

효율적인 터널 내공 단면 추출을 위한 지상 레이저 스캔 자료 처리기법 개발

한수희¹, 조성하², 김상민³, 허 준^{4*}, 손흥규⁵, 유광호⁶

Developing a method of processing terrestrial laser scan data for efficient extraction of tunnel cross sections

Soo-Hee Han, Seong-Ha Cho, Sang-Min Kim, Joon Heo, Hong-Gyoo Sohn, Kwang-Ho You

Abstract The present study is about an efficient extraction of tunnel cross sections from huge point cloud achieved by a terrestrial laser scanner. A method, using a hash-based data structure, is introduced, by which point clouds, potentially composing cross sections, are extracted along a tunnel center line. The center line is estimated by linking points which are drawn in the middle of pseudo cross sections based on the hash-based data structure. Point clouds of a same thickness are extracted at a same interval along the center line. In result, it took less than 3 seconds and 124 MB of memory to extract, out of the 7.5 million points, the point clouds of 1 m interval and 0.1 m thickness. A manual operation, however, was needed to fix the outliers on the center line and to select both start and end points on it.

Keywords: Terrestrial laser scanner, tunnel, slice, hash, point cloud

요 지 본 논문에서는 방대한 크기의 지상 레이저 스캔 자료로부터 터널의 내공 단면을 효율적으로 추출하기 위하여, 해시(hash) 기반 구조체를 이용한 터널 중심선 자동 추정 및 터널 내공 단면 구성 포인트 클라우드 추출 방식을 제안하였다. 즉, 해시 기반 구조체에 입력한 레이저 스캔 자료로부터 일정한 방향의 단면들을 추출한 후 각 단면의 중심점을 연결하여 터널의 중심선을 추정하였으며, 추정된 중심선을 따라 일정 간격 및 두께로 터널 내공 단면 구성 포인트 클라우드를 추출하였다. 결과적으로 약 750만개의 포인트로 구성된 레이저 스캔 자료로부터 1 m 간격으로 0.1 m 두께의 단면 구성 포인트 클라우드를 추출하는데 3초미만의 시간이 소요되었으며 메모리는 124 MB가 소요되었다. 그러나 터널 중심선 추정 후 오류 포인트 제거, 시점 및 종점 추가 작업을 수동으로 수행해야 하는 한계도 드러내었다.

주요어: 지상레이저스캐너, 터널, 단면, 해시, 포인트 클라우드

1. 서 론

미굴 및 여굴은 정도의 차이는 있으나 터널 굴착 작업 시 필연적으로 발생하는 현상으로서 시공 전반에 적지 않은 영향을 미친다. 특히 여굴은 터널의 보강과 연결되어 경제성 및 안정성 측면에서 매우 중요한 부분을 차지하므로 발생을 최소화하기 위한 정밀한 상태 파악 및 원인 분석이 필요하다(이영남 등 2001, 정동호 등 2007a, 정동호 등 2007b, 안봉도 등 2009). 내공 단면 추출은

현 시공단계의 형상과 당초 설계의 차이를 분석함으로써 미굴 및 여굴을 정밀하게 파악하기 위한 기초자료로 사용된다. 터널의 내공 단면을 추출하기 위해서는 수치 사진측량과 토탈스테이션을 이용하는 방법이 있다. 수치사진측량의 경우 터널 내의 광량 확보의 어려움과 분석과정의 복잡성이라는 문제점이 있으며, 토탈스테이션의 경우 정확한 단면을 산출하기 위한 다량의 특징점을 취득하는데 많은 시간이 소요된다(김인섭 등 2007, 노태호 등 2008).

최근 측량분야에서는 보다 정확하고 신속하게 지형지물의 공간정보를 취득 할 수 있는 3차원 지상 레이저 스캐너가 각광 받고 있다. 지상 레이저 스캐너는 거리 측정 방식에 따라 크게 triangulation 방식과 time-of-flight 방식으로 나뉘며(Boehler et al. 2002) 초당 수 만개 이

¹비회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사후연구원

²정회원, (주)다산이엔지 기술연구소 전무이사

³비회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정

⁴정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수

⁵비회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 정교수

⁶정회원, 수원대학교 토목공학과 부교수

* 교신저자: 허 준 (E-mail: jheo@yonsei.ac.kr)

