

제어/로보틱스 II (다목적홀): 13:00~14:20

좌장 : 강진식(제주대학교)

13:00-13:20	제목 : 인터넷을 이용한 CAN기반 시스템의 원격 제어	135
	저자 : 조재한(부산대학교), 서원교(부산대학교), 이장명(부산대학교)	
13:20-13:40	제목 : 중량물 운송을 위한 AGV의 주행 제어 방법	139
	저자 : 우승범(부산대학교), 정경훈(부산대학교), 김정민(부산대학교), 박정제(부산대학교), 김성신(부산대학교)	
13:40-14:00	제목 : 다양한 탑승자에 대한 차륜형 밸런싱 로봇의 실험적 연구	142
	저자 : 김현욱(충남대학교), 정 슬(충남대학교)	
14:00-14:20	제목 : uDEAS를 이용한 히터 시스템의 IMC-PID 자동 동조 제어기 설계	144
	저자 : 김만석(동아대학교), 김조환(동아대학교), 최민구(동아대학교), 박종오(동아대학교), 김종욱(동아대학교)	

제어/로보틱스 III (다목적홀): 14:30~16:10

좌장 : 주영훈(군산대학교)

14:30-14:50	제목 : 각도 히스토그램을 이용한 특징 패턴의 잡음 제거	151
	저자 : 정은국(부산대학교), 정경훈(부산대학교), 김정민(부산대학교), 도주철(부산대학교), 김성신(부산대학교)	
14:50-15:10	제목 : 외바퀴 로봇의 자세 및 방향제어	154
	저자 : 최성희(부산대학교), 황종명(부산대학교), 이호원(부산대학교), 이장명(부산대학교)	
15:10-15:30	제목 : 모듈형 로봇의 물리적 결합을 통한 이동성 향상에 관한 연구	158
	저자 : 나두영(한경대학교), 민현홍(한경대학교), 이창석(한경대학교), 노수희(한경대학교), 문형필(성균관대학교), 정진우(동국대학교), 김용태(한경대학교)	
15:30-15:50	제목 : 저가형 센서 시스템을 활용한 차량의 주행 모드 판별에 관한 고찰	160
	저자 : 이재훈(고려대학교), 남동균(고려대학교), 박주영(고려대학교), 박현우(위드로봇), 유동현(위드로봇), 김도윤(위드로봇)	
15:50-16:10	제목 : 로봇의 아암의 이미지피드백 제어	164
	저자 : 김준홍(경남대학교), 석진환(경남대학교), 심병균(경남대학교), 한성현(경남대학교)	

응용시스템 I (303 강의실): 09:30~11:10

좌장 : 배영철(전남대학교)

09:30-09:50	제목 : PD제어를 이용한 이동로봇용 조향제어시스템	169
	저자 : 양우열(목포대학교), 이용준(목포대학교), 유영재(목포대학교), 장영학(목포대학교), 임대영(한국생산기술원)	
09:50-10:10	제목 : 구간비례 제어를 적용한 이동로봇의 속도제어시스템	172

저가형 센서 시스템을 활용한 차량의 주행 모드 판별에 관한 고찰

Investigations on Motion-Mode Decision for Land Vehicles Utilizing Low-cost Sensor Systems

이재훈¹ · 남동균¹ · 박주영¹ · 박현우² · 유동현² · 김도윤²

Jaehoon Lee, Dongkyun Nam, Jooyoung Park, Hyunwoo Park, Dong Hyun Yoo and
Do-Yoon Kim

¹고려대학교 제어계측공학과

E-mail: {white8704, skadas, parkj}@korea.ac.kr

²위드로봇

E-mail: {irmusy, briandyh, getcome}@gmail.com

요 약

차량의 움직임(Motion)에서 유도되는 특징을 이용하면 항법시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. 차량의 주행모드는 정지(Stationary mode), 직선주행(Straight-line mode), 그리고 곡선주행(Cornering mode)으로 나눌 수 있는데, 저가형의 관성 측정값(Inertial measurements)은 차량의 진동(Vibration)등으로 인해 올바른 주행모드를 판별하기 위해서는 세심한 주의가 필요하다. 본 논문에서는 관성측정값의 노이즈(Noise)에 견딜 수 있는 차량 주행모드 판별(Motion mode decision system)에 대해 고려했다. 그리고, 기존의 자이로-프리 방법(Gyro-free approach) 중 여섯 개의 가속도 센서(6 accelerometers)를 이용한 디스크 형(Disk-type) 모델에 1개의 자이로센서(Gyroscope)를 추가한 6-가속도/1-자이로 센서 시스템(6-Accelerometers/1-Gyro sensor system)에 기반을 둔 주행 모드 판별에 대해서도 고찰한다.

