

GPS/MEMS DR을 이용한 차량용 항법시스템

김광진¹⁾ · 박찬국^{*2)} · 강우용³⁾서울대학교 기계항공학부^{1) 2) 3)}

Car Navigation System with GPS/MEMS DR

Kwangjin Kim¹⁾ · Chan Gook Park^{*2)} · Woo Yong Kang³⁾¹⁾ Navigation Electronic System Lab, Seoul National University, Kwanak-gu, Seoul 151-744, Korea^{*2)} Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Kwanak-gu, Seoul 151-744, Korea³⁾ Navigation Electronic System Lab, Seoul National University, Kwanak-gu, Seoul 151-744, Korea

Abstract : In this paper, GPS/MEMS DR navigation algorithm is proposed by exploiting the nonholonomic constraints that govern the motion of a land vehicle. The load test is experimented to prove the performance of the algorithm and to decide the gyro number for GPS/MEMS DR system in packaging. Experimental results show that the proposed algorithm has the improved performance by keeping the navigation error bounded during GPS outage.

Key words : Telematics(텔레매틱스), Car Navigation(차량 항법), MEMS(초소형 센서), GPS(위성항법장치)

1. 서 론

첨단 전자시스템을 포함한 자동차 산업에 이동 통신 등의 IT 산업을 기술 융합함으로써 자동차 산업의 부가가치를 높일 수 있는 텔레매틱스 산업은 우리 경제의 새로운 성장 동력을 제공해 줄 것으로 기대되고 있다.¹⁾ 텔레매틱스는 무선 음성 및 데이터 통신과 인공위성을 이용한 위치정보시스템인 GPS를 기반으로 자동차를 이용해 정보를 주고 받을 수 있도록 하는 기술이며, 위치측정시스템과 무선통신망을 이용해 운전자와 탑승자에게 정보 이용의 이동성과 새로운 연결 환경을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.²⁾

텔레매틱스 산업의 핵심 소요 구성품 중의 하나인 위치측정시스템은 차량의 현재 위치를 실시간으로 정확하게 제공할 수 있어야 하며 차량 주행 상태 등의 기록을 위하여 운동 정보를 정확하게 측정할 수 있어야 한다. 이러한 이유로 정확한 위치해를 제공할 수 있는 GPS와 함께 운동 정보를 제공할 수 있는 관성항법장치(Inertial Measurement Unit: IMU)를 사용하게 되었으며, 반도체 기술의 발달로 소형의 MEMS(Micro Electro

Mechanical System) IMU를 이용한 MEMS DR 시스템(Dead Reckoning System)이 차량 위치 추정 시스템의 표준 모델로 인식되기 시작하였다.

MEMS DR과 GPS를 결합한 항법시스템은 GPS 가시위성 개수가 4개 이상인 구간에서는 안정적인 항법해를 제공하나 가시위성이 3개 이하일 경우에는 GPS를 사용할 수 없으므로 MEMS DR을 이용하여 항법해를 제공해야 한다. 그러나, MEMS DR에 사용된 자이로와 가속도계는 매우 성능이 낮은 저급의 관성 센서이므로 MEMS DR 단독으로 항법을 수행할 경우 위치 오차가 급격하게 증가하게 된다.

본 논문에서는 GPS 가시위성의 개수가 3개 이하인 구간에서도 GPS/MEMS DR이 안정적인 항법해를 제공할 수 있도록 하기 위하여 차량의 운동 특성을 이용한 Nonholonomic 강제 조건을 제시하고 이를 이용한 측정치 증가 기법에 대하여 설명한다. 또한 차량용 항법시스템의 크기를 최소화하기 위하여 MEMS DR과 GPS를 하나의 패키지 시스템으로 제작할 경우에 요구되는 최소한의 센서 개수를 확인하기 위하여 자이로의 개수에 따른 항법 성능을 시험을 통하여 비교 분석한다.

