

굴삭 자동화를 위한 레이저 스캐너 기반의 3차원 객체 탐지 알고리즘의 개발

Object Detection From 3D Terrain Data Generated by Laser Scanner of Intelligent Excavating System(IES)

유 현 석*
Yoo, Hyun-Seok

박 지 운**
Park, Ji-Woon

최 윤 념***
Choi, Youn-Nyung

김 영 석****
Kim, Young-Suk

Abstract

The intelligent excavating system(IES), the development in South Korea of which has been underway since 2006, aims for the full-scale automation of the excavation process that includes a series of tasks such as movement, excavation and loading. The core elements to ensure the quality and safety of the automated excavation equipment include 3D modeling of terrain that surrounds the excavating robot and the technology for detecting objects accurately(i.e., for detecting the location of nearby loading trucks and humans as well as of obstacles positioned on the movement paths). Therefore the purpose of this research is to ensure the quality and safety of automated excavation detecting the objects surrounding the excavating robot via a 3D laser scanning system. In this paper, an algorithm for estimating the location, height, width, and shape of objects in the 3D-realized terrain that surrounds the location of the excavator was proposed. The performance of the algorithm was verified via tests in an actual earthwork field.

Keywords : 3D, Object, Detection, Laser scanner, Terrain

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축 및 토목공사에 있어 토공사는 장비운전원의 고령화, 숙련공 부족에 따른 생산성 저하, 위험작업 환경 하에서의 안전성 문제 등으로 인해 굴삭기 등 토공사 관련 장비의 자동화를 위한 연구 개발의 필요성이 대두되어 왔다. 토공사 작업에 투입되는 건설 중기계 중 굴삭기는 전체 건설기계의 31%를 차지하고 있는 대표적 건설기계로(유병인, 2009) 성토, 집토, 상차, 다짐, 땅 고

르기 등 다양한 작업의 수행이 가능하며 국내외적으로 현재 그 등록 대수가 계속적으로 증가하고 있다. 또한 굴삭기를 대상으로 한 각종 어태치먼트(Attachment)들이 개발되면서 건설현장에서의 효용성 또한 매우 높아지고 있는 실정이다.

굴삭기 관련 자동화 연구는 1980년대 말부터 미국 및 일본을 중심으로 굴삭 작업의 품질 제고나 인력 투입이 어려운 위험 작업환경 하에서의 활용을 목적으로 한 MMI(Man-Machine Interface) 혹은 원격제어 기반의 굴삭기 개발이 진행되어 왔으며, 국내의 경우 2006년부터 국토해양부의 지원을 받아 굴삭 작업의 전자자동화를 목표로 한 지능형 굴삭 시스템(Intelligent

* 일반회원, 인하대학교 대학원 건축공학과 박사수료, hsyoo.inha@gmail.com

** 일반회원, 인하대학교 대학원 건축공학과, 공학석사, geofront@nate.com

*** 일반회원, 인하대학교 대학원 건축공학과 석사과정, guycyn@nate.com

**** 중신회원, 인하대학교 대학원 건축공학과 교수, 교신저자, youngsuk@inha.ac.kr

Excavation System; IES)의 개발에 관한 연구가 진행 중에 있다. 굴삭 작업은 주로 이동, 굴삭, 상차 작업 등을 거치는 일련의 프로세스이며, 이를 자동으로 실현하기 위해서는 이동 경로상의 장애물 위치, 상차트럭, 사람 등 굴삭기 주변 객체를 정확하게 탐지할 수 있어야 한다. 따라서 굴삭 작업 자동화 시스템을 개발함에 있어 주변 작업환경의 지형이나 객체의 효과적인 모델링 및 탐지는 작업 품질과 안전성 확보 측면에서 필수적으로 요구되는 핵심 요소 기술이라 할 수 있다. 기존의 굴삭 작업 자동화 관련 연구는 레이저 스캐너 등으로 획득한 작업영역의 지형정보를 바탕으로 굴삭작업 계획, 운전자 성능향상, 특정 객체 탐지를 위한 알고리즘 등 다양한 기술이 개발된 바 있다. 그러나 기존의 객체 탐지 알고리즘은 적용 환경이나 대상이 제한적인 관계로 비정형의 광범위한 토공사 현장을 대상으로 적용하기에는 작업 품질과 안전성 확보 측면에서 적절하지 않으며, 객체의 접근정보나 형상정보를 실시간으로 탐지하여 굴삭자동화 작업을 지원하는 연구 또한 매우 미흡하였다.

본 연구의 목적은 굴삭 자동화 시스템에 장착된 회전형 레이저 스캐너로 획득한 토공사 작업 현장의 3차원 지형데이터로부터 객체의 속성 정보(위치, 높이, 너비, 형상)를 추출하는 객체 탐지 알고리즘을 개발하고, 현장실험을 통해 이를 검증하는 것이다. 본 연구에서 제안된 알고리즘은 비정형의 광범위한 토공사 작업 현장을 대상으로 개발하였으며, 굴삭기 전(후)방위에 접근하는 사람, 상차 트럭, 장애물 등 객체의 속성 정보를 실시간으로 탐지하여 수치와 영상으로 출력함으로써 자동화 굴삭 작업을 지원할 수 있도록 하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

자동화 굴삭 작업에 있어 객체 탐지기술의 용도는 이동경로의 설정, 사람의 접근 및 충돌 방지를 위한 경보 발생 및 작업 중단 여부 판단, 트럭의 상차영역 인식 등으로 다양하며, 이러한 판단을 위한 객체 인식(recognition) 기술은 객체의 위치, 너비, 높이, 형상 등의 속성정보를 필요로 한다. 따라서 객체의 인식에 앞서 객체의 유무 및 속성정보를 추출하는 탐지(detection)의 과정이 선행되어야 한다. 본 연구는 객체의 유무를 판단하고 객체의 속성정보(위치, 너비, 높이, 형상)를 추출하는 탐지(detection)기술의 개발로 그 범위를 한정하였다. 본 연구에서 제안하는 객체 탐지 알고리즘은 현재 국내에서 개발 중인 지능형 굴삭 시스템의 회전형 레이저 스캐너로부터 획득한 토공사 작업현장의 3차원 지형 데이터를 대상으로 개발되었으며, 세부적인 연구의 방법은 다음과 같다.

- 1) 선행 연구 분석
기존의 굴삭작업 자동화를 위한 객체 탐지 연구 동향과 기존 레이저 스캐너 기반 객체 탐지 알고리즘을 분석하여 기존 연구의 한계성 및 토공사 현장에 최적화된 객체 탐지 알고리즘 개발의 필요성을 도출하였다.
- 2) 알고리즘 개발을 위한 고려요소 도출
알고리즘 개발에 앞서 토공사 현장의 속성을 고려하여 토공사 작업현장을 대상으로 3차원 객체 탐지 알고리즘의 개발을 위한 고려요소를 도출하였다.
- 3) 지형 데이터 전처리
회전형 레이저 스캐너의 지형데이터 구성원리를 토대로 데이터를 구성하는 수많은 점들의 수치해석을 위한 데이터의 규칙성과 방향성을 부여하는 지형 데이터 구조를 정의하였다.
- 4) 그림자를 기준으로 한 객체 탐지 알고리즘의 개발
객체 후면에 필연적으로 발생하는 그림자 영역을 기준으로 지능형 굴삭 시스템 작업환경 주변 객체의 고도, 거리 등 데이터의 특성을 분석함으로써 그림자 영역의 경계를 검출하고 객체의 정보를 추출하기 위한 함수식을 도출하였다.
- 5) 현장실험을 통한 알고리즘의 검증
제안된 객체 탐지 알고리즘은 MATLAB 7.8.0 (R2009a)으로 구현하였으며, 실제 토공사 작업현장의 주요 대상 객체인 사람과 상차트럭, 장애물(기타 장비) 등의 반복적 탐지 실험 및 성능 분석을 통하여 제안된 알고리즘의 검증을 수행하였다.

