

# ZMP를 이용한 굴삭기의 안정성에 관한 연구

최종환<sup>+</sup>, 엄 혁<sup>+</sup>, 임태형<sup>++</sup>, 김승수<sup>+++</sup>, 양순용<sup>++++</sup>, 이병룡<sup>++++</sup>, 안경관<sup>++++</sup>

## A Study on Stability of Excavator using ZMP

Choi Jong-Hwan<sup>+</sup>, Um Hyuk<sup>+</sup>, Lim Tae-Hyeong<sup>++</sup>, Kim Sung-Su<sup>+++</sup>, Yang Soon-Yong<sup>++++</sup>,  
Lee Byung-Ryong<sup>++++</sup> and Ahn Kyung-Kwan<sup>++++</sup>

### Abstract

The hydraulic excavator has been a popular research object for automation because of its multi-workings and economic efficiency. When it works crane tasks, most of disasters happen. The stability of the excavator having crane function has a close relation with excavator's posture, motion and load. In this paper, the stability of tipping-over has been analysed using Zero Moment Point(ZMP),

**Key Words :** hydraulic excavator(유압굴삭기), Zero Moment Point(ZMP), Tipping-over(전도)

### 1. 서론

건설 현장에서 많이 사용하고 있는 유압굴삭기는 기계 자체가 갖는 기구학적 유연성과 유압을 이용한 고출력 때문에 그 역할과 기능이 점차 확대되고 있어 굴삭 작업뿐만 아니라 크레인 작업도 병행하고 있다. 그러나 유압굴삭기를 이용한 크레인 작업은 법으로 규제하고 있으나, 그럼에도 불구하고 필요에 의해 불법으로 작업을 하고 있으며 이로 인한 사고가 증가하고 있는 실정이다. 크레인 작업은 하중을 들어올리는 동시에 가속을 하고 일정지점까지 등속으

로 움직이다가 목표지점의 일정위치 근처에서 감속과 동시에 하중을 내리는 일련의 동작으로 작업자는 작업장치를 동시에 조작해야 하므로 고도의 숙련이 필요하며, 숙련된 작업자라 할지라도 전도 사고의 위험성을 안고 작업하게 된다.

유압굴삭기 전도에 관한 안정성 문제는 정적인 상태에 서 모멘트 방정식을 적용하여 해석하고 있다. 그러나 실제 작업에서는 하중을 포함한 유압굴삭기 작업장치의 동적인 요소가 추가되므로 모멘트 방정식에 의한 전도의 안정성 판별은 어렵다. 따라서, 정적인 상태 및 동적인 상태를 고

\* 부산대학교 대학원 지능기계공학과 (jonghan@pusan.ac.kr)

주소: 680-749 울산광역시 남구 무거2동 산29 남울산우체국 사서함18호 울산대학교 산학협동관 404호

++ 울산대학교 대학원 기계·자동차공학과

+++ 울산대학교 RRC

++++ 울산대학교 기계·자동차공학부

려한 유압굴삭기의 안정성 판별 알고리즘이 필요하다.

ZMP(Zero Moment Point)는 대상 시스템에 작용하는 모든 힘에 의한 모멘트의 합이 zero인 평면상의 점이라고 정의한다. 일반적으로 ZMP 이론은 기존의 바이페드 로봇 연구에서 안정적인 거동에 관한 해석으로 적용하고 있다. Takanish는 예상 ZMP 성분을 미리 설정하여 만족시킬 수 있는 트렁크의 궤적을 구하였고, 안정성을 향상시키기 위해 트렁크의 롤링(rolling) 및 요잉(yawing) 모멘트를 사용하였다. Sorao는 기준 입력 ZMP와 측정된 ZMP와의 오차 값을 제어함으로써 보행의 안정성을 증명하였다. 그러나, ZMP에 대한 정확한 궤적을 얻지 못하여 보행에 있어서의 유연성은 떨어진다. 이 경우 로봇의 경우 인간의 보행에서와 같이 트렁크의 운동을 유연적으로 하기 위해서는 ZMP의 위치를 발바닥 영역 안의 적절한 위치로 선정하여야 한다. 즉, ZMP의 위치는 시간에 대한 함수로 표현되어야 하나, ZMP를 로봇의 보행에 따라 적절히 위치시킨다는 것은 쉽지 않은 문제이다. ZMP를 적용한 안정성 해석은 임의의 안정영역을 설정하고 ZMP가 설정된 영역을 벗어나면 불안정하고, 영역 내에 존재하면 안정성을 유지하게 된다.

