

애니메이션을 이용한 사각보행로봇 해석 환경의 개발

°최 병 욱, 정 명 진, 변 중 남
한국과학기술원 전기 및 전자공학과

The environment development for analysis of a quadruped robot using animation

°B. W. Choi, M. J. Chung, and Z. Bien
Dept. of EE, KAIST

Abstract

In this paper, we developed an environment for the analysis of kinematic characteristics of a quadruped robot using animation with simple task planning in SUN3 workstation. The projection method and related graphic utilities are developed, and we considered user interface with mouse. The legs with pantograph mechanism are mathematically modelled and they will be used for the simulation of algorithms to be developed in the graphic monitor.

1. 서론

지금까지의 다각보행로봇에 관한 연구는 다리의 구동방식, 기구적인 특성과 제어방식, 경로계획(path planning) 및 걸음세(gait)와 그 안정도에 대한 연구로 진행되어 왔다[1-3]. 이와 같은 연구 분야에서의 개발비와 시간 및 실험에서의 위험도에 비해서 다각보행로봇을 시뮬레이션할 수 있는 환경의 개발은 미비한 형편으로 복잡한 다리의 이동에 대한 기구적 특성의 연구 등에 제한이 있었다.

그리고, 산업용 로봇과는 다른 작업지시의 방법과 있걸음이나 회전운동에 대한 연구가 요구되는데 복잡한 구조의 다리를 갖는 보행로봇은 그 이동을 예측하기가 어렵게 된다. 따라서, 컴퓨터 그래픽스를 이용한 애니메이션으로써 그래픽 화면을 이용한 실제 상황의 묘사로서 보행로봇의 재만연구를 할 필요가 있다.

본 연구에서는 보행 로봇의 기구학적인 형태 중의 하나인 펜토그래프 형태의 다리를 갖는 사각보행로봇을 대상으로 이와 관련된 알고리즘의 실현성을 off-line으로 실험할 수 있는 환경의 개발에 대해서 논한다[3,4].

그래픽스를 이용한 애니메이션으로 사각보행로봇에 관련된 연구를 위하여, 그래픽 프리비터브가 구현되어야 하며, 이러한 환경의 개발은 로봇의 모델링 과정이 설계의 과정과

유사하게되며, 이러한 모델된 보행로봇을 이용하여 컴퓨터 화면에서 여러 알고리즘을 실험한다면 개발사의 시간의 절약과 구조의 선택에 도움을 주며, 개발비와 실험시의 위험도등을 줄일 수 있을 것이다[5-8].

본 논문에서는 모델된 보행로봇에 간단한 작업지시 방법을 통하여 본 논문에서 제시된 해석 환경의 유용성을 보였다. 작업지시는 2차원 평면을 가정하여 기준좌표계에서 보행로봇 몸의 중심점의 이동을 연속적으로 나타내었다. 그리고, 복잡한 펜토그래프 구조의 다이내믹스는 고려하지 않았다[3,4].

2. 사각보행로봇의 모델링

(1). 개요

다각보행로봇은 링크의 구조에 따라 제어방식과, 걸음세(gait)에 따른 안정도 및 3차원 동작을 위한 나머지 조인트와의 간섭등이 달라지게 된다. 펜토그래프 구조의 링크는 x와 z 방향의 움직임이 상호간 간섭이 없으며, 평면에서 움직일 때 다리의 높이를 조절할 필요가 없어서 에너지 손실이 적다[1].

펜토그래프 형태의 다리를 갖는 사각보행로봇의 걷는 모습은 기구학적인 제한 즉, y축의 구동 방식에 따라 걷는 방식이 달라진다. 회전을 하거나 옆걸음을 위한 y축 구동방식은 첫째, z축을 중심으로 회전하는 방법 둘째, y축으로 다리를 선형적으로 움직이는 방법과, 힌지를 이용한 사면증폭의 형태인 3차원 펜토그래프 구조등이 있으며 [1-4], 본 논문에서는 세번째 방법으로 개발된 환경에서의 실험을 하였다.

