

論文

웨이블릿 임계화 기법을 이용한 INS-GPS 결합항법 시스템의 성능향상

강철우*, 박찬국**, 조남익***

Improvement of INS-GPS Integrated Navigation System using Wavelet Thresholding

Chul Woo Kang*, Chan Gook Park** and Nam Ik Cho***

ABSTRACT

This research have introduced wavelet signal processing technic for improving navigation signals. INS signals can be distorted with conventional pre-filtering method such as low-pass filtering by unwanted smoothing on real signals. But in this paper, wavelet thresholding method is implemented to INS signal to denoise for INS-GPS integrated system. This method reduces signal noise but not distorts the rapid varing signal. And this paper applied thresholding to INS-GPS integrated navigation system and improved navigation performance.

초 록

본 논문에서는 웨이블릿 잡음제거 기법 중 하나인 임계화 기법을 이용하여 관성센서 신호의 잡음을 제거하면서도 운동에 의한 신호변화는 상대적으로 왜곡이 적은 필터링기법을 제안하였다. 이는 기존 연구들이 웨이블릿의 장점을 충분히 활용하지 못하고 저역통과 필터와 같은 형태로 사용되기 때문에 급격히 변화하는 항체에 대하여는 부적합한 점을 개선하기 위한 것이다. 제안된 방법의 성능 확인을 위하여 INS-GPS 결합항법 시스템에 적용하였다.

Key Words : Wavelet denoising(웨이블릿 디노이징), INS(관성항법 시스템), Inertial sensor(관성센서), Thresholding(임계화 기법)

1. 서 론

최근 관성항법시스템(INS)과 GPS 결합항법 시스템에서 다양한 신호처리 알고리즘을 적용하여 성능을 향상시키려는 연구가 주목을 받고 있다 [1]. 그 중 비교적 새로운 신호처리 기법인 웨이블릿 변환(wavelet transform)을 이용하여 INS-GPS 결합항법 시스템에서의 각종 신호를 처

리하여 성능을 향상시키려는 연구가 진행되었다 [2],[3],[4]. 이러한 기존 연구에서는 주로 웨이블릿 변환의 특성을 이용해 특정 주파수 이상의 테이터를 없애는 형태로 사용하여 저역통과 필터(low pass filter)나 대역통과 필터(band pass filter)와 비슷한 역할을 수행하도록 하였다. 그러나 이는 웨이블릿 변환의 이점을 잘 활용하지 못한 것으로 본 논문에서는 웨이블릿 잡음제거(denoising) 기법 중 하나인 임계화(thresholding) 기법을 이용하여 관성센서에 발생하는 오차를 줄이는 연구를 수행하였다.

기존 INS-GPS 결합항법 시스템에서 INS와 GPS 신호에 발생하는 고주파 잡음이나 순간적으로 튀는 값을 억제하기 위하여 주로 저역 통과필

† 2009년 5월 27일 접수 ~ 2009년 7월 28일 심사완료

* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

교신저자, E-mail : chanpark@snu.ac.kr

서울시 관악구 관악로 599번지

*** 서울대학교 전기공학부

터로 구성된 전처리 필터(pre-filter)가 성능을 높이는 역할을 수행하였다. 그러나 INS 신호의 경우는 저역통과 필터를 사용하면 성능에 악영향을 끼치는 경우가 종종 발생한다. 그 이유는 항체의 급격한 운동에 의해 가속도와 각속도가 크게 변화하는 값을 나타내는데, 저역통과 필터를 사용함으로써 신호의 빠른 변화를 무시하고 완만한 변화를 가지는 형태로 신호를 왜곡시킨다. 이 때문에 오차가 발생하게 되는데 저역통과 필터와 같은 기존 신호처리 기법을 이용하여 INS 신호의 잡음을 제거하면 오히려 항법성능을 저하시키는 결과를 보인다. 이는 본 연구의 결과에서 저역통과 필터를 사용하여 얻은 결과에서 살펴볼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복할 수 있는 방법으로 웨이블릿 임계화 기법을 이용하여 고주파 신호 왜곡을 줄인 INS 신호 전처리 필터를 제안하고 성능을 알아보았다.