상의 포인트에 대하여 정밀한 3차원 좌표를 취득할 수 있다. 터널 계측의 중요성이 강조되는 가운데(방준호 등 2007, 박시현 2008, 김범주 등 2008) 터널 계측 분야에서도 레이저 스캐너의 활용성이 증가하고 있다. 이재원과 윤부열(2007)은 3차원 레이저 스캐닝을 이용하여 기존 구조물의 변형량 계측방법의 신뢰성 문제를 해결하고 구조물의 형태 변화를 3차원화 하여 시각적으로 판단할 수 있는 자료를 제시하였다. Siefko Slob과 Robert Hack(2004)은 지상 레이저 스캔 자료를 이용하여 체적, 지형도 작성, 사면과 터널 등 다방면으로의 적용을 연구하였으며 phase-based 스캔 방식을 이용하여 터널의 슷크리트 변위를 모니터링하였다. Roderik Lindenbergh et al.(2009)은 지상 레이저 스캔 모니터링을 통하여 공칭 정확도 이상의 정확도 취득 및 변위 측정을 실험하였고, Rinske van Gosliga et al.(2006)은 터널 변위 측정을 공정별로 수행하였다. 윤정숙 등(2007)은 레이저 스캐닝 데이터를 이용한 터널 시설물 및 손상부위 검출 알고리즘을 제안하였고, 사공명 등(2006)은 터널 검출 자동화 시스템 개발의 일환으로 3D 레이저스캐너의 시작품 개발 및 적용성을 검증하였다.

터널 내공 단면 추출과 관련하여, 김인섭과 임수봉(2007)은 토탈스테이션을 이용한 방식과 레이저 스캔 자료를 이용한 방식의 효율성을 비교 평가하였다. 김종석 등(2008)은 터널 내공 단면 측량 시 측정간격에 따른 터널의 체적 및 터널 전체에 대한 체적을 비교하여 가장 합리적인 측정간격을 결정하는 연구를 수행하였으며, 노태호 등(2008)은 터널 단면을 추출하여 터널의 미굴량 및 여굴량을 산정할 수 있는 터널 단면 관리 시스템을 제안하였다.

그러나 기존의 지상 레이저 스캔 자료를 이용한 터널 내공 단면 추출 방법은 대체로 터널 설계 도면이 존재하여 터널 선형 추출이 가능하거나(김인섭, 임수봉 2007, 노태호 등 2008), 사용자가 직접 터널 선형을 입력함(김종석 등 2008)을 전제로 하고 있다. 아울러, 수백만에서 수억 개에 이르는 포인트로 구성된 레이저 스캔 자료의 처리 가능성과 효율성에 대해서도 실질적으로 고려되지 않고 있는 실정이다.

본 연구는 레이저 스캔 자료를 이용한 터널 내공 단면의 자동 추출을 궁극적인 목표로 한다. 본 논문에서는 터널 내공 단면의 자동 추출을 위한 전체적인 연구의

흐름을 제시하며, 특별히 효율적인 터널 중심선 추정 및 터널 내공 단면 구성 포인트 클라우드 추출에 초점을 두었다. 이를 위하여 해시(hash) 기반 구조체를 활용한 터널 중심선 추정 방식을 제시하고, 추정된 중심선을 따라 터널 내공 단면 구성 포인트 클라우드를 추출하기 위한 방안을 제시하였다. 결과적으로 해시 기반의 구조체를 사용함으로써 방대한 크기의 레이저 스캔 자료로부터 터널 중심선 추정 및 터널 내공 단면 구성 포인트 클라우드 추출을 효율적으로 수행할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 연구의 흐름 및 범위

본 연구의 흐름은 그림 1과 같다. 먼저, 터널을 대상으로 취득된 레이저 스캔 자료로부터 해시 기반 구조체를 형성하여 터널 중심선을 추정하고 정밀한 중심선을 취득하기 위하여 노이즈 제거 및 curve fitting 등에 기반한 선형 보정을 수행한다. 보정된 중심선 상에서 동일한 간격의 포인트를 추출하여 각 단면의 중심점으로 사용하며, 중심선에 수직인 평면으로부터 일정 거리에 존재하는 포인트들을 추출하여 단면 포인트 클라우드를 구성한다. 마지막으로, 추출된 단면 구성 포인트 클라우드들로부터 최종 단면 형상을 모델링한다. 권기욱과 이종달(2009)은 원통과 같은 단순한 단면 형상에는 수학적 접근 방식을 적용하였고 복심 곡선형 및 비원통형과 같은 복잡한 형상에 대해서는 선추적 방법, 유전자 알고리즘,

