

안드로이드 GPS 원시데이터의 의사거리를 이용한 측위 정확도 비교

Comparison of Positioning Accuracy Using the Pseudorange from Android GPS Raw Measurements

김준성^{1*} · 박관동²

¹주식회사 피피솔 기술연구소

²인하대학교 지리정보공학과

Joonseong Gim^{1*} · Kwan-dong Park²

¹Institute of Technology, PPSOLN. INC, Seoul, 08504, Korea

²Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

[요 약]

이 연구에서는 안드로이드의 GPS 원시데이터를 이용한 의사거리 기반 GPS 성능을 자체 계산된 NMEA와 비교했다. 원시데이터를 이용한 GPS와 NMEA간의 성능 비교를 위해 Nexus 9 태블릿을 사용하고, 구글에서 제공하는 GNSS logger 어플리케이션을 이용하여 원시데이터와 NMEA를 수집하였다. 산출된 최종좌표의 성능을 검증하기 위해 VRS를 기준 좌표로 사용하고, 동시간 NMEA 결과와 비교하였다. 원시데이터의 의사거리를 이용한 GPS의 정확도는 수평 RMS 3.05 m, 수직 RMS 3.82 m, 3차원 RMS 4.97 m로 NMEA 대비 수평 32%, 수직 65%, 3차원 49%의 성능 향상을 확인할 수 있었다.

[Abstract]

In this paper, the pseudorange-based GPS performance using the Android's raw measurements is compared with NMEA. In order to compare the performance between the two different implementations, we used Nexus 9 tablets and collected the raw measurements and NMEA data using the GNSS logger application provided by Google. To verify the performance of the final coordinates calculated, the VRS was used as the reference coordinate and compared with the NMEA results. The resulting horizontal, vertical, and 3D RMS errors of the pseudorange-based GPS using the Android's raw measurements are 3.05, 3.82, and 4.97 m, respectively, which correspond to 32% horizontal, 65% vertical and 49% 3D performance improvement compared with NMEA.

Key word : Android, Smartphone, Raw measurement, Global positioning system, Kalman filter.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.5.514>



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.

Received 22 September 2017; Revised 23 September 2017

Accepted (Publication) 12 October 2017 (30 October 2017)

*Corresponding Author; Joonseong Gim

Tel: +82-10-6770-5892

E-mail: jsgim@ppsoln.com

I. 서 론

구글은 2016년 5월에 개최된 "I/O 2016" 컨퍼런스에서 안드로이드 N(Nougat : 버전 7) 운영 체제를 사용하는 스마트폰, 태블릿에서 전 지구 위성 항법 시스템(GNSS; global navigation satellite system) 원시데이터를 개발자에게 제공 할 것이라고 발표했다. 이는 수 미터 수준의 정확도를 제공하는 GNSS 수신기의 개념을 벗어나 의사 거리, 도플러 및 반송파위상 측정값을 사용하여 더 정확한 위치 결과를 계산 할 수 있는 가능성을 열어주기 때문에 중요한 의미를 갖는다[1].

이 발표 이전에도 많은 연구자들이 제한적인 방법으로 스마트폰 GNSS 정확도와 정밀도를 높이기 위한 연구를 수행했으며 현재도 활발히 진행 중이다. 핀란드 지리정보연구소(FGI; finnish geospatial research institute)의 연구팀은 퀄컴(qualcomm) 통합 수신칩에서 GNSS 원시 측정값을 획득 할 수 있도록 수정된 펌웨어를 장착한 마이크로소프트 모바일 폰으로 정확도를 높이는 연구를 진행했다[2]. 오스틴 텍사스 대학 연구팀은 스마트폰의 안테나를 사용하여 반송파위상 측정하고 측정된 반송파를 이용한 측위 기술을 제안하고 진행했다[3]. 두 연구팀 모두 스마트폰을 활용한 GNSS 정확도 향상 연구를 수행했으나, 스마트폰의 펌웨어를 수정하는 방법으로 원시데이터를 획득하여 사용하는 한계를 보였다. 또 다른 연구로 세종대학교는 보정정보 위치영역 투영(DGNSS-CP; differential GNSS correction projection) 기술을 제안하고 DGNSS 정확도 수준의 성능을 검증하였고, ㈜피피솔은 DGNSS-CP를 이용한 안드로이드 어플리케이션을 구현하고 필드테스트를 진행하였다. DGNSS-CP는 스마트폰에서 자체 계산한 NMEA(the national marine electronics association)의 위치좌표와 위성 배치 정보만을 이용하여 보정정보를 위치영역으로 투영하는 방법을 사용하는데, 각종 필터가 적용되는 스마트폰 자체 측위 알고리즘을 상세하게 반영하여 처리하기에는 어렵다는 한계가 있다[4]. 이러한 한계점들로 인해 스마트폰 원시데이터의 필요성이 높아지고 있으며 안드로이드 N의 원시데이터제공을 통해 한계점을 극복하고, 위치 정확도를 높이는 다양한 연구에 활용할 수 있게 되었다.

