

지능형 굴삭 로봇의 토양 속 장애물 제거작업을 위한 알고리즘 개발 Development of Algorithm for Underground Obstacle Removal of Intelligent Excavator

*박형주¹, 이상학¹, 배장호¹, 오경원¹, #홍대희²

*H. Park (hyongju@gmail.com)¹, S. H. Lee¹, J. H. Bae¹, K. W. Oh¹ and #D. Hong(dhhong@korea.ac.kr)²

¹Div. of Mech. Eng., Graduate School of Korea Univ., ²Div. of Mech. Eng., Korea Univ.

¹고려대학교 기계공학부 대학원, ²고려대학교 기계공학부

Key words : excavator, backhoe, obstacle removal, obstacle avoidance

1. 서론

지능형 굴삭로봇은 단순·반복적인 굴삭작업을 인력이 아닌 로봇을 통하여 수행함으로써 노동비 절감을 꾀하고 노동자들의 사고에 의한 위험을 줄이기 위하여 제안되었다. 자동화된 굴삭작업을 위해서는 각종 센서를 통하여 굴삭 환경에 대한 정보를 실시간으로 입력 받는 것이 필수적이다. 그러나 굴삭환경은 매우 열악하고 위험하기 때문에 굴삭기의 암 또는 버킷에 센서를 장착하는 것은 쉽지 않다. 이와 같은 굴삭환경의 특성을 반영하지 않은 지능형 굴삭로봇의 개발은 현장 적용에 어려움이 있다. 따라서 현재까지 실제 현장에 적용하기 위한 굴삭기 모델이 다수 제안되어왔다. 가장 단순하면서도 굴삭작업 시의 환경정보를 용이하게 얻을 수 있는 방법은 버킷실린더 힘을 측정하는 것이다. 버킷실린더 힘을 측정함으로써 토양에 의한 반력을 어느정도 정확히 예측할 수 있다. 지능형 굴삭로봇의 굴삭작업 시 가장 큰 문제점은 환경의 변화나 예측하지 못했던 변수에 의해 사고가 발생할 수 있다는 점이다. 예를 들면 굴삭작업 시 토양 속에서 단단한 돌이 박혀 있을 때 굴삭명령에 따라 돌을 고려하지 않고 그대로 작동시켰을 경우에 굴삭기의 전복까지도 상상해 볼 수 있다.

지능형 굴삭로봇의 토양 속 장애물 제거 작업에 대한 연구는 아직 초기 연구단계에 놓여 있다. 미국의 소수 대학들을 중심으로 간단하고 제안적인 연구만 이루어져 왔다. 토양 속 장애물을 직접 제거하는 부분은 미비하고 토양 속 장애물을 힘반향을 이용하여 탐지 인식하는 부분이 주를 이루고 있다. 본 논문에서는 장애물 모델을 원기둥으로 단순하게 가정하여 2 차원 평면상에서 시뮬레이션을 통해 힘반향에 의한 굴삭 경로를 재생성하고 장애물의 회피여부를 설득력 있게 결정짓기로 한다.

2. 지능형 굴삭로봇의 시스템 구성

지능형 굴삭로봇 시스템은 기존의 굴삭기를 개량한 형태이다. 기존의 굴삭기 모델을 개량하는 목적은 각 실린더 힘을 측정을 가능케 하고 각 관절의 각도가 측정 가능케 하며 마스터 시스템과 통신이 용이하도록 하기 위함이다. 지능형 굴삭 로봇은 로컬 작업 경로 생성 명령에 따라 작동하며 로컬 경로 생성기는 구속조건에 의해 경로 상의 제

약을 가지게 된다. 여기서 말하는 구속조건에는 굴삭기의 기구학적인 제약조건뿐 아니라 지형적인 구속조건도 포함된다. 지형적 구속조건은 지능형 굴삭기의 실린더 힘반향 정보에 의해 업데이트 된다. 실린더 힘반향에 의해 업데이트 되는 정보는 대부분 장애물의 위치 점 정보라고 볼 수 있다. 기본적인 굴삭명령은 파라미터화된 굴삭계획의 형태로 경로 생성기로 입력된다. 여기서 말하는 굴삭계획은 단순한 직사각형 형태의 구덩이를 파는 작업을 말하지만 넓게는 의미에서는 상부의 swing 모션을 통하여 얻어지는 부채꼴 모양의 구덩이를 포함한다.

