굴삭기 작업영역의 전방위 장애물 탐지기술 개발

Development of Omnidirectional Object Detecting Technology for a Safer Excavator

소 지 윤   이 준 복*   한 충 희

Soh, Ji-Yune   Lee, Junbok*   Han, Choong-Hee

Department of Architectural Engineering, Kyung-Hee University, Giheung-Gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 449-701, Korea

Abstract

The demand for the development of automated construction equipments is gradually increasing to deal with the current problems of construction technology, such as a lack of experienced workers, the aging of engineers, safety issues, etc. In particular, earth work such as excavation is very machine-dependent, and there has been a great deal of research on the development of an intelligent excavator, which involves great safety concerns. Thus, the objective of this study is to develop the technology to enhance the safety of intelligent excavation systems by developing an omnidirectional object detection technology for the intelligent excavator and applying it to a user-friendly system. The existing literature was reviewed, and the function of various sensor technologies was investigated and analyzed. Then, the best laser sensor was selected for an experiment to determine its effectiveness. An omnidirectional object detection algorithm was developed for a user interface program, and this can be used as the fundamental technology for the development of a safety management system for an intelligent excavator.

Keywords : sensing, laser sensor, automated excavator, safety management

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

현재 건설 산업은 숙련공 부족 현상, 기술자의 고령화 문제, 노무 생산성 저하, 안전성 미확보 및 시공기술 경쟁력의 약화 등 여러 문제점들로 인해 어려움에 직면해 있다.[1] 그러한 문제점들의 해결을 위한 대안으로 자동화 건설기계에 대한 개발 요구가 점점 늘어나고 있는 실정이다.[2] 특히 토공작업은 매우 기계 의존적인 작업이기 때문에 자동화된 굴삭기 개발과 관련된 연구가 많이 이루어지고 있다.[3]

본 연구에서는 토공작업을 효율적으로 할 수 있도록 자동화 굴삭기의 안전관리 시스템에 활용할 수 있는 토공 작업환경의 안전관리 방안을 제안하고자 한다.

선행연구[4]를 통해 여러 가지 센싱 기술들의 성능에 대해 조사 및 분석을 실시하였으며, 최적의 요소기술을 선정하였다. 개발된 알고리즘을 요소기술에 적용하여 성능실험을 실시하였고 요소기술의 적정성을 확인하였으나, 굴삭기 작업영역 전방위에 대한 센싱이 불가능하다는 문제점이 드러났다. 이러한 문제점을 보완하기 위한 방안으로 작업영역의 전방위 탐지가 가능한 기술을 개발하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 선행연구[4]를 통해 요소기술로 선정된 레이저 센서의 입증된 성능을 바탕으로 여러 대의 센서를 동시에 구동하는 전방위 탐지기술 개발을 목적으로 한다. 또한 굴삭기 장착 실험의 이전 과정으로 토공사 현장에서의 전방위 탐지기술의 기능테스트 및 사용자 인터페이스(User Interface) 작동 실험을 통해 그 성능을 평가한다.

Received : June 30, 2010

Revision received : August 2, 2010

Accepted : August 9, 2010

* Corresponding author:

[Tel: 82-31-201-3250, E-mail: leejb@khu.ac.kr]

©2010 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 굴삭기의 자동화 목표를 원격조정까지로 제한하였으며, 기술적 문제로 사면에서의 작업은 배제하고 평지 작업만을 고려하였다. 이런 점을 바탕으로 토공 작업 영역에서의 자동화 굴삭기 안전관리 시스템을 위한 전방위 장애물 탐지 기술을 개발하는 것을 연구의 범위로 한다.

이를 위한 본 연구의 절차 및 방법은 다음과 같다. 첫째, 선행연구에서 선정된 요소기술을 바탕으로 자동화 굴삭기의 안전관리 시스템에 적용하기 위한 전방위 장애물 탐지 기술을 개발하고 성능을 평가한다. 둘째, 선행연구에서 개발된 사용자 인터페이스(User Interface(U/I))를 활용할 수 있도록 2대의 센서를 동시에 구동할 수 있는 알고리즘을 개발한다. 셋째, 전방위 탐지가 가능한 사용자 인터페이스(U/I)의 현장실험을 실시하여 성능평가를 한다.

