

# 자동화 굴삭기 최적경로 생성 알고리즘 개발

## Development of Optimal Path Planning for Automated Excavator

신진옥\*·박형주\*\*·이상학\*\*\*·홍대희\*\*\*\*

Shin, Jin-Ok · Park Hyong-Ju · Lee Sang-Hak · Hong Dae-Hee

---

### ABSTRACT

The paper focuses on the establishment of optimized bucket path planning and trajectory control designated for force-reflecting backhoe reacting to excavation environment, such as potential obstacles and ground characteristics. The developed path planning method can be used for precise bucket control, and more importantly for obstacle avoidance which is directly related to safety issues. The platform of this research was based on conventional papers regarding the kinematic model of excavator. Jacobian matrix was constructed to find optimal joint angles and rotation angles of bucket from position and orientation data of excavator. By applying Newton-Raphson method optimal joint angles and bucket orientation were derived simultaneously in the way of minimizing positional errors of excavator. The model presented in this paper was intended to function as a cornerstone to build complete and advanced path planning of excavator by implementing soil mechanics and further study of excavator dynamics together.

**Keywords:** *automated excavation, joint angle path planning, newton-raphson method*

---

### 1. 서론

자동차의 생산라인에서, 반복되는 일련의 작업을 로봇의 매뉴플레이터를 적용하여 자동화를 실현 하는 것을 볼 수 있다. 토목 현장에서도 자동차의 생산라인의 조립/용접 로봇에서의 것처럼, 반복적인 굴삭 작업을 자동화를 통하여 무인 굴삭 작업 시스템으로 대체 적용할 수 있다. 인간에 의해 조종되는 굴삭기를 자동화 함으로써 반복적인 작업을 지속적으로 수행 할 수 있도록 하면, 빠른 시간 안에 주어진 작업량을 달성할 수 있다. 이와 같은 굴삭기의 자동화 연구가 세계적으로 다수 행해지고 있지만, 국내에서는 아직 활성화 되어 있지 않은 분야로 체계적인 연구가 필요하다. 본 논문에서는 굴삭기의 자동화를 위한 기초 연구로써 굴삭 작업시의 버킷 경로와, 그 경로를 버킷이 추종하기 위한 각 조인트의 회전각 생성에 대해서 논의한다. 또한 각 작업영역에서의 좌표축과 회전에 대하여 정의를 하고, 순기구학에 대한 역기구학 문제를 뉴턴-랩슨법을 적용 함으로써 각 조인트의 경로를 연산한다. 그 연산결과를 시뮬레이션으로 보이고, 결론과 차후 연구 계획에 대

---

\* 정회원 · 고려대학교 기계공학과 연구교수 Email: jinokshin@korea.ac.kr

\*\* 고려대학교 기계공학과 석사과정 Email: hyongju@korea.ac.kr

\*\*\* 고려대학교 기계공학과 석사과정 Email: sanghak@korea.ac.kr

\*\*\*\* 정회원 · 고려대학교 기계공학과 교수 Email: dhhong@korea.ac.kr

해서 서술 한다.

## 2. 모바일 베이스의 기준좌표에 대한 위치 정의

굴삭기를 두 부분으로 정의 할 수 있다. 크게 굴삭기는 지구 좌표계에서 움직이는 모바일(mobile) 부분과 굴삭 작업을 하기 위한 메뉴플래이더 부분으로 나눌 수 있다. 모바일 부분은 기준 좌표에서 작업영역에까지의 위치정보와 굴삭기의 자세를 포함하고 있으며, 메뉴플래이더 부분은 굴삭작업을 하기 위한 각 링크의 회전을 포함한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 굴삭기의 이동에 관한 부분을 모바일 부분이라고 정의하며 6개의 자유도를 가진다. 이 6개의 자유도는 각 축에 대한 3개의 회전(pitch,roll,yaw)으로 구성되며, 또한 기준점에 대한 거리 좌표(X,Y,Z)로 구성된다.