3. 토양 속 장애물의 형태

토양 속에 잠재하는 장애물의 형태는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 전기나 하수 시설이다. 전기라인이나 하수 시설의 존재 유무에 대한 조사는 굴삭작업 전 토질조사계획에 포함되어있어야 하지만 미 항공우주국(NASA)의 조사에 따르면 이와 같은 유틸리티 라인을 건드려서 발생한 사고는 미국에서 해마다 다수 발생하고 있다고 한다. 전기시설물은 금속 탐지기의 탐재를 통하여 인식할 수 있다. 금속탐지기에 의해 금속물이 인식되면 해당 굴삭영역에 대한 작업을 보류해야 한다. 그러나 하수관의 경우는 문제가 복잡해 진다. 둘째는 큰 돌이나 구조물이다. 큰 돌은 크게 굴삭작업 가능여부에 비추어 볼 때 몇 가지의 형태로 나눌 수 있다. 즉, 돌의 무게와 크기 조건이 제거 가능 조건을 만족 시키는 지의 여부에 따라서이다. 돌은 대체로 밀도가 일정 범위를 가지고 있으므로 돌의 크기에 따른 무게를 예상할 수 있다. 본 논문에서는 짧은 실린더 형태의 돌을 장애물로 가정하였다. 따라서 이와 같은 형태의 장애물 탐지인식과 경로재생성, 그리고 제거방법에 대하여 제안하고자 한다.

4. 토양 속 장애물 인식에 대한 방법론

버킷 팁이 큰 돌과 같은 강체의 장애물을 만나면 실린더 힘이 갑작스럽게 증가하게 된다. 이와 같은 갑작스런 힘의 증가는 장애물의 존재를 암시한다. 따라서 접촉점의 위치는 장애물점의 위치를 의미하므로 이를 기초로 장애물 형상 매트릭스를 생성할 수 있다. 장애물 형상 매트릭스는 다음과 같이 표현한다.

$$F_b = \begin{bmatrix} x_{b1} & y_{b1} & z_{b1} \\ x_{b2} & y_{b2} & z_{b2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{bn} & y_{bn} & z_{bn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 n 은 x-z 의 한 평면에서 인식된 장애물 점의 개수이다.

기본 굴삭작업 형태를 일정한 형태로 가정하기로 한다. 기본적인 굴삭영역은 x 축 방향으로 3-6.5m 까지이고 z 축

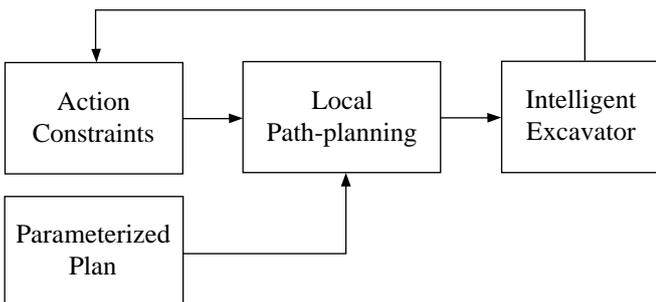


Fig. 1 System configuration of intelligent excavator

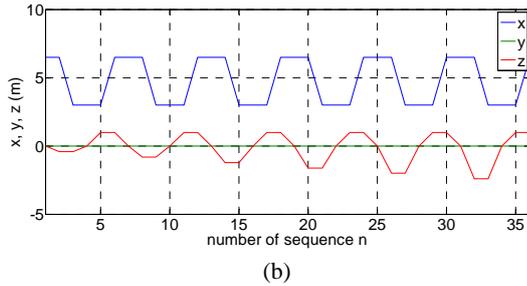
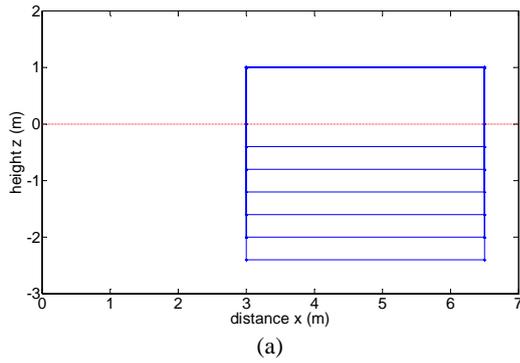


Fig. 2 Basic path-planning for trench operation

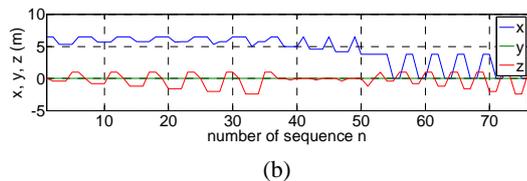
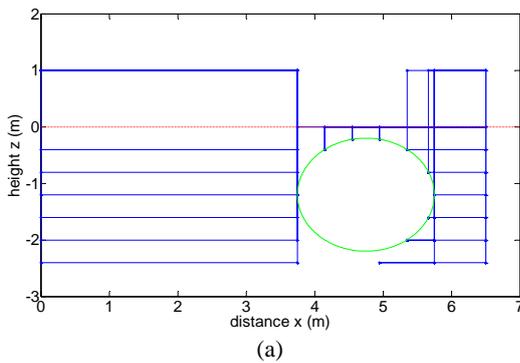


