

지반형상 3차원 모델링을 위한 스테레오 비전 영상의 노이즈 제거 알고리즘 개발

Development of the Noise Elimination Algorithm of Stereo-Vision Images for 3D Terrain Modeling

유 현 석* 김 영 석** 한 승 우***
Yoo, Hyun-Seok Kim, Young Suk Han, Seung-Woo

요 약

작업환경 주변의 사물(target object)을 자동으로 인식하고 그 결과를 효과적으로 모델링하는 기술은 작업 품질, 생산성 등 개발 장비의 성능(performance)에도 지대한 영향을 미치게 되므로 이는 건설자동화 장비를 개발함에 있어 필수적으로 요구되는 핵심 요소기술이다. 현재 국내에서는 2006년부터 지능형 굴삭 로봇(intelligent robotic excavator)의 개발을 위하여 토공 작업환경을 대상으로 스테레오 비전을 활용하여 굴삭 로봇 주변 영역의 지반형상을 3차원으로 모델링하기 위한 기술을 개발하고 있다. 본 연구의 목적은 실제 토공 작업환경을 3차원으로 모델링하는 과정에서 필연적으로 발생하는 스테레오 매칭 노이즈를 효과적으로 제거하기 위하여 다양한 토공작업 환경 요소가 포함된 스테레오 영상을 수집하고 토공 작업환경의 3차원 모델링에 적합한 노이즈 제거 알고리즘을 제안하는 것이다. 본 연구를 통해 개발된 디지털 영상처리 기술은 토공 작업환경을 대상으로 주변을 자동 인식하고 추출하고자 하는 관심의 대상을 3차원으로 모델링해야 하는 굴삭기 이외의 자동화 장비 개발에 있어서도 응용성이 매우 클 것으로 기대된다.

키워드 : 스테레오 비전, 노이즈 제거, 지반형상 모델링, 지능형 굴삭시스템

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

작업환경 주변의 사물을 자동으로 인식하고 그 결과를 효과적으로 모델링하는 기술은 작업 품질, 생산성 등 개발 장비의 성능에도 지대한 영향을 미치게 되므로 이는 건설자동화 장비를 개발함에 있어 필수적으로 요구되는 핵심 요소기술이다. 최근 주변 사물을 탐지하고 모델링하기 위한 방법으로는 간단하게는 초음파 센서(ultrasonic sensor)에서부터, 머신 비전(machine vision),

구조광(structured light), 스테레오 비전(stereo vision), 플래시 레이더(flash lidar), 라인 스캐너(line scanner), 광대역 3차원 레이저 스캐너(terrestrial 3D laser scanner)에 이르기까지 많은 변화와 발전을 이루어왔다.

현재 국내에서는 토공 작업환경을 대상으로 지능형 굴삭 로봇이 작업하는 주변의 로컬 영역을 3차원으로 모델링하기 위한 요소기술의 연구가 시작되어 구조광, 스테레오 비전, 광대역 3차원 레이저 스캐너, 라인 스캐너 등 주변 환경의 자동 인식을 위한 다양한 센서가 현장에 적용되어 테스트되어 왔다.

특히, 본 연구에서 요구되는 로컬 영역 3차원 모델링 기술은 지능형 굴삭 로봇의 작업 속도에 맞추어, 변화하는 로컬 영역의 지반형상을 빠르고 정확하게 모델링할 수 있어야 하며, 경제성이 우수하면서도 운용에 있어 편의성이 높아야 한다.

현재까지 개발된 다양한 환경인식 장비 가운데 광대역 3차원 레이저 스캐너는 가장 정확하게 지반 형상을 모델링할 수 있으나 모델링 시간이 길고 매우 고가일 뿐만 아니라, 원활한 작동을

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

** 중신회원, 인하대학교 건축공학과 부교수, 공학박사(교신저자),
youngsuk@inha.ac.kr

*** 중신회원, 인하대학교 건축공학과 조교수, 공학박사,
shan@inha.ac.kr

본 연구는 국토해양부 지능형 굴삭시스템 개발 연구비 지원에 의한 연구의 일부임. (과제번호 : 06첨단융합C-01)

위해서는 정밀한 수평 보정이 요구되는 단점이 있다. 반면, SICK(독일)사의 LMS 시리즈와 같은 라인 스캐너는 비교적 저렴하고 속도도 빠른 편이지만, 3차원 모델링을 위해서는 별도의 정밀 틸트(tilt) 장치의 제작이 반드시 필요하기 때문에 원활한 모델링 제어가 어렵고, 노이즈가 비교적 많은 편이다. 이러한 레이저 기반 환경 모델링 기술들에 비해 스테레오 비전 기술은 근본적으로 디지털 카메라를 이용하는 영상처리 기술이기 때문에 데이터 전송 대역폭만 확보된다면 실시간으로 사물을 3차원으로 정확하게 모델링할 수 있고, 3차원 좌표 정보와 함께 색상 정보도 함께 획득할 수 있으며, 경제성이 우수하고 설치·해체·운용 등의 과정이 매우 용이한 장점이 있다.

스테레오 비전 장비는 국내에서 주로 로봇 분야에서 실내 환경의 인식을 위해 사용되었으나, 최근 본 연구의 적용대상인 토공 작업환경에 적용해 본 결과 실내 환경보다 훨씬 우수한 3차원 모델링 성능을 보였다.

이는 자연 상태의 지반 표면이 다양한 패턴이나 특징을 지니고 있기 때문에 스테레오 매칭(stereo matching)에 있어 보다 정확한 결과를 나타내기 때문이다. 그러나 토공 작업현장에는 흙이나 암석뿐만 아니라 디지털 영상을 처리함에 있어 노이즈의 원인이 되는 풀, 나무뿌리, 지표수, 흙관, 맨홀 콘크리트 구조물 등 흙 이외의 다양한 요소들이 존재한다. 굴삭기 주변 로컬 영역의 디지털 영상을 3차원으로 모델링함에 있어 노이즈가 발생될 경우, 이는 기본적으로 3차원 모델링의 품질을 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 굴삭 로봇 주변 환경 객체의 인식(recognition)에 있어서도 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 표면(surface) 모델링 과정 이전에 반드시 제거되어야만 한다.

이 연구의 목적은 스테레오 비전 장비를 이용하여 실제 토공 작업환경을 3차원으로 모델링하는 과정에서 필연적으로 발생하는 스테레오 매칭 노이즈를 효과적으로 제거하기 위하여, 다양한 토공 작업환경 요소가 포함된 스테레오 영상을 수집하고, 토공 작업환경의 3차원 모델링에 적합한 노이즈 제거 알고리즘을 개발하는 것이다.

