GPS/INS 를 이용한 차량의 파라미터 추정

박건홍† ・장유신* ・류재헌* ・박석현** ・이춘한** ・홍신표*** ・이만형***

Estimation of vehicle parameters using GPS/INS

Gunhong Park, Yushin Chang, Jaeheon Ryu, Seokhyun Park, Chunhan Lee, Sinpyo Hong, and Manhyung Lee

Key Words : GPS, GPS/INS, INS, cornering stiffness, side slip angle, parameter estimation

Abstract

In this paper deals with a unique method for measuring vehicle states such as body sideslip angle and tire sideslip angle using GPS velocity information in conjunction with other sensors. A method for integrating Inertial Navigation System (INS) sensors with GPS measurements to provide higher update rate estimates of the vehicle states is presented, and the method can be used to estimate the tire cornering stiffness. The experimental results for the GPS velocity-based sideslip angle measurement and cornering stiffness estimates are compared with the theoretical predictions. From the experimental results, it can be concluded that the proposed method has an advantage for future implementation in a vehicle safety system.

기호설명

x, y : 차량의 무게중심을 원점으로 하는 차량기준 좌표계
V : 차량의 속도 벡터
F_{xf}, F_{xr} : 전륜과 후륜의 타이어 방향의 힘
F_{yf}, F_{yr} : 전륜과 후륜의 타이어 측면 방향의 힘
r : 차량의 요 각속도
a, b : 차량의 무게중심과 전·후륜과의 거리
α_f, α_r : 전륜과 후륜의 옆 미끄럼 각
β : 차량 중심선과 무게중심에서의 속도벡터와의 사이각
δ : 전륜 조향각
ψ : 지구 좌표계와 차량 좌표계의 사이각

† 부산대학교 지능기계공학과
E-mail : ghpak@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-1456 FAX : (02)123-1234
* 부산대학교 지능기계공학과
** 부산대학교 메카트로닉스 협동과정
*** 부산대학교 기계공학부

1. 서 론

일반적으로 차량 동역학은 차량의 중량, 관성모멘트, 종방향 속도, 타이어의 cornering stiffness 에 의해 영향을 받는다. 특히 타이어와 노면의 특성인 cornering stiffness 의 경우에는 속도에 크게 영향을 받지 않으나, 타이어의 크기, 형태(radial 과 bias-ply), 플라이(ply)의 개수, 코드(cord) 각도, 타이어의 폭과 접지면이 중요한 변수들이다. 이러한 변수들이 주어진 타이어의 경우는 차량의 중량에 의해 타이어에 가해지는 압력과 노면의 상태가 중요한 변수로 작용한다. 그러나 일반적인 주행에서는 승차인원과 적재된 화물, 연료량의 변화, 서스팬션의 특성에 따라 가해지는 압력이 변하게 되며, 노면의 경우도 맑은 날과 비가 오는 경우 또한 눈이 오는 경우, 빙판길의 경우와 같이 날씨에 의한 영향과 아스팔트 도로와 시멘트 도로, 비포장 도로 등의 노면 재질의 영향으로 인해 타이어의 마찰력은 차이가 나게 된다. 이러한 이유 때문에 주행 중 cornering stiffness 의 변화는 차량의 중량이나 관성모멘트의 변화보다 매우 심하며, 따라서 각각의 차량과 노면에 따

른 cornering stiffness 의 측정이 필요하다. 현재는 차의 앞부분에 광 센서(optical sensor)를 설치하여 반사량(reflections)을 이용하여 노면의 특성을 추정하는 방법을 사용하고 있다. 이 방법은 바퀴가 앞으로 접촉할 노면의 특성을 파악할 수 있는 장점이 있는 반면, 센서가 깨끗하게 유지되어야만 하는 단점이 있다. 다른 방법으로는 음향센서(acoustic sensor)를 이용하여 노면의 특성을 파악하는 방법과 타이어의 트레드(tread)에 스트레인게이지를 설치하여 측정된 변형율(strain)과 응력을 이용하는 방법이 있으나 기술적으로도 쉽지 않으며 고가의 장비가 소요 된다는 단점을 가진다(1). 이러한 문제를 해결하기 위해 차량의 주요 변수를 간접적으로 추정하는 방법들이 적용되어 왔는데, Masmoudi 와 Hedrick(2)은 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 차량의 축 토크를 추정하였고, Ray(3)는 칼만 필터를 사용하여 타이어 힘을 추정하였고 이 힘을 토대로 확률론적으로 노면 마찰 계수를 추정하였다. 또한, 상태 변수를 추정하기 위해서는 관측기를 이용한 방법이 주로 사용되어 왔는데, Huh 와 Stein(4)은 시스템 행렬을 스케일링하여 well-condition 이 되도록 이득값을 결정하고, 이에 따른 외란에 강인한 관측기를 설계하였으며, Tu 와 Stein(5)(6)은 모델링 오차를 줄이기 위한 모델 오차 보상기를 관측기에 적용하여 강인한 성능을 갖도록 하였다.