이와 같은 사각보행로봇을 모델링하여 주어진 길을 걷게함으로써 그 실제적인 모습을 그래픽스를 이용한 애니메이션을 통하여 기구적 특성을 관찰하여 개발사의 발생할 수 있는 상황을 컴퓨터 화면에서 실험할 수 있다.

(2). 기하학적 모델링

사각보행로봇은 일반적인 산업용 로봇보다는 더 많은 링크의 조합으로 이루어진다. 이러한 로봇을 구성하는 링크의 형태는 여러가지가 될 수 있으나, 그래픽스를 이용할 경우의 데이터양이나 계산 속도의 개선을 위하여, 충분한 근사화의 방법인 나각기동으로의 근사화 모델링 방법을 이용하였다.

하나의 구조물을 나타내기 위한 데이터 구조는 대상물을 나타내기 위해 용이하여야 하며, 대상물을 계층적으로 나타내었을 때, 조작 및 계산이 편리하여야한다. 이와 같은 목적에 맞는 방법으로 계층적 데이터 구조를 선택함으로써 구조물에 대한 3차원적 조작은 대상물 대표 좌표계(local object coordinate)와 기준 좌표계 간의 동차 변환(homogeneous transformation) 행렬식을 이용하게 된다[4,7].

로봇의 모델링은 각 링크의 구조를 결정짓고 이러한 링크를 이용하여, 결합관계를 규정지어서 조인트에 따른 움직임을 결정짓게 할 수 있어야한다. 각 링크간의 결합관계를 나타내기 위하여서는 구조물의 조작과 동일하게 된다. 따라서, 각 좌표계간의 좌표 변환은 행렬식의 형태로 나타난다. 그리고, 링크간의 움직임은 조인트에서의 자유도에 의존하여 회전 및 이동의 형태로 나타나는데, 하나의 다리의 링크들에 대하여 모델링하였다[3]. 모든 링크는 나무 형태의 계층적 구조를 구성하며, 나머지 다리는 물체의 중심에 대한 기구적 대칭성을 이용하여 집 대칭과 선 대칭에 의하여 모델링할 수 있다. 따라서, 사각보행로봇의 데이터 구조로는 그림 1.과 같은 형태를 가지며,

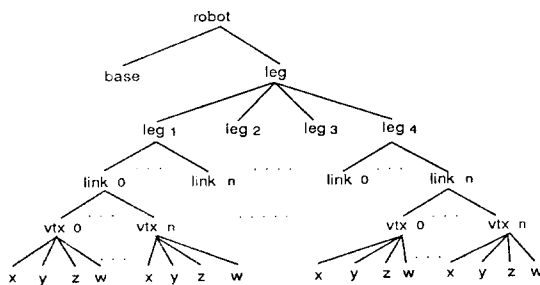


그림 1. 보행로봇의 데이터 구조
Fig. 1. Data structure of quadruped robot

(3). 다리 구조의 수학적 모델링

본 연구의 대상인 사각보행로봇은 펜토그래프구조를 갖고 있기 때문에 기구학적 제한이 존재하고 있다. 이러한 제한은 제어를 하고자할 때 각 다리의 끝점의 움직임이 기구적인 제한으로 오히려 쉽게 나타내진다는 장점을 갖는다[1].

그러나 그래픽을 통한 애니메이션을 위해서는 펜토그래프를 구성하는 4개의 링크가 각각 분리된 조인트와 같게 된다. 따라서 이러한 기구적 제한에 의한 조인트는 끝점에서의 움직임이 조인트 값에 선형적인데 반해서 비선형성을 갖게 된다. 이러한 기구학적 제한을 수학적으로 모델링할 때 각 다리의 링크의 움직임이 3개의 조인트 값으로 명시되어 앞으로 개발된 보행로봇과 관련된 알고리즘을 실제의 서보(servo)를 구동하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다[3].