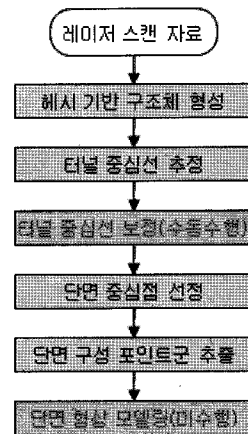


그림 1. 연구의 흐름

패턴 추적 방법을 적용하였다. 그러나 본 논문에서는 주로 터널 내공 단면 추출과 관련된 처리 효율성에 초점을 두어, 헤시 기반 구조체를 활용한 터널 중심선 추정 및 단면 구성 포인트 클라우드 추출에 대해서만 언급하였다. 자동화된 중심선 보정 및 단면 모델링에 대해서는 차후 연구에서 수행하고자 한다.

2.2 헤시 기반 구조체

일반적으로 지상 레이저 스캔 자료는 불규칙한 분포의 3차원 좌표를 가진 포인트들의 집합인 포인트 클라우드로 구성되어 있다. 따라서 포인트 클라우드를 처리하는 과정에서 특정 좌표 또는 그에 인접한 포인트를 검색하기 위해서는 자료의 처음부터 끝까지 검색하는 brute-force 검색을 수행해야 한다. 그러나 brute-force 방식의 경우 시간 복잡도(time complexity)가 $O(n^2)$ 이므로 수백만에서 수억에 이르는 포인트로 구성된 레이저 스캔 자료를 효율적으로 처리하기 어렵다. 본 연구에서는 검색 효율성이 크게 향상된 헤시 기반의 구조체를 사용하였다.

헤시 기반 구조체는 그림 2와 같이 레이저 스캔 자료가 차지하는 x-y 평면 전 영역을 포함할 수 있는 2차원 헤시 배열들로 구성된다. 하나의 헤시는 x, y 방향으로 각각 n_{CS} 크기의 격자 영역에 포함된 포인트들을 저장하며 각 포인트의 z값이 key 값으로 사용된다. 즉, 임의의 포인트 $p(x,y,z)$ 와 이 포인트가 저장될 헤시 $H_{u,v}(k)$ 의 관계는 식 1에 의하여 규정된다. 여기서, u,v는 2차원 배열의 좌표, k는 헤시의 key값, $(x_{min}, y_{min}, z_{min})$ 는

레이저 스캔 자료를 포함하는 최소 경계 사각형(minimum bounding rectangle)의 최소좌표이다.

$$\begin{aligned} u &= \text{INT}[(x - x_{min})/n_{CS}] \\ v &= \text{INT}[(y - y_{min})/n_{CS}] \\ k &= \text{INT}[(z - z_{min})/n_{CS}] \end{aligned} \quad (1)$$

2.3 터널 중심선 추정

터널 중심선을 추정하기 위하여 헤시 기반 구조체를 이용한 순차적인 검색 방식을 사용하였다. 즉, 그림 3과 같이 레이저 스캔 자료를 헤시 기반 구조체에 입력한 후 x축 또는 y축 방향으로 진행하면서 n_{CS} 두께의 단면 구성 포인트 클라우드들을 추출한다. 각 단면 구성 포인트 클라우드들 중 진행방향과 수직방향으로 서로의 거리가 가장 먼 두 포인트를 선정하고 그 중심점을 계산한