본 연구를 통해 개발된 디지털 영상처리 기술은 토공 작업환경을 대상으로 주변을 자동 인식하고 추출하고자 하는 관심의 대상을 3차원으로 모델링해야 하는 굴삭기 이외의 자동화 장비 개발에 있어서도 응용성이 매우 클 것으로 기대된다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 범위는 실제 토공 작업환경의 스테레오 비전 영상을 대상으로 토공 작업환경에 적합한 노이즈 제거 알고리즘을

개발하고 적용 결과를 분석하는 것이며 세부적인 연구의 방법은 다음과 같다.

- 1) 최신 기술 및 연구문헌 분석 : 스테레오 비전 기술의 원리와 건설분야 지반형상 모델링의 최신 연구개발 동향을 분석한다.
- 2) 스테레오 비전 영상을 활용한 토공 작업환경의 특성 파악 : 스테레오 비전 장비를 이용하여 실제 토공 작업환경의 3차원 비전 영상을 획득하고, 데이터 특징 및 노이즈 패턴 분석을 통하여 토공 작업 환경의 특성을 파악한다.
- 3) 노이즈 제거 알고리즘 개발 : 토공 작업환경에 적합한 노이즈 제거 알고리즘의 프로세스를 설계하고 효과적인 데이터 구조 설계를 통해 지반 객체와 노이즈 객체를 판별하는 프로시저를 개발한다.
- 4) 개발 알고리즘의 적용과 장단점 분석 : 실제 토공현장에서 수집된 영상을 대상으로 본 연구에서 개발된 알고리즘을 적용하여 결과를 분석하고 본 알고리즘의 장단점 분석을 통해 후속 연구의 개선방향을 도출한다.

2. 스테레오 비전 기술의 원리 및 관련 연구개발 동향 분석

2.1 스테레오 비전 기술의 원리

스테레오 비전은 서로 다른 관측지점에서 획득한 두 장 이상의 영상을 이용하여 삼차원 공간상의 실제 위치 정보를 추출하는 기술로서, 이러한 정보들은 등고선이나 경사도와 같은 지형 정보 추출과 물체의 추적 및 제어 기술, 얼굴인식 등 다양한 분야에 적용되고 있으며, 인공지능 로봇의 거리 판단 및 3차원 물체의 추정에도 많은 연구가 진행되고 있다.(박성기, 2006)

스테레오 비전 시스템의 기본 원리는 그림 1과 같이 서로 다른 지점에서 촬영한 두 영상 내의 동일 물체로 실제 공간상의 물체와의 기하학적 삼각법을 고려하여 실제 물체의 위치를 산출하는 것이다. 여기서 두 관측점 사이의 거리를 b (baseline), 두 카메라의 렌즈 초점 거리를 f (focal length), 영상의 중심과 물체 사이의 거리를 각각 왼쪽영상은 d_L 과 오른쪽 영상은 d_R 이라고 하면, 물체와의 거리 z 는 다음 수식 1과 같이 표현할 수 있다.

$$z = \frac{b}{d}, \text{ where } d = d_L - d_R \quad (\text{식 1})$$

이미지 평면에 수평으로 스테레오 카메라가 구성되기 때문에 두 영상이 같은 평면에 위치한다고 할 때, d_L 과 d_R 의 차를 변위

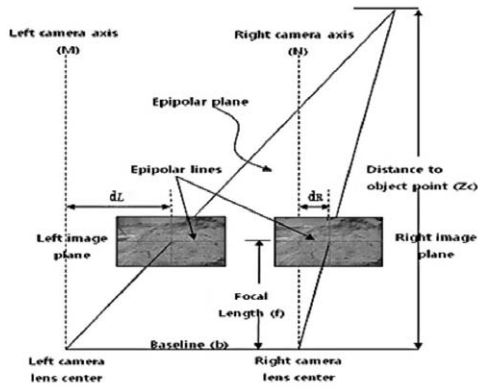


그림 1. 스테레오 비전의 기하학적 관계

(disparity)라고 하며, 영상 평면과 물체와의 법선 거리인 d 가 직접적인 관계가 있다. 이와 같이 baseline과 초점거리를 알고 있다는 가정 하에 두 영상의 동일점을 찾아내어 변위를 구하는 것이 스테레오 비전의 기본 구현원리가 된다.

스테레오 비전 시스템의 구현에 있어 가장 핵심적인 부분은 두 영상 내에서 동일 물체점에 해당하는 대응화소(corresponding pixel)를 찾아내는 것이며, 이를 위해 특징기반 기법(feature-based method)과 영역기반 기법(area-based method)이 주로 사용된다. 일반적으로 특징기반 기법은 대응점 문제를 해결하기 위하여 꼭지점이나 경계선 정보 등을 통하여 영상 내의 동일한 특정 점들을 찾아내는 방법으로서, 처리속도를 향상시킬 수 있으나 영상의 전체 영역에 대한 조밀한 변이 추정은 불가능한 단점이 있다.

이에 반해 영상 내에서 영역 상관도를 측정·비교하여 대응점을 계산하는 영역 기반 기법은 이미지의 전체 대응점을 대상으로 조밀한 삼차원 정보를 제공해 주기 때문에 널리 사용되고 있으며, 주요 기법으로는 SAD(sum of absolute difference), SSD(sum of squared difference), Cross Correlation 등이 있다.

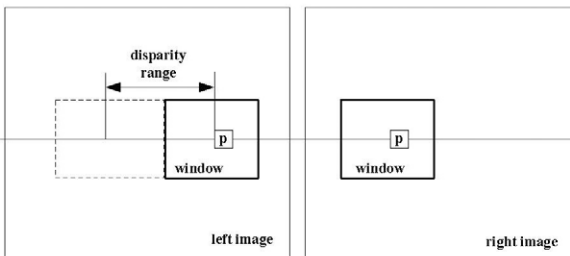


그림 2. 영역기반 정합 알고리즘을 이용한 이미지 정합 (이성현, 2004)

그림 2는 영역 기반 정합 알고리즘을 이용하여 이미지를 정합하는 과정을 나타내는 그림으로서, 왼쪽 영상의 기준 윈도우를 최대 변위(maximum disparity)만큼 픽셀 이동시키면서 오른쪽 영상의 윈도우와 비교하여 정합지점을 찾게 된다. 본 연구에

서 사용된 SAD 알고리즘은 각 윈도우에 대응하는 픽셀들의 차의 절대치를 더한 값이 최소가 되도록 하는 알고리즘을 말하며, 다음 수식 2와 같이 표현된다.

