

무대 공연이 가능한 대형 줄 인형 로봇 기구 시스템 설계

임홍석^{*†} · 조민수^{**} · 최순영^{*}

* 인천정보산업진흥원 부설 인천지능형로봇연구소, ** 윈텍

Design of Large-size Marionette Robot Mechanism System Capable of Stage Performances

Hong Seok Lim^{*†}, Min Su Cho^{**} and Soon Young Choi^{*}

* Incheon Intelligent Robotics Center

** WINTECH

(Received March 23, 2012 ; Revised July 19, 2012 ; Accepted July 19, 2012)

Key Words: Marionette robot(줄 인형 로봇), Mobile stage(모바일 스테이지), Wire controller(와이어 컨트롤러), Puppet(인형)

초록: 줄 인형은 인형에 연결된 줄을 당겨 여러 동작을 구현하는 인형이다. 이러한 줄 인형은 사람의 손으로 조작하여야 하므로 인간 크기의 대형 인형으로 무대 공연을 하는 것은 불가능했다. 그러나 와이어로 연결된 구동기를 활용하여 동작하는 줄인형 로봇은 다른 로봇이나 사람과 함께 공연하는 것이 가능한 인간 크기 줄 인형으로 사용될 수 있다. 그리고 모바일 플랫폼과 구동기, 줄 인형 로봇이 장착된 모바일 스테이지를 사용하여 이 논문에서 설계된 대형 줄 인형 로봇 시스템은 별도의 무대 장치 없이도 무대 위 자유로운 이동과 회전이 가능하도록 하였다. 설계된 줄 인형 로봇 구동기 구조의 타당성은 동역학 해석을 활용하여 검증하였고 줄 인형 로봇 시스템의 효율성과 안전성은 실제 로봇을 제작하고 구동시켜 검증되었다.

Abstract: A marionette is a moving puppet that can be made to perform several actions by pulling wires connected to the puppet. Because a marionette is operated by hand, a stage performance with a human-sized marionette is impossible. However, a marionette robot operated using a wire controller could be used as a human-sized marionette to conduct a stage performance with other robots or actors. In addition, by using mobile stages that utilize mobile platforms, a wire controller, and the marionette robot body, the large marionette robot system designed in this study can be made to rotate and translate freely in a stage performance. The feasibility of the structure of the marionette robot wire control system is verified by using dynamics analysis. Furthermore, the efficiency and safety of the robot is demonstrated by manufacturing and operating a prototype robot.

1. 서 론

줄 인형극은 인형을 매달은 줄을 손으로 조작하여 인형을 움직이는 인형극이다. 이러한 인형극에 사용되는 줄 인형은 동양과 동유럽 등지에서 오랜 역사를 가지며 발전되어 왔다. 그러나 기존의 줄 인형은 사람의 손으로 조작하다 보니 인형의 크기에 제한을 받을 수 밖에 없고 숙련된 조종 기술을

필요로 하기 때문에 줄 인형극은 특정 연출자에 의해 소극장 규모의 형태로만 공연이 가능하였다. 줄 인형은 조작 정도에 따라 충분히 현실감 있는 동작이 가능하므로 이를 대형화하고 대형 공연장에서 배우나 다른 로봇들과 함께 공연하는 것이 가능해진다면 새로운 공연문화로서의 시장 창출이 가능할 것으로 예측된다.

이러한 기존 줄 인형의 한계를 극복하기 위해 로봇기술이 응용되기 시작하고 있다. 이러한 노력은 아직 초기단계로 주로 줄 인형 제어를 로봇 기구로 대체하려는 연구가 대부분으로 싱가포르,⁽¹⁾ 일본,⁽²⁾ 인도,⁽³⁾ 미국,⁽⁴⁾ 한국⁽⁵⁾ 등에서 수행되었으나

† Corresponding Author, limit75@iit.or.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

직접 줄 인형극을 대체할 정도의 수준에는 이르지 못했다. 또한 사람이 제어하는 방식을 기초로 하여 로봇의 효율성을 높이기 위해 최소한의 구동기로 최대한의 DOF(degree of freedom)를 갖게 하려는 연구가 수행되었으며⁽¹⁾ 또한 모션 캡처(Motion Capture)와 결합하여 보다 효과적으로 목표 동작에 다가가기 위한 시도도 이뤄지고 있다.⁽²⁾