2. 장애물 탐지 요소기술

2.1 요소기술 선정

자동화 굴삭기에 적용하기 위한 여러 조건을 바탕으로 각각의 요소기술들에 적용가능여부를 조사하여 그 내용을 비교하였다. 안전관리시스템에 적용하기 위한 장애물 탐지 기술의 필요조건으로 우선, 실시간 탐지가 가능해야 하고, 장애물과의 거리 측정 및 회피를 용이하게 할 수 있도록 굴삭기와 장애물 간의 거리측정이 가능해야 한다. 또한 자동화 굴삭기에 부착해야 하는 환경적 특성으로 인해 이동이나 진동이 일어날 경우에도 작동이 이루어 질 수 있어야 한다. 여러 기술들에 대한 비교·분석 결과 초음파 센서와 레이저 센서가 장애물 탐지에 가장 적합한 것으로 나타났다.

선정된 두 센서 중 초음파 센서는 바람에 민감하고 악천후 시 오작동의 우려가 높아 토공 현장에서의 원거리 탐지에 어려움이 있는 것으로 확인되었다. 그 반면 레이저 센서는 경제성은 다소 떨어지나 데이터의 처리속도가 빠르고, 원거리 탐지가 가능하며 무엇보다 토공 현장에서의 탐지가 가능하다는 장점이 있다. 여러 가지 조건들을 비교하여 최종적으로 레이저 센서를 자동화 굴삭기의 굴삭 작업 중 주변 장애물 탐지를 위한 장비로 선정하였으며, 이는 선행연구[4,5]의 결과를 통해 확인할 수 있다.

또한 레이더를 회전시켜 넓은 대상영역을 확대하는 원리를 갖고 있는 스캔센서 중 경제성, 안정성, 응용사례 등을 고려하여 SICK사의 레이저 센서를 선정하였다.

SICK 센서의 경우 가격은 비교적 고가이지만 실외용으로 제작되어 상용화된 것이 있고, 특히 기존의 연구[6]에 의

해 토공사 현장에서 물체를 센싱하는 데에 문제가 없는 것으로 나타났다.

선정된 센서의 주요사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of laser sensor

Data Interface	RS-232, RS-422
Max Range	80m
Distance Resolution	180°
Angle Resolution	10mm
Supply Voltage	0.25°/0.5°/1°
	24 V DC +/- 15%

2.2 객체 탐지 모듈

Figure 1. Composition of omnidirectional object detecting system

Figure 1은 레이저센서를 활용한 전방위 객체 탐지 모듈의 구성을 나타낸 것이다. 시스템은 크게 센서부와 제어 시스템부로 나눌 수 있으며, Figure 1의 위 그림은 센서부, 아래 그림은 제어시스템부에 해당된다. 센서부는 전원공급장치(24V 배터리), 센서 2대 및 데이터 변환을 위한 컨버터로 구성되고, 제어 시스템부는 구성된 장비들을 연결하여 구동시키기 위한 컴퓨터 및 장애물 탐지를 확인할 수 있는 사용자 인터페이스(U/I)를 제공하는 프로그램으로 구성되어 있

다. 각각의 장비 및 전원을 공급하기 위한 연결케이블 등은 제외하였다.

2.3 장애물 탐지 알고리즘

레이저 센서를 이용한 객체 탐지 모듈의 전방위 장애물 탐지 알고리즘은 Figure 2와 같다.

Figure 2. Omnidirectional object detecting algorithm

굴삭기가 작업을 준비하는 동안 전원을 공급하여 센서를 작동시키면 센서는 기본 설정값에 따라 자동으로 구동 테스트가 이루어진다. 센서의 측정 속도와 각도, 그 각도의 분할 값을 설정하면 센서가 장애물 탐지를 시작하고, 동시에 사용자 인터페이스(U/I) 구동 소프트웨어도 작동을 시작한다. 장애물 탐지를 위한 설정 값은 변경이 가능하다. 굴삭기가 굴삭작업을 진행하는 동안 센서는 작업 반경 내 장애물이 존재하는지를 연속적으로 확인하게 된다. 센서가 장애물을 발견할 경우 위험경고를 보냄과 동시에 굴삭작업을 중

단하고 장애물을 파악할 수 있다. 또한 장애물이 탐지되면 그 위치정보를 출력하여 장애물을 확인할 수 있게 된다.