$$C(x, y, \sigma) = \sum_{y=0}^{wh-1} \sum_{x=0}^{ww-1} |I_R(x, y) - I_L(x + \sigma, y)| \quad (\text{식 2})$$

2.2 건설분야 지반형상 모델링 연구개발 동향

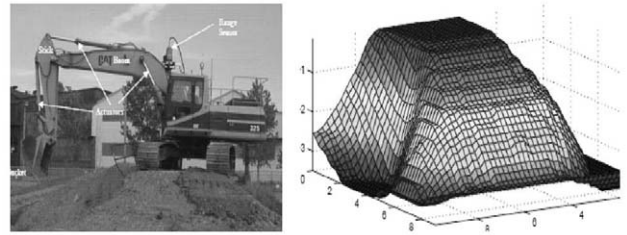


그림 3. Autonomous Excavator(Cannon, 1999)

1) Extended Earthmoving with an Autonomous Excavator(Cannon, 1999, 미국)

카네기 멜론(Carnegie Mellon) 대학의 Cannon (1999)은 그림 3과 같이 굴삭기에 3차원 레이저 스캐너와 각종 센서를 장착하여 주변 작업 지형을 3차원으로 모델링하고 상차 트럭을 인식하여 굴착한 토사를 자동으로 상차하는 시스템을 개발하였다. 이 연구에서는 2대의 광대역 3차원 레이저 스캐너를 사용하였으며, 주변 영역의 빠른 모델링을 위해 비교적 낮은 해상도로 모델링을 수행하여 신속하게 주변 영역을 인식할 수 있도록 하였다. 3차원으로 인식된 주변 지형은 작업 플래너(task planner)에 의해 영역 분할되어 작업 계획이 수립되고 굴삭기가 완전 자동화된 방식으로 토사를 트럭에 상차할 수 있도록 하였다.

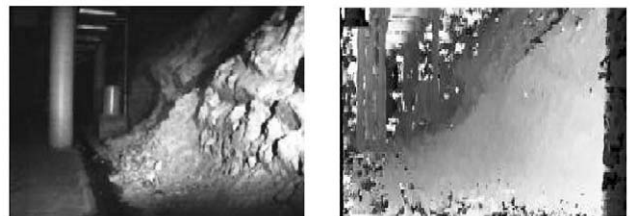


그림 4. Mining Robot의 스테레오 이미지 매칭

2) 3D Perception for Mining Robotics (Corke, 1999, 오스트레일리아)

Corke(1999)은 그림 4와 같이 스테레오 비전 장비가 장착된

광산 채굴 자동화 로봇을 개발하고, 광산 내부에서의 광석과 파일(pile)의 위치를 3차원으로 모델링하는 연구를 수행하였다. 이 연구는 일조 조건이 충분하지 못한 환경에서 광산 환경에서 인공조명에 의한 스테레오 비전 시스템의 3차원 모델링 기법과 가능성을 제시하였다.

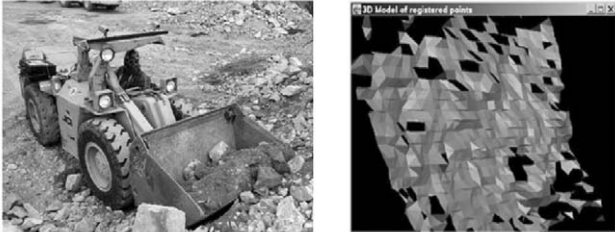


그림 5. LHD vehicle (Whitehorn et al, 2003)

3) Stereo Vision in LHD Automation (Whitehorn et al, 2003, 미국)

Whitehorn(2003)은 그림 5와 같이 지하 채굴 작업장을 대상으로 개발된 LHD(load-haul-dump) 장비에 스테레오 비전 장비와 조명을 장착하여 지하 채굴 작업장(underground mining)을 3차원으로 모델링하는 연구를 수행하였다. 스테레오 매칭에는 ZSSD(zero-mean sum of squared differences) 알고리즘이 사용되었으며, 스테레오 매칭 과정에서 발생하는 노이즈를 감소시키기 위해 전처리 과정으로 5×5 가우시안 필터(gaussian filter)와 5×5 마스크 미디언 필터(median filter)를 적용하였다.

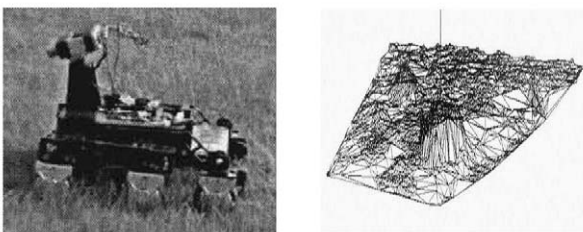


그림 6. 야외환경탐사용 주행로봇과 지형 맵

4) 스테레오 카메라를 이용한 주행로봇의 야외 환경 탐사(윤석중, 2005)

윤석중(2005)는 그림 6과 같이 험로 주행을 위해 개발된 Robhaz-6W 장비에 스테레오 비전 카메라를 장착하여 실시간으로 주변 지형을 3차원으로 모델링하고 주행로봇의 위치 추정 과정을 통해 자동으로 장애물 지도를 작성하는 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 실시간 모델링을 위해 비교적 속도가 빠른

SAD(sum of absolute difference) 알고리즘을 사용하였으며, 모델링의 정확성 보다는 주변 지형을 신속하게 모델링하여 최적의 탐사 경로를 산출하였다.

광대역 3차원 레이저 스캐너 및 스테레오 비전 카메라를 이용하여 지반의 형상을 3차원으로 모델링한 국내외 관련 문헌을 고찰한 결과, 1) Cannon(1999)의 연구에서는 로컬영역의 모델링을 위해 두 대의 광대역 3차원 레이저 스캐너를 사용하였으나, 장비 특징 상 스테레오 비전 카메라와 같이 빠른 속도로 지형의 변화를 3차원으로 모델링할 수 없기 때문에 굴삭 작업 도중에 지형 스캐닝을 위한 대기시간이 필연적으로 발생하는 문제점이 있으며, 2대의 3차원 레이저 스캐너의 가격이 굴삭기 가격을 상회하는 경제적 한계성이 있었다. 2) 윤석중(2005)의 연구에서와 같이 광량 조건이 수시로 변화하는 야외 환경뿐만 아니라 광산(Corke(1999))이나 지하 채굴장(Whitehorn(2003))과 같은 열악한 환경에서도 인공조명을 활용할 경우 스테레오 비전 카메라의 적용 가능성이 충분함을 알 수 있었다. 3) Whitehorn(2003)의 연구에서는 3차원 스테레오 매칭 단계에서 발생하는 노이즈를 감소시키기 위해 가우시안 필터나 미디언 필터와 같은 전처리 프로세스를 이용하였는데, 전반적인 영상 노이즈 레벨을 개선하는 효과는 분명히 있을 것으로 판단되나 스테레오 매칭 단계에서 발생하는 노이즈 처리에 관한 연구는 미흡한 한계가 있었다.

