이족보행 안정성을 위한 골반기구의 제어시스템 설계

Control System Design of Pelvis Platform for Biped Walking Stability

김 수 현*, 양 태 규
(Su-Hyeon Kim and Tae-Kyu Yang)

Abstract : The pelvis platform is the mechanical part which accomplishes the activities of diminishing the disturbances from the lower body and maintaining a balanced posture. When a biped robot walks, a lot of disturbances and irregular vibrations are generated and transmitted to the upper body. As there are some important machines and instruments in the upper body or head such as CPU, controller units, vision system, etc., the upper part should be isolated from disturbances or vibrations to functions properly and finally to improve the biped stability. This platform has 3 rotational degrees of freedom and is able to maintain balanced level by feedback control system. Some sensors are fused for more accurate estimation and the control system which integrates synchronization and active filtering is simulated on the virtual environment.

Keywords : 3 DOF nonlinear coupling control, adaptive filtering, biped robot, sensor fusion, synchronous motion

I. 서론

1. 연구내용 및 목적

최근에 휴머노이드 로봇에 관한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 휴머노이드 로봇에서 가장 핵심적인 기술은 이족보행이라 할 수 있는데, 이는 로봇 전체적인 구조설계와 각 몸체부분의 움직임제어, 균형감지를 위한 센서피드백, 실시간 동시제어 기술 등이 복합적, 연합적으로 활용되는 고난도 분야이다. 휴머노이드 로봇의 개발은 로봇관련 기술의 총체로 기계적인 설계와 동적 모델링, 제어 프로그래밍과 구동시스템 및 센서의 피드백 연동, 전기시스템과 전자회로모듈의 연동이 함께 이루어져야 하는 분야인 보행 및 자세균형 기능이 안정화된 이후에, 동시적 위치인식 및 지도형성(SLAM), 물체와 환경인식 등의 인공시각 기술과 인공지능기술도 함께 갖춰야 하는 통합 연구 분야이다.

본 연구에서는 휴머노이드 로봇 개발에 있어 가장 기본적이고 이동기능에 중요한 이족보행의 안정성에 관한 부분으로 그 동안에 이루어진 하체구조 즉 다리부분에서의 강체형 링크구조들과 각 링크들 간의 관절각의 상호조합에 의한 보행패턴 형성 및 균형유지를 위한 제어연구들을 바탕으로 하고 있다. 단, 기존 연구는 하체의 보행패턴 및 ZMP 안정을 위한 다리관절각 제어에 중점을 두고 있는 반면, 본 연구에서는 로봇 전체적인 동적 평형 관점에서 상체부위의 제어를 고려한 점이 다르다고 할 수 있다. 즉, 보행로봇은 지면과의 접촉력 만을 제외하면, 동적 평형관점에서 다리의 흔들림 운동(swing motion)에 의하여 상체도 모멘트 영향을 받는 상호영향 상태에 있으므로, 상대적으로 질량이 큰 상체부분의 운동을 고려할 필요가 있다. 따라서 상체의 제어를 위하여 하체와 상체 사이에 3개의 회전자유도를 갖는 골반기구 제어시스템을 설계하고, 이를 보행안정성 관점에서 제어하여 휴머노이드 로봇 개발에 활용하기 위한 기술로 삼고자 한다. 3개의 회전자유도를 갖는 골반기구는 일부 휴머노이드 로봇 모델, 즉 일본 와세다대학의 WABIAN 시리즈의 허리골반기구와는 달리 회전축이 한 점에서 교차하는 구조로서, 회전방향에 따른 관성모멘트변화를 최소화하고 실시간 자세제어성능을 높일 수 있다. 또한 상체의 다양한 자세 구현 및 서비스 기능을 위해서도 필요한 구조가 될 수 있다[1,3,4].

본 연구에서는 위와 같은 이유에서 상체의 자세를 조정할 수 있는 3개의 제어가능한 회전자유도를 가지고 있는 골반기구의 필요성을 역설하고, 그 구조 및 역할 그리고 이의 효과적인 제어시스템설계 안을 제안하고자 한다. 효과적인 제어성능을 위해 동적으로 변하는 시간 상에서 원하는 상체의 자세각도를 맞추기 위하여 3개의 모터가 추종각까지 동시에 맞춰지도록 하기 위한 동기제어 방식과 동적 연성 시스템에 대하여 효과적인 제어방식인 PID 제어기에 적응성을 갖춘 기능을 추가한 적응필터가 적용된 적응필터 PID (adaptive filtering)제어방식을 이용한다. 이 제어시스템에서 적응필터는 이족보행의 일정 패턴의 외란 형태에 대한 외란제거효과를 추가한 것으로서 관련된 연구분야에서 다루어지지 않은 제어방식이다. 센서의 피드백신호의 즉시성과 신뢰성을 향상시키기 위해 지면에 대한 절대 기울기를 측정하는 기울기센서와 각속도를 측정하는 레이트 자이로 센서를 융합 사용함으로써, 전체적인 제어시스템의 성능향상을 기하였다.

2. 관련연구

휴머노이드 로봇의 보행안정성에 관한 연구는 Vukobratovic의 ZMP (Zero Moment Point) 이론에 관한 발표를 시작으로 활성화되기 시작하여, 약 20여년만의 성과물인 일본 HONDA 사의 휴머노이드 로봇 ASIMO 시연으로 전세계적으로 널리 알려지게 되었다[2]. 일찍이, 미국 MIT 에서도 타조의 보행에 관한 모사연구와 함께, 다양한 보행로봇 개발이 시도되었으며, 최근 Boston Dynamics 에서는 안정성과 실용성을 높여 실제 현장에서 적용이 가능한 4족로봇 BigDog를 공개하였다. 국내에서도 이러한 세계적인 연구 추세에 상응하여 각 연구기관 및 학교에서 활발한 연구가 이루어지고 있으며, 마이크로 로봇 스케일에서 인간 스케일의 로봇에 이르기까지 다양한 연구가 진행 중에 있다. 최근 몇 년 동안 국내 및 세계적으로 국내기술력을 보여준 KAIST의 HUBO와 KIST의

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2008. 10. 1. 채택확정 : 2008. 12. 8.
김수현 : 목원대학교 IT공학과 대학원(dukesoo@mokwon.ac.kr)
양태규 : 목원대학교 지능로봇공학과(tkyang@mokwon.ac.kr)

MAHRU는 이러한 국내연구성과의 대표라 할 수 있으며, 이밖에도 뛰어난 관련 연구기술들을 유수의 연구기관 및 대학이 보유하고 있다. 휴머노이드 로봇의 개발을 위해서 안정적인 이족보행에 관한 연구가 많이 이루어졌는데, 정보행을 위한 CoP (Center of Pressure) 균형과 이를 반영한 보행패턴형성 및 착지점 고려 등 정적 안정성 측면 확보에 관한 부분이 주가 되었다[3]. 최근에는 동보행을 위한 기초연구가 질점(point mass)요소로 모델링된 단순구조의 로봇, Acrobot, RABBIT, ERNIE 등을 통하여 이루어졌다[2]. Wisse 등[3]은 수동 동보행로봇 모델에서 힘의 역할을 구분하여 상체를 추가하는 방식으로 안정성을 확보하는 연구결과를 발표한 바 있고, Hobbelen 등[4]은 일정 주파수로 걷도록 단순설계된 로봇이 수동 보행 중에 지면접촉에 의한 외란을 억제하도록 흔들림 운동 다리의 지면접촉시간 직전에 길이를 축소하는 방식으로 전진운동을 촉진하는 방식의 효용성에 대하여 연구하였다.