2. 선행 연구 분석 및 알고리즘 개발을 위한 고려요소 도출

2.1 토공사 작업 현장의 객체 탐지 연구 동향

2.1.1 트럭 탐지 관련 연구

트럭의 상차 영역 인식을 위한 연구는 Stentz(2000)에 의해 수행된 바 있다. 굴삭기가 상차 영역을 향하여 선회하고 트럭 인식 신호를 보내면 굴삭기에 장착된 3D 광대역 레이저 스캐너로 전방을 스캔하여 트럭의 특수한 평면 형태를 인식하여 상차영역을 탐지한다. 단 트럭이 위치한 고도와 방향은 그림 1과 같이 굴삭기가 트럭을 내려 보는 시각으로 설정되어 있어야 한다.

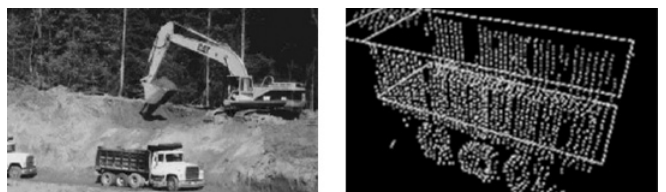


그림 1. 상차 트럭의 인식 (Stentz, 2000)

Sarata(2007)는 휠로더에 2D 레이저 스캐너를 장착하고 지면과 전방을 스캔하여 덤프 트럭을 탐지하는 연구를 수행하였다. 평평한 지면의 패턴과 트럭이 존재할 때 상부로 돌출되는 패턴을 감지하여 덤프트럭의 존재를 판단하는 알고리즘으로 평지의 테스트베드에서 실험이 수행되었으며 트럭 이외의 다른 객체는 고려되지 않았다(그림 2).

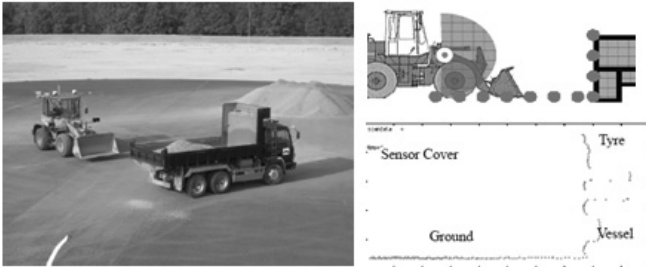


그림 2. 2D 레이저 스캐너를 이용한 덤프 트럭의 탐지 (Sarata, 2007)

2.1.2 흙더미 탐지 관련 연구

스테레오비전으로 획득한 3차원 영상으로부터 평지와와의 높이 차이를 이용하여 흙더미를 탐지하고 사이즈를 측정하는 연구가 Sarata(2008)에 의해 수행된 바 있으며, 이 역시 평지의 테스트베드에서 실험이 진행되었다. 이는 고도를 기준으로 지면으로부터 돌출된 객체를 검출하는 객체 탐지 방법으로, 비정형의 토공사 작업 현장에서 고도만을 이용하여 객체를 분리할 경우 흙더미와 그 외의 객체, 일반 지형의 굴곡 부 등이 구별이 되지 않아 실제 현장에 적용하기에는 한계가 있다(그림 3).

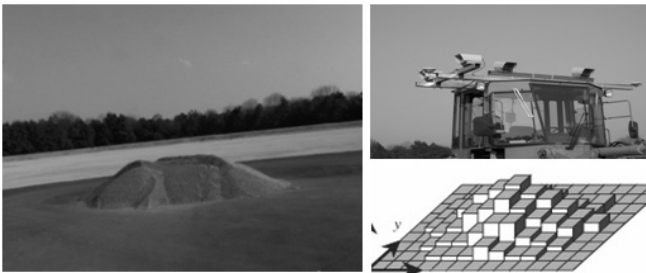


그림 3. 스테레오비전을 이용한 흙더미의 탐지 (Sarata, 2008)

2.1.3 충돌 방지 관련 연구

Stentz(2000)는 굴삭기 붐(boom)의 충돌 방지를 위한 연구에서 예상된 붐의 이동경로와 3D 광대역 레이저 스캐너로 맵핑한 지형데이터와의 중복 여부를 판단하여 정지신호를 내리는 알고리즘을 개발하였다(그림 4). 그러나 이는 붐의 이동반경으로 범위가 한정되어 있어 그 외의 범위에서는 안전성을 보장하지 못한다.

토공사 작업 현장의 객체 탐지를 위한 기존의 연구를 고찰한 결

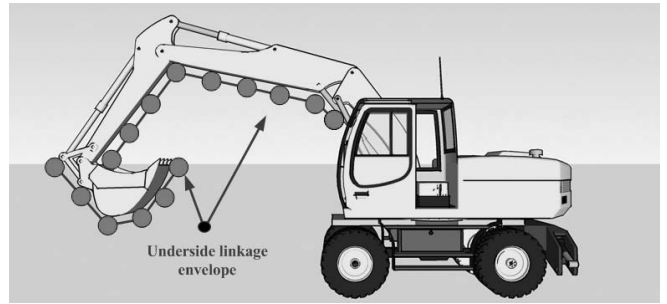


그림 4. 굴삭기 붐의 충돌방지 범위 (Stentz, 2000)

과, 센서 인터페이스로는 주로 2D 또는 3D 레이저 스캐너를 사용할 수 있었다. 그러나 첫째, 트럭 인식을 위한 Stentz(2000)의 연구에서는 트럭이 위치하는 방향 및 고도를 설정하는 전제가 있었고, Sarata(2007)의 연구는 다양한 지형 조건 및 트럭 이외의 객체를 고려하지 않은 한계성이 있었다. 둘째, 흙더미 탐지를 위한 Sarata(2008)의 연구도 평지의 지형만을 고려하였으며, 셋째, 붐의 충돌방지를 위한 Stentz(2000)의 연구는 충돌방지 범위가 한정되어 있다는 한계성이 있다. 이와 같이 기존의 연구는 하나의 대상만을 고려하거나 제한된 공간만을 고려하였기 때문에 실제 현장에 적용하기에는 한계가 있는 것으로 사료되며, 이에 자동화 굴삭 작업 환경의 안전성 확보를 위해서는 비정형의 광범위한 토공사 현장에 적용할 수 있는 객체 탐지 알고리즘의 개발이 절실히 요구되는 것으로 판단되었다.

2.2 기존 레이저 스캐너 기반의 객체 탐지 알고리즘 분석

2.2.1 레이저 스캐너의 측정 방식

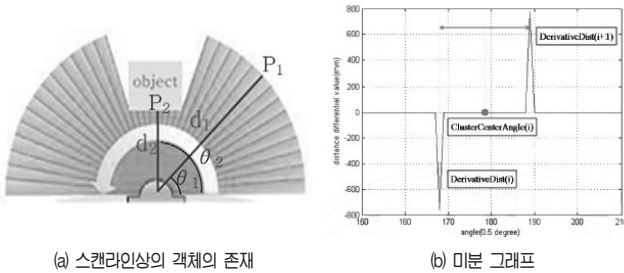
레이저 스캐너는 레이저광을 대상 물체에 주사하고 그 반사광이 돌아오는 시간을 측정하여 거리값을 출력하는 TOF(Time of Flight)방식이 주로 사용된다. TOF 방식의 레이저 스캐너는 3D 광대역 레이저 스캐너와 2D 라인 레이저 스캐너의 두 가지 종류가 있으며, 그 특성은 표 1과 같다.