줄 인형 로봇 구동기에 대한 다양한 시도가 이뤄지고 있지만 줄 인형의 이동성은 공연을 위해 반드시 해결되어야 할 부분이다. 복수의 인형들이 한 무대에서 공연할 때, 회전이나 교차로 인한 간섭이 문제가 된다. 기존의 인형극 제어기의 경우 줄 인형을 움직이는 수단으로 무대의 프레임에 매달려 있는 암 구조물을 이용하여 2 차원 운동을 하거나⁽¹⁾ 자석을 이용하여 제어기를 무대 천정에 매달고 자석을 이동시키는 방법,⁽⁶⁾ 전방향성을 갖는 자석 바퀴를 활용하는 방법^(7,8) 등이 연구되고 있다. 그러나 로봇팔을 사용하는 방법은 구조물이나 배선의 영향으로 인해 회전 운동이나 줄 인형 간의 교차에 어려움이 생기며 자석을 사용하는 경우는 로봇 아래쪽으로 하중이 전부 실리게 됨으로 로봇 전체의 하중보다 큰 힘을 필요로 하는 문제점이 발생한다. 또한 자석 바퀴의 활용은 이동을 위해 레일 설치가 필요하며 설치 레일 내로 이동성이 제약된다는 단점이 발생한다.

본 논문에서는 기존 줄 인형의 한계를 극복하기 위해 사람 크기 수준의 대형 줄 인형 로봇 몸체를 구동할 수 있는 로봇 구동기를 개발하고 하부 모바일 플랫폼과 상부 구동기, 그리고 구동기와 줄로 연결된 로봇이 장착한 형태의 모바일 스테이지를 개발하여 별도의 구동기 이동을 위한 무대 장치가 없이도 무대 위 자유로운 이동과 회전이 가능하도록 하였다. 이를 위해 설계된 줄 인형 로봇 구동기 구조는 해석 시뮬레이션을 통해 구동기 움직임과 팔 동작과의 연관성을 분석하여 타당성을 검증하였고 개발된 줄 인형 로봇 시스템의 효율성과 안전성은 실제 로봇을 제작하고 구동시켜 봄으로써 검증하였다.

2. 줄 인형 로봇 몸체 설계

기존 줄 인형은 사람의 손과 팔로 조종되기 때문에 사람 손과 팔의 크기를 고려하여 대부분 90cm 이하의 소형으로 제작되어 있다. 이러한 소형 줄 인형은 인체 비례에 맞추어 제작되었을 경우에는 얼굴이 작아서 관객이 관람석에서 보기가 어렵다. 그래서 인형의 특징을 쉽게 볼 수 있도록

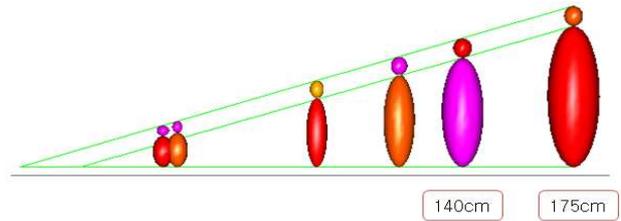


Fig. 1 Height-to-head size ratio

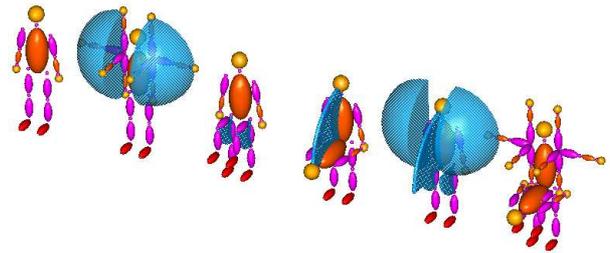


Fig. 2 Range of marionette motion

머리가 과장되게 크고 동작을 쉽게 인식할 수 있도록 손과 발도 크게 구성하는 경향이 있다.

본 연구에서 설계한 줄 인형 로봇 몸체는 140cm 내외의 대형 로봇이므로 인체 비례와 유사하게 신체 각 부위를 구성할 필요성이 있다. 신장 140cm는 남아 10 세에서 11 세의 평균 신장에 해당하므로 Fig. 1 에서 보여주는 것과 같이 이 신장에 해당하는 남아의 머리, 몸통, 팔, 다리의 비율에 맞추어서 줄 인형 로봇 몸체의 각 부분 크기를 결정하고 설계를 진행하였다.