II. 웨이블릿 잡음제거 기법

2.1 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환(wavelet transform)은 최근 신호처리 분야에서 주목받고 있는 신호 변환기법으로 주로 이미지의 변환과 복원, 오디오 신호의 변환 등에 많이 이용되고 있다. 그림 1의 오른쪽 위에 표지된 바와 같이 기존의 푸리에 변환은 전체 시간영역에서의 신호를 각 주파수 성분의 출력으로 분해함으로써 전체 시간에 대한 각 주파수 성분으로 신호를 분해한다. 그러나 항체의 움직임에 따라 신호특성이 변하는 항법센서의 신

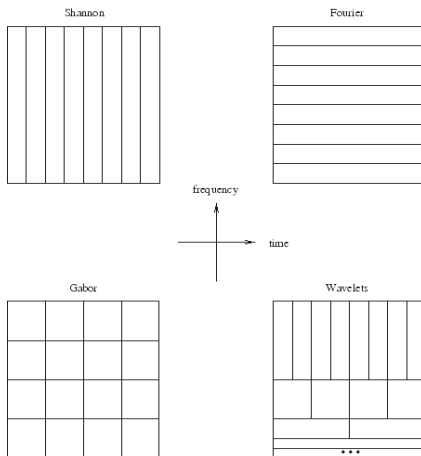


그림 1. 시간-주파수 평면에서의 다양한 형태의 샘플링 : Shannon, Fourier, Gabor, Wavelet [7]

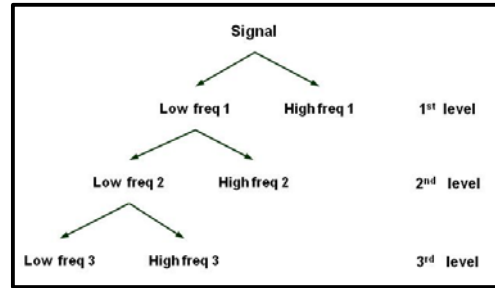


그림 2. 웨이블릿 변환 [6]

호는 변환 시 특정 시간의 움직임에 의한 신호변화가 전체 시간 영역의 주파수 성분에 나타내게 된다.

그러나 웨이블릿 변환은 시간-주파수 영역으로의 분해를 수행한다[5],[6]. 즉, 각각의 시간에서의 신호의 주파수 성분을 알아볼 수 있는 특성을 지니고 있어서 특정시간에 변화하는 신호의 특성을 잘 파악할 수 있게 해준다. 웨이블릿 변환과 푸리에 변환의 비교는 그림 2와 같다.

웨이블릿 변환에 의해 나온 결과는 저주파 영역에서는 넓은 시간 범위의 주파수 성분으로 계산되고 고주파 영역에서는 짧은 시간 사이의 주파수 성분으로 계산된다. 이는 저주파 성분을 보기 위해서는 긴 시간의 데이터가 필요하고 고주파 성분은 짧은 시간에 변화하는 값만 있어도 계산 가능함을 의미하므로 직관과도 일치한다.

이산시간 웨이블릿 변환은 아래와 같이 이루어진다.

$$\phi(t) = \sum_k g_0[k] \phi(2t-k) \tag{1}$$

$$\psi(t) = \sum_k g_1[k] \phi(2t-k) \tag{2}$$

웨이블릿 함수는 식 (1), (2)의 관계를 만족하는 모든 함수가 될 수 있다. 식 (1)에서 ϕ 는 스케일 함수라고 하고 식 (2)에서 ψ 는 웨이블릿 함수라고 한다. g_0 와 g_1 는 각각 웨이블릿 계수들을 뜻한다. 한 단계(level) 위의 스케일 함수는 한 단계 아래의 스케일 함수와 웨이블릿 함수의 컨볼루션으로 표현할 수 있다. 이는 저주파 영역을 다시 고주파 영역과 저주파 영역으로 분해할 수 있음을 의미한다. 이러한 관계는 그림 2에 소개되어 있다. 웨이블릿 변환이 한 단계씩 진행됨에 따라 점점 저주파로 나뉘게 되는데 저주파로 내려갈 때 마다 2배 크기의 데이터를 필요로 하기 때문에 분해 가능한 가장 낮은 주파수 영역은

전체 데이터를 이용해서 계산된 푸리에 변환시의 DC값과 일치하게 된다.