표 1. TOF 레이저 스캐너의 종류 및 특성

2D (라인) 레이저 스캐너	3D (광대역) 레이저 스캐너
평면을 선형으로 스캔 실시간으로 결과 출력 소형 장비로 이동에 적합	회전하면서 3차원 고해상도 스캔 스캔속도가 느림 (15~20분) 이동이 용이치 않음

2.2.2 측정 데이터의 미분을 통한 특이점 검출

측정데이터를 미분하는 방법은 2D 데이터의 분석에 주로 사용하는 방법으로, 그림 5(a)의 스캔라인상에 객체가 존재할 경우 점 P에 대한 거리값 d의 변화량이 갑자기 증가하므로 이 거리값을 스캔각 θ 에 대해 미분한 그래프 그림 5(b)로부터 객체의 경계를 찾는 방법이다.



(a) 스캔라인상의 객체의 존재

(b) 미분 그래프

그림 5. 측정데이터의 미분을 이용한 특이점 검출 (정진구, 2008)

이기룡(2008)은 스캔각 θ 가 90° 에서 멀어질수록 그림 6과 같이 거리값 d의 변화량이 커짐으로 인해 발생하는 검출결과와 왜곡을 지적하였다(그림 6). 지형은 평지인데도 불구하고 미분값이 점점 증가하는 결과를 발생시키므로, 이에 2차원 도법(圖法)을 이용한 미분값의 보정을 통하여 검출오차를 감소시키는 연구를 수행하였다.

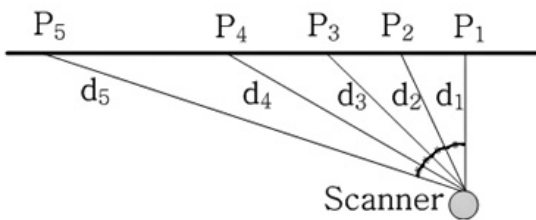


그림 6. 스캔각에 따른 거리값의 변화량 증가 (이기룡, 2008)

2.2.3 고도를 이용한 객체의 분리

3D 스캔 데이터의 분석법으로는 고도를 이용하는 방법이 있다. Axelsson(1999)은 3D 스캔 데이터로부터 도로면과 건물을 분리하는 연구에서, 지표면은 연결성을 가진 낮은 고도값으로 구성되어 있다는 가정 하에 어느 정도의 높이 임계치를 주어 도로면과 건물을 분리하는 작업을 수행하였다(그림 7).

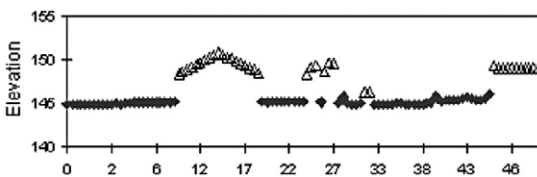


그림 7. 고도를 이용한 도로와 객체의 분리(Axelsson, 1999)

기존 레이저 스캐너 기반 객체 탐지 알고리즘을 분석한 결과, 토공사 현장에 적합한 객체 탐지 알고리즘은 부재한 실정이나, 기존의 연구는 알고리즘 개발에 있어 중요한 개념들을 제공하였다. 2D 데이터 기반의 미분을 통한 특이점 검출법은 지형데이터의 평면적 분석에 있어 효과적으로 사용될 수 있다. 특히 검출오차에 대한 이기룡의 연구는 광범위한 토공사 현장의 지형 데이터를 고려하면 그 측정오차가 심해지기 때문에 중요한 고려대상이 된다. 단 2D 데이터 기반의 미분법은 하나의 2차원 미분그래프를 대상으로 하였으나, 3차원 스캔데이터의 경우 스캐너원점으로부터의 거리에 따라 수백 개의 스케일을 달리하는 미분그래프가 발생하므로, 스케일 오차를 보정하기 위한 보다 효율적인 방안이 필요할 것으로 사료된다. 고도를 이용한 3차원 분석법은 평지의 지형에서 매우 효율적이거나 고도차가 있는 비정형의 지형을 대상으로 적용하기에는 한계가 있다. 그러나 객체가 존재하는 경계 내부로 분석영역을 축소한다면 고도를 이용하여 객체를 분리할 수 있을 것으로 사료된다.

2.3 토공사 작업 현장의 객체 탐지를 위한 고려요소 도출

2.3.1 전(筭)방위의 실시간 탐지

안전성의 확보를 위해서는 굴삭기 전(筭)방위를 실시간으로 탐지할 수 있어야 한다. 국내에서 개발 중인 지능형 굴삭 시스템은 실시간 탐지를 위해 2D 레이저 스캐너를 사용하고 전(筭)방위를 스캔하기 위해 2D 레이저 스캐너의 회전을 통한 3차원 지형 모델링 방법을 사용한다. 따라서 회전형 레이저 스캐너 모듈의 데이터 처리 방법을 고려할 필요가 있다.

2.3.2 비정형의 광범위한 지형

토공사 현장은 비정형의 광범위한 지형이라는 속성이 있다. 따라서 지형에 구애받지 않는 객체의 속성을 고려할 필요가 있으므로 레이저의 직진성에 기인하여 객체 후면에 필연적으로 발생하는 그림자를 검출하여 객체를 탐지하는 방안을 사용하기로 한다. 추가적으로, 스캐너 원점으로부터 멀어질수록 데이터의 밀도가 감소하는 현상이 발생하므로 이를 고려하여 스캔지점에 따라 가변적인 기준을 적용할 필요가 있다.

2.3.3 토공사 현장의 탐지 대상 주요 객체

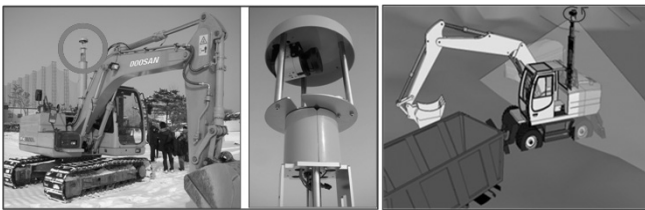
객체 탐지 기술을 필요로 하는 자동화 대상 작업은 매우 다양하며, 크게 회피대상과 작업대상을 탐지하는 경우로 나눌 수 있다. 회피대상을 탐지하는 경우에는 이동경로의 설정, 협착 및 충돌 방지를 위한 경보 발생, 비상정지 등이 있으며, 이 경우 존재하는 모든 객체는 장애물로 간주될 수 있다. 특히 토공사 작업 현장에 존재하는 장애물로는 고가의 측량장비들이나 덤프된 흙

터미들을 고려할 수 있으며, 무엇보다도 협착 및 충돌사고로 인한 인명피해로부터 안전성을 확보하는 것이 중요하기 때문에 사람의 탐지가 보장되어야 한다. 그리고 작업 대상을 탐지하는 경우에는 상차 작업을 위한 상차 영역의 인식을 들 수 있다. 상차 영역의 인식을 위해서는 트럭의 위치 및 너비, 높이, 형상 정보의 탐지가 필수적으로 요구된다.

