

겔로핑 측정을 위한 가속도 센서 드리프트 보상 알고리즘

변기식† · 안영주* · 김환성**

(원고접수일 : 2003년 9월 25일, 심사완료일 : 2003년 11월 6일)

Drift Compensation Algorithm of Acceleration Sensor for Galloping Measurement System

Gi-Sik Byun† · Young-Joo An* · Hwan-Seong Kim**

Key words : 드리프트 보상(Drift Compensation), 가속도계(Accelerometer), 겔로핑(Galloping), 자이로(Gyro), 관성항법계(INS), 송전선(Power Transmission Line)

Abstract

In this paper, we deal with two drift compensation algorithms of acceleration sensor for measuring the galloping on power transmission line. Firstly, the block diagram of galloping measurement system is given and a galloping model is presented. Secondly, two compensation algorithms, a simple compensation and a period compensation, are proposed. A simple compensation algorithm uses the drifts of velocity and distance at fixed periods, so it is useful for constant drift case. Next, a period compensation algorithm can compensate a periodic drift. This algorithm uses the previous measured data and compensated data for constant period, where the period is obtained by FFT method. Lastly, the effectiveness of proposed algorithms is verified by comparing between two algorithms in simulation, and its characteristics and the drift error bound are shown, respectively.

기호설명

m : 송전선의 단위 질량

x, y, z : 종방향, 횡방향, 수직방향의 이동거리

ϕ, θ, ψ : 롤링, 피칭, 요잉방향의 회전각

F_x, F_y, F_z : x, y, z 방향의 힘

M_ϕ, M_θ, M_ψ : ϕ, θ, ψ 방향의 회전 모멘트

J_ϕ, J_θ, J_ψ : ϕ, θ, ψ 방향의 관성 모멘트

k_x, k_y, k_z : x, y, z 방향의 송전선의 강성계수

d_x, d_y, d_z : x, y, z 방향의 송전선의 감쇠계수

† 책임저자 (부경대학교 전기·제어계측공학부) E-mail : gsbyun@mail.pknu.ac.kr, T : 051)620-1634

* 부경대학교 전기·제어계측공학부

** 한국해양대학교 물류시스템공학과 E-mail:kimhs@hhu.ac.kr, T : 051)410-4334

- k_ϕ, k_θ, k_ψ : ϕ, θ, ψ 방향의 송전선의 강성계수
- d_ϕ, d_θ, d_ψ : ϕ, θ, ψ 방향의 송전선의 감쇠계수
- ω : ϕ 방향의 회전 각속도
- d_v, d_p : 속도 및 위치 드리프트
- α_v, α_p : 속도 및 위치 오차 보상 계인
- β_v, β_p : 속도 및 위치 주기보상 계인

1. 서 론

궤로핑 현상은 결빙 및 착설로 인하여 송전선 단면이 비 대칭을 이룰 때, 수평방향의 풍력에 의해 송전선에 양력이 발생되며 이로 인하여 송전선에서 주파수적 진동이 발생하는 현상을 말한다. 이러한 궤로핑 현상은 송전선의 단선사고 및 순시정전 사고를 가져오며, 전력 수요가에 커다란 영향을 미치고 있다^{[1] [3]}.

이에 대한 방지책으로서 선진 각국에서는 송전선에 스페이서 댐퍼 등을 설치하여 진동 억제를 행하고 있으나, 궤로핑 발생 구간의 지형 및 기상 특성을 고려하지 않은 상태에서는 정확한 궤로핑 억제가 어려운 실정이다. 현재, 국내에서는 궤로핑에 대한 연구가 수행되고 있으나^[3], 초보적인 연구 단계로서 보다 효율적인 연구를 위해서는 궤로핑의 측정 및 분석이 필요하다.

궤로핑을 측정하기 위해서는 항공분야에서 사용되는 관성항법장치(INS)를 이용할 수 있으나, 송전선의 공간적인 제약 및 전원 사용의 제약성으로 인하여 기존의 INS 장치를 그대로 이용하기는 어렵다. 또한, 기존의 INS 장치는 고정밀도로 지나치게 가격이 높은 단점을 지니고 있다^{[4] [6]}.

INS 분야에서는 주로 차량의 수식 모델을 이용하고 있으며 가속도계와 자이로 센서로 부터의 데이터를 이용하여 현재의 위치 및 자세를 계산하고^{[4] [6]}, 또한 칼만필터를 이용하여 위치 및 자세를 추정하기도 한다^{[4] [6]}. 그러나, 본 연구에서는 종래와 같은 정밀한 위치 및 자세 데이터를 요구하지 않으며, 종래의 연구 결과를 본 연구에 적용하기에는 계산량이 방대하여 시간이 많이 걸려 구현하기 어렵다.