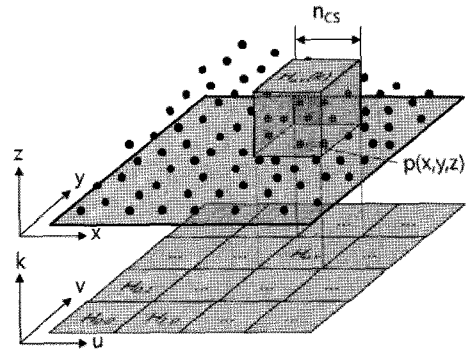


그림 2. 헤시 기반 구조체

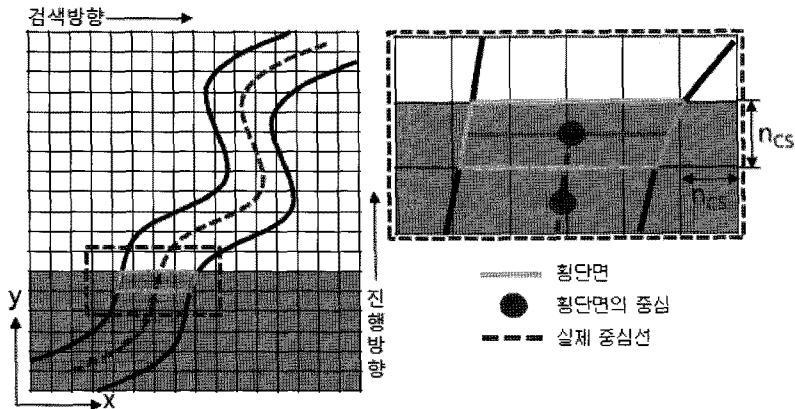


그림 3. 터널 중심선 추정

다. 이와 같이 계산된 중심점들을 순차적으로 연결한 선을 터널의 중심선으로 사용한다. 헤시 기반 구조체의 격자 크기(n_{CS})를 줄임으로서 중심선 정확도를 향상시킬 수 있다.

그러나 터널의 시점이나 종점 부근에서 일부분의 단면 구성 포인트들이 누락된 부분, 터널의 폭이 급격하게 변하거나 분기되는 부분에서는 제안된 방식으로는 잘못된 중심선이 추출될 가능성이 높다(그림 4).

따라서 보다 정확한 중심선 추정을 위해서는 인위적인 편집을 가하거나, 오류 인식 후 해당 구간 재 추정 또는 curve fitting 등을 이용한 자동화된 중심선형 보정이 필요하다. 본 연구에서는 중심선 후보 포인트 중 오류 포인트를 수동으로 인식 및 제거하고 시점과 종점 역시 수동으로 추가하였다. 자동화된 중심선 보정에 대해서는 차후 연구에서 수행하고자 한다.

2.4 단면 구성 포인트 클라우드 추출

터널 중심선 보정은 중심선 선형에서 크게 벗어나는 중심점을 수동으로 인식하여 제거하는 방식을 사용하였으며, 터널의 시점과 종점을 중심선에 추가하였다. 이후, 추정된 터널 중심선을 따라 동일한 간격으로 단면 중심점을 선정하였으며, 각 중심점을 포함하며 중심선에 수직인 평면으로부터 일정 거리에 존재하는 단면 구성 포인트 클라우드를 추출하였다. 아울러, 단면 구성 포인트 클라우드 검색 시간을 줄이기 위하여, 헤시 기반 구조체를 이용하여 단면 구성 포인트 클라우드 검색 범

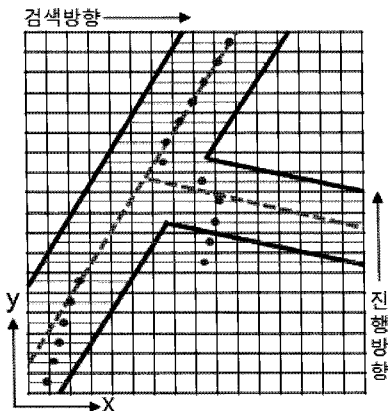


그림 4. 중심선 추출 오류

위를 제한하였다. 즉, 그림 5와 같이 임의의 단면 중심점에 대하여 두께 d 인 단면 구성 포인트 클라우드를 추출할 경우, 중심선에 대한 수평면으로부터 양쪽으로 거리가 $d/2$ 인 영역이 포함되는 헤시 기반 구조체의 격자에 대해서만 단면 구성 포인트 클라우드를 검색하였다.