3. 토공 작업환경의 스테레오 비전 영상

3.1 토공 작업 환경의 3차원 비전영상 획득

토공 작업환경은 흙과 암석으로 구성된 지면뿐만 아니라, 풀, 나무뿌리, 지표수, 흙관, 맨홀 콘크리트 구조물 등 다양한 요소들로 구성되어 있다. 스테레오 비전을 이용하여 토공 작업환경을 3차원으로 모델링하기 위해서는 이러한 요소들이 모두 포함된 영상을 획득하는 과정이 반드시 필요하다. 본 연구에서 토공 작업환경의 스테레오 비전 영상을 획득하기 위한 조건은 다음과 같다.

- 1) 굴삭기 조종석 상부와 동일한 2.7미터 삼각대를 설치
- 2) 수평 방향으로부터 하향 30도 각도로 스테레오 비전 카메라 설치(Point Grey사의 BumbleBee XB-3 사용)
- 3) 실제 토공현장의 다양한 조건의 지형을 촬영 (흙더미, 사면, 평면, 구조물, 나무뿌리, 흙관 등)
- 4) 640×480 해상도, Triclops SDK와 SAD 알고리즘, 기본 parameter setting 사용

본 연구에서는 그림 7과 같은 조건으로 총 5회에 걸쳐 98장의 스테레오 비전 영상을 획득하였으며, 실제 토공 현장의 다양한 요소 뿐만 아니라, 일사조건, 토공 장비의 작업 영역, 날씨, 작업에서 발생하는 분진 등의 외부 요소의 변화가 최대한 반영될 수 있도록 하였다.



그림 7. 토공 작업환경 영상 획득과정

한편, 스테레오 영상은 모두 640×480 해상도의 컬러 이미지로 획득되었으며 우측 영상을 기준으로 스테레오 매칭(matching) 과정이 수행되도록 설정되었다. 본 연구에서 획득된 영상의 각 화소는 3차원 좌표(x, y, z)와 컬러(red, green, blue), 2차원 좌표(row, column)를 모두 포함하고 있으며, 다음 표 1과 같이 데이터 구조체(data structure)로 정의하였다. 스테레오 영상은 촬영된 좌, 우 영상에서 매칭에 성공한 화소만 표시한 영상으로서 데이터 구조체의 멤버인 유효화소 표시에 따라 매칭 성공 여부를 구분할 수 있도록 설계되었다.

표 1. 스테레오 비전 영상의 화소 데이터 구조체

typedef struct tagG3Dpoint{	
float x;	// x 좌표 (3차원)
float y;	// y 좌표 (3차원)
float z;	// z 좌표 (3차원)
int red;	// red 컬러 (8bit)
int green;	// green 컬러 (8bit)
int blue;	// blue 컬러 (8bit)
int row;	// row 좌표 (2차원)
int col;	// column 좌표 (2차원)
float distance;	// 원점과의 거리
bool validFlag;	// 유효화소 표시
}G3Dpoint;	

본 연구에서는 토공 현장 획득 데이터의 분석을 위하여 미국 Point Grey사의 Triclops SDK와 미국 Silicon Graphics사의 OpenGL(open graphic library), Microsoft사의 Visual C++ 6.0 컴파일러(compiler) 등을 이용하여 로컬영역 3차원 모델링 프로그램(local area 3D terrain modeling program)을 구현하였다. 그림 8은 이러한 과정을 통해 토공 현장 2차원 스테레오 영상을 3차원 매칭 영상으로 나타낸 것으로서, 2차원 스테레오

영상에서 관찰할 수 없는 노이즈들이 3차원 매칭 영상에서는 빈번하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