* Correspondence address : chanpark@snu.ac.kr

2. GPS/MEMS DR 결합 항법시스템

MEMS DR IMU와 GPS는 일반적으로 두 시스템이 서로 독립되게 제작되고 있으므로 이를 결합하기 위해서는 약결합 기법을 사용한다. 약결합 기법이란 GPS와 MEMS DR의 출력치를 사용하여 항법 오차를 보정하는 기법으로 구현이 간단한 것으로 알려져 있으며 구조는 그림 1과 같으며 칼만 필터의 측정치로 GPS 수신기의 내부 알고리즘에 의하여 계산된 위치와 속도 정보를 이용한다.³⁾

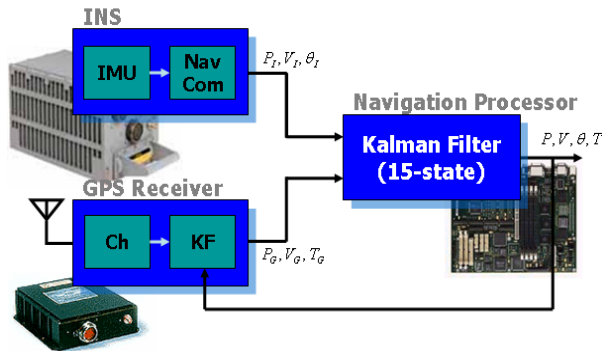


Figure 1. Loosely coupled INS/GPS approach

2.1 시스템 모델

약결합 방식의 INS/GPS 결합시스템은 위치, 속도, 자세를 기본 상태변수로 선정하고 가속도계와 자이로 추정치를 상태변수에 포함한 15차 모델을 일반적으로 많이 사용하며 식(1)과 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{INS}(t) &= F_{INS}(t) x_{INS}(t) + w_{LC}(t) \\ &= \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & F_{24} & 0_{3 \times 3} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & 0_{3 \times 3} & F_{35} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} x_{INS}(t) + w_{LC}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 상태변수 x_{INS} 는 다음과 같다.

$$x_{INS}(t) = [x_f^T \quad x_a^T]^T \quad (2)$$

$$x_f = [\delta L \quad \delta l \quad \delta h \quad \delta v_N \quad \delta v_E \quad \delta v_D \quad \phi_N \quad \phi_E \quad \phi_D]^T \quad (3)$$

$$x_a = [\nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z]^T \quad (4)$$

또한 $w_{LC}(t)$ 는 평균 0, 공분산 Q_{LC} 인 가속도계와 자이로의 백색잡음으로 식(5)와 같다.

$$w_{LC}(t) = [0_{1 \times 3} \quad w_{a_N} \quad w_{a_E} \quad w_{a_D} \quad w_{g_N} \quad w_{g_E} \quad w_{g_D} \quad 0_{1 \times 6}]^T \quad (5)$$