여기서 모바일의 좌표를 기준좌표로 변환하는 행렬을  $H_M^O$ 이라고 했을 때

$$H_M^O = \begin{bmatrix} R(\phi, \theta, \psi) P \\ 0^{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

와 같이 표현이 되며 위치벡터, P와 회전 행렬,  $R(\phi, \theta, \psi)$ 은 각각 다음 식과 같다.

$$P = [X \ Y \ Z]^T$$

$$R(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} c\theta c\phi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ c\theta s\phi & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

P는 임의의 기준좌표로부터의 굴삭기의 위치를 나타내며 모바일 부분의 Z축회전 중심과 지면이 만나는 지점의 위치를 나타낸다. P벡터의 정보는 GPS와 같은 지구위치측정 시스템에 의해서 얻을 수 있다.

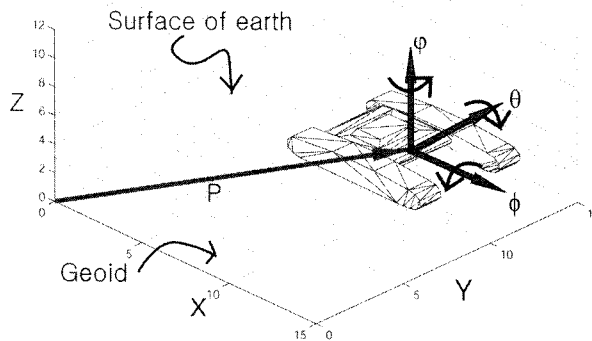


Fig. 1 Definition of mobile axis

## 3. 순기구학 (Forward Kinematics)

작업영역에 도달한 굴삭기는 각각의 링크에 연결된 조인트를 회전시켜 원하는 버킷 작업을 한다. 이때 메뉴플래이더 부분의 자유도는 4개이며 Fig. 2에서 보이는 바와 같이,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 로 정의한다. 메뉴플래이더의 각각의 링크들 사이의 변환 행렬을  $T_i^{-1}$ 로 정의 하였을 때 행렬은 (3)과 같이 표현된다.

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & s\theta_i & 0 & L_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} - s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} & \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 각 페러미터들에 대한 값들을 Table. 1에 표시하며, 각 치수의 영역을 Fig. 3에 나타낸다. 따라서 4 자유도의 링크에서, 작용점(end effector)의 좌표를 모바일 기준 좌표로 변환하려고 하였을 경우 변환 행렬은 다음과 같다.

$$T_4^M = T_1^M T_2^1 T_3^2 T_4^3 \quad (4)$$

따라서, 버킷 팀으로부터 임의의 기준 좌표로의 변환 행렬은 다음과 같은 식으로 표현이 된다.

$$H_4^O = H_M^O T_4^M \quad (5)$$

기준점에서 거리 P지점에 있는 작업영역에서 작업을 하기 위해서는 10개의 페러미터를 필요로 한다. 다시 말하면 굴삭기는 총10개의 자유도를 가지고 있다고 할 수 있다.

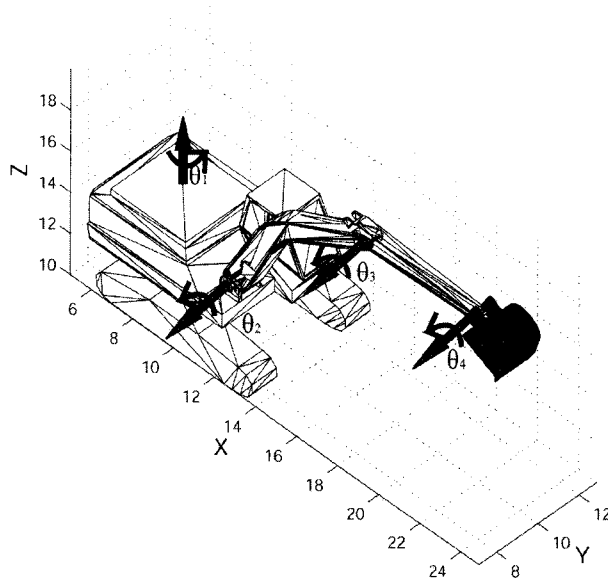


Fig. 2 Rotational axes of manipulator

Table. 1 Values of each parameter

$i$	$\alpha_i$	$L_i$	$d_i$	$\theta_i$
0	0	$-L_0$	0	$\psi$
1	$\pi/2$	$L_1$	$d_1$	$\theta_1$
2	0	$L_2$	$d_2$	$\theta_2$
3	0	$L_3$	0	$\theta_3$
4	0	$L_4$	0	$\theta_4$