Fig. 3 Path update due to addition of constraints

깊이 방향으로 2.4m 까지이며, 굴삭기의 단위 이동 영역은 0.4m 이다. 이와 같은 규칙에 따라 굴삭계획을 2 차원으로 도시하면 Fig. 2-(a) 와 같다. Fig. 2-(b)는 각 단계별로 각 축에서의 좌표 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3는 Table 1의 장애물 탐지 알고리즘에 따라 경로를 도시하고 이에 따른 좌표 변화를 나타낸 것이다. 시뮬레이션을 이용했을 경우 큰 돌과 마딱뜨렸을 때의 힘반향에 따른 결과처리가 불가능하므로 버킷 팁이 장애물 반경 안으로 진입할 때 장애물과 접촉한 것으로 가정하였다. 이와 같은 알고리즘 수행의 결과로 장애물 형상 매트릭스를 얻을 수 있었다. 본 예시에서의 장애물 형상 매트릭스는 9 개의 행 요소를 가지고 있으며 이 점들을 만족하는 최소자승원을 얻을 수 있었다. 최소자승원의 반경은 0.969m 이고 중심점의 좌표는 (4.75, 0, -1.2)과 같다. 최소자승법은 자코비안 J 를 구성하여 다음의 식을 통해 error 를 업데이트 하는 방법으로 수행하였다.

$$\Delta X = (J^T W J)^{-1} J^T K \quad (2)$$

여기서 W 는 n*n 의 항등행렬, K 는 n*1 의 잔여벡터행렬, 그리고 J 는 목표방정식의 각 좌표값에 대한 편미분을

Table 1 Obstruction detection with path update algorithm

Input: max depth, dimension of trench,
Output: trajectory of bucket tip , obstruction matrix
1: while bucket tip does not reaches max depth do
2: if the job is not finished then
3: if obstacle is detected then
4: append the point to obstruction matrix
5: else
6: continues obstacle search and digging operation
7: else
8: break
9: return trajectory of bucket tip, obstruction matrix

통해 얻은 n*3 의 행렬로 구성하였다. Fig. 4 에서 볼 수 있듯이 시뮬레이션을 통해 얻은 최소자승원의 반경을 통해 장애물의 크기를 알 수 있고 장애물이 돌이라고 가정할 경우, 돌의 평균적인 밀도를 통해 돌의 무게를 얻을 수 있다. 장애물의 크기는 버킷의 크기와 같거나 작아야 제거할 수 있을 것으로 예상되지만 보다 구체적인 사항은 실험을 통해서 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

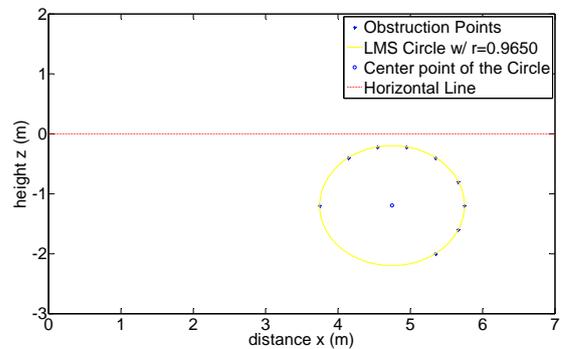


Fig. 4 Acquisition of obstruction circle using LMS

5. 결론

단순히 버킷과 일치하는 폭을 가진 trench 작업영역에서 버킷의 폭과 일치하는 원기둥 형상의 장애물을 탐지 및 인식하는, 매우 이상적인 조건에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행 결과 흙 속에 잠재하는 장애물의 무게와 크기를 예상하였고 장애물을 회피하여 연속적인 굴삭작업이 가능함을 증명하였다. 그러나 굴삭로봇 상부의 스윙 회전을 고려할 경우에는 좀 더 확장된 알고리즘이 필요하므로 앞으로 이에 대한 심층적인 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 건설교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원 (06 첨단융합 C01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. X. Huang and L. E. Bernold, "Control Model for Robotic Backhoe Excavation and Obstacle Handling," In ASCE Specialty Conf. on Robotics for Challenging Environments, pp. 123-130, 1994.
2. H. Park, et al., "Obstacle Avoidance for Robotic Excavator Using a Recurrent Neural Network", International Conference on Smart Manufacturing Application. pp. 2008.
3. H. Park, et al., "Optimal path planning for backhoe based on excavation environment", Proceedings of the 24th International Symposium on Automation & Robotics in Construction, pp. 169-174, 2007.