3.2 토공 현장 데이터 특징 및 노이즈 패턴 분석

토공 현장에서 수집된 2차원 스테레오 영상과 3차원 매칭 영상의 노이즈 패턴을 분석한 결과, 흙과 암석으로 구성된 일반 지

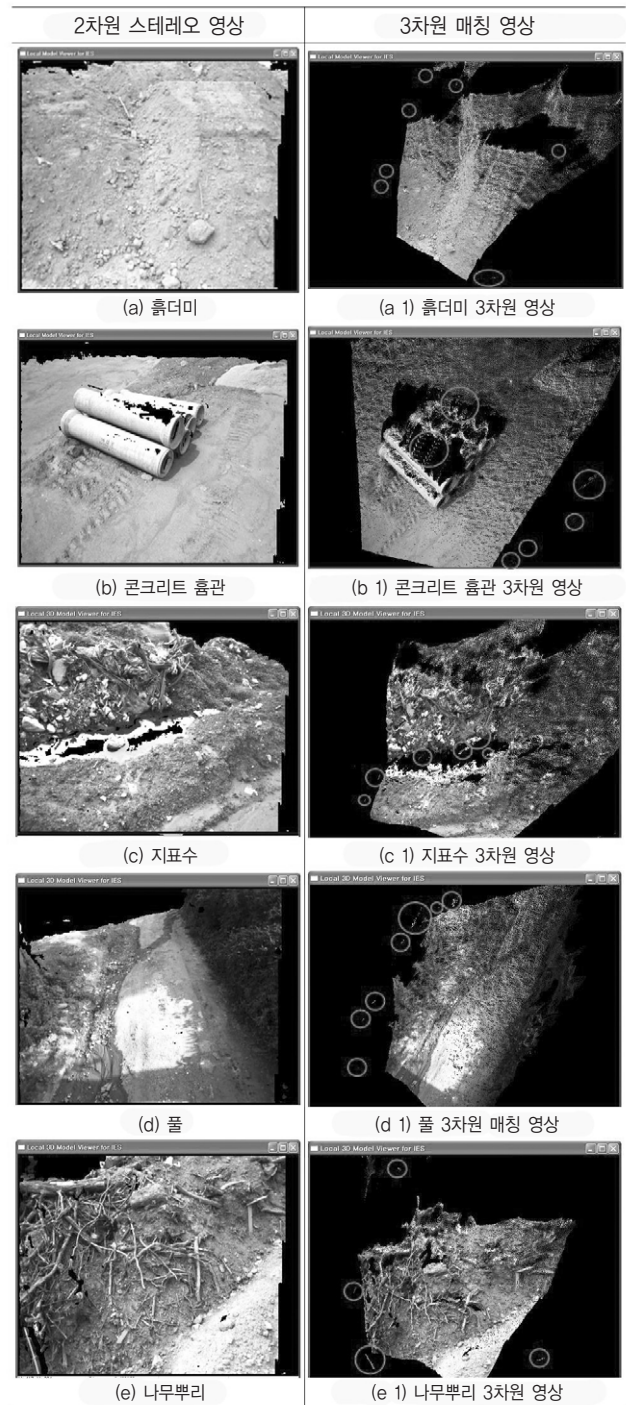


그림 8. 토공 현장 영상과 노이즈

반은 대부분 영상에서 그림 8의 (a-1)과 같이 전체적으로 노이즈 레벨이 상당히 낮고, 1~5화소 정도의 소규모 노이즈만 산발적으로 발생하는 형태인 것으로 분석되었다. 이는 실내 환경에서의 노이즈 레벨에 비하면 월등히 우수한 결과이며, 지반의 경우 흙이나 암석의 패턴이 매우 다양하여 영상 매칭의 결과가 실내에 비해 매우 양호한 것으로 분석되었다. 일반 지반에서 노이즈가 발생하는 영역은 주로 3차원 상에서 급격한 단차가 있는 부분, 즉 흙더미의 정점 부분과 같이 2차원 스테레오 영상에서 매칭의 편차가 크게 존재하는 부분에서 주로 발생하였다.

토공 현장에 야적된 콘크리트 흙관이나 지표수를 촬영한 경우 그림 8의 (b), (c)와 같이 표면 상당 영역에서 태양광 반사로 인하여 화이트홀(white hole)¹⁾이 발생하였고, 이로 인해 스테레오 매칭 과정에서 계단 형태의 많은 노이즈 영역이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 근본적으로 스테레오 비전 카메라의 다이내믹 레인지(dynamic range)가 낮기 때문에 발생하는 문제로서, 스테레오 비전 카메라의 노출(exposure) 값을 조정함으로써 해결이 가능한 문제이나, 스테레오 비전 카메라의 최대 셔터 스피드(shutter speed)로 이를 조절할 수 없는 경우에는 역시 노이즈로 처리해야 한다.

그림 8의 (d)와 (e)의 경우는 풀과 나무뿌리 등을 촬영한 영상으로서 1~40화소 크기의 중소 규모 노이즈가 주로 발생한다. 주로 풀잎이나 잔 나뭇가지 등의 스테레오 매칭 오류에서 발생한 것으로 판단되며, 일반 지반과 마찬가지로 급격한 단차가 있을 경우에 주로 발생하는 경향을 보인다.

결론적으로 토공 작업현장의 3차원 영상은 근본적으로 실내 환경에 비해 월등히 노이즈 레벨이 낮은 편이나, 콘크리트 구조물이나 지표수의 경우 태양광의 반사가 상당히 많은 노이즈를 발생시킴을 알 수 있다. 대부분 노이즈의 규모는 일반 지반의 경우 1~5화소 크기, 풀, 흙관 등의 나머지 요소가 포함될 경우 최대 40화소 크기의 노이즈가 발생되었다.

4. 알고리즘 개발 및 성능평가

4.1 알고리즘 및 데이터 구조의 구현

영상에서 노이즈를 제거하는 방법은 침식 기반 노이즈 제거 기법과 객체 인식 기반 노이즈 제거 기법으로 구분할 수 있다. 서로 인접한 점들의 모임을 각각의 객체라고 정의하면, 침식기

반 노이즈 제거 기법은 노이즈 객체가 삭제될 때까지 객체의 외곽 표면을 조금씩 침식(삭제)하는 방법이다.

이러한 방법은 영상에서 아주 작은 노이즈가 골고루 분포할 때는 효과적일 수 있고 속도도 매우 빠르지만 노이즈가 아닌 객체도 외곽 표면에 손상을 받기 때문에 노이즈 객체가 일정 크기 이상일 경우 사용할 수 없는 문제점이 있다. 이에 반해 객체 인식기반 노이즈 제거 기법은 영상에서 서로 인접한 점들을 각각의 객체로 클러스터링(clustering)하여 각 객체의 형태적인 특성-크기, 둘레, 무게중심, 원형도 등-에 따라 지능적으로 노이즈 객체를 판별하는 방법을 말한다. 객체 인식기반 노이즈 제거 기법은 노이즈 판별 기준에 따라 성능이 좌우되는데, 신경망과 같은 인공지능 알고리즘을 사용하여 판별 기준을 확립할 경우, 매우 높은 정확도로 노이즈를 제거할 수 있으며, 노이즈가 아닌 객체 표면에 전혀 손상을 입지 않는다는 장점이 있다.

영상에서 객체를 인식하는 방법으로 라벨링(labeling) 알고리즘이 가장 널리 사용되는데, 라벨링 알고리즘은 서로 연속하는 점들을 각각의 영역으로 묶어내기 위한 알고리즘으로, 인접하여 연결된 모든 화소에 동일한 라벨을 붙이는 반복 과정을 통해 평면 영상에서 객체를 추출하고 각 객체의 면적 특성을 함께 인식할 수 있다. 그러나 라벨링 알고리즘은 근본적으로 2차원 이진화(binary) 영상을 대상으로 개발된 알고리즘으로서 이를 3차원 영상에서 사용하기 위해서는 새로운 데이터 구조(data structure)의 구현과 상당부분 알고리즘의 수정이 필요하다. 3차원 영상의 객체 인식을 위한 첫 번째 단계는 각 화소의 인접 점들과 연속성 여부를 먼저 판단하는 것이다.

표 2. 화소 연속성 판단 데이터 구조체

```
typedef struct tagGDistIndexPoint{
    float Dist[3][3];           // 3x3 거리 인덱스
    bool ContFlag[3][3];      // 연속성 인덱스
    unsigned int Label;       // 객체 라벨
}GDistIndexPoint;
```

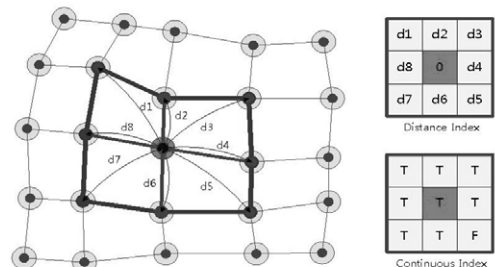


그림 9. 화소 연속성 판단을 위한 인덱스 구조

2차원 이진화 영상은 흑, 백으로 확연히 구분되어 있기 때문에 별도의 처리 과정 없이 객체의 추적이 가능하지만 3차원 영상은

1) 화이트홀은 색상정보(RGB)가 모두 255(흰색)인 영역을 말하며, 일반적으로 노출(exposure)이 오버되는 경우에 발생한다. 이 영역은 색상정보가 없기 때문에 후처리를 하더라도 보정이 불가능하다.

