회전하는 3자유도를 갖는 병렬형 구조를 설계하였다.

그림 1은 3개의 실린더와 중심축, 상판, 하판의 구조로

* 교신저자(Corresponding Author)

논문접수: 2006. 10. 2., 수정: 2007. 1. 29., 채택확정: 2009. 5. 20.

배영겐, 정슬: 충남대학교 BK21 Mechatronics Group

(dynoyg@empal.com/jungs@cnu.ac.kr)

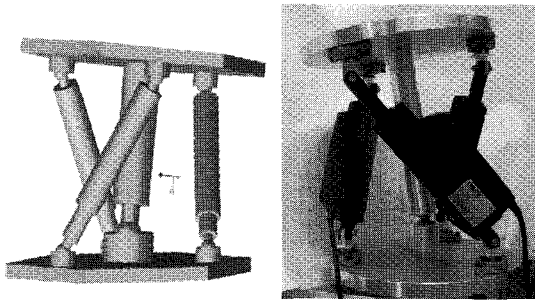


그림 1. 병렬형 로봇의 구조.
Fig. 1. Structure of a parallel robot.

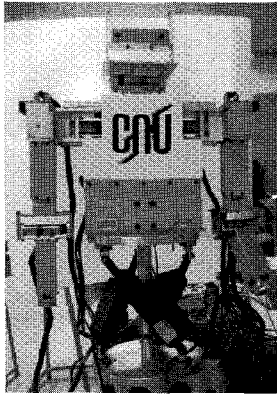


그림 2. 직렬·병렬 혼합 구조의 휴머노이드 로봇 시스템.
Fig. 2. Humanoid with a serial and parallel structure.

구성되어있다. 하판을 base로 하여 3개의 실린더는 각각 상판 및 하판과 베어링과 회전 조인트로 연결되어져 있으며, 반경 15cm의 원상에 각각 120°의 간격으로 위치하여 상판의 무게중심을 잡고 있다. 중심축은 상판의 중심에 고정된 축과 하판의 중심에 고정된 축을 볼 조인트가 연결하고 있다. 3개의 실린더는 병렬기구의 구동축으로 하판을 기준으로 상판의 움직임을 가능하게 한다. 실린더들의 중앙에 위치한 중심축은 전체적인 병렬기구의 무게중심의 변화에 움직임이 한 방향으로 쏠리는 것을 방지하고 실린더의 하중을 분산시키는 3개의 실린더의 움직임을 구현하는데 중요한 역할을 한다. 병렬 구조는 실제 제작에 사용될 모터를 기준으로 설계되었다. 로봇의 상체를 견뎌야하므로 모터의 토크도 무시할 수 없는 제약 조건을 고려하여 모터를 선정한 후 모터의 길이와 행정의 최대 길이를 기준으로 시스템을 설계하였다. 그림 2는 이러한 과정을 통해 제작된 병렬 구조와 각 6축으로 구성된 양팔을 가진 로봇을 연결하여 본 논문에서 구현한 직·병렬 혼합구조의 로봇 시스템이다.

III. 병렬 구조의 기구학 해석

1. 역기구학

병렬 구조의 로봇에서 역기구학이라 함은 로봇의 자세를 알고 있을 때 즉, x, y, z 세 축에 대한 자세 θ, ϕ, ψ 를 알고 있을 때 각 링크 d_1, d_2, d_3 의 길이를 구해내는 것을 말한다.

여기서 θ, ϕ, ψ 이라 함은 그림 3에서 나타난 고정좌표계인 제1좌표계(x_1, y_1, z_1 축)에 대한 이동좌표계인 제2좌표계

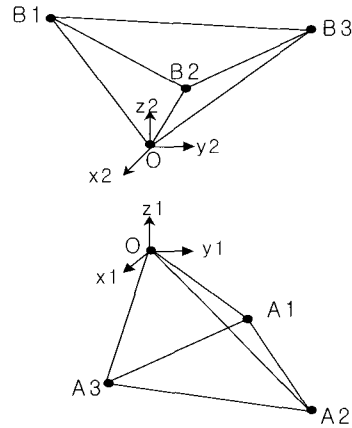


그림 3. 병렬형 로봇의 좌표.
Fig. 3. Coordinates of a parallel robot.

(x_2, y_2, z_2 축)의 오리엔테이션의 값을 나타낸다.

우선 상판 구조의 세 점의 좌표와 하판 세 점의 좌표를 나타내면 다음과 같다.

$$a_i = [a_{ix}, a_{iy}, a_{iz}]^T, b_i = [b_{ix}, b_{iy}, b_{iz}]^T, i=1,2,3 \quad (1)$$

여기서 a_i, b_i 는 각 하판, 상판의 좌표를 나타낸다.

고정좌표계와 이동좌표계의 오리엔테이션에 따른 변환 행렬은 다음 식 (2)과 같이 나타난다.