3. 회전형 레이저 스캐너 기반의 3차원 객체 탐지 알고리즘의 개발

3.1 지형데이터의 구조 정의

지능형 굴삭 시스템의 회전형 레이저 스캐너 모듈은 2D 라인 레이저 스캐너와 회전 장치로 구성되어 있다. 그림 8(a)와 같이 레이저 스캐너의 스캔방향을 아래로 향하도록 회전 장치에 장착한 후, 지면으로부터 4.5m 높이의 굴삭기 상부에 설치하여 그림 8(b)와 같이 지면을 스캔한다. 스캐너가 실시간으로 지면을 선형 스캔하는 동시에 회전 장치를 정속으로 회전시켜 3차원 지형 데이터를 획득한다.



(a)회전형 레이저 스캐너 모듈

(b)스캔 방식

그림 8. 지능형 굴삭 시스템의 회전형 레이저 스캐너 모듈

수많은 점으로 구성된 지형 데이터를 전산적으로 처리하기 위해서는 데이터의 처리 방향이나 순서에 일정한 규칙을 부여해야 하므로, 이를 위해 지형 데이터의 구성원리에 입각하여 데이터의 주소 구조를 정의할 필요가 있다. 회전형 레이저 스캐너 모듈은 극좌표계에 기반한 좌표를 가지며, 측정점의 거리값 D 와 회전장치의 회전각 ϕ 와 스캐너 스캔각 θ 로 지형데이터가 구성된다. 그림 9에서 임의의 점 P 에 대해 회전장치의 회전각을 ϕ_i 라 하고, 스캐너의 스캔각을 θ_j 라 하면 점 P 의 주소는 i, j 로 구성된 2차원 매트릭스의 형태로 표현할 수 있다. 또한 이러한 극좌표 데이터는 내부 프로세서에서 3차원 직교 좌표계로 변환되어 객체 탐지를 위한 데이터 분석에 사용된다.

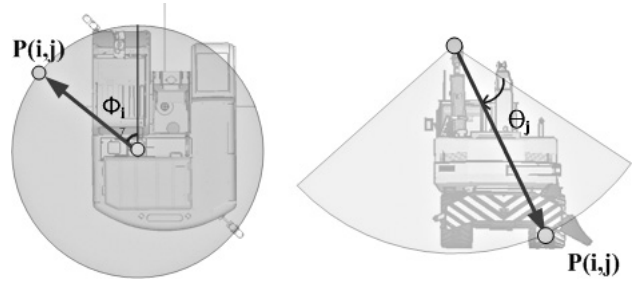


그림 9. 회전장치 회전각 ϕ 와 스캐너의 스캔각 θ

3.2 그림자 영역을 기준으로 한 객체 탐지 프로세스

지형 데이터 상에 객체가 존재할 경우 레이저의 직진성에 기인하여 그림 10과 같이 객체 후면으로 그림자 영역이 발생하며 그림자 영역을 발생시키는 모든 점은 객체에 해당한다는 것을 알 수 있다.

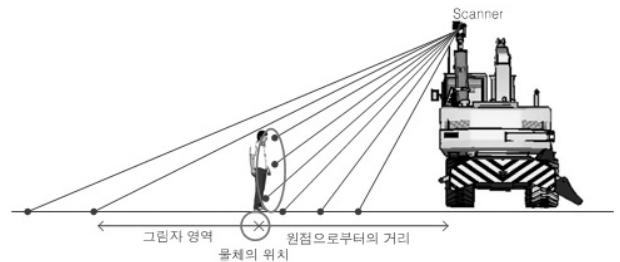


그림 10. 그림자 영역의 발생 원리

따라서 본 객체 탐지 알고리즘은 그림자 영역을 기준으로 객체를 탐지하는 방안에 착안하였으며, 검출된 그림자 영역 별로 분석영역을 축소하여 연산량을 줄이는 방법을 고안하였다. 본 객체 탐지 알고리즘의 전체적인 프로세스는 그림 11과 같다.

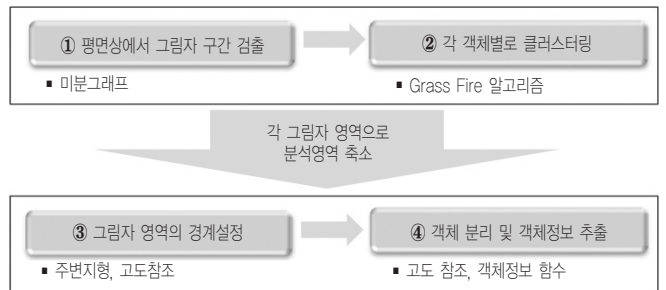


그림 11. 객체 탐지 프로세스

3.2.1 그림자 구간의 검출 및 클러스터링

그림자 구간은 지형데이터를 X-Y 평면으로 보고 측정점의 2차원 거리값을 미분하여 검출한다. 그림 12에서 $D_{i,j}$ 는 스캐너 원점으로부터 임의의 측정점 $P_{i,j}$ 까지의 2차원 평면상의 거리를 나타낸다. 스캐너인상에 객체가 존재할 경우 D값이 갑자기 감소하고 그 후면으로 그림자 영역이 발생하게 되므로 일반적인 2D 레이저 스캐너 데이터의 미분방법과 같이 측정점의 거리값을 각도에 대해 미분한 식 (1)을 사용하면 객체의 시작점과 끝점에 해당하는 특이점을 검출할 수 있다.

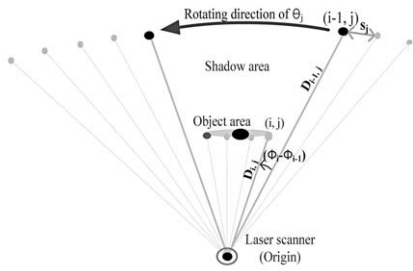


그림 12. 미분을 이용한 그림자 구간의 검출

$$Differential(i, j) = \frac{D_{i,j} - D_{i-1,j}}{\phi_i - \phi_{i-1}} \text{ ----- 식 (1)}$$

그러나 여기서 한 가지 더 고려해야 할 것은 그림 13과 같이 스캔각 θ_j 가 90° 에서 멀어질수록, 즉 측정점이 스캐너 원점으로부터 멀어질수록 데이터의 밀도가 감소하여 평균적인 점간의 거리가 멀어진다는 점이다. 이로 인해 스캔각 θ_j 가 달라짐에 따라 미분값의 스케일이 달라지는 결과를 초래하고, 어느 위치에서나 동일한 기준을 적용하여 특이점을 검출할 수 없게 된다. 미분값의 스케일이 달라지는 이유는 스캐너가 정속 회전 하는 관계로 회전각 ϕ 의 변화량 $\Delta\phi$ 가 항상 일정하여 상수화되고, θ_j 가 변화해도 $\Delta\phi$ 가 변화하지 않는 데에 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 스캔각이 θ_j 일 때의 평균적인 점의 밀도를 대표하는 변수 S_j (Scale j)를 정의하였다.

