

크레인 기능을 가진 굴삭기 안전장치 알고리즘

The Algorithm of Safety Equipment of The Hydraulic Excavator with Crane Working

손 구 영(울산대원), 김 승 수(울산대 R.R.C.),

양 순 용(울산대 기계·자동차공학부), 이 병 룡(울산대 기계·자동차공학부), 안 경 관(울산대 기계·자동차공학부)

Abstract

A hydraulic Excavator is applied for outdoor tasks in construction, agriculture and undersea etc. When a hydraulic Excavator works crane function tasks, most of disasters happen. In this study, In order to preventing these disasters, the safety equipment algorithm for crane working is developed, and the safety equipment algorithm for crane working is being developed. The proposed control algorithm(Zero Moment Point) is designed to avoid overload. The hydraulic excavator for crane function must work within a maximum limit of load. To accurately detect a working load, pressure sensors of boom, arm cylinder, and angle sensors of boom, arm and bucket joint are used.

Keywords : Excavator, Z.M.P., Overload.

I. 서론

굴삭기(Excavator)은 건설, 임업, 농업, 해저 등 다양한 옥외 작업에서 인간을 대신하여 위험하거나 반복적이고 힘든 일을 수행 할 수 있는 것을 의미한다. 특히, 건설 현장에서 많이 사용되는 굴삭기의 생산성 향상, 안전성 확보, 위험한 작업장에서의 해방 등을 위해 자동화, 지능화의 요구가 높아지고 있다. 이에따라, 산업현장에서는 다양한 작업이 가능한 굴삭기의 필요성이 부각됨에 따라 다기능 굴삭기에 대한 연구가 진행되고 있다.

크레인은 산업현장의 무거운 물체를 이송하는 경우에 쓰인다. 크레인은 다른 운송수단에 비하여 운반물의 유지기구가 간단한데 비하여 큰 중량을 취급할 수 있고, 운반물이 공중에서 이동하므로 운송경로나 운반물을 취급하는 위치의 자유도가 높다. 또한 지상에서는 이동을 위한 통로가 필요함으로 운반물거치의 효율이 좋다. 크레인을 이용한 이

송과정은 물건을 들어올리는 동시에 가속을 하고 일정지점까지 등속으로 움직이다가 목표지점의 일정위치 근처에서 감속과 동시에 물건을 내리는 이런 동작으로 이루어져 있다.

일반적으로 굴삭기를 사용한 크레인 작업은 작업장치들을 동시에 조작해야 하므로 고도의 숙련이 필요하며, 숙련된 조작자라 할지라도 크레인 작업 중 굴삭기가 전복되는 경우는 산업현장에서 흔한 일이다. 또한, 열악한 작업 환경에서의 운전자를 위한 작업 편의성과 안전성 등의 인간중심의 기술이 중요시되고 있으며, 일본등 일부 국가에서는 이미 오래전부터 크레인 기능이 부착된 굴삭기의 안전성 확보에 많은 연구가 진행 되었다.

가혹한 환경하에서도 신뢰성과 내구성을보장하면서 굴삭기의 안정성을 보장 받기 위해서는 기존의 Load cell을 이용한 굴삭기 안전장치로는 한계가 있다. 그래서 작업의 상황이나 상태에 따라 전체굴삭기 dynamics을 고려한 안전장치개발가 필요하다.

본 논문에서는 굴삭기 운전자 및 작업장에 치명적인 결과를 초래하는 굴삭기 전복 위험을 방지하기 위해서 ZMP이론을 근거로하는 크레인 부착형 굴삭기의 안전장치를 개발하고자 한다. 시뮬레이션/실차 test를 통한 안전장치 개발연구가 진행중이다.

처음 ZMP이론은 mobile 매뉴플레이트의 모든 dynamics를 고려한 안정도 판별에 적용되었다. ZMP이론에 기초하여 stability degree 와 valid stable region이 제안되었다. 안정도 범위와한계는 stability degree에 의해 주어진다. 작업장안에서 외란의 영향을 고려한 안정도는 valid stable region을 사용함으로써 논의되어진다.