기존 줄 인형의 동작을 분석해보면 Fig. 2 에서 보여주는 것과 같이 어깨 관절을 중심으로 하는 팔 동작과 고관절을 중심으로 하는 다리 동작, 허리를 숙이는 허리 동작 그리고 목 관절을 중심으로 하는 목 동작으로 구성되어 있다. 다리동작은 고관절에 힌지를 구성하고 무릎 부분에서 와이어를 당겨서 동작을 생성한다. 줄을 당기는 속도에 따른 관성으로 발을 퍼는 동작을 만들 수도 있다. 허리동작은 허리 부분에 힌지 구조를 구성하고 어깨 부분에 장착된 와이어를 당기고 푸는 과정을 통하여 동작을 생성하며 목 동작도 목 관절에 힌지 구조를 구성하고 머리 끝에 와이어를 당기는 과정을 통하여 동작을 간단하게 생성할 수 있다. 마지막으로 팔 동작은 줄 인형에서 가장 강조되는 동작으로 팔 끝에 매달린 와이어를 이용하여 3 차원적인 동작을 생성한다. 자유로운 팔 동작을 만들기 위해서 기존의 줄 인형은 팔의 상박부를 줄로 구성하고 어깨부분과 하박부의 팔꿈치 부분이 이 와이어로 연결되어있다. 그러나 소형의 줄 인형에서는 상박부의 길이가 짧기 때문에 와이어로 연결된 구조로도 팔 동작 구현이 가능하지만 대형

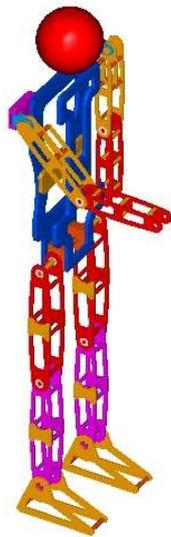


Fig. 3 Structure of marionette robot body

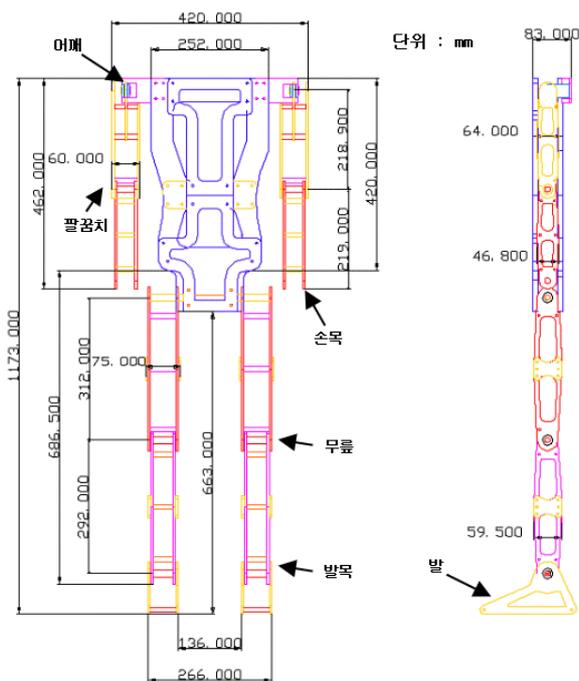


Fig. 4 Structure of marionette robot leg joint

줄 인형에서는 상박부를 와이어로 구성하였을 경우 팔 끝부분에 연결된 와이어로 동작 시 발생하는 큰 관성 제어가 불가능하여 팔이 흔들리는 현상이 발생한다. 따라서 팔 부분의 동작을 자연스럽게 구성하기 위해서는 새로운 구조가 필요하다. 이와 같이, 줄 인형 동작을 유사하게 구현할 수 있는 로봇 개발을 위해 본 연구에서는 줄 인형에서 가장 중요한 팔 동작을 중심으로 다리 동작과 목 동작이 가능한 줄 인형 로봇을 설계하였다. 설계된 전체 줄 인형 로봇 몸체는 Fig. 3에 나타내었고 각 부분의 치수는 Fig. 4에 나타내었다.