보행중인 로봇 시스템의 자세제어는 일반적으로 각 관절축 모터의 각도제어에 의해 이루어지며, 운동 중에 충격 및 진동이 발생하게 되므로 정확한 제어성능을 유지하기가 어렵다. 이러한 충격 및 진동에 의한 외란을 제거하기 위해 계산토크방식에 기초한 선형제어 기법이나 적응제어기법, 강인제어 기법 등을 이용한 연구가 이루어져 왔다[4]. 하지만 이와 같은 방법은 제어하고자 하는 모델에 대한 정보가 필요하고, 동역학적 특성을 알아야 가능하며, 모델링 과정이 복잡하다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 적응 규칙에 의해 모델의 불확실성, 시스템의 변화, 외란으로 인하여 발생하는 공칭모델 사이의 오차를 보상하도록 제어입력을 생성하는 내부 루프 부분과 공칭 모델의 명령을 추종하도록 하여 제어 입력을 생성하는 외부 루프 부분으로 구성되는 방법인 외란 관측기 제어기가 이용되기도 하였다[5,6].

본 논문은 크게 다음과 같이 구성된다. 우선, 다음 절에서 관련연구에 관한 간단한 검토가 이루어진 후, 본론에서 골반기구의 필요성에 관해 언급하고, 골반기구에 대한 기구학적 원리와 추종각을 구하기 위한 역기구학 유도과정 및 해가 구해진다. 다음 장에는 비선형 동기식 제어기와 적응필터가 추가된 이유와 제어방식에 대해 설명된다. 다음으로 이를 위한 센서융합에 대해 다루어지고, 이후 동적 시뮬레이션에 대한 결과와 분석이 이루어진다.

II. 골반기구의 구조

1. 골반기구의 필요성 및 각 요소의 기능

골반기구는 롤, 피치, 요의 회전자유도가 있는 구조를 가지며, 각각의 자유도는 기어감속된 DC 모터에 의하여 구동 및 제어된다. 본 골반기구는 로봇 몸체의 균형을 맞추고, 운동범위의 제한 조건을 위배하지 않기 위해 각 회전축이 교차되어 있는 구조로 설계되어 하체와 상체를 연결하며 두 부분의 3개 회전상대운동을 가능하게 할 수 있다. 골반기구의 역할은 상체의 자세방향 유지기능과 하부 다리에서 전달되는 외란 및 토크의 제거기능으로 나뉘어진다. 따라서 일정한 목표방향을 지향하는 자세를 갖도록 하기 위한 각 모터의 제어각도가 역기구학의 해로 구해진 후 이 기준각도를 실시간으로 추종하도록 하는 제어시스템이 된다. 이 때, 골반기구가 3개의 프레임요소 간 동적 연성되어 있는 복잡한 구조이면서 충분한 정도로 정확한 실시간 추종과 외란제거 성능을 갖도록 하기 위해서 효과적인 제어시스템에 대한 고려가 필요하다.

보행시 상체의 평형유지는 안정적이고 지속적인 보행제어를 위해 필연적이다. 보행중인 로봇의 역학적 평형 상태를 자유물체도로 분석할 때, 로봇이 바닥에 쓰러지지 않도록 하기 위해서는 움직이는 각 몸체의 질량에 의한 무게, 다리의 회전력과 그 반작용력, 지면에 접촉하는 발에서의 접촉지지력 간에 정적, 동적 평형 상태가 유지되어야 한다. 즉, 전진보행 상태에서 일정 평균속도로 걸어가고 있다면, y축 방향의 정적 평형유지와 x축 방향의 평균가속도의 0 인 조건 그리고 z축의 모멘트 평형이 이루어져야 한다. 보행중의 주기적인 다리와 발의 움직임은 몸체 상부에 반복적인 외란 또는 진동을 일으키게 되는데 몸체 상부의 의도적인 제어 과정에서 일정한 주파수성분을 검출할 수 있으므로 이것을 이용하여, 주기적인 하부몸체로부터의 진동을 예측하고 효율적인 외란 제거를 할 수 있게 된다.

골반기구는 하체 다리와 연결된 기저프레임과 상체 부위와 연결되는 상위프레임 그리고 이 사이의 3개 제어프레임으로 구성되어 있다. 제어프레임은 각각 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw) 의 회전자유도를 갖고 있다. 이는 각각 상체의 가로수평각(cross level), 고도각(elevation), 방위각(azimuth)에 해당한다. 기저프레임 상에는 x축, y축 방향의 기울기각을 측정할 수 있는 기울기센서(tilt sensor)가 설치된다. z축 방향의 회전각은 전자나침반(electronic compass)에 의해 측정되며, 제어프레임들은 독립적으로 제어되어 최종적으로 상위프레임과 이와 강체 결합된 상체의 자세를 특정 방향으로 유지할 수 있다. 그림 1은 골반기구의 개념모델을 도식화한 것이다.

위에서 언급한 바와 같이 보행 중 발이 지면과 접촉하는 시점에서의 충격과 다리와 발의 왕복 교차하는 흔들림운동에 의해 진동이 상체에 전달된다. 이러한 외란이 기저프레임에서 상체프레임을 통해 몸체에 전달되는 것을 억제하고 차단하기 위해서 능동 제어되는 골반기구는 각 센서로부터 받은 신호를 이용하여 제어각을 계산하고 이를 추종하는 형태

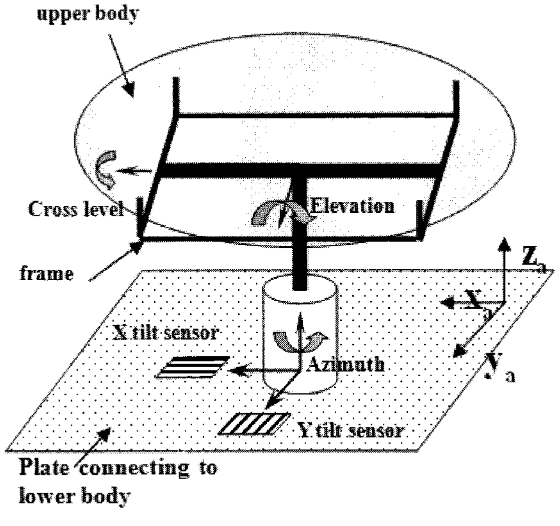


그림 1. 골반기구의 개념모델.
Fig. 1. A schematic of the pelvis platform.

의 동적 피드백제어시스템이다.