본 논문에서 고리된 사각보행로봇의 애니메이션 변수에 대한 자세한 설명은 참고 문헌 [3]에 자세히 있다. 그림 2. a)에서는 2차원 펜토그래프구조를 나타내며 변수 $\alpha_1 = \theta_1 - \theta_2$ 와 $\alpha_2 = \theta_1 + \theta_3 - \theta_2$ 로서, 조인트 값인 h_x, v_z 의 함수로 주어진다. 그리고, 그림 2. b)에서는 앞으로의 이동을 나타내며 회전각 α_3 로 나타낸다.

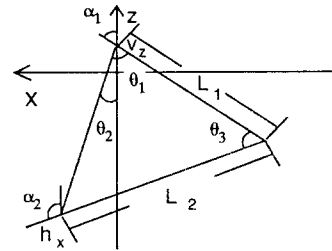


그림 2. a) 2차원적 기구의 수학적 모델링
Fig. 2. a) Mathematical modelling of 2-D mechanism

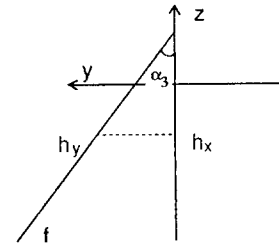


그림 2. b) y방향 이동의 변수
Fig. 2. b) Parameter of y direction movement

(4). 경로 계획

보행로봇에 대한 작업지시란 경로를 계획하여 그 경로의 조건에 맞는 길을세로 걸게하는 것을 말한다. 실제적인 문제에서는 노면이 평탄하지 않으므로 지형에 적응하면서 작업을 하게 되는데, 전체적인 차원에서 경로를 길정하고, 세부적인 경로 계획에서 기울기나 험난도 또는 방해물에 기인한 문제를 최소화하는 경로를 선택하여 걸게된다. 따라서, 다리의 제어 및 방해물 회피 알고리즘의 개발 및 안정도 해석이 또 다른 연구 대상이 될 수 있으며, 본 연구에서는 평탄한 평면을 걷는다고 가정하였다.

길을 2차원 평면으로 가정하였기 때문에 경로는 몸의 중심이 이동하는 점의 연속으로 나타낼 수 있다. 즉 2차원 길의 지정은 기준(world) 좌표계에서 좌표를 지정하는 일과 동일하게 된다. 이와 같은 목적을 위하여 그래픽화면에서 마우스를 이용하거나, 데이터 파일을 이용할 수 있게 하였다.

(5). 걸음새(gait) 제어

걸음새에 기초하여 애니메이션 시킬 때 다리가 하나 이동할 때 몸이 같이 움직이면 몸의 이동에 대한 나머지 다리의 모습을 그려야하므로 화면 전체가 새로이 그려져야한다. 그러나 하나의 다리의 이동에도 전체를 새로이 그릴 경우 걷는로봇의 걷는 효과가 감소되며, 계산 및 그래픽 프리미티브의 속도 제한에 의하여 다리의 기구적 특성을 고려할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 각 다리의 움직임을 몸체와 독립적으로 그래픽 화면에 나타나게 하였다.

경로는 world 좌표계이므로 몸의 중심으로 좌표 변환이 이루어지서 inverse kinematics를 풀어야 하는데, 좌표 간의 관계는 그림 3과 같으며 p_1, p_2, p_3 는 이동해야 할 좌표들로서, (x_2, y_2, z_2) 좌표계에서 p_3 의 위치에 대한 inverse kinematics를 풀게 된다. 이러한 몸의 중심의 좌표계의 기준 좌표계로의 변환은 $T_2 = T_1 A_2$ 으로 되어 기준 좌표계에 대한 보행로봇의 위치를 알게 된다[9,10].