이러한 구속조건이 적으며 실제 상황에 사용하기에 적합한 다음과 같은 측정 시스템을 이용한다. GPS(Global Positioning System)는 인공위성을 이용한 범세계적 위치결정 체계로, 정확한 위치를 알고 있는 위성에서 발사한 전파를 수신하여 관측점까지의 소요시간을 측정함으로써 관측점의 위치를 구하는 방식으로 비교적 정확한 3 차원 속도 계측을 가능하게 하였다. GPS 시스템은 순간적인 오차는 관성 항법 시스템에 비하여 크지만 시간이 지나도 누적되지 않은 특성을 가지고, 1~5 Hz의 느린 신호 획득 시간을 가지고 있다. 반면 관성 항법 시스템(Inertial Navigation System, INS)는 측정한 가속도 및 각속도에 여러 가지 오차가 존재하며 항법 알고리즘의 적분 과정으로 인하여 이러한 오차가 시간이 지남에 따라 누적되는 문제가 있지만 수십에서 수백 Hz의 높은 동특성을 가지고 있다. 때문에 GPS 의 가동 초기부터 GPS 와 INS 의 통합에 관한 다양한 연구들이 수행되어 왔다.

본 논문에서는 주행중인 차량의 상태 중 하나인 옆 미끄럼 각을 측정하고 이를 이용하여 횡방향 제어를 위해 사용되는 모델들의 주요 파리미터인 cornering stiffness 를 추정한다. 이때 차량의 거동은 GPS/INS 통합 시스템을 통해서 측정을 하며, 측정된 값을 후처리 과정을 통해서 최종적으로 cornering stiffness 를 구하게 된다

2. STATE MEASUREMENT

Fig. 1 은 종방향과 횡방향속도를 state 로 가지는 2 자유도 평면의 vehicle 모델을 나타낸다.그리고 그에 따른 상태방정식은 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_y \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-C_{\alpha f} - C_{\alpha r}}{mV_x} & -V_x + \left(\frac{C_{\alpha r} b - C_{\alpha f} a}{mV_x} \right) \\ \frac{C_{\alpha r} b - C_{\alpha f} a}{I_z V_x} & \frac{-C_{\alpha f} a^2 - C_{\alpha r} b^2}{I_z V_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_{\alpha f}}{m} \\ \frac{C_{\alpha f} a}{I_z} \end{bmatrix} \delta \quad (1)$$

여기서 차량의 옆 미끄럼 각(sideslip angle, β)은 차량 중심선과 무게중심에서의 속도 벡터와의 사이각이다. GPS 의 속도 측정을 이용해서 차량의 속도 벡터를 구할 수 있고 이를 이용하면 차량의 측면 미끌림을 측정할 수 있다.

$$\beta = \psi_{GPS}^{VEL} - \psi \quad (2)$$

ψ_{GPS}^{VEL} 은 GPS 로 측정한 차량의 속도 백터의 각도이다. 차량 중심선과 지구 좌표계와의 사이각(ψ)은 요 자이로로 추정이 가능하다. 자이로는 직선 주행 중에 초기화 되고 바이어스를 추정하여 제거할 수 있다. 하지만 바이어스 또한 시간에 따라 변화 하므로 주행 중 보정을 위해서 자세 측정용 GPS 를 이용해서 ψ을 주행 중에 보정한다. 차량의 측면 방향 속도는 식(3)로 계산 할 수 있다.

