

Wearable Robot Arm 의 제작 및 제어

정연구* · 김윤경* · 김경환* · 박종오*

Design and Control of a Wearable Robot

Younkoo Jeong, Yoon Kyong Kim, Kyunghwan Kim and Jong Oh Park

Key Words : Wearable Robot, Wearability, Mechanical Design, Pneumatic Control, Parallel Mechanism

Abstract

As human-friendly robot techniques improve, the concept of the wearability of robotic arms becomes important. A master arm that detects human arm motion and provides virtual forces to the operator is an embodied concept of a wearable robotic arm. In this study, we design a 7 DOF wearable robotic arm with high joint torques. An operator wearing this robotic arm can move around freely because this robotic arm was designed to have its fixed point at the shoulder part of the operator. The proposed robotic arm uses parallel mechanisms at the shoulder part and the wrist part on the model of the human muscular structure of an upper limb. To reduce the computational load in solving the forward kinematics and to prevent singularity motions of the parallel mechanism, yawing motion of the parallel mechanisms was separated using a slip link mechanism. The total weight of the proposed robotic arm is about 4 kg. An experimental result of force tracking test for the pneumatic control system and an application example for VR robot are described to show the validity of the robot.

1. 서 론

시대가 바뀌어가면서 기술의 분야에 있어서 인간과 함께 하는 ‘공존성’이란 개념은 점차 빼놓을 수 없는 중요한 ‘주요어’가 되고 있다. 이러한 개념 속에서 사람의 일부가 로봇이 되는 사이보그(Cyborg) 또는 사람에게 착용이 가능한 로봇의 개념이 등장하기 시작하였다. 특히 원격조종 분야에서는 사람이 착용을 함으로서 원격지에 있는 로봇을 직관적으로 사람이 직접 조종할 수 있도록 하기 위한 외골격형 마스터 장치(Exoskeleton Master Device)의 연구가 많은 연구자에 의해서 진행되었고 단순한 인간의 움직임을 검출하는 단계에서 벗어나 인간에게 원격지의 로봇이 겪을 가상의 힘을 느끼도록 함으로서 인간의 작업이 훨씬 실질적이 되고, 완벽한 것이 되도록 하였다 1),2). 그러나 이러한 연구는 인간의 움직임을 검출하고, 필요시 힘을 제공함으로써 상호작용을 한다는 의미에서는

큰 진전이 있었지만 ‘입는형 로봇 (Wearable Robot)’이라는 관점에서 보았을 때는 시작에 불과한 수준이었다. 사람과 상호작용을 하는 방법으로서는 반력을 제공하고 있지만 이를 위해 무거운 액츄에이터를 사용하기 때문에 장치를 벽과 같은 다른 구조물에 장착해야만 함으로서 사람의 이동성에 큰 제한을 가하게 되었다. 1993 년의 EXOS 3)는 모터의 개수와 반력을 제한하여 입고 이동해 다닐 수 있는 이동성(Portability)을 제공하였지만 자유도가 5 자유도에 그치는 단점이 있었다. Yoji Yamada 4) 등은 우주인들이 우주복을 입고 작업을 할 때 피로감을 줄이고 작업을 원활히 하는 것을 돕기 위해서 외골격형 입는형 로봇의 연구를 진행해 왔지만 손 부분의 연구에 집중하여 팔 전체에 관한 연구로서는 시작단계의 수준에 불과하다.

본 연구에서는 인간 팔의 자유도 및 구조에 관한 해부학적인 분석을 기반으로 한 입는형 로봇암의 설계, 제작 및 제어를 논하고자 한다. 본 개념을 확장하면 인간의 팔 뿐 아니라 몸통과 다리 전체로 입을 수 있는 전체적인 개념에서의 입는

* 한국과학기술연구원

로봇으로 발전시킬 수 있을 것이다.