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} c\phi c\psi - s\phi c\theta s\psi & -c\phi s\psi - s\phi c\theta c\psi & s\phi s\theta \\ s\phi c\psi + c\phi c\theta s\psi & -s\phi s\psi + c\phi c\theta c\psi & -c\phi s\theta \\ s\theta s\psi & s\theta c\psi & c\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

상판의 세 개의 점 좌표를 식 (3)과 같은 과정으로 고정 좌표계에 대한 좌표로 변환한다.

$$b_i = [b_{ix}, b_{iy}, b_{iz}]^T = {}^A R_B {}^{B_i} b_i \quad (3)$$

각 링크의 길이는 하판의 세 점과 상판의 세 점 사이의 거리를 나타낸다. 식 (4)~식 (6)을 통해 각 링크의 길이 d_i 를 구할 수 있다.

$$d_i = b_i - a_i \quad (4)$$

$$d_i^2 = a_i^2 + b_i^2 - 2a_i^T b_i \quad (5)$$

$$d_i = \pm \sqrt{a_i^2 + b_i^2 - 2a_i^T b_i} \quad (6)$$

2. 정기구학

병렬로봇에서 정기구학을 구한다는 것은 각 링크 d_1, d_2, d_3 의 길이를 알고 있을 때 로봇의 오리엔테이션 즉, θ, ϕ, ψ 을 구하는 것을 말한다. 식 (5)는 식 (7)과 같이 정리 할 수 있다.

$$e_{i1}c\phi + e_{i2}s\phi + e_{i3} = 0, \text{ for } i=1,2,3 \quad (7)$$

여기에서 각 변수는 다음과 같다.

$$e_{i1} = \lambda_{i1}c\psi + \lambda_{i2}s\psi + \lambda_{i3}, e_{i2} = \mu_{i1}c\psi + \mu_{i2}s\psi + \mu_{i3}$$

$$e_{i3} = \nu_{i1}c\psi + \nu_{i2}s\psi + \nu_{i3}, \lambda_{i1} = a_{iy}b_{iw}c\theta + a_{ix}b_{iw}$$

$$\lambda_{i2} = a_{iy}b_{iu}c\theta - a_{ix}b_{iu}, \lambda_{i3} = -a_{iy}b_{iw}s\theta$$

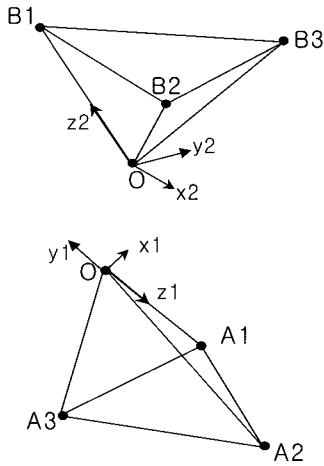


그림 4. 정기구학을 위한 좌표계 설정.
Fig. 4. Coordinates for forward kinematics.

$$\begin{aligned} v_{i1} &= a_{iz}b_{iu}s\theta, & v_{i2} &= a_{iz}b_{iu}c\theta \\ v_{i3} &= a_{iz}b_{iw}c\theta + \frac{1}{2}(a_i^2 + b_i^2 - d_i^2) \end{aligned} \quad (8)$$

그림 4의 좌표계는 정기구학을 풀기 위하여 새로이 설정한 좌표계이다. 각 좌표계의 한 축을 상판 및 하판의 한 점을 향하도록 각각 설정한다. 그림 4의 좌표계를 이용하면 식 (9)와 같이 여러 변수들이 간략화된다.

$$\begin{aligned} a_{1x} = a_{1y} = a_{2y} = 0, & \quad b_{1u} = b_{1v} = b_{2v} = 0 \\ a_{1z} = l_1 = OA_1, & \quad b_{1w} = l_2 = OB_1 \end{aligned} \quad (9)$$

위 식 (9)의 값들을 식 (8)에 대입하고 $i=1$ 에 관하여 식 (7)을 정리하면 다음 식 (10)처럼 θ 에 관한 식이 유도 된다.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - d_2^2}{2l_1l_2}\right) \quad (10)$$

여기서 l_1, l_2, d_2 의 값을 알고 있으므로 θ 의 값을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 θ 를 식 (7)에 대입하여 $i=2,3$ 에 대하여 정리하면 식 (11), 식 (12)와 같이 $c\phi, s\phi$ 의 식이 유도 된다.

$$c\phi = \frac{e_{22}e_{33} - e_{23}e_{32}}{e_{21}e_{32} - e_{22}e_{31}} \quad (11)$$

$$s\phi = \frac{e_{23}e_{31} - e_{21}e_{33}}{e_{21}e_{32} - e_{22}e_{31}} \quad (12)$$

여기서, $c^2\phi + s^2\phi = 1$ (단, $e_{21}e_{32} - e_{22}e_{31} \neq 0$)의 삼각함수를 적용하여 식 (13)과 같이 정리 한다.

$$\begin{aligned} (e_{22}e_{33} - e_{23}e_{32})^2 + (e_{23}e_{31} - e_{21}e_{33})^2 \\ - (e_{21}e_{32} - e_{22}e_{31})^2 = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$t = \tan \frac{\psi}{2}$ 일 때, $c\psi = \frac{1-t^2}{1+t^2}$, $s\psi = \frac{2t}{1+t^2}$ 의 삼각함수 공식을 이용하여 식 (8)에 대입하면 식 (14)와 같이 변수 t 에 관한 8차 방정식을 얻게 된다.

$$k_0t^8 + k_1t^7 + \dots + k_7t + k_8 = 0 \quad (14)$$

이렇게 얻어진 식 (14)를 수치해석적인 방법으로 풀게 되는데 하나의 θ 에 관하여 ψ 는 8개의 해가 존재한다. θ 와 ψ 가 정해지면 식 (11), 식 (12)에 대입하여 ϕ 의 해를 구할 수 있게 된다.