골반기구의 부분 프레임들은 서로 교차되고, 동적으로 연성되어 있는 비선형시스템이다. 이러한 시스템의 경우 부분적으로 제어 모델링식을 구성하여 기준입력과의 오차가 0이 되도록 하는 피드백제어 방식으로는 목적을 달성하기 어렵다. 따라서 각 프레임상의 제어를 비선형시스템에 적합하고, 경제적인 PID 형식의 제어기를 구성하여, 제어각을 추종하도록 한다. 상체가 특정 자세를 유지하기 위해서는 상체의 방향이 일정 각도로 유지되어야 하며, 이러한 경우에는 각 프레임 축의 각도값이 결정되어야 하는데, 이 값은 골반기구의 역기구학 해에 의해서 구할 수 있다. 즉 본 시스템은 기저프레임에 전해지는 외란에도 불구하고 상체프레임이 특정 각도를 유지하면서 고요한 상태를 유지하도록 하는 기능을 수행한다. 이와 같은 제어시스템을 구축하기 위해서 우선 골반기구의 순기구학 분석이 이루어진 이후, 역기구학 해가 구해져야 한다. 역기구학 해는 각 프레임 축의 제어각을 결정하며, 각 구동기와 센서는 이를 독립적으로 추종하도록 제어된다[6,7].

2. 순기구학 분석

순기구학(forward kinematics)은 다수링크와 축의 결합으로 이루어진 기구의 말단부(end effector)의 위치와 각도를 구하는데 있어서, 기저부위부터 순차적인 링크의 길이와 관절각도의 함수로 표현하는 것이다. 골반기구의 기저프레임에서 상체프레임까지 순기구학 분석을 위한 시스템 모델과 기호는 그림 2와 같다. {A}, {B}, {C}, {D} 좌표계는 각각 기저프레임, 방위각프레임, 고도각프레임, 가로수평각프레임을 나타내며, 가로수평각프레임은 상체프레임과 일치한다.

절대좌표계 {**X, Y, Z**} 가 기구 외부에서 정의되고, 하체부위와 연결되어 있는 기저프레임에 $\{\mathbf{x}_a, \mathbf{y}_a, \mathbf{z}_a\}$ 좌표계가 정의되며, X축 방향의 외란 d_1과 Y축 방향의 외란 d_2 Z 축 방향의 외란 d_3을 정의하면, 오일러(Euler) 각도방식의 회전행렬 관계는 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_a \\ \mathbf{Y}_a \\ \mathbf{Z}_a \end{bmatrix} = R_{AG} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} \tag{1}$$

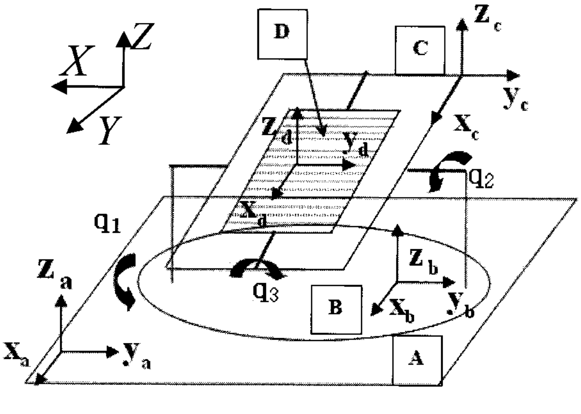


그림 2. 골반기구의 기구학적 기호 정의.
Fig. 2. Symbol definition for Kinematics of the platform.

여기서 R_{AG} 은 절대좌표계에서 지역좌표계 {A}까지 관계를 표현하는 회전행렬이고, sin, cos 함수를 약자 S, C 로 표기하면 다음과 같이 정의된다.

$$R_{AG} = \begin{bmatrix} Cd_3 & Sd_3Sd_2 & -Cd_2Sd_3 \\ Sd_2Sd_3 & Cd_2 & Sd_2Cd_3 \\ Sd_3 & -Sd_3Cd_3 & Cd_2Cd_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Cd_1 & Sd_1 & 0 \\ -Sd_1 & Cd_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

골반기구의 기저프레임에서 상체프레임까지 Z축 방향으로 q_1, X축 방향으로 q_2, Y축 방향으로 q_3 의 각도만큼 회전했을 때, 각 프레임의 회전 관계를 좌표계와 회전변환 행렬로 표시한 것은 각각 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x_b} \\ \mathbf{y_b} \\ \mathbf{z_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cq_1 & Sq_1 & 0 \\ -Sq_1 & Cq_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x_a} \\ \mathbf{y_a} \\ \mathbf{z_a} \end{bmatrix} = R_{q1} \begin{bmatrix} \mathbf{x_a} \\ \mathbf{y_a} \\ \mathbf{z_a} \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x_c} \\ \mathbf{y_c} \\ \mathbf{z_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & Cq_2 & Sq_2 \\ 0 & -Sq_2 & Cq_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x_b} \\ \mathbf{y_b} \\ \mathbf{z_b} \end{bmatrix} = R_{q2} \begin{bmatrix} \mathbf{x_b} \\ \mathbf{y_b} \\ \mathbf{z_b} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x_d} \\ \mathbf{y_d} \\ \mathbf{z_d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cq_3 & 0 & -Sq_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ Sq_3 & 0 & Cq_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x_c} \\ \mathbf{y_c} \\ \mathbf{z_c} \end{bmatrix} = R_{q3} \begin{bmatrix} \mathbf{x_c} \\ \mathbf{y_c} \\ \mathbf{z_c} \end{bmatrix} \tag{5}$$

위 식들로부터 {A}좌표계에서 {D}좌표계까지 회전 변환행렬은

$$R_{CA} = \begin{bmatrix} Cq_3 & 0 & -Sq_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ Sq_3 & 0 & Cd_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & Cq_2 & Sq_2 \\ 0 & -Sq_2 & Cq_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Cq_1 & Sq_1 & 0 \\ -Sq_1 & Cq_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

외란각들과 프레임 회전각들을 모두 포함하여 절대 좌표계에서 상체프레임 좌표계까지의 관계는 다음과 같이 표현되고,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x_d} \\ \mathbf{y_d} \\ \mathbf{z_d} \end{bmatrix} = R_T \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} \tag{7}$$

이 때, $R_T = R_{CA} \cdot R_{AG}$ 를 만족한다.

위 식들로부터 세개의 외란각과 세 개의 제어각을 알면 절대좌표계상에서 상체프레임 좌표계의 방향각을 얻을 수 있게 된다.