3. 현장실험

3.1 기능 테스트(Functional Test)

선행연구[4]에서 총 3회의 기능실험(functional test)을 실시하였다. 1차 실험을 통해 원거리 장애물과 움직이는 물체의 탐지 가능 여부를 확인하였다. 2차 실험은 비가 오는 악천후에도 장애물 탐지 가능여부, 3차 실험은 토공현장에서의 장애물 탐지 가능여부 확인을 위하여 실시하였다.

기능실험의 결과는 Figure 3과 같다. Figure 3에서 a), b), c)의 좌측 사진은 센서의 탐지 영역을 실제 촬영한 모습이고, 우측 그림은 센서 구동 프로그램의 장애물 탐지 모습이다. 우측 그림의 녹색 선은 센서의 탐지영역을 나타내고, 흰색 표시 부분은 탐지된 장애물 위치를 나타낸다.

Figure 3. Functional Test

Figure 3의 (a)는 1차 기능실험 결과이다. 센서의 탐지 가능 여부 및 물체와의 거리 확인, 주변 환경의 모든 물체의 탐지 가능 여부의 확인 결과 사람, 건물, 나무, 돌 등의

주변 물체들에 대한 탐지가 모두 가능하다는 것을 확인하였다.

Figure 3의 (b)는 2차 기능실험 결과이다. 2차 실험에서는 우천 시의 작동 여부 및 출력된 데이터와 실제 거리·방위와의 일치 여부를 실측을 통하여 확인하였다. 실험 결과 비, 바람 등의 기후에도 이상 없이 작동하였으며 측정거리 30m 기준으로 최대 20cm의 오차가 발생하였고, 방위는 이상 없이 측정되었다.

Figure 3의 (c)는 3차 기능실험 결과이다. 3차 실험에서는 열악한 토공현장 환경에서의 작동 여부를 확인하였다. 실험 결과 바람이 많이 불고 흙먼지가 날리는 토공현장에서도 이상 없이 작동하였으며 현장 부지에 있는 건설 자재 등의 탐지가 가능함을 확인하였다.

실험결과 원거리 장애물과 움직이는 물체의 탐지가 가능하였고, 비가 오는 악천후에도 장애물 탐지가 가능하였으며, 먼지가 많은 토공현장에서의 장애물 탐지가 가능한 것을 확인하였다.

3.2 사용자 인터페이스 작동 테스트

사용자 인터페이스(U/I)를 이용한 작동 테스트를 총 2회 실시하였다. 1차 테스트는 정지된 물체에 대한 실험으로써, 탐지되는 장애물이 사용자 인터페이스(U/I) 화면에 실시간으로 확인 가능한지에 대해 실험하였다. 2차 테스트는 움직이는 물체에 대해 실험하였고, 사용자 인터페이스(U/I) 화면상에 표시되는 장애물의 좌표값과 실제 장애물과의 거리가 일치하는지에 대한 실험을 실시하였다.

Figure 4, Figure 5에서 (b)의 반원 모양 그림에서 아래쪽 중앙이 센서의 위치이고, 센서를 중심으로 180도 범위를 32m 거리까지 센싱하는 것으로 설정하였다. 보우비율(baud rate)을 9600으로 설정하였고, 넓은 측정 범위와 높은 해상도(resolution)를 갖기 위해 $180^\circ/0.5^\circ$ 모드(mode)를 이용하였다. 장애물이 탐지되는 부분은 0.5도 당 한 개씩의 점으로 표시되어 장애물 위치를 나타내며 그 위치의 변화에 따라 점이 움직이게 된다. 또한 설정한 거리에 따라 점의 색이 다르게 나타나며 일정 사정거리 안에 장애물이 들어오면 경고음과 함께 경고 메시지를 보낸다.

Figure 4, Figure 5에서 보이는 바와 같이, (a)의 자동차 및 사람 등의 이동 객체 위치는 (b)의 반원 형태의 화면에서 확인할 수 있고 설정된 거리에 따라 그 색이 다르게 표시된다. 또한 (c)의 그래프로의 화면전환을 통해 위치 정보에 대한 정확한 거리 값의 확인도 가능하도록 하였다.

