

도심환경에서의 밀결합 측위 기법

황유민*, 오주영*, 김윤현*, 김진영*, 김하성**, 지규인***

Closely Coupled Positioning Technique in Urban Environments

Yu Min Hwang*, Ju Young Oh*, Yoon Hyun Kim*, Jin Young Kim*, Ha Sung Kim**, and Gyu-In Jee***

요 약

최근 위치해를 얻기위해서 위성을 기반으로한 GPS(Global Positioning System) 가 많이 이용되고 있다. 그러나 도심지역 등에서는 다중경로에 의한 영향으로 신뢰성 낮은 위치 정보를 수신할 수도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 GPS신호와 QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) 신호를 통합하는 밀결합 측위기법을 제안하고자 한다. 또한 AP(access point)정보를 이용함으로써 Wi-Fi 신호와 GNSS신호를 통합하는 밀결합 알고리즘을 제안하고자 한다. 본 연구과제는 도심지역에서 항법성능을 향상시키기 위해서 GPS/QZSS/Wi-Fi 통합항법 알고리즘을 개발하고, 이를 차량주행실험을 통하여 위치의 가용성과 정확도를 기준으로 성능분석을 수행하였다.

Key Words : GNSS, GPS, QZSS, Wi-Fi, LBS, 위성항법시스템

ABSTRACT

Currently, GPS(Global Positioning System) is used to find user location information. However, in some cases, especially in urban environments, we receive unreliable location information due to multipath fading. In order to resolve this problem, we propose a closely coupled positioning technique where GPS signal is combined with QZSS signal. Also we proposed and analyze a combining algorithm of GNSS and Wi-Fi signals to get closely coupled location information by referring AP information. Finally, this paper proposes a combined GPS/QZSS/Wi-Fi navigation algorithm to improve navigation performance, and it is verified by testing of car deriving according to availability and accuracy standard.

I. 서 론

미국 국방성에 의하여 개발, 운용되는 GPS(Global Positioning System)는 이미 항공, 해양 및 육상 항법뿐 아니라 비행기의 이착륙, 선박의 항구진입, 측지, 측량 등 고 정밀을 요구하는 응용에서도 널리 사용되고 있다.[1] 미국은 GPS 근대화(GPS modernization) 프로그램을 통해 위성항법 시장에서의 우위를 유지하고 있다. 이 프로그램에 따르면, 2004년 발사 위성부터 L2 주파수에 새로운 민간용 신호(L2C)가 추가되고, 2005년 발사 위성에는 L5 주파수에 항해를 위한 새로운 신호가 추가될 예정이다. 하지만 GPS는 위성을 기반으로 위성신호를 수신하고 이를 이용하여 위치를 계산하므로, 장애물에 의해서 신호 수신에 어려운 지역인 도심이나 숲과 같은 곳에서는 위치를 계산할 수 없다. 위치를 계산한다고 할 수 있더라도 다중경로 오차에 의해서 위치 오차가

증가하므로 신뢰할 수 없는 결과를 가져오게 된다. 한편 일본은 GPS에의 종속을 탈피하기 위하여 GPS와 호환되지만 독자적인 위성항법 시스템인 QZSS(Quasi-Zenith Satellite System)를 개발하였고, 도심지역에서 고층건물이나 신호의 수신을 방해하는 장애물에 의해 신호가 차단되는 문제의 해결을 목적으로 2011년 9월 첫 번째 위성인 MICHIBIKI를 발사했다. 이후로 QZSS의 테스트를 마치고 현재 위치를 계산할 수 있는 신호를 송신하고 있다. 또한 일본의 QZSS는 GPS와 호환성과 상호 운용성이 높은 신호를 송신하므로 GPS 측정치와 결합이 용이하다. 특히 QZSS L1 신호는 GPS L1 신호와 동일한 반송파, 코드, 그리고 메시지 형식을 가지고 있으므로 기존 GPS 항법 알고리즘을 이용하여 GPS와 쉽게 결합될 수 있다.

