

정밀 도로 지도 구축 방법을 이용한 GPR 영상 데이터 지오레퍼런싱 Georeferencing of GPR image data using HD map construction method

신진수¹⁾ · 원종현²⁾ · 이시영³⁾

Shin, Jinsoo · Won, Jonghyun · Lee, Seeyoung

Abstract

GPR (Ground Penetrating RADAR) is a sensor that inspects the pavement state of roads, sinkholes, and underground pipes. It is widely used in road management. MMS (Mobile Mapping System) creates a detailed and accurate road map of the road surface and its surroundings. If both types of data are built in the same area, it is efficient to construct both ground and underground spatial information at the same time. In addition, since it is possible to grasp the road and important facilities around the road, the location of underground pipelines, etc. without special technology, an intuitive understanding of the site is also possible, which is a useful tool in managing the road or facilities. However, overseas equipment to which this latest technology is applied is expensive and does not fit the domestic situation. LiDAR (Light Detection And Raging) and GNSS/INS (Global Navigation Satellite System / Inertial Navigation System) were synchronized in order to replace overseas developed equipment and to secure original technology to develop domestic equipment in the future, and GPR data was also synchronized to the same GNSS/INS. We developed software that performs georeferencing using the location and attitude information from GNSS/INS at the time of acquiring synchronized GPR data. The experiments were conducted on the road site by dividing the open sky and the non-open sky. The road and surrounding facilities on the ground could be easily checked through the 3D point cloud data acquired through LiDAR. Georeferenced GPR data could also be viewed with a 3D viewer along with point cloud data, and the location of underground facilities could be easily and quickly confirmed through GPR data.

Keywords : HD map, GPR Image, Georeferencing, Underground Facilities

초 록

GPR (Ground Penetrating RADAR)은 도로의 포장 상태 및 싱크홀, 지하관로를 검사하는 센서로 도로관리에 활발히 사용되는 센서이다. MMS (Mobile Mapping System)는 도로 표면과 주변 환경에 대한 정확한 정밀 도로 지도를 제공한다. 두 종류의 데이터가 동일한 지역에서 구축되면 지상과 지하의 공간정보를 동시에 구축할 수 있어서 효율적이며 육안으로 도로와 도로 주변의 중요 시설물, 지하의 관로 위치등을 파악할 수 있어서 현장에 대한 직관적인 이해가 가능하여 도로나 시설물을 관리하는데 있어서 유용한 도구가 된다. 그러나 이러한 최신 기술을 적용한 해외의 장비는 고가이며 국내 실정에 맞지 않다. 해외 개발 장비를 대체하고 향후 국산 장비를 개발할 수 있는 원천 기술을 확보하기 위해 LiDAR (Light Detection And Raging)와 GNSS/INS (Global Navigation Satellite System / Inertial Navigation System)를 동기화 하고, 동일한 GNSS/INS에 GPR 데이터도 동기화 하였다. 동기화된 GPR 데이터를 취득 당시의 GNSS/INS의 위치와 자세정보를 이용하여 지오레퍼런싱을 수행하는 소프트웨어를 개발하였다. 개활지와 비개활지로 구분하여 도로 현장에서 실험을 수행하였으며, LiDAR를 통해 취득되는 3D 포인트 클라우드 데이터를 통해서 지상의 도로와 주변 시설물을 육안으로 쉽게 확인할 수 있었다. 지오레퍼런싱된 GPR 데이터도 점군데이터와 함께 3D 뷰어로 볼 수 있었으며, 지하의 시설물의 위치를 GPR 데이터를 통해 쉽고 빠르게 확인할 수 있었다.

핵심어 : 정밀 도로 지도, GPR 영상, 지오레퍼런싱, 지하시설물

Received 2021. 11. 26, Revised 2021. 12. 01, Accepted 2021. 12. 15

1) Corresponding Author, Member, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul (E-mail: decsjs@naver.com)

2) Soda System (E-mail: jhwon@sodasys.com)

3) Soda System (E-mail: co2@sodasys.com)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

GPR (Ground Penetrating Radar) 장비를 이용한 탐사는 현재의 지하관로 물리탐사 방법 중 가장 효율적인 방법으로 지표면에서 지하로 전자파를 방출한 후 지하의 각종 경계면에서 반사돼 오는 반사파를 기록·분석해 지하공동, 매설관 등을 탐지하거나 지하구조물 또는 지층구조를 영상화하는 비파괴탐사법이다(Kang, 2020). 지상과는 달리 지하의 정보를 입체적으로 분석하고 이해할 수 있는 방법으로 최근 많은 활용 방안이 도출되고 최신 기술들이 개발되고 있다(Kim, D.G., 2020).