각 화소간의 거리 정보로 연속성 여부를 결정해야 하므로 스테레오 영상에 대한 별도의 연속성 인덱스가 반드시 필요하다. 예를 들어 그림 8의 (a) 영상의 노이즈 객체의 경우 2차원 영상으로는 모두 연속한 점으로 보이지만, 3차원 영상으로는 모두 불연속적인 점이다. 그림 9와 표 2는 연속성 인덱스를 저장하기 위한 데이터 구조체를 정의한 것이다.

3차원 매칭 영상에서 각 화소의 연속성을 판단하는 프로세스는 그림 9와 같이 중심화소를 중심으로 3×3 마스크(mask)의 각 점간 거리를 구하고, 이 점간 거리가 정해진 기준보다 작으면 연속되는 점으로 표시(true)하고 기준보다 크면 연속되지 않은 점으로 표시(false)하는 것이다. 이러한 과정을 영상 전체 영역에 대하여 순차적으로 계산하면 스테레오 비전 영상에 대한 연속성 인덱스가 완성된다. 연속성 인덱스 계산 과정에서 가장 핵심적인 내용은 각 점간의 연속성을 판단하기 위한 기준으로서 본 연구에서는 테스트 결과 640×480 영상에서 15cm를 적용하였으며, 이 기준은 영상의 크기에 따라 가변적으로 적용되어야 한다.

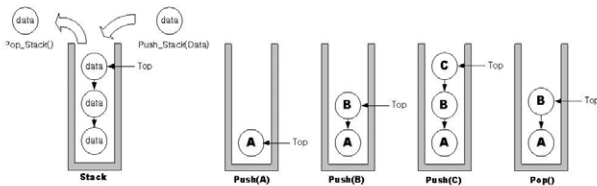


그림 10. 스택의 구조

한편, 그림 9의 3×3 인덱스는 8-근방화소를 가지는데, 영상의 전 영역에 대하여 계산을 할 때, 모든 근방 화소에 대하여 각각의 거리를 계산하면 중복이 발생하기 때문에 이 연구에서는 우, 하, 우하, 좌하 4방향의 거리만 계산한다. 연속성 인덱스가 완성되면 영상에서 인접한 화소를 하나의 객체로 클러스터링(clustering)하는 과정을 수행한다.

이 과정은 2차원 이진화 영상의 라벨링 프로세스(labeling process)와 유사한 방법을 사용하게 되는데 그림 10과 같은 스택(stack) 데이터 구조가 먼저 구현되어야 한다. 스택은 후입선출(LIFO, last-in, last-out) 구조를 가지는 데이터 구조로서, 접시 홀더와 같이 가장 마지막에 쌓은 데이터가 가장 먼저 나가는 데이터 구조를 말한다. 객체 클러스터링 알고리즘은 서로 인접하는 화소 영역을 추적하는 알고리즘이기 때문에 추적한 위치를 스택에 저장해 두어야만 하나의 영역을 완전하게 추적할 수 있다. 구현 측면에서 별도의 스택을 구현하지 않고 재귀함수(recursive function)를 사용할 수도 있으나 이 연구에서와 같이 큰 영역을 고속으로 클러스터링하기 위해서는 별도의 스택 제작

이 필수적이다.(강동중, 2001)

객체 클러스터링 알고리즘은 다음 그림 11과 같이 영상 내에 인접하는 점들의 모임을 하나의 번호 라벨로 채워나가는 과정으로서, 3×3 마스크를 이용하여 인접된 8-근방화소에 연결된 화소가 있는지 검사하여 마스크의 중심을 이동하면서 하나의 영역을 동일한 라벨로 마킹하는 프로세스를 거친다. 이와 같은 영역추적 과정에서 스택은 그림 11과 같이 추적 위치를 데이터 구조에 기록하여 하나의 객체 영역을 완전하게 추적할 수 있도록 한다.

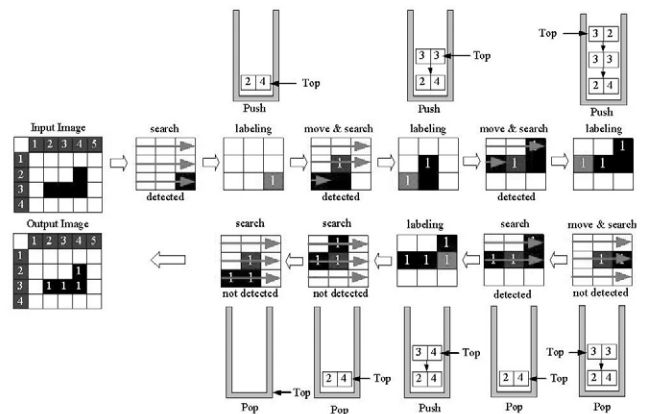


그림 11. 스택을 이용한 객체 클러스터링

객체 클러스터링 알고리즘의 세부적인 검사 과정은 그림 12와 같이 1) M×N개의 화소로 구성된 영상에 대하여 순차적으로 유효 화소가 발견될 때까지 검색을 수행하고, 2) 발견된 유효화소를 중심으로 하는 3×3 마스크의 8-근방화소 중 연결성이 유효하고 라벨이 없는 화소가 발견되면 그 점에 라벨을 부착한 다음, 3) 해당 점의 (x, y) 좌표를 스택에 저장한 후 마스크 중심을 해당 점으로 이동하고, 4) 해당 점을 중심화소로 다시 8-근방화소를 검색하여, 라벨링되지 않은 연결 화소가 발견되지 않으면 스택의 데이터를 출력한 후 다시 검색을 계속하고, 5) 2)~4)과정을 반복하여 스택에 더 이상 검사할 데이터가 남아있지 않으면 라벨 번호를 증가하여 영상 내에 모든 화소를 검사할 때까지 1)의 과정을 반복하는 것이다.

토공 작업현장에서 수집된 영상을 대상으로 제안된 알고리즘을 테스트한 결과 일반적으로 300~800여개의 객체가 인식되었으며, 대부분의 객체는 1~3개 화소 면적을 가진 객체이고 지반면과 같은 큰 객체는 약 70,000~92,000 여 화소 면적으로 구성되어 있다. 객체 클러스터링 과정에서 객체의 인식 숫자는 연속성 인덱스 계산에서 적용되는 연속성 판단 거리에 따라 민감하게 변화할 수 있는데, 이 연구의 적용기준인 15cm와 같이 일괄적 기준이 아니라 원점과의 거리에 따라 유동적으로 적용될 수 있다면 객체의 숫자는 보다 감소할 수 있는 여지가 있다.