Figure 4는 1차 사용자 인터페이스(U/I) 작동 실험 결과이다. 정지된 물체에 대해 실험을 실시하였고, 센서가 탐지

한 장애물의 위치 및 거리 등에 대한 정보들이 잘 나타나는 것으로 확인되었다. 또한 설정된 거리 간격 마다 장애물 표시가 다른 색으로 표시되었으며, 일정 사정거리 안에 장애물이 나타났을 경우에는 경고 신호가 바로 나타나는 것을 확인하였다.

(a) Front view

(b) Object detecting display

(c) Object detecting display(graph)

Figure 4. First U/I performance test

Figure 5는 2차 사용자 인터페이스(U/I) 작동 실험 결과이다. 정지된 물체 및 움직이는 장애물에 대해 실험을 실시하였고, 센서가 탐지한 장애물의 위치 및 거리 등에 대한 정보들이 잘 나타나는 것으로 확인되었다.

(a) Front view

(b) Object detecting display

(c) Object detecting display(graph)

Figure 5. Second U/I performance test

실험 결과, 실시간으로 이동하는 물체와 장애물에 대한 탐지가 가능하였고 사용자 인터페이스(U/I)를 통해 장애물의 정보를 확인할 수 있었다. 또한 센서 구동 전에 미리 설정한 센서의 절대좌표에 따라 상세 방위정보 및 위치정보를 확인하는 것이 가능하였으며 일정 거리 안에 장애물이 발견되었을 경우, 경고 사인이 나타나는 것을 확인하였다.

4. 전방위 장애물 탐지 기술

4.1 전방위 탐지 영역

굴삭기 작업영역에서 안전을 위해 장애물 충돌을 방지하려면 전방위 탐지는 필수적이다. 선정된 요소기술인 센서의 센싱 영역이 180도이므로 2대의 센서를 이용하면 전방위 탐지가 가능하다.

Figure 6. Sensing area of sensor

Figure 6은 굴삭기 작업영역에서 2대의 센서를 이용한 장애물 탐지 가능 영역을 나타낸 것이다. 굴삭기 중심부를 기준으로 하여 1대의 센서는 굴삭기 전면부를 탐지하고, 1대의 센서는 후면부를 탐지하게 되면 작업영역 전체에 대한 장애물 탐지가 가능하게 된다.

4.2 데이터 처리 알고리즘

전방위 탐지를 위해 2대의 센서를 동시에 구동하게 되면 센서를 통해 획득한 장애물의 위치정보 데이터도 그 처리 절차가 달라진다. 센서 2대를 구동하기 위한 데이터 처리 알고리즘은 Figure 7과 같다.

객체 탐지 모듈의 센서부에 해당하는 장비들의 설치를 완료한 후 센서가 작동을 시작하면, 센싱 속도 및 범위, 센싱하는 범위에 대한 각도의 분할 값을 소프트웨어에서 설정 한다. 2대의 센서가 동시에 센싱을 시작하고 각각의 센서에서 얻어지는 데이터는 컨버터를 통해 컴퓨터에 입력된다. 입력된 데이터는 유효 데이터만 추출하여 에러값을 삭제하고 굴삭기 중심으로 절대좌표를 변환하는 데이터 처리 과정을 거치게 된다. 2대의 센서에서 각각 획득된 데이터는 일련의 처리과정을 거친 후, 사용자 인터페이스(U/I) 화면 상에 점으로 표현된다. 이와 같은 프로세스를 반복적으로 실행하게 된다. Figure 7의 알고리즘을 기존의 사용자 인터페이스(U/I) 프로그램에 적용하였으며, U/I 디스플레이에서 전방위(360°)를 확인할 수 있도록 수정하였다.

Figure 7. Data process algorithm

4.3 전방위 탐지 기능 테스트

전방위 탐지기술에 대한 기능 테스트를 위해 총 2회의 실험을 실시하였다.

1차 실험에서는 2대의 센서를 이용한 장애물 탐지 및 사용자 인터페이스(U/I) 화면 구동 여부에 대해 확인하였고, 2차 실험은 공사현장에서 실제 굴삭기에 장착하게 될 경우, 전방위 장애물 탐지 가능여부를 확인하였다. 또한 실제 장애물의 위치와 센서의 절대좌표에 따라 변환된 데이터의 상세 방위정보 및 위치정보에 대한 일치여부를 확인하였다.