2. Wearable Robot Arm의 구조설계

2.1 인간 상지의 운동 해부학을 근거로 한 Wearable Robot Arm의 구조 설계

인간 상지의 운동 해부학을 근거로 할 때 인간 상지의 운동학적 자유도는 9 자유도 이상이 되는 것을 알 수 있다. 즉, 어깨의 병진운동으로 2 자유도, 회전운동으로 3 자유도, 팔꿈치 부의 회전운동 2 자유도, 손목부의 회전운동 2 자유도이다 5). 그러나 인간이 가까이 있는 물체를 조작을 할 때, 즉 큰 움직임이 필요하지 않을 때 인간은 어깨의 병진운동 2 자유도를 최소로 사용하고 나머지 7 자유도로 운동을 구사한다. 이러한 개념을 근거로 하여 Wearable Robot Arm의 자유도를 7 자유도로 설계하고자 한다. 또한 인간의 팔의 해부학적인 구조가 뼈 주위로 병렬형태로 입혀있는 구조임을 생각할 때 입는형 로봇의 개발에 있어서도 병렬형의 구조가 매우 유리한 구조가 될 수 있음을 생각할 수 있다.

하지만 병렬형 메커니즘은 자유도가 높을 경우 기구학적인 해석이 복잡하고, 특이점을 지니지 않는 작업 영역이 직렬형 메커니즘에 비해 좁을 수 있기 때문에 요구 자유도의 계산 및 작업영역의 설정이 매우 신중하게 이루어 져야 한다. 장석호 등 6)은 입는형 마스터 암의 개발시에 병렬형 메커니즘을 주로 사용하였으나 자유도 산출 및 작업영역 산출이 완벽하지 않아 마스터 암의 개발 후에 특이점 회피를 위한 추가 센서의 설치 및 알고리즘의 개선 등을 위해 많은 노력을 기울여야 되었다. 이러한 문제를 미연에 방지하기 위해 면밀한 자유도의 계산을 근거로 병렬형 구조와 직렬형 구조를 적절히 조합하는 하이브리드(Hybrid) 구조를 사용할 수 있다.

3RPS 병렬 메커니즘은 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 3 개의 Revolute-Prismatic-Sphere의 조인트들이 병렬 구조로 연결되어 있는 것으로서 하판을 고정판으로 할 경우 상판은 회전각 x 축, 회전각 y 축, 병진운동 z 축의 3 자유도를 갖는다 7).

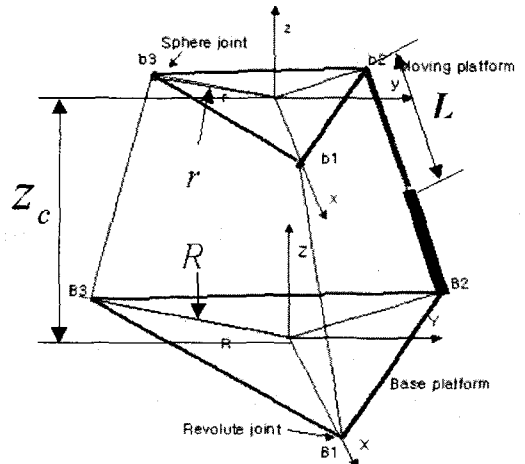


Fig. 1. Schematic of a 3RPS parallel mechanism.

이 3RPS 병렬 메커니즘을 어깨와 손목을 위해 사용할 경우 두 회전각 자유도를 사용하여 굽힘/펴짐 및 벌림/모음의 운동을 제공해 줄 수 있고 하나의 병진운동 자유도를 사용하여 사람마다 팔의 길이가 달라서 발생하는 장착시의 문제를 극복할 수 있다. 또한 3 자유도로 자유도가 낮으므로 기구학적인 해석의 부담감도 낮아 제어적인 측면에서도 유리하다.

슬립 링(Slip-ring) 메커니즘은 링형의 슬라이더가 가이드(Guider) 주위를 따라 움직이면서 상대적인 회전운동을 유발하는 전형적인 직렬형 메커니즘의 하나이다. 하지만 링의 중앙부가 비어 있기 때문에 병렬형 메커니즘과 마찬가지로 입는형 로봇에서 사용하기 유리하다.