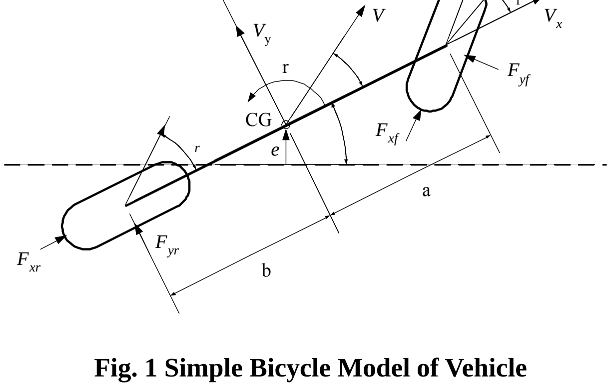

Fig. 1 Simple Bicycle Model of Vehicle

$$V_y^{GPS} = V^{GPS} \sin(\beta) \quad (3)$$

실제 측정된 옆 미끄럼 각은 GPS 안테나가 설치된 점의 각도 이므로 실제 차량의 무게중심과 전륜, 후륜 타이어의 미끌림 각이 아니다. 따라서 GPS 안테나(A)에서 우리가 원하는 어느 지점(P)의 속도 벡터를 얻기 위해서 A점에서 P점의 상대 속도를 구한다.

$$V_p = V_A + \vec{\omega} \times \vec{r}_{A/P} \quad (4)$$

여기서 $\vec{\omega}$ 은 일반적으로 차량의 롤과 피치, 요 각속도를 모두 포함하고 있으며, $\vec{\omega}$ 의 측정값을 이용하여 P 점의 속도를 구한다. P 점에서의 미끌림 각을 구하기 위해서는 속도 벡터의 x축과 y축을 사용하여 구할 수 있으며 식(5)로 구할 수 있다.

$$\beta_p = \tan^{-1}\left(\frac{V_Y^P}{V_X^P}\right) \quad (5)$$

여기서 V_X와 V_Y는 차량 기준 좌표계에서의 속도이다. 타이어의 옆 미끄럼 각(Fig. 1에서의 α_f 와 α_r)이란 타이어의 실제 방향과 타이어의 진행 방향의 각도이다. 이는 CG 점과 차축까지의 거리의 차로 발생되는 것으로 측정된 CG 점에서의 속도 벡터와 CG 점에서 각 차축까지의 거리를 (4)식에 대입하면 전륜과 후륜의 타이어의 속도 벡터를 구할 수 있으며 이를 (5)식에 대입하면 최종적으로 각 타이어의 옆 미끄럼 각을 구할 수 있다. 후륜의 경우 타이어의 방향이 차량의 방향과 동일함으로 위에서 구한 옆 미끄럼 각을 그대로 사용할 수 있으나 전륜의 경우 옆 미끄럼 각에 조향각(δ)이 포함되어 있으므로 조향각을 뺀 값이 전륜의 옆 미끄럼 각이 된다.

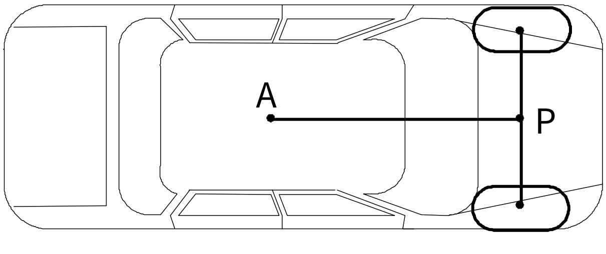

Fig. 2 Position of A and P

$$\alpha_f = \beta_f^{tire} - \delta$$
$$\alpha_r = \beta_r^{tire} \quad (6)$$

전륜과 후륜의 cornering stiffness 는 GPS 의 측정치를 이용하여 칼만필터에 의해 보정된 가속도 값을 사용해서 추정할 수 있다. Cornering stiffness 는 많은 방법으로 추정이 가능하지만 이 논문에서는 bicycle 모델에서 뉴턴 방정식인 식(1)을 이용하면 구할 수 있다.

$$\sum F_y = m\ddot{y} = F_{yf} + F_{yf} \cos(\delta)$$
$$\sum M_z = I_z \ddot{\psi} = aF_{yf} - bF_{yr} \cos(\delta) \quad (7)$$