본 논문에서 굴삭기 시스템의 운동방정식은 Denavit-Hatenberg 좌표계를 사용하고, Euler-Lagrange 운동방정식으로부터 도출했다. 그리고, 이 시스템에 달랑베르 법칙(D'Alembert

Principle)을 적용하여 ZMP 관계 방정식에서 X 방향과 Y방향의 식을 정리하여 x_{zmp}, y_{zmp} 식으로 표현했다. 유도한 x_{zmp}, y_{zmp} 은 안정도를 판별하는 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 ZMP(Zero Moment Point)이론을 굴삭기 자세, 붐(Boom), 암(Arm), 버킷(Burket)의 위치 및 운동을 고려하여 안정성 판별에 적용하였다. 안정도(Stability degree)와 유효 안전 지역(Valid Stable Region)을 제안 하였다. 굴삭기의 운동방정식과 ZMP이론을 바탕으로 굴삭기 시스템 적용/실차 테스트는 연구 진행 중이다.

2. 굴삭기 시스템

굴삭기(excavator)의 일반적인 구조를 그림 1에 나타낸다. 작업장치는 붐(boom), 암(arm), 버킷(bucket)의 3개의 링크 연쇄를 이루고 있으며, 각 링크는 유압 실린더로 구동된다. 버킷 기구부는 버킷이 보다 넓은 회전영역을 가질수 있도록 4절 링크로 구성되어 있다. 본 논문에서는 작업장치를 모델링 하는데 있어서 각 링크는 강체로 가정하며, 붐의 선회(swing)를 배제한 2차원 평면 운동을 고려한다. 이 때, 링크 연결부의 마찰과 변형은 무시한다.

2.1. 굴삭기의 모델링

굴삭기 작업장치의 모델식은 Denavit-Hatenberg 좌표계를 사용하고, Euler-Lagrange 운동방정식으로부터 도출한다. 그림 2에 본 논문에 사용된 좌표계와 각 링크의 파라미터를 나타낸다.

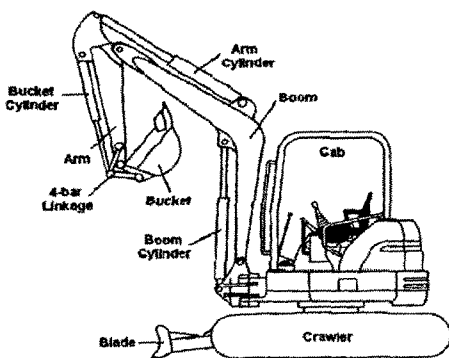


그림 1. Excavator Layout

링크 시스템 전체의 운동에너지를 T , 위치에너지를 V , 각 관절의 토크를 $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$ 로 하면 Euler-Lagrange 운동방정식은 식(1)과 같다.[3]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i, \quad (i=1, 2, 3) \quad (1)$$

여기서, Lagrangian L 은 식(2)와 같이 운동에너지와 위치에너지의 차로 정의된다.

$$L(\theta_i, \dot{\theta}_i) = T - V \quad (2)$$

$\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ 라 하면, 링크 시스템의 운동에너지 T 는 식(3)과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T J(\theta) \dot{\theta} \quad (3)$$

여기서, 관성행렬 $J(\theta)$ 는 대칭인 양의 한정(symmetric positive definite) 행렬이다.

강체 동역학의 경우 위치에너지는 중력에 의해서만 유도되며, 다음 식(4)와 같다.

$$V = g^T r_c m \quad (4)$$

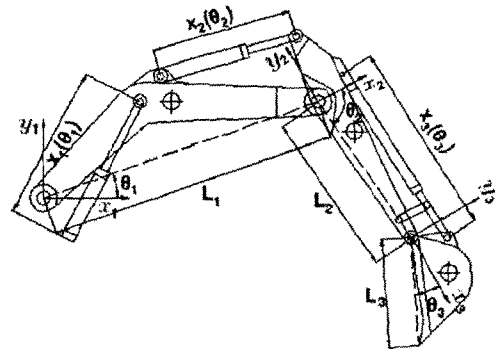


그림 2. Denavit-Hartenberg Coordinate System and Parameters of Attachment

여기서, 벡터 g 는 기준좌표계로 나타낸 중력벡터, r_c 는 링크의 질량중심까지의 높이이다.