본 논문에서는 안드로이드의 원시데이터의 의사거리를 이용한 GPS 성능을 자체 계산된 NMEA와 비교한다. 2장에서는 먼저 안드로이드 N 운영 체제에서 원시데이터를 제공하는 스마트폰 및 태블릿을 조사하고, GNSS 원시데이터 변환방법을 설명한다. 3장에서는 실험 방법과 위치 계산방법을 설명하고, 4장에서 스마트폰 자체 NMEA 위치와 원시데이터 의사거리 기반 GPS 위치를 비교한다.

II. 안드로이드 원시데이터 종류, 지원 장치 및 변환 방법

2-1 안드로이드 N 제공 원시데이터 종류 및 지원 장치

기존 안드로이드 운영체제를 사용하는 장치들은 GNSS에 가속도, 자이로스코프 등과 같은 추가 센서들의 정보를 융합하고 필터 처리하여 최종 사용자 위치정보를 제공했다[5]. 이렇게 필터 처리된 위치정보는 연구자, 개발자와 같은 전문가들의 연구, 개발에 한계점으로 작용한다. 이러한 GNSS 원시데이터의 필요성이 높아짐에 따라 구글은 안드로이드 N부터 의사거리(pseudorange), 의사거리 변화율(pseudorange rate), 항법 메시지(navigation message), 반송파 누적거리(accumulated delta range), 반송파측정값(carrier), 하드웨어 시계값(H/W clock)의 제공을 지원한다. 그러나 안드로이드 N 운영체제를 사용하는 모든 장치에서 원시데이터를 제공하는 것은 아니며 현재 2017년 8월 현재 GNSS 원시데이터를 지원하는 목록은 표 1과 같다. P는 의사거리, N은 항법메시지, A는 반송파 누적거리, H는 하드웨어 시계를 의미, G는 GPS, R은 GLONASS, E는 Galileo, C는 Beidou를 의미한다[6].

2-2 안드로이드 원시데이터 변환 방법

표 1의 원시데이터 출력을 지원하는 장치를 이용하여 GNSS 원시측정값을 수집하기 위해서는 두 가지 방법이 존재한다. 첫 번째로 구글 개발자에서 제공하는 응용 프로그램 프로그래밍 인터페이스(API ; application programming interface)를 이용하여 직접 구현하는 방법과, 두 번째로 구글에서 제공하는 GNSSLogger 어플리케이션을 이용하는 방법이다. GNSSLogger 어플리케이션은 그림 1과 같다.

표 1. 원시데이터 지원 장치

Table 1. Android devices that support raw measurements.