전륜과 후륜 타이어 측면 방향의 힘은 cornering stiffness 의 정의를 통해서 쉽게 구할 수 있다.

$$F_{yf} = 2C_{\alpha f}\alpha_f$$
$$F_{yr} = 2C_{\alpha r}\alpha_r \quad (8)$$

(8)식을 (7)식에 대입하면 cornering stiffness 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{\alpha f} = \frac{bm\ddot{y} + I_z\ddot{\psi}}{2(a+b)\alpha_f}$$
$$C_{\alpha r} = \frac{am\ddot{y} - I_z\ddot{\psi}}{2(a+b)\alpha_r \cos(\delta)} \quad (9)$$

3. GPS/INS 통합 알고리즘

본 논문에서 사용된 Fig. 과 같은 구조를 갖는 약결합 방식은 GPS 수신기 내에 내장되어 있는 알고리즘을 사용하여 위치 및 속도 정보를 INS에 맞게 좌표 변환을 한 후 관성항법장치의 오차 보정 칼만필터의 측정치로 이용하는 방법이다.(7)

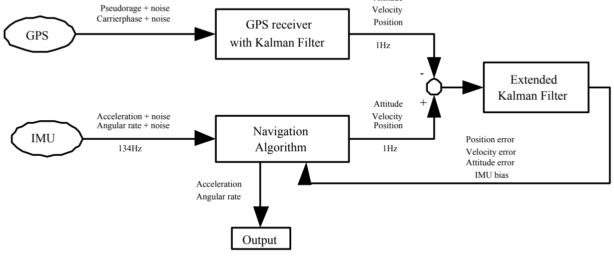

Fig. 3 The structure of loosely coupled approach

4. 실 험

차량 실험으로 GPS/INS 결합필터 및 차량의 옆미끄럼 각과 cornering stiffness를 측정한다. 차량에는 IMU와 GPS 수신기, RTK(Real time Kinematics)용 PDL(Positioning Data Link)을 설하였다. IMU 데이터와 GPS 데이터는 직렬 interface를 사용하여 수신하였으며, 3개의 직렬 interface를 위해서 별도의 serial 확장카드를 사용하였다. 실험에서 주행시에는 펜티엄 PC를 사용하여 각 센서의 데이터를 저장하고, 저장된 데이터는 후처리(post-processing)를 통하여 주행 결과를 얻었다. 후처리를 사용하는 이유는 동일한 궤적에 대하여 다양한 데이터를 얻을 수 있기 때문이다. 실험장소는 교내 운동장에서 실시 하였다. 전체 실험차량은 크게 GPS와 IMU로 구성된 항법 센서와 조향각을 측정하기 위한 핸들부 그리고 전체 데이터를 수집할 PC로 구성되어 있다. 실험 차량은 기아자동차의 93년도 스포티지 차량이며 자동변속기와 파워 스티어링이 장착된 모델이다. 차량의 제원은 다음과 같다.요 관성와 C.G점의 위치는 발표된 데이터가 없고 실제 측정이 불가능하여 근사값을 사용하였다(8).

Table 1. Specification of vehicle

Wheelbase(m)	2.65
a (C.G.에서 전륜까지 거리, m)	1.4
b (C.G.에서 후휸까지 거리, m)	1.25
Curb weight (kg)	1465
Total yaw inertia(kg.m²)	2931

차량의 장치된 GPS는 2종류가 사용 된다. 정확한 위치 좌표를 측정하기 위하여 Ashtech 사의 Z-Sensor를 사용하는데 이는 수평 1㎝의 오차를 가지며 1 Hz의 갱신 주기를 가진다. 자세 측정을 위해서는 ADU2를 사용하였다. 이것은 4개의 안테나와 12개의 채널을 사용하며 안테나의 간격이 1m인 경우에는 요 각은 0.2°(rms)의 오차를 가진다. 그리고, Base 와 remote 의 데이터 전송을 위해서 사용한 기기는 PACIFIC CREST 사의 PDL로 전송 속도는 최대 19,200 Baud Rate 이다. IMU 는 Crossbow 사의 DMU-6X 로 6축 측정 장치로 3축의 가속도와 각속도를 측정할 수 있으며 데이터 전송 속도는 38400 Baud Rate 이고 가속도계의 측정범위는 2G이며 bias는 0.05 ㎧² 이하이며 랜덤 잡음의 RMS(root mean square)는 0.01 ㎧² 이하이다. 자이로의 측정범위는 100.00°/s 로 bias 와 RMS 값은 0.1°/s 이하이다. 차량 운행 중에 조향각을