따라서, 운동에너지 식(3)과 위치에너지 식(4)를 식(1) 및 식(2)와 정리하면 링크 시스템의 운동방정식은 식(5)와 같이 얻어진다.

$$J(\theta) \ddot{\theta} + h(\dot{\theta}, \theta) + g(\theta) = \tau \quad (5)$$

이 때, $h(\dot{\theta}, \theta) = [h_1, h_2, h_3]^T$ 는 coriolis력과 원심력에 의한 항, $g(\theta) = [g_1, g_2, g_3]^T$ 는 중력에 의한 항을 나타낸다.

3. Z.M.P(Zero Moment Point)

ZMP는 로봇의 보행 시에 로봇의 안정성을 판별하는 조건으로 사용된다. 이 ZMP는 바이페드로봇의 두 다리 중 바닥에 접촉되어 있는 다리의 발 바닥에 임의의 기준 좌표계를 설정해 놓고, 그 점에 대해서 모멘트 합 조건을 적용했을 시, 로봇 발 위쪽 링크들의 전체 운동량을 보상하기 위한 반발력이 발 바닥의 어느 한 점에 존재한다는 물리 법칙에 근거한 이론이다. 여기서 ZMP의 위치가 로봇 발의 크기를 벗어나서 존재할 경우 로봇은 안정성을 잃게 된다. 따라서, ZMP를 발 영역 이내에 존재시키면 로봇은 넘어지지 않고 안정하게 보행을 할 수 있게 된다. 본 논문에서는 이 ZMP이론을 로봇 매리플레이트와 구조가 비슷한 굴삭기에 적용하고자 한다.

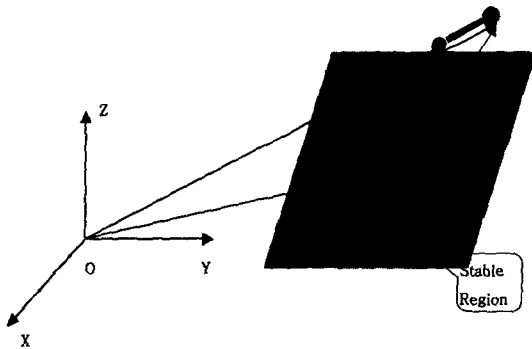


그림. 3 Model of excavator and coordinate system

ZMP(Zero Moment Point)는 중력, 관성력, 외력의 합이 zero인 floor위의 point이다. 만약, ZMP가 stable region안에 있다면 안전하고, stable region밖에 존재하면 불완전 또는 turn over 될 것이다.

그림. 4는 좌표계에서 기준 좌표계 O_{xyz} 를 설정해놓고, 임의의 질량 시스템에 대해 벡터의 관계를 나타낸 것이다.

이 시스템에 달랑베르 법칙(D'Alembert Principle)을 적용하면 다음과 같은 식(6)으로 표현된다.

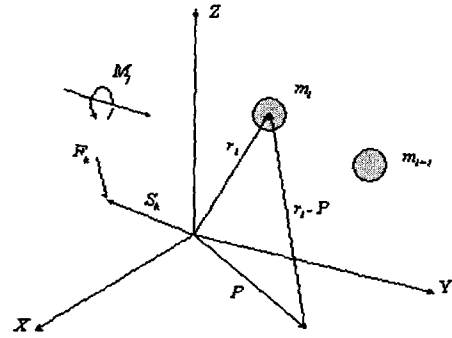


그림.4 D'Alembert Principle of a particle system

$$\sum_i m_i (r_i - P) \times \left[\left(-\frac{d^2 r_i}{dt^2} + G \right) - \frac{d^2 P}{dt^2} \right] + T - \sum_j M_j - \sum_k (s_k - P) \times F_k = 0 \quad (6)$$