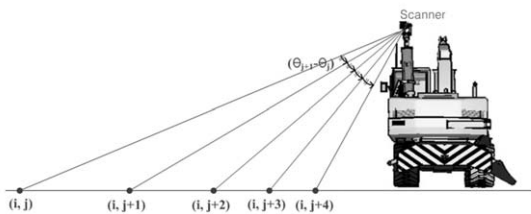


그림 13. 스캔각 θ_j 에 따른 데이터 밀도의 차이

S_j 에 대한 식은 객체가 존재하지 않는 평지의 지형을 가정했을 때, 다음과 같은 기하학적 원리에 의해 유도할 수 있다. 그림 14(a)에서 스캔각이 θ_j 일 때 스캐너 원점으로부터 임의의 측정점 $P_{i,j}$ 까지의 2차원 평면상의 거리를 $D_{i,j}$ 라 하면, 지면으로부터 스캐너까지의 높이 4.5m를 적용하여 $D_{i,j}$ 는 식 (2)와 같이 정의할 수 있다. 이를 평면에서 본 그림 14(b)에서 점들 상호간의 거리를 S_j 라고 했을 때, 객체가 존재하지 않는 평지의 지형이므로 같은 θ_j 값을 가진 점들의 D값은 모두 같다. 따라서 S_j 는 제 2코사인법칙에 의해 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

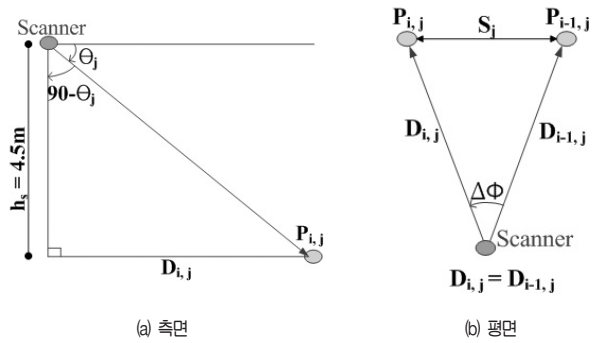


그림 14. S_j 공식 유도 원리

$$D_{i,j} = h_s \cdot \tan(|90 - \theta_j|) \text{ ----- 식 (2)}$$

$$h_s : \text{sensor height}(4.5m)$$

$$S_j^2 = 2 \cdot D_{i,j}^2 - 2 \cdot D_{i,j}^2 \cdot \cos(\Delta\phi) \text{ (based on law of cosines)}$$

$$S_j = D_{i,j} \cdot \sqrt{2 \cdot (1 - \cos(\Delta\phi))}$$

$$= h_s \cdot \tan(|90 - \theta_j|) \cdot \sqrt{2 \cdot (1 - \cos(\Delta\phi))} \text{ ----- 식 (3)}$$

$$h_s : \text{sensor height}(4.5m)$$

$$\Delta\phi : \phi \text{ interval}$$

결과적으로 그림자 구간을 검출하는 미분식 $Differential(i, j)$ 는 그림 12에서 D값을 S_j 에 대해 미분한 식 (4)와 같다. 여기서 S_j 는 데이터 밀도에 관계없이 일정한 스케일로 미분값을 증폭하는 역할을 한다.

$$Differential(i, j) = \frac{D_{i,j} - D_{i-1,j}}{S_j} \text{ ----- 식 (4)}$$

식 (4)에 의한 미분 그래프는 그림 15와 같다. 객체의 시작점 $istart$ 와 끝점 $iend$ 는 일정한 임계치 T_d 값을 기준으로 검출할 수 있다. 여기서 $istart$ 는 항상 (-)부호를 가지며 $iend$ 는 항상 (+)부호

를 가지므로 부호가 반대인 한 쌍의 구간 $i_{start} \sim i_{end}$ 를 그림자 구간으로 간주할 수 있다.

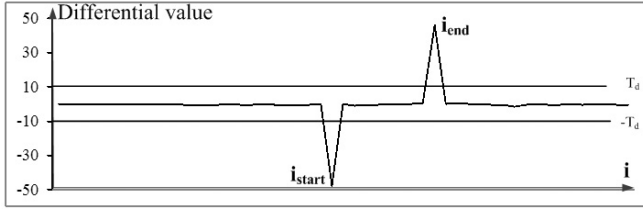


그림 15. 스캔각이 θ_j 인 데이터의 미분그래프

T_d 는 검출하고자 하는 특이점의 최소 높이 h_o 를 반영하여 다음과 같이 설정한다. 그림 16에서 스캔각이 θ_j 일 때 $P_{i,j}$ 는 객체가 존재하지 않을 경우의 측정점의 위치이고, $P_{i-1,j}$ 는 객체가 존재할 경우의 측정점의 위치이다. 측정점 $P_{i-1,j}$ 의 높이를 h_o 라고 할 때, 두 측정점 $P_{i,j}$ 와 $P_{i-1,j}$ 사이의 D 값 변화량은 식 5와 같다. 이를 식 4에 대입하여 식 6과 같이 T_d 값을 설정할 수 있다.

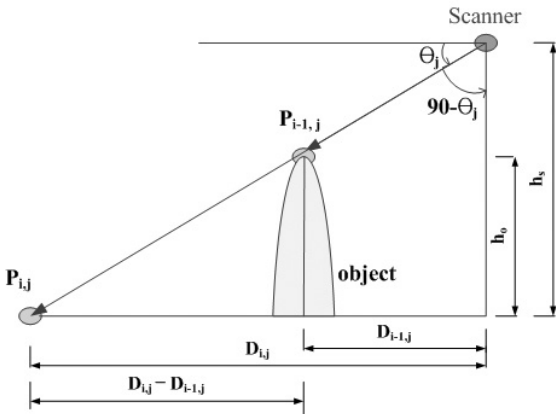


그림 16. T_d 값 설정 원리

$$D_{i,j} - D_{i-1,j} = h_o \cdot \tan(|90 - \theta_j|) \quad \text{----- 식 (5)}$$

$$\begin{aligned} T_d &= \frac{D_{i,j} - D_{i-1,j}}{S_j} \\ &= \frac{h_o \cdot \tan(|90 - \theta_j|)}{h_s \cdot \tan(|90 - \theta_j|) \cdot \sqrt{2} \cdot (1 - \cos(\Delta\phi))} \\ &= \frac{h_o}{h_s \cdot \sqrt{2} \cdot (1 - \cos(\Delta\phi))} \quad \text{----- 식 (6)} \end{aligned}$$

h_s : sensor height (4.5m)

h_o : object height

$\Delta\phi$: ϕ interval

위와 같이 그림자 구간으로 검출된 점들은 클러스터링을 통해 같은 객체별로 그룹화 한다. 같은 객체에 속하는 점들은 그 주소 i, j 가 연속되어 있는 속성을 이용하여 서로 연속하는 점들을 각각의 영역으로 그룹화 할 수 있다. 본 연구에서는 Grass Fire 알고리즘¹⁾을 사용하여 클러스터링을 수행하였으며, 그 결과 그림 17과 같이 같은 객체로 분류된 점들 별로 객체 번호를 부여받게 된다.

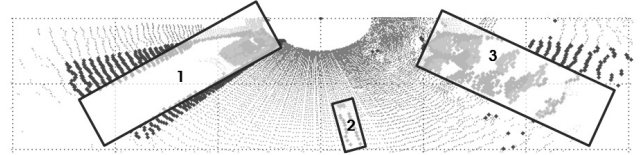
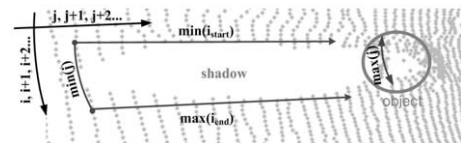


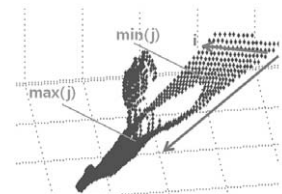
그림 17. 객체별 번호 부여

3.2.2 그림자 영역의 경계 결정 및 객체 정보 추출

클러스터링이 완료되면 분석영역은 각각의 그림자 영역 내부로 축소된다. 각 객체별 그림자 영역의 경계는 클러스터링된 점들로부터 그림 18(a)와 같이 4면의 경계 중 3면의 경계를 우선 결정할 수 있다. i 방향에서는 i_{start} 의 최소값 $\min(i_{start})$ 와 i_{end} 의 최대값 $\max(i_{end})$ 가 그림자영역의 경계이며 j 방향에서는 j 의 최소값 $\min(j)$ 가 그림자 영역의 경계이다. 그러나 미분을 통하여 검출된 점들 중 j 의 최대값은 실제 그림자영역의 경계로 볼 수 없다. 그림 18(b)에서 그림자 영역의 나머지 한 경계인 $\max(j)$ 지점은 실제 객체의 위치로 지면과 객체가 만나는 지점이며, 지면과 객체의 패턴 차이가 모호한 지점이기 때문에 미분을 통하여 검출되지 않는다.