본 연구 과제에서는 QZSS의 GPS 호환성과 상호 운용성에 주목하여 QZSS와 GPS를 통합한 통합 위성항법 알고리

* 본 연구는 KT와 방송통신위원회의 국책과제 일환으로 연구수행에 의한 결과물임.

*광운대학교 전자융합공학과 유비쿼터스시스템연구실 (yumin@kw.ac.kr, ultrayh1873@kw.ac.kr),

KT 종합기술원 유무선네트워크연구소 (hasung.kim@kt.com), *건국대학교 전자공학부(gijee@konkuk.ac.kr)

접수일자 : 2012년 9월 14일, 수정완료일자 : 2012년 9월 17일, 최종 게재확정일자 : 2012년 9월 20일

즘을 개발하였다. 또한, Wi-Fi를 추가적으로 결합하여 보다 정확한 위치해를 추정할 수 있는 GPS/QZSS/Wi-Fi 통합 밀결합 측위 알고리즘을 개발하였다. Wi-Fi의 추가적인 결합은 최근 스마트폰 사용자가 늘어남에 따라 GPS와 Wi-Fi를 통합하여 보다 정확한 위치해를 추정하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 각 통신사에서 스마트폰 사용자를 위해 많은 Wi-Fi AP를 설치하고 있다. 특히 유동인구가 많은 도심지역에 많은 Wi-Fi AP가 설치되어 있고 GPS와 Wi-Fi 수신모듈이 탑재되어있는 스마트폰을 이용하여 GPS와 Wi-Fi를 통합한다면 도심지역의 GPS 문제점을 해결할 수 있기 때문에 GNSS와 Wi-Fi의 통합은 신뢰성 있는 위치좌표를 얻을 수 있는 방안이 된다. 또한 본 연구에서는 밀결합 측위 알고리즘의 성능 검증을 위하여 도심지역에서 차량주행실험을 실시하였고 위치의 가용성과 정확도를 기준으로 성능 평가를 실시하고 분석하였다. GPS/QZSS/Wi-Fi 통합 항법 알고리즘의 입력 데이터는 각 시스템에 대한 모듈을 탑재한 차량으로 차량주행 실험을 통하여 획득하였고 시스템의 통합을 위해서 시각 동기화 하였다. 통합항법 알고리즘은 저장된 실제 데이터를 읽어와서 후처리로 PC에서 Iterated WLSE기반으로 거리 측정치 영역에서 통합되었다.

II. QZSS 위치 측위

2.1 QZSS 이온층 오차

일반적으로 단일 주파수 GPS 측정치를 이용하여 위치를 계산할 때는 항법메시지에 포함된 이온층 오차보정 변수를 이용하여 이온층에 의한 지연을 보정한다. QZSS 항법메시지에는 GPS와 마찬가지로 이온층 오차보정을 위한 변수들이 포함되어있다. 이 변수들은 일본의 한정된 지역에서만 사용가능하며, 그 외의 지역에서는 GPS 항법메시지에 포함된 이온층 오차보정 변수들을 사용해야 한다. 만약 이 외의 지역에서 QZSS 이온층 오차보정 변수를 이용할 경우 항법 오차는 증가한다. 아래의 그림 2는 QZSS에 포함된 이온층 오차보정 변수의 적용지역을 나타낸다.[2]



그림 1. QZSS 이온층 오차보정 변수 적용 지역

2.2 QZSS 위성 궤도

QZSS 위성은 경사각을 갖는 정지궤도(Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, IGSO) 위성과 경사각이 없는 정지궤도(Geosynchronous Orbit, GSO) 위성 4*7개로 구성된 계획이다. IGSO 위성은 8자 형태의 램니스케이드 궤적을 갖고 있으며, 현재 첫 번째 위성 MICHIBIKI가 위성궤도와 송출 신호 검증을 마치고, 항법신호를 송신하고 있다. IGSO 위성의 공전 주기는 지구자전 주기와 같은 약 23시간 56분이다. 아래의 그림 1은 MICHIBIKI 위성의 궤도 지적선을 나타내고, 표 2는 궤도의 주요 변수를 나타낸다.[3]