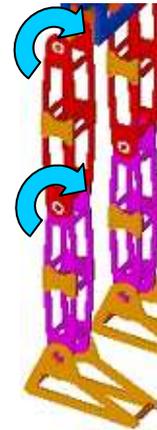


Fig. 5 Structure of marionette robot leg joint

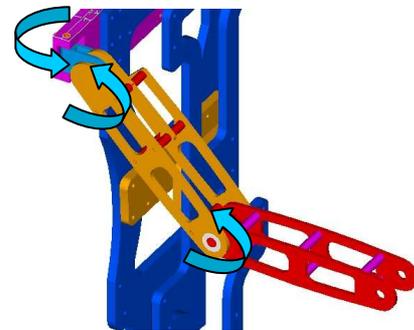


Fig. 6 Structure of marionette robot arm joint

우선 목 동작은 줄을 이용하여 조정할 경우에 동작이 1차원적으로 제한되기 때문에 머리 부분에 구동기를 장착하여 머리의 좌우회전과 상하회전의 2가지 동작을 할 수 있도록 구성하였고 다리 동작은 Fig. 5에서 나타낸 것과 같이 고관절과 무릎 관절 부분을 힌지 구조로 구성하고 무릎 관절부에 와이어를 연결하여 조정함으로써 구현하였다.

다음으로 팔 동작은 소형의 줄 인형과 다르게 팔의 상박 부분을 와이어로 구성하는 대신 어깨 부분에 2개의 힌지를 복합적으로 구성하고 팔꿈치 부분에 1개의 힌지를 구성하여 팔 끝 부분에서 와이어로 조정하면 기존 줄 인형에서 구현되는 팔 부분의 3차원 동작이 가능하도록 구성하였다. 팔 부분의 구조는 Fig. 6에 나타내었다.

3. 줄 인형 조종을 위한 구동 시스템

줄 인형 로봇을 동작시키기 위한 줄 인형 구동 시스템은 줄을 당기고 푸는 것으로 줄 인형 로봇 몸체의 팔과 다리를 조종하여 원하는 동작을 구현

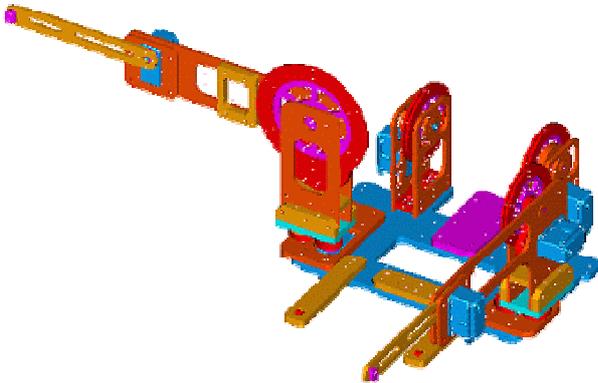


Fig. 7 Wire control system of marionette robot

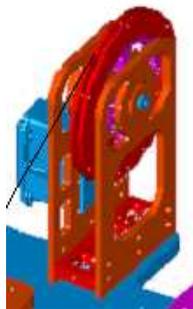


Fig. 8 Wire control system of marionette leg part

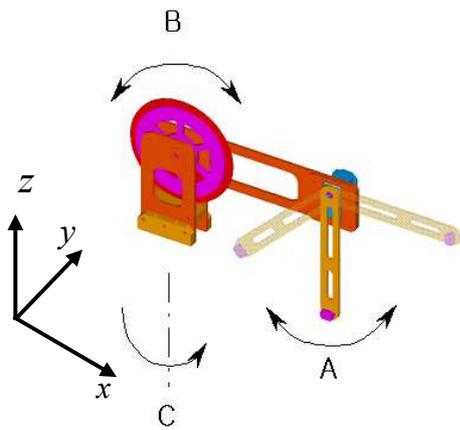


Fig. 9 Wire control system of marionette arm part

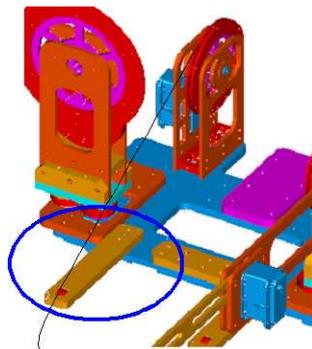


Fig. 10 Roller structure of wire control system

하는 시스템이다. 이 구동 시스템은 줄 인형 로봇의 상부에 위치하면서 줄 인형을 동작시키는 장치이므로 로봇 구동 시 진동을 최소화하고 지지 구조를 간략화 하기 위해 소형이면서 경량화된 구조가 필요하다.