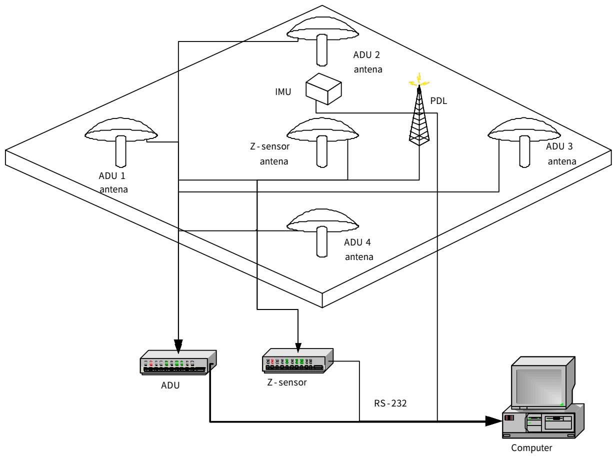

Fig. 4 Diagram of Measurement system at vehicle

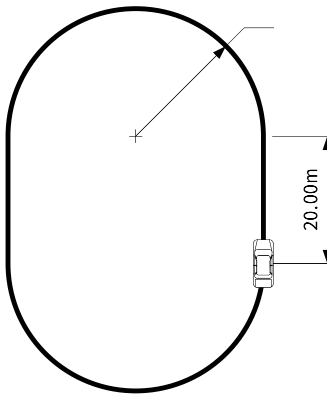

Fig. 3 Layout of test track

측정하기 위해서 핸들과 타이밍 벨트를 전위차계와 연결하였다. 차량에 부착되는 장비의 구성도는 Fig. 4 와 같다. 외곽에 있는 4 개의 GPS 안테나는 자세 수신기에 연결되며 가운데 있는 안테나와 무선 수신기는 위치 수신기에 연결이 되어 두 수신기와 IMU 는 직렬 포트를 통해서 데이터 수집용 컴퓨터에 연결 된다. 또한 PDL 은 RTK 용 보정 데이터의 수신을 위해 두 GPS 수신기에 연결된다. 실제 실험은 교내 운동장에서 Fig.과 같이 트랙을 그리고 트랙을 따라 운행 하였고 이때 측정 데이터를 수집하였다. 트랙의 형상은 Fig. 5 와 같다.

Cornering stiffness는 코너 진입시와 코너 주행 중에 발생함으로 전체 트랙에서 코너의 길이를 길게 잡았으며 값의 크기를 크게 하기 위해서 비포장 노면에서 측정을 하였다. 위에서 구한 차량 좌표계의 속도로 (5)식을 이용하여 옆 미끄럼 각을 구하면 Fig. 6과 같다. 데이터는 차량의 속도가 고르게 유지되는 부분을 선별하여 25초에서 80초의 데이터를 사용 하였다.

실제 차량 주행 방향이 반시계 방향으로만 진행하기 때문에 한쪽 방향으로만 옆 미끄럼 각이 발생할 것이라 예상하였으나 측정 결과 주행 중에는 반대 방향의 옆 미끄럼 각도 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 코너를 이탈하여 직선주행을 들어서는 부분에서 발생되는 것으로 관찰 되었다. 차량의 무게 중심에서 구한 속도를 (4)식에 대입하여 전륜과 후륜에 속도를 구하고, 이를 다시 (5)식과 (6)식에 대입하여 각 바퀴에서의 옆 미끄럼 각을 구한다. Fig. 7은 전륜과 후륜의 옆 미끄럼 각이다. 전륜의 경우 후륜의 경우보다 옆 미끄럼이 많은 것을 알 수 있다. 위에서 구한 옆 미끄럼 각을 (2.15)식에 대입하여 최종적으로 전륜과 후륜의 cornering stiffness를 구할 수 있다. 그러나 cornering stiffness의 선형구간은 조향각이 0.017~0.087 rad (1~5°)이므로 [9] $0.017 \le \delta \le 0.087$ 의 범위의 값만을 취하여 cornering stiffness를 구하면 Fig. 8과 같은 결