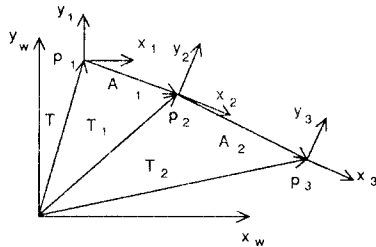


그림 3. 경로의 좌표변환
Fig. 3. Coordinate transformation of path

몸의 중심 좌표계에서 다음 위치로 이동을 위한 방향은 그림 3에 따라서 여러 방향으로 구분된다. 이러한 각 방향으로의 이동은 다리가 몸 안으로 들어갈 수 없는 경우에, 일걸음은 이동시 몸의 중심에 대하여 각 다리의 보폭은 동일한 형태로 나타난다. 따라서, 몸의 위치가 이동할 때 방향은 변하지 아니하고, 다만 각 다리가 오른쪽 왼쪽에 따라 움직이는 순서만 변화 될 뿐이며, 조인트 인터플레이션된 각 조인트 값은 같게된다.

그러나, 회전 운동을 할 경우 다리의 이동 순서는 방향에 따라 결정될 것이며, 각 다리의 움직임이 몸체의 중심에 대하여 같은 반경을 유지하여야 한다. 따라서, 거리와 회전각으로 네 다리의 움직임을 묘사해야 하는데, 각 다리의 조인트 값을 구하는 방법은 사각보행로봇이 강체를 이룬다는

짐에 착안하여 각 다리의 궤적을 구할 수 있게 된다. 그림 4에서 다리2의 다음 위치는 $p = p' - t_1 = A t_2 - t_1$ 과 같으며, 나머지 다리들도 몸의 중심에서 다리의 위치를 나타내는 고유한 벡터에 의하여 보폭을 결정 지을 수 있다[3,4].

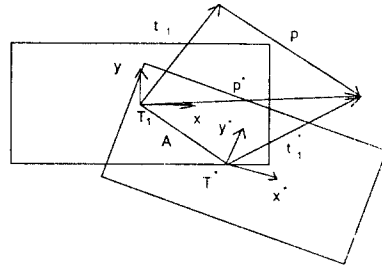


그림 4. 회전이동시의 다리의 이동
Fig. 4. Leg movement on rotating walk

3. 그래픽 시뮬레이션 환경의 구성 및 수행 결과

(1). 구성

보행로봇의 시뮬레이션의 목적은 주어진 경로를 따라 걷고 있는 모습을 통하여 기구학적인 정보를 얻고자 하는데 있다. 따라서 그래픽 시뮬레이터의 기능을 증대시키기 위하여 현실감을 주는 2차원 무영기술이 요구되며, 기준 좌표계에서의 출력 프리미티브가 화면에 나타나는 관계를 결정짓는 수학적 기술이 필요하게 된다.

그래픽 시뮬레이터의 하드웨어 구성은 그림 5와 같이 이루어졌다. SUN3 110LC는 68020의 cpu를 가지고 있다. 그래픽 모니터는 1152 × 900의 해상도를 가지며 RGB가 0-255의 조합으로 색을 구성하게 되어 있는데, 16가지 색으로 메뉴를 구성하여 마우스를 이용하여 선택할 수 있게 구현하였다[12,13].

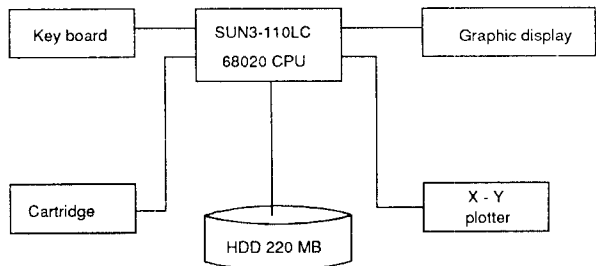


그림 5. 전체 하드웨어의 구성
Fig. 5. Hardware structure of total system

전체적인 해석환경을 위하여 고려되어야할 사항이 그림 6에 나타내었다. 로봇 모델링은 각각의 링크의 꼭지점 값들을 이용하여 사각보행로봇의 데이터 구조를 구성하며, 이러한 모델링을 위한 링크나 대상물을 로봇의 작업환경에 배치하기 전에 두개의 윈도우를 이용하여 하나의 윈도우에서는

3차원적인 모습을 나타냄으로써 여러가지의 대상물을 쉽게 설계할 수 있다.