Fig. 2는 3RPS 병렬 메커니즘과 슬립 링 직렬 메커니즘을 적절히 배합한 하이브리드 형의 입는형 로봇암의 개념도이다. 어깨부를 위해 1 개의 3RPS 병렬 메커니즘과 1 개의 슬립링 메커니즘을 혼용하였고 팔꿈치부를 위해 1 개의 4 bar linkage 메커니즘과 1 개의 슬립링 메커니즘을, 손목부를 위해 1 개의 3RPS 병렬 메커니즘을 사용하여 전체 7 자유도를 갖도록 하였다. 3RPS 병렬 메커니즘의 조인트 각도 범위는 Revolute 조인트와 Sphere 조인트의 위치 그리고 Prismatic 조인트의 움직임 범위에 의해 달라지게 된다. 또한 능동형 조인트를 사용할 경우 제공할 수 있는 조인트 토크도 이러한 파라미터의 영향을 받게 된다. 따라서 요구 조인트 각도 범위와 조인트 토크를 근거로 파라미터들을 설계하여 주어야 한다.

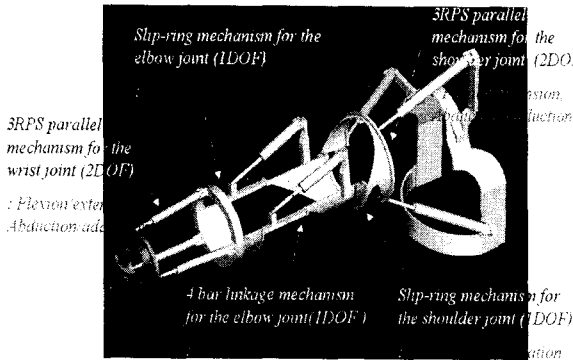


Fig. 2. Conceptual design of a wearable robotic arm.

2.2 3RPS 병렬형 메커니즘의 파라미터 설계

3RPS 병렬 메커니즘에서 설정되어야 하는 파라미터는 Fig. 1 에 사용된 기호를 사용하여 표 1 과 같이 정리될 수 있다.

표 12 3RPS Parallel mechanism 의 파라미터

| | |
|----------------|-------------------------|
| r | 상판의 크기 |
| R | 하판의 크기 |
| stroke | Prismatic Joint의 stroke |
| minimum length | Prismatic Joint의 최소길이 |

상판의 자유도를 $\alpha, \beta, \delta, X_c, Y_c, Z_c$ 이라고 하면 기하학적인 구속조건(3 개)에 의해 이 중에 3 개의 자유도만 남게 된다. 즉, 본 메커니즘은 3 개의 기구학적인 자유도를 갖게 된다. 구속조건을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\delta = 0$$

$$X_c = -\frac{1}{2} \frac{r}{R} (1 - \cos(\beta)) \cdot \cos(2\alpha)$$

$$Y_c = \frac{1}{2} \frac{r}{R} (1 - \cos(\beta)) \cdot \sin(2\alpha)$$

이 경우 α, β, Z_c 가 3 개의 자유도로 남게 된다. 여기서 Z_c 의 경우는 장착하는 어깨부의 구조에 의해 결정되어 질 수 있는 값이므로 170 mm 로 설정하였다. 3RPS 병렬 메커니즘의 설계해야 하는 파라미터 중 상판의 대각선 길이 r 의 크기는 어깨부의 굽기에 의해 결정되어지며 조작자의 신체 조건을 고려하여 70mm 로 설정하였다. Prismatic 조인트의 최소 길이는 사용하는 공압 실린더의 굽기 및 Stroke 에 의해 결정되어지므로 독립적인 파라미터는 아니다. 따라서 설계시 고려할

수 있는 파라미터는 하판의 대각선 길이인 R 과 Prismatic Joint 의 Stroke 두 개로 줄어진다.