3. 적 용

대상 터널은 시험용으로 제작된 터널로서 터널 폭 및 중심선형이 비교적 일정하지 않다. 굴착은 동북쪽에서 시작하여 남서 방향으로 진행되었으며 후반부에서 다시 남동 방향으로 진행된 형태이다(그림 6). 실험은 시점으

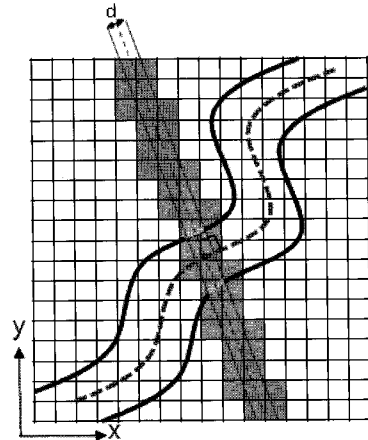


그림 5. 단면 구성 포인트 클라우드 추출

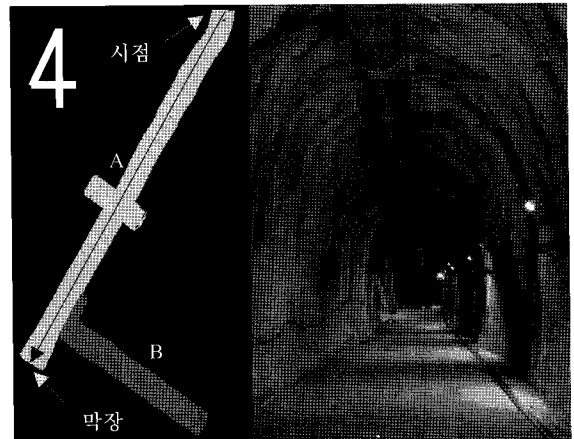


그림 6. 터널의 형태

로부터 남서방향의 막장에 이르는 A 구간에 대하여 지상 레이저스캐너로부터 취득한 약 750만개의 포인트에 대하여 수행하였다.

대상 터널 및 사용된 레이저스캐너의 제원은 각각 표 1, 표 2와 같으며 사용된 컴퓨터의 사양 및 각종 파라미터는 표 3과 같다. 대상 터널은 시험용으로 제작된 터널로서 슛크리트로 마감된 상태이며 일반적인 완공터널에 비해 표면 굴곡이 비교적 많은 상태이다.

먼저 모든 포인트를 메모리에 저장한 상태에서, 헤시 기반 구조체를 구성하는데 소요된 시간과 메모리는 각

각 2.07초와 124 MB이었으며, 터널 중심선 후보로 389개의 포인트를 추출하는데 소요된 시간은 0.42초이었다. 터널의 시점과 종점, 중간 분기점 부근에서 중심점 추정 오류가 발생하여 82개의 포인트를 수동으로 제거하였으며 시점과 종점을 추가하였다(그림 7). 최종적으로, 수정된 중심선을 따라 총 790,664개의 포인트로 구성된 90개의 단면(그림 8)을 추출하는데 소요된 시간은 0.75초였다. 터널 시점에서의 중심점 포인트 및 단면 구성 포

표 1. 터널의 제원

항목		내용
위치		경기도 용인시 기흥구 마북동 102-4 (주)현대건설 기술개발원
내부상태		슛크리트
터널 표고	상부	137.9 m
	하부	147.6 m
수평 길이	구간 A	약 89 m
	구간 B	약 40 m
폭, 높이	폭	약 5 m
	높이	약 6 m

표 2. 레이저스캐너의 제원

항목	내용
장비명	Leica Scanstation 2
측정원리	Time of flight (TOF)
스캔속도	50,000 points/sec
Range	최대 300 m
Accuracy	4 mm

표 3. 컴퓨터 사양 및 파라미터

항목	내용
CPU	Intel Core2duo E8200
RAM	4 GB
OS	Windows 7 64bit
코딩언어	Visual C++ 2008
격자크기(mCS)	0.20 m
단면 간 간격	1 m
단면 두께(d)	0.1 m
포인트 수	7,529,226개

