

원격 굴삭 로봇의 전도 방지를 위한 안정성 판단 제어 Stability Estimation Control for Turnover Prevention of Tele-operated Excavator Robot

*문성민¹, #홍대희², 김영욱³, 김봉석⁴

*S. M. Moon¹, #D. H. Hong(dhhong@korea.ac.kr)², Y.O. Kim³, B.S. Kim⁴
^{1,2} 고려대학교 기계공학과, ^{3,4} 전자부품연구원

Key words : Tele-operated Excavator Robot, Wireless control station, Zero moment point, Turnover stability estimation

1. 서론

오늘날 많은 건설 시공 분야의 여러 분야에서 굴삭기가 많이 사용되고 있다. 현재 굴삭기는 다양한 종류의 작업에 대한 높은 적용성과 경제성에 의해 그 역할이 점차 확대되어 전체 건설 중장비 생산에서 굴삭기가 차지하는 비중은 60%를 넘어서고 있다. 최근 산업 현장뿐만 아니라 농업, 임업, 더욱 나아가서는 해저작업이나 우주작업의 용도로 사용되는 복합기계로서의 역할을 담당하고 있다.

하지만 최근에는 힘들고 어려운 일을 기피하는 작업자가 증가하면서 굴삭기를 운전하기 위해 필요한 숙련자의 수가 점차 감소하는 추세를 띄고 있다. 이로 인해 다수의 굴삭기 미숙련 운전자가 험한 작업 환경에서 작업하는데 어려움을 느끼고, 많은 안전 문제가 발생하고 있다.

이를 해결하기 위해 최근에는 굴삭기와 같은 중장비의 자동화 연구가 활발히 진행되고 있다. 굴삭작업이나 운반작업 등을 하는데 있어서 원격 작업자는 일련의 동작으로 작업장치를 동시에 조작해야 하므로 고도의 숙련성이 요구되고, 비록 숙련된 작업자라 할지라도 원격제어의 특성상 외부 상황에 대한 인식이 불충분하기 때문에 전도 사고와 같은 안정성 문제가 뒤따르게 된다. 건설 장비의 전도는 고장과 더불어 경제적 손실을 줄 수 있기 때문에 이동과 작업에 있어서 아주 중요한 문제이다.

안정성을 판단하고 사고를 예방하기 위해 로봇틱스 분야에서는 많은 연구가 진행되고 있다. Dubowsky⁽¹⁾와 Fukuba⁽²⁾은 로봇의 정적인 불안정 상태를 극복하기 위한 방법을 연구하였다. 이를 보완하기 위해 Sugano⁽³⁾는 동적 안정성의 판단을 ZMP(Zero Moment Point)를 이용한 움직임 계획에 따라 연구를 수행 하였다. 하지만 이런 연구들은 미리 주어진 환경 정보에 의해 연구가 진행되었고, 정적 안정성의 판단은 예측 못한 상황에 대해 이동하는 물체의 동적 안정성을 움직임 계획에 따라 판단하고 예방할 수 없다. 이를 위해 불안정한 환경 정보에 대한 모바일의 경로 이동과 매니플레이터 동작 시에 일어날 수 있는 전도현상의 안정성을 판단하는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 실제 굴삭기를 대신해 안정성을 판단하기 위한 원격 굴삭로봇 시스템에 대해 알아보고, 굴삭로봇의 매니플레이터를 이용한 작업과 환경에 따라 경로를 이동하는 문제에 있어서 발생할 수 있는 전도현상의 기본 개념에 대해 알아보고, 안정 지수를 구하여 안정 영역을 설정하고 이를 통해 원격 굴삭로봇의 안정성을 판단한다.

2. 원격 굴삭로봇 시스템

안정성 판단 실험을 하기 위해 실제 굴삭기의 사용은 전자화의 어려움과 경제적인 문제 등의 많은 문제가 뒤따른다. 이에 따라 실험을 위한 Fig. 1 에 보이는 실제굴삭기의 1/10 비율로 설계된 굴삭로봇을 제작하였다. 원격 굴삭로봇 매니플레이터의 각 링크제어는 유압방식이 아닌 Ball-Screw 를 이용하여 실린더를 제어할 수 있도록 한다. 실제 굴삭

기와 동일하게 무한궤도 방식의 모바일을 채용하여 굴삭로봇의 이동에 있어서의 안정성 판단을 할 수 있도록 하였다. 그리고 Fig.2 의 무선스테이션을 개발하여 굴삭로봇을 원격으로 제어할 수 있도록 하였다⁽⁴⁾. 무선 스테이션은 환경 영상 정보를 판단할 수 있는 3 개의 모니터로 구성되어 있으며, 원격 제어를 위한 센서 정보 판단, 제어 상태 감시, 시뮬레이션에 대한 처리를 수행한다.