키워드 : Motion mode, INS, Land Vehicle Navigation, Kalman Filter, 6-Accelerometers/1-Gyro Sensor System.

1. 서 론

차량의 움직임(Motion)에서 유도되는 특징을 이용하면 항법시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. 차량의 주행모드는 정지(Stationary mode), 직선주행(Straight-line mode), 그리고 곡선주행(Cornering mode)으로 나뉘는데, 실제로 저가형의 관성 측정값(Inertial measurements)은 차량의 진동(Vibration)등으로 인해 올바른 주행모드를 판별하기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 관성측정값의 노이즈(Noise)에 견딜 수 있는 주행모드 판별법에 대해 고찰한다.

그리고, 최근에 장착에 필요한 크기, 무게 및 가격을 줄이기 위해 자이로 대신 다수의 가속도계를 사용하는 저가의 자이로-프리 센서 시스템[4-8]의 활용에 대한 중요성이 점차 커져감을 고려하여, 기존의 자이로-프리 방법(Gyro-free approach) 중 여섯 개의 가속도센서(6-accelerometers)를 이용한 디스크 형(Disk-type) 모델[4-6]에 1개의 자이로센서(Gyroscope)를 추가한 6-가속도/1-자이로 센서 시스템(6-accelerometers/1-gyro sensor system)에 기반을 둔 차량의 주행 모드 판별에 대해서도 고찰해 본다.

2. 차량모델의 관성항법시스템(INS)

항법 알고리즘은 동체 좌표계(Body frame)의 관성측정장치에서 얻은 센서 출력 값을 이용해 항체의 자세, 속도, 위치의 정보를 계산하는 알고리즘이다. 일반적인 관성항법시스템(IMU)[1]은 쿼터니언(Quaternion) 자세계산식, 코리올리 힘(Coriolis force) 및 중력(Gravity) 모델 등을 모두 고려하고 있다.

하지만 저가형 센서 시스템이 장착되는 차량에 적합한

관성항법시스템은 좀 더 간단한 형태로 구성되곤 한다 [2]. 본 논문에서는 참고문헌 [2]의 차량주행모델을 활용한다. 본 논문에서 고려하는 차량에 특화된 알고리즘에서는 지구자전효과(Earth rotation)가 무시되고 중력모델을 사용하지 않는 대신 중력은 상수 값으로 사용한다. 그리고 자세를 구할 때 오일러 각도(Euler angles)를 이용하며, 전방 속도(Forward velocity)를 제외한 방향에서는 아래 식 (1)과 같이 속도가 제한된다.

$$\begin{aligned} v_y^b &= 0, \\ v_z^b &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

먼저 동체 좌표계(Body frame)에서 항법 좌표계(Navigation frame)로의 방향코사인행렬(DCM)은 아래 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} R_b^s &= (R_s^b)^T = R_z(-\psi)R_y(-\theta)R_x(-\phi) \\ &= \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c\theta c\psi & -c\theta s\psi + s\phi s\theta c\psi & s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi & -s\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ϕ , θ , ψ 세 요소는 각각 오일러 각도의 롤(Roll), 피치(Pitch), 헤딩(Heading)을 나타낸다[1].

관성측정장치(IMU)의 3축 자이로와 3축 가속도계에서 얻은 각속도와 가속도 값을 이용해 동체의 자세, 속도, 위치를 구하는 방법은 아래 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \underline{r}^n \\ \underline{v}^n \\ \underline{\dot{A}}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D^{-1} \underline{v}^n \\ R_b^n \underline{f}_{ib}^b - \underline{g}^n \\ C_b^n \underline{\omega}_{ib}^b \end{bmatrix} \quad (3)$$

where $\underline{r}^n = [\phi \ \lambda \ h]^T$, $\underline{v}^n = [v_N^n \ v_E^n \ v_D^n]^T$,
 $\underline{A}^n = [\phi \ \theta \ \psi]^T$, $\underline{f}_{ib}^b = [f_{ib,x}^b \ f_{ib,y}^b \ f_{ib,z}^b]^T$,
 $\underline{g}^n = [0 \ 0 \ g]^T$, $\underline{\omega}_{ib}^b = [\omega_{ib,x}^b \ \omega_{ib,y}^b \ \omega_{ib,z}^b]^T$.