본 연구에서는 송전선의 궤로핑을 측정하기 위해 사용되는 가속도 센서의 드리프트 보상에 관한 연구를 수행하고자 한다. 가속도 센서는 관성항법장치에서도 필수적으로 사용되는 센서로서 측정된 가속도 신호는 이중 적분을 통하여 위치 신호로서 변환된다. 그러나, 가속도 센서의 필터링 및 계인 조정을 위해서 사용되는 앰프의 특성상 정지 상태에서 미세한 신호가 검출되며, 이러한 신호를 시간에 대해서 적분함으로써 실제 위치에 커다란 오차를 가져오게 된다. 따라서, 가속도 센서의 미세한 드리프트 신호를 보상하기 위한 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 가속도 센서의 드리프트 신호를 보상하기 위한 것으로 드리프트가 일정한 경우와 주기적으로 변하는 경우에 대해 각각 알고리즘을 제안한다. 먼저, 일정 드리프트인 경우는 속도와 위치 드리프트의 기울기를 보상하는 단순보상법을 제안한다. 또한, 드리프트가 일정 주기로 변하는 경우에는, 송전선 궤로핑의 주기적인 특성을 이용한 주기의 드리프트를 보상하는 주기보상 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션에서는 드리프트가 일정한 경우와 주기적으로 변하는 경우에 대해 각각 비교 고찰을 행하며, 본 연구에서 제안한 드리프트 보상 알고리즘의 유효성과 함께 오차의 범위에 따라 그 응용분야를 확인한다.

2. 궤로핑 측정 시스템

2.1. 궤로핑 측정 시스템의 구성

송전선상에 발생하는 궤로핑 측정을 위해서는 송전선의 병진 및 회전운동을 포함한 데이터가 필요하며, 병진운동은 송전선의 종방향, 횡방향, 수직방향의 x, y, z 축방향의 변위로서, 회전운동은 롤링, 피칭 및 요잉으로 나타낸다.

송전선 궤로핑 측정 시스템의 블록선도는 Fig. 1과 같이 나타내며, 마이크로 컴퓨터를 기반으로 하여 각종 센서를 탑재하여 무선으로 측정 데이터를 전송하는 기능을 갖추고 있다. 기본적으로는 송전선의 위치 및 자세를 측정하기 위한 가속도 센서 및 자이로 센서를 탑재하고, 부가적으로는 풍향, 풍속, 온도 및 결빙량 등을 측정하는 기능을

갖추고 있다.

측정 시스템의 기능으로는 원격무선 양방향통신을 이용하여 궤로핑 데이터를 측정 및 분석하고, 원격제어기능으로서 필요한 데이터를 필요한 개수만큼 측정한다. 또한, 전원은 배터리를 이용하며 필요시에는 솔라 패널을 장착하여 자체 충전시킨다.

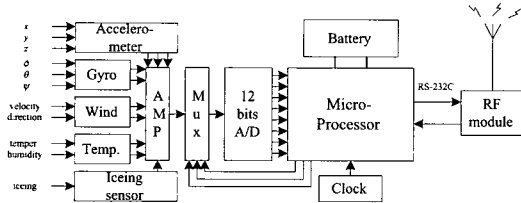


Fig. 1 Block diagram of galloping measurement system.

2.2. 송전선 모델링

본 절에서는 송전선의 모델링을 위해 선형화 기법에 의한 모델링 방법^[3]을 이용한다. 모델의 간략화를 위해 송전선을 단일 질점으로 간주하면 Fig. 2과 같이 나타내어 진다.

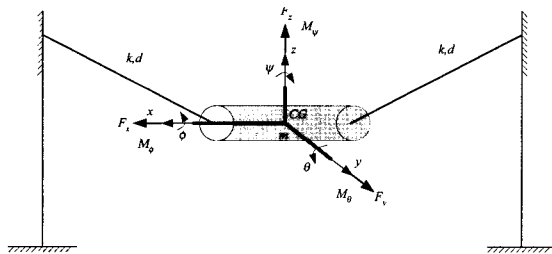


Fig. 2 PTL model with single mass.

위의 그림에서 사용된 기호는 앞의 기호설명과 같다. 위의 송전선 모델은 특성상 x 축, θ 회전각 및 ψ 회전각의 움직임이 상대적으로 작으므로, 이를 무시하여 운동방정식을 세우면 다음과 같다.