Model	Raw measurement	Global systems
Huawei Honor 9	P, N, A, H	G, R
Samsung S8(Exynos)	P, N, A, H	G, R, E, C
Samsung S8(QCOM)	P, H	G
Huawei P10	P, N, A, H	G, R, E, C
Huawei P10 lite	P, H	G
Huawei Honor 8	P, N, A, H	G, R, C
Huawei Mate 9	P, N, A, H	G, R, C
Huawei P9	P, N, A, H	G, R, C
Pixel XL	P, H	G
Pixel	P, H	G
Nexus 6P	P, H	G
Nexus 5X	P, H	G
Nexus 9(non cellular)	P, N, A, H	G, R

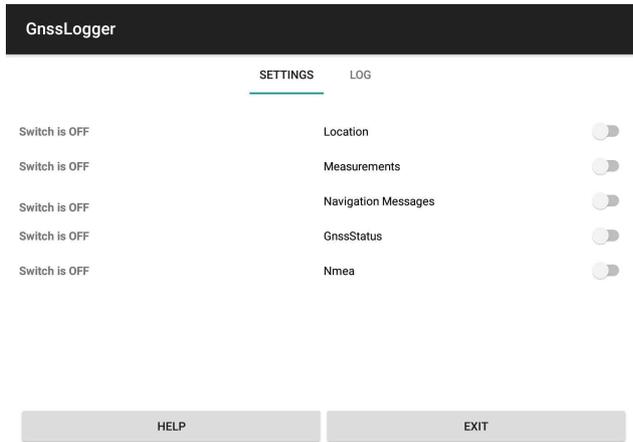


그림 1. GNSLogger 실행 화면

Fig. 1. GNSLogger screen.

이 논문에서는 구글의 GNSLogger 를 이용하여 원시측정 값을 수집하였다. 수집되는 원시 측정값의 상세 목록은 표 2에 나타내었다.

표 2. 원시 측정값 목록

Table 2. List of raw measurement.

Name	Data type	remark
Raw	String	Header
ElapsedRealtimeMillis	double	
TimeNanos	int64	Nano Second
LeapSecond	int64	
TimeUncertaintyNanos	int64	Nano Second
FullBiasNanos	int64	Nano Second
BiasNanos	double	Nano Second
BiasUncertaintyNanos	double	Nano Second
DriftNanosPerSecond	double	
DriftUncertaintyNanosPerSecond	double	
HardwareClockDiscontinuityCount	double	
Svid	double	
TimeOffsetNanos	double	Nano Second
State	double	
ReceivedSvTimeNanos	int64	Nano Second
ReceivedSvTimeUncertaintyNanos	int64	Nano Second
Cn0DbHz	double	
PseudorangeRateMetersPerSecond	double	
PseudorangeRateUncertaintyMetersPerSecond	double	
AccumulatedDeltaRangeState	double	
AccumulatedDeltaRangeMeters	double	
AccumulatedDeltaRangeUncertaintyMeters	double	
CarrierFrequencyHz	double	
CarrierCycles	int64	
CarrierPhase	double	
CarrierPhaseUncertainty	double	
MultipathIndicator	double	
SnrInDb	double	
ConstellationType	double	Global Systems

이렇게 수집된 원시 측정값을 위치 계산에 사용하기 위해서는 각 위성별 의사거리 변환이 필요하다. 의사거리는 위성 신호를 받은 시간과 위성신호를 보낸 시간의 차에 빛의 속도를 곱해서 계산할 수 있는데 식 (1)과 같다. 이때 빛의 속도는 299,792,458 m/s 이다[7].

$$Pseudorange = (Rx\ Time - Tx\ Time) \times SpeedofLight \quad (1)$$

식 (1)은 의사거리를 계산하는 기본 식으로 수신시간과 송신시간을 계산하기 위해 원시출력값의 TimeNanos, FullBiasNanos, BiasNanos, TimeOffsetNanos, ReceivedSvTimeNanos의 값을 이용한다. 먼저 수신시간 계산은 식 (2)와 식 (3)과 같다.

$$weekNumber = (FullBiasNanos \times 10^{-9}) / WeekSecond \quad (2)$$

$$WeekNumberNanos = weekNumber \times WeekSecond \times 10^9$$

$$tRxNanos = (TimeNanos + TimeOffsetNanos) - (FullBiasNanos + BiasNanos) - WeekNumberNanos \quad (3)$$

$$tRxSeconds = tRxNanos \times 10^{-9}$$

수신시간과 송신시간을 이용해 의사거리로의 변환은 식 (4), 식 (5)와 같다.