이에 본 연구에서는 ZMP 이론을 적용하여 유압굴삭기의 크레인 작업시 전도에 대한 안정성 해석을 제안한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 ZMP 이론에 근거로 하여 안정영역을 설정하고 모멘트 방정식을 이용한 안정성 해석 문제와 비교하여 하중을 포함한 동적 요소의 추가로 전도에 대한 안정성에 미치는 영향을 고찰하도록 한다.

## 2. 유압굴삭기의 전도 안정성 해석

유압굴삭기는 무게중심의 위치에 따라 안정성이 결정된다. 무게중심이 유압굴삭기의 하부체 바닥면 내부에 존재하면 지면으로부터 무게에 대한 반력을 받아 안정성을 유지하

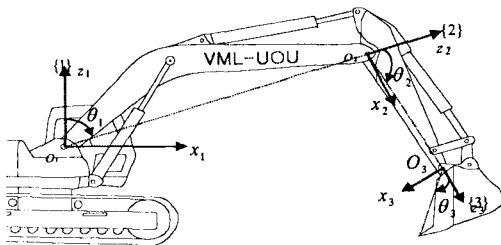


Fig. 1 Coordinate system of hydraulic excavator

며 굴삭작업 및 크레인 작업을 수행할 수 있다. 그러나 무게중심의 위치가 하부체 바닥면을 벗어나면 지면에 의한 반력이 상실되어 전도가 발생한다. 이러한 상태를 불안정한 상태라고 한다. 따라서 유압굴삭기의 안정성 해석은 무게중심의 위치와 관계하는 문제이다. 본 연구에서는 유압굴삭기 작업장치를 강체로 가정하며 상부체의 선회(swing) 운동은 배제한다. 또한 유압굴삭기는 고정된 지점에서 크레인 작업을 수행하는 것으로 가정한다. 유압굴삭기 작업장치의 운동을 표현하기 위해 Fig. 1과 같은 좌표계를 설정한다. 붐 조인트  $O_1$  을 기준으로 붐, 암, 버킷 끝단의 변위를 나타내면 식(1)~(3)과 같다.

$$x_1 = L_1 \sin \theta_1 \quad (1)$$

$$z_1 = L_1 \cos \theta_1$$

$$x_2 = x_1 + L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

$$z_2 = z_1 + L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2)$$

$$x_3 = x_2 + L_3 \sin (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3)$$

$$z_3 = z_2 + L_3 \cos (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

Fig. 2는 유압굴삭기 작업장치의 무게중심을 나타내고 있다. 유압굴삭기의 상부체와 하부체의 무게중심은 고정이며, 작업장치에 대한 무게중심은 식(4)~(6)과 같이 표현된다.

$$x_{1g} = l_1 \sin (\theta_1 - \delta_1) \quad (4)$$

$$z_{1g} = l_1 \cos (\theta_1 - \delta_1)$$

$$x_{2g} = x_1 + l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2 - \delta_2) \quad (5)$$

$$z_{2g} = z_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2 - \delta_2)$$

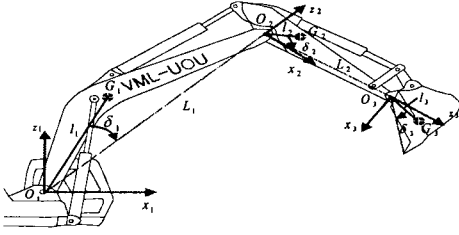


Fig. 2 Schematic diagram of attachment

$$x_{3g} = x_2 + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - \delta_3) \quad (6)$$

$$z_{3g} = z_2 + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - \delta_3)$$

따라서 암의 끝단에 하중이 매달린 상태에서 전체 무게중심을 나타내면 식(7)과 같다.

$$x_g = \frac{1}{W} \left\{ \sum_i (W_i x_{ig}) + W_a x_a + W_b x_b + W_l x_2 \right\} \quad (7)$$

$$z_g = \frac{1}{W} \left\{ \sum_i (W_i z_{ig}) + W_a z_a + W_b z_b + W_l z_2 \right\}$$

여기서  $W$ 은 유압굴삭기의 총 무게,  $W_i$ 는 유압굴삭기 작업장치의 무게,  $W_l$ 은 하중,  $W_a$ 와  $W_b$ 는 유압굴삭기의 상부체와 하부체의 무게를 각각 나타내며,  $(x_a, z_a)$ 와  $(x_b, z_b)$ 는 유압굴삭기의 상부체와 하부체의 무게중심 좌표값을 각각 나타낸다.