(a) 그림자 영역 4면의 경계



(b) $\max(j)$ 의 위치

그림 18. 그림자 영역의 경계

1) 2D 영상에서 픽셀단위의 연산을 하는 클러스터링 알고리즘으로, 인접하여 연결된 모든 픽셀에 동일한 라벨을 붙이는 작업을 반복하는 알고리즘

그림 19는 $\min(j)$ 부터 $\max(j)$ 까지의 고도(z)값 패턴을 나타낸 것이다. $\min(j)$ 의 바로 이전 위치인 $\min(j)-1$ 은 그림자 영역 경계 외부이므로 일반적인 지형과 같은 패턴을 보이다가 그림자 영역의 경계인 $\min(j)$ 에서 뚜렷하게 객체가 돌출된 것을 확인할 수 있다. 그리고 $\max(j)$ 방향으로 갈수록 지면과 객체의 고도 패턴 차이가 모호해져 $\max(j)$ 에서 지면과 동일해 지는 것을 볼 수 있다. 따라서 $\max(j)$ 의 위치는 고도를 이용한 3차원 분석을 통하여 결정할 수 있다.

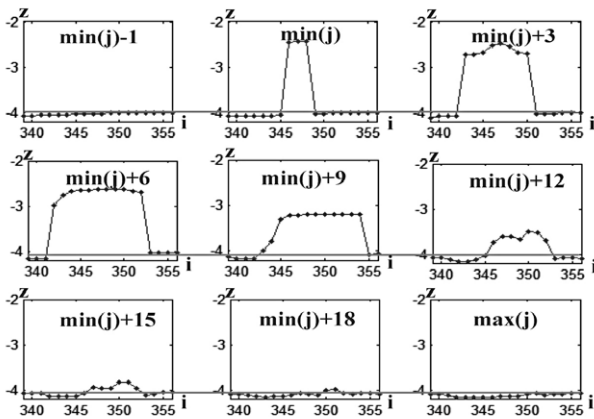


그림 19. $\min(j) \sim \max(j)$ 구간의 고도 패턴

고도를 이용한 분석에서는 가상의 지형라인을 생성하여 이를 기준으로 객체와 지면을 분리한다. 가상의 지형라인은 그림자 영역 경계 외부에 존재하는 주변지형 $G1, G2$ 를 참조한다(그림 20). 그림자 영역 경계의 i 값이 $\min(i_{start}), \max(i_{end})$ 일 때, 참조하는 주변지형 $G1$ 의 i 값은 $\min(i_{start})-1$, $G2$ 의 i 값은 $\max(i_{end})+1$ 이다.

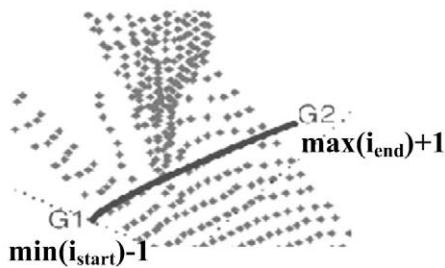


그림 20. 주변지형 $G1, G2$ 의 위치

$G1$ 과 $G2$ 를 지나는 가상의 지형라인 $\overline{G1G2}$ 의 i 에 대한 1차 함수를 구하여 z 값이 직선 $\overline{G1G2}$ 를 T_h 이상 상회할 경우 객체로 분리하고, 그렇지 않을 경우 지형으로 분리한다. 그리고 객체가 더 이상 출현하지 않을 경우 그 지점의 j 값을 $\max(j)$ 로 결정한다. 여

기서 T_h 는 지형과 객체를 구분하는 임계치로 이 연구에서는 사람의 발목의 높이를 기준으로 하여 0.15m로 설정하였다. 즉 사람이 서 있을 때 지형과 사람의 구분은 발목 이상의 부분부터 시작되는 의미로, T_h 가 0.15m일 때 0.15m 이상 지면으로부터 돌출되지 않은 부분은 객체로 간주하지 않는 개념과 동일하다(그림 21).

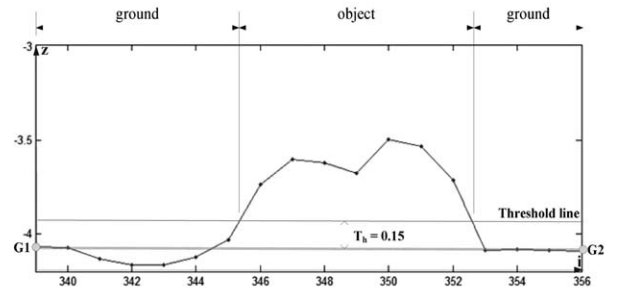


그림 21. 고도를 이용한 지형과 객체의 분리

직선 $\overline{G1G2}$ 의 i 에 대한 1차 함수 $GL(i)$ 는 두 점을 지나는 직선의 방정식에 의해 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$GL(i) = a \cdot i + b \quad \text{----- 식 (7)}$$

$$a = \frac{z_{G2} - z_{G1}}{\max(i_{end}) + 1 - \min(i_{start}) - 1}$$

$$b = z_{G2} - a \cdot \max(i_{end}) + 1$$

4면의 그림자 영역 경계가 모두 결정되면 그 내부의 점들로부터 객체의 정보를 추출할 수 있다. 표 2는 객체의 위치, 너비, 높이를 추출하는 공식이다.

표 2 객체 정보 추출 공식

Item	Formula
Object No.	Clustered Number
Location : (x-y) coordinates of P(i, j)	$i = \left\{ \frac{\min(i_{start}) + \max(i_{end})}{2} \right\}$ $j = \max(j)$
Width	$\{\max(i_{end}) - \min(i_{start})\} \times S_{\max(j)}$
Height	$\max(z) - \min(z)$

4. 현장실험을 통한 알고리즘의 검증

본 객체 탐지 알고리즘의 검증을 위해 경기도 안산 소재의 토공사 작업 현장을 대상으로 객체 탐지 실험을 수행하였다. 본 현

장은 최대 고저차 1.5m의 경사가 있는 비정형의 지형이었으며 성토와 절토에 의해 흙더미들이 중첩되어 쌓여 있었다. 또한 측량작업, 굴삭작업, 상차작업이 동시에 이루어지고 있었으므로 트럭, 사람, 흙더미, 측량장비 등의 탐지 대상객체가 모두 존재하는 일반적인 토공사 현장의 조건을 갖추고 있었다(그림 22). 실험에서는 굴삭기를 중심으로 반경 30m 범위를 스캔한 지형데이터를 대상으로 본 알고리즘을 적용하여 트럭, 사람, 흙더미, 측량 장비의 탐지 여부를 확인하였다. 알고리즘의 검증은 1)객체의 속성 정보를 올바르게 출력하는지의 여부, 2)시간을 달리하여 획득한 여러 개의 데이터에 대해 객체를 누락 없이 탐지하는지의 여부, 3)Td값 설정에 따른 객체 탐지 결과의 변화 양상을 확인하는 과정으로 진행하였다.