$$PseudorangeSeconds = tRxNanos - ReceivedSvTimeNanos \quad (4)$$

$$Pseudorange = PseudorangeSecond \times SpeedofLight \quad (5)$$

각 위성별로 위의 계산 과정을 반복하여 매 시간 수집된 원시 측정값을 의사거리로 변환한다. 이때 GPS, GLONASS, Galileo, Beidou 각 위성항법시스템의 의사거리 변환은 시스템 간의 차이가 없이 동일한 방법으로 계산되며, 본 논문에서는 GPS 위성항법시스템의 의사거리를 변환하여 사용하였다.

III. 실험 방법 및 원시데이터 기반 GPS 위치 계산

본 연구에서 제시한 원시데이터의 의사거리를 이용한 GPS 정확도와 자체 계산된 NMEA의 정확도 비교를 위해 표 1에 나와 있는 Nexus 9 태블릿을 사용하여 원시데이터를 수집하였다. 수집 장소는 (쭈피피솔이 위치한 서울 소재의 대성디폴리스 A 동 옥상이며, 기준좌표에서 정지형태로 10분씩 총 9회 수집하였다. 정확도 비교를 위한 기준좌표는 Septemtrio PolaRx3e 수신기를 사용하고, 국토지리정보원에서 운영하고 있는 네트워크 RTK(real time kinematic)인 VRS(virtual reference system)를 이용하여 기준좌표를 획득하여 사용하였다.

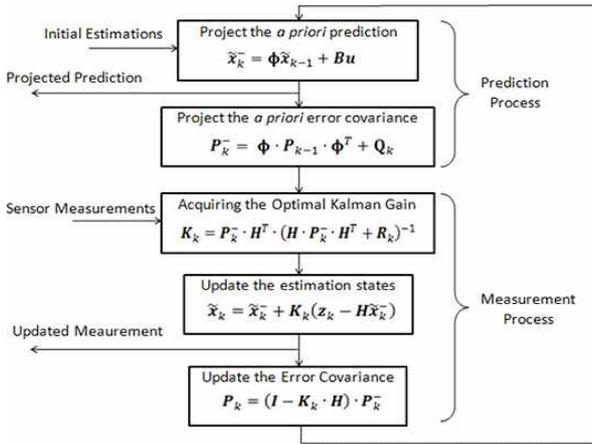


그림 2. 칼만 필터 알고리즘 흐름도
 Fig. 2. Kalman filter algorithm flow chart.

Nexus 9에서 자체 계산된 NMEA 위치 정보는 2-2절에서 소개한 GNSSLogger를 이용하여 원시측정값과 동시에 수집하였다. 이때, NMEA위치 정보는 일반적인 GPFGA(Global Positioning System Fix Data) 형태로 저장되지 않고 어플리케이션에서 정의한 형태로 수정되어 저장된다. 저장형태를 살펴보면, 헤더정보, 사용된 위성항법시스템, 위도, 경도, 고도, 속도, 정확도, 협정 세계시(UTC; coordinated universal time)의 형태를 갖추고 있다. 동시간 정확도 비교를 위해 UTC(ms)를 위성 초(GPS second)형태로 변환한다.

원시데이터 기반 GPS 위치 계산을 위한 필수 요소인 위성좌표 계산은 GPS 방송궤도력을 다운받아 연산하였으며, 위성좌표 계산식은 ICD(interface control documents) 문서를 참고했다 [7]. 또한, 전리층, 대류권 오차 모델을 적용하였고, 적용한 모델은 전리층 Kloubucher 모델, 대류권 GPT(global pressure and temperature) 모델을 사용하였다.