Figure 9와 Figure 11에서 보이는 바와 같이 원형 모양 그림의 중심부가 센서의 위치이고, 360도 범위를 25m 거리까지 2대의 센서가 각각 전방은 원의 상부, 후방은 원의 하부로 나누어 센싱하는 것으로 설정하였다. 장애물이 탐지되는 부분은 0.5도 당 한 개씩의 점으로 표시되어 장애물 위치를 나타내며 그 위치의 변화에 따라 점이 움직이게 된다. 또한 디스플레이에 표현되는 센싱 영역의 거리는 5m, 10m, 25m로 설정하였고, 그 거리에 따라 점의 색이 다르게 나타나며 위험 가능범위(5m) 안에 장애물이 들어오면 경고 알람을 보낸다. 위의 설정 값들은 U/I 화면에서 변경이 가능하다.

Figure 8. Sensors in the first omnidirectional object detecting test

Figure 8은 1차 현장실험에서 전방위 탐지를 위해 센서 2대를 승용차에 임시로 설치한 모습이다.

(a) Front view

(b) Rear view

(c) Object detecting display

Figure 9. First omnidirectional object detecting test

Figure 9는 1차 실험의 결과이다. Figure 9의 (a)는 전방을 주시한 모습으로 원형 그래프의 상부에 해당하고, (b)는 후방을 주시한 모습으로 원형 그래프의 하부에 해당된다.

정지된 물체 및 움직이는 장애물의 탐지에 대해 실험을 실시하였고, 장애물 탐지 디스플레이에 2대의 센서가 탐지한 장애물의 위치 및 거리 등에 대한 정보들이 잘 나타나는 것을 확인하였다. 또한 설정된 거리 간격 마다 장애물 표시가 다른 색으로 표시되었으며 위험 가능 거리(5m) 안에 장애물이 나타났을 경우에는 경고 신호가 바로 나타나는 것을 확인하였다.

Figure 10은 2차 현장실험을 위해 굴삭기 전면 및 후면에 센서를 임시로 설치한 모습이다. Figure 10에서 (a)는 전방의 센서 모습이고, (b)는 후방의 센서 설치 모습이다. 향후 굴삭기에 직접 장착하여 실험할 것을 고려하여 위치 선정을 하였으며, 결과의 정확성을 높이기 위해 장착 가능한 여러 위치에서 실험을 실시하였다.

Figure 10. Sensors in the second omnidirectional object detecting test

Figure 11은 공사현장에서 이루어진 2차 실험 결과이다. 1차 실험과 같이 Figure 11의 (a)는 전방의 모습으로 (c)의 U/I 디스플레이에 출력된 그림의 상부에 해당하고, (b)는 후방의 모습으로 (c)의 하부에 해당된다. 센서의 센싱 조건 및 화면구성은 1차 실험과 동일하게 설정되었다. 2차 실험에서도 실시간으로 이동하는 물체 및 장애물에 대한 탐지가 가능하였고, 설정된 거리 정보에 따라 장애물의 위치 정보가 디스플레이에 다른 색으로 나타났다. 또한 센서의 절대좌표에 따라 변환된 상세 방위정보 및 위치정보가 실측한 장애물의 위치와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 11. Second omnidirectional object detecting test

현장의 환경 여건 상 먼지가 많고 굴삭기 구동 시에 진동이 발생하였지만, 장애물을 탐지하고 그 정보가 U/I 디스플레이 화면에 출력되는 것에는 문제가 없었다. 그리고 현장 주변에 나무들이 있어 장애물이 많이 탐지되었으나, 센서의 센싱 영역 거리 설정을 통해 디스플레이 화면에서 위치정보 확인 및 장애물의 식별이 가능함을 확인하였다.

그러나 2차 실험에서 굴삭기 위에 설치한 센서의 높이에 따라 굴삭기 주변으로 사각지대가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 완전한 전방위 탐지를 위해서는 사각지대까지 센싱할 수 있는 보완기술의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 자동화 굴삭기에 적용하기 위한 안전관리 시스템 개발의 기초연구로써, 토공현장에 적용 가능한 전방

위 장애물 탐지 기술 개발에 대한 연구를 수행하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 선행연구에서 선정된 요소기술을 이용하여 전방위 장애물 탐지기술을 개발하였고, 현장실험을 통해 그 적정성을 평가하였다.
- 2) 선행연구에서 개발된 사용자 인터페이스(U/I)를 활용할 수 있도록 2대의 센서를 동시에 구동할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.
- 3) 전방위 탐지가 가능한 2대의 센서를 동시에 구동하는 사용자 인터페이스(U/I)에 대해 현장실험을 통한 성능평가를 실시하였고, 그 한계점을 파악하였다.