Fig.1 Excavator Robot



Fig.2 Wireless Control Station

3. 안정성 판단 센싱 모듈

안정성 판단을 위해 센서를 통한 환경정보를 수집하고 처리할 수 있도록 안정성 판단 센싱 모듈을 설계하였다. 이 모듈은 굴삭기의 자세정보와 위치정보를 판단하기 위해 가속도 센서와 자이로 센서가 결합된 3DM-GX2 와 DGPS 를 장착하였다. Fig.3 에서와 같이 얻어진 정보는 DSP 컨트롤러 (TMS320F28335)에서 안정성을 판단하여 무선모뎀을 통해 스테이션에 보내어 작업자가 피드백 받을 수 있도록 하였다.

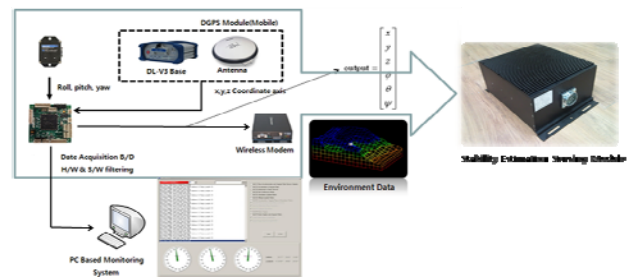


Fig.3 Stability Estimation Sensing Module

4. 안정성 판단 알고리즘

안정성 판단 알고리즘은 보행로봇에서 많이 사용되고 있는 ZMP 이론을 토대로 하여 만들어 졌다. ZMP 를 이용한 안전성 판단 방법은 굴삭로봇 각 링크의 무게 중심과 동적 운동으로 인해 발생하는 중력, 관성력, 그리고 외력의 합 모멘트가 영(zero)가 되는 지점의 궤적을 결정해 주는 방법이다.

Fig.4는 기준 좌표계 O-XYZ 에서 질점에 대한 벡터의 관계를 나타내고 있다. 임의의 점 P 에 대하여 D'Alembert 법칙을 적용하여 식(1)의 운동방정식을 유도할 수 있다.

$$\sum_i m_i (r_i - P) \times \left\{ \left(\frac{d^2 r_i}{dt^2} + G \right) - \frac{d^2 P}{dt^2} \right\} + T - \sum_j M_j - \sum_k (S_k - P) \times F_k = 0 \quad (1)$$

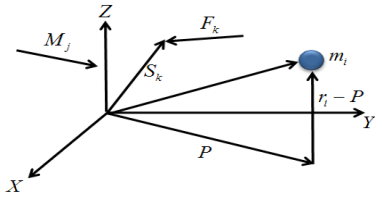


Fig.4 Definition of Vectors for System

식(1)을 통한 ZMP의 값을 구해보면 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$x_{ZMP}^R = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_i m_i (\ddot{x}_i + g_x) z_i + \sum_k (S_{zk} F_{xk} - S_{xk} F_{zk})}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_k F_{zk}} \quad (2)$$

$$y_{ZMP}^R = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_i m_i (\ddot{y}_i + g_y) z_i + \sum_k (S_{yk} F_{zk} - S_{zk} F_{yk})}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_k F_{zk}}$$

이 ZMP 값을 외력이 없는 경우에 대해 생각하여 모바일의 가속도와 회전속도에 관해 정리해 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽⁵⁾.

$$(x_{ZMP}^R, y_{ZMP}^R) = (x_{ZMP, noforce}^R + \frac{a}{g_z} h, y_{ZMP, noforce}^R + \frac{vw}{g_z} h) \quad (3)$$

ZMP를 통한 전도현상의 판단은 Fig.5에서와 같이 ZMP가 하부체의 투영면 내부에 존재하는지에 따라 알 수 있다. 투영면 내부에 존재하면 전도의 가능성이 적고, 반대로 투영면의 외부에 존재하면 전도의 가능성이 커진다.