2.2 웨이블릿 임계화 기법

웨이블릿 변환을 이용하여 잡음을 감소시키는 기법은 이미지에 포함된 각종 잡음을 제거하기 위하여 개발되었다. 그 중에서 가장 대표적인 방법이 임계화 기법으로 대표되는 웨이블릿 축소 (shrinkage) 기법이다[5],[8]. 웨이블릿 임계화 기법은 웨이블릿 변환을 수행하여 계산된 웨이블릿 계수가 임계값에 미치지 못할 경우 0으로 만든다. 이 방식은 실제 신호의 크기가 잡음 수준에 비해 크다는 가정을 하고 전체 주파수 영역에 대해서 잡음이 섞여 있는 경우를 가정한다. 이 경우 특정 주파수 성분에서의 값이 신호의 알려진 잡음수준보다 작은 값의 데이터를 가지게 되면 그 값은 실제로는 0이고 작은 데이터는 잡음으로 간주하여 버리게 된다. 일반적인 저역통과 필터는 특정 주파수 이상의 주파수 성분은 모두 없애 버리는 특성을 지니므로 고주파 성분에 실제 데이터가 존재하는 경우에 실제 신호에 손실을 가져오게 된다. 특히 관성센서의 신호 중 가속도계 신호는 항체에 가속이 있는 경우 순간적으로 변화하게 되는데 저역통과 필터를 거치면 순간적인 신호의 변화를 왜곡시켜 느리고 완만하게 변화하는 신호로 만든다. 이러한 성질은 그림 3을 보면 명확히 알 수 있다. 그림 3에서 실제 신호는 실선으로 나타나는데 1점 쇄선으로 표시된 저역통과 신호의 결과는 순간적인 신호변화를 부드럽게 따라가는 형태로 나타났으며 이러한 성질이 기존 관성항법 시스템에서 기본적인 저역통과 필터를 전처리 필터로서 사용하기 불가능하게 하는 결과를 가져왔다.

그러나 웨이블릿 임계화 기법은 잡음수준을 줄이면서도 신호의 갑작스런 변화에 대한 왜곡이 거의 없는 결과를 그림 3에서 보여준다. 그림 3

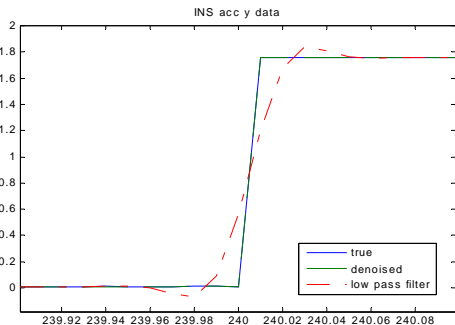


그림 3. 가속도계 신호에 대한 저역통과 필터와 임계화 기법의 비교

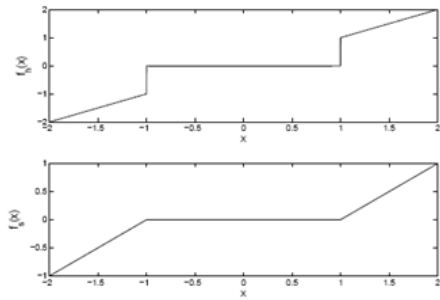


그림 4. hard thresholding 함수와 soft thresholding 함수

에서 점선으로 표시된 임계화 기법의 결과는 왜곡이 거의 없기 때문에 실제 신호와 겹쳐져서 구분되지 않을 정도로 정확한 결과를 보인다. 이 때문에 기존의 저역통과 필터의 단점을 보완한 관성센서 신호에 대한 전처리 필터로서의 역할을 수행할 수 있다.

이러한 임계화 알고리즘은 다음과 같이 수행된다. 먼저 신호에 대하여 웨이블릿 변환을 수행하여 웨이블릿 계수들을 얻는다. 그 다음 각각의 웨이블릿 계수에 대하여 임계화를 수행한다. 그리고 임계화의 결과로 나온 계수들을 기존의 웨이블릿 계수를 대신하여 역변환을 수행한다 [5],[8].

