

# 디지털 영상을 활용한 도심지 내 GPS 다중경로오차 경감 방법 개발

## Development of GPS Multipath Error Reduction Method Based on Image Processing in Urban Area

윤성주<sup>1)</sup> · 김태정<sup>2)</sup>

Yoon, Sung Joo · Kim, Tae Jung

### Abstract

To determine the position of receiver, the GPS (Global Positioning System) uses position information of satellites and pseudo ranges based on signals. These are reflected by surrounding structures and multipath errors occur. This paper proposes a method for multipath error reduction using digital images to enhance the accuracy. The goal of the study is to calculate the shielding environment of receiver using image processing and apply it to GPS positioning. The proposed method, firstly, performs a preprocessing to reduce the effect of noise on images. Next, it uses hough transform to detect the outline of building roofs and determines mask angles and permissible azimuth range. Then, it classifies the satellites according to the condition using the image processing results. Finally, base on point positioning, it computes the receiver position by applying a weight model that assigns different weights to the classified satellites. We confirmed that the RMSE (Root Mean Square Error) was reduced by 2.29m in the horizontal direction and by 15.62m in the vertical direction. This paper showed the potential for the hybrid of GPS positioning and image processing technology.

Keywords : GPS, Multipath Error, Weight Model, Image Processing

### 초 록

GPS측위는 수신된 신호를 바탕으로 계산된 위성의 위치와, 의사거리를 이용하여 수신기의 위치를 결정한다. 위성의 신호는 전달되는 과정에서 주변 물체에 의해 반사 및 굴절되는데, 이에 신호전달이 지연되어 다중경로 오차가 유발된다. 본 논문에서는 정확도 향상을 위해 영상을 활용한 다중경로 오차 경감 방식을 제안하고자한다. 연구의 목표는 영상처리를 이용하여 신호의 차폐환경을 계산하고 GPS측위에 적용하여 오차를 보정하는 것이다. 먼저, 영상의 잡음 제거를 위한 전처리 기법을 수행한다. 다음으로, 허프변환을 적용하여 건물옥상의 외곽선을 검출하고, 연산을 통해 차폐각과 허용가능한 방위각 범위를 계산한다. 이후, 영상처리 결과를 바탕으로 위성을 차폐에 따라 분류한다. 최종적으로, 분류된 위성에서 서로 다른 무게를 적용하는 가중치 모델을 세우고 단독 위방식을 기반으로 수신기 위치를 결정한다. 실험에는 600개의 GPS데이터를 사용하였으며, 수평방향 RMSE의 경우 2.29m, 수직방향 RMSE의 경우 15.62m 오차가 절감된 것을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해서, GPS측위기술에 영상처리기술을 융합한 복합측위 방식의 가능성을 확인할 수 있었다.

핵심어 : GPS, 다중경로 오차, 가중치 모델, 영상처리

Received 2018. 02. 07, Revised 2018. 02. 24, Accepted 2018. 04. 26

1) Member, Dept. of Geoinformatic Engineering, Inha University (E-mail: ymh5648@naver.com)

2) Corresponding Author, Member, Dept. of Geoinformatic Engineering, Inha University (E-mail: tezid@inha.ac.kr)

## 1. 서론

GPS (Global Positioning System) 측위에는 의사거리(pseudo-range)를 이용하는 단독측위방식과 반송파 위상을 이용하는 상대측위방식이 있다. 단독측위방식은 상대측위방식보다 다중경로오차 다중경로오차(multipath error)의 영향을 더 크게 받지만, 일회 관측으로도 측위가 가능하기 때문에 도심지에서는 일반적으로 단독측위 방식을 사용한다(Kang *et al.*, 2000). 다중경로오차란 위성의 신호가 주변의 물체에 인해 신호에 굴절 및 반사현상이 발생하여 나타나는 오차를 말한다(Xie and Petovello, 2015). 이는 도심지에서 GPS와 같은 전파항법을 수행할 때 가장 큰 오차요인으로 작용한다(Lee *et al.*, 2002).