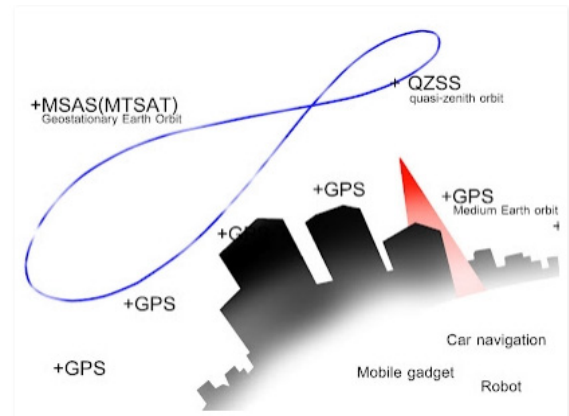


그림 2. MICHIBIKI 위성 궤도 지적선

2.3 QZSS 시각과 좌표 시스템

QZSS의 시각 시스템(QZSST)은 UTC (NICT)를 따르며, GPS 시각 시스템(GPST-UNSO) 사이의 차이는 위성항법 메시지에 포함된 위성시계 오차 변수를 이용해서 보정한다. 1초의 길이와 주 번호(week number)의 시작점은 GPS와 동일하다. 따라서 QZSS는 GPS 시각과의 차이를 보정하기 위해서 Galileo와 같이 별도의 보정 변수 제공하거나 추정하는 알고리즘이 필요하지 않다.[4]

QZSS의 좌표시스템 JGS (Japan satellite navigation Geodetic System, JGS)는 세계 기준 좌표계(International Terrestrial Reference System, ITRS)를 따라서 정의되어있다. QZSS 좌표 시스템과 GPS 좌표 시스템 WGS84와의 차이는 0.02m 보다 작도록 설계되었다. 좌표 시스템 차이는 측지학을 연구하는 분야를 제외하고는 무시할 수 있는 값이므로 시각 시스템과 동일하게 두 좌표계 일치 위한 보정정보를 제공하지 않는다.[5]