이 때 임계화 기법은 hard thresholding과 soft thresholding으로 구분된다. 식 (3)은 hard thresholding 함수를 식 (4)는 soft thresholding 함수를 나타내며, 이를 그림으로 나타내면 그림 4와 같다. u 는 웨이블릿 계수인데 기준값 이하의 계수는 모두 0으로 만들어 버린다. 웨이블릿 계수는 신호의 특정 주파수 성분의 크기를 의미하므로 잡음에 가까운 크기의 특정 주파수 성분은 사라지는 것을 의미한다. 이러한 작은 값들은 잡음이하의 크기만을 지니므로 잡음제거 과정에서 없어져도 큰 의미를 지니지는 않는다.

$$T_{\lambda}^{hard} = \begin{cases} u & \text{if } |u| \geq \lambda \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$T_{\lambda}^{soft} = \begin{cases} (u - \text{sign}(u)\lambda) & \text{if } |x| \geq \lambda \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

두 방식 중 일반적으로 soft thresholding 기법이 성능이 좋은 것으로 알려져 있으므로[5],[8] 앞으로의 시뮬레이션에서는 soft thresholding 기법을 이용한다.

임계화 기법에서 성능에 영향을 주는 중요한 요소 중 하나는 기준값 λ 을 어떻게 설정하느냐 하는 문제이다. 일반적인 경우 아래의 식에 따라 결정한다[5]. 여기서 σ 는 신호의 표준 편차이고 n 은 신호의 샘플 개수를 의미한다.

$$\lambda = \sqrt{2 \log n \sigma} \quad (5)$$

그러나 식에 의해 결정된 값이 최적의 결과를 가지는 것은 아니므로 실험을 통해 적합한 λ 을 결정해야 한다.

III. INS-GPS 결합항법 시스템

시뮬레이션에서 사용된 INS-GPS 결합항법 시스템은 일반적인 15차 약결합 모델을 이용하였다. 칼만필터의 상태변수는 위치 오차, 속도 오차, 자세 오차, 가속도계 오차, 자이로 오차로 구성된다[9]. 또한 측정치는 GPS의 위치 정보로 1 초마다 이용되며 관성센서 신호는 웨이블릿 임계화 기법을 통해 개선되어 0.01초 마다 시간의 진행에 따른 항법해 계산을 수행하는데 이용된다. 본 연구에서는 그림 6과 같은 Daubechies 웨이블릿을 이용하여 변환을 수행하였는데 웨이블릿의 설정은 어떤 것을 이용하더라도 큰 차이가 없다. GPS에 적절한 저역통과 필터링을 수행하여 통합하면 성능이 좋아질 것이나 본 연구의 목표는 관성센서 신호의 잡음제거를 통해 얼마나 성능 향상이 가능한지 알아보기 위하여 GPS 신호를 따로 필터링을 하지 않았다.

관성센서 신호에 대한 임계화 알고리즘은 앞에서 기술한 바와 마찬가지로 다음과 같이 수행된다. 먼저 각 축의 자이로와 가속도계 신호에 대하여 웨이블릿 변환을 수행하여 총 6개의 신호에 대한 웨이블릿 계수들을 얻는다. 이 때 웨이블릿 변환은 4차까지 수행 되었으며 임계치 기준 값 λ 는 가속도계의 경우 $\lambda = \sqrt{2 \log n \sigma} / 100$,