기존에 연구된 다중경로오차를 보정하는 방식에는 SNR (Signal to Noise Ratio) 수치를수치를 이용하는 방식과 사전에 구축된 3차원 모델을 이용하는 방식, 적외선 전방향 카메라를 이용하는 방식이 있다. SNR 수치를 이용하는 방식은 위성에서 송출된 신호가 전달되는 과정에서 주변 환경에 의해 SNR이 변동되는 점을 근거로 다중경로오차를 검출한다(Kim *et al.*, 2015). 이 경우 GPS장비 이외에 추가적인 장비가 요구되지 않지만, SNR 수치에는 주변 환경에 의한 신호 반사 및 굴절이외에도 대류권과 이온층, 습윤량 등 여러 요인이 포함되어 다중경로오차를 명확하게 검출할 수 없다. 사전에 구축한 3차원 모델을 이용하는 방식은 GPS위성과 3차원 모델의 위치정보를 이용하여 그림자 매칭을 통해 위성 별 차폐정도를 예측하여 오차를 보정한다(Wang *et al.*, 2013). 이 방식은 사전에 구축된 3차원 모델이 요구되는데, 임의의 지점에 대해 3차원 모델이 구축되어 있지 않거나 부정확한 경우가 많아 어려움이 있다. 전방향 적외선 카메라를 이용하는 방식은 하늘 방향으로 설치된 전방향 적외선 카메라로 영상을 취득하고, 계산한 위성의 위치가 하늘 영역에 있는지 판별함으로써 위성을 분류하여 GPS측위를 한다(Suzuki *et al.*, 2011; Meguro *et al.*, 2009). 이 방식은 고가의 적외선 카메라가 요구되기 때문에 적용에 어려움이 있다.

이에 본 논문에서는 일반 디지털 영상을 활용하는 다중경로오차 경감 방식을 제안하고자 한다. 본 방식의 처리과정은 영상처리단계와 GPS 측위단계로 나누어 볼 수 있다. 먼저 영상처리 단계에서는 단일 영상을 통해 주변 구조물에 의한 차폐각을 비롯하여 구조물 사이 방위각 범위 등의 기하학적 배치를 계산한다. 다음 과정인 GPS 측위단계에서는 앞서 산출된 수신기와 구조물 간의 기하 배치정보를 바탕으로 위성을 일정 조건하에 분류하고 가중치 모델을 적용하여 수신기 위치를 산출한다. 이러한 접근방식은 기존 방식들과 달리, 고가

의 장비를 요구하지 않아 경제적이며 3차원 모델과 같은 추가 정보가 필요하지 않기 때문에 초기 구축비용이 들지 않고 즉시 운용이 가능하다는 장점이 있다. 또한 SNR 수치와 같이 여러 요인이 포함되는 정보를 활용하지 않고 다중경로오차에 직접 요인이 되는 차폐정보를 사용하기 때문에 정확한 분석이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 본 연구는 디지털 영상을 활용한 영상처리를 기반으로 하는 GPS측위의 다중경로오차 경감방식을 개발하여 새로운 접근방식을 제안하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 제안 알고리즘

### 2.1 영상처리기반의 수신기 주변 구조물 배치 파악

영상처리를 통한 수신기 주변 환경을 파악하는 과정은 영상 전처리단계, 좌우 구조물의 외곽선 검출단계와 구조물의 옥상 추출단계, 그리고 좌우 구조물에 의한 차폐각 산출 단계로 나눌 수 있다. 먼저, 전처리 단계에서 잡음제거 연산을 수행한다. 경계선 검출은 영상의 DN (Digital Number)값을 기반으로 연산되기 때문에 전처리 과정에서 영상 내 잡음 제거가 요구되며, 본 연구에서는 중앙값 필터를 적용하여 전처리단계를 수행한다. 중앙값 필터는 영상에서 임의의 크기를 갖는 윈도우를 이용하여 영역 내 중앙값을 화소의 DN값으로 입력한다. 본 연구에서는 3×3크기의 중앙값 필터를 적용하여 전처리 과정을 수행하였다. 건물의 외곽선과 같은 경계선은 영상에서 그 주변 DN값이 불연속적인 특징이 있다. 이를 근거로 DN값 변화율을 산출하여 영상에서 경계선을 검출한다. 영상은 화소 1개를 최소 단위로 하는 2차원 데이터로서 수평, 수직방향 DN값에 대한 편미분을 통해 DN값 변화율( $\nabla M(x,y)$ )이 결정된다.