IV. 병렬형 허리 구조의 작업 공간 해석

그림 5는 앞서 기술한 병렬구조의 역기구학을 이용하여 병렬 구조의 각 링크 길이의 변화에 따른 작업공간을 시물레이션을 통해 나타내 본 것이다. 실제 설계된 병렬 구조의 각 링크의 행정길이는 10cm의 제한된 영역을 갖고 있으므로 시물레이션에도 이러한 여건을 고려하여 실제 작업 영역의 한계정도 예측할 수 있도록 하였다.

그림 5(a)는 허리의 회전 동작을 나타내기 위한 것으로 링크의 길이 변화에 따라 Z축을 중심으로 회전하는 영역을 나타낸다. 그림 5(b)는 허리의 앞뒤 굽힘 동작을 나타내기 위한 것으로 링크의 길이 변화에 따라 y축을 중심으로 회전하는 영역을 나타낸다. 그림 5(c)는 허리의 굽힘 동작을 나타내기 위한 것으로 링크의 길이 변화에 따라 x축을 중심으로 회전하는 영역을 나타낸다.

그림 6은 세 축을 동시에 구동시키는 경우에 상판의 세 점을 이은 삼각 평면의 영역과 상판의 중심점의 영역을 나타낸 것이다.

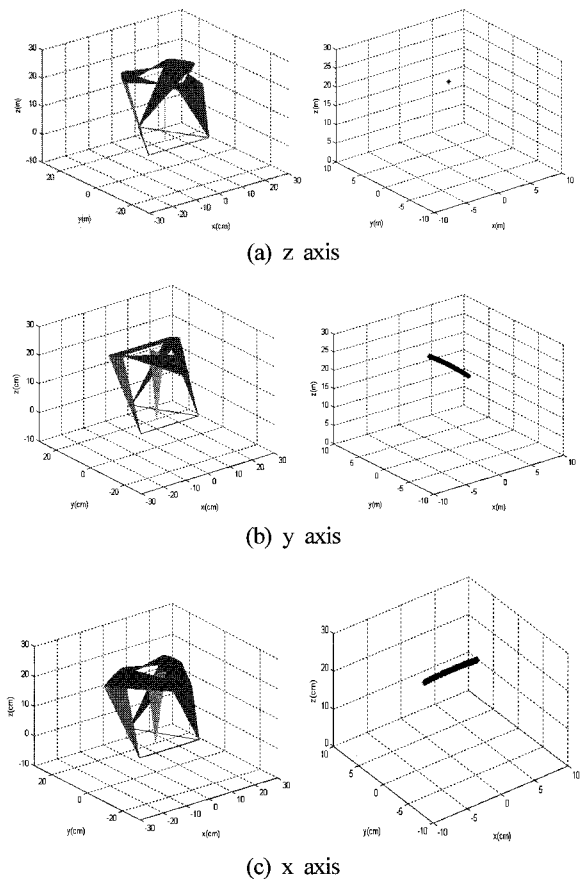


그림 5. 각축을 기준으로 회전.
Fig. 5. Rotation about each axis.

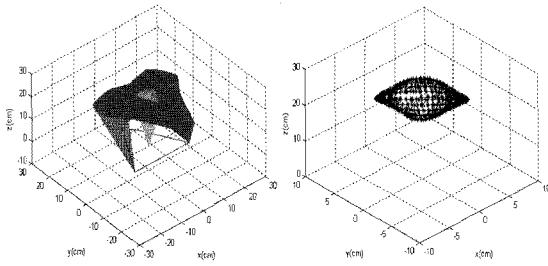


그림 6. 세 축 동시 구동시의 작업 공간 시뮬레이션.
Fig. 6. Workspace for all joint movements.

V. 직렬 병렬 혼합구조의 기구학 해석

1. 정기구학

그림 7은 본 논문에서 구현한 직렬·병렬 혼합형 구조의 기구학적 모델이다. 9자유도의 10축 좌표계로 설정하였으며 제1좌표계~제3좌표계는 병렬 구조를 제5좌표계~제10좌표계는 직렬 구조를 나타낸다[6-8]. 두 구조의 연결부에 임의의 제 4좌표계를 두어 기구학 해석 및 구조의 파악에 용이하도록 하였다.