모델된 보행로봇에 작업 지시의 방법으로 경로를 계획하게 되며, 2차원 평면에서는 화일이나 마우스를 이용하여 몸의 중심으로서 작업 지시를 할 수 있으나, 3차원적인 경로계획 방법과 한 번의 이동에서 나타날 수 있는 다리 이동의 순서인 걸음세 제어 알고리즘은 앞으로 개발 되어야 한다. 그리고, 보행로봇에 있어서 이동의 동역학을 파악하는 안정도 여유에 대한 방법들이 본 연구에서 개발된 환경에서 emulator를 통하여 다리의 움직임이나 몸의 움직임을 출력 프리미티브를 이용하여 화면에 사각보행로봇을 애니메이션 시키게 된다. 따라서, 컴퓨터 화면에서 작업 지시의 정당성의 확인이나, 실제 실험에서 발생할 수 있는 상황을 off - line으로 실험할 수 있는 환경이 된다.

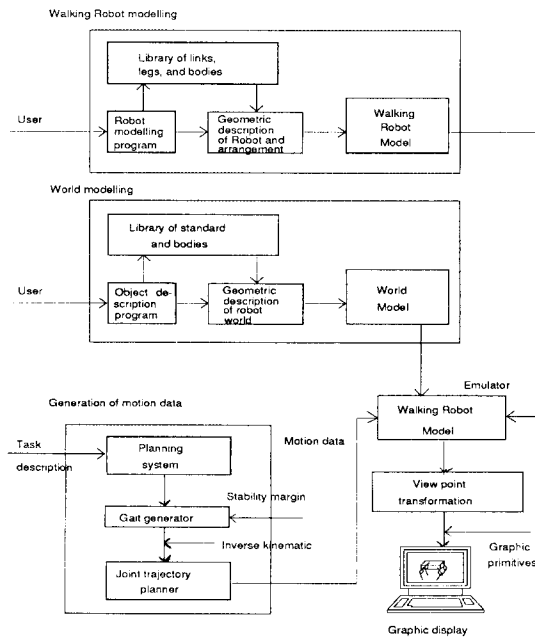


그림 6. 해석환경의 구조
Fig. 6. The structure of analysis environment

(2). 그래픽 유틸리티 (Graphic utilities)

(2-1). 사용자 편이 (User interface)

그래픽 프리미티브로써 Sun Core를 이용하였으며, 사용자 편이를 위해 Sun Core의 입력 프리미티브중에서 논리 입력 소자로 로케이터(locator), 픽(pick) 및 버튼(button)을 마우스를 이용하여 구현하였다. 이와 같은 입력 프리미티브와 사용자간의 제어를 그림 7.에 나타내었다. 이와 같은 사용자 편이를 위한 메뉴의 조작은 시뮬레이션 시스템에서는 중요한 요소가 된다. 앞으로 팝업(pop up)이나 아이콘(icon) 등을 이용한 메뉴의 다양화가 필요하다[13].