식(1)에서 F_{INS} 는 SDINS 오차모델을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{11} &= \begin{bmatrix} \frac{R_{mm}\rho_E}{R_m+h} & 0 & \frac{\rho_E}{R_m+h} \\ \frac{\rho_N}{\cos L}(\tan L - \frac{R_{tt}}{R_t+h}) & 0 & \frac{\rho_N \sec L}{R_t+h} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ F_{12} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{R_m+h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sec L}{R_t+h} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \\ F_{21} &= \begin{bmatrix} \frac{\rho_E R_{mm}}{R_m+h} v_D - (\rho_N \sec^2 L + 2\Omega_N) v_E - \rho_N \rho_D R_{tt} & 0 & \frac{\rho_E}{R_m+h} v_D - \rho_N \rho_D \\ (2\Omega_N + \rho_N \sec^2 L + \rho_D \frac{R_{tt}}{R_t+h}) v_N - (\frac{\rho_N R_{tt}}{R_t+h} - 2\Omega_D) v_D & 0 & \frac{\rho_D}{R_t+h} v_N - \frac{\rho_N}{R_t+h} v_D \\ \rho_N^2 R_{tt} + \rho_E^2 R_{mm} - 2\Omega_D v_E & 0 & \rho_N^2 + \rho_E^2 \end{bmatrix} \\ F_{22} &= \begin{bmatrix} \frac{v_D}{R_m+h} & 2\rho_D + 2\Omega_D & -\rho_E \\ -2\Omega_D - \rho_D & \frac{v_N \tan L + v_D}{R_t+h} & 2\Omega_N + \rho_N \\ 2\rho_E & -2\Omega_N - 2\rho_N & 0 \end{bmatrix} \\ F_{23} &= \begin{bmatrix} 0 & -f_D & f_E \\ f_D & 0 & -f_N \\ -f_E & f_N & 0 \end{bmatrix}, \quad F_{24} = C_b^n \\ F_{31} &= \begin{bmatrix} \Omega_D - \frac{\rho_N R_{tt}}{R_t+h} & 0 & \frac{-\rho_N}{R_t+h} \\ -\frac{\rho_E R_{mm}}{R_m+h} & 0 & \frac{-\rho_E}{R_m+h} \\ -\Omega_N - \rho_N \sec^2 L - \frac{\rho_D R_{tt}}{R_t+h} & 0 & \frac{-\rho_D}{R_t+h} \end{bmatrix} \\ F_{32} &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_t+h} & 0 \\ -\frac{1}{R_m+h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-\tan L}{R_t+h} & 0 \end{bmatrix} \\ F_{33} &= \begin{bmatrix} 0 & \Omega_D + \rho_D & -\rho_E \\ -\Omega_D - \rho_D & 0 & \Omega_N + \rho_N \\ \rho_E & -\Omega_N - \rho_N & 0 \end{bmatrix}, \quad F_{35} = -C_b^n \end{aligned}$$

여기서, L : 위도, l : 경도, h : 고도,

C_b^n : 좌표변환행렬,

ρ_N, ρ_E, ρ_D : N,E,D 방향 각속도 성분,

$\Omega_N, \Omega_E, \Omega_D$: 지구 자전 각속도,

R_{mm}, R_{tt} : 지구반경 위도에 대한 변화율.

2.2 칼만필터 측정치 모델

약결합 방식은 GPS의 위치와 속도정보를 측정치로 사용하므로 측정 오차 모델은 다음식과 같이 간단하게 표현된다.

$$z = \begin{bmatrix} P_{INS} \\ V_{INS} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{GPS} \\ V_{GPS} \end{bmatrix} = H_{LC} x_{INS} + v_{LC} \quad (6)$$

여기서, $v_{LC} \sim N(0, R_{LC})$ 으로 측정잡음이며 GPS와 INS의 위치는 위도, 경도, 고도로 표현되며 속도는 항법좌표계에서 표현된 속도이다.

식(6)의 측정행렬 H_{LC} 는 식(7)과 같다.

$$H_{LC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0_{1 \times 9} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0_{1 \times 9} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0_{1 \times 9} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0_{1 \times 9} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0_{1 \times 9} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0_{1 \times 9} \end{bmatrix} \quad (7)$$

지금까지 유도한 상태방정식 (1)과 측정방정식 (7)을 사용하여 약결합 방식의 칼만필터를 구성한다. 식에서 알 수 있듯이 상태방정식은 일반적인 INS의 오차모델을 그대로 사용하여 구성할 수 있으며 측정방정식은 두 시스템의 항법해의 차이로 간단하게 표현된다. 이는 약결합 방식이 INS와 GPS의 시스템 레벨의 결합이므로 이미 구성되어 있는 각 시스템의 알고리즘을 그대로 적용한 것으로 구성상의 용이함이 있음을 알 수 있다. 그러나 측정치로 사용하는 정보가 GPS의 항법해인 위치, 속도이므로 GPS의 신호단절이나 가시위성이 3개 이하인 경우 측정치를 제공받을 수 없으며 따라서 항법오차가 증가하는 단점을 가지게 된다.