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & s\theta_i & 0 & L_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} - s\alpha_{i-1} - d_i s\alpha_{i-1} & & \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 각 페러미터들에 대한 값들을 Table. 1에 표시하며, 각 치수의 영역을 Fig. 3에 나타낸다. 따라서 4 자유도의 링크에서, 작용점(end effector)의 좌표를 모바일 기준 좌표로 변환하려고 하였을 경우 변환 행렬은 다음과 같다.

$$T_4^M = T_1^M T_2^1 T_3^2 T_4^3 \quad (4)$$

따라서, 버킷 팁으로부터 임의의 기준 좌표로의 변환 행렬은 다음과 같은 식으로 표현이 된다.

$$H_4^O = H_M^O T_4^M \quad (5)$$

기준점에서 거리 P지점에 있는 작업영역에서 작업을 하기 위해서는 10개의 페러미터를 필요로 한다. 다시 말하면 굴삭기는 총10개의 자유도를 가지고 있다고 할 수 있다.

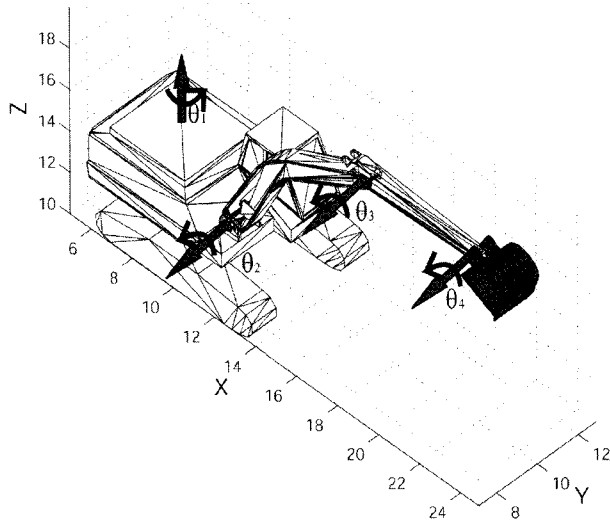


Fig. 2 Rotational axes of manipulator

Table. 1 Values of each parameter

$i$	$\alpha_i$	$L_i$	$d_i$	$\theta_i$
0	0	$-L_0$	0	$\psi$
1	$\pi/2$	$L_1$	$d_1$	$\theta_1$
2	0	$L_2$	$d_2$	$\theta_2$
3	0	$L_3$	0	$\theta_3$
4	0	$L_4$	0	$\theta_4$

$$V = [\epsilon(1,1) \epsilon(3,1) \epsilon(1,4) \epsilon(2,4) \epsilon(3,4)]^T \quad (9)$$

따라서 다음과 같은 식이 성립된다.

$$V = Jdq \quad (10)$$

$$dq = [d\theta_1 \ d\theta_2 \ d\theta_3 \ d\theta_4]^T$$

여기서 자코비안(J)는 정방행렬이 아니기 때문에 다음 식과 같은 유사역행렬(pseudo-inverse)을 이용한다.

$$J^* = (J^T J)^{-1} J^T \quad (11)$$

따라서 q의 변화량은 다음과 같은 식이 되고,

$$dq = J^* V \quad (12)$$

식(12)를 순차적 식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$q_{k+1} = q_k + J_k^* V \quad (13)$$

그리고 반복연산(Newton-Raphson Iteration)을 통해 각 조인트의 회전각을 찾는다.

## 5. 시뮬레이션

시뮬레이션 조건으로는 버켓의 자세를  $\theta_b^M = \pi/8$ 도, 버켓의 톱을  $P_b^M = [15 \ 0 \ 0]^T$ 로 하였다. 초기 자세로부터 목표로 하는 자세까지 20회의 반복연산으로 각 조인트의 각도를 구하였다.

Fig. 4에서는 20회의 반복연산을 하는 동안, 오차 V의 각각의 원소들의 0으로의 수렴을 나타내었다.