또한 전도가 발생하는 축의 수직선과 무게중심과의 각도를 전도각이라 정의하면 식(8)과 같다.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{L_1 - x_g}{z_g} \right) \quad (8)$$

여기서  $L_1$ 은 좌표축 원점과 전도가 발생하는 지점까지의 거리를 나타낸다.

만약 무게중심이 유압굴삭기 하부체 바닥면 내부에 존재하면 전도각은 양의 값을 가지고, 외부에 존재하면 음의 값을 가진다. 즉, 전도각이 양의 값을 가지면 유압굴삭기는 안정이고, 음의 값을 가지면 불안정하여 전도가 발생한다.

### 3. ZMP 이론

ZMP(Zero Moment Point)는 대상 시스템의 하부체 바닥의 기준 좌표계에 대하여 시스템의 관성력, 중력, 외력 등에 의한 모멘트의 합이 zero인 평면상의 점이라 정의한다.

Fig. 3은 기준 좌표계 O-XYZ에서 질점에 대한 벡터의 관계를 나타내고 있다. 임의의 점  $P$ 에 대하여 D'Alembert 법칙을 적용하여 운동방정식을 유도하면 식(9)와 같다.

$$\sum_i (r_i - p) \times m_i (\ddot{r}_i + g - \dot{p}) + \rho_c \times m \ddot{p} + \sum_i T_i - \sum_j M_j - \sum_k (s_k - p) \times f_k = M_p \quad (9)$$

여기서  $m_i$ 는 질점의 질량,  $r_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 는 기준 좌표계 원점에 대한 질량 중심의 위치벡터,  $p = [x_p, y_p, 0]^T$ 는 임의의 점  $P$ 에 대한 X - Y평면의 위치벡터,  $g = [0, 0, g_z]^T$ 는 중력가속도,  $T_i$ 는 회전관성 모멘트,  $M_j$ 는 외부에서 작용하는 모멘트,  $f_k$ 는 외력,  $s_k$ 는 외력이 작용하는 위치벡터 등을 각각 나타낸다. 임의의 점  $P$ 에 대한 질량 중심의 위치벡터  $\rho_c$ 는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_c = \frac{1}{m} \sum_i m_i (r_i - p) \quad (10)$$

식(10)을 식(9)에 대입하여 정리하면 식(11)과 같다.

$$\sum_i (r_i - p) \times m_i (\ddot{r}_i + g) + \sum_i T_i - \sum_j M_j - \sum_k (s_k - p) \times f_k = M_p \quad (11)$$

임의의 점  $P$ 가 ZMP라고 하면 위치벡터  $p = p_{zmp} = [x_{zmp}, y_{zmp}, 0]^T$ 이고, 모멘트의 합은  $M_p = [0, 0, M_z]^T$ 이다. 따라서 ZMP에 대한 각 성분을 정리하면 식(12), (13)과 같다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_i m_i (\ddot{x}_i + g_x) z_i - \sum_j T_{y_j} + \sum_j M_{y_j} + \sum_j (s_{zj} f_{xj} - s_{xj} f_{zj})}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_j f_{zj}} \quad (12)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_i m_i (\ddot{y}_i + g_y) z_i + \sum_j T_{zj} + \sum_j M_{xj} + \sum_j (s_{yjf} z_j - s_{zjf} y_j)}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_j f_{zj}} \quad (13)$$

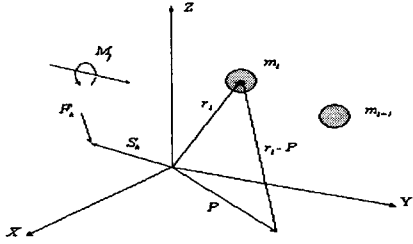


Fig. 3 Definition of Vectors for System

외부에서 모멘트와 힘이 작용하지 않는다고 가정하면 ZMP에 대한 각 성분은 아래와 같은 식(14), (15)와 같다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (14)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (15)$$

#### 4. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 연구에서는 유압굴삭기에서 크레인 작업을 수행할 때 ZMP 이론을 적용하여 전도에 대한 안정성 문제를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석한다.