III. 알고리즘 구현

3.1 GPS/QZSS 통합항법 알고리즘

GPS/QZSS 통합항법은 기존 GPS 단독항법에 측정치 하

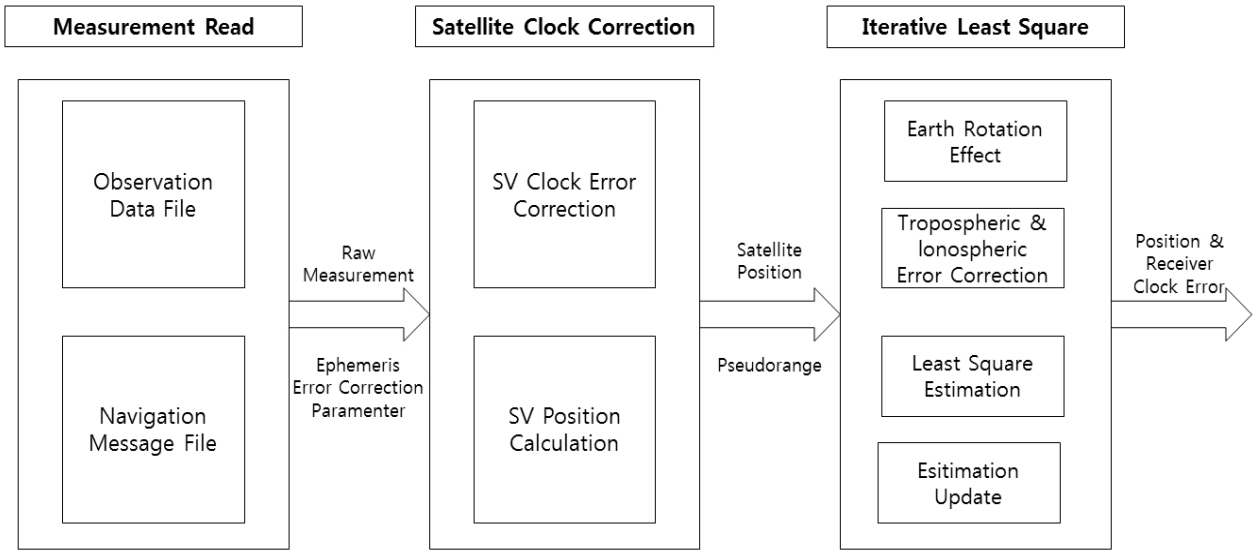


그림 3. GPS/QZSS 통합항법 구조도

나가 추가된 형태로 구현되었다. QZSS 위성위치는 QZSS 항법메시지를 이용해서 GPS 위성계산식과 동일하게 계산되며, 측정치의 오차보정 방법도 GPS 와 동일한 방법으로 보정한다. QZSS 위성의 PRN은 193번부터 197번부터 할당되어 있다. 통합항법 시 PRN 193 측정치 하나가 추가 되었고, 따라서 현재 동작하는 MICHIBIKI 위성의 PRN 193번이다. 아래의 그림 3은 GPS/QZSS 통합항법 알고리즘의 구성도를 나타낸다. 항법 알고리즘은 측정치를 시각 동기화 하고 전처리하는 부분과 위성 위치를 계산하는 부분 그리고 Weighted Least Square Estimation(WLSE)를 이용하여 위치를 계산하는 부분으로 나누어진다.

3.2 GPS/QZSS 데이터 획득 및 전처리

GPS와 QZSS 데이터 획득을 위해서 Novatel Flexpak6 수신기를 이용하였다. 수신기로부터 출력되는 거리 측정치와 위성궤도 정보를 파일로 로그하고 이를 RINEX(Receiver Independent Exchange Format) 2.1 형식으로 변환하였다. RINEX 형식은 다양한 GPS 수신기로부터 수신된 GPS 데이터의 상호 교환이 쉽게 이루어 질 수 있도록 베른 대학의 천문학회에 의해 개발되었다. 일반적으로 다양한 수신기 제조업체는 고유의 수신기 형식과 RINEX 형식사이의 변환 프로그램을 제공하거나 출력을 지원한다. RINEX 형식은 의사거리, 도플러, 반송파 위상 등 측정치를 포함한 observation file과 위성위치 계산을 위한 궤도정보와 위성시계오차 그리고 이온층 오차 보정 변수를 포함하는 navigation file로 구성되어 있다. 먼저, observation file로 변환하기 위해서는 Novatel 수신기에서 RANGE 측정치를 기록해야 한다. Navigation file로 변환하기 위해서는 Novatel 수신기에서 RAWEPHEM, IONUTC와 QZSSRAWEPHEM, QZSSIONUTC를 기록해야 한다. RAWEPHEM은 위성궤도 정보를 포함하고 있으며,

IONUTC는 이온층 오차보정 변수를 포함하고 있다.

3.3 GPS/QZSS/Wi-Fi 통합항법

일반적으로 Wi-Fi 측정치는 신호세기 즉 RSSI(received signal strength indicator)가 이용된다. Wi-Fi RSSI를 이용하는 방법은 크게 fingerprint와 trilateration 두 가지로 나누어진다. 먼저 fingerprint 방식은 구역을 나누고 해당 구역에서 수신된 Wi-Fi RSSI에 대한 데이터베이스를 만들고 이를 비교하는 방식이다. 이 방법은 Wi-Fi RSSI 맵 데이터베이스를 구축해야 하고, 구축하더라도 AP 설치환경이 변경되면 맵 데이터베이스를 갱신해야하는 단점이 있다. 또 다른 방법인 trilateration으로 RSSI를 거리로 환산함으로써 위치를 계산하는 방법이다. 이 방법은 RSSI를 거리로 환산하는 path-loss model를 정확하게 구하기 어렵고, AP 위치를 알아야 하는 단점이 있다. 반면이 이 방법은 GPS/QZSS와 동일하게 거리측정치와 송신위치를 알고 있을 때 수신기의 위치를 계산하는 방법을 이용하므로 위성항법시스템과 쉽게 결합가능 하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 Wi-Fi RSSI를 거리로 변환하고 GPS/QZSS 측정치와 결합하는 통합항법 알고리즘을 개발하였다.