표 1은 위의 좌표계의 설정에 따른 D-H 변수들이다. 각 좌표의 변환 행렬들을 통해 시스템의 팔 끝의 좌표를 나타내는 최종행렬 T를 구할 수 있다. 그림 8은 직·병렬 혼합

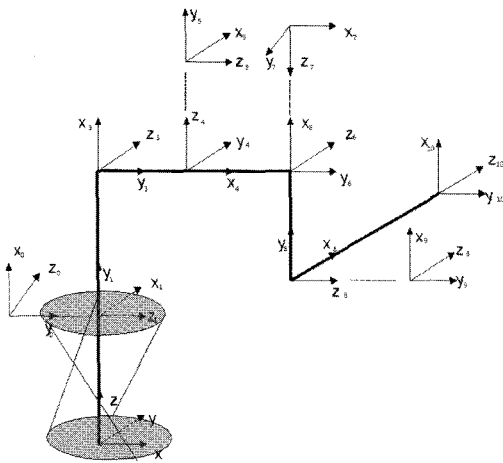


그림 7. 직렬·병렬 혼합형 로봇의 좌표계 설정.
Fig. 7. Coordinates of serial and parallel robot.

표 1. DH parameter.
Table 1. DH parameters.

	θ	α	a	d
1	pi/2	pi/2	0	d1
2	pi/2	pi/2	0	0
3	0	0	a3	0
4	pi/2	pi/2	a4	0
5	pi/2	pi/2	0	0
6	pi/2	pi/2	0	d6
7	pi/2	-pi/2	0	0
8	-pi/2	-pi/2	0	d8
9	pi/2	pi/2	0	0
10	0	0	0	d10

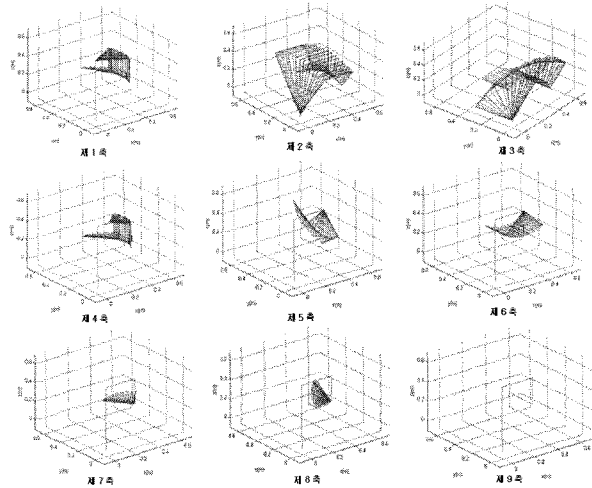


그림 8. 직·병렬 혼합 휴머노이드 로봇의 자유도.
Fig. 8. Movements of a serial and parallel robot.

구조의 휴머노이드 로봇 시스템의 9자유도의 움직임을 기구학해석을 통해 나타낸 모습이다.

2. 역기구학

본 논문에서 직·병렬 혼합의 휴머노이드 로봇의 역기구학을 구한다는 것은 10축 전체 시스템의 팔 끝의 경로로부터 병렬 허리 구조의 3개의 링크의 각각의 길이를 구하고 직렬 팔 구조의 6개 관절의 각도 값을 구해내는 것을 말한다. 이러한 구조는 redundant model로서 일반적인 방법으로는 역기구학을 구할 수 없다. 본 논문에서는 역기구학을 구하기 위해 병렬 구조와 직렬 구조의 작업공간을 고려하여 일정 작업 비율을 정하는 방법을 선택하였다. 앞에서 살펴본 바와 같이 병렬 구조는 3개 링크 길이의 한계성으로 인해 작업 영역이 매우 제한적이며 병렬 구조이므로 영역의 범위 또한 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 이에 비해 6 관절의 팔 구조는 직렬 구조이므로 작업 영역이 넓게 나타난다. 이러한 특성을 이용하여 직렬 구조와 병렬 구조의 작업 영역의 비율을 구할 수 있다.

본 논문에서는 기준 좌표계를 중심으로 x축, y축, z축으로의 작업 가능한 영역의 비율을 $x_s : x_p, y_s : y_p, z_s : z_p$ 로 설정한 후 직·병렬 혼합 구조의 end-effect의 변화에 이 비율을 적용하여 병렬 구조의 작업 영역을 설정하였다. 병렬 허리 구조의 작업 영역이 결정되면 병렬 구조의 end-effect를 구할 수 있으며, 병렬 구조의 역기구학을 통해 각 링크의 길이를 구할 수 있다.

2.1 병렬 구조의 작업 공간 한계

세 축이 동시에 구동된다고 가정할 때 작업 공간 해석에 의해 각 링크의 한계 길이를 만족하는 각 축의 최대 크기의 각을 구할 수 있다. Z축에 대하여 약 20°, X축에 대하여 약 10°, Y축에 대하여 약 10°의 한계각 범위를 갖고 있는 것으로 나타났으며, 다음 그림 9는 이와 같이 구해진 병렬 구조의 각 축에 대한 한계각을 이용하여 병렬 구조의 end-effect의 작업영역을 구한 것이다.