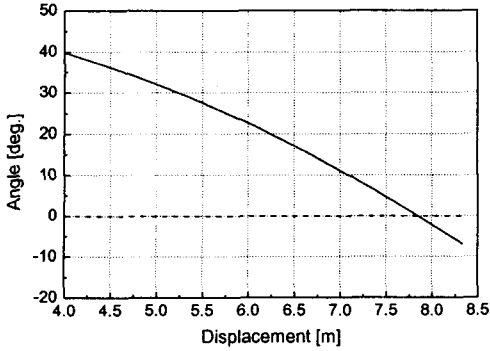
작업 조건은 암 끝단에 임의의 부하를 매달고 안쪽에서 바깥쪽으로 등가속도로 이동할 때 기존의 모멘트 방정식의 CGC(Center of Gravity Control) 적용과 ZMP 이론 적용에 의한 전도 안정성 해석 결과를 비교하도록 한다. ZMP 이론에 의한 안정영역은 유압굴삭기가 지지되고 있는 하부체 바닥면으로 선정하여 ZMP의  $x_{zmp}$  성분의 임계점은 기준 원점으로부터  $\pm 2.22[m]$ 로 설정한다. 크레인 작업시 동적인 요소를 배제하기 위하여 암 끝단의 수평 가속도 성분을 매우 작은 값으로 한다. 또한 동적인 요소가 전도에 미치는 영향을 확인하기 위해 암 끝단의 가속도에 따른 전도 상황을 CGC 이론과 ZMP 이론 적용의 해석 결과를 비교·

Table 1 Parameters of hydraulic excavator used in computer simulation

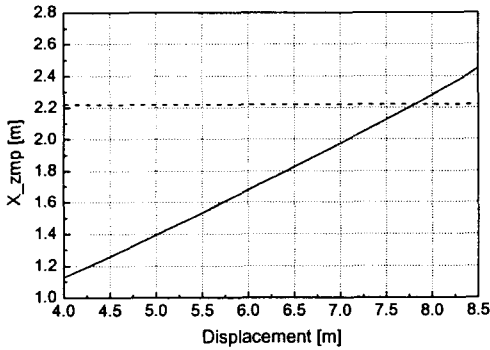
Para.	Value	Para.	Value
$m_a$	8950 [kg]	$L_1$	5.68 [m]
$m_b$	8889 [kg]	$L_2$	2.92 [m]
$m_1$	2152 [kg]	$L_3$	1.46 [m]
$m_2$	879 [kg]	$l_1$	2.7 [m]
$m_3$	830 [kg]	$l_2$	0.623 [m]
$x_a$	-1 [m]	$l_3$	0.553 [m]
$z_a$	1.69 [m]	$\delta_1$	12.4 [deg.]
$x_b$	0 [m]	$\delta_2$	13.8 [deg.]
$z_b$	0.65 [m]	$\delta_3$	26.2 [deg.]

검토하였다. 유압굴삭기는 선회(swing)운동은 고려하지 않은 2차원 평면 운동으로 제한하여 궤적 계획을 수립한다. 궤적 계획은 5차 다항식을 통해 Arm 끝단의 위치와 속도 그리고 가속도가 결정되고, 역기구학(inverse kinematics) 해석을 통하여 각 관절의 목표 회전각이 구해진다. 크레인 작업시 버킷은 사용하지 않으므로 최대한 오무런 자세로 고정하고, 하중은 1500[kg]으로 암의 끝단에 집중하중으로 설정한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 하기 위하여 본 연구에 사용한 유압굴삭기의 기구학적 제원과 유압장치의 제원은 Table 1과 같다.