원시데이터 기반 GPS 위치 계산은 칼만필터를 사용하였다. 일반적인 칼만필터 알고리즘은 그림 2와 같다[8]. 칼만필터를 이용하여 위치를 계산할 때 필터의 성능을 좌우하는 가장 중요한 사항은 실제 시스템과 최대한 유사하도록 시스템 모델을 설정하는 것이다. 특히 시스템 잡음과 측정 잡음에 대한 최적화가 필수적인데 잡음의 특성 외에 여러 가지 요인이 작용하기 때문에 시스템에 대한 경험을 바탕으로 적절하게 결정해야만 한다 [9]. 이 논문에서는 (주)피피솔에서 다년간 수행한 GNSS 정밀 자료처리 결과를 근거로 최적화된 시스템 잡음값을 사용하였다. 측정 잡음의 경우 표 2에 나와 있는 ReceivedSvTimeUncertaintyNanos값을 거리오차로 환산하여 설계하였다.

IV. NMEA와 원시데이터 기반 GPS 성능 비교

성능 비교에 앞서 NMEA를 분석한 결과 위성 고도각 제한을 두지 않고 매 시간 수집되는 모든 GPS 위성을 사용하는 특징을 보였다. 따라서 원시데이터 기반 GPS 위치 계산 역시 고도각

제한을 두지 않고 결과를 산출하였다. 그리고 NMEA와 GPS간의 성능 비교를 위한 실험횟수를 분리하여 진행한 이유는 칼만 필터 특성상 시간이 누적됨에 따라 수렴하는 특징을 보이기 때문이다. 성능비교 방법은 VRS를 이용하여 획득한 좌표를 기준으로 북쪽변위($\Delta north$), 동쪽변위($\Delta east$), 수직변위($\Delta vertical$) 방향으로 오차를 계산하였다. 그 결과는 표 3, 4, 5에 정리하였다. 모든 RMS(root mean square)와 차이값(Diff)은 소수점 둘째 자리에서 반올림하였고, 향상도(Improvement)는 소수점 첫째 자리에서 반올림하였다. 차이값, 향상도 계산방법은 식(6), (7)과 같다.

$$Diff = NMEA(m) - GPS(m) \tag{6}$$

$$Improvement(\%) = \frac{NMEA(m) - GPS(m)}{GPS(m)} \times 100\% \tag{7}$$

표 3, 4, 5를 살펴보면 원시데이터 기반 GPS 위치결과의 정확도 평균은 수평 RMS 3.05 m, 수직 RMS 3.82m, 3D RMS 4.97m 이며, NMEA 위치 결과의 정확도는 수평 RMS 3.84 m, 수직 RMS 4.92 m, 3D RMS 6.53 m 이다.

표 3. 수평 오차 결과

Table 3. Horizontal error result.

count	Horizontal		Comparison	
	GPS(m)	NMEA(m)	Diff	Improvement %
1	2.01	3.82	1.81	90 %
2	2.36	3.11	0.75	32 %
3	3.11	3.54	0.43	14 %
4	4.08	3.4	-0.68	-17 %
5	2.22	4.32	2.1	95 %
6	3.36	5.56	2.2	66 %
7	5.02	5.9	0.88	18 %
8	2.25	2.74	0.49	22 %
9	3.03	2.19	-0.84	-28 %
Average	3.05	3.84	0.79	32 %

표 4. 수직 오차 결과

Table 4. Vertical error result.

count	Vertical		Comparison	
	GPS(m)	NMEA(m)	Diff	Improvement %
1	2.6	0.78	-1.82	-70 %
2	2.53	7.93	5.4	213 %
3	2.7	8.6	5.9	219 %
4	6.51	5.1	-1.41	-22 %
5	3.03	6.25	3.22	106 %
6	8.05	2.48	-5.57	-69 %
7	4.6	5.16	0.56	12 %
8	1.66	4.42	2.76	166 %
9	2.72	3.55	0.83	31 %
Average	3.82	4.92	1.10	65 %

표 5. 3차원 오차 결과
Table 5. 3D error result.

count	3D		Comparison	
	GPS(m)	NMEA(m)	Diff	Improvement %
1	3.29	3.9	0.61	19 %
2	3.46	8.52	5.06	146 %
3	4.12	9.31	5.19	126 %
4	7.69	6.13	-1.56	-20 %
5	3.76	7.6	3.84	102 %
6	8.72	6.09	-2.63	-30 %
7	6.81	7.83	1.02	15 %
8	2.8	5.2	2.4	86 %
9	4.07	4.17	0.1	3 %
Average	4.97	6.53	1.56	50 %