하지만, 이러한 GPR 데이터는 지하의 정보만을 취득하여 이미지화 되어 보여줄 뿐, 정밀한 좌표를 주지 않음은 뿐만 아니라, 지상의 상황, 특히 도로 상의 위치나 방향을 인지할 수 있는 정보를 주지 않기 때문에 정확한 지하 시설물의 위치를 제공해 주지 못한다. 이를 해결하기 위해 GNSS (Global Navigation Satellite System)와 연결하여 취득된 위치를 함께 저장하고 있다(Kim *et al.*, 2018). 이는 GNSS로부터 취득된 위치를 도로에 표시하는 용도로 활용한다. 그러나 단순히 GNSS로부터 취득된 위치를 저장하는 것은 GNSS가 가진 위치의 정확도에 대한 문제를 논하기 이전에 단순한 좌표만을 기록하여 현장에서 해당 지점을 확인하기 위해 별도로 GNSS를 이용해야 하는 등 활용도가 높지 않다. 이에, INS(Inertial Navigation System)를 사용하여 단절 없는 위치 데이터 취득과 함께 3차원 자세 데이터를 동시에 저장하여 경사지형이 많은 한국지형에 유용한 기술에 대한 연구도 진행되었다(Lim *et al.*, 2019).

최근에는 주로 고정밀 도로 지도 제작을 위해 사용되는 MMS (Mobile Mapping System)와 GPR이 통합된 시스템이 개발되어 데이터 구축을 하고 있다(Yan *et al.*, 2019). 이러한 장비에는 고정밀 위치와 자세를 측정하는 GNSS/INS (Global Navigation Satellite System / Inertial Navigation System)가 탑재되어 있어서 지상은 LiDAR (Light Detection And Raging)를 통해 도로 주변을 스캔하여 포인트 클라우드를 생성하고, 지하는 GPR을 이용하여 이미지데이터를 취득한다. 다만, 현장의 도로 관리에 활용하기에는 수억원의 가격으로 판매되고 있어서 국내에서 도로관리나 지하시설물 안전관리를 위해 사용하기에는 많은 어려움이 있다. 이에 다양한 성능의 센서를 사용할 수 있는 GPR, GNSS/INS 센서간의 동기화 기술을 국산화하여 개발하고 최종적으로 국내 법규와 제도에 맞춘 GPR과 MMS를 결합한 시스템을 개발하고자 한다.

이를 위해, GPR 데이터의 취득 시각을 GNSS로부터 정확하게 측정된 시각으로 저장하고, MMS에 내장된 GNSS/INS

를 데이터를 후처리하여 GPR 데이터가 취득된 시각의 위치와 자세값을 가져오는 소프트웨어를 개발하였다. 그런 다음 GPR 안테나의 위치와 GNSS/INS 위치의 차이를 측정하여 실제 GPR 안테나의 취득 시각 위치를 구하는 기능을 구현하였다.

2. GPR과 MMS 동기화 기술 개발

2.1 GPR 장비의 위치 기준

기존 GPR장비는 GNSS를 이용하여 GPR 데이터를 취득한 위치를 표시할 수 있다. 이러한 위치 표시는 GNSS의 위치정확도에 절대적으로 의존하기 때문에, 도심이나 터널등에서 작업할 때 위치를 알 수 없는 문제가 있었다. 최근 GNSS에 더불어 GNSS/INS를 통합하여 비교적 이러한 지역에서도 위치 데이터를 수신하는데에는 성공하고 있으나 그 정확도가 작업할 수 있는 정도로 높지 않다. 더욱이 위치 데이터만 제공하기 때문에 탐사 결과를 분석하고 분석된 결과를 확인하거나 유지보수를 위해 현장에 방문할 경우 별도의 GNSS를 이용하여 실시간으로 위치를 취득해야지만, 접근할 수 있는 문제가 있다. 이 때문에 GPR 데이터가 취득된 위치를 현장에서 인지할 수 있는 자료가 함께 구축되어야 한다.