Fig. 4는 암 끝단의 수평 가속도가  $0.1[m/s^2]$ 일 때 암의 변위에 대한 CGC 적용의 전도각과 ZMP의  $x$  성분을 나타내고 있다. 전도각이 양의 값을 가지면 무게중심이 유압굴삭기의 하부체 바닥면 내부에 존재하여 지면의 반력에 의하여 안정성을 유지한다. Fig. 4(a)에 나타난 것과 같이 초기 전도각에서 암 끝단 변위가 증가할수록 전도각은 감소하고



(a) Angle of tipping-over

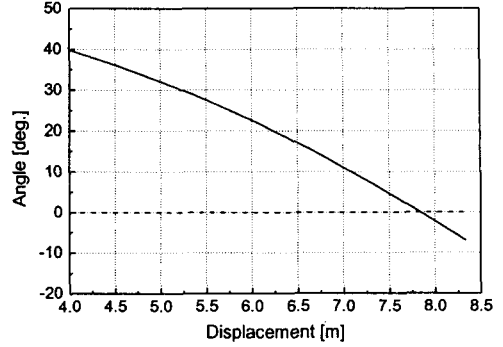


(b)  $x_{zmp}$

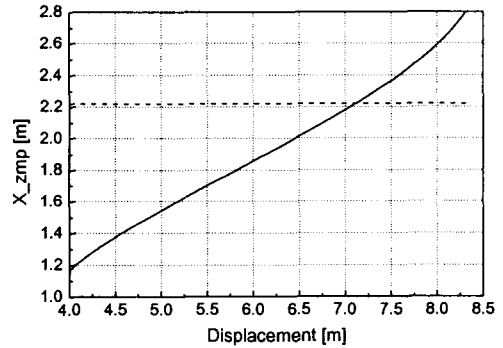
**Fig. 4 Acceleration of arm : 0.1 [m/s<sup>2</sup>]**

변위가 약 7.8[m]일 때 전도각이 전이하여 전도가 발생될 것으로 예상된다. 이는 ZMP 이론을 적용한 Fig. 4(b)에서도 동일한 결과를 얻었다. ZMP의  $x$  성분의 변화를 보면 암 끝단 변위가 약 7.8[m]일 때 ZMP의 안정영역을 벗어나고 있다. 이것은 설정된 가속도 값이 작아 동적인 영향이 반영되지 않았다.

Fig. 5는 암 끝단의 수평 가속도가 3[m/s<sup>2</sup>]일 때 암의 변위에 대한 CGC 적용의 전도각과 ZMP의  $x$  성분을 나타내고 있다. Fig. 5(a)에 나타난 것과 같이 전도가 발생하는 지점은 수평 가속도가 0.1[m/s<sup>2</sup>]일 때와 동일하다. 이것은 CGC는 동적인 성분이 배제된 상황에서 정적인 상태의 전도 안정성을 해석하고 있기 때문이다. 그러나 Fig. 5(b)에서 알 수 있는 것과 같이 암 끝단의 수평 가속도가 3[m/s<sup>2</sup>]이면  $x_{zmp}$ 는 암 변위가 약 7.1[m]일 때 안정영역을 벗어나 전도가 발생될 것으로 사료된다. 이것은 가속도의 증가로 동적인 요소가 포함되었기 때문이다.



(a) Angle of tipping-over

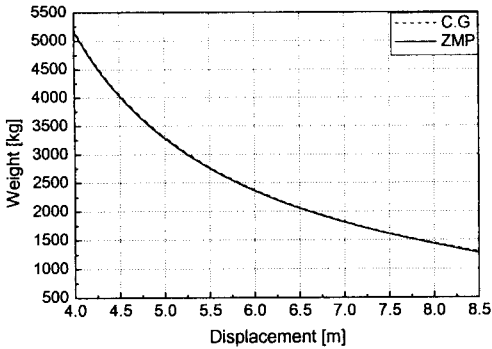


(b)  $x_{zmp}$

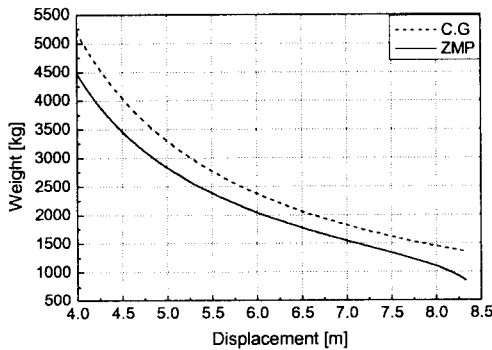
**Fig. 5 Acceleration of arm : 3 [m/s<sup>2</sup>]**

Fig. 6은 암 끝단 변위에 대한 CGC 적용과 ZMP 이론 적용에 의한 전도하중을 나타낸다. 점선은 CGC 적용의 결과, 실선은 ZMP 이론 적용의 결과를 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 암 끝단의 수평 가속도가 0.1[m/s<sup>2</sup>]일 때 전도하중을 나타낸다. 동적 요소가 반영되지 않아 동일한 전도하중을 나타내면 변위가 증가할수록 전도하중은 감소하고 있다.