3. 역기구학 분석

역기구학(inverse kinematics)은 말단부의 위치와 방향을 알기 위해 기저부에서 말단부에 이르는 각 링크의 위치와 관절각도를 알아내는 것이다. 본 시스템에서 말단부인 상체프레임의 지향 방향각을 벡터성분으로 표시하면, 절대좌표계 상에서 다음과 같이 정해진다.

$$\mathbf{d} = \alpha\,\mathbf{X} + \beta\,\mathbf{Y} + \gamma\,\mathbf{Z} \tag{8}$$

지향방위각을 θ_1, 지향고도각을 θ_2 으로 정의하면

$$\mathbf{d} = \cos\theta_1 \cos\theta_2\,\mathbf{X} + \sin\theta_1 \cos\theta_2\,\mathbf{Y} + \sin\theta_2\,\mathbf{Z} \tag{9}$$

과 같고, 가로수평각 θ_3 은 항상 0이 되도록 하는 조건에서 상체프레임의 지향자세각이 45° 가 되도록 설정하고, $\mathbf{v}=\mathbf{d}$ 를 적용하면, 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} R_{q_3} R_{q_2} R_{q_1} R_2 R_1 \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} R_{q_3} R_{q_2} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta & \gamma \end{bmatrix} \left(R_{q_1} R_2 R_1 \right)^{-1} = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서 $\alpha=\cos\theta_1\cos\theta_2$, $\beta=\sin\theta_1\cos\theta_2$, $\gamma=\sin\theta_2$ 이다. 위의 관계식을 통하여 절대좌표계에서 기저좌표계까지의 외란각 d_1, d_2, d_3 에 관해 측정한 정보를 갖고 있을 때, 상체가 특정방향을 유지하여 자세를 취하도록 하는 골반기구의 관절 제어각도값 $q_{1,des}$, $q_{2,des}$, $q_{3,des}$을 얻을 수 있다. 식 (11), (12)를 간단히 정리하면 다음 식을 얻게 된다.

$$\tan q_2 = -\frac{v_2}{v_3} \tag{12}$$

$$\sin q_3 + \cos q_3 = \sqrt{2}\, v_1 \tag{13}$$

$$\sin q_3 - \cos q_3 = \frac{\sqrt{2}}{\sin q_2} v_1 \tag{14}$$

식 (12), (13)과 (14)를 연립하여 푼 결과는 다음과 같다.

$$\tan q_3 = \frac{v_1 + \frac{\sqrt{2}}{\sin q_2} v_2}{v_1 - \frac{\sqrt{2}}{\sin q_2} v_2} \tag{15}$$

$$q_3 = \tan^{-1}\left(\frac{v_1 + \frac{\sqrt{2}}{\sin q_2} v_2}{v_1 - \frac{\sqrt{2}}{\sin q_2} v_2} \right) \tag{16}$$

기구의 각 관절제어각이 q_1, q_2, q_3이고, 상체프레임이 지향하는 방위와 고도가 각각 θ_1, θ_2 로 지정되고, 외란각 d_1 은 플랫폼 상에 설치되는 전자나침반에 의해 측정된다. 이를 정리하면, 다음과 같이 골반기구의 역기구학 해가 얻어진다.

$$q_{1,des} = \theta_1 - d_1, \tag{17}$$

$$q_{2,des} = \tan^{-1}\left(-\frac{v_2}{v_3} \right) \tag{18}$$

$$q_{3,des} = \tan^{-1}\left(-\frac{v_1 + \frac{\sqrt{2}}{\sin q_{2,des}} v_2}{v_1 - \frac{\sqrt{2}}{\sin q_{2,des}} v_2} \right) \tag{19}$$

상체프레임의 지향각이 결정되면, 3개의 외란각을 기울기센서와 전자나침반 등의 센서들을 통해 얻을 수 있으므로 골반기구의 세 프레임의 각도를 제어함으로써, 하체로부터의 외란에도 불구하고 원하는 지향각을 유지할 수 있게 된다.

III. 제어시스템 설계

1. 확장칼만필터방식 센서융합

앞장에서 기구학적 관계에 의하여 하체로부터의 외란에도 불구하고 이를 실시간으로 측정하여 역기구학 해에 의한 각 프레임 관절축의 각도가 제어된다면, 상체프레임은 항상 고요한 상태를 유지할 수 있다. 하지만, 실제 이를 적용할 때, 센서신호의 오차요소, 비선형성, 불명확성 등의 원인에 의해 정확한 측정값을 얻지 못하는 경우가 많다. 센서융합(sensor fusion)은 이러한 센서측정의 오차를 줄이고자 하는 방법으로 두 가지 이상의 센서신호를 융합하여 종합하고, 변환하는 방식 등을 통해, 보다 정확하고 신뢰성 있는 측정값을 얻기 위한 과정이다.

본 시스템에서 활용되는 기울기센서는 가로방향의 가속도 성분이나 갑작스런 충격 등에 의해 쉽게 영향을 받아 잡음을 발생하는 단점이 있으므로 이를 보완하기 위하여 각속도를 측정하는 데 이용되는 레이트 자이로센서(rate gyro sensor)를 활용하고, 센서융합방식으로 확장칼만필터(Extended Kalman Filter : EKF)방식을 쓴다. 확장칼만필터는 불완전하면서 잡음이 있는 측정신호로부터 정확한 측정값을 예측하는 데 사용되는 반복회귀식 알고리즘으로 비선형시스템에 적용이 가능하도록 확장된 형태의 모델이다[7].

이 알고리즘에서 센서로부터의 측정값과 부가되는 잡음신호는 통계적으로 가우시안 분포를 하고 있다고 가정하며, w_k 과 v_k 가 각각 백색 잡음의 프로세스 잡음과 측정 잡음이라 할 때, 센서측정과정의 상태공간형식 모델링은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x_k &= Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \\ z_k &= Hx_k + v_k \end{aligned} \tag{20}$$

프로세스 잡음 공분산 Q 와 측정 잡음의 공분산 R 은 정규분포하고 있다고 가정한다. 즉,

$$p(w) \approx N(0,Q), \quad p(v) \approx N(0,R). \tag{21}$$

추정과정에서 현재의 단계를 k로 표시하고, 그 이전 단계의 값을 윗첨자 – 로 표시하면, 이전단계와 이후단계 사이의 측정오차는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$e_k^- \equiv x_k - \hat{x}_k^-, \quad e_k \equiv x_k - \hat{x}_k \tag{22}$$

이와 같은 방식으로 공분산은,

$$P_k^- = E\left[e_k^- e_k^{-T} \right], \tag{23}$$

$$P_k = E\left[e_k e_k^T \right] \tag{24}$$

이 되고, 칼만필터이득계수 K 는 이전단계의 측정값과 이후의 측정값 사이의 오차를 보상하는 다음과 같은 형태로 이용된다.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-) \tag{25}$$

위 식에서 $z_k - H\hat{x}_k^-$ 항은 잔여값(residual) 또는 측정변화율(measurement innovation)이라 하며, 이는 추정된 값과 측정된 값 사이의 차이를 의미한다. 칼만필터이득계수 K 는 식 (19)의 결과를 최소화하기 위해 계산되면, 매 단계에서 다음 식

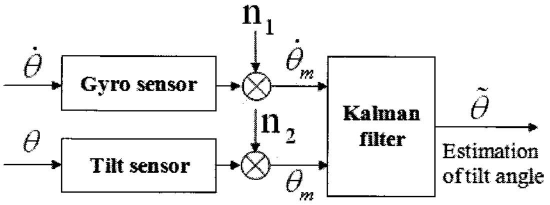


그림 3. 확장칼만필터에 의한 센서융합과정.
Fig. 3. Sensor fusion by extended kalman filter.