여기서 \underline{r}^n 은 위도, 경도, 고도로 이루어진 곡선 좌표계(Curvilinear frame)의 위치벡터, \underline{v}^n 은 항법 좌표계(Navigation frame)의 속도벡터, \underline{A}^n 은 항법 좌표계를 기준으로 동체 좌표계(Body frame)를 바라본 자세벡터를 나타낸다. 그리고 \underline{f}_{ib}^b 와 $\underline{\omega}_{ib}^b$ 는 각각 관성측정장치에서 측정된 각속도와 가속도 값이며, C_b^n 은 동체 좌표계(Body frame)에서 항법 좌표계(Navigation frame)로의 자세 변환식, 그리고 D^{-1} 은 항법 좌표계(Navigation frame)에서 곡선 좌표계(Curvilinear frame)로의 변환식이다.

3. 차량의 주행 모드(Motion Mode) 판별

차량의 주행모드로는 정지, 직선주행, 그리고 곡선주행 등을 고려할 수 있다. 본 장에서는 참고문헌 [2]의 관련 내용을 바탕으로 하여, 보다 간편하게 사용할 수 있도록 수정된 차량 주행 모드 판별법에 대해 고려한다.

먼저 직선동태(Linear junk dynamics)는 아래 식 (4)과 같다.

$$JD(t_k) = \sum_{t_i=t_k-n}^{t_k} |A_{norm}(t_i) - A_{norm}(t_{i-1})| \quad (4)$$

여기서 n 은 안정적인 동태(Dynamics)를 얻기 위한 시간축의 크기(Size of time window)이고 A_{norm} 은 3축 가속도의 크기이며 식 (5)와 같이 표현된다.

$$A_{norm} = \sqrt{A_{Bx}^2 + A_{By}^2 + A_{Bz}^2} \quad (5)$$

추정된 각속도 정보를 활용한 기울기동태(Tilting dynamics)는 아래 식 (6)과 같다.

$$TD(t_k) = \sum_{t_i=t_k-n}^{t_k} |\omega_{norm}(t_i)| \quad (6)$$

여기서 ω_{norm} 은 식 (7)과 같다.

$$\omega_{norm} = \sqrt{\omega_{Bx}^2 + \omega_{By}^2} \quad (7)$$

여기서 얻어진 직선동태(Linear junk dynamics)와 기울기동태(Tilting dynamics) 값은 아래 표의 규칙에 의해 해당되는 동태지표(Dynamics indicator) 값을 갖게 된다.

표 1. 동태지표(Dynamics indicator)를 위한 규칙.

Table 1. Rules for Dynamics indicator.

	$JD(t_k) \leq JD_{threshold}$	$JD(t_k) > JD_{threshold}$
$TD(t_k) \leq TD_{threshold}$	$DI(t_k) = 1$	$DI(t_k) = 2$
$TD(t_k) > TD_{threshold}$	$DI(t_k) = 2$	$DI(t_k) = 3$

여기서 $JD_{threshold}$ 와 $TD_{threshold}$ 는 각각 직선동태(Linear junk dynamics)와 기울기동태(Tilting dynamics)의 경계

값이다.

위에서 구한 동태지표(Dynamics indicator) 값을 이용해 정지와 비(非)정지를 판단할 수 있게 되지만, 직선동태(Linear junk dynamics)와 기울기동태(Tilting dynamics)를 구할 때 사용한 시간축의 크기(Size of time window) n 에 의해 지연이 발생하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 우리는 전방동태(Forward dynamics)를 아래 식 (8)과 같이 고려한다.

$$FD(t_k) = \sum_{t_i=t_k-p}^{t_k} |f_{ib,x}^b(t_i) - f_{ib,x}^b(t_i - p)| \quad (8)$$

여기서 p 는 선형가속도 차이를 계산하기 위한 시간적 격차(Time lag)이다.

차량이 정지상태에서 움직이기 시작할 때, 급격한 변화가 발생한다. 위에서 구한 동태지표(Dynamics indicator)와 전방동태(Forward dynamics)의 상태를 바탕으로 아래 표와 같이 정지상태와 비(非)정지상태를 판단할 수 있다.

표 2. 정지상태와 비(非)정지상태의 판별 규칙.

Table 2. Rules for stationary/non-stationary mode.