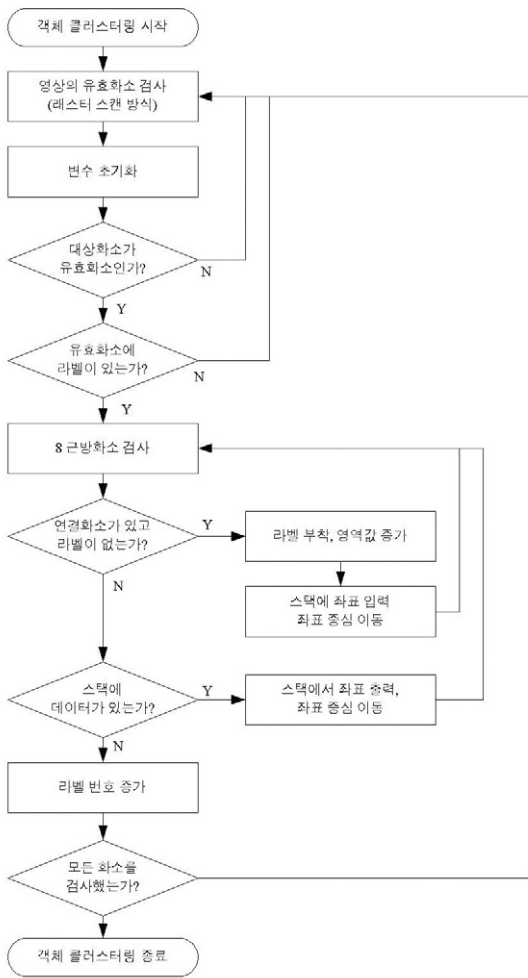


그림 12. 객체 클러스터링 프로세스

그림 13은 객체 클러스터링 과정에서 발생한 각 라벨 번호에 대하여 영역의 크기(포인트의 개수)를 그래프로 나타낸 것이며, 앞서 3장에서 분석된 바와 같이 토공 현장에서 발생하는 노이즈의 대부분이 1~40화소 크기임을 감안하여 40화소 이하의 크기를 가지는 객체는 노이즈로 판단하여 제거하였다.

4.2 개발 알고리즘의 적용결과 및 장단점 분석

본 연구에서는 앞서 실제 토공 작업현장에서 총 5회에 걸쳐 수집된 영상 98장을 대상으로 노이즈 제거 알고리즘에 적용하여 3차원 영상의 성능을 테스트하였다. 노이즈 제거 부분을 표시하기 위하여 3차원 지반 모델링 프로그램의 우측에 촬영된 스테레오 영상과 256단계 그레이 스케일의 깊이 영상(depth image)을 함께 표시하였고, 노이즈 제거가 발생한 부분을 적색으로 나타낼 수 있도록 하였다. 다음 그림 14는 노이즈 제거 결과를 나타낸 것이다.

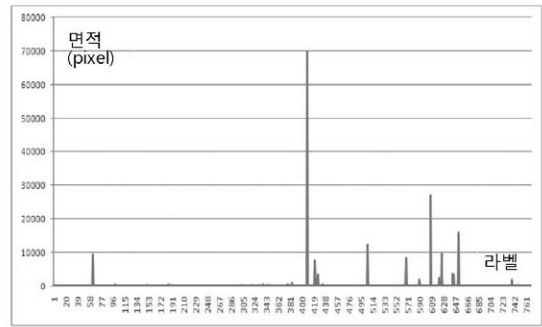


그림 13. 3차원 매칭영상의 객체인식과 면적특성

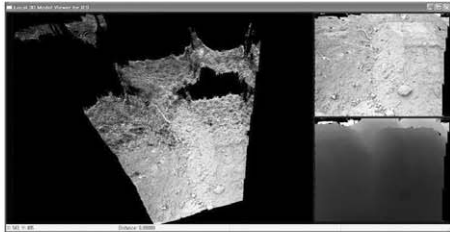
일반 지반을 대상으로 본 알고리즘을 적용한 결과, 그림 14의 (a)와 같이 노이즈는 대부분 완전하게 제거되었으나 일부 영상에서 전방 12미터 영역의 지반면이 부분적으로 손실되는 현상도 확인되었다. 이는 앞서 밝힌 바와 같이 노이즈 제거 알고리즘의 연속성 인덱스를 계산하는 과정에서 일괄적으로 15cm의 연속성 판단 거리를 적용하였으나, 전방 12미터 영역에서는 화소간격이 평균 8cm이상 되기 때문에 지면의 굴곡이 큰 경우 연속된 하나의 객체로 모델링되지 않고 별개의 영역으로 분할되었기 때문인 것으로 분석되었다. 이 현상은 향후 연구에서 원점과 지면의 거리에 따라 연속성 판단 거리를 유동적으로 적용할 수 있는 알고리즘이 개발되면 상당부분 보완될 수 있을 것으로 판단된다.

토공현장에 야적된 콘크리트 구조물과 지표수가 반사된 영상의 경우 매칭 정보의 부정확으로 인해 발생한 계단 형태의 노이즈는 대부분 제거되었으나 일반 지반의 경우와 마찬가지로 전방 12미터 영역에서 지면의 일부 손실도 발생하였다. 풀과 나무뿌리가 포함된 영상에서는 가장 효과적으로 노이즈가 제거된 것으로 분석되었으며, 종류에 관계없이 단차가 있는 영역의 노이즈도 효과적으로 제거되었다. 결론적으로 본 연구에서 사전에 의도된 바대로 대부분의 노이즈를 효과적으로 제거할 수 있었으나, 전반적으로 전방 12미터 부근의 지반면이 일부 손실되는 현상이 발생하였다. 현재로서는 객체의 면적 특성에 따라 노이즈를 판별·제거하고 있으나, 향후 연구에서 보다 다양한 객체 특성치를 추출하여 적용하고, 지능적으로 3차원 공간상의 화소간 연속성을 판단할 수 있는 알고리즘이 보완될 경우 본 노이즈 제거 알고리즘의 성능은 획기적으로 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

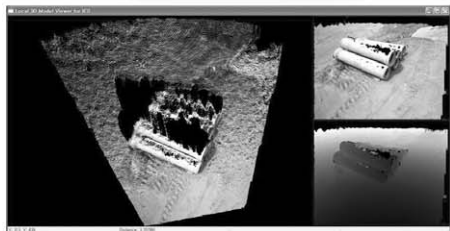
5. 결론

본 연구에서는 토공 작업환경에서 시공상황에 따라 지속적으로 변화하는 지반을 3차원으로 모델링하기 위하여 스테레오 비전 카메라를 이용하여 토공 작업환경을 대상으로 3차원 모델링

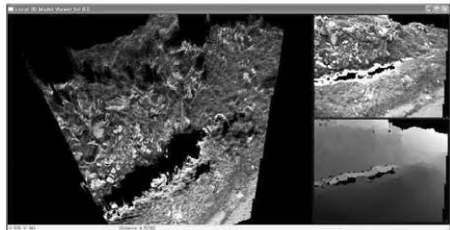
테스트를 수행하였고, 각 환경요소에 따라 발생하는 노이즈의 특성을 분석하여 객체 클러스터링 기반 노이즈 제거 알고리즘을 개발하였다. 이 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.