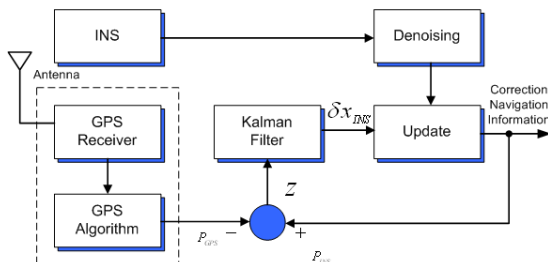


그림 5. INS-GPS 결합항법 시스템 구조

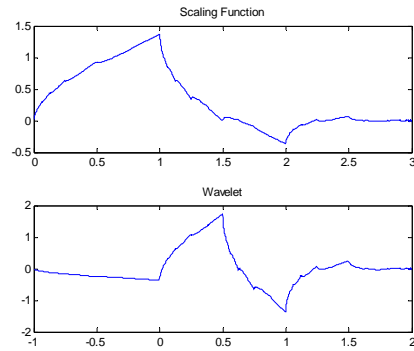


그림 6. Daubechies의 스케일 함수와 웨이블릿 함수

자이로의 경우 $\lambda = \sqrt{2 \log n \sigma} / 50$ 로 하였다. 이는 여러 번의 시뮬레이션을 통하여 실험적으로 잡은 값으로, 현재의 경우는 전체 샘플에 대하여 필터링을 수행하므로 많은 샘플개수에 의해 임계치가 너무 커지는 것을 방지하기 위하여 특정 숫자를 나누는 식으로 값을 작게 만들었다. 이렇게 구해진 각각의 웨이블릿 계수에 대하여 임계화를 수행한다. 그리고 임계화의 결과로 나온 계수들을 기존의 웨이블릿 계수를 대신하여 역변환을 수행한다. 역변환된 신호는 잡음이 개선된 관성센서 신호로 이를 이용하여 INS-GPS 결합 항법을 수행한다.

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 그림 7과 같은 사각형 궤적에 대하여 실험하였다. 그리고 그 때 센서 신호 생성에 사용된 센서의 성능은 표 1과 같다.

관성센서는 중급의 IMU(inertial measurement unit)을 가정하였고, 궤적은 10분간 주행한 결과이다. 초기 1분 동안 정지해 있다가 1분간 가속하고 2분간 정속주행 후 회전을 반복한다.

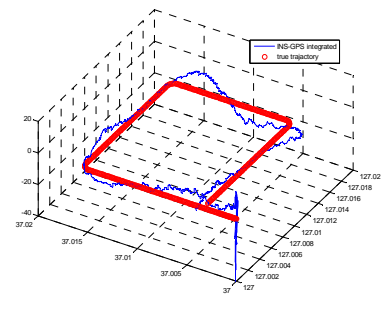


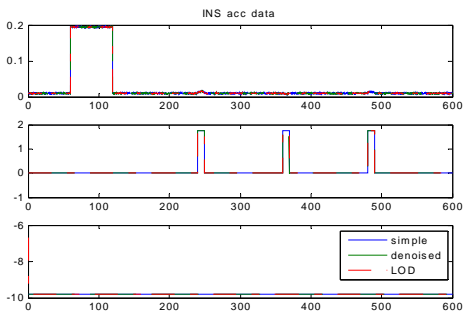
그림 7. 시뮬레이션 궤적

표 1. 시뮬레이션에서 사용된 센서의 성능

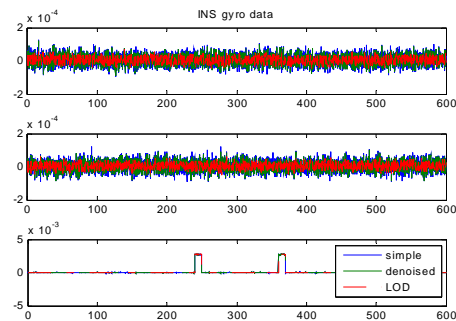
	바이어스	백색 잡음	환산계수오차
자이로	1 deg/hr	0.1 deg/√hr	100ppm
가속도계	1000 μg	100 μg	100ppm

결과 비교는 [3]의 연구에서 사용된 잡음감소 방식과의 비교를 수행하였다. [3]의 연구에서는 분해수준(LOD, Level of Decomposition)을 조절하는 방법을 사용하여 INS 신호의 잡음을 제거한다. 이 방식은 웨이블릿 변환을 수행하여 각각의 주파수 성분으로 신호가 분해되면 이를 다시 복원하는 과정에서 고주파 성분은 제거하고 신호를 복원한다. 따라서 이는 저역통과 필터와 거의 똑같은 결과를 보이게 된다. 웨이블릿 변환에 사용되는 스케일 함수의 주파수 응답은 저역통과 필터와 똑같은 형태를 지니기 때문이다. 따라서 결과 중 LOD라고 표현된 결과는 [3]의 연구결과이지만 저역통과 필터를 사용한 결과라고 생각해도 무방하다.

먼저 센서 신호의 결과를 보면 다음과 같다. 그림 8은 순서대로 가속도계와 자이로의 x, y, z



(a) 가속도계 신호



(b) 자이로 신호

그림 8. 센서데이터의 비교

축에 대한 출력이다. 데이터는 simple로 표시된

원신호와 임계화 기법을 이용하여 잡음을 감소시킨 결과, 그리고 LOD로 표시된 참고문헌 [3]과 같은 형태로 저역통과 필터를 사용한 경우를 비교하였다. 그림 8의 자이로 x, y축의 결과에서 볼 수 있듯이 잡음 감소 성능은 저역통과 필터의 경우가 더 뛰어나다. 그러나 가속도계 y축 240초 근처를 확대한 그림 9의 경우에서 알 수 있듯이 순간적으로 변하는 데이터의 경우에 임계화 기법을 사용하는 경우가 보다 우수함을 알 수 있다.