3. Nonholonomic을 이용한 강제조건

앞장에서 설명한 약결합 시스템의 단점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 차량의 속도 출력의 특성을 사용하는 nonholonomic 강제 조건에 대하여 기술한다. Nonholonomic 강제조건이란 차량과 같이 전진방향 운동만 존재하는 경우 동체좌표계 상에서 전진방향을 제외한 나머지 두 축의 속도를 0으로 가정하는 것이다.⁴⁾ 이를 위해서는 항법 시스템에서 출력된 속도 성분을 동체좌표계에 대한 속도 성분으로 표시하여야 하며 이를 나타낸 다음과 같다.

$$\hat{V}^B = \hat{C}_N^B \hat{V}^N = (\hat{C}_N^B)^T \hat{V}^N \quad (8)$$

위 식에 참값과 오차를 함께 나타내기 위하여 섭동시키면 다음의 관계식이 유도된다.

$$\begin{aligned} V^B + \delta V^B &= ((I - E^N) C_N^B)^T (V^N + \delta V^N) \\ &= C_N^B (I + E^N) (V^N + \delta V^N) \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)에서 오차의 고차항을 무시하고 정리한 후, 속도 오차항에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta V^B &= C_N^B \delta V^N + C_N^B E^N V^N \\ &= C_N^B \delta V^N - C_N^B V^N \times \varepsilon^N \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, ε^N 은 자세 오차항을 의미한다.

식(10)으로부터 차량의 nonholonomic 강제조건을 이용하여 칼만필터의 측정식을 구성할 수 있으며, 이때 측정치는 다음과 같이 정의한다.

$$z_k = [\delta V_y^B \quad \delta V_z^B]^T \quad (11)$$

식(11)에서 정의된 측정치의 측정행렬은 식(10)의 관계식으로부터 구할 수 있으며 다음의 행렬식으로 표현된다.

$$H_k = \begin{bmatrix} C_{12} C_{22} C_{32} V_E C_{32} - V_D C_{22} \\ 0_{2 \times 3} C_{13} C_{23} C_{33} V_E C_{33} - V_D C_{23} \\ V_D C_{12} - V_N C_{32} V_N C_{22} - V_E C_{12} \\ V_D C_{13} - V_N C_{33} V_N C_{23} - V_E C_{13} \end{bmatrix} \quad (12)$$

식(11)에서 정의한 칼만필터의 측정값은 Y축과 Z축 동체좌표계의 속도값이며 식(12)에 칼만필터의 상태변수인 위치, 속도, 자세 오차항을 곱하여 측정치의 추정값을 계산한다. 이와 같은 과정을 도시하면 그림 2와 같다. 그림 2로부터 GPS 수신기에 수신 불량 상태가 발생하여 안정적인 보조 항법해의 제공이 불가능할 경우 INS 순수항법의 결과인 항법좌표계의 속도식에 좌표 변환행렬을 곱하여 동체좌표계의 속도식으로 변환한 후 Y축과 Z축의 속도 성분을 칼만필터의 측정치로 사용함을 알 수 있다.

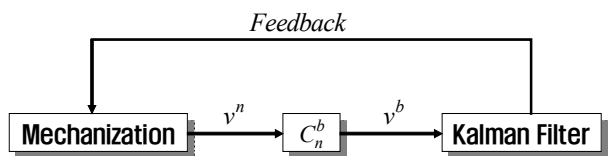


Figure 2. Measurements by nonholonomic constraints

4. 차량 시험 결과

Nonholonomic 강제조건을 이용한 MEMS DR/GPS 결합 시스템의 성능을 분석하기 위하여 차량 시험을 수행하였다. 차량 시험은 그림 3과 같은 소형밴을 이용하여 서울대학교 교내를 주행하면서 수행하였으며 시스템 측정 모델을 고도측과 수직축 속도 성분을 제외한 13차 모델과 15차 모델로 나누어서 시험하였다. 또한 nonholonomic 강제조건에 의한 시스템 성능 개선을 확인하기 위하여 이에 대한 해석도 함께 수행하였다.