항상 작업영역의 범위 안에 들기 위해 이러한 한계점들 중 최소값을 기준으로 할 경우에 그림 9의 결과를 보면 알

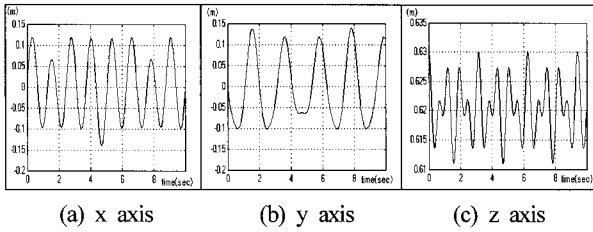


그림 9. 병렬 구조의 작업영역.

Fig. 9. Workspace of a parallel robot.

수 있듯이 X축으로의 변화량의 한계는 0.15m, Y축으로의 변화량의 한계는 0.1m, Z축으로의 변화량의 한계는 0.03m와 같이 나타났다.

위와 같은 병렬 구조의 한계점을 이용하여 결정된 작업 공간에 해당하는 팔 끝의 경로를 기준 좌표로 하여 병렬 구조의 역기구학을 통해 허리 구조의 링크의 길이를 구할 수 있으며, 직렬 구조의 역기구학을 통해 6축 로봇 팔의 각 관절의 각도 값을 얻어낼 수 있다.

초기 위치에서 전체 시스템의 팔 끝의 변화량 Δp_{10} 을 알고 있을 때 직렬 구조와 병렬 구조의 작업 비율 $r_{(x,y,z)}$: 1을 고려하면 병렬 구조의 팔 끝인 $ep_{4x}, ep_{4y}, ep_{4z}$ 값을 다음과 같이 유도할 수 있다. ip_4 는 병렬 구조 end-effect의 초기값이다.

$$\begin{aligned} ep_{4x} &= ip_{4x} + \Delta p_{10x}/r_x \\ ep_{4y} &= ip_{4y} + \Delta p_{10y}/r_y \\ ep_{4z} &= ip_{4z} + \Delta p_{10z}/r_z \end{aligned} \quad (15)$$

또한 변환 행렬 0T_4 의 위치 벡터를 살펴보면 다음 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} P_{4x} &= -\frac{1}{10}C(\theta_1)C(\theta_2)S(\theta_3) + \frac{1}{10}S(\theta_1)C(\theta_3) \\ &\quad + \frac{63}{100}C(\theta_1)C(\theta_2)C(\theta_3) + \frac{63}{100}S(\theta_1)S(\theta_3) \\ P_{4y} &= -\frac{1}{10}S(\theta_1)C(\theta_2)S(\theta_3) - \frac{1}{10}C(\theta_1)C(\theta_3) \\ &\quad + \frac{63}{100}S(\theta_1)C(\theta_2)C(\theta_3) - \frac{63}{100}C(\theta_1)S(\theta_3) \\ P_{4z} &= -\frac{1}{10}S(\theta_2)S(\theta_3) + \frac{63}{100}S(\theta_2)C(\theta_3) \end{aligned} \quad (16)$$

여기에서 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 기준 좌표계를 기준으로 제3좌표계의 오리엔테이션을 나타내는 각도 값이다.

θ_4 는 시스템의 특성상 항상 $\frac{\pi}{2}$ 의 상수값을 가지므로 0T_4 의 변환 행렬에는 상수로서 표현되어 있다. 식 (15)의 $ep_{4x}, ep_{4y}, ep_{4z}$ 의 값과 식 (16)의 P_{4x}, P_{4y}, P_{4z} 식은 같은 값을 나타내므로 연립하여 풀면 병렬형 허리 구조의 오리엔테이션을 결정하는 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 를 유도해 낼 수 있다. 단, 여기에서 기구적 특성상 병렬 구조의 end-effect는 3자유도를 가진 중심축의 끝점이다. 중심축은 한 개의 링크로 볼 수 있으며 한 개의 링크의 끝점은 2개의 회전각으로 표현이 가능하다. 즉 P_{4x}, P_{4y}, P_{4z} 값은 이 중심축의 끝점과 동

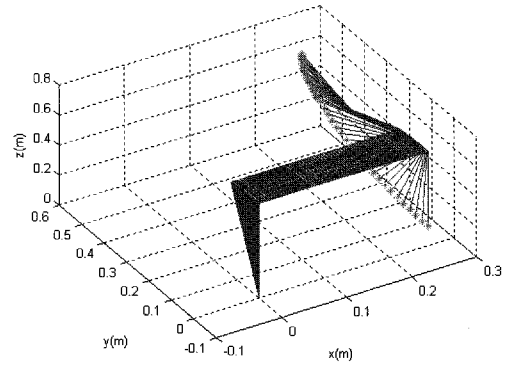


그림 10. 악수할 때 직 · 병렬 로봇의 움직임.

Fig. 10. Movements of shake hands motion.

일하므로 P_{4x}, P_{4y}, P_{4z} 값을 결정하는 오리엔테이션 인자는 2개로 충분하다. 따라서 상대적으로 회전의 한계각이 작은 θ_3 를 초기값으로 고정하면 θ_1, θ_2 를 쉽게 유도할 수 있다. 이렇게 유도해낸 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 를 이용하여 0T_4 를 구할 수 있고 구해진 0T_4 는 팔 관절 로봇의 Base 오리엔테이션 및 위치를 결정한다.