센서 출력의 RMSE를 정리하면 표 2와 같다. 그림 8의 결과에서 항체의 운동이 센서 출력에 영향을 크게 미치는 가속도계 x축과 y축, 자이로 z축의 경우 저역 통과 필터를 사용하면 센서오차가 크게 발생하는데 비해 임계화의 결과는 오차를 감소시키는 결과를 보여준다. 가속도계 z축은 항상 약 -1[g]의 가속도를 가지는데 이 가속도가 저역통과 필터에 의해 왜곡되어 들어가기 때문에 저역통과 필터의 경우는 오차가 크게 발생한다. 이 부분은 항법 수행 시에는 정렬과정에 들어가기 때문에 항법 성능에는 큰 영향을 미치지 않는다. 반면 상대적으로 항체의 운동이 영향을 미치지 않는 자이로 x, y 축 결과는 그림 10의 b에서 전체적인 잡음수준이 더 크게 감소하므로 단순한 저역통과 필터링이 더 성능이 좋아진다. 그러나 이 경우에도 역시 임계화의 결과는 상당한 성능향상을 보여준다. 결과적으로 잡음이 큰 신호가 빠른 변화가 생기는 경우에는 임계화 기법을 이용하면 가장 오차가 적은 결과를 얻을 수 있다.

이러한 데이터를 이용하여 INS-GPS 결합항법을 수행한 결과는 그림 11과 표 3과 같다.

그래프에서는 눈에 보이는 차이가 크게 발생하지는 않는다. 그러나 RMSE를 계산해 보면 본 연구에서 사용된 임계화 기법을 사용한 경우가 가장 뛰어난 성능을 나타냄을 알 수 있다.

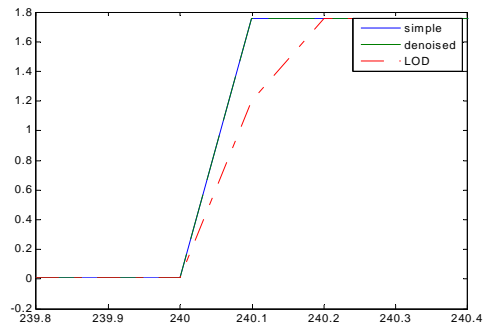


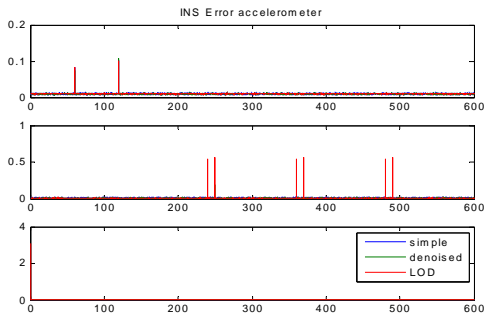
그림 9. 가속도계 데이터의 확대 신호

표 2. 센서신호 오차

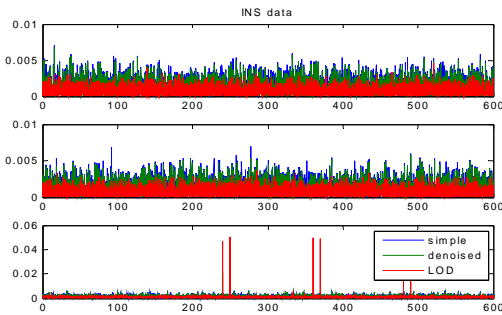
RMSE ($\times 10^{-3}$)	무처리	저역통과 필터	임계화 기법	항상
가속도계 x축 [m/s^2]	0.12855	0.12820	0.12713	임계화
가속도계 y축 [m/s^2]	0.12714	0.25884	0.12940	임계화
가속도계 z축 [m/s^2]	0.11422	0.53177	0.11514	임계화
자이로 x축 [rad/s]	0.02216	0.01241	0.01906	LOD
자이로 y축 [rad/s]	0.02208	0.01231	0.01904	LOD
자이로 z축 [rad/s]	0.02177	0.02364	0.02033	임계화