먼저 13차 모델과 15차 모델 및 nonholonomic 강제 조건에 의한 주행 결과는 그림 4, 5와 같다. 그림에서 전체적인 주행 궤적은 세 경우 모두 유사하게 나타나지만 그림 5에 알 수 있듯이 GPS 가시 위성이 4개 이하로 감소 되어 정상적인 항법해가 출력되지 않는 경우에는 강제조건을 사용하는 경우의 항법 성능이 더 우수함을 알 수 있다.

다음으로 자이로의 사용 개수에 따른 항법 성능을 비교 분석하기 위하여 15차 시스템 모델에 측정치로 nonholonomic 강제 조건까지 구현된 항법 시스템의 센서 입력단에 사용되는 자이로 개수를 강제로 제한시키면서 성능을 비교 분석하였다. 그 결과는 그림 6과 같으며 그림에서 경우 1은 3축 자이로를 모두 사용할 때, 경우 2는 Y, Z축 자이로만 사용할 때, 경우 3은 Z축 자이로만 사용하는 경우이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 경사지 주행시 발생한 GPS 신호 불능 상태 구간을 제외하고는 모든 주행 구간에서 항법 성능이 유사함을 알 수 있다. 특히 그림 5에서 나타난 GPS 신호 불능 구간에서도 자이로의 개수에 관계없이 모두 안정적인 항법해를 제공하였다. 이 구간은 평지 주행 구간으로 경사가 없는 경우에는 수직축 자이로만 사용하여도 항법 성능에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 그림 7, 8과 같이 경사지 주행 구간에서 GPS 신호가 불능인 경우에는 위치 오차가 급격히 증가함을 알 수 있다. 그림 7의 오차 크기를 비교하면 경우 2는 13초 동안 RSS 위치 오차가 15[m] 이내를 유지하고 있으나 경우 3은 5초 이후부터 위치 오차가 급격하게 증가하여 최대 26[m] 위치오차가 발생한다.