파라미터의 설계를 위해 3RPS 병렬 메커니즘에서 제공해야 할 고려해야 할 중요한 기능을 살펴 보았다. 우선적으로 3RPS 병렬 메커니즘은 충분한 조인트 범위를 제공할 수 있어야 하고, 충분한 조인트 토크, 그리고 최대 토크의 위치가 조인트 범위에서 중앙부근에 있으며 최대 토크와 최소 토크의 크기가 적은 것이 유리하다는 결론을 내리게 되었다. 이상의 경험적인 내용을 근거로 다음 식과 같은 성능지수 함수(Performance Index function)을 정의하였다.

$$PI(p, L) = JR(p, L) \cdot W_1 + JT(p, L) \cdot W_2 + UF(p, L) \cdot W_3$$

여기서 JR, JT, UF 는 각각 조인트 범위, 조인트 토크, 조인트 토크의 균일성 정도를 나타내는 함수들이고 W_1, W_2, W_3 각각 함수들의 기여도를 조정하기 위한 Weight function 이다. 각각의 함수는 해석이 가능한 범위에서 최대의 값과 최소의 값을 근거로 Normalized 되었고 $W_1 + W_2 + W_3 = 1$ 이 되도록 각각의 Weight function 은 조절되어 있다. 본 Weight function 은 설계자가 요구 설계 사양 및 설계 경험을 근거로 수렴의 방향을 설정할 수 있도록 한다. 본 성능지수에는 최대 값이 존재하며 성능지수가 최대가 되는 위치의 Stroke 및 R/r 값을 사용해서 파라미터 설정을 하였다.

본 해석 결과 표 2 와 같은 목표 설계 사양을 얻게 되었다. Rotational Motion 은 슬립 링 메커니즘에 관한 설계 사양이고 팔꿈치의 굽힘과 펴짐(Flexion/extension)의 경우는 4-bar linkage mechanism 을 해석한 결과 얻은 목표 설계사양이다.

표 2 목표 설계 사양

| | Shoulder joint | | Elbow joint | | Wrist joint | |
|---------------------|----------------|------|-------------|-----|-------------|----|
| | deg | Nm | deg | Nm | deg | Nm |
| Flexion/Extension | 86 | 17.7 | 97 | 7.1 | 60 | 4 |
| Adduction/Abduction | 86 | 17.7 | - | - | 60 | 4 |
| Rotational Motion | 90 | 2.2 | 90 | 2.2 | - | - |

2.3 Wearable Robot Arm 의 상세 설계

이상의 분석에서 얻은 파라미터 값을 근거로 마스터 암의 각 부분에 관한 상세한 설계가 이루어

어졌다. 본 설계를 위해서는 3D CAD Software 인 Pro/Engineer 를 사용하였다. 본 설계에서는 상세한 설계 및 간섭 확인이 이루어져 Prototype 을 가공하였을 경우 발생할 수 있는 문제를 최소화 하도록 노력하였다.

3. Wearable Robot Arm 의 제작 및 실험

3.1 Wearable Robot Arm 의 제작

앞서 설계된 마스터 암의 제작을 위해 주물, 밀링, 선반 작업이 주로 이루어졌고 재료로는 저가이면서도 중량대비 강성이 우수한 알루미늄을 선택하여 가공을 하였다. 어깨 고정부는 작업자의 신체 구조에 맞추어 현장 맞춤 형식으로 제작하였고 나머지 부분은 3 차원 설계 도면을 근거로 제작하였다. 어깨 고정부는 작업자의 가슴부에 단단히 고정될 수 있도록 3 차원 형상으로 제작 되었고, Prismatic joint 를 위해 공압 실린더(Pneumatic cylinder)가 사용되었다. 슬립 링 메커니즘에 반력을 제공하기 위해 회전형 공압 실린더(Rotary pneumatic actuator)가 사용되었다. 공압 실린더의 길이를 측정하기 위해 포텐시오미터(Potentiometer)를 장착하였고 슬립 링 회전각을 측정하기 위해 로터리 포텐시오미터(Rotary potentiometer)를 장착하였다.