Rule 1	차량이 정지(Stationary mode) 상태에 있을 때: $FD(t_k) > FD_{threshold}$ 이면, 차량은 비(非)정지(Non-stationary mode) 상태.
Rule 2	차량이 비(非)정지(non-stationary mode) 상태에 있을 때: $FD(t_k) \leq FD_{threshold}$ 이고 $DI(t_k) = 1$ 이면, 차량은 정지(Stationary mode) 상태.

차량이 비(非)정지상태일 때, 다음 과제는 직선주행과 곡선주행모드를 구분하는 것이다. 진행방향 동태(Yawing dynamics)는 아래 식 (9)와 같다.

$$YD(t_k) = \frac{1}{m} \sum_{t_i=t_k-m}^{t_k} \omega_{b,z}^b(t_i) \quad (9)$$

일정시간 m 동안의 평균을 구하여 노이즈(Noise)의 영향을 줄일 수 있다. 진행방향동태(Yawing dynamics)의 정보를 바탕으로 비(非)정지상태일 때, 직선주행과 곡선주행모드를 구분하는 판별 규칙은 아래 표와 같다.

표 3. 직선주행모드와 곡선주행모드의 판별 규칙.

Table 3. Rules for straight-line/cornering mode.

Rule 1	차량이 마지막으로 직선주행(Straight-line mode) 상태에 있었을 때: $YD(t_k) > YD_{threshold}$ 이면, 차량은 곡선주행모드(Cornering mode) 상태.
Rule 2	차량이 마지막으로 곡선주행모드(Cornering mode) 상태에 있었을 때: $YD(t_k) \leq YD_{threshold}$ 이면, 차량은 직선주행(Straight-line mode) 상태.

지금까지 살펴본 차량주행모드판별의 구성도는 아래 그림 1과 같이 요약될 수 있다.

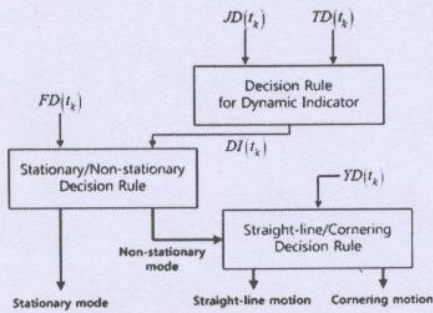


그림 1. 차량 주행모드 판별의 구성도.

Fig 1. Block diagram of the vehicle dynamics identification system.

4. 6-가속도/1-자이로 센서 시스템

본 논문에서는 일반적인 3-가속도/3-자이로 센서 시스템을 대상으로 하는 주행 모드 판별에 추가하여, 보다 저가로 구현이 가능하도록 자이로의 개수를 줄인 6-가속도/1-자이로 센서 시스템을 활용하는 주행 모드 판별도 고려한다. 다음에서는 본 논문에서 활용하는 6-가속도/1-자이로 센서 시스템에 관한 사항을 기술한다.

4.1 6-가속도/1-자이로 센서 시스템의 구성

3축 선형가속도와 3축 회전가속도를 계산하기 위해서는 일반적으로 3축 가속도센서와 3축 자이로센서가 필요하다. 하지만 6자유도 이상의 가속도 센서를 사용하는 자이로-프리 센서 시스템을 이용할 경우에도 추가적인 해석을 통하여 같은 정보를 얻을 수 있다[4-8]. 본 논문에서는 6-DOF 가속도계 시스템의 모델[4] 기반에 차량의 진행방향(Yaw)의 정확도를 높이기 위해 수직축에 자이로를 추가한 6-가속도/1-자이로 센서 시스템(그림 2 참조)을 활용하여 주행 모드 판별을 수행하는 문제를 일반적인 센서 시스템을 이용한 경우와 함께 고려한다.

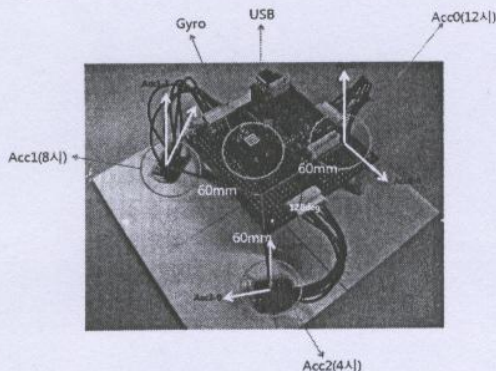


그림 2. 6-가속도/1-자이로 센서 시스템.

Fig 2. 6-Accelerometers/1-Gyro sensor system.