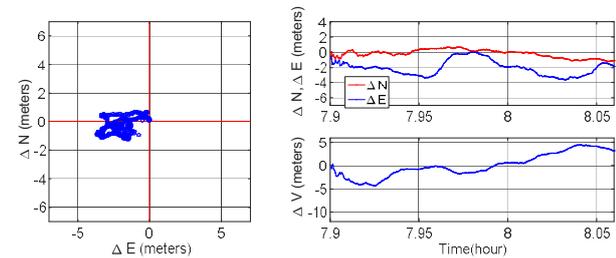


그림 3. 9회차 실험 GPS 결과 그래프
Fig. 3. 9th test GPS result plot.

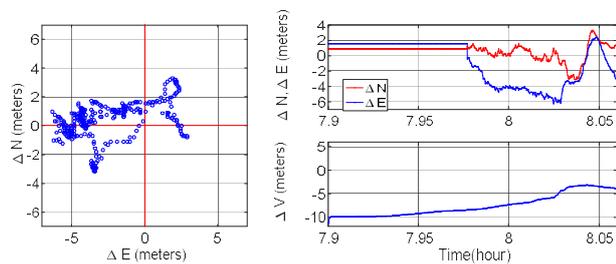


그림 4. 9회차 실험 NMEA 결과 그래프
Fig. 4. 9th test NMEA result plot.

원시데이터 기반 GPS 위치 정확도가 NMEA 정확도 대비 수평 32%, 수직 65 %, 3D 49 %의 향상된 정확도를 보이는 것을 알 수 있다.

원시데이터 기반 GPS 시계열 결과와 NMEA 시계열 비교를 위해 실험 9의 결과를 그림 3, 4에 표시하였다. 그림 3, 4의 좌측 수평오차 그래프를 보면, 원시데이터 기반 GPS의 성능이 자체 계산된 NMEA에 대비해 정확도와 정밀도가 높은 것을 알 수 있다. 그림 4 NMEA 우측 상단의 ΔNorth, ΔEast 결과를 보면 7.9 시간부터 변위가 없는 것과 같은 이상 현상이 발견되는데 실제 결과에서는 미세하게나마 변위가 발생하고 있으나 그래프 범위에 비해 작은 변위로써 표현되지 못한 것이다. 이는 그림 4 우측 하단의 수직 시계열의 변위가 발생한 것을 통해서도 확인할 수 있다. 그리고 이러한 작은 변위가 유지되는 것은 2-1절에서

언급한바와 같이 안드로이드 운영체제의 위치 정보 출력 시 다양한 센서들의 융합 필터 처리된 결과를 출력하는 것으로 판단된다. 즉, 실험 장비인 Nexus 9 내부의 GNSS 결과와 가속도계나 자이로스코프 등의 센서 정보를 융합하여 처리 할 때, GNSS와 센서들의 작은 변위량을 판단하여 정지/고정으로 처리했다고 판단된다. 또한, 4, 6, 7 번 실험을 제외한 모든 결과에서 원시데이터 기반 GPS 위치 정확도는 수평 2~3 m, 수직 2~4 m 수준으로 유지되는 것을 확인할 수 있으나 NMEA의 정확도는 일관성을 유지하지 않는 것으로 보아 GNSS이외의 다양한 센서 값들이 위치 결과에 상당한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 안드로이드 N운영 체제에서 제공하는 원시데이터의 의사거리를 이용한 GPS 위치 정확도와 안드로이드에서 자체 계산된 NMEA의 위치 정확도를 비교 분석하였다. 원시데이터 기반 GPS의 위치 정확도는 NMEA 대비 수평 32%, 수직 65 %, 3차원 49 %의 성능 향상을 확인하였다. 이는 기존 안드로이드 스마트폰, 태블릿에서 블랙박스 개념의 GNSS 위치 정보 활용에 머무는 것이 아니라, GNSS기반의 고정밀 위치 정보 생성 가능성을 확인하는 계기가 되었다. 그러나 스마트폰, 태블릿의 GNSS용 안테나와 모듈의 성능이 일반적인 외장형 GNSS 수신기 수준의 수신감도와 안정성이 확보되지 못하는 문제점을 안고 있어 향후 장치 자세에 따른 GNSS 성능 분석이 필요하다. 그럼에도 불구하고 안드로이드 GNSS 원시데이터의 도플러, 반송파위상 측정값을 활용한 다양한 연구가 활발히 진행 될 것으로 판단되며, 정밀도를 요구하는 위치기반서비스, 시설관리, 교통 정보 수집 체계 등에 스마트폰, 태블릿의 활용성 또한 높아질 것으로 판단된다.