본 연구에 적용한 경계선 검출 필터는 Eq. (1)과 같이 유도된다.

$$M_y = \frac{\partial M}{\partial y} = \lim_{h \rightarrow s} \frac{M(x,y+h) - M(x,y)}{h} \approx \frac{M(x,y+2) - M(x,y)}{2} \quad (\because \text{Small unit} = 2) \quad (1)$$

$$F(x,y) = \|\nabla M(x,y)\| = \sqrt{M_y^2} = \left| \frac{M(x,y+2) - M(x,y)}{2} \right|$$

where  $M$  is 3×3 mask and  $F(x,y)$  is x-direction operator.

영상에서 인접한 두 픽셀 간의 DN값 변화량만을 고려할 경우, 필터가 영상의 작은 변화에도 상당히 민감하다. 따라서

Eq. (1)와 같이 영상 최소 단위를 두 픽셀로 설정하였다. 그 후 이진화를 통해 일정 DN값 변화량 이상의 크기를 갖는 경계선을 최종적으로 검출한다.

그 후 검출된 경계선 중에서 옥상에 해당되는 선을 추출하기 위해 먼저 허프변환(Hough transform)을 수행한다. 허프 변환은 영상처리에서 주로 사용되는 특징 추출기술(feature extraction)로 영상에서 선이나 원과 같은 도형을 추출하는데 사용된다. 데카르트 좌표시스템에서 해석되는 영상의 경우, 임의의 직선상의 존재하는 픽셀위치  $(r, c)$ 들은 거리( $r$ )와 각도( $\theta$ )로 표현되는 매개변수 공간에서 서로 교점을 갖는 직선으로 나타난다. 이를 근거로, 검출된 경계선 위의 픽셀들을 매개변수 공간에 사상(mapping)한 후 보팅 과정(voting procedure)을 통해 직선 성분을 추출한다(Heo *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2006). 추출과정에서 직선의 각도와 길이, 위치에 대한 임계값을 설정하여 최적의 직선을 추출하고 이를 좌우 구조물의 옥상에 대한 선으로 판단한다.

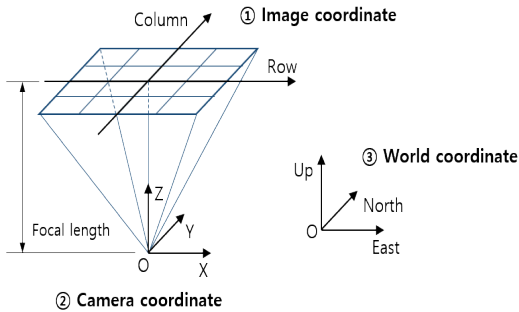


Fig. 1. Order of transformation

Fig. 1과 같은 순서로 좌표계를 변환한다. 먼저, 영상에서 추출된 직선은 초점거리를 포함한 카메라 내부 파라미터를 이용하여 카메라 좌표계로 변환한다. 그 후 카메라 좌표계 상에서의 직선방정식을 결정한다. 직선방정식은 본 알고리즘의 기준좌표계인 관측자중심 평면직각좌표계로 변환한다. 카메라 좌표계의 Z축 기준 회전을 통해 변환하며, 회전정도는 지자기센서를 이용하여 확인한다. 변환된 직선방정식을 통해 차폐각과 구조물의 상대위치를 산출한다.

## 2.2 기하배치에 따른 위성분류 및 GPS측위

위성의 차폐 여부를 판단하기 위해 먼저 항법 RINEX (Receiver Independent Exchange Format) 정보를 이용하여 수신된 GPS위성의 위치를 산출하고 관측 RINEX정보를 통해 수신기 초기 위치를 결정한다. 그 후 GPS위성과 수신기 간

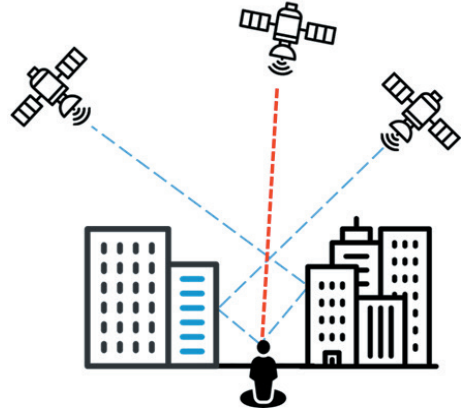


Fig. 2. Signal reflection and refraction in signal transmission

의 벡터를 정의하고 지역평면직각좌표계로 변환하여 좌표계를 통일한다. 각 위성에 대한 고도각과 방위각을 산출하고, 영상처리 결과를 바탕으로 각 위성을 Table 1에 따라 분류한다 (Fig. 2).