그림 22 토공사 현장 전경 (경기도 안산시)

1) 객체 속성 정보 추출 결과

그림 23은 현장실험을 통해 도출된 객체 탐지 결과를 보여준다. 현장에 존재하는 트럭, 흙더미, 장비, 사람이 모두 탐지되었으며 각 객체별로 객체 번호가 부여되어 있음을 알 수 있다. 중첩되어 쌓여 있는 흙더미들의 경우 그림자 영역이 겹쳐져 있으므로, 여러 개의 흙더미가 하나로 클러스터링 되어 객체 번호가 부여되었다. (5)번 객체의 경우 역시 두 사람이 앞 뒤로 나란히 서 있는 경우로 하나의 객체로 클러스터링 되었다.

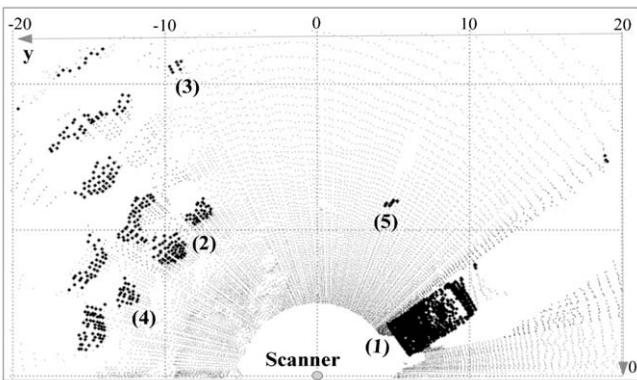


그림 23. 객체 탐지 결과 영상 (Td = 5)

그림 23에서 탐지된 객체들에 대한 위치, 너비, 높이, 형상 정

보 추출 결과는 다음 표 3과 같다. 추출된 객체의 위치 및 크기 정보는 실제 객체의 정보와 일치하였다. 형상정보의 추출 결과는 스캐너로부터 가까운 위치에 있는 객체일수록 높은 데이터 밀도로 인해 뚜렷한 형상정보가 추출되었다.

표 3 객체 정보 추출 결과

객체 종류	No.	객체 정보		형상 정보
트럭	(1)	Location (x, y)	-2.38, 5.57	
		Width (m)	3.26	
		Height(m)	3.29	
흙더미	(2)	Location (x, y)	-9.00, -8.46	
		Width (m)	4.31	
		Height(m)	1.68	
측량 장비	(3)	Location (x, y)	-20.32, -9.25	
		Width (m)	0.87	
		Height(m)	0.88	
흙더미	(4)	Location (x, y)	-4.41, -12.38	
		Width (m)	5.38	
		Height(m)	1.64	
사람	(5)	Location (x, y)	-11.83, 4.81	
		Width (m)	0.69	
		Height(m)	1.63	

트럭과 같이 높이가 높은 객체의 경우 스캐너 원점으로부터 반경 15m를 벗어나면 스캔라인이 트럭의 높이를 넘지 못하여 트럭의 형상을 온전히 스캔하지 못하는 것으로 나타났다(그림 24). 이 경우 트럭의 형상 추출은 되지 않았지만 위치, 너비, 높이 정보는 모두 추출되었다.

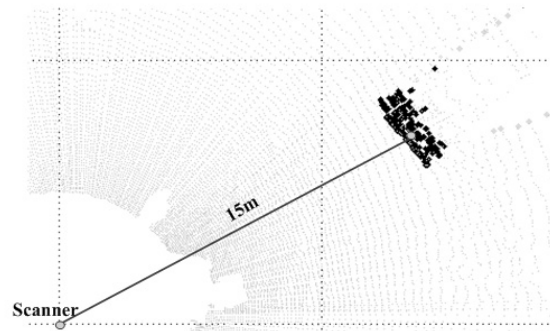


그림 24. 스캐너 반경 15m 위치의 트럭 스캔 결과

2) 여러 지형 데이터에 대한 객체 탐지 결과

5분 간격으로 획득한 10개의 지형 데이터를 대상으로 객체 탐지 알고리즘을 적용한 결과는 표 4와 같다. 현장에 존재하는 모든 객체는 누락 없이 탐지되었으며, 존재하지 않는 객체가 탐지되거나 존재하는 객체가 탐지되지 않는 경우는 발생하지 않았다. 다만 2개의 데이터에서 노이즈 점이 검출되는 일이 있었다. 노이즈는 트럭의 일부에서 발생하였는데, 이는 스캔라인이 트럭의 높이를 넘지 못하여 트럭의 경계를 온전히 스캔하지 못하는 데서 기인한 것으로 파악되며 주로 1~2개의 점으로 나타나므로 정상적인 객체와 구별이 가능한 것으로 사료된다.

표 4. 여러 지형 데이터에 대한 객체 탐지 결과

(a) 여러 지형 데이터에 대한 객체 탐지 결과 표

Terrain data No.	Detection Result			
	Expected Objects	Detected Objects	Missed Objects	Noise
1	4	4	0	1
2	3	3	0	1
3	2	2	0	0
4	2	2	0	0
5	3	3	0	0
6	3	3	0	0
7	3	3	0	0
8	3	3	0	0
9	4	4	0	0
10	2	2	0	0

(b) 여러 지형 데이터에 대한 객체 탐지 결과 영상

Terrain data No.	영상	Terrain data No.	영상
1		6	
2		7	
3		8	
4		9	
5		10	

3) T_d값에 따른 객체 탐지 결과

동일한 지형 데이터를 대상으로 T_d값을 변화시키며 알고리즘을 적용한 결과는 표 5와 같다. T_d값을 5로 설정하였을 때는 모

든 객체가 검출되었으며, T_d값을 15로 설정하였을 때는 최고 높이가 1m 미만인 객체는 검출되지 않았다. T_d값을 25로 설정하였을 때는 최고 높이가 2m 미만인 객체는 검출되지 않았으며 트럭만이 검출되었다. 따라서 T_d값에 비례하여 검출되는 객체의 높이기준도 증가함을 알 수 있었다.

표 5. T_d값에 따른 객체 탐지 결과

T _d	탐지 결과			
	트럭 (height : 3.29m)	흙더미 (height : 1.68m)	사람 (height : 1.63m)	측량 장비 (height : 0.88m)
5	0	0	0	0
15	0	0	0	X
25	0	X	X	X

현장실험 결과 토공사 작업 현장에 존재하는 객체들을 누락이나 오류 없이 탐지해 내어 객체의 유무를 판단하였고, 객체의 속성정보를 추출함으로써 본 객체 탐지 알고리즘의 성능을 테스트 하였다. 따라서 본 알고리즘에 의해 객체의 속성 정보를 굴삭기의 작업계획 시스템(TPS: Task Planning System)으로 전송하면 이동경로 설정, 비상정지 등이 가능하며, 상차영역 및 작업계획을 위한 객체 인식(recognition) 모듈에 객체의 속성정보를 제공할 수 있다. 상차영역 인식을 위한 트럭의 속성 정보 추출의 경우 스캐너 반경 15m를 벗어나면 스캐닝 포인트의 밀도가 급격하게 낮아지고, 사각이 증가하여 트럭 전체가 스캔되지 않았으므로, 트럭에 한해서 형상정보 추출 및 상차영역 인식 범위는 스캐너 반경 15m라고 할 수 있다. 그러나 스캐너 반경 15m 이외의 지점에서 트럭을 비롯한 객체의 유무, 위치, 너비, 높이 정보의 탐지는 가능하였다. 15m 지점 이외의 영역에서 객체 탐지확률을 높이기 위해서는 레이저 스캐닝 회전 속도를 감소시킴으로써 스캐닝 포인트의 밀도를 증가시켜야 한다. 그러나 레이저 스캐너의 회전속도를 낮출 경우 밀도는 높아지지만 3차원 모델의 갱신속도가 늦어진다. 실제 상차트럭의 적재함 영역 인식이 주요목적일 경우 보다 정확한 모서리점 인식을 위해서는 회전속도를 늦추는 것이 유리하고, 반대로 신속한 인식을 위해서는 회전속도를 높이는 것이 유리하다.