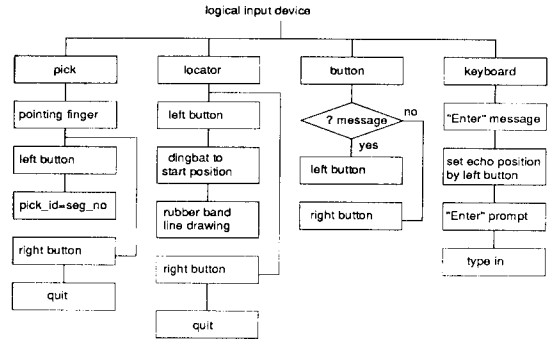


그림 7. 사용자 편이를 위한 메뉴
Fig. 7. Menus for user interface

(2-2). 투영 조작 (Viewing operation)

응용 프로그램에서 출력 프리미티브는 어떠한 가상적 공간에 그려지게 된다. 이러한 공간의 그림이나 문자가 그래픽 화면에 그려지기 위해서는 가상적 공간인 기준(world) 좌표계에서의 그림중에서 보여질 양을 정하고, 기준 좌표계와 NDC(Normalized Device Coordinate) 공간과의 수학적 변환을 결정짓는 투영 조작(viewing operation)이 필요하게 된다[11-13]. 이와 같은 관계를 그림 8.에 나타내었다. 투영 변의 값들은 그래픽 모니터의 해상도에 무관하기 위하여 NDC로 변환되어지며, NDC에서의 좌표값이 해상도에 의존하는 PDC(Physical Device Coordinate)로 바뀌어져서 화면에 나타나게 된다.

3차원 대상물을 2차원인 그래픽 화면에 나타내는 방법은 크게 나누어서 평행 투영법과 원근 투영법이 있다. 평행선들을 투영 면에 평행하게 그리는 방법이 평행 투영법이며, 제거 집에 평행선을 수렴시켜서 평행하지 않게 나타내는 방법이 원근 투영법이다. 이와 같이 평행선을 제거 집으로 수렴시키는 것은 사람의 눈의 효과를 그림으로 표시하기 위해서이다[11]. 이와 같은 효과를 위하여 원근 투영법을 이용한 모드를 구성하였다.

그래픽에서 현실감을 주기위한 방법으로 가장 중요한 연구의 대상이 숨은선 제거가 된다. 여러개의 선이 겹쳐서 나타날 때 사람의 눈의 초점에 따라 물체의 형상이 달리 보이기 때문에, 보는 위치에서 뒷면을 제거함으로써 현실감을 증대시킬 수 있다.

본 연구에서는 사각보행로봇의 기구적 특성을 관찰하는 것이 목적이므로 하나의 링크에 대해서 숨은 선을 제거함으로써 다리의 모습은 모두 나타내는 방식을 취했다[7,11]. 그리고, 링크에 대해서만 숨은 선을 제거함에 따라 물체의 뒷다리의 모습에의해 다리의 위치가 모호하게 되는것을 방지하기 위하여 물체에 대한 숨은 선은 점선으로 그려서 현실감을 증대시켰다.

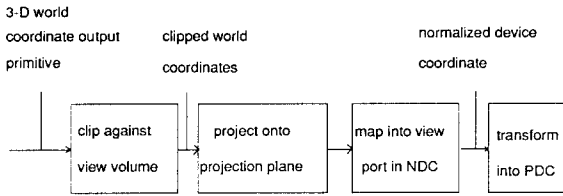


그림 8. 부영 조작의 순서

Fig. 8. Sequence of viewing operation

(3). 애니메이션 방법

Sun Core에서 출력의 형태인 3차원적인 그림은 세그먼트(segment)를 통하여 이루어 진다. 다시 말해서 세그먼트는 출력의 조합으로 이루어 지며, 가시성(visibility)을 이용하여 출력이 화면에 나타나는 것을 조절할 수 있다. 따라서, 이와 같은 특성을 이용할 경우 그래픽화면에서의 애니메이션 효과를 증대시킬 수 가 있다[12].