가중치 모델은 고도각 모델을 활용하였다(Kim, 2015). 그 후 분류된 위성에 서로 다른 가중치를 부여하였다 (Eq. (2)).

$$W = \begin{bmatrix} \sigma^{-2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^{-2} & & \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \sigma_i^{-2} \end{bmatrix} \begin{cases} \text{Condition 1: } \sigma_i^2 = n_1 \frac{1}{\sin(e_i^2)} \\ \text{Condition 2: } \sigma_i^2 = n_2 \frac{1}{\sin(e_i^2)} \\ \text{Condition 3: } \sigma_i^2 = n_3 \frac{1}{\sin(e_i^2)} \end{cases} \quad (2)$$

where  $W$  is weight matrix,  $\sigma^2$  is noise variance,  $e_i$  is elevation,  $n_1, n_2, n_3$  are constant ( $n_1 < n_2 < n_3$ ) and  $i$  is 1 to the number of satellites.

Table 1. Classification condition by GPS position

Condition	
Condition 1	The elevation angle of the satellite is greater than the mask angle.
Condition 2	Condition 1 is not satisfied, but the elevation angle is above a threshold angle and satellite is not obscured by the surrounding structure of the receiver.
Condition 3	Both of the above conditions are not met.

GPS측위과정의 미지수는 3차원 위치정보를 비롯하여 수

신기 시계오차로 총 4개이며, 조정계산을 위해서 적어도 5개 이상의 위성의 정보가 필요하다. GPS와 수신기 간 거리를 산출하는 과정에는 다양한 오차요인이 포함된다. 각 요인들에 대한 오차 모델을 의사거리에 적용하여 오차가 보정된 의사거리를 산출한다. 의사거리 관측방정식은 Eq. (3)과 같다.

$$PR = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + \delta I + \delta T + \delta O + \delta_r + \delta^s + \delta M + \epsilon \quad (3)$$

where  $PR$  is pseudo range,  $\rho$  is geometrical distance between satellite and receiver,  $\delta t_r$  is receiver clock error,  $\delta t^s$  is satellite clock error,  $\delta I$  is ionospheric delay,  $\delta T$  is tropospheric delay,  $\delta O$  is satellite orbital error,  $\delta_r$  is receiver hardware error,  $\delta^s$  is satellite hardware error,  $\delta M$  is multipath,  $\epsilon$  is measurement error and  $c$  is speed of light in vacuum.

본 연구에서는 다중경로오차 절감에 따른 전후 비교를 위해, 제거할 수 없는 우연오차와 위성 하드웨어오차 및 수신기 하드웨어 오차를 제외한 다중경로오차 이외의 나머지 5개의 오차 모델링을 의사거리에 적용하여 산출하였다.

### 3. 실험 및 결과

실험의 대상지역은 인하대학교 60주년 기념관과 2호관 건물 사이로 선정하였다. 해당 지점은 약 10m 높이의 주변 건물이 동서방향에 위치하여 GPS 측위 간에 다중경로 오차가 발생하는 지역이다. 측량 지점의 참값 좌표는 위도 37.4512°, 경도 126.6548°, 고도 29.86m이며 정밀 표정을 거친 스테레오 영상을 사용하여 수치도화기를 통한 좌표독취를 통해서 획득하였다. 측량 지점은 Fig. 3과 같다.

측위는 U-blox사의 LEA-5T 제품군을 사용하여 단독측위 방식을 적용하였으며, 차폐각 산출을 위한 영상은 스마트폰을 이용하여 취득하였다. 사용한 수신기와 카메라의 사양은



Fig. 3. Experiment area; Inha university

Table 2와 같다.

Table 2. GPS and camera equipment specification

LEA-5T	
Specification	50-channel u-blox 5 engine GPS L1 C/A code SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN
Accuracy (CEP 50%)	2.5m
Smart phone camera	
Specification	Sensor: Sony EXmor RS IMX240 BSI CMOS sensor Focal length: 0.8013mm Sensor size: 1.12μm

GPS데이터는 13분35초 동안 1초 간격으로 에포크(epoch) 815 개를 취득하였다. GPS 설치 및 해체 간에 오차 발생을 고려하여, 전후 시간의 데이터를 제외한 600개의 데이터를 실험에 사용하였다. 영상은 주변 구조물이 좌우에 위치하도록 촬영되었다. 방법 RINEX (Receiver Independent Exchange Format)정보의 경우 NASA (National Aeronautics and Space Administration)의 데이터 아카이브 및 정보 서비스인 CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System)에서 확보하였다. 좌표변환을 위한 Z축 기준 회전정도는 스마트폰을 이용하여 취득하였다.