Figure 3. SNU Test VAN

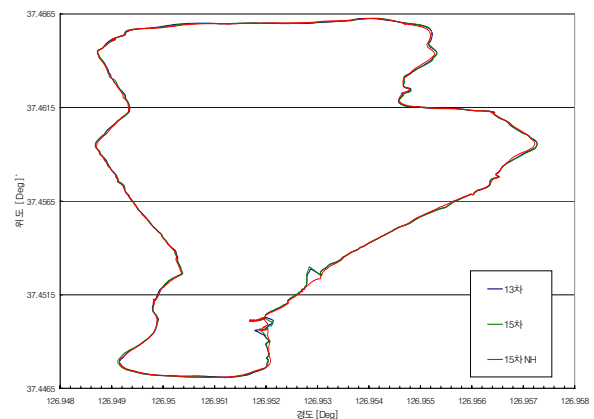


Figure 4. Test Result

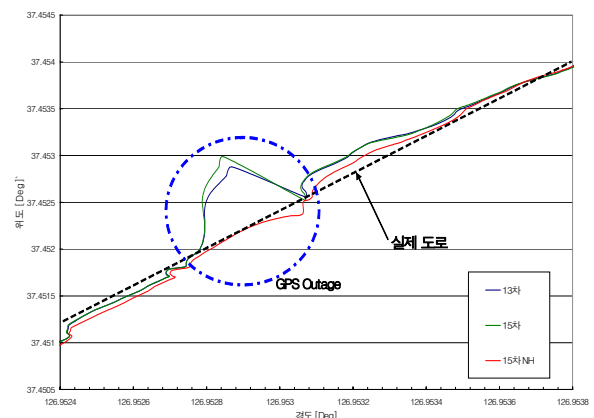


Figure 5. Test Result during GPS Outage

5. 결 론

본 논문에서는 차량용 항법장치를 위한 GPS/MEMS DR 결합 항법시스템을 구성하고 이에 대한 시험을 수행하였다. 도심 주행시 GPS 가시위성의 개수가 3개 이하인 구간에서도 구성된 항법시스템이 안정적으로 동작할 수 있도록 nonholonomic 강제조건을 이용한 측정치 증가 기법을 제시하였으며 차량 시험을 통하여 그 성능을 검증하였다. 또한, GPS와 MEMS DR을 하나의 패키지로 구성하기 위하여 요구되어지는 최소한의 차이로 개수를 결정하기 위한 시험을 수행하였으며 그 결과 Y, Z축 두 개의 자이로만을 사용하여도 안정적인 항법해를 제공할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제시된 결과는 저가의 차량용 GPS/MEMS DR 항법시스템 구성에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국전자통신연구원 “텔레매틱스-USN 연구단”의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) 임광선, 텔레매틱스 기술 및 산업 동향, ETRI 정보화기술연구소, 2003. 10.
- 2) PilMagney, “Telematics Perspective,” *Telematics Europe 2003*.
- 3) C. G. Park, “Navigation of Launch Vehicle,” *The 8th Short Course on Space Technology*, 2003.
- 4) G. Gamin, S. Salah, N. Eduardo and D. Hugh, “A New Algorithm for the Alignment of Inertial Measurement Units without External Observation for Land Vehicle Applications,” *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 1999.

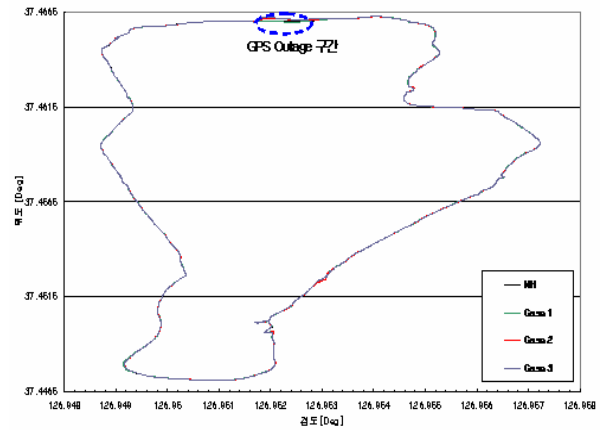


Figure 6. Test Result by changing gyro number

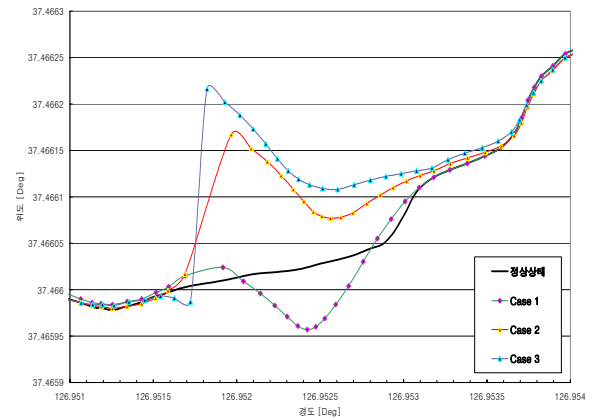


Figure 7. Position output

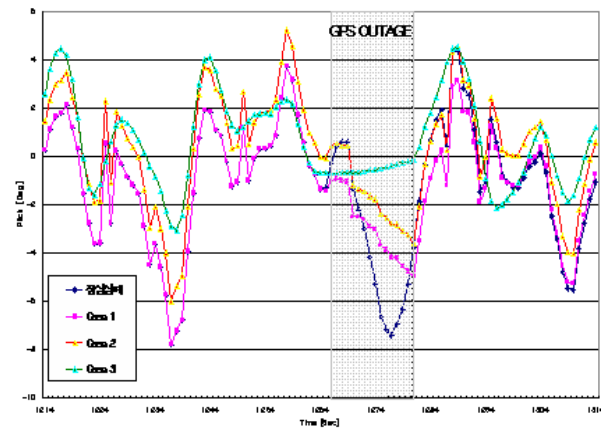


Figure 8. Pitch angle