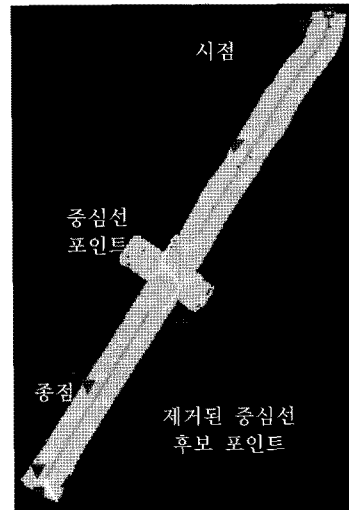


그림 7. 중심선 포인트 분포



그림 8. 단면 구성 포인트 클라우드

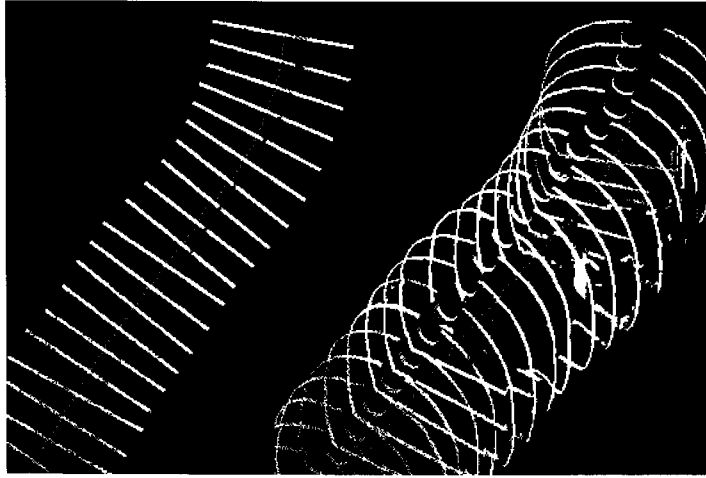


그림 9. 중심점 포인트 및 단면 구성 포인트 클라우드의 분포 형태(좌: 평면시, 우: 입체시)

인트 클라우드의 형태는 그림 9와 같다.

성능 비교를 위하여, 레이저 스캐너 제작사인 Leica에서 제공하는 Cyclone(Leica Geosystems, 2010) 소프트웨어를 사용하여 유사한 실험을 수행하였다. 해당 소프트웨어에서는 터널의 중심선을 자동으로 추출하는 기능이 부재하여 수동으로 중심선을 입력하였다. 본 연구에 적용한 조건과 동일하게 1 m 간격으로 0.1 m 두께의 단면 구성 포인트 클라우드를 추출하였으며 소요된 시간은 수 분이 초과되었다. 따라서 본 연구에서 제안한 방식이 보다 시간 효율적임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 터널을 대상으로 취득된 레이저 스캔 자료로부터 터널의 내공 단면을 자동으로 추출하기 위하여, 헤시 기반 구조체를 이용한 터널 중심선 추정 및 터널 내공 단면 구성 포인트 클라우드 추출 방식을 제안하였다. 약 750만개의 포인트로 구성된 터널 레이저 스캔 자료로부터 1 m 간격으로 0.1 m 두께의 단면 구성 포인트 클라우드를 추출하는데 3초미만의 시간이 소요되었으며 메모리는 124 MB가 소요되었다. 터널 중심선 추정시 오류 포인트 제거, 시점 및 종점 추가 작업을 수동으로 수행해야 하는 한계도 확인하였다.

서론에서 언급된 바와 같이, 내공 단면 추출은 현 시공 단계의 형상과 당초 설계의 차이를 분석함으로써 미굴

및 여굴을 정밀하게 파악하기 위한 기초자료로 사용된다. 아울러 완공된 터널의 준공검사, 과거에 시공되어 도면이 존재하지 않는 터널의 도면 작성 등에 활용될 수 있다. 3차원 레이저 스캐너를 활용함으로써 기존의 토탈 스테이션을 이용한 방식에 비해 매우 조밀한 계측이 가능해졌지만 방대한 양의 레이저 스캔 자료를 효율적으로 처리하기 위한 연구는 충분히 이루어지고 있지 않다. 이러한 상황에서 본 연구는 레이저 스캔 자료를 이용한 터널 내공 단면 추출의 효율성 향상 및 자동화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 특별히, 본 연구에서 제안한 자료 구조체 및 검색 방식은 터널 표면 및 내부 구조물에 대한 3차원 모델링과 공간 분석을 위한 레이저 스캔 자료 처리 분야에도 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

향후 연구에서는 터널 중심선 추정 및 보정 방식을 개선하여 추정된 중심선의 정확도를 평가하고, 헤시 기반 구조체의 격자 크기(ncs)의 변화에 따른 처리 시간 및 메모리 사용량을 평가하여 자료의 특성에 따른 최적의 격자 크기를 산출하고자 한다. 최종적으로, 추출된 단면 구성 포인트 클라우드로부터 수학적 형태의 단순화된 단면 모델을 생성하기 위한 여러 방안을 평가하여 본 연구에 적용하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능