제안 알고리즘의 성능을 분석하기에 앞서, 중간 산출물인 차폐각을 검증하기 위한 실험을 진행하였다. 직접 측정이 가능한 실외기를 대상으로 실험을 하였으며 실외기 사이의 간격은 0.84m, 높이는 2.28m이다.

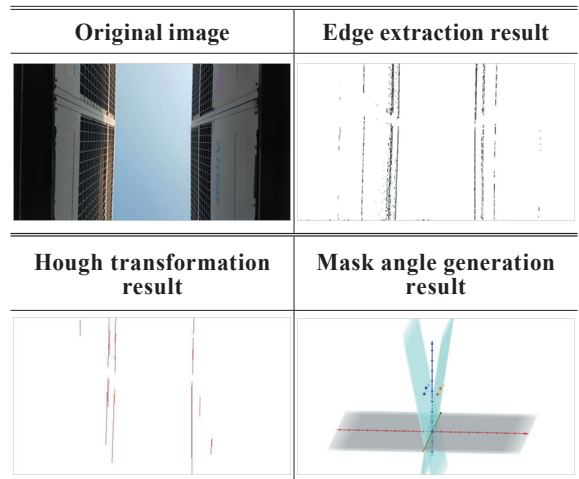


Fig. 4. Results of mask angle generation for verification



Fig. 4처럼, 영상처리를 통해 원본영상에서 외곽선을 추출할 수 있었으며 실제 차폐각과 영상 처리로 계산된 차폐각은 Table 3에 정리하였다.

**Table 3. Error in calculated mask angle**

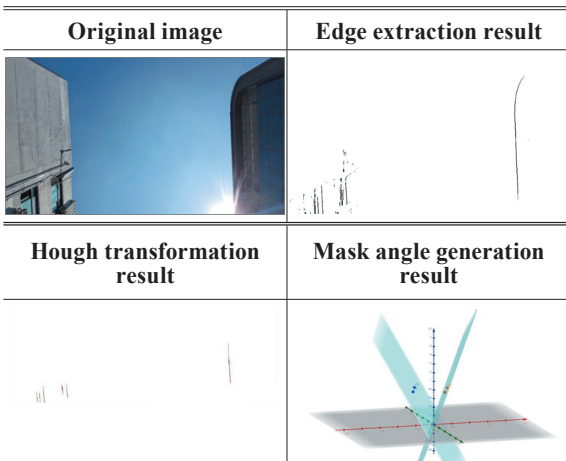
	Mask angle(°)
Measured result	20.88
Algorithm result	21.46
Absolute error	0.58

차폐각 산출에서 약 0.58°의 오차를 보였으며, 영상 1장만으로도 높은 정확도를 유지하며 주변 구조물에 대한 차폐각을 산출할 수 있음을 확인하였다.

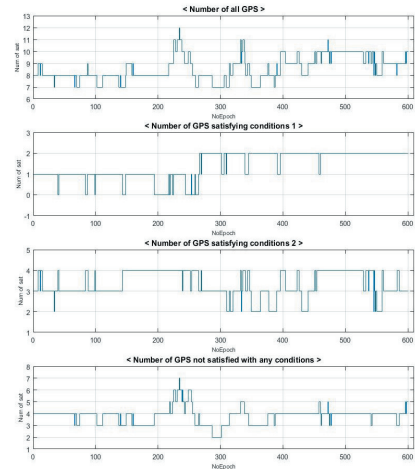
제안 알고리즘의 성능을 분석하기 위해, 본 연구에서 제안하는 방식을 적용하지 않은 GPS 측위결과와 적용한 GPS 측위 결과를 비교하였다. 먼저, 영상처리를 통해 주변 구조물에 의한 차폐각을 산출한 결과는 Fig. 5와 같다. 영상처리 결과 차폐각은 56.17°로 계산되었으며 0.09초의 처리시간이 소요되었다.