줄 인형 구동 시스템의 구조는 Fig. 7 에서 보여주는 것과 같이 줄 인형의 무릎 부분에 장착되어 있는 줄을 당겨서 다리 동작을 만드는 2 개의 구동 모듈과 팔 끝부분에 장착된 줄을 당겨서 팔 동작을 만드는 2 개의 구동 모듈로 구성하여 소형화를 구현 하였으며 재료 선택과 구조 간략화를 통해 경량화를 실현할 수 있다.

다리 부분은 다리를 들었다가 내리는 동작만을 수행하게 되므로 다리 동작 모듈은 Fig. 8 에서 보여주는 것과 같이 줄을 당기고 푸는 기능만 수행할 수 있도록 구동기와 롤러의 조합으로 단순하게 구성할 수 있다. 그러나 다리 부분 구동 모듈과는 다르게 3 차원적으로 움직이는 팔 부분의 운동을 조정하기 위해서는 단순하게 줄을 당기고 푸는 기능만으로는 구현이 불가능하다. 따라서 팔 동작 구동 모듈은 당기는 위치를 지정하는 A 부분과 당기는 길이를 조정하는 B 부분 그리고 팔의 좌우 움직임을 조정하기 위해 팔의 좌우 회전 각도를 조정하는 C 부분으로 구성된다. 이러한 3 차원적인 운동이 가능한 구동 시스템은 Fig. 9 에서 나타낸다. A 부분과 B 부분의 조종 방법에 따라 줄 인형의 팔 부분은 구동 속도와 구동 궤적 등의 대해 다양한 운동 특성을 나타낼 수 있다.

팔 부분 구동 시스템 구조를 좀 더 자세히 분석해보면 Fig. 8 에서 C 부분은 팔의 좌우 회전을 위해 z 축 방향으로 회전하고 A 와 B 부분은 팔의 올림과 내림을 위해 y 축 방향으로 회전을 한다. 이 중 A 와 B 부분은 같은 축으로 회전을 하나 각 부분의 회전은 팔 동작에 대해 다른 운동 특성을 나타낸다. 자세한 특성 분석은 시뮬레이션 결과를 사용해 5 장에서 설명하도록 한다.

또한 와이어가 움직이면서 구조물에 의해서 발생하는 마찰을 최소화하기 위해서 Fig. 10 에서 보여주는 것과 같이 롤러 구조를 적용하여 줄 인형 로봇 동작 시에 마찰을 최소화할 수 있도록 하였다.

4. 줄 인형 로봇 시스템 구조

기존의 줄 인형은 무대 위에서 사람이 직접 조정하는 방식이어서 대형화되기 어렵고, 개발되었던 줄 인형 로봇도 넓은 무대 공간을 활용하여

공연하기 위해 대형 줄 인형을 조정하기에는 어려움이 많았다. 특히 천정에 강관을 설치하고 자석을 이용하여 움직이거나 설치된 이송 레일 위를 움직이는 구조의 줄 인형 로봇은 넓은 무대를 자유롭게 이동하는데 여러 가지 문제점이 있었다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서 제시한 줄 인형 로봇 시스템은 하부 모바일 플랫폼을 이용하여 무대 공간 위를 자유롭게 움직이는 구조여서 다양한 무대 공간에서 공연이 가능한 장점이 있다. 하부 모바일 플랫폼이 장착된 대형 줄 인형 로봇을 무대에서 작동시키기 위해서는 줄 인형 로봇 몸체와 줄 인형 로봇을 구동하는 구동 시스템 그리고 무대 공간 위를 자유롭게 움직일 수 있는 하부 모바일 플랫폼이 하나로 결합된 모바일 스테이지의 제작이 필요하다.

모바일 스테이지의 구조는 구동 시스템이 줄을 이용하여 로봇의 관절부를 당기는 기능을 가지고 있기 때문에 줄 인형 로봇 시스템의 상부에 위치해야 가장 안정된 동작 구현이 가능하며 줄 인형과 이를 조정하는 구동 시스템을 이송하는 하부 모바일 플랫폼은 하부에 위치하여 무대 위를 자유롭게 이동할 수 있도록 하여야 한다. 그리고 이 두 부분을 연결하고 줄 인형 로봇의 흔들림을 최소화한 동작을 나타낼 수 있도록 구성 부분을 모두 지지할 수 있는 한 개 또는 두 개의 기둥을 사용하여 위 아래 부분을 연결한 모바일 스테이지를 Fig. 11 에서 보여주는 것과 같이 구성하였다.