3.4 GPS/QZSS/Wi-Fi 통합항법 알고리즘

그림 4는 통합항법 알고리즘의 구조도를 나타낸다. 그림을 보면 기존의 GPS/QZSS 통합항법 구조에서 Wi-Fi RSSI 측정치를 거리와 path-loss 값으로 변환하여 기존과 동일하게 WLSE를 적용하도록 되어있다. Wi-Fi 측정치는 거리오차가 GPS/QZSS보다 크므로 GPS/QZSS의 측정치 수가 4개 이하일 때만 이용하도록 한다. 만약 GPS/QZSS 측정치 수가 4개 이하가 되면 Wi-Fi 측정치들을 추가적으로 이용하여 위치와 위성 시계오차를 추정한다.

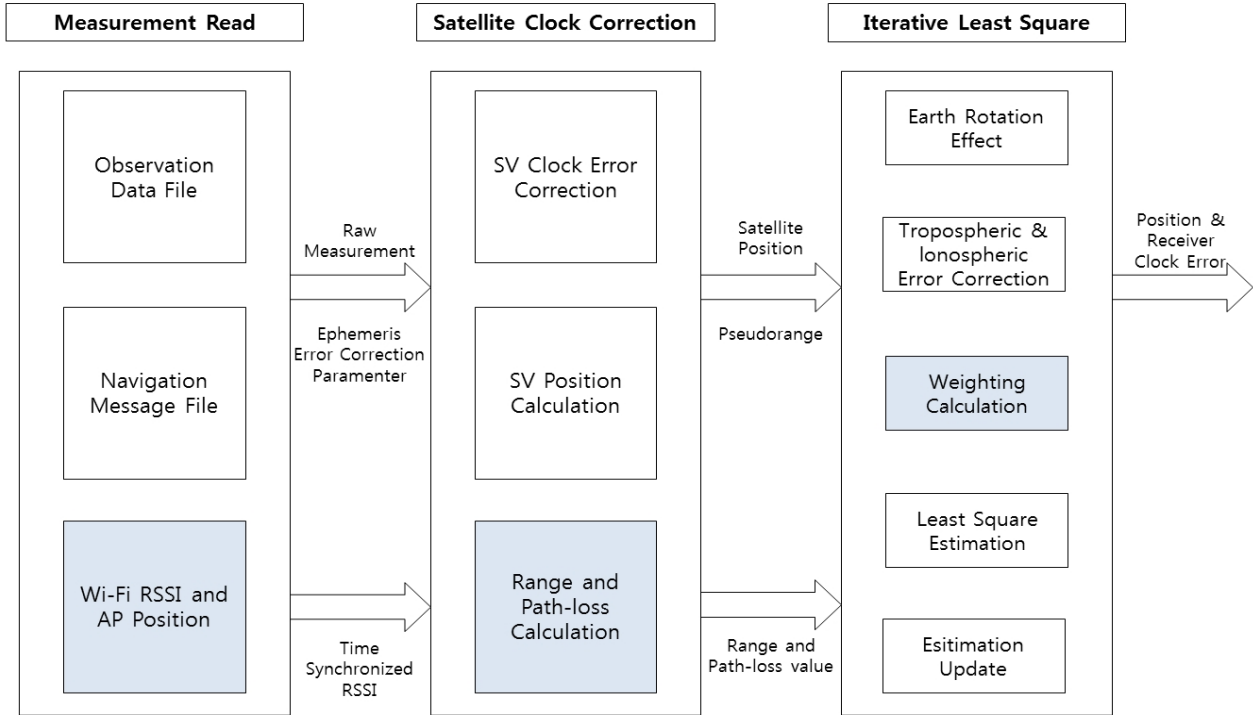


그림 4. GPS/QZSS/Wi-Fi 통합항법 구조도

IV. 성능평가 및 분석

4.1 GPS/QZSS 통합 항법 성능분석

GPS/QZSS 통합항법 성능을 평가하고 분석하기 위해서 정지상태와 동적상태에서 실험을 수행하였다. 정지상태실험은 QZSS 측정치 추가 이용에 따른 정확도 향상 정도와 원인을 분석하는 것을 목적으로 하며, 신호의 차단이 없는 개활지에서 수행하였다. 동적상태실험은 QZSS 측정치 추가 이용에 따른 가용성 향상을 평가하는 것을 목적으로 하며, 도심지역에서 차량 주행실험을 수행하였다. GPS/QZSS 통합항법의 성능향상을 평가하기 위해서 GPS만을 이용한 경우 위치해와 비교하였다. 추정된 위치의 오차는 이전에 정밀 측위된 위치를 기준으로 계산하였다. 아래의 그림 6과 표 3에 위치추정 결과를 나타내었다. 그림 6은 수평오차를 나타낸 것으로 GPS/QZSS 통합항법 결과가 GPS만을 이용한 경우보다 오차가 더 작음을 알 수 있다. 표 3의 수평위치 오차 결과를 보면 GPS/QZSS 통합항법 결과 오차가 더 작지만 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 수직오차의 경우 평균오차는 크게 향상되지 않았지만 최대오차가 크게 향상됨을 알 수 있다. 