Fig. 6(b)는 암 끝단의 수평 가속도가 3[m/s<sup>2</sup>]일 때 전도하중을 나타낸다. 동일한 암 끝단 변위 지점에서 수평 가속도의 증가로 동적 성분이 추가되어 ZMP 이론에 의한 전도하중은 CGC에 의한 하중 값보다 작은 값을 가진다.



(a) Acceleration of arm : 0.1 [m/s<sup>2</sup>]



(b) Acceleration of arm : 3 [m/s<sup>2</sup>]

Fig. 6 Load of tipping-over

## 5. 결 론

본 연구에서는 유압굴삭기에서 크레인 작업을 수행할 때 ZMP 이론을 적용하여 전도에 대한 안정성 해석을 수행하였다. 크레인 작업시 전도를 발생시키는 힘은 유압굴삭기와 하중의 정적인 힘과 하중 이동에 의한 관성력도 포함된다. 전도 안정성을 해석하기 위한 기존의 CGC 이론은 정적인 상태에서 모멘트 방정식을 이용하여 전도 상황을 예측하고 있어 관성력에 의한 전도 안정성은 해석되지 않는다. 그러나 ZMP 이론을 적용하면 정적인 성분뿐 아니라 동적인 성분도 모두 고려할 수 있다. 하중의 이동에 대한 관성력이 작은 값을 가질 때는 하중의 이동 변위에 대한 전도하중이 CGC 적용의 경우와 동일한 결과를 나타내며, 하중 이동의 가속도 성분이 증가할수록 ZMP 이론의 적용시 전도하중은 CGC 적용보다 작은 값으로 나타난다. 이것은 관성력의 증가로 실제 크레인 작업시 부하하중은 정적인 상태에서의 부

하하중보다 감소되어야 함을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다.

향후 ZMP 이론을 적용하여 유압굴삭기 작업장치의 평면 작업뿐만 아니라 상부체의 선회 및 주행을 포함한 3차원 상에서 크레인 작업시 유압굴삭기의 전도에 대해 해석하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부-한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성 평가 연구 센터 지원에 의한 것입니다.

## 참 고 문 헌

- (1) John J. Craig, *Introduction to Robotics Mechanics and Control second edition*, Addison-Wesley, 1992.
- (2) T. Morita, Y. Sakawa, "Modeling and Control of a Power Shovel", *計測自動制御學會論文集*, Vol.22, No.1, 1986.
- (3) S. Kajita and K. Tani, "Study of Dynamic Biped Locomotion on Rugged Terrain", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1405-1411, 1991.3.
- (4) Shigeki SUGANO, Qiang HUANG, Ichiro KATO, "Stability Criteria in Controlling Robotic Systems", *IEEE/RSJ*, July 26-30, 1993.
- (5) Qiang HUANG, Shigeki SUGANO, "Manipulator Motion Planning for Stabilizing a Mobile-Manipulator", *IEEE*, 1995.
- (6) K. Sorao, T. Murakami, and K. Ohnishi, "A Unified Approach to ZMP and Gravity center Control in Biped Dynamic Stable Walking", *Proceeding of Advanced Intelligent Mechatronics AIM97*, 1997.
- (7) A. Ghasempoor, N. Sepeshri, "A Measure of Stability for Mobile Manipulators with Application to Heavy-Duty Hydraulic Machines", *ASME*, Vol.120, 1998.
- (8) M. W. Spong, *Robot Dynamics and Control*, United State, John Wiley & Sons, 1989.
- (9) J. Yamaguchi, A. Takanish, and I. Kato, "Development of A Biped Robot Compensating for Three-Axis

Moment by Trunk Motion", *Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 561-566, 1993.9.

- (10) Huang, Z. M., Waldron, K. J., "Relationship Between Payload and Speed in Legged Locomotion Systems", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 6, No 5, 1993.
- (11) T. Yoshimura, K. Etokoro, "A Simulation Study of Leveling Control by Hydraulic Shovels", *日本機械學會論文集(C編)* 58卷 554号, 1992.