물론 GPR 장비에서도 도로의 상황을 인지하기 위해 카메라를 이용한다(Chae, 2015; Barzaghi *et al.*, 2016; Lee and Jang, 2019). 하지만, 이러한 카메라는 Fig. 1과 같이 도로 주변의 3차원 형상을 담지 못하고, 도로의 요철, 과속방지턱이나 조도, 차량의 속도등 주변 환경에 의해 왜곡되어 사용에 제한적이다.



Fig. 1. Distorted GPR camera Image

2.2 MMS 데이터와 GPR 동기화

MMS는 도로를 주행하는 차량에 LiDAR와 GNSS/INS를 장착하고 도로 주변을 3차원으로 스캔하여 도로 주변의 3D

포인트 클라우드를 Fig.2와 같이 생성한다. 포인트 클라우드는 도로 주변 가로수나 가로등과 같이 현장에서 육안으로 위치를 확인할 수 있는 시설물의 형태와 함께 도로 표면의 차선이나 방향표시등 LiDAR의 반사강도가 높아서 육안으로 확인할 수 있는 정보를 볼 수 게 해준다. 이를 이용하여 별도의 GNSS 측량없이도 쉽고 빠르게 현장에서 위치를 확인할 수 있다.

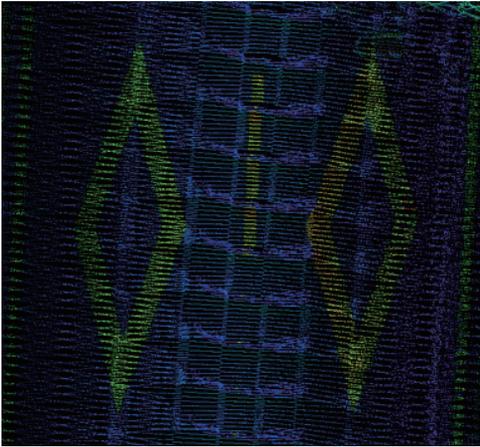


Fig. 2. Point Cloud Data

MMS에 사용되는 GNSS/INS를 GPR 영상 데이터와 동기화하여 GPR 영상을 지오레퍼런싱 할 경우 GNSS/INS를 기준으로 GPR 이미지와 LiDAR를 3차원으로 구축할 수 있다. 이러한 장비는 GPR과 MMS를 물리적으로 같은 차량에 장착하여 주행함과 동시에 GPR 영상 데이터를 절대시각에 취득하여 GNSS/INS와 통합하는 것을 지원한다. 이 데이터는 하나의 데이터로 지상과 지하의 데이터를 동시에 보여줄 수 있을 뿐만 아니라, 현장 활용이나 GPR 데이터를 3차원적으로 분석할 수 있게 해준다(Fig.3).

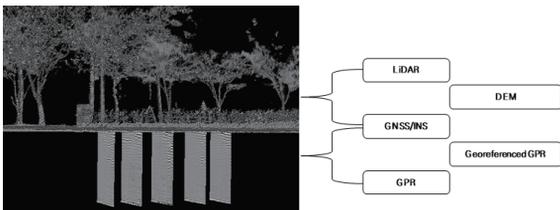


Fig. 3. Concept image of GPR and MMS

GNSS/INS는 내부에 GPS로부터 수신되는 정확한 시각을

가지고 있으며, 이 시각을 GPGGA와 같은 NMEA 형태로 제공하고 있다. 대부분의 외부 기기와 이 형태의 신호를 이용하여 동기화 한다. GPR장비에서도 기본적인 GPS정보를 수신하기 위한 별도의 포트를 가지고 있다. 이를 하드웨어적으로 연결하여 GPR 수신기에서 GPS의 시각과 기본적인 위치를 저장하도록 한다.