결과를 보면 위치정확도가 약 5%정도 향상되었다. 일반적으로 위성항법의 항법해에 영향을 미치는 요인은 크게 위성배치에 대한 영향과 측정치 오차에 대한 영향으로 나눌 수 있다. QZSS 통합을 통해서 위 두 가지 요인 중 어떤 것에 의해서 영향을 받는지 분석하였다. 먼저 위성배치에 대한 영향은 DOP(Dilution of precision) 변화를 통해서 분석 가능하

며, 측정치 오차에 대한 영향은 GPS와 QZSS 측정치의 residual를 비교함으로써 분석 가능하다.

표 1. WLSE와 EKF 위치추정 결과

		GPS	GPS+QZSS
수평오차	RMS [m]	2.0774	1.9839
	MAX [m]	7.2993	7.2752
수직오차	RMS [m]	3.6488	3.4779
	MAX [m]	11.2957	3.38843

4.2 GPS/QZSS/Wi-Fi 통합 항법 성능분석

GPS/QZSS/Wi-Fi 통합항법 성능을 분석하기 위해서 도심지역에서 차량주행실험을 수행하였다. GPS 단독, GPS/QZSS 통합, GPS/QZSS/Wi-Fi 통합에 대해서 정확도와 가용성을 평가하였다. 추가적으로 GPS/QZSS/Wi-Fi 통합항법에 대해서 무지향성 안테나 패턴과 전방향성 안테나 패턴에 대해서 항법 결과도 비교하였다. 위치오차 계산을 위해서 Novatel SPAN의 항법해를 기준 값으로 이용하였다. 총 4가지 경우에 대해서 가용성과 위치 정확도를 아래의 표 2와 3에 나타내었다. 먼저 GPS, GPS/QZSS, GPS/QZSS/Wi-Fi 전방향성 세가지 결과를 보면 Wi-Fi 측정치를 추가적으로 이용함으로써 가용성은 향상되었지만 위치오차는 조금 증가함을 알 수 있다. 이는 Wi-Fi 거리 정확도가 GPS에 비해서 큰 오차를 갖기 때문이다. 추가적으로 표 2와 3에서 전방향성과 무지방향성 안테나 패턴 결과를 비교해보면 전방향성의 경우 가용성이 크고 위치 오차도 더 작음을 알 수 있다.