을 통해 얻어진다.

$$K_k = \frac{P_k^- H^T}{H P_k^- H^T + R} \tag{26}$$

추정과정과 갱신과정을 반복적으로 수행하면서 칼만필터는 최적의 추정값을 찾게 된다. 로봇의 보행 중 발의 지면접촉 시 상체에 전해지는 가속도성분과 다리의 흔들림운동에 의한 회전모멘트 성분은 측정신호에 잡음을 발생하게 된다. 이를 위하여 상대적으로 빠른 속도와 외부영향에 강인한 특성을 갖고 있는 레이트 자이로센서가 융합되어 사용된다. 그림 3은 이러한 센서융합 과정을 개념적으로 표현한 것이다.

위 그림에서 θ 와 $\dot{\theta}$ 는 각각 기울기센서가 측정한 측정각과 자이로센서가 측정한 각속도값이며, n_1 과 n_2 는 측정잡음과 외란잡음을 그리고 아랫첨자 m 은 측정값을 의미한다. 센서융합에 의해 n_1, n_2 잡음을 배제함으로써 추정된 기울기값 $\hat{\theta}$ 이 실제값과 근사하도록 정확성을 높일 수 있다.

다음과 같은 센서융합 과정을 거친다. 각도와 각속도 간에는 적분관계가 성립하므로 측정시스템은 다음과 같이 모델링될 수 있다.

$$\dot{x}_1 = \overset{A_1}{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}} x_1 + \overset{B_1}{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}} f,$$
$$y = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \theta_m \end{bmatrix} = \overset{C_1}{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}} x_1 + \overset{D_1}{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}} f + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \tag{27}$$

위 식에서 $x_1 = \begin{bmatrix} \dot{\theta} & \theta \end{bmatrix}^T$ 는 상태변수이고 f 는 적용된 회전토크이다. 측정되는 토크값은 센서신호에 더해지는 형태의 백색잡음으로 간주된다. 휴머노이드 로봇의 보행에 의한 잡음은 대부분 저주파 대역에 걸쳐 있으므로 측정신호에 저주파통과필터를 가하여 취급하고, 이 때 체비셰프(Chebyshev) 방식의 필터로 구성하면, 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다[7].

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u, \quad f = C_2 x_2 + D_2 u \tag{28}$$

필터통과된 신호를 고려하면, 식 (22)와 (23)은 다음과 같이 통합된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \overset{A}{\begin{bmatrix} A_1 & B_1 C_2 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \overset{B}{\begin{bmatrix} B_1 D_2 \\ B_2 \end{bmatrix}} u \tag{29}$$

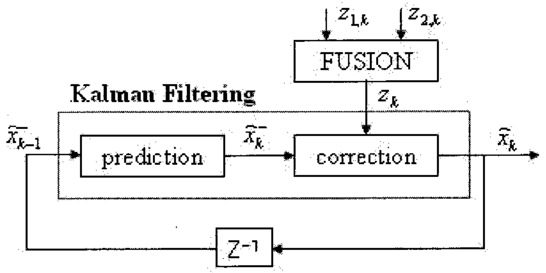


그림 4. 적용된 확장칼만필터과정의 개념도.
Fig. 4. A schematic of the applied Kalman filtering process.

$$y = \overset{C}{\begin{bmatrix} C_1 & D_1 C_2 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \overset{D}{D_1 D_2} u + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \tag{30}$$

칼만필터를 위 식에 적용하기 위해 u, n_1, n_2 의 공분산이 정의되어야 한다. 시스템의 특성을 고려하여 u는 백색잡음으로 n_1 와 n_2는 저주파수를 주요하게 포함하고 있다고 가정한다. 그림 4는 이와 같은 확장칼만필터에 의한 추정 과정을 표현한 것이다.

2. 다축동기식 적응필터 PID 제어

이족보행시스템의 경우 다양한 환경의 지면조건 변화, 내부의 수많은 변수 그리고 동적 연성의 문제 때문에 수학적 모델링에 의한 상태공간방정식 수립이 어렵고, 제어수행 결과가 보행목적상 전체적으로 고려되어야 하므로 일부 국한된 구간에서의 선형화 또한 무의미하다.

다수의 축이 상호 교차되어 연결되는 동적연성시스템(dynamically coupled system)에 관한 제어성능을 높이기 위하여 동기화 방법에 관한 연구가 주목을 받아 왔다[8]. 두 개 이상의 축의 제어각 조절에 의하여 최종적으로 정확한 추종성능을 유지하는 시스템의 경우 각 축이 순차적으로 제어되면, 순차적인 오차의 증폭이 커져 결과적 성능이 더 크게 악화되기 쉬우므로, 최종 제어각을 기준으로 최종 시점에서 각 축의 제어각 오차가 없도록 동기적으로 미세하게 조정해 나가는 방식이 동기화 방법이다. 또한, 동적연성시스템의 경우 상태\공간방식에 의한 모델링이 어렵고 선형화 미분방정식 형태의 변환도 적절치 않으므로 일반적으로 모델링이 필요치 않은 PID 제어 방식을 활용하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 시스템에 대한 적절한 제어기 설계를 위하여 동기화 방법에 의한 PID 제어방법을 활용하면서 외란의 제거성능을 높일 수 있는 적응필터 PID 제어방식을 이용한다.

$$\frac{q_1(t)}{q_1^d} = \frac{q_2(t)}{q_2^d} = \cdots = \frac{q_n(t)}{q_n^d}, \quad (i = 1, \ldots, n) \tag{31}$$

여기서 q_i^d 는 각 모터의 추종각이며, 위 조건이 성립할 때 기구부의 모든 모터는 동기적으로 움직이게 되므로 기구부 상단의 최종 자세지향각을 맞출 수 있다. 3점의 시간에서, $q_i(t)/q_i^d = q_{i+1}(t)/q_{i+1}^d = q_{i-1}(t)/q_{i-1}^d$ 의 조건을 추가하면 동기화 함수가 다음과 같이 유도된다.

$$f_i(q_i, q_{i+1}, q_{i-1}) = 2\frac{q_i(t)}{q_i^d} - \frac{q_{i+1}(t)}{q_{i+1}^d} - \frac{q_{i-1}(t)}{q_{i-1}^d} = 0. \tag{32}$$

각 모터의 제어각 오차를 $\Delta q_i(t) = q_i(t) - q_i^d$ 로 정의하고, 테일러급수전개(Taylor series expansion)하면,

$$\left.\frac{\partial f_i}{\partial q_i}\right|_{q_i^d}\Delta q_i(t)+\left.\frac{\partial f_{i+1}}{\partial q_{i+1}}\right|_{q_{i+1}^d}\Delta q_{i+1}(t)+\left.\frac{\partial f_{i-1}}{\partial q_{i-1}}\right|_{q_{i-1}^d}\Delta q_{i-1}(t)=0 \quad (33)$$