또한, GNSS/INS로부터 센서의 위치와 자세를 취득하게 되는데 이 때의 위치와 자세의 기준은 GNSS/INS 센서이다. 따라서, GPR 데이터를 3차원으로 지오레퍼런싱하기 위해서는 GPR 센서의 위치와 자세로 변환하기 위한 후처리 과정이 필요하다. 이를 위한 기술은 고정밀 도로 지도 제작에 사용되는 동일한 기술을 통해 구현한다.

GPS의 시각과 위치정보는 GPR 저장 포맷인 SEG-Y 포맷으로 저장할 수 있다. SEG-Y 포맷은 Society of Exploration Geophysicsts(SEG)에 의해 개발된 지구물리학 데이터를 저장하는 파일 포맷이다. 이 포맷의 특징은 데이터가 구축되는 시간순서대로 저장할 수 있다는 것이다. 최근 버전은 2017년 Version 2가 발표되면서, 마이크로초 단위의 Time Stamp를 저장할 수 있도록 변경되었다(Fig.4).

Optional SEG Y Tape Label	3200 byte Textual File Header	400 byte Binary File Header	1 st 3200 byte Extended Textual File Header (Optional)	N th 3200 byte Extended Textual File Header (Optional)	1 or more 240 byte Trace 1 Headers	1 st Data Trace	1 or more 240 byte Trace M Headers	M th Data Trace
---------------------------	-------------------------------	-----------------------------	---	---	------------------------------------	----------------------------	------------------------------------	----------------------------

Fig. 4. SEG-Y File Format

SEG-Y 포맷에서 시각과 관련된 정보는 헤더 중 3511-3512 Byte의 Time basis code를 정의하는 것과 Description block의 creationtime에 아래와 같은 형식으로 저장된다(Fig. 5).

Timestamp for creation of the data block. May be set to the recording time for the SEG-Y record if unknown. Cannot be empty or dummy timestamp.

Timestamp format is UTC time (zero GMT time offset) according to ISO 8601 (24 hour clock):

Format: YYYY-MM-DD hh:mm:ssZ

Example: 2015-09-01 22:04:00Z

Fig. 5. Definition of SEG-Y creation time

센서간의 동기화는 Fig. 6과 같이 센서에서 주어지는 데이터의 시간을 GNSS로부터 취득되는 시간에 맞추어 저장하고 함께 저장된 GNSS/INS의 데이터 중 동일한 시각의 데이터

에서 위치와 자세를 계산하여 절대위치화하는 과정이다. 센서가 카메라나 GPR같이 데이터가 이미지로 주어지는 경우에는 해당 이미지 자체가 동기화 대상이며, 동기화된 결과는 촬영된 시각 정보를 포함하는 이미지이다.

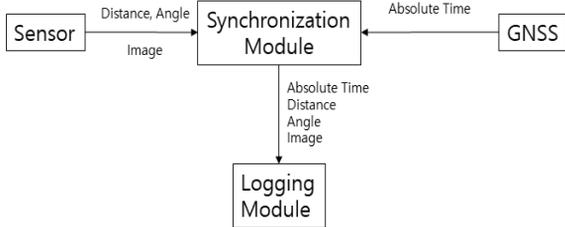


Fig. 6. Concept of Sensor Synchronization

이미지의 시각 정보는 일반적으로 EXIF (EXchangable Image File format)를 통해서 저장되나, GNSS/INS와 동기화하기 위해서 필요한 시각 정보의 정확도는 1/1,000초로 EXIF 특성상 저장할 수 있는 시각의 정밀도를 넘어서기 때문에 EXIF에 저장하기에는 불가능하다. 따라서 데이터 취득 시각을 이미지 파일명으로 저장한다.