위의 식에서 m_i 는 링크 i 의 질량이고, r_i 는 링크 i 의 질량 중심의 위치, 그리고 M_j 는 시스템에 가해지는 외부 모멘트, s_k 는 외력 F_k 가 작용하는 점의 위치가 된다.

m_i	mass of particle i
$G = [g_x, g_y, g_z]^T$	gravitational acceleration
$r_i = [x_i, y_i, z_i]^T$	position vector of particle i
$P = [x_{zmp}, y_{zmp}, 0]^T$	position vector of P
$s_k = [x_k, y_k, z_k]^T$	position vector where external force k is put
$T = [T_x, T_y, T_z]^T$	resultant torque acted on point P
$F_k = [F_{x,k}, F_{y,k}, F_{z,k}]^T$	external force k
$M_j = [M_{x,j}, M_{y,j}, M_{z,j}]^T$	external moment j
0	zero vector

위의 식을 X 방향과 Y 방향의 식을 정리하면 다음과 같이 x_{zmp} , y_{zmp} 식으로 표현할 수 있다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g_z) x_i - \sum_{i=1}^n m_i (x_i'' + g_x) z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g_z) x_i - \sum_k F_{z,k}} + \frac{\sum_{i=1}^n M_{y,i} + \sum_{k=1}^n (S_{zk} F_{zk} - S_{zk} F_{zk})}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g_z) x_i - \sum_k F_{z,k}}$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g_z) y_i - \sum_{i=1}^n m_i (y_i'' + g_y) z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g_z) x_i - \sum_k F_{z,k}} + \frac{\sum_{i=1}^n M_{x,i} + \sum_{i=1}^n (S_{y,k} F_{z,k} - S_{z,k} F_{y,k})}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g_z) x_i - \sum_k F_{z,k}}$$

위의 식을 외력 모멘트와 힘이 없다는 가정 ($M_i=0$) 과 함께 X 방향과 Y방향의 식을 정리하면 다음과 같이 x_{zmp} , y_{zmp} 식으로 표현할 수 있다.

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g_z) x_i - \sum_{i=1}^n m_i x_i'' z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g_z)}$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g_z) y_i - \sum_{i=1}^n m_i y_i'' z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i'' + g_z)}$$

O-XYZ안의 ZMP와 O'-X'Y'Z'안의 ZMP사이의 관계식은 다음과 같다.

$$(X_{zmp}, Y_{zmp}, 1)^T = R \times (X'_{zmp}, Y'_{zmp}, 1)^T$$

여기서, R는 3×3 homogeneous transformation matrix이다.

4. Stability Degree

ZMP이론에 따르면 Z.M.P.가 stable region안에 위치하면 안정하고 그렇지 않으면 불안정하다. 그러나 Z.M.P.에는 안정도를 표현하기 위한 정량치가 주어지지 않는다. 굴삭기가 크레인 작업을 할 때 정량치를 알아내는건 대단히 중요하다.

만약 작업장에 장애물이나 외란이 있을경우 작업장은 미지의 환경이 되기 때문에 높은 stable extent를 가지는 것은 필수적이다. 반대로 작업장에 장애물이나 외란이 없을경우 굴삭기에 높은 stable extent는 요구치 않는다. 그러므로 Stability Degree를 제안한다.