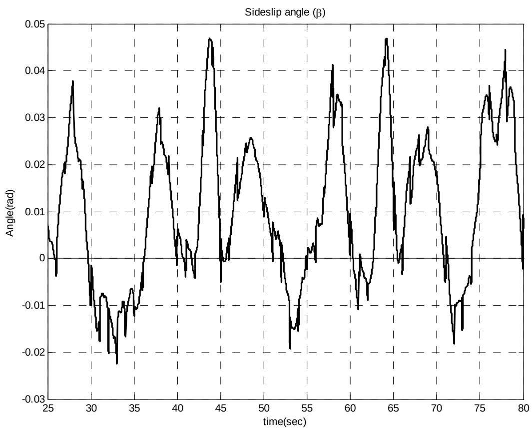

Fig. 6 Calculated sideslip angle

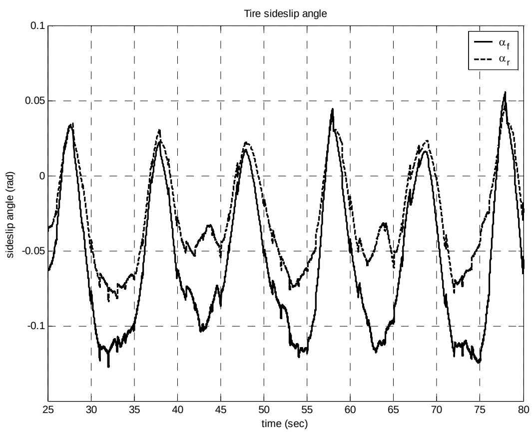

Fig. 7 Tire sideslip angle

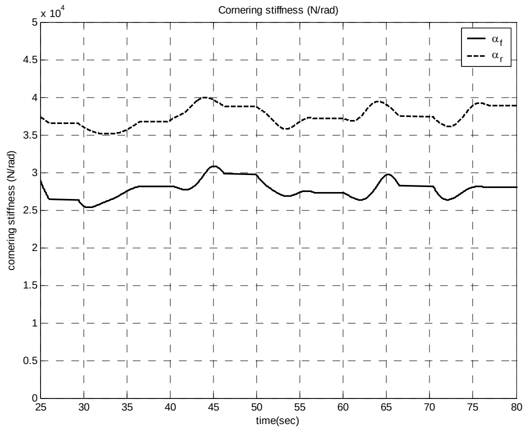

Fig. 8 Cornering stiffness of front and rear

과를 얻는다. 평균적으로 전륜은 28300N/rad, 후륜은 38400N/rad의 값으로 측정이 되었는데 일반 아스팔트 도로에서의 값은 60000N/rad으로 본 논문의 실험에서는 비포장(교내 운동장)에서 실험을 하였고 특히 비가 온 다음 날의 노면이었으므로 노면의 미끌림이 심하여 cornering stiffness의 값 또한 낮게 측정이 되었다. 전륜의 값이 후륜보다 낮게 측정이 되었는데 이는 전륜의 경우 조향각이 있을 때 미끄럼의 발생이 더욱 심하기 때문이고 이에 반비례하여 cornering stiffness가 낮게 측정이 되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 주요 상태 중 하나인 옆 미끄럼 각과 차량의 횡방향 제어에 사용할 수 있는 차량 모델 중 bicycle 모델의 주요 파라미터 중 하나인 cornering stiffness를 추정하였으며, 그 내용은 다음과 같다. GPS/INS 통합 시스템을 이용하여 실제 주행하는 차량의 위치, 속도, 자세를 측정하였으며, 이를 이용하여 차량의 옆 미끄럼 각을 측정하고, cornering stiffness를 추정하였다. 옆 미끄럼 각은 GPS에서 측정한 속도백터와 IMU의 자이로를 이용한 차량의 요 각을 이용하여 직접 측정하였으며, 다른 추정기법에 의한 방법에 비하여 매우 정확한 값을 얻을 수 있었다. 또한 옆 미끄럼 각의 측정을 위해서 차량의 파라미터를 사용하지 않았으므로, 파리미터의 불확실성에 의한 오차가 없는 값을 측정할 수 있었다. Cornering stiffness는 GPS/INS 통합 시스템에서 얻은 ENU 좌표계 기준의 속도를 이용하여 차량 좌표계로 변환하고, 이를 다시 전륜과 후륜의 속도로 변환 하였다. 이를 이용하여 타이어의 옆 미끄럼 각을 계산하였고, 이를 이용하여 전륜과 후륜의 cornering stiffness를 구할 수 있었다. 위의 방