한편, 시간을 달리하여 측정한 10개의 지형데이터에 대한 객체 탐지 실험 결과, 모든 객체를 누락 없이 탐지하였으며 10개의 데이터 중 단 2개의 데이터에서 노이즈가 검출되었다. 또한 알고리즘에 사용되는 변수 가운데 T_d값에 따라 탐지되는 객체의 높이 기준도 변화시킬 수 있으므로, 트럭 인식의 경우와 같이 다른 객체를 배제하고 트럭만 인식할 필요가 있을 때 T_d값을 상향 조정하여 적용할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 굴삭 자동화 연구 동향 및 레이저 스캐너 기반의 객체 탐지 알고리즘 고찰 결과와 토공사 작업 현장의 지형적 특성을 규정하여 도출한 고려요소를 바탕으로, 토공사 현장에 최적화된 객체 탐지 알고리즘을 개발하였으며 현장실험을 통하여 알고리즘의 성능을 검증하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 토공사 작업 현장의 객체 탐지 고려요소 도출 결과 전(全)방위의 실시간 탐지의 필요성, 비정형의 광범위한 지형, 가변적인 데이터 밀도 등이 도출되었다. 본 연구에서 제안한 알고리즘은 회전형 레이저 스캐닝 모듈의 데이터 처리, 데이터 밀도를 반영한 그림자 검출의 방법을 통하여 도출된 고려요소들을 모두 반영함으로써 토공사 작업 현장에 최적화된 알고리즘으로서의 실용 가능성이 매우 높은 것으로 분석되었다.

2) 토공사 작업 현장의 주 탐지 대상 객체인 사람, 상차트럭, 측량 장비, 흙더미를 대상으로 한 객체 탐지 현장 실험 결과, 제안된 알고리즘은 시간을 달리 하여 측정된 10개의 지형 데이터에서 누락이나 오탐지 없이 현장에 존재하는 객체를 모두 탐지하였으며, 추출된 객체의 속성(위치, 너비, 높이 형상)정보는 실제 객체의 속성과 일치하였다. 상차트럭에 한해 형상정보 추출 가능 범위는 스캐너 반경 15m 이내인 것으로 밝혀졌으며 이는 상차 영역 인식에 있어 충분한 범위라 할 수 있다.

노이즈 발생 데이터의 비율은 20%였으며 노이즈는 크기와 높이에 있어 객체와 구별되는 특성을 보이므로 노이즈 필터링 기법을 이용하여 제거가 가능한 것으로 사료된다. 또한 T_d 값과 탐지 객체의 높이 사이에 비례 관계가 존재하여 T_d 값 조절을 통해 높이에 따른 객체의 선별적 탐지가 가능한 것으로 밝혀졌다. 본 연구의 현장 실험 결과 T_d 값 15에 해당하는 탐지 객체의 최대 높이는 0.88m~1.63m 범위였으며 T_d 값 변화량 10에 대하여 검출되는 객체의 최고 높이가 약 1m씩 상향 조절 되었다. 평지를 기준으로 한 식 (6)에 의한 T_d 값은 초기값 설정에 참조할 수 있으나 현장실험 결과와 일치하지는 않았으며, 최적화된 T_d 값은 현장 여건에 따라 경험적으로 얻어짐으로 이에 대한 정량화 연구가 필요한 것으로 사료된다.

3) 기존의 객체 탐지 연구가 토공사 현장의 주 대상 객체인 사람, 트럭, 흙더미 중 어느 하나의 객체만을 대상으로 하였고 평지만을 고려하여 수행된 데 비하여, 본 연구에서 제안하는 알고리즘은 위의 객체를 모두 고려하였으며 실제 토공사 현장에서 수행한 실험 결과 사람, 트럭, 흙더미를 모두 누락없이 탐지하였다. 따라서 지능형 굴삭 시스템의 이동경로 설정, 상차영역 인

식, 협착에 의한 인명피해 예방 등에 필요한 객체 탐지 기술을 제공할 수 있는 것으로 판단되며, 나아가 레이저 스캐닝 모듈을 사용하는 자동화 장비의 핵심 요소 기술로서 그 활용범위가 넓을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

본 연구는 인하대학교의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- 유병인 (2009). “스테레오비전 기술을 이용한 지반형상 3차원 모델링 및 굴삭 작업 지원 시스템 개념 설계”, 인하대학교 석사학위논문
- 정진구, 홍석교, 좌동경 (2008). “무인 이동 개체의 경로 생성을 위한 레이저 스캐너와 비전 시스템의 데이터 융합을 통한 장애물 감지”, Trans. KIEE, Vol. 57, No. 7, JUL, 2008
- 이기룡, 홍석교, 좌동경 (2008). “레이저 스캐너를 이용한 장애물 탐색 및 분리 알고리즘 개발”, 전기학회논문집 Vol.57(4), pp. 677-685
- Anthony Stentz, John Bares, Sanjiv Singh, Patrick Rowe (2000). “A Robotic Excavator for Autonomous Truck Loading”, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University
- Shigeru Sarata, Noriho Koyachi, Hiroyasu Kuniyoshi, Takashi Tsubouchi, Kazuhiro Sugawara (2007). “Detection of Dump Truck for Loading Operation by Wheel Loader”, 24th ISARC 2007
- Shigeru Sarata, Noriho Kiyachi, Kazuhiro Sugawara (2008). “Measuring and Update of Shape of Pile for Loading Operation by Wheel Loader”, 25th ISARC 2008
- Peter Axelsson (1999). “Processing of laser scanner data algorithms and applications”, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol.54, pp.138-147

논문제출일: 2011.06.27

논문심사일: 2011.07.01

심사완료일: 2011.08.31

요 약

2006년부터 한국에서 개발중인 지능형 굴삭 시스템(IES)은 이동, 굴삭, 상차를 포함하는 굴삭 작업 일련의 과정을 전자동으로 실현하기 위한 프로젝트로서, 굴삭 로봇 주변 지형의 3차원 모델링과 상차트럭의 위치, 사람의 접근, 이동경로상의 장애물 등의 객체를 정확하게 탐지하는 기술은 굴삭 자동화 장비의 작업 품질과 안전성 확보 측면에서 필수적으로 요구되는 핵심 요소 기술이라 할 수 있다. 이 연구의 목적은 레이저 스캐닝 시스템을 이용하여 지능형 굴삭 로봇 주변의 지형과 객체를 3차원으로 탐지함으로써 자동화 굴삭 작업의 품질과 안전성을 확보하는 데 있다. 본 연구에서는 굴삭기 주변의 3차원 지형으로부터 객체의 위치, 높이, 너비, 형상 정보를 추출하는 알고리즘을 제안하였으며, 실제 토공현장을 대상으로 한 실험을 통하여 알고리즘의 성능을 검증하였다.

키워드 : 3D, 객체, 탐지, 레이저 스캐너, 지형