여기서,

$$\left.\frac{\partial f_i}{\partial q_i}\right|_{q_i^d}=\frac{2}{q_i^d},\ \left.\frac{\partial f_{i+1}}{\partial q_{i+1}}\right|_{q_{i+1}^d}=-\frac{1}{q_{i+1}^d},\ \left.\frac{\partial f_{i-1}}{\partial q_{i-1}}\right|_{q_{i-1}^d}=-\frac{1}{q_{i-1}^d}\ \text{이고,}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_1(t)&=\frac{2}{q_1^d}\Delta q_1(t)-\frac{1}{q_2^d}\Delta q_2(t)-\frac{1}{q_3^d}\Delta q_3(t)\\ \varepsilon_2(t)&=\frac{2}{q_2^d}\Delta q_2(t)-\frac{1}{q_3^d}\Delta q_3(t)-\frac{1}{q_1^d}\Delta q_1(t)\\ \varepsilon_3(t)&=\frac{2}{q_3^d}\Delta q_3(t)-\frac{1}{q_1^d}\Delta q_1(t)-\frac{1}{q_2^d}\Delta q_2(t)\end{aligned} \quad (34)$$

이는 다음과 같이 간략하게 표현될 수 있으며,

$$\bar{\varepsilon} = E(q^d)\Delta\bar{q} \quad (35)$$

여기서 $E(q^d)$ 는 식 (29)에서 유도되는 변환행렬이다.

$$E(q^d)=\begin{bmatrix} 2/\rho & -1/\rho & -1/\rho \\ -1/\rho & 2/\rho & -1/\rho \\ -1/\rho & -1/\rho & 2/\rho \end{bmatrix} \quad (36)$$

일반적인 PD 제어와 동기화 PI 제어를 결합시킨 제어기는 다음과 같은 형태로 표현된다[8].

$$\tau_C = -K_P(\Delta q + \varepsilon) - K_d\dot{q} - K_I\int_0^t(\Delta q(u) + \varepsilon(u))du \quad (37)$$

말단위치(end effector)의 정밀한 위치제어 정확성을 만족시키기 위한 동기화 제어를 실행하기 전에 추가해야 하는 부분은 다리의 일정패턴의 진동을 예측하고, 이러한 외란의 상체 전달을 억제시키는 역할을 수행하는 적응필터에 의한 제어기 성분이다. 골반기구에서 상체프레임 상에 z 축 상의 가속도 성분을 측정하면, 다음 그림과 같은 결과를 얻을 수 있다.

그림 5 에서 상단의 그림은 시간에 대한 가속도 성분의 변화이며, 하단의 그림은 이를 FFT 분석에 의해 주파수 성분을 확인하기 위한 것이다. 보행 하는 중의 각 다리 관절각은 시간에 대한 사인함수의 형태로 표현되는 것이 보통이며 무릎부위와 발목 부위 등도 이와 같은 일정 주기를 갖고 있는 반복적인 운동이다. 선정된 모터의 회전수는 허벅지관절부터 발목까지 약 2.9Hz~3.5Hz 범위이다. 이러한 일정형태의 외란을 실시간으로 관측하여, 제어기에 반영함으로써, 외란 배제 성능을 높일 수 있다. 즉 일정 주파수를 갖는 사인파 형태의 외란요소는 이에 대한 반대위상의 사인파 제어입력을 가함으로써, 기존의 PID 제어기의 성능에 외란배제능력을 추가하게 된다. 이러한 역할에 적당한 필터로 Sallen-Key[9]의 능동형 적응필터(active adaptive filter)를 도입한다. 이는 저주파통과필터(low-pass filter)형태로 2개의 극점을 갖는 버터워즈(butterworth) 필터의 한 종류이다.

저주파통과필터인 H_1, H_2, H_3 에서는 작은 것부터 큰 것의 순으로 세 개의 주요 주파수 성분을 통과시켜 주파수 성분의 상대적 진폭에 대한 가중치를 이득값 K로 설정하게 된다. 여기서 주파수 대역폭 값은 적응필터회로 상의 저항값을 조정함으로써 가능하며[9], 각각 허벅지관절모터 주파수와 그 배수, 3배수의 값을 취하여 필터이득계수 K_1, K_2, K_3 는 각각 1, 0.5, 0.2의 비율을 유지하도록 설정한다. 그림 7은 위 결과를 얻기 위해 구성된 ADAMS™ 모델이며, 외관과 전자회로 및 컴퓨터, 전원부를 고려하지 않은 동역학 시뮬레이션을 위한 기계적 구조중심의 휴머노이드 로봇 모델이다. 이 모델은 제작된 실제모델을 실험하기 위한 선행연구를 수행하기 위한 것으로, 로봇 전체의 높이는 약 130cm(상체 50cm, 골반기구 포함한 하체 80cm)이며 무게는 25Kg이다. 보행을 위한 허벅

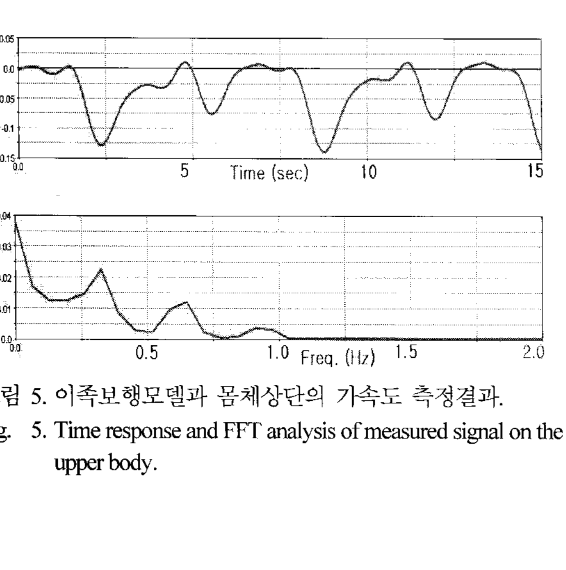


그림 5. 이족보행모델과 몸체상단의 가속도 측정결과.

Fig. 5. Time response and FFT analysis of measured signal on the upper body.

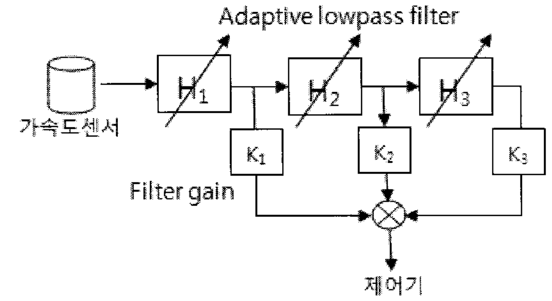


그림 6. 적응필터의 신호흐름선도.

Fig. 6. Signal flow diagram of adaptive filter.

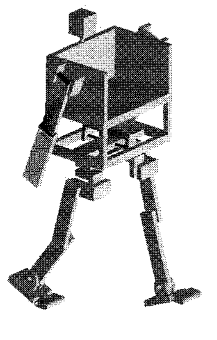


그림 7. 동역학 시뮬레이션 수행을 위한 ADAMS 모델.

Fig. 7. ADAMS model for dynamics simulation.

지부위 관절각은 주기가 2초인 사인파 형태로 설정하였으며, 무릎부위와 발부위의 관절각들은 지면에의 접촉시간을 고려하여 자연스러운 보행패턴에 적합하도록 동일한 주기를 갖되 위상차이\를 주었다. 이는 구속되지 않은 로봇모델에 적절한 평형관계를 만족시키면서 전진을 위한 추진력을 생성시키는 지면접촉력을 엄밀히 고려하지 않은 개회로제어(open loop control, feedforward control)이며, 골반기구의 외란제어 기능 관점에서 지면과 발 접촉시 발생하는 충격력과 각 다리부위의 각운동 만을 고려하여도 충분하다고 전제하고 있다.