4.2 센서 교정 (Sensor calibration)

6 자유도(6-DOF) 가속도계 시스템 출력은 가속도 센서 위치 벡터 $\Delta^o r_i$ 와 방향 벡터 $\Delta^o u_i$ 의 뒤틀림으로 인한 오차(Alignment error)와 바이어스(Bias) Δa_{of} 를 포함하고 있다. 이를 해결하기 위해 디스크형 자이로-프리 시스템의 구성에 기반을 둔 센서 교정(Sensor calibration) 과정[4]을 수행하면 된다. 그리고, 4개의 서로 다른 자세에 놓여 있는 센서 시스템에 대한 관찰로부터 데이터를

얻어 주요 오차인 $\Delta^o u$ 와 Δa_{of} 를 추정할 수 있다[4]. 본 논문에서는 4개의 서로 다른 정지 자세로 ${}^o \ddot{p}_{gb} = [0 \ 0 \ g], [g \ 0 \ 0], [0 \ -g \ 0], [0 \ 0 \ -g]$ 를 고려하여 교정 과정을 수행하였다[4-5].

4.3 각속도 추정을 위한 칼만필터

6-DOF 가속도계 시스템에서 얻은 각속도를 적분하면 오차 누적 등의 원인으로 정확한 각속도를 구하기가 어려워진다[6]. 따라서 본 논문에서는 차량의 각 주행모드(Motion Mode)에 따라 영점보상(Zero reference)[6]을 수행하는 작업과 함께, 자이로 센서 각속도를 관측 값(Observation)으로 이용하는 과정을 추가하여, 칼만 필터 기반 3축 각속도 추정 작업을 수행하였다.

5. 실험 및 결과 고찰

5.1 주행모드 결과

차량의 주행모드를 확인할 실험 구간은 교대역-서초역 주변을 한바퀴 도는 궤적으로 그림 3과 같다.



그림 3. 실험 구간 궤적(교대역-서초역 주변).

Fig 3. Test trajectory(near Kyodae-Seoch stations).

차량의 전방방향속도(Forward velocity)와 자이로(Gyro)의 출력과 비교한 주행모드(Motion mode)는 그림 4와 같다. 그림 4는 관성측정장치(IMU)의 3축 가속도와 3축 각속도의 값을 이용하여 구한 결과이며, 여기에서 구한 주행 모드(Motion mode)를 통해 각각의 동태에서 유도되는 관측 값(Dynamic-derived observations)을 추가로 이용하여 항법알고리즘의 성능 향상을 얻는 경우를 관찰할 수 있었다[3].

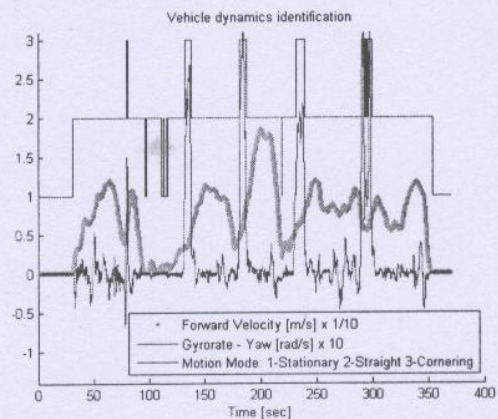


그림 4. 'c'자 형 궤적의 주행모드 결과.

Fig 4. Motion mode results of the 'c' trajectory.

일반적인 관성측정장치(IMU)를 이용한 결과와 마찬가지로, 본 논문에서 고려하는 6-가속도/1-자이로 센서 시스템에 대해서도 주행모드(Motion mode) 판별이 제대로 이루어짐을 관찰할 수 있었다. 실험에 사용한 차량의 전방방향을 기준으로 'ㄷ'자 형 궤적으로 진행할 때 관찰된 우측방향의 속도(Y-axis velocity)와 자이로(Gyro)의 출력, 그리고 추정된 가속도 및 각속도를 활용한 주행 모드(Motion mode) 판별 결과는 그림 5와 같다.

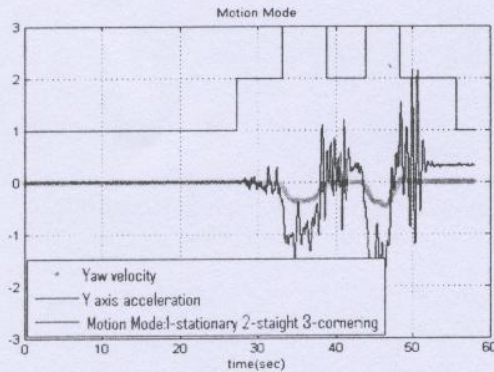


그림 5. 'ㄷ'자 형 궤적의 주행모드 결과.