공압 액츄에이터는 중량대비 큰 힘을 제공할 수 있는 장점이 있지만 공기가 압축성 특성을 갖기 때문에 힘이 전달되는 과정에서 반응이 느리게 된다는 단점을 지니고 있다. 또한 상용화된 공압 제어기가 매우 무겁고 크기 때문에 로봇암 가까이 장착할 수 없어 시스템의 착용성을 감소시킨다. 따라서 제어가 용이하며, 응답성을 향상시키고, 로봇암에 장착할 수 있을 정도로 충분히 작은 소형 공압 비례 제어 밸브를 제작하여 사용하였다. 비례 제어 밸브 1 개의 크기는 대략 20mm*30mm 이며 4 channel 형으로 제작을 하여도 손바닥 안에 들어올 정도로 크기가 작다. 또한, 두 개의 공압 센서가 달려 있어서 직접적으로 차압(Differential pressure)을 측정할 수 있도록 되어 있어 실린더의 추력을 직접적으로 측정할 수 있다. Fig. 3 은 전체적인 공압 제어 시스템의 Block diagram 이다. 기구학 해석 및 외부와의 통신을 위해서 386 EX digital processor (Stand-alone 형 제어기)를 공압 액츄에이터의 Closed loop 제어를 위해 아날로그 형태의 Closed loop 제어기를 설계하였다. 아날로그 제어기에는 압력센서를 위해 Instrument Amplifier 와 전류 증폭기인 VI-converter 와 신호를 교환하기 위한

Interface part 가 포함되어 있다.

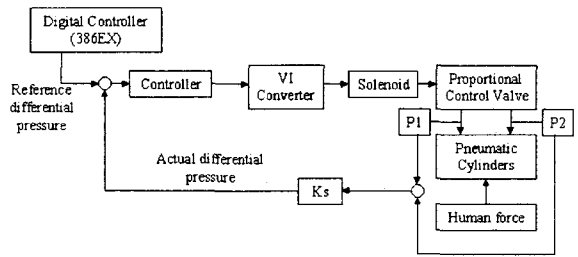


Fig. 3. Schematic of pneumatic control system

3.2 공압 제어 실험

Fig.4 는 개발된 소형 공압 비례 제어 밸브 및 공압 제어 시스템을 사용하여 얻어진 실험 결과를 보여준다. 본 결과는 계단형 입력에 작업자에 의한 disturbance 입력이 있는 경우의 실험 결과이다. 목표 입력값이 0 에 가까운 경우 작업자는 작은 마찰력을 느끼며 실린더를 움직일 수 있었지만, Offset 의 크기가 존재할 경우 Positive 또는 Negative 형태로 추력을 느끼며 움직이게 된다. 여기에도 약간의 비대칭성은 존재하지만 목표 입력값을 잘 추종하고 있는 것을 알 수 있다. 계단 입력 부에서 압력이 작업자의 움직임을 어느 정도 따라가는 특성은 제어기의 응답성능의 문제일 수도 있지만 압축성 공기의 특성에 의해 목표 입력을 추종하는데 큰 시간 지연이 존재하기 때문으로 보인다.

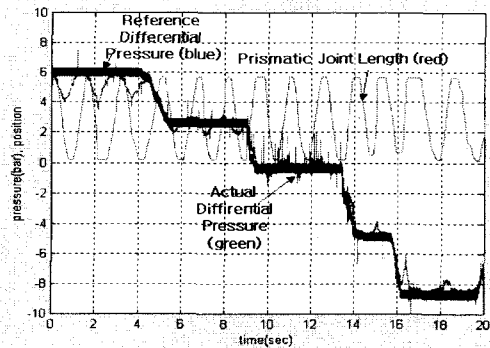


Fig. 4. Force tracking performance (step-wise reference input).

3.3 가상로봇 구동

가상 로봇을 구동하기 위해서는 각 공압 액츄에이터에 장착되어 있는 센서로부터 값들을 읽어

들인 후 3RPS 병렬형 메커니즘에서 순방향 기구학(Forward Kinematics) 해석을 한 후 나머지 직렬형 메커니즘을 연동시키면 된다. Fig. 5 는 순방향 기구학 해석을 위한 본 로봇암의 해석 모델이다.

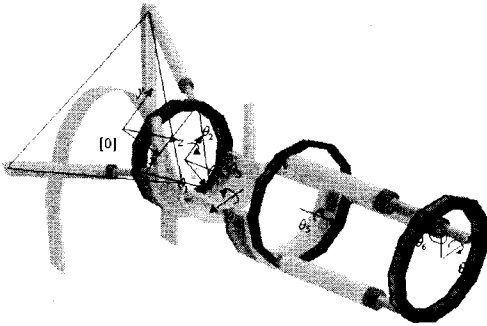


Fig. 5. Forward kinematics model of the wearable Robot Arm.