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + 2d_y \frac{dy}{dt} + 2k_y y = F_y \tag{1}$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + 2d_z \frac{dz}{dt} + 2k_z z = F_z \tag{2}$$

$$J_\psi \frac{d^2 \psi}{dt^2} + 2d_\psi \frac{d\psi}{dt} + 2k_\psi \psi = M_\psi \tag{3}$$

위의 운동방정식에서 상태변수 및 출력변수를 다음과 같이 고려하면..

$$\mathbf{r}_s = [y \ v_y \ z \ v_z \ \phi \ \omega]^T, \mathbf{y}_s = [y \ z \ \phi]^T$$

상태방정식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{\mathbf{r}}_s = \mathbf{A}_s \mathbf{r}_s + \mathbf{B}_s \mathbf{u}_s \tag{4}$$

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{C}_s \mathbf{r}_s \tag{5}$$

여기서,

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2k_y}{m} & -\frac{2d_y}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2k_z}{m} & -\frac{2d_z}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{2k_\psi}{J_\psi} & -\frac{2d_\psi}{J_\psi} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_\psi} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}_s = [F_y \ F_z \ M_\psi]^T$$

3. 가속도 센서 드리프트 보상 알고리즘

가속도 센서로부터의 신호는 필터 및 증폭기를 통하여 얻어지며, 증폭률이 큰 경우는 거의 정지상태에서도 미약한 드리프트 신호가 발생된다. 이 경우 신호를 이중 적분하여 위치신호로 변환하는 경우에는 상당히 큰 오차가 발생하게 된다.

3.1 드리프트 영향 및 특성 분석

가속도 센서의 드리프트는 가속도 신호로부터 발생하는 것으로 일정한 형태와 주위 환경에 따라

변하는 형태로 나눌 수 있다. 일반적으로 센서의 증폭기 내부로부터 발생하는 드리프트는 일정하나, 계절 및 주야의 변화에 따른 환경의 변화로부터 증폭기 내부의 온도 및 기압의 변화에 따른 드리프트는 주로 저주파 영역의 주기적 형태를 지니게 된다.

본 절에서는 일정한 드리프트 형태를 가정하여 2장에서 고려한 송전선 모델에 의해 그 영향을 고찰하고자 한다. 시뮬레이션에 이용된 파라미터는 다음과 같다.

Table 1 Parameters for drift compensation.

Symbols	Values	Symbols	Values
m	1.628	J_p	0.000001465
k_z	1.628	k_y	5000
d_y	1.628	k_p	432
d_z	1.628	d_p	0.002541

가속도 센서의 드리프트를 0.001으로 한 경우, 시뮬레이션 결과는 Fig. 3와 같이 나타내어진다.

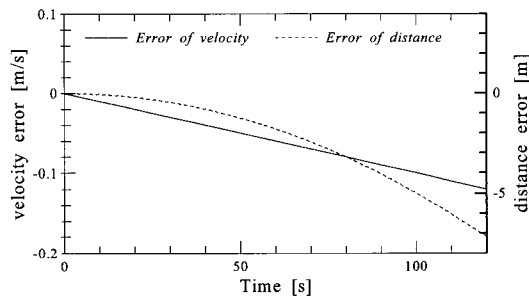


Fig. 3 Drift errors on velocity and distance.

위의 결과로부터 120초 만에 겔로핑 거리 오차가 7(m) 이상이 발생하여, 적분기에 의해 시간이 경과함에 따라 드리프트 영향이 커짐을 알 수 있다.

3.2 드리프트 보상 알고리즘

본 논문에서 사용되는 드리프트 보상 알고리즘은 아래와 같이 나타낸다. 여기서 편의상 y 축에 대해서만 서술한다.

〈드리프트 보상 알고리즘〉

1. 가속도 데이터를 측정한다.(드리프트가 포함되어 있음)

$$\bar{a}_y = a_y + \delta a_y$$

여기서 a_y 는 순수한 가속도 데이터를 나타내며 δa_y 는 드리프트 가속도 데이터를 나타낸다.

2. 적분기를 이용하여 속도를 계산한다.

$$\bar{v}_y(t+1) = \int_t^{t+1} \bar{a}_y(\tau) d\tau + \bar{v}_y(t)$$

3. 속도 드리프트를 보상한다.

$$v_y(t+1) = \bar{v}_y(t+1) + d_v$$

4. 적분기를 이용하여 위치를 계산한다.

$$\bar{y}(t+1) = \int_t^{t+1} \bar{v}_y(\tau) d\tau + \bar{y}(t)$$

5. 위치 드리프트를 보상한다.

$$y(t+1) = \bar{y}(t+1) + d_p$$

위의 알고리즘은 on-line으로 반복적 계산을 통하여 드리프트가 보상된 v_y 와 y 를 계산할 수 있다. 이때, 샘플링 간격이 적을수록 누적 오차량이 적어지나 시간이 경과함에 따라 산술오차가 증가하게 되는 경향이 있다.