전방향성을 이용하는 경우 무지향성의 경우보다 Wi-Fi 거리 오차가 적으므로 사용할 수 있는 Wi-Fi 측정치 수가 증가하므로 가용성과 정확도가 모두 향상된다. 두 경우에 대해서 Wi-Fi 거리정확도를 평가하기 위해서 AP위치와 SPAN 위치를 이용해서 실제 거리를 계산하고 비교하였다.

표 2. 위치오차 계산 결과

		GPS	GPS+QZSS	GPS+QZSS+Wi-Fi (전방향성)	GPS+QZSS+Wi-Fi (무지향성)
수평 오차	RMS [m]	14.9	8.7	9.01	9.03
	MAX [m]	96.6	44.4	44.4	44.4
수직 오차	RMS [m]	21.5	11	13.1	15.3
	MAX [m]	77.8	61.2	61.2	63.1

표 3. 가용성 계산 결과

	GPS	GPS+QZSS	GPS+QZSS+Wi-Fi (전방향성)	GPS+QZSS+Wi-Fi (무지향성)
가용성 [%]	40.2	78.3	86.1	82.8

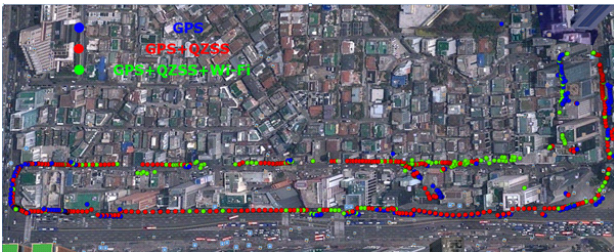


그림 5. GPS 단독, GPS/QZSS 통합, GPS/QZSS/Wi-Fi 통합 방법 결과

V. 결론

본 연구에서는 GPS/QZSS/Wi-Fi 통합항법 알고리즘을 개발하고 실제 데이터를 이용하여 성능을 분석하였다. 성능은 가용성과 정확도 향상을 기준으로 분석하였다. 통합항법 알고리즘은 저장된 실제 데이터를 파일로 읽어와서 후처리로 PC의 MATLAB상에서 개발되었다. 통합항법 알고리즘은 Iterated WLSE를 기반으로 하였으며, GPS/QZSS/Wi-Fi가 거리 측정치 영역에서 통합되었다. 먼저 GPS/QZSS 통합항법 알고리즘은 기존의 GPS 항법 알고리즘에 PRN 193번 측정치가 추가적으로 입력되는 형태로 개발되었다. 통합항법 알고리즘은 정지상태와 동적상태에서 데이터를 수신하고 성능을 분석하였다. 개활지의 정지상태 실험을 통해서

QZSS 측정치 이용에 따른 정확도 향상 및 원인을 분석하였다. 그 결과 정확도가 5% 향상되었으며, 거리 측정치 정확도 보다는 DOP가 위치 정확도에 주로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 도심지역 차량주행실험을 통해서 가용성 향상 정도를 분석하였다. 실험 결과 GPS만을 이용할 때보다 GPS/QZSS 통합항법을 통해서 약 23% 가용성이 향상됨을 확인하였다. 도심지역에서 GPS/QZSS 통합항법의 가용성을 증가를 위해서 Wi-Fi를 추가적으로 결합하는 연구를 수행하였다. Wi-Fi RSSI 측정치를 거리로 변환하고, 이를 GPS/QZSS 거리 측정치와 함께 통합함으로써 위치를 추정하였다. Wi-Fi RSSI 측정치를 거리로 변환할 때, 도심지역에서 실험적으로 얻어진 NLOS 모델을 이용하였다. Path-loss 값을 계산을 위해서 무지향성 안테나 패턴과 전방향성 안테나 패턴 두 가지 방법을 이용하고 성능을 비교하였다. 그 결과 전방향성 안테나 패턴을 이용한 경우 Wi-Fi 거리오차가 더 작으므로, 정확도와 가용성 모두 향상 시킬 수 있었다. GPS/QZSS 통합항법과 GPS/QZSS/Wi-Fi 통합항법 결과를 비교한 결과, GPS/QZSS 측정치가 4개보다 작은 구간에서 Wi-Fi 측정치의 추가적인 이용으로 가용성이 증가하였다. 하지만 Wi-Fi 거리 측정치의 오차가 GPS/QZSS 보다 크므로, 위치오차는 조금 증가하였다. 추가적으로 현재 구현된 알고리즘에서는 전방향성 안테나 패턴을 적용 시 필요한 방위각 정보를 이전에 추정된 위치로부터 계산하였다. 보다 정확한 추정을 위해서는 방위각을 위치의 함수로 나타내고 이를 추정하는 방법을 이용해야 한다. 향후 연구 방향으로 실제 적용을 위해서는 AP 안테나 기울기, 비선형 등 고려할 사항에 대해서 추가적으로 오차를 감소시킬 수 있는 요소를 분석하고 수식적으로 정리가 필요하다.