이렇게 구성된 모바일 스테이지는 무대 위를 자유롭게 이동할 수 있고 별도의 무대 장치를 구성할 필요가 없다는 장점을 가진다.

5. 줄 인형 로봇 시스템 시뮬레이션

구성된 줄 인형 로봇 시스템의 검증을 위해 구동 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션에 의해 설계된 줄 인형 로봇 구동기 구조의 타당성을 검증하고 특히 팔 부분 동작 구현을 위해 Fig. 9 에서 나타낸 A 부분과 B 부분의 조종 방법에 따른 구동기 움직임과 팔 운동 궤적 사이의 연관성에 관한 분석을 수행한다.

A 부분의 회전은 Fig. 12 에서 보여주는 것과 같이 bar 형태의 구조물을 하나의 고정된 축을 중심으로 회전시켜 줄을 당기거나 푸는 동시에 줄의 당기는 위치를 조정하게 되므로 팔을 들어올리는 동시에 앞으로 뻗는 동작을 가능하게 한다. 이 그림에서 파란선은 팔 끝단의 궤적을 나타낸다. 이러한 운동은 특히 빠른 동작 시 줄의 당김과 풀림

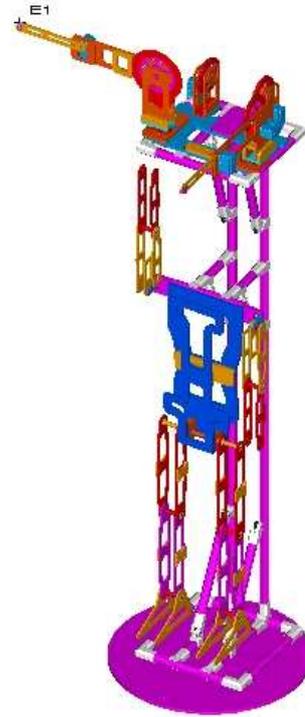


Fig. 11 Marionette robot system

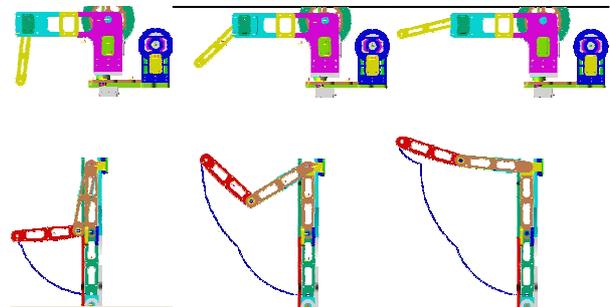


Fig. 12 Marionette robot simulation(A part actuating)

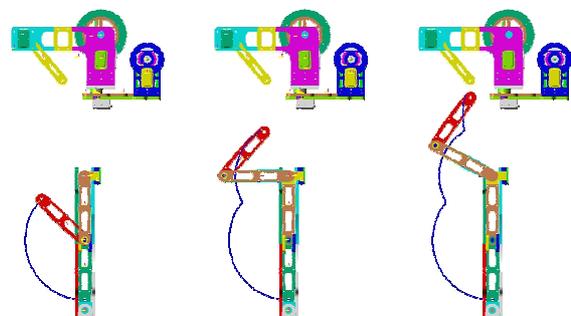


Fig. 13 Marionette robot simulation(B part actuating)