허리 구조의 끝점으로부터 전체 시스템의 end-effect인 $p_{t_{10}}$ 까지의 관계는 다음과 같이 표현되어 진다.

$$\begin{aligned} {}^4p_{10x} &= p_{t_{10x}} - {}^0p_{4x} \\ {}^4p_{10y} &= p_{t_{10y}} - {}^0p_{4y} \\ {}^4p_{10z} &= p_{t_{10z}} - {}^0p_{4z} \end{aligned} \quad (17)$$

${}^4p_{10(x,y,z)}$ 값을 기준으로 앞장에서 설명한 일반적인 직렬 로봇의 역기구학을 통해 각 축의 각도값 $\theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9, \theta_{10}$ 을 구한다. 구해진 각도값을 이용하여 ${}^4T_{10}$ 의 변환 행렬을 구할 수 있으며, 이러한 과정의 역기구학을 이용하여 얻어진 전체 시스템의 최종 변환 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$${}^0T_{10} = {}^0T_4 {}^4T_{10} \quad (18)$$

구해진 최종행렬은 직렬 · 병렬 혼합 구조 로봇의 팔 끝의 오리엔테이션과 좌표를 포함하고 있다.

2.2 역기구학 검증

역기구학의 검증을 위해 직 · 병렬 혼합 휴머노이드 로봇의 기구학에 일정 경로를 설정한 후, 기준 경로의 순기구학과 역기구학 결과를 시뮬레이션하여 비교하여 보았다. 그림 10은 사람이 악수를 청하는 동작을 묘사한 허리와 팔의 움직임을 나타내는 직 · 병렬 혼합 휴머노이드 로봇의 기준 경로이다.

그림 11(a)는 로봇의 기준 경로에 대하여 본 논문에서 제시한 역기구학의 방법으로 병렬 허리 구조의 링크 길이와 직렬 팔 구조의 각 관절 각도 값을 구한 후 그 결과를 나타낸 그림이다. 관절 각각의 움직임 영역은 다르나 end-effect의 운동 경로는 동일함을 볼 수 있다. 이를 정확히 확인하기 위하여 그림 11(b)는 로봇의 기준 경로와 역기구

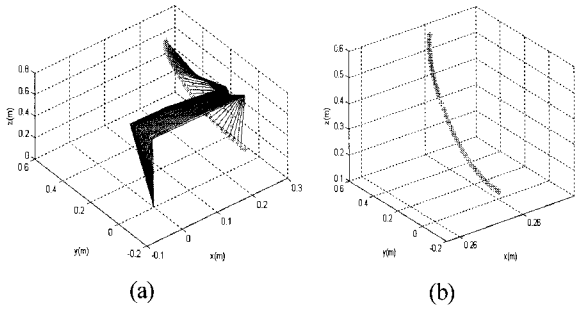


그림 11. 로봇의 기준 경로와 역기구학 해.

Fig. 11. Desired trajectory and inverse kinematics solutions.

학을 통한 시뮬레이션 결과의 팔 끝의 좌표만을 동시에 나타낸 것으로 정확하게 일치함을 확인할 수 있다.

VI. 실험

1. 실험환경

실험은 Simulink를 사용하여 DSP 장비에 다운로드 하여 실험하였다. 그림 12는 실험을 위한 시스템의 블록도이다.

본 실험에서는 시스템의 제어를 위해 Simulink를 이용하여 간단한 PD제어기를 설계하여 사용하였다. 병렬 구조의 허리 부분은 직접적으로 관절각을 제어할 수 없고 원하는 회전각에 대한 각 링크의 길이가 제어 대상이 된다. 따라서 그림 13과 같이 기준 입력은 미리 계산되어진 각 링크의 길이이며 에러를 검출하기 위하여 피드백 되는 센서 값도 potentiometer에 의한 길이 비율 값이다. 직렬 로봇 팔 관절 부분의 경우에는 원하는 회전각이 그대로 제어 대상이며 귀환되는 엔코더 값을 사용하여 에러를 검출한다.

2. 실험 결과

앞서 역기구학의 시뮬레이션 검증을 위하여 수행하였던 사람이 악수를 하는 동작을 실제 시스템에 적용하여 실험하여 보았다. 악수하는 모션을 만들기 위하여 병렬 허리 구조는 Z축과 Y축에 대해서는 움직이지 않고 X축에 대해서 허리를 굽히는 동작을 기준각도로 하였으며, 팔 관절의 경우에는 제 2 축과 제 4 축만을 이용하여 팔을 흔드는 모션을 기준각도로 정의하였다.

그림 13은 본 실험에 필요한 기준각을 기구학에 의해서 변환한 각 링크의 기준길이와 실험을 통해 얻어진 결과 값을 비교하여 오차를 나타낸 것이다. 각각의 링크의 오차를 살펴보았을 때 약 1mm 미만의 오차를 나타내고 있다. 기준 값에 매우 근사하게 제어되고 있음을 알 수 있다. 실험과정에서 상체의 무게로 인해 병렬 구조의 조인트 부분에 작지만 구조적 결함이 발생하였음에도 실험 결과가 원하는 길이로 잘 추종되고 있는 것으로 보아 제어기 설계가 잘 된 것으로 보인다.