형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C04)에 의해 수행되었으며, 터널 이용에 협조해주신 (주)현대건설 기술개발원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 권기욱, 이종달 (2009), “레이저 스캐닝 측정군에 의한 터널 3차원 형상의 재현”, 대한토목학회논문집, 제29권, 제4D호, pp. 555-561.
2. 김범주, 황영철 (2008), “NATM 터널 굴착시 초기 내공 변위와 최종 내공변위의 상관관계 연구”, 터널기술, 제10권, 제3호, pp. 233-243.
3. 김인섭, 임수봉 (2007), “터널굴착시 3차원 레이저스캐너에 의한 내공 단면 측량에 관한 연구”, 토목학회논문집, 제27권, 제4D호, pp. 541-546.
4. 김종석, 손홍규, 한수희, 이정빈 (2008), “지상 LiDAR 시스템을 활용한 터널의 내공 단면 측량”, 대한토목학회 정기학술대회, pp. 4037-4040.
5. 노태호, 김진수, 이영도 (2008), “지상 레이저 스캐닝 자료를 이용한 터널단면관리시스템 개발”, 한국지리정보학회지, 제11권, 제1호, pp. 90-104.
6. 박시현 (2008), “터널 선형변위를 활용한 한계변형률 개념의 적용 연구”, 터널기술, 제10권, 제4호, pp. 337-347.
7. 방준호, 김기영, 정용훈 (2007), “터널 시공 중 3차원 절대변위 계측시스템의 개발과 적용”, 터널기술, 제9권, 제3호, pp. 229-240.
8. 사공명, 문철이, 이준석, 황선근, 김병홍 (2006), “3D 레이저 스캐너 기반의 터널스캐너 개발”, 터널기술, 제8권, 제4호, 2006년 12월, pp. 377-388.
9. 안봉도, 강대우 (2009), “뇌관의 시차 정밀도가 터널 여굴에 미치는 영향 수치 해석”, 한국암반공학회 학술발표회 논문집, pp. 73-82.
10. 윤정숙, 이준석, 이규성, 사공명 (2007), “이저 스캐닝 데이터를 이용한 터널 시설물 및 손상부위 검측 알고리즘”, 터널기술, 제9권, 제1호, pp. 19-28.
11. 이영남, 김대영, 서영호 (2001), “고경사 절리 암반에서의 터널 굴착”, 2001년도 한국암반공학회 춘계 학술발표회 논문집, pp. 132-138.
12. 이재원, 윤부열 (2007), “3차원 레이저 스캐닝을 이용한 터널의 천단 및 내공 변위 관측”, 한국지형공간정보학회지, 제15권, 제2호, pp. 67-75.
13. 정동호, 문상조, 안대진, 정원준, 김은관, 김동규 (2007), “발파공해 해소 및 여굴 최소화를 위한 선굴열 암굴착 노치장비 개발에 관한 연구”, 터널과 지하공간, 제17권, 제3호, pp. 216-224.
14. 정동호, 문상조, 안대진, 정원준, 김은관, 김동규 (2007), “노치굴착장비 개발과 터널 여굴제어 및 손상영역 최소화를 위한 터널 발파설계의 최적화 연구”, 한국암반공학회 특별심포지엄 논문집, pp. 461-469.
15. Boehler, W., Heinz, G. and Marbs, A., (2002), “The potential of non-contact close range laser scanners for ultral heritage recording, surveying”, 28, pp. 289-295.
16. Leica Geosystems (2010), website accessible from “http://hds.leica-geosystems.com/en/ Leica-Cyclone_6515.htm”.
17. Lindenbergh, R., Uchanski, L., Bucksch, A. and van Gosliga, R. (2009), “Structural monitoring of tunnels using terrestrial laser scanning.”, Reports of Geodesy, Special Issue of the IX Konferencji Naukowo-Technicznej, pp. 1-9.
18. Slob, S. and Hack, R. (2004), “3D terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique.”, Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 104, pp. 179-189.
19. Van Gosliga, R., Lindenbergh, R. and Pfeifer, N. (2006), “Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning.”, IAPRS Volume XXXVI, Part 5, pp. 167-172.

접수일(2010.2.25), 수정일(2010.3.24), 게재확정일(2010.5.19)