$$a = d / r_0$$

$$d = \min [d(zmp)]$$

$$r_0 = \max [d \in A(d)]$$

여기서,

a : stability degree

$d(zmp)$: ZMP와 stable region 경계사이의 거리집합

d : ZMP와 stable region 경계사이의 최소거리

r_0 : d 의 최대치

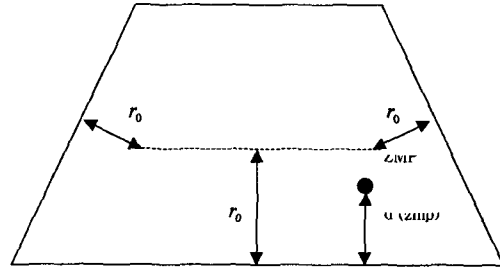
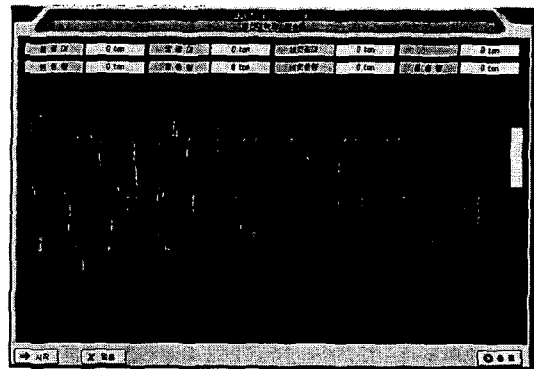


그림.5 Stable Region and Stability Degree

5. 고찰

본 논문에서 제안한 ZMP(Zero Moment Point)이론을 굴삭기 자세, 붐(Boom), 암(Arm), 버킷(Burket)의 위치 및 운동을 고려하여 안정성 판별에 적용한 개발 장치 메인 화면이다. 이 프로그램은 Visual C로 개발하였다. 화면 우측에 보이는 빨강(위험), 노랑(경고), 파랑(안전)은 굴삭기의 안정도를 나타낸다. 화면 중앙에 나타나는 Load는 load cell을 이용하여 load하중을 직접 검출하여 운전자에게 나타난다. 굴삭기 주변 작업장에는 경고음을 통해 위험을 알려 안전사고를 방지할 수 있게 개발되고 있다.



6. 결론

본 논문은 ZMP 이론을 이용한 크레인 부착형 굴삭기 안전장치 개발을 위해 연구를 수행하고 있다. 요즘 산업현장에서 굴삭기를 이용한 크레인작

업의 필요성이 점점 증가하고 있다. 문제는 굴삭기가 크레인 작업을 할 때 빈번히 전도되어 기기파손 및 인명피해를 가져오는 심각한 피해를 가져올 수 있다. 이를 방지하기 위해 본 논문에서는 ZMP(Zero Moment Point)이론을 굴삭기 자세, 붐(Boom),암(Arm), 버킷(Burket)의 위치 및 운동을 고려하여 안정성 판별에 적용하였다. 안정도(Stability degree)와 유효 안전 지역(Valid Stable Region)을 제안 하였다. 앞으로 적용알고리즘의 검증 및 실차 테스트를 통해 제품개발을 목적으로 연구가 계속 진행중이다.

참고문헌

- [1] N. Kimura, H. Araya, M. Kakuzer, "Automatic control system for hydraulic excavator", *Kobe Steel Engineering Report*, Vol.37, No.2, 1987.
- [2] 양순용, "적응제어를 이용한 Field Robot의 궤적 추종 제어", *대한기계학회*, 第16卷, 第11號, pp2011~2020
- [3] S. Sugano, Q.Huang,I.Katol, "Stability Criteria in Controlling Mobile Robotic System" *IEEE /RSJ*, July 26-30, 1993.
- [4] 양순용 외 4., "굴삭기 자동화를 위한 스트로크 센싱 실린더 개발에 관한 연구", *한국 자동제어 학술회의논문집*, 1994.
- [5] 최용준, 양순용외2, "홀센서를 이용한 유압실린더의 스트로크 센싱 실린더 개발에 관한 연구", *한국정밀공학회*, 94년도추계학술대회논문집, pp.375-380, 1994.
- [6] 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.
- [7] 足立修一, *制御のためのシステム同定*, 東京電機大學出版局, 1999.
- [8] S.Dubowsky and A.B.Tanner, "A Study of the Dynamics and Control of Mobile Manipulators Subjected to Vehicle Disturbances" *Symp.of Robotic Research*, Santa Cruz. CA,1987,pp304-31