IV. 시뮬레이션 실험결과 및 분석

골반기구 상에는 2개의 기울기 센서와 레이트 자이로센서 그리고 전자나침반이 설치되어 있어, 각각 롤, 피치, 요 각을 측정할 수 있다. 각 센서로부터의 신호는 잡음과 오차를 포함할 수 있으므로 센서융합을 하여 신호의 정확성을 기한다. 보다 정확성을 기하기 위하여 처리된 신호는 역기구학 해를

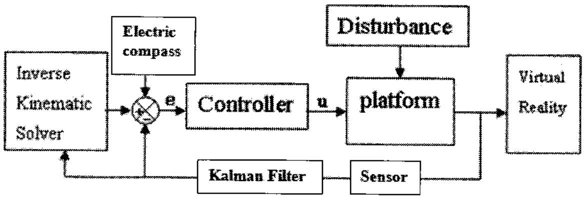


그림 8. 골반기구의 제어 시뮬레이션 과정도.

Fig. 8. Simulation diagram for control system design.

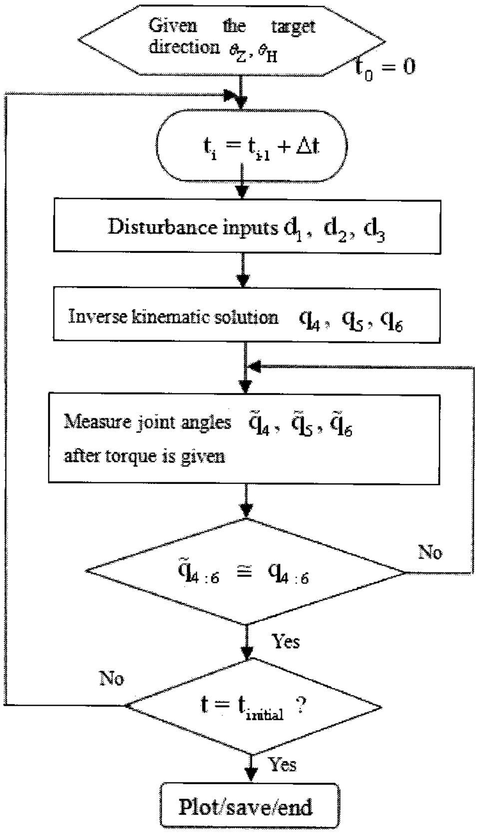


그림 9. 골반기구의 제어 알고리즘 흐름도.

Fig. 9. Flow diagram of platform control algorithms.

추종하도록 각 모터의 각도를 제어하게 된다. 제어방식은 적응 필터 동기화 PID 제어방식을 쓰며, 그 결과는 그래프형태 및 가상환경 상으로 출력된다. 그림8과 그림 9는 이러한 시뮬레이션 과정과 알고리즘 흐름도를 나타낸 것이다.

휴머노이드 로봇의 보행 시뮬레이션을 위하여 사람의 일반적인 보행 패턴 및 보행 환경을 적용하였다. 보행 속도는 약 1초에 2보 미만이 되어 시속 1.7Km/h가 되며, 지면과의 접촉 및 발바닥의 접촉 시 전해지는 주파수 등을 고려하여 약 10Hz의 외란을 가정하였다. 또한 하체를 통해 전해지는 충격의 크기를 고려하여, 하체프레임의 기울기각 변화가 ±10° 이하가 되도록 설정하였다. 골반기구 부분 만의 무게는 약 5kg이고, 모든 링크는 원통형 알루미늄소재로 구성하였다. 시뮬레이션 결과는 ADAMS™와 MATLAB/SIMU LINK /SimMechanics™를 이용하였으며, 그 결과를 그래프를 통해 분석하였다. 그림 10은 골반기구의 하체프레임에 전달되는 외란을 나타낸 것이고, 그림 11는 이 때의 골반기구의 각 프레임 제어각이 역기구학에 의해 결정되는 것을 나타낸 것이다. 이 때의 제어목적은 상체프레임이 항상 절대수준에서 평행인 상태를 유지하도록 하는 것이다. 그림 12는 센서융합과정을 통해 실제 각도와 각속도를 추종하는 과정을 나타낸 것

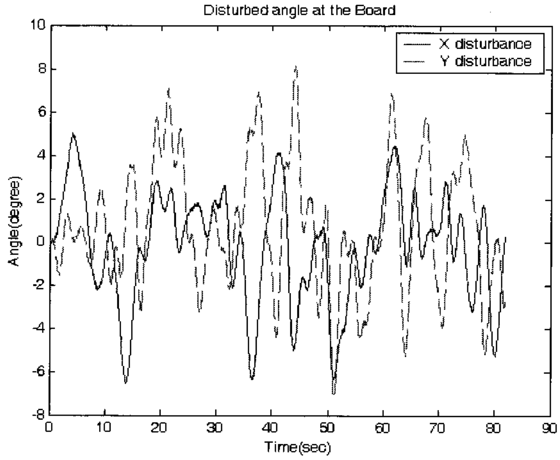


그림 10. 골반기구의 하체프레임에 전달되는 외란.

Fig. 10. Disturbances on the lower body frame of platform.

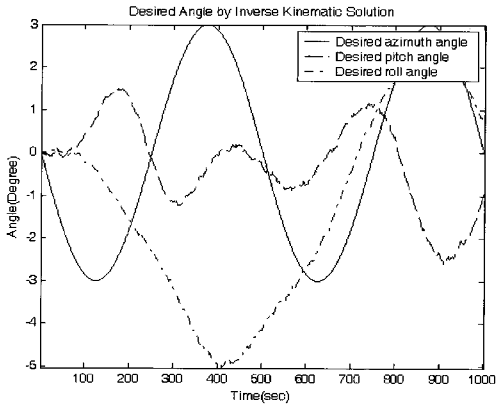


그림 11. 역기구학 해로 구해진 제어각.

Fig. 11. Desired angles by inverse kinematic solver.

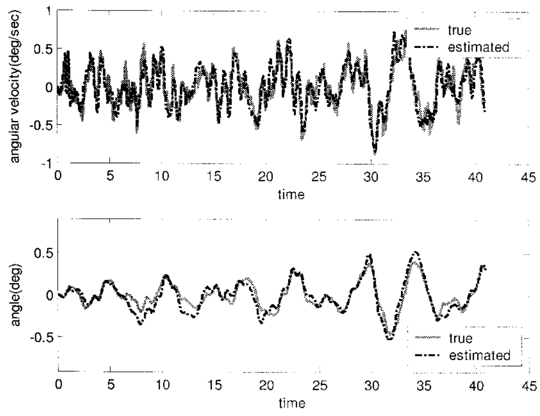


그림 12. 센서융합에 의한 기울기각 및 각속도 추종결과.

Fig. 12. Estimation results about angle and angular vel. by sensor fusion.