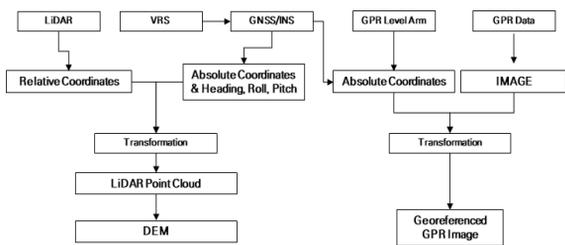


Fig. 7. Data Process Flow of GPR and MMS

GPR 영상과 GNSS/INS 동기화된 후 GPR 영상 시각을 GNSS/INS 후처리 결과에서 찾아서 GPR 영상 취득 당시의 GNSS/INS 기준 절대좌표와 자세 취득한다. 취득된 절대좌표와 자세를 기준으로 3차원 이동을 통해 영상의 좌상단, 좌하단, 우상단, 우하단의 좌표를 추출한다 (Fig.7). 이 좌표를 기준으로 GPR 영상을 3차원 공간에 배치하면 3차원 뷰어에서 포인트 클라우드 데이터와 함께 볼 수 있게 된다. 3차원 공간상에 영상 데이터를 표현하기 위한 포맷으로 PLY (Polygon file format)을 사용하였다. 이 포맷은 Stanford Triangle Format으로도 알려져 있으며, 3차원 공간에서 폴리곤을 이용하여 형태를 표현하기 위해 고안된 포맷으로 GPR 영상을 표현하기에 적합한 공개 포맷이다.

```

ply
format ascii 1.0
comment TEXTUREFILE 2.jpg
comment Author: TI
obj_info anything
element vertex 4
property float x
property float y
property float z
element face 2
property list uchar int vertex_indices
property list uchar float texcoord
end_header
313210.979 4161378.989 31.380
313212.260 4161381.620 31.259
313210.979 4161378.989 36.380
313212.260 4161381.620 36.259
3 0 1 2 6 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 1.0
3 2 1 3 6 0.0 1.0 1.0 0.0 1.0 1.0
    
```

Fig. 8. PLY File Sample

3. 현장 실험 및 테스트 결과

개발된 기술을 이용하여, 현장에서 데이터를 취득해 보고 지상의 측량점과 비교해서 문제점을 도출하고 개선점을 확인하기 위해 실험을 수행하였다.

이를 위해 각 센서를 선정하고 센서간 동기화를 수행하였다. GNSS/INS로는 Applanix사의 APX-15를 사용하였다. 드론에 사용하는 저렴한 GNSS/INS로 개활지에서의 성능은 일반 MMS에 사용되는 장비와 유사한 성능이다. LiDAR는 Velodyne사의 VLP-16을 사용하였다. 저렴하며, 1kg 미만으로 가벼워 다양한 GPR에 장착할 수 있다. 향후, 카트형 GPR에 장착할 수 있는 형태이다. GPR의 경우 32채널을 갖는 멀티 채널 방식의 차량견인형 GPR을 이용하였다.

3.1 개활지 실험

본 연구에서 구현한 GNSS/INS와 LiDAR를 이용한 점군 데이터의 정확도를 검증하고, GPR 영상의 지오레퍼런싱 구현 기능을 실험하기 위해 GNSS/INS의 오차가 가장 적은 개활지에서 실험을 진행하였다.

Table 1에서 보여주고 있는 것처럼 측량점과 점군데이터의 차이는 GNSS 수신기 원활한 서울, 부산 1구역, 부산2구역, 광주 1구역에서는 20cm이내의 정확도를 보여주며, 주변 건물에 의해 GNSS 수신기 방해 받는 지역은 50cm 미만의 정확도를 나타냈다.

Table 1. Quality of point cloud

Classification	GPS coordinate			Point Cloud			Residual			
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	XY (m)	Z (m)
Seoul#1	316421.93	4161001.00	50.07	316422.23	4161001.27	50.20	-0.339	-0.264	0.399	-0.128
Seoul#2	316420.14	4161000.41	50.21	316420.04	4161000.80	50.30	0.106	-0.390	0.404	-0.092
Seoul#3	315596.91	4159738.53	39.41	315596.89	4159738.45	39.58	0.017	0.080	0.082	-0.165
Seoul#4	315613.05	4159744.51	39.58	315613.04	4159744.45	39.70	0.010	0.066	0.067	-0.124
Seoul#5	315608.58	4159743.93	39.46	315608.51	4159743.87	39.58	0.072	0.054	0.090	-0.127
BusanS1#1	287209.59	397623.00	39.24	287209.59	397623.005	39.24	0.310	0.224	0.382	-0.368
BusanS1#2	287197.55	397639.98	40.67	287197.55	397639.983	40.67	-0.238	0.257	0.350	-0.371
BusanS4#1	285420.67	382246.85	38.05	285420.72	382246.771	38.16	-0.055	0.082	0.099	-0.114
BusanS4#2	285478.16	382252.17	37.51	285478.10	382252.084	37.61	0.060	0.093	0.111	-0.105
GwangjuS1#1	288483.49	183088.35	50.59	288483.39	183088.296	50.74	0.105	0.059	0.120	-0.146
GwangjuS2#1	288504.00	183053.34	50.65	288503.71	183053.078	51.04	0.288	0.262	0.389	-0.381
GwangjuS2#2	288468.86	183044.34	50.33	288468.60	183044.078	50.66	0.251	0.270	0.369	-0.325