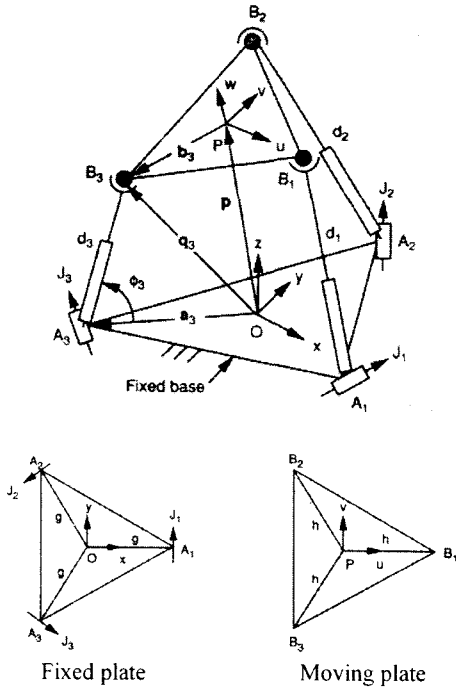


Fig. 6. Kinematics model of a 3RPS parallel mechanism.

Fig. 6 에서 보는 바와 같은 3RPS 병렬 메커니즘의 기구학 모델에서 Sphere 조인트의 위치에 해당하는 벡터는 다음의 식으로 표현되어질 수 있다.

$$\bar{q}_1 = \begin{bmatrix} g - d_1 c \phi_1 \\ 0 \\ d_1 s \phi_1 \end{bmatrix} \quad \bar{q}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(g - d_2 c \phi_2) \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}(g - d_2 c \phi_2) \\ d_2 s \phi_2 \end{bmatrix} \quad \bar{q}_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(g - d_3 c \phi_3) \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}(g - d_3 c \phi_3) \\ d_3 s \phi_3 \end{bmatrix}$$

이 경우 위판의 세 Sphere Joint 가 하나의 정삼각형을 이루고 있으므로 아래와 같은 구속조건을 갖는다.

$$|B_i B_{i+1}| = \sqrt{3}h, \text{ or } [\bar{q}_i - \bar{q}_{i+1}]^T [\bar{q}_i - \bar{q}_{i+1}] - 3h^2 = 0$$

위의 구속조건에 앞의 q 벡터를 입력하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다. 주어진 d 벡터로부터 아래의 식을 사용해서 θ_i 벡터를 산출해 내면 상판의 중앙점을 나타내는 벡터인 P 벡터를 q 벡터의 합의 형태로 구할 수 있다. 이를 위해 Newton-Rhapson Method 를 사용하였다 8).

$$a_i c \phi_i c \phi_{i+1} + b_i s \phi_i s \phi_{i+1} + c_i c \phi_i + d_i c \phi_{i+1} + e_i = 0$$

본 식에서 각 변수는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} a_i &= d_i d_{i+1} \\ b_i &= -2d_i d_{i+1} \\ c_i &= -3gd_i \\ d_i &= -3gd_{i+1} \\ e_i &= 3g^2 + d_i^2 + d_{i+1}^2 - 3h^2 \end{aligned}$$

제작된 로봇 암의 전체적인 순방향 기구학은 각 부분에서 구해진 변환행렬의 곱으로 산출되어질 수 있다.

이상의 순 기구학 해석을 기반으로 한 가상로봇을 OpenGL 로 구축하였다. Fig. 7 은 구현된 가상로봇의 모습이다. Fig. 8 은 Wearable Robot Arm 으로부터 얻은 신호를 순 기구학 해석을 거친 후 사람의 모양으로 재 구성한 경우이다. 분산되어 있는 Wearable Robot Arm 의 자유도를 사람 팔의 자유도로 재 구성하였다. Fig. 9 은 로봇을 착용하고 가상 로봇을 움직이고 있는 모습이다.