본 연구를 통해 개발된 장애물 탐지 기술과 사용자 인터페이스는 향후 장애물 탐지데이터의 실시간 획득 및 데이터베이스화, 안전관리시스템의 효과적인 적용을 위한 기술로써 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 기술의 효율적 활용을 위해서는 사각지대를 최소화 할 수 있는 센서의 굴삭기 장착 위치 선정이 중요하며, 장착 후 현장 실험이 추가로 이루어져야 할 것이다. 또한 자동화 굴삭기의 안전관리시스템에 적용하기 위해서는 시스템 통합이 가능한 소프트웨어의 추가적인 개발이 요구된다.

향후 본 논문의 결과를 바탕으로 장애물 탐지의 사각지대를 최소화 할 수 있는 기술을 개발할 예정이다. 요소기술을 보완하여 센서의 센싱 범위를 넓힐 수 있도록 센서를 틸팅(tilting)시키는 기술과 패닝(panning)시키는 기술에 대해 연구를 진행 중에 있으며, 기술적 보완이 완료되면 굴삭기에 직접 장착이 가능할 것으로 기대된다.

이는 자동화 굴삭기의 안전관리시스템에 적용할 수 있고, 상용화 가능 기술로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

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

본 연구는 경희대학교 대학원의 2008학년도 우수연구논문 장학금으로 지원받아 연구되었습니다.

요 약

현재 건설 산업에서 나타나고 있는 숙련공 부족 현상, 기술자의 고령화 문제, 안전상의 문제 등을 해결하기 위한 대안으로써 자동화 건설기계들의 개발 요구가 점점 늘어나고 있다. 특히 토공작업은 매우 기계 의존적인 작업이기 때문에 자동화 건설기계의 개발과 관련된 연구가 많이 이루어지고 있

며, 자동화 굴삭기를 개발하는 데 있어서는 안전을 확보하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 토공작업을 효율적으로 할 수 있도록 토공작업 시 작업환경의 안전을 위해, 레이저 센서를 이용하여 자동화 굴삭기의 안전관리 시스템에 활용하기 위한 장애물 탐지 기술을 개발하고자 한다. 또한 요소기술로 선정된 레이저 센서의 입증된 성능을 바탕으로 여러 대의 센서를 동시에 구동하는 전방위 탐지 기술 개발을 목적으로 하였고, 굴삭기 장착 실험의 이전 과정으로 전방위 탐지 기술에 대한 토공사 현장에서의 기능테스트 및 사용자 인터페이스 작동 실험을 실시한다. 이는 자동화 굴삭기의 안전관리 시스템에 적용 가능한 기술로써 활용될 수 있을 것이다.

키워드 : 센싱, 레이저 센서, 자동화 굴삭기, 안전관리

References

1. Kim YS, Kim HC, Seo JH, Oh Sw. A study for the introduction of construction automation and robotics technologies in domestic construction industry. Journal of the Korea Institute of Building Construction 2001;17(2):111-120.
2. Hasegawa Y. Construction automation and robotics in the 21st century. International Symposium on Automation and Robotics in Construction 2006:565-568.
3. Anthony S, John B, Sanjiv S, Patrick R. A robotic excavator for autonomous truck loading. The Robotics Institute of Carnegie Mellon University; 1999.
4. Soh JY, Kim MW, Lee JB, Han CH. Development of core technology for object detection in excavation work using laser sensor. Journal of the Korea Institute of Building Construction 2008;8(4):71-77.
5. Kim MW. A study on the application strategies of object detection technology for secure safety in automated construction machine [Master's thesis]. Kyung Hee University; 2009.
6. Sarata S, Koyachi N, Kuniyoshi H, Tsubouchi T, Sugawara K. Detection of dump truck for loading operation by wheel loader. International Symposium on Automation and Robotics in Construction 2007:181-184.