3.2 비개활지 실험

비개활지인 서울 도심지역에 대한 실증 테스트를 수행하였다.

2021년 10월 14일부터 15일에 서울 주요 도로에 대한 실증을 수행하였으며, Table 2와 같이 서울시 강남구, 서초구 일원 내의 3개 지점에 대한 점군데이터와 GPR 영상데이터를 취득하였다.

Table 2. Seoul Test Area Location Map

Station Chungdam #1	Station Yeoksam #2	Station Gyoudae #3
		

데이터 취득 결과는 서울시 네트워크 RTK 시스템을 이용하여 GNSS/INS 후처리를 진행하였다. LiDAR 저장 데이터와 GPR 영상 데이터를 후처리된 GNSS/INS와 동기화하여 각각 포인트 클라우드 생성과 지오레퍼런싱을 수행하였다.

Table 3. Seoul DEM & GPR image

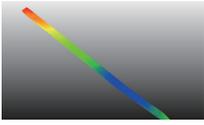
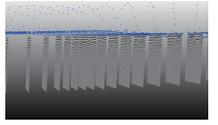
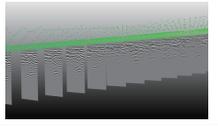
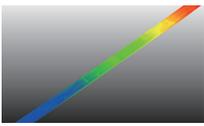
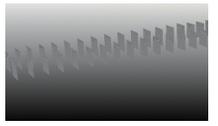
	DEM(Digital Elevation Model)	DEM & GPR image
#1		
#2		
#3		

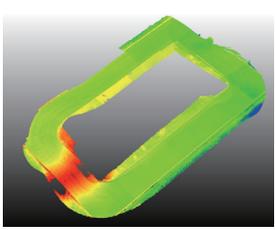
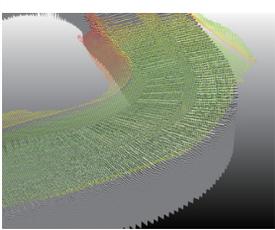
Table 3과 같이 개발된 소프트웨어는 정상 동작하여 포인트 클라우드와 GPR 데이터의 지오레퍼런싱에 성공하였다. 개활지 실험 결과와 비교하여 GNSS의 수신이 어려운 환경임에도 불구하고, 데이터 생성에는 문제가 없었다. 다만, 2구간과 3구간의 경우, DEM 생성에 사용된 GNSS/INS 데이터와

GPR 이미지의 지오레퍼런싱을 위해 사용된 GNSS/INS 데이터의 정확도에 차이가 생기면서 DEM 위로 GPR 이미지가 표출되는 경우가 일부 확인되었다. 이는 GNSS/INS 데이터 후처리시 INS가 정지된 상태임을 알지 못하여 생기는 일반적인 현상으로, 차량의 실제 이동량을 센싱하는 DMI (Distance Measurement Instrument)를 차량의 바퀴에 장착하여 추가 센서로 활용하여 해결할 수 있다.

3.3 테스트베드 실험

2021년 10월 22일에 연천에 위치한 한국건설기술연구원 SOC실증센터의 테스트베드에서 검증 수행하였다. 해당 테스트베드는 특정 지하 시설물을 실제 매설하여 장비의 정확도를 검증할 수 있는 테스트베드이다.