표 3. 항법해 오차

RMSE	무처리	저역통과 필터	Thresholding
N축 [deg]	2.84847 $\times 10^{-3}$	2.84619 $\times 10^{-3}$	2.83083 $\times 10^{-3}$
E축 [deg]	2.90878 $\times 10^{-3}$	2.79399 $\times 10^{-3}$	2.75622 $\times 10^{-3}$
D축 [m]	0.20012	0.21131	0.20966



(a) 가속도계 오차



(b) 자이로 오차

그림 10. 각 경우의 신호 오차 비교

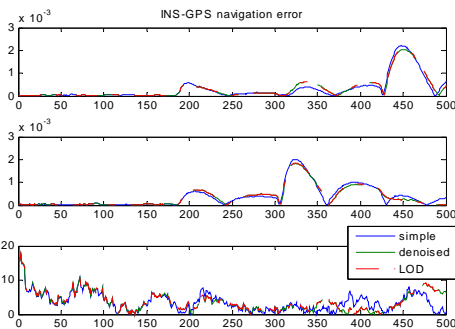


그림 11. INS-GPS 통합항법 결과

V. 결론

기존의 INS-GPS 결합항법 시스템에서 사용하는 저역통과 필터는 INS 신호에 적용하는 경우 신호 왜곡과 신호의 지연 문제 등의 다양한 문제를 가져왔다. 이러한 문제들은 항법 성능을 저하시키는 결과를 가져왔기 때문에 INS 신호의 전처리 필터는 최소한으로만 사용이 되어왔다. 그러나 최근 개발된 임계화 기법과 같은 웨이블릿 변환을 이용한 잡음감소 기법을 사용하면 신호의 왜곡을 줄이면서도 신호의 SNR을 높이는 것이 가능하다. 본 연구에서는 임계화 기법을 INS-GPS 결합항법 시스템에 적용하였다. 임계화 기법은 신호의 잡음을 줄이는 동시에 신호의 왜곡도 거의 발생하지 않는 성질을 지니고 있는데 이러한 성질은 항체의 운동에 따라 빠르게 변화하는 INS 신호처리에 매우 좋은 특성이 될 수 있다. 이러한 기법을 INS-GPS 시뮬레이션에 적용하여 INS 신호가 개선될과 동시에 전체 항법 결과도 향상이 가능함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 기초연구과제(UD080015FD)의 지원에 의하여 수행된 결과의 일부분입니다. 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) A. Soloviev, F. van Graas, "Enhancement of Integrated GPS/INS Performance Utilizing Frequency Domain Implementation of INS Calibration", NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation, Vol. 54, No. 2, 2007.
- 2) NOURELDIN Aboelmagd, OSMAN Ahmed, EL-SHEIMY Naser", A Neuro-Wavelet Method for Multi-Sensor System Integration for Vehicular Navigation", Measurement science & technology, 2004, vol. 15, no. 2.
- 3) Sameh Nassar, Naser El-Sheimy, "Wavelet Analysis for Improving INS and INS/DGPS Navigation Accuracy", The Journal of Navigation, VOL 58; PART 1, pp. 119-134, 2005.
- 4) 김성필, 김응태, 성기정, "웨이블릿을 이용한 GPS/INS/기압고도계 센서융합", 한국항공우주학회 2008년도 추계학술발표회, 2008. 11.
- 5) Andrew K. Chan, Cheng Peng, "Wavelets for Sensing Technologies" Artech House Publishers, 2003.
- 6) Jaideva C. Goswami, Andrew K. Chan, "Fundamentals of Wavelets : Theory, Algorithms, and Applications," Wiley, 1999.
- 7) Ingrid Daubechies, Ten lectures on wavelets". Philadelphia, PA, USA, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.
- 8) Byung-Jun Yoon, P. P. Vaidyanathan, "Wavelet-based Denoising By Customized Thresholding", Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004. Proceedings. (ICASSP '04). IEEE International Conference on, May 2004.
- 9) D. H. Titterton and J. L. Weston, Strapdown Inertial Navigation Technology. Stevenage, U.K. : Peregrinus, 1997.