Fig 5. Motion mode results of the 'ㄷ' trajectory.

위의 그림을 통해 'ㄷ'자 형 궤적에서의 큰 특징인 두 번의 코너링 부분을 분명하게 확인할 수 있다.

5.2 칼만 필터를 이용한 각속도 추정결과

앞에서 살펴본 6-가속도/1-자이로 센서 시스템으로부터 계산된 각속도와 칼만 필터에 의해 추정된 각속도를 'ㄷ'자 형 궤적에서 비교한 결과는 그림 6과 같다. 칼만 필터를 이용한 결과에서는 단순 적분에 의해 나타나는 드리프트(Drift) 현상이 상당히 개선됨을 확인할 수 있었다.

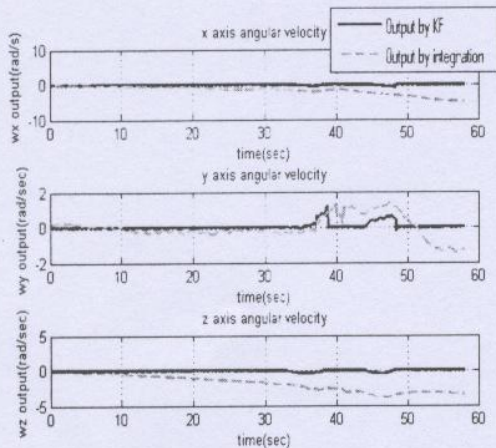


그림 6. 6-가속도/1-자이로 센서 시스템의 3축 각속도.

Fig 6. 3-axis angular velocity of the 6-accelerometers/1-gyro system.

6. 결 론

본 논문에서는 차량의 움직임(Motion)에서 유도되는 특징을 이용하기 위한 주행모드 판별법에 대해 알아보

고, 이를 실험결과를 통해 확인하였다. 주행 모드(Motion mode)를 통해 각각의 동태에서 유도되는 관측 값(Dynamic-derived observations)을 추가로 이용하여 항법알고리즘의 성능 향상을 얻는 경우를 관찰할 수 있었다[3]. 그리고 6-가속도/1-자이로 센서 시스템에서도 차량의 각 주행모드(Motion Mode)에 따라 영점보상(Zero reference) 및 자이로 센서 각속도를 관측 값(Observation)으로 적용한 칼만 필터를 통해 3축 각속도의 성능 개선을 확인할 수 있었다. 향후 과제로는 6-가속도/1-자이로 센서 시스템을 이용한 관성항법알고리즘(INS)과 위성항법시스템(GPS)의 결합 등을 들 수 있겠다.

감사의 글 : 본 연구는 2009년 u-Transportation 기반기술 개발, 과제번호: 06-교통핵심-A01-01에 의해 수행되었습니다, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Artech house, 2007.
- [2] J. H. Wang, *Intelligent MEMS INS/GPS Integration for Land Vehicle Navigation*, UCGE Reports Number20246, University of Calgary, September 2006.
- [3] 이재훈, 차량주행을 위한 GPS/INS 결합에 관한 고찰, 고려대학교 제어계측공학과 석사학위논문, 2010.
- [4] R. Onodera, N. Mimura, "Six-degree-of-freedom motion sensor system using multiple accelerometers," *Proceedings of 36th International Symposium of Robotics*, Vol. 1, pp. 116-124, 2004.
- [5] N. Mimura, R. Onodera, "Calibration method for 6 DOF acceleration sensor systems using multiple accelerometers," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineering Series C*, Vol. 72, No. 724, pp. 3798-3805, 2006.
- [6] R. Onodera, N. Mimura, "Measurement of a vehicle motion using a new 6-DOF motion sensor system: Angular velocity estimation with Kalman Filter using motion characteristic of a vehicle," *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 20, No.1, pp. 116-124, 2008.
- [7] S. Park, C.-W. Tan, and J. Park, "A scheme for improving the performance of a gyroscope-free inertial measurement unit," *Sensors and Actuators A*, Vol. 121, pp. 410-420, 2005.
- [8] T.-L. Chen and S. Park, "MEMS SoC: observer-based coplanar gyro-free inertial measurement unit," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, pp. 1664-1673, 2005.