Fig. 6은 구조물과 위성 간의 배치 관계를 기준으로 분류하였을 때, 시간에 따른 위성의 개수를 나타낸다. 600개의 에포크에서 위성의 개수는 최소 7대, 최대 12대가 있었다. 조건 1을 만족하는 위성은 최대 2대가 있었으며, 일부 에포크에서는 조건1을 만족하는 위성이 없었다. 다음으로 위성의 분류 결과에 따라 가중치를 설정하여 GPS 측위를 진행하였다.

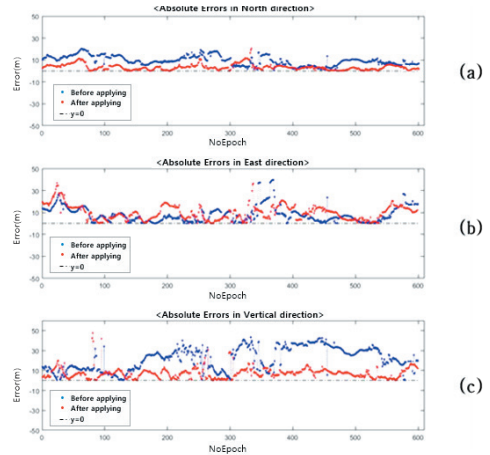
본 알고리즘 적용 여부에 따른 방향 별 절대오차 그래프는 Fig. 7과 같다.



**Fig. 5. Results of mask angle generation in experiment area**



**Fig. 6. Graphs of the number of satellites by conditions**



**Fig. 7. Absolute error graphs by direction ((a) North-South direction, (b) East-West direction, (c) Vertical direction)**

**Table 4. Comparison of RMSE in general and proposed methods**

Direction	General method's RMSE(m)	Proposed method's RMSE(m)	Reduction(m)
North-South	10.35	4.44	5.91
East-West	10.69	11.78	-1.09
Horizontal	14.88	12.59	2.29
Vertical	24.41	8.79	15.62
3D	28.85	15.36	13.49

파랑색은 알고리즘을 적용하기 전 결과를 나타내며 빨강색은 적용 후 결과를 나타낸다. Fig. 7의 (a)를 살펴보면, 동서 방향에 대해서는 오차보정이 미비한 것으로 보였다. 하지만 Fig. 7의 (b)와 (c)에서처럼, 남북 방향과 수직 방향에서는 오차가 크게 보정되었다. 또한 불규칙적으로 크게 발생하는 오차가 본 알고리즘을 통해 제거되는 것을 확인할 수 있었다. 동서 방향에 대해 오차보정이 미비한 원인은 위성 배치에 따라 가중치가 적용됨에 있다. 현재 실험한 연구지역은 좌우 건물이 동서방향에 위치한다. 이에 따라 측량 지점을 기준으로 동서방향에 위치한 위성에 대해서는 가중치가 작게, 천정방향을 비롯한 남북방향에 위치한 위성에 대해서는 가중치가 크게 설정되어 동서 방향으로 오차타원의 장축이 형성된다. 이에 근거하여 정밀도 및 정확도 측면에서 남북방향과 수직방향에 대해 보다 좋은 결과를 얻게 되었다. 각 방향과 3차원 위치에 대한 RMSE (Root Mean Square Error) 수치는 Table 4에 정리하였다. 알고리즘을 적용하지 않았을 때, 3차원 공간상의 위치오차는 28.85m 발생되었으며 특히 수직방향 위치오차가 24.41m로 크게 발생되었다. 본 알고리즘을 적용할 경우 남북 방향으로 5.91m 오차가 보정되었지만 동서 방향으로 1.09m 오차가 증가되어 수평방향 RMSE는 2.29m 경감되었다. 수직방향 RMSE는 15.62m 경감되었으며, 수평방향보다는 수직방향에 대해 오차가 크게 보정되었음을 확인하였다. 최종적으로 3차원 공간상의 위치오차는 13.49m 보정되어 본 알고리즘의 성능을 확인할 수 있었다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 영상처리를 활용하여 주변 환경의 공간상의 배치를 파악하고 이를 GPS측위에서 가중치 산정의 척도로 활용하여 측위 정확도를 향상시키는 알고리즘을 제시하였다. 이에 따라 본 알고리즘을 적용할 경우 수평방향 RMSE의 경우 2.29m, 수직방향 RMSE의 경우 15.62m 오차가 절감된 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해서 GPS측위기술에 영상처리기술을 융합한 복합측위 방식 기반으로 저가의 다중경로 오차 절감 방식의 가능성을 확인할 수 있었다. 연구 초기에는 고도각에 따라, 위치계산에 위성의 가용여부를 결정하였지만, 진행과정에서 가용 위성의 배치에 따라 정밀도가 크게 감소하는 결과를 확인하게 되었다. 이에 따라, 차폐각보다 낮은 위성을 소거하지 않고 가중치를 결정하여 조정계산을 진행하게 되었으며 결과적으로 정확도와 정밀도가 향상되는 것을 확인하였다.