에 의해 팔을 운동시키는 것 보다 줄에서 발생하는 장력의 영향을 적게 받으면서 빠른 동작

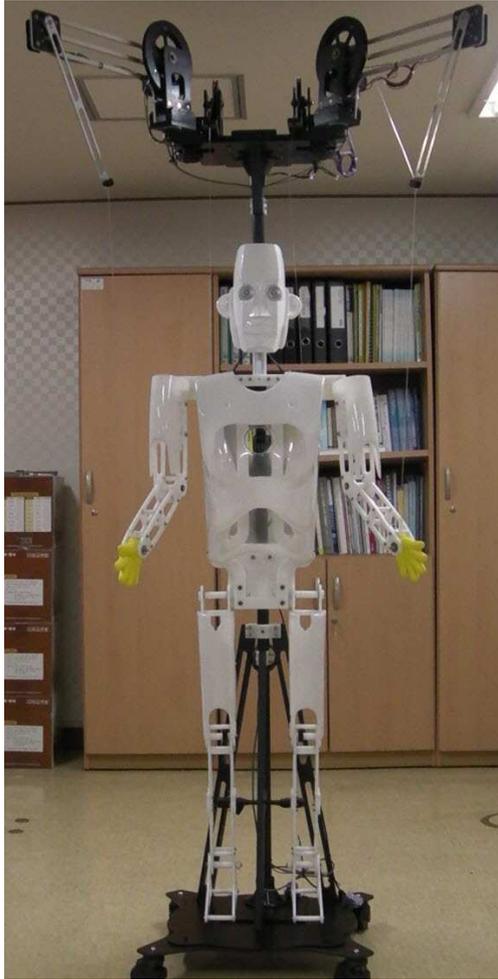


Fig. 14 Developed marionette robot system

구현이 가능하도록 한다. 이에 비해 Fig. 13 에서 보여주는 것과 같이 B 부분의 회전으로 줄이 당겨지게 되면 우선 팔꿈치 관절이 굽혀지면서 팔의 하박부가 들어올러지고 하박부가 최대로 굽혀진 상태에 도달한 후 어깨 관절이 움직이기 시작하며 상박부가 들어 올려진다. 또한 상박부가 들어 올려지는 동시에 팔꿈치 관절은 펴지면서 팔이 완전히 펴서 들어올린 상태가 된다. 따라서 B 부분의 회전은 줄을 당기거나 풀어 팔을 올리거나 내리는 동작을 수행하게 한다. 또한 B 부분을 구성하는 롤러의 반경이 증가할수록 구동기의 적은 회전 각도로도 줄의 길이 변화를 크게 가져갈 수 있고 이로 인해 팔이나 다리의 동작 속도가 증가하게 된다. 그러나 롤러의 반경이 증가할수록 구동기의 작동 토크도 증가하고 전체 구동 시스템의 크기도 증가하므로 적절한 설계값을 정하는 것이 필요하다.

이와 같이 팔 동작에 대한 두 구동부의 구현 가능 동작은 위에서 보여주는 것과 같이 차이가 존재하므로 이러한 동작 특성을 잘 반영한 구동 제어 솔루션을 고려하여야 한다. 따라서 팔 부분과 다리 부분의 구동 제어 특성은 이 논문에서 언급되지 않으나 향후 연구로 진행할 예정이다.

6. 개발된 줄 인형 로봇 시스템

설계된 줄 인형 로봇 시스템의 효율성과 안정성을 확인하기 위해 줄 인형 로봇 시스템을 제작하고 구동 실험을 수행하였다. 실제 제작된 무대 공연이 가능한 대형 줄 인형 로봇은 Fig. 14 에 나타난 것과 같다. 제작된 로봇 시스템은 Fig. 15 에서 보여주는 것과 같이 구동 시험을 해 본 결과, 구동 속도는 기 개발된 다른 공연 로봇들에 비해 빠른 속도의 움직임이 가능하며 구동 자유도가 총 10 자유도로 기본적인 휴먼노이드 로봇 움직임에 최소로 필요한 17 자유도보다 적은 자유도로 휴먼노이드 형태의 로봇과 유사한 동작 구현이 가능하다는 장점을 보여준다. 이것은 구동 액추에이터의 개수를 감소시킬 수 있으며 또한 적은 구동기와 간단한 구조로 인해 전체 시스템 무게가 하부 이동 플랫폼을 제외하고 약 20kg 수준으로 가벼워 이동이 용이하며 제작비가 다른 공연 로봇에 비해 저렴하다는 장점을 가지고 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 사람에 의해 조종되던 소형 크기의