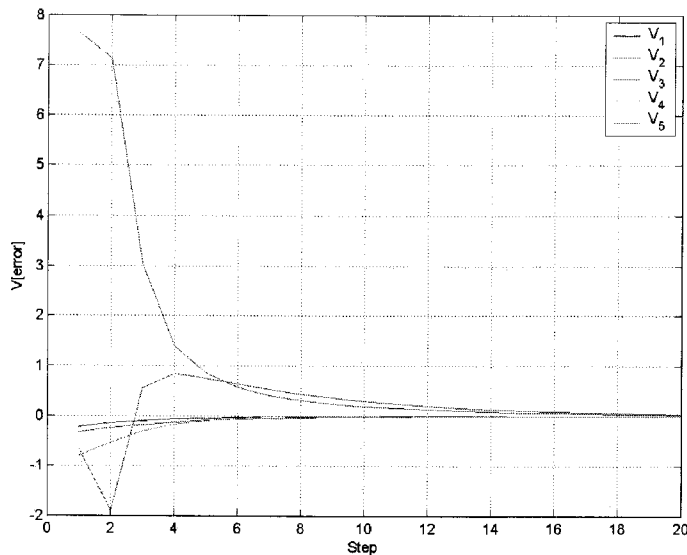


Fig. 4 Convergence of error V (20 iterations)

Fig.5에는 목표로 하는 버켓의 위치와 자세의 정보와 뉴턴-랩슨법으로 구한 각 조인트의 회전각을 가지고 순기구학을 통하여 초기 위치/자세와 목표 위치/자세를 3차원 좌표계에 표시하였다.

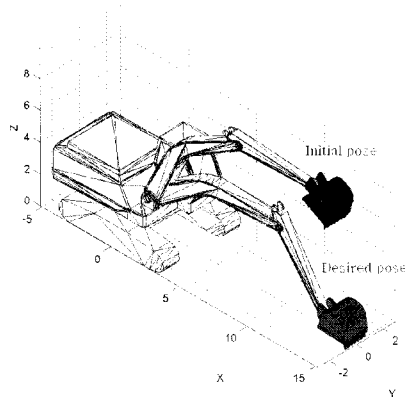


Fig. 5 Pose of Excavator after applying joint angles derived by Newton-Rhapon Method

## 6. 결론

본 연구에서는 굴삭기 자동화 연구를 위한 기준 정립을 위해, 먼저 좌표의 정의를 하였고, 정의된 좌표를 기준으로 하여 각각의 회전/이동 행렬을 정의 하였다. 또한 버킷의 이동 경로로부터 뉴턴-랩슨법을 이용하여 역기구학을 계산하고 각 조인트에 대한 회전각을 유도 하여 시뮬레이션을 통해 연산결과를 확인 하였다. 이렇게 생성된 각 조인트의 각도는 각 링크의 실린더 변위로 변환되어 실제 굴삭기의 실린더의 변위 입력값이 된다. 다음 연구는 굴삭 작업 시에 필요한 버킷팁의 이동경로생성 방법을 구축할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단융합건설기술개발사업의 연구비지원(과제번호#: 06첨단융합C01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- P. K. Vähä, M. J. Skibniewski (1993) Dynamic Model of Excavator, ASCE, J. Aerosp. Eng., Volume 6, Issue 2, pp. 148-158.
- Hsu, P., Hauser, J., Sastry, S. (1988) Dynamic control of redundant manipulators, *Robotics and Automation*, Proceedings of IEEE International Conference on.
- L. Schiavico, B. Siciliano (1988) A Solution Algorithm to the Inverse Kinematic Problem for Redundant Manipulators, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, NO. 4.
- Andrew A. Goldenbert, B. Benhabib, Robert G. Fenton (1985) A Complete Generalized Solution to the Inverse Kinematics of Robots, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-1, NO. 1.
- Ming-Hwei Perng, Lin Hsiao (1999) Inverse Kinematic Solutions for a Fully Parallel Robot with Singularity Robustness, *The International Journal of Robotics Research*.
- John J. Craig (2005) *Introduction to Robotics 3rd Edition*, Prentice Hall, New Jersey.