법으로 구한 옆 미끄럼 각과 cornering stiffness 는 특정 모델을 사용하여 구한 추정치가 아니므로 bicycle 모델의 다른 파라미터 추정에 사용할 수 있으며, cornering stiffness는 안정성 제어와 steer-by-wire 제어기의 설계, 고속 주행에서의 횡방향 제어의 성능 향상과 차량의 상태 진단, 타이어의 상태와 마찰력 감지에 사용 될 수 있다.

실험을 통하여 제기된 문제점은 다음과 같다. 현재 본 논문에서는 후처리 과정을 통하여 GPS/INS를 통합을 하였고 이를 이용하여 옆 미끄럼 각을 측정 하였으며 cornering stiffness를 추정하였다. 하지만 차량의 상태를 실시간으로 측정하기 위해서는 GPS/INS 통합 시스템을 실시간 시스템으로 개발하는 것이 필요하며, 실시간 처리를 위한 알고리즘 개발이 선행되어야 한다. 또한 차량의 운행 중 발생하는 진동에 의한 여러 값들의 잡음 처리가 주요한 해결과제이다. 본 논문에서는 차량의 진동으로 인하여 발생하는 잡음이 센서 측정치에 그대로 반영이 되었으며 FFT 분석 결과 백색 잡음의 형태로 모든 주파수 영역에 나타났다. 본 논문에서는 단순 이동 평균법을 사용하여 평활화(smoothing)을 실시하였고 약 2Hz 이상의 신호는 제거하였다. 이는 차량에 가해지는 조향 입력이 1Hz 이내라고 가정을 하고 2Hz의 신호를 제거한 것이다. 평활화의 경우 후처리를 할 경우에만 사용할 수 있으며 만약 실시간 시스템을 구성 할 때에는 IMU에 저주파 통과 필터를 추가해야 할 것이다. 하지만 이 경우 신호 지연의 문제가 발생하게 되며, GPS 측정값과의 동기화에 문제가 생기게 된다. 따라서 GPS/INS 통합 시스템의 정확성에 나쁜 영향을 미치게 된다. 그러므로 차량의 구체적인 진동원, 노면과의 관계, 서스팬션에 의한 진동 특성 등을 고려하여 차량 자체에서 발생하는 진동을 센서 측정시 제거 할 수 있는 방안이 필요하다.

참고문헌

(1) U. Eichhorn and J. Roth, 1992, "Prediction and Monitoring of Tire/Road Friction," *Proceedings FISITA, London,* pp. 67-74.

(2) R. A. Msmoudi, J. K. Hedrick, 1992, "Estimation of Vehicle Shaft Torque Using Nonlinear Observers," *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 144, pp. 394-400.

(3) L. R. Ray, 1995, "Stochastic Decision and Control Parameters for IVHS," *ASME IMECE Advanced Automotive Technologies*, pp. 114-118.

(4) K. Huh, J. L. Stein, 1995, "Well-Conditioned Observer Design for Observer-Based Monitoring Systems," *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 117, No. 4, pp. 592-599.

(5) J. F. Tu, J. L. Stein, 1995, "On-Line Preload Monitoring for Anti-Friction Spindle Bearings of High-Speed Machine Tools," *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 117, pp. 43-53.

(6) J. F. Tu, J. L. Stein, 1998, *Model Error Compensation for Observer Design*, Int. J. Control, Vol. 69, No. 2, pp. 329-345.

(7) S.P Hong, M.H Lee, J.A. Rios and J.L. Speyer, 2002, "Observability Analysis of INS with a GPS Multi-Antenna System," KSME International Journal Vol. 16, Vol. 16, No. 11, pp. 1367-1378.

(8) R. Wade Allen, Henry T. Szostak, June 1992, *Vehicle Dyamic Stability and Rollover*, SYSTEM TECHNOLOGY.