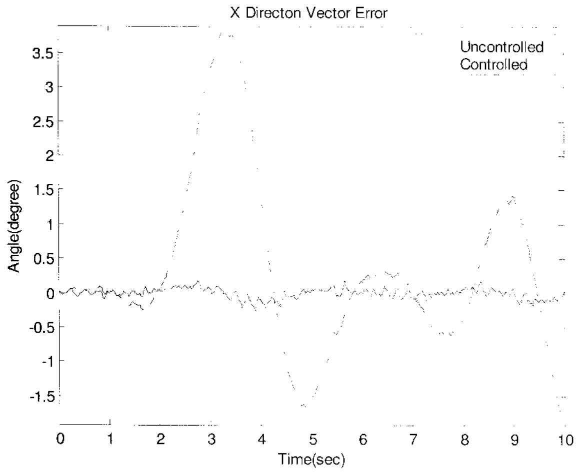


그림 13. 골반기구의 X축 제어 성능 결과.

Fig. 13. Controlled response of pelvis platform X axis.

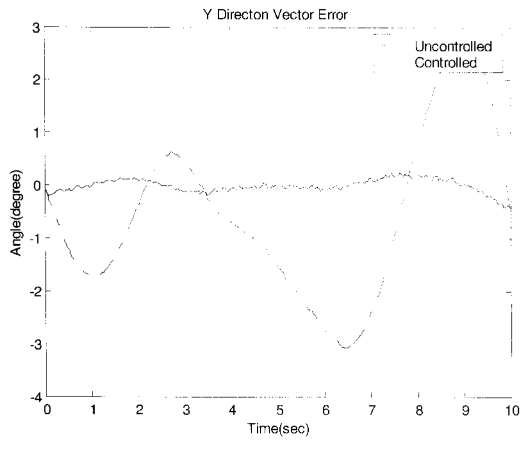


그림 14. 골반기구의 Y축 제어 성능 결과.

Fig. 14. Controlled response of pelvis platform Y axis.

이다. 마지막으로 그림 13과 14는 위와 같은 보행 중의 외란 환경 하에서 역기구학 해를 통하여 추종각을 얻은 후, 적응 필터 동기화 PID 제어에 의한 제어 성능 결과를 나타낸 것이다. 이는 상체프레임의 x축 방향의 오차각도의 제어 전후 결과를 통해 확인할 수 있다.

V. 결론

휴머노이드 로봇의 이족보행 안정성을 유지하기 위한 골반기구의 필요성 및 제어시스템 설계를 통하여 성능결과를 시뮬레이션 수행으로 확인하였다. 골반기구는 로봇의 보행 시 동적 평형을 유지할 뿐만 아니라, 특정 자세를 유지할 수 있는 여유자유도를 가능케 하면서, 보행 시의 일정 주파수 외란에 대한 제거능력을 갖출 수 있다. 골반기구의 프레임 제어각은 병렬 처리되는 시스템에 의한 역기구학 해를 통해 추종각을 얻을 수 있다. 우수한 외란제거 성능을 보이는 적응 필터 개념이 3축 회전자유도를 가진 비선형 동적 연성 골반 기구 시스템에 적용됨으로써, 동기화 PID 제어기의 실시간 성능을 더욱 높일 수 있었다. 또한 피드백 신호의 실시간 정확성을 위하여 확장칼만필터 방식의 센서융합 알고리즘을 효과적으로 적용하였다. 시뮬레이션 결과는 본 제어시스템의 성능이 속도 및 실시간 추종성에서 우수함을 보여주었다.

참고문헌

[1] Giuseppe Carbone et al., "Stiffness analysis of biped humanoid robot WABIAN-R4," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 41, pp. 17-40, 2006

[2] M. Vukobratovic, "Zero-Moment point-Thirty five years of its life," *Int. J. of Humanoid Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 157-173, 2004.

[3] E. R. Westervelt et al., *Feedback control of dynamic bipedal robot locomotion*, CRC Press, 2007.

[4] M. Wisse, D. G. E. Hobbelen, and A. L. Schwab, "Adding ad upper body to passive dynamic walking robots by means of a besecting hip mechanism," *IEEE trans. On Robotics*, vol. 23, no. 1, Feb. 2007.

[5] D. G. E. Hobbelen and M. Wisse, "Swing-leg retraction for limit cycle walkers improves disturbance rejection," *IEEE trans. On Robotics*, vol. 24, no. 2, April 2008.

[6] F. Asano, M. Yamakita, "Virtual gravity and coupling control for robotic gait synthesis," *IEEE trans. On systems, man, and cybernetics-Part A:systems and humans*, vol. 31, no. 6, Nov. 2001.

[7] 장유신, 계중읍, "이동형 차량용 무인사격시스템의 외란 제거 및 자세 제어," 전자공학회논문지, 제44권 제3호, 2007.

[8] D. Simon, *Optimal State Estimation: Kalman, H-infinity, and Nonlinear Approaches*. John Wiley & Sons, 2006.

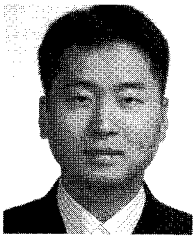
[9] C. Peng and K. ONO, "Accuracy analysis of optimal trajectory planning methods based on function approximation for a four-dof biped walking model," *J. of Mechanical Scienceand Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 452-460, 2005.

[10] J. Li, W. Chen, D. Liu, and J. Wang, "Inverse Kinematic and Dynamic analysis of a 3 DOF parallel mechanism," *7th International Conference on Control, Automamation, Robotics and Vision*, Singapore, Dec. 2002.

[11] T. takahashi and A. kawamura, "Position and altitude tracking control for toe support phase of biped walking robot," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 157, no. 1, 2006.

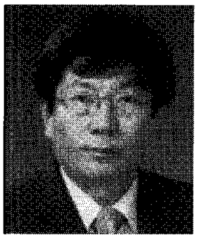
[12] P. Sardain and G. Bessonnet, "Forces acting on a biped robot.

Center of pressure-ZMP," *IEEE Transactions on system, man and cybernetics*, vol. 34, no. 5, 2004.
[13] Y. Su, D. Sun, and J. K. Mills, "Integraton of saturated PI synchronous control and PD feedback for control of parallel manipulator," *IEEE transactions on robotics*, vol. 22, no. 1, 2006.
[14] J. Karki, "Active low-pass filter design," Application Report of Texas Instruments, Oct. 2000.



김 수 현

1975년 12월 18일생. 2001년 고려대학교 기계공학과 학사. 2003년 고려대학교 대학원 기계공학과 석사. 2005년 KAIST 기계공학과 박사과정수료. 2009년 2월 목원대학교 IT공학과 대학원 박사. 관심분야는 휴머노이드 로봇 보행, 입체 시각시스템, 패턴인식.



양 태 규

1958년 2월 7일생. 1982년 광운대학교 전자공학과 학사. 1984년 광운대학교 대학원 전자공학과 석사. 1989년 광운대학교 대학원 전자공학과 박사. 1991년~2006년 목원대학교 전자공학과 교수. 2007년~현재 목원대학교 지능로봇공학과 교수. 관심분야는 지능제어, 지능로봇 등.