다리하나가 여러개의 링크로 구성되어 있으며 각각의 링크는 몸체 중심과 동차 변환으로 3차원 적인 변환 관계가 형성된다. 따라서 이와 같은 변환을 그래픽화면에서 그림으로 보여 줄 때 링크마다의 불연속적인 모습이 보이게 된다. 따라서, 3차원 변환을 통하여 계산하여 만드는 출력 세그먼트는 가시성을 이용하여 화면에 나타나지 않게한다. 그리고 애니메이션을 위하여 지나간 다리의 모습은 지우게 되는데, 이 경우에도 이용하게 된다. 즉 새로운 3차원적인 이동을 계산하고, 지나간 것을 지우는 등의 조작은 그림이 지워진 상태에서 가상적 3차원 공간에서 이루어 진다. 그리고 애니메이션은 완결된 출력의 가시성을 이용하여 이루어 진다.

(4) 수행 결과

본 연구에서의 전체적인 응용 프로그램은 "C" 언어로 구현되었으며, 출력 프리미티브가 DYNAMICC 이고, SYNCHRONOUS INPUT까지 제공되는 Sun Core를 그래픽 프리미티브로서 이용하였다[12,13].

시물레이션시의 애니메이션 속도를 증가를 위하여 리테인드 세그먼트(retained segment)를 이용하여 다리의 이동을 묘사하였으며, 현실감을 위하여 리테인드 세그먼트의 가시성을 이용함으로써 화면을 지우지 않고 그림을 변화시켰다. 한 보폭에 대하여 몸의 이동은 한번 일어나며, 다리의 움직임은 x, y 및 z로 한 번의 인터플레이션을 하게 되어 모두 8 번 일어난다. 이러한 하나의 보폭에 대하여 약 0.75 초가 소요되며, 원근 투영이나 숨은선 제거를 고려한 경우도 거의 같은 속도를 갖는다.

그림 9.는 이동할 곳이 (515.8, 480.0)에서 (578.6 469.1)으로 변화할 경우 가장 현실감을 높일 수 있는 semi hidden perspective mode에서 실험한 결과이다. 여기서 몸의 기준 좌표계에서 본 기울기는 -9.858° 이며, 관찰자의 위치를 (1000,

2000, 400)으로 하였을 경우이며 데이터에 대한 배율 값은 2.0이다. 이와 같은 몸의 중심에서의 회전각이 -y 방향이므로 걷는 다리의 순서가 달라지는데, 이 경우는 1, 4, 3과 2의 순서로 이동하여 회전시 다리와 몸체의 간섭을 피하게 되며, 회전이동이므로 각각의 다리의 inverse kinematics값이 서로 다르며 조인트 값은 그림 아래에 표시하였다. 여기서 h_x 는 x축으로의 이동값이며, h_y 는 앞걸음을 위한 y축으로의 조인트 값을 나타낸다. 그리고, v_z 는 z축으로 다리를 드는 조인트 값이 되는데, 여기서는 1.0으로 조인트 인터플레이션을 하였다. 따라서, 이러한 조인트 값은 다리의 기준 좌표계에서 조인트를 구동하는 형태가 된다.

5. 결론

본 논문에서는 지금까지의 로보틱스에 있어서의 그래픽 시물레이터의 대상이었던 산업용 로봇와는 다른 펜토그래프 구조의 다리를 갖는 사각보행로봇을 모델링하였다. 그리고, 이러한 기구적 제한을 수학적으로 나타내어 애니메이션 시키는 방법에 대하여 연구하였으며, 보행로봇을 모델링하여 2차원 평면을 대상으로하여 견게하여, 그 움직임을 애니메이션 시킴으로써 기구학적 특성을 관찰해 보았다.

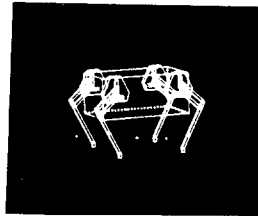
그리고, 보행로봇의 해석을 위하여 고려 되어야할 사항들에 대하여 논하였다. 따라서, 제반 알고리즘의 개발에 응용될 수 있을 것이다.

앞으로 작업환경을 모델링하고, 다리의 제어에 대한 연구 및 다이내믹스에 대한 연구가 추가되어야 할 것이다.