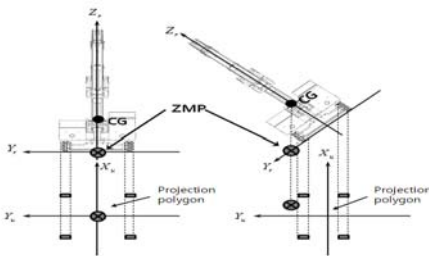


Fig.5 Projection of ZMP

굴삭로봇의 움직임에 따른 전도의 경우를 생각해보면 Fig.6과 같이 전후 가속에 의한 Pitchover와 좌우 회전에 의한 Rollover에 관해 나타낼 수 있다.

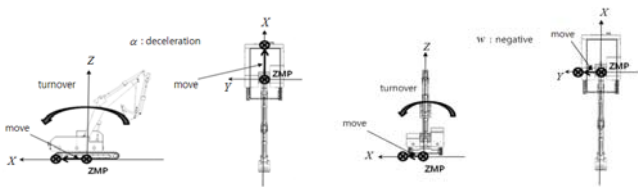


Fig.6 Turnover Pattern

이를 방지하기 위해서 전도 안정지수를 ZMP의 값으로 구해보면 다음의 식으로 나타낸다.

$$S_{au} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{g}{a_{max} h} (ZMP_{x, noforce} - X_u) \right\}$$

$$S_{ai} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{g}{a_{max} h} (ZMP_{x, noforce} - X_i) \right\} \quad (4)$$

구해진 전도 안정 지수를 토대로 하여 ZMP의 범위를 설정하고 전도 안정 영역을 표현하면 Fig.8로써 표현할 수 있다.

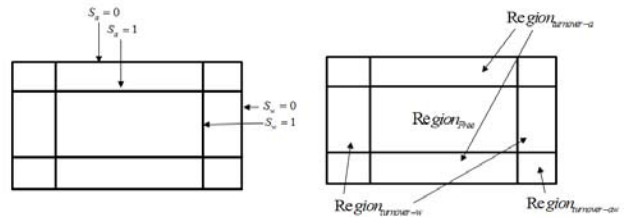


Fig.7 Stability Region

정의된 전도 안정 영역의 타당성을 판단하기 위해 굴삭로봇의 매니플레이터의 동작과 모바일 이동에 따른 ZMP의 변화를 실험해본 결과는 Fig.8과 같이 나타났다.

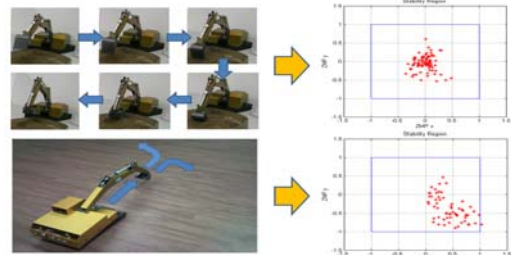


Fig.8 Experimental Result

실험 결과, 환경정보에 따른 굴삭로봇의 작업과 이동에 대해서는 안정영역 내부에 ZMP가 존재하고 있어 전도가 없이 굴삭 작업이 가능함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

이 논문에서는 안정성 판단 실험을 위해 원격 굴삭로봇 시스템을 개발하였다. 그리고 센서를 통한 환경 정보를 판단, 처리하기 위해 안정성 판단 센싱 모듈을 설계하여 ZMP를 적용함으로써 굴삭로봇의 동적 움직임에 대한 안정성을 판단할 수 있도록 하였다. 기존의 정적인 움직임에 대한 안정성 판단과 달리 동적인 움직임에 대한 안정성을 판단함으로써 외력의 작용에 대해서 적용할 수 없었던 부분을 보완한 점에서 향후 실제 굴삭기의 적용에 유리하도록 하였다.

후기

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(06첨단융합C01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. S. Dubowsky and E. Vance, *Planning mobile manipulator motions considering vehicle dynamics stability constraints*, in Proc., IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1271-1276, 1989
2. T. Fukuda and et.al., *Manipulator/vehicle system for man-robot cooperation*, in Proc., IEEE Int. Cont. on Robotics and Automation, pp. 74-79, 1992
3. S. Sugano, Q. Huang, and I.Kato, *Stability criteria in controlling mobile robotic systems*, in Proc., IEEE/RSJ Int. Conf on Intelligent Robots and Systems, pp. 832-838, 1993.
4. S.M.Moon, D.H.Hong, Y.O.Kim and B.S.Kim, *Design of Wireless Control Station for Intelligent Excavator*, International Symposium on Robotics, Oct. 2008
5. J.H.Lee, J.B.Park, and B.H. Lee, *Turnover Prevention of a Mobile Robot on Uneven Terrain using the Concept of Stability Space*, ROBOTICA, Published Online, Aug. 2008