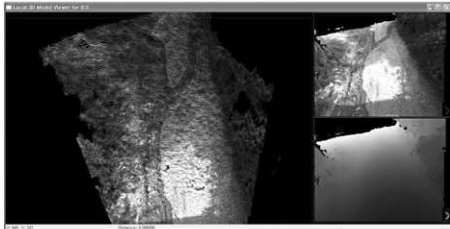
(a) 지반 영상의 노이즈 제거



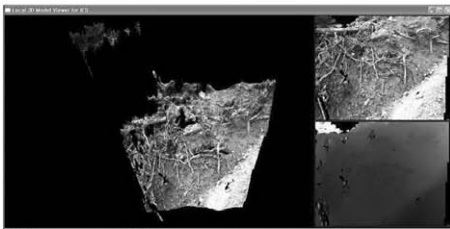
(b) 콘크리트 구조물의 노이즈 제거



(c) 지표수 영상의 노이즈 제거



(d) 풀 포함 영상의 노이즈 제거



(e) 나무뿌리 영상의 노이즈 제거

그림 14. 노이즈 제거 결과

- 1) 스테레오 비전 기술의 원리와 현재 선진외국에서 개발된 건설 분야 최신 스테레오 비전 응용기술을 조사하였다.
- 2) 토공 작업환경을 구성하는 다양한 환경요소가 포함된 스테레오 비전 영상을 획득하기 위하여, 영상 획득 환경 조건을

제시하였고, 총 5회에 걸쳐 98장의 스테레오 비전 영상을 획득하였다.

- 3) 토공 작업현장에서 획득된 영상을 분석한 결과 일반 지반 영상에서는 1~5화소, 풀, 나무뿌리 등이 포함된 영상에서는 1~40화소 크기의 노이즈가 발생하였으며, 지표수나 콘크리트 홈관이 포함된 영상에서는 태양광 반사로 인한 화이트홀의 영향으로 계단 형태의 노이즈가 발생하였다.
- 4) 효과적인 노이즈 제거를 위하여 객체 클러스터링 기반 노이즈 제거 알고리즘을 설계하였으며, 3차원 영상에 적용하기 위하여 연속성 인덱스 및 스택 데이터 구조를 이용한 3차원 영상 객체 클러스터링 알고리즘을 제안하였다.
- 5) 토공 작업환경에서 수집된 영상에 노이즈 제거 알고리즘을 적용하여 테스트한 결과 일반 지반영상의 소규모 노이즈, 풀과 나무뿌리가 포함된 영상의 중소 규모 노이즈, 지표수나 콘크리트 홈관이 포함된 영상의 계단형 노이즈 대부분이 효과적으로 제거되었다. 그러나 일부 영상에서 전방 12미터 영역에서 지반면 손실이 부분적으로 발생하였다. 이는 향후 연속성 판단 거리의 지능적인 적용을 통해 충분히 개선될 수 있을 것으로 판단되며, 객체 특성에 관한 연구가 추가될 경우 훨씬 더 정확한 알고리즘이 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(과제 번호 : 06첨단융합-C01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 강동중, 하종은(2001), "Visual C++을 이용한 디지털 영상처리", 사이텍미디어, p253~254, 2001. 7
2. 박성기 외 19인(2006), "로봇주행을 위한 강인 스테레오 비전 센서 및 인식기술 개발에 관한 연구(1차년도)", 산업자원부 연구보고서, 2006. 12
3. 유현석, 이정호, 김영석, 김정렬(2004), "도로면 크랙실링 자동화를 위한 머신비전 알고리즘의 개발", 한국건설관리학회 논문집, 제5권 제2호, 2004. 4, pp. 90~105.
4. 윤석중(2005), "스테레오 카메라를 이용한 주행로봇의 야외환경 탐사", 한국과학기술원 박사학위 청구논문, 2005. 5
5. 이광도, 안상철, 권용무, 고한석, 김형곤(1999), "Tri-

- ocular 영상을 이용한 3D 얼굴 모델 자동 생성”, 전자공학 회 논문지, 제36권 S편, 제7호, pp. 844~855, 1999. 7
6. 이성환(2004), “FPGA 기반의 실시간 스테레오 비전 시스템 설계”, 중앙대학교 석사학위 청구논문, 2004. 12, pp. 3~9, 2004. 12
 7. Cannon, H(1999), "Extended Earthmoving with an Automomous Excavator", Masters Thesis, Carnegie Mellon Robotics Institute, CMU-RI-TR-99-10, 1999
 8. Corke, P., Robert, J., and Winstanly G.(1999), "3D Perception for Mining Robotics", In Proceedings Field and Service Robotics, pp. 41-47, Springer-Verlag, 1999
 9. Whitehorn Mark, Tyron Vincent, Christian H. Debrunner and John Steele(2003), "Stereo-Vision in LHD Automation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.39, No. 1, January/february 2003

논문제출일: 2008.10.24

심사완료일: 2008.12.09

Abstract

For developing an Automation equipment in construction, it is a key issue to develop 3D modeling technology which can be used for automatically recognizing environmental objects. Recently, for the development of "Intelligent Excavating System(IES), a research developing the real-time 3D terrain modeling technology has been implemented from 2006 in Korea and a stereo vision system is selected as the optimum technology. However, as a result of performance tests implemented in various earth moving environment, the 3D images obtained by stereo vision included considerable noise. Therefore, in this study, for getting rid of the noise which is necessarily generated in stereo image matching, the noise elimination algorithm of stereo-vision images for 3D terrain modeling was developed. The consequence of this study is expected to be applicable in developing an automation equipments which are used in field environment.

Keywords : Stereo-Vision, Noise Elimination, Terrain Modeling, Intelligent Excavating System