그림 14는 두 번째와 네 번째 로봇 팔의 기준 값에 대한 실험 결과 및 에러를 나타낸 것이다. 그래프에서도 살펴 볼 수 있듯이 팔이 움직이기 시작하는 부분과 실험이 끝나 전원이 꺼지는 부분을 제외한 실제 실험이 적용되는 부분에서는 약 1°를 넘지 않는 범위의 에러를 나타내고 있다.

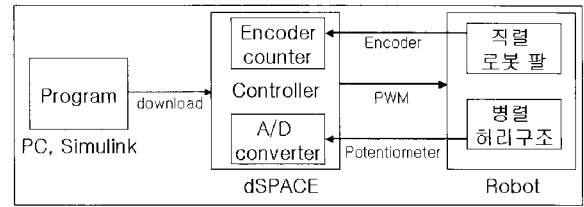
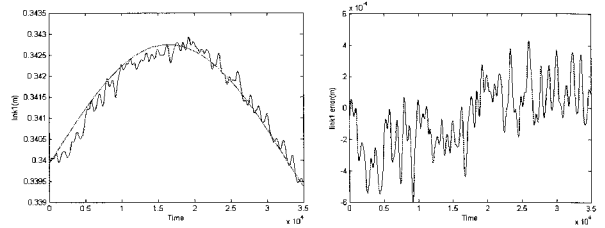
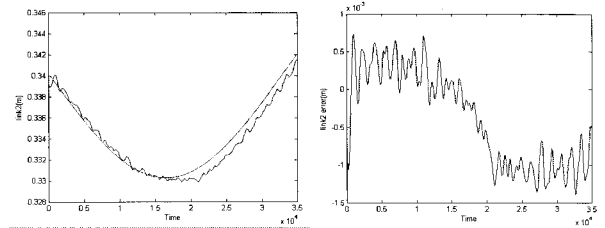


그림 12. 실험을 위한 시스템 블록도.

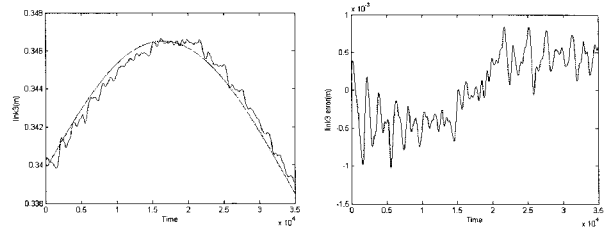
Fig. 12. Experimental setup block diagram.



(a) Link 1



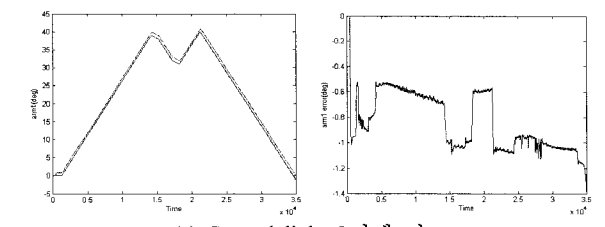
(b) Link 2



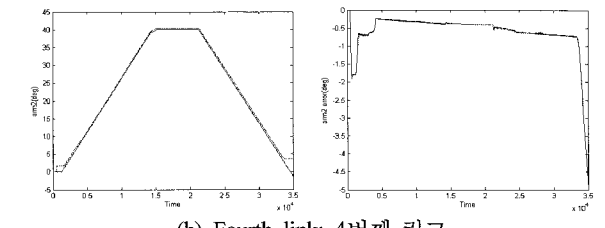
(c) Link 3

그림 13. 시뮬레이션과 실험 결과의 비교.

Fig. 13. Comparison between simulation and experiment.



(a) Second link: 2번째 링크



(b) Fourth link: 4번째 링크

그림 14. 로봇 팔의 2축 및 4축의 추종 및 에러.

Fig. 14. Tracking and error of second and fourth link.

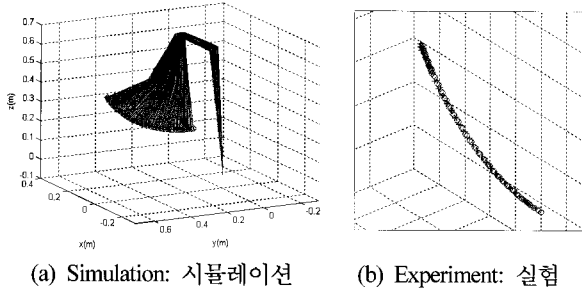


그림 15. 악수하는 로봇 자세 시뮬레이션과 실험 결과.
Fig. 15. Simulation and experiment for shaking hands motion.