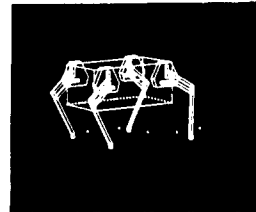
참고 문헌

- 1 D. J. Todd, "Walking Machines - A Introduction to Legged Robots", Anchor Press, 1985.
- 2 Shigeo Hirose, "A Study on Design and Control of a Quadruped Walking Vehicle", Int. J. of Robotics Reserch., Vol. 3, no. 2, pp.113-133, 1984.
- 3 최 병욱, "펜토그래프 구조의 다리를 갖는 사각보행로봇의 그래픽 시물레이터의 개발", 한국과학기술원, 석사학위논문, 1988
- 4 최 병욱, 임 준홍, 정 명진, 변 중남, "컴퓨터 그래픽스를 이용한 사각보행로봇의 기구적해석", 88 계속 및 제어연구회 합동학술발표회, pp.72-76, 1988
- 5 C. C. Thomson, "Robot Modelling - The Tools Needed for Optimal Design and Utilization", Computer aided design, Vol. 16, no. 6, Nov. pp.335-337, 1984.
- 6 Toshio Sata, Fumiliko Kimura and Akio Amano, "Robot Simulation System as a Task Programming Tool", 11th. ISIR, Oct. pp.595-602, 1981.

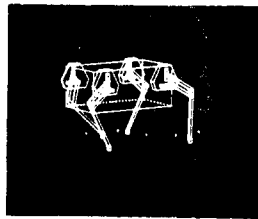
- 7 장 원, 정 명진, 변 증남, "로봇과 제이기의 개발을 위한 로봇 시뮬레이터의 설계", 대한전자공학회지, vol. 25, no. 1, pp.8-17, 1988
- 8 박 종현, 장 철, 최 병욱, 정 명진, "다중로봇 시스템을 위한 로봇 언어 개발에 관한 연구", 88 계측 및 제어연구회 합동학술발표회, pp.68-71, 1988
- 9 C. S. G. Lee, R. C. Gonzalez and K. S. Fu, "Tutorial on Robotics", IEEE Computer Society, 1984
- 10 John J. Craig, "Introduction to Robotics", Addison - Wesley, 1986
- 11 Foley and Van Dam, "Fundamentals of Interactive Computer Graphics", Addison - Wesley, 1982.
- 12 "Sun Core Reference Manual", Sun microsystems, 1986.
- 13 "Sunview Programmer's Guide", Sun microsystems, 1986.



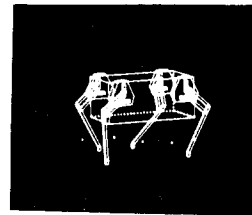
a) Body :: $h_x = 0.00$ $h_y = 0.00$ $v_z = 0.00$



b) Leg₁ :: $h_x = -4.96$ $h_y = -0.33$ $v_z = 0.00$

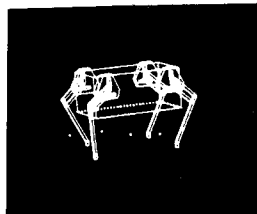


c) Leg₄ :: $h_x = -5.78$ $h_y = -1.48$ $v_z = 0.00$

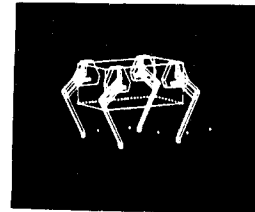


d) Leg₃ :: $h_x = 5.78$ $h_y = 1.49$ $v_z = 0.00$

Leg₂ :: $h_x = 4.60$ $h_y = 1.39$ $v_z = 0.00$



e) Leg₃ :: $h_x = 0.00$ $h_y = 0.00$ $v_z = 0.00$



f) Leg₂ :: $h_x = 0.00$ $h_y = 0.00$ $v_z = 0.00$

그림 9. 시뮬레이션 결과

Fig. 9. Simulation results