참고 문헌

- [1] A. Ward, A. Jones, and A. Hopper, "A new location technique for the active office," IEEE Personal Communications., vol. 4, no. 5, pp. 42 - 47, Oct. 1997.
- [2] In-Su Lee · Jae-One Lee · Sang-Jun An, 2004, "Performance Analysis of Real-Time Kinematic GPS Positioning using Continuous Operating Reference Station in Korea", The Journal of Geographic Information System Association of Korea, Vol. 12, No. 4, pp. 371~382
- [3] N. B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, "The cricket location-support system," Proc. 6th Int. Conf. Mobile Computing and Networking (ACM Mobicom), pp. 32 - 43, Boston, USA, 2000.
- [4] 안광훈, 김현철, 이덕권, 권종원, 김희식, "안정적인 LBS 단말기 설계를 위한 GPS 오차 분석", CICS, 2010 정보 및 제어 학술대회 논문집, 2010
- [5] Hollreiser M., Erhard P., Lorenzi P., Charles S. Dixon, 2003, "Galileo User Segment Overview" ION GPS/GNSS 2003, pp 1914~1928

저자

황 유 민(YuMin Hwang)

준회원



- 2012년 2월 : 광운대학교 전자공학과 졸업
- 2012년 3월~현재 : 광운대학교 전자공학과 석사과정

<관심분야> : VLC, 재난 통신, 디지털통신

오 주 영(JuYoung Oh)

준회원



- 2012년 2월 : 광운대학교 전자공학과 졸업
- 2012년 3월~현재 : 광운대학교 전자공학과 석사과정

<관심분야> : WBAN, 디지털통신

김 윤 현(YoonHyun Kim)

정회원



- 2006년 2월 : 광운대학교 전자공학과 졸업
- 2008년 2월 : 광운대학교 전자공학과 석사
- 2008년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야> : 가시광 통신, 협력통신, 인지무선통신

김 진 영(JinYoung Kim)

종신회원



- 1998년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 2001년 2월 : SK텔레콤 네트워크연구소 책임연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

<관심분야> : 디지털통신, 가시광통신, UWB, 부호화, 인지무선통신, B4G 이동통신

김 하 성(Hasung Kim)



- 1994년 2월 : 고려대학교 전자공학과 학사
- 1996년 2월 : 고려대학교 전자공학과 석사
- 2004년 12월 : Georgia Institute of Technology, ECE 박사
- 2005년 3월 ~ 2012년 3월 : LG전자 MC연구소(수석연구원)
- 2012년 4월 ~ 현재 : KT 종합기술원 유무선네트워크연구소 (매니저)

<관심분야> : 무선통신, 위치측위

지 규 인(GyuIn Jee)



- 1982년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 학사
- 1984년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 석사
- 1989년 9월 : Case Western Reserve Univ. 시스템공학 박사
- 1992년 3월 ~ 현재 : 건국대학교 전자공학과 교수

<관심분야> : 위성항법, 무선측위, 차량자율주행