추후 실험에서 다음 사항이 연구되어야 할 것으로 판

단된다. 본 연구에서는 GPS 위성만을 활용하였다. 현재 GLONASS (Global Navigation Satellite System), BeiDou 등과 같이 다양한 GNSS (Global Navigation Satellite System)가 존재하며 이를 측위에 활용한다면 조건1(차폐각보다 큰 고도각을 갖는 경우)을 만족하는 위성의 개수는 증대되어 측위 정확도와 정밀도는 더욱 향상될 것이다. 다음으로, 처리속도의 경우 GPS측위단계에서는 약 0.0019초에서 0.0023초로 증가하여 차이가 거의 없었으나, 영상처리 단계에서 약 0.09초 소요되었다는 점이다. 본 알고리즘을 통한 오차개선은 크지만 실제 측위에 적용하기 위해서는 병렬처리 등을 이용한 처리속도 개선이 필요할 것이다.

본 연구에서 제안하는 방식은 숲이 우거진 지역처럼 불규칙한 환경일 경우와 고가도로 밑을 통과하는 상황처럼 주변 구조물이 서로 대칭으로 배치되지 않았을 경우 적용이 어려울 수 있다. 하지만 일반적인 도심지 환경에서 영상처리를 이용하여 자동화된 방식으로 GPS 오차를 보정하였다는 점에서 그 가치가 매우 크다고 판단된다. 이는 GPS측위에 사용되지 않던 카메라 장비를 복합적으로 사용하는 방안의 가능성을 향상시켜 줄 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NO. 2016R1A2B4013017).

#### References

- Heo, G.H., Lee, K.E., and Woo, Y.W. (2006), Edge strength Hough transform : an improvement on Hough transform using edge strength, *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 10, No. 11, pp. 2055-2061. (in Korean with English abstract)
- Kang, J.M., Lee, Y.W., and Lee, E.S. (2000), Pseudorange smoothing using integrated carrier phase, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 20, No. 4D, pp. 447-455. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.I. (2015), *Improvement of the Real-Time Positioning Accuracy in Urban Canyons through Development of a New Weight Model Based on GNSS Signal Strength*, Ph.D. dissertation, Inha University, Incheon, Korea, 145p.
- Kim, T.J., Lee, T.Y., and Kim, K.O. (2006), Semiautomatic

- building line extraction from IKONOS images through monoscopic line analysis, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 72, No. 5, pp. 541-549.
- Kim, D.S., Park, K.D., Kim, H.I., and Tae, K.H. (2015), A study on analysis of multipath signal detection using GPS signal strength information, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 39, No. 1, pp. 7-13. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.K., Lee, J.G., and Jee, G.I. (2002), Channelwise multipath detection for general GPS receivers, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 8, No. 9, pp. 818-826. (in Korean with English abstract)
- Meguro, J.I., Murata, T., Takiguchi, J.I., Amano, Y., and Hashizume, T. (2009), GPS multipath mitigation for urban area using omni directional infrared camera, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 22-30.
- Suzuki, T., Kitamura, M., Amano, Y., and Hashizume, T. (2011), High-accuracy GPS and GLONASS positioning by multipath mitigation using omnidirectional infrared camera, *Robotics and Automation (ICRA) 2011 IEEE International Conference on*, 9-13 May, Shanghai, China, pp. 311-316.
- Wang, L., Groves, P.D., and Ziebart, M.K. (2013), GNSS shadow matching: improving urban positioning accuracy using a 3D city model with optimized visibility scoring scheme, *Navigation*, Vol. 60, No. 3, pp. 195-207.
- Xie, P. and Petovello, M.G. (2015), Measuring GNSS multipath distributions in urban canyon environments, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64, No. 2, pp. 366-377.