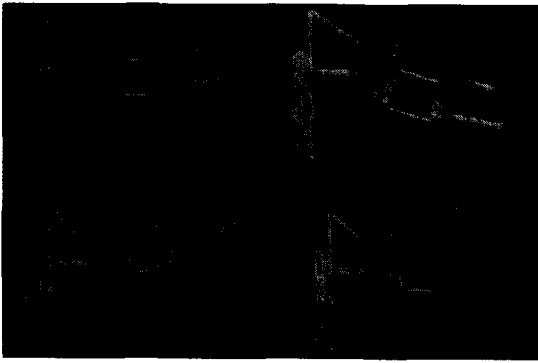


Fig. 7. Movement of the virtual robot using forward kinematics analysis.

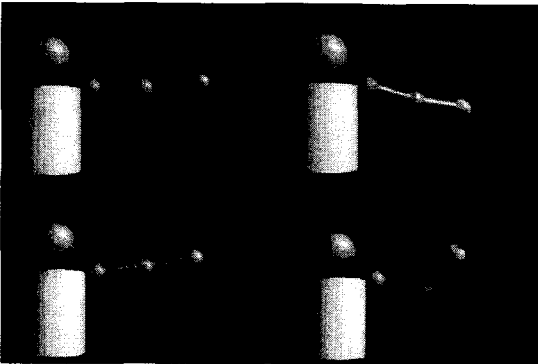


Fig. 8. Movement of the human virtual model.



Fig. 9. Operator wearing the proposed robot arm.

4. 결론

인체의 운동 해부학적인 관점에서 상지의 구조 및 자유도를 해석하였다. 그 결과를 기준으로 착용이 용이하고 착용자에게 부담을 줄이는 형태의 Wearable Robot Arm의 구조 설계를 하였다. 자유도

의 분석을 통한 하이브리드형 구조를 설계하였고 이를 제작하여 기본적인 공압 시스템의 성능 평가 실험을 수행하였다. 본격적인 반력 또는 지원력의 실험을 하기에 앞서 기구학적인 검증 및 적용 예를 검증하기 위해 가상 로봇을 구축하여 기능을 검증하여 보았다. 앞으로 가상 로봇과 공압 시스템을 연동하여 착용자의 힘을 지원해 주거나 반력을 제공하는 본격적인 의미에서의 상호작용에 관한 연구를 수행하고자 한다. 특히 고정점을 사람의 몸으로 설정하고 있는 로봇으로서 반력의 의미를 고찰해 보고자 한다. 착용자의 움직임 의도를 파악하여 로봇의 움직임 방향을 결정하기 위해 생체신호와와의 결합도 고려해 볼만한 연구 분야이다.

본 Wearable Robot Arm은 로봇 원격조종, 의료용 보조기, 엔터테인먼트를 위한 입출력 장치, 힘 보조 장치 등으로 활용이 가능할 것이다.

후기

공압 비례제어 밸브의 제작 및 실험에 도움을 주신 한국 항공대학의 홍예선 교수님께 감사의 말씀을 전한다. 적용 실험시 로봇 착용자로서 자원에 주신 지능형 마이크로시스템 개발 사업단의 Chi-pheng Chung 연구원님께 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

- (1) Akito Nakai, etc., "Development of 7 DOF Exoskeleton Type Haptic Interface," *Journal of Robotics Society of Japan*, vol 17, no. 8, pp.1126-1133, 1999.
- (2) <http://www.cs.utah.edu/~jmh/Haptics.html>
- (3) <http://sbir.gsfc.nasa.gov/SBIR/successes/ss/035text.html>
- (4) Yoji Umetani, Yoji Yamada, Tetsuya Morizono, Tetsuji Yoshida, Shigeru Aoki, 'Skil Mate, Wearable Exoskeleton Robot,' 0-7803-5731-0/99, 1999IEEE
- (5) '움직임 해부학, 조상현역, 영문출판사, 1999
- (6) Jungtea Kim, etc, "Singularity Analysis and its Avoidance for KIST Hybrid Master Arm," 99 ICAR, pp. 509 - 514, 1999
- (7) K. M. Lee and D. K. Shah, "Kinematic Analysis of a Three-Degrees-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 4, No. 3, June 1988.
- (8) 'Robot Analysis', Lung-Wen Tsai, A Wiley-Interscience Publication, 1999