Table 4. Youncheon DEM & GPR image

DEM(Digital Elevation Model)	DEM & GPR image
	

GNSS/INS 후처리 결과는 개활지이기 때문에, 앞선 개활지 실험에서의 결과와 동일하게 평면과 수직 모두 10cm 이내의 높은 정확도를 보였다. Table 4와 같이 포인트 클라우드로 만들어진 DEM의 경사도 부분에서 높은 고도를 보여주는 결과를 보여주며, 정상적인 데이터 처리 결과를 도출했다. GPR 데이터도 지오레퍼런싱을 통해 테스트베드의 두 개 차로에 차량의 방향과 동일하게 모두 지오레퍼런싱 되었다. 고도 또한, GPR 데이터가 차로의 위로 올라오거나 지나치게 내려가지 않고 지오레퍼런싱 되었다.

4. 결론

본 연구는 MMS에 통합된 GNSS/INS 데이터를 GPR 영상의 지오레퍼런싱에 사용하여 GPR 영상 데이터의 위치정확도를 높이기 위해 수행되었다. 현재 단계에서는 GPR 영상 데이

터를 MMS의 점군데이터와 함께 3차원 가시화하였고, 점군 데이터를 측량점과 비교하여 정확도를 비교하였다. 향후 동기화 결과를 도출하기 위한 자동화된 SW를 추가하고 안정성을 높이면 현장에서 사용하기 편리한 시스템으로 개발될 것이 기대된다. 현재 구축된 시스템에 대한 현장 실증 결과를 토대로 작성한 결론은 다음과 같다.

(1) 모든 GNSS/INS가 가진 한계와 마찬가지로 GNSS의 수신이 원활한 지역에서는 10cm 이내의 높은 정확도의 위치와 자세가 취득되었다. 비개활지에서는 GNSS 수신 상황에 따라 최대 50cm의 정확도를 보여주었다. 다만, 이러한 정확도는 점군 데이터의 측량점과의 비교를 통해 도출한 것으로 실제 지하 시설물의 위치와 GPR 영상을 이용한 결과와 비교한 것이 아니기에, 향후 추가적인 연구가 필요하다.

(2) 도심에서의 테스트 결과 확인된 정차시 오차 증가 현상을 방지하기 위해 DMI를 사용하여 최소화하여야 한다. DMI는 차량의 실제 이동 거리를 측정하는 센서로 정차 중인지 아닌지를 GNSS/INS에 알려주어 오차를 소거할 수 있도록 해준다.

(3) 향후 고정밀 도로지도를 측량점을 이용하여 보정하는 기술을 GPR 영상 데이터의 지오레퍼런싱 결과에 적용하여 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구 결과로 만들어진 시스템은 향후 충분한 테스트를 통해 고도화할 계획이다. 최종 연구가 종료되어 시스템이 최종 완성되면, 다양한 건설이나 유지보수 현장에서 편리하고 안전한 사용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21DCRU-B158151-02).

References

Barzaghi, R., Cazzaniga, N.E., Pagliari, D., and Pinto, L. (2016). Vision-based georeferencing of GPR in urban areas, *Sensors*, Vol.16, No.1, pp. 117-122.

Chae, H.Y. (2015), Large-scale GPR system to detect underground facilities, *Proceedings of Korean Geo-Environmental Society*, 18 September, Seoul, Korea, pp. 48-61.

Kang, W. (2020), Technical feature and case study of

- GPR, *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, Vol. 31, No. 3, pp. 10-18.
- Kim, D.G. (2020), GPR principles and technical trends, *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, Vol. 31, No. 3, pp. 3-9.
- Kim, T.H., Cho, D.W., Oh, S.J., and Lee, Y.C. (2018), Detection of underground facilities using GPR and GNSS, *Proceedings of Korean Society for Geospatial Information Science*, 1-3 November, Jeju, Korea, pp. 341-342.
- Lee, S.H. and Jang, I.H. (2019). A study on the underground condition of road using 3D-GPR exploration, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 20(2) pp. 49-58.
- Lim, J.H., Xu, C., and Yun, H.C. (2019), Development of oblique topography GPR surveying technique using INS, *Proceedings of Korea Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, 11-12 April, Gwangju, Korea, pp. 105-106.
- Yan, J., Jaw, S.W., Soon, K.H., and Schrotter, G. (2019). The ladm-based 3d underground utility mapping: Case study in singapore. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-4/W15, pp. 117-122.