Acknowledgments

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호. 16TBIP-C094408-02-000000).

References

[1] B. Simon, F. V. Diggelen, "Precise GNSS for everyone: Precise positioning using raw GPS measurements from android smartphones," *GPS World 2016*, Cleveland, OH : North Coast Media LLC, pp. 43-48, Nov. 2016.
[2] M. K. Jaakkola, S. Söderholm, S. Honkala, H. Koivula, S. Nyberg, and H. Kuusniemi, "Low-cost precise positioning

using a national GNSS network,” in *Proceedings of the 28th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation*, Tampa: FL, pp. 2570-2577, 2014.

- [3] K. M. Pesyna, R. W. Heath, and T. E. Humphreys, “Centimeter positioning with a smartphone-quality GNSS antenna,” in *Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation*, Tampa: FL, pp. 1568-1577, 2014.
- [4] D. H. Shin, C. S. Lim, H. J. Seok, D. H. Yoon, and B. W. Park “DGNSS-CP performance comparison of each observation,” *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 20, No. 5, pp. 433-439, Oct. 2016.
- [5] W. Kadous, and J. Ganesh(2013, May). Beyond the blue dot : New features in android location. *Google i/o 2013* [Internet]. Available:

[http://commondatastorage.googleapis.com/io-2013/presentations/106%20-%20Beyond%20the%20Blue%20Dot-%20New%20features%20in%20Android%20Location%20\(1\).pdf](http://commondatastorage.googleapis.com/io-2013/presentations/106%20-%20Beyond%20the%20Blue%20Dot-%20New%20features%20in%20Android%20Location%20(1).pdf)

- [6] Google Developers. “Raw GNSS measurements” [Internet]. Available: <https://developer.android.com/guide/topics/sensors/gnss.html>
- [7] Navstar GPS Space Segment/Navigation User Segment Interface, GPS Interface Specification IS-GPS-200, Revision H, Global positioning system directorate, 2015
- [8] S. P. Kim, *Essential Kalman Filter*, 1st ed. Uiwang, Gyeonggi: AJIN, pp. 42, 2010.
- [9] H. I. Kim, K. D. Park, “Development of intelligent GNSS positioning technique based on low cost module for an alley navigation,” *Journal of The Korean Society for Geo-Spatial Information System*, Vol. 24, No. 3, pp. 11-18, Sep. 2016.



김 준 성 (Joonseong Gim)

2008년 8월 : 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학사)
 2008년 9월 ~ 2011년 2월 : 전자컴퓨터통신공학과 박사수료
 2015년 12월 ~ 현재 : ㈜피피솔 기술연구소 연구원
 ※ 관심분야 : DGNSS, WAVE



박 관 동 (Kwan-dong Park)

2000년 12월 : Univ. of Texas at Austin Ph.D
 2001년 1월 ~ 2002년 6월 : Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics Post-doc. Fellow
 2002년 7월 ~ 2004년 2월 : 한국천문연구원, GPS 연구그룹, 선임연구원
 2004년 3월 ~ 2007년 2월 : 국민대학교 산림과학대학 산림자원학과, 조교수
 2007년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 공간정보학과 교수
 ※ 관심분야 : DGNSS, PPP-RTK, GNSS