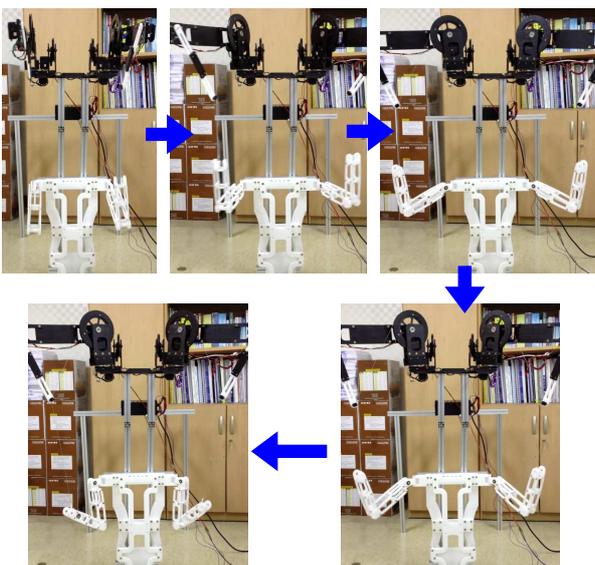


Fig. 15 Movement test result for upper part of marionette robot system

줄 인형에 비해 일반 무대 공연이 가능한 수준인 사람 정도 크기를 가지면서 자동 조종 장치에 의해 동작 조종이 가능한 대형 줄 인형 로봇 시스템을 개발하였다. 개발된 로봇 시스템은 구동기와 로봇 몸체, 하부 이동 플랫폼이 일체화되어 무대 위 자유로운 움직임이 가능하며 무대 위 이동을 위해 별도의 무대 장치를 필요로 하지 않는다는 장점을 가진다.

또한 개발된 줄 인형 로봇 시스템은 사람 손과 팔의 움직임을 보다 유사하게 모사할 수 있는 구동 시스템 구조를 제시하여 구동기의 소형화 및 경량화 구현과 함께 빠른 동작을 가능하게 함으로써 다양한 무대 공연이 가능하도록 하였다. 따라서 현실감 있는 동작을 구현할 수 있는 대형 줄 인형을 사용하여 배우나 다른 로봇들과 함께 공연하는 것이 가능해짐으로 새로운 공연 형태의 시장 창출이 가능할 것으로 예측된다.

향후 개발된 로봇 시스템을 활용하여 구동기와 로봇 바디 사이 구동 관계를 명확하게 할 수 있는 운동 방정식의 유도와 줄 구동 속도에 따른 각 부분의 동작 및 제어 특성에 관한 연구를 진행할 계획이다.

후 기

본 논문은 2010 년 지식경제부 광역경제권연계 협력사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Chen, I.-M., Tay, R., Xing, S. and Yeo, S. H., 2007, "Marionette: From Traditional Manipulation to Robotic Manipulation," *International Symposium on History of Machines and Mechanisms*, Vol. 3, pp.119~133.
- (2) Yamane, K., Hodgins, J. K. and Brown, H. B., 2003, "Controlling a Motorized Marionette with Human Motion Capture Data," *International Conference on Robotics & Automation*, Vol. 3, pp. 3834~3841.
- (3) Bhattacharya, R., 2004, "Dancing Puppets – An Innovative Approach to Learning Programming," *Proceeding of ICEE, Gainesville, Oct.*, pp. 17~21.
- (4) Martin, P. and Egerstedt, M., 2008, "Optimal Timing Control of Interconnected Switched System with Applications to Robotic Marionettes," *Workshop on Discrete Event Systems, Gothenburg, Sweden*.
- (5) Ahn, H.-J., Joung, S. I., Kim, B. Y., Han, Y. J. and Hahn, H. S., 2010, "Mechanism Design of a Robot for Controlling Gestures of a Marionette," *Proceeding of the KSME Spring Annual Conference*, pp.41~42.
- (6) Yi, H.-c., Joo, H.-h. and Han, S.-c., 2000, "Development of Detachable System of permanent Magnet Wheel for Mobile Robot," *Proceeding of the KSPE Fall Annual Conference*, pp.635~638.
- (7) Kim, E.-T., Lee, D.-H., Kim, H.-K., 2008, "Development of a Hull-Plate Moving Robot with Permanent Magnets," *Proceeding of the KSME Fall Annual Conference*, pp.990~995.
- (8) Kim, B. Y., Han, Y. J. and Hahn, H. S., 2010, "Omni-Directional Mobile Robot for 2D Translation and Rotation of a Puppet Using Magnet," *Trans. of the KROS*, Vol.18, pp. 326~331.