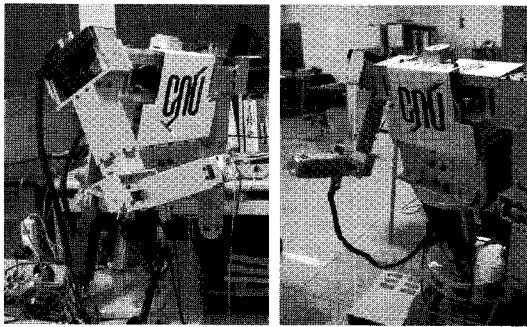


그림 16. 악수하는 모션의 실험.
Fig. 16. Real movement of shake-hands motion.

그림 15는 실험에서 얻어진 로봇의 전체적인 자세와 팔 끝의 결과를 실험에 적용한 기준 값과 비교한 것이다. 로봇 팔 끝의 경우 각 링크의 오차와 각 관절의 오차의 누적으로 인해 약간의 오차를 확인할 수 있다. 그러나 그 차이가 매우 작으며, 로봇의 전체적인 운동 경로와 움직임은 기준 값과 거의 유사하게 나타났다.

위 실험 결과들에서 보듯이 시뮬레이션 결과와 원하는 경로에 대한 기구학 해석을 통해 얻어진 데이터를 이용한 실험의 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 이것은 본 논문에서 연구된 직·병렬 혼합 구조 시스템에 대한 기구학적 분석이 효과적으로 되었음을 말한다.

그림 16은 실제로 실험 중인 장면을 나타내는 사진으로 시뮬레이션에서 악수하는 자세가 동일함을 확인할 수 있다.

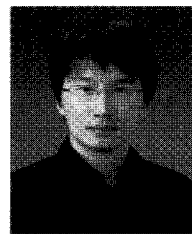
VII. 결론

본 논문에서는 6관절 두 팔을 가진 휴머노이드 로봇 시스템에 3자유도를 갖는 병렬형 구조를 도입하여 인간의 허리 움직임을 구현하기 위한 연구를 수행하였다. 로봇의 허리 구조로 병렬형 구조를 선택하여 무거운 상체 시스템의 하중에 대한 강성 및 정밀성을 보완하고자 하였고, 병렬형 허리 구조의 정기구학, 역기구학을 해석하여 기구학적 특성을 분석하였다. 또한 6관절의 직렬 로봇 팔 시스템과 3자유도 병렬 로봇 시스템의 결합을 통해 9자유도의 직·병렬 혼합 구조의 로봇을 설계하였으며, 이에 대한 기구학 해석을 수행하고 시뮬레이션을 통해 작업 영역을 분석하였다. 실험을 통해 그 결과를 시뮬레이션을 통한 기구학적 분석의 결과와 비교하여 검증하였다.

참고문헌

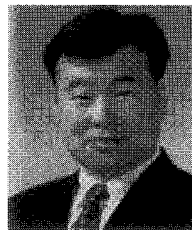
- [1] L.-W. Tsai, *Robot Analysis : The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, Wiley, 1999.
- [2] C. S. Yee and K. B. Lim, "Forward kinematics solution of Stewart platform using neural networks," *Neurocomputing*, vol. 16, no. 4, pp. 89-95, 1995.
- [3] W. K. Kim, K. K. Huh, and B.-J. Yi, "Kinematic/dynamic optimal design of a Stewart platform mechanism," *제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지*, 제2권 제1호, pp. 45-52, 1996.
- [4] 송세경, 권동수, "구속조건을 사용한 6자유도 병렬 매니플레이터의 정기구학의 단순화 해석," *제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지*, 제6권 제7호, pp. 559-567, July 2000.
- [5] M. Callegari, M. Palpacelli, and M. Scarponi, "Kinematics of the 3-CPU Parallel Manipulator assembled for Motions of Pure Translation," *ICRA*, pp. 4020-4025, 2005.
- [6] J. H. Park, W. K. Chung, and Y. I. Youm, "Computation of gradient of manipulability for kinematically redundant manipulators including dual manipulators system," *ICASE*, 제1권 제1호, pp. 8-13, Jun. 1999.
- [7] 신기태, 최진태, 이관희, 안현식, "불출기 여유자유도와 역기구학 해," *제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지*, 제3권 제5호, pp. 469-475, 1997.
- [8] Carl D. Crane III and Joseph Duffy, "Kinematic analysis of robot manipulators," Cambridge University Press, 1998.
- [9] 전풍우, "Exoskeleton 형태의 모션 캡처 장치를 이용한 이동 로봇의 원격 제어," *충남대 석사논문*, 2003.
- [10] 송덕희, "퍼지 제어를 이용한 휴머노이드 로봇 팔 시스템의 신경망 보상 제어," *충남대 석사논문*, 2005.
- [11] 이운규, "비전 시스템 기반의 두 팔 로봇의 제어," *충남대 석사논문*, 2006.

배 영 걸



2004년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2006년 충남대학교 메카트로닉스 석사 졸업. 2009년~현재 동 대학원 지능 로봇 시스템 전공 박사 과정. 관심분야는 로봇 팔, 지능형 서비스 로봇.

정 슨



1964년 9월 11일생. 1988년 미국 웨인주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사, 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능

제어 및 지능 로봇 시스템, 로봇과 인간의 상호작용, 로봇 두 팔의 협조 제어 및 응용.