그러나, 위의 알고리즘에서는 각 드리프트 보상 계인 d_v 와 d_p 를 구하는 것으로 아래와 같이 단순 보상에 의한 방법과 주기보상에 의한 방법을 소개 하도록 한다.

3.3 드리프트 보상 계인 결정법

3.3.1 단순보상 계인 결정법

일정한 드리프트가 발생하는 경우에서는 일정시간의 평균 드리프트 크기를 구하는 방법으로서 가장 일반적이며 확실한 방법이다.

먼저, 가속도 센서를 일정시간 동안 정지상태에 두고 속도 드리프트 d_v 및 위치 드리프트 d_p 를 측정한다. 또한, 속도 및 위치 드리프트를 측정하는데 있어서 외부의 영향을 받지 않도록 해야 하며, 가능한 장시간 동안 측정하는 것이 바람직하다.

그러나, 단순보상 계인 결정법은 가속도 센서가

사용되는 환경이 변한다면가, 가속도 센서가 변경될 경우에는 새로운 드리프트 값을 예측해야 하는 어려움이 있다.

3.3.2 주기보상 게인 결정법

송전선의 고유진동수는 송전탑, 송전선의 길이, 서브 스패간의 간격, 서브 스패의 종류 및 결빙각 등에 정해지나, 바람에 의한 외력에 대해서는 크게 변동이 없다.

따라서, 송전선의 결빙각 및 크기가 일정하다고 간주하면 송전선의 고유진동수는 거의 변함이 없다고 볼 수 있다.

송전선의 고유진동수를 이용하는 경우 주기 보상 블록선도는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 α_v, α_p 는 각각 속도와 위치의 오차 보상 계인을, β_v, β_p 은 주기 보상 계인을 각각 나타낸다.

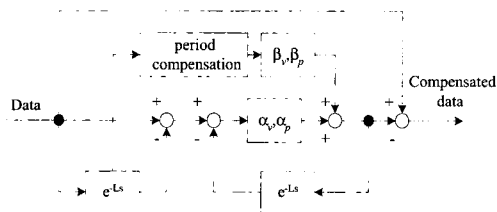


Fig. 4 Block diagram of periodic drift compensation.

〈주기보상 게인 구하는 절차〉

1. FFT 분석을 통하여 송전선의 고유진동수와 크기를 구한다.
2. 송전선의 깎로핑 크기로부터 지배적인 주파수 모드를 선정한다.
3. 선정된 모드로부터 지배적인 주기 L 을 구한다.
4. 2차원 주기 데이터(속도, 위치) 테이블을 만들고 초기화 시킨다.
5. 속도 드리프트 보상 계인을 구한다.

$$d_v(t+1) = \beta_v(\max(peak) + \min(peak))/2 + \alpha_v(\bar{v}_y(t+1) - \bar{v}_y(t+1-L) - d_v(t))$$

단, $\max(peak)$ 및 $\min(peak)$ 는 송전선 진동의 최대 치 및 최소치를 각각 나타낸다.

6. 위치 드리프트 보상 계인을 구한다.

$$d_p(t+1) = \beta_p(\max(peak) + \min(peak))/2 + \alpha_p(\bar{y}(t+1) - \bar{y}(t+1-L) - d_p(t))$$

위의 절차에서 단계 5 및 6은 루틴 내에서 반복적으로 계산하여 보상한다. 그리고 계산된 내용을 테이블에 저장하여 다음 보상에 이용하도록 한다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션은 3.1절의 드리프트 영향 분석에서와 동일한 방법으로 행하며, 이에 대한 보상은 3.2절 및 3.3절 알고리즘에 의해 행하도록 한다.

시뮬레이션에 이용된 드리프트는 아래와 같이 일정한 경우와, 주기적으로 변하는 경우를 각각 가정한다.

$$Drift = \begin{cases} 0.001 \\ 0.001 + 0.0005 \times \sin(1.06t) + 0.0005 \times \sin(0.21t) \end{cases}$$

또한, 시뮬레이션에 이용된 파라미터는 Table 2과 같다. 여기서 Δt 는 데이터 샘플링 시간을 나타낸다.

시뮬레이션에서의 드리프트 보상 결과는 Fig. 5-8와 같다. Fig. 5와 6은 일정 및 주기적인 드리프트에서의 단순보상 알고리즘의 결과를 나타내며, Fig. 7과 8은 주기보상 알고리즘의 경우에 대한 응답을 나타낸다.

Table 2 Parameters for drift compensation.

Symbols	Values	Symbols	Values
L	3.81[s]	Δt	10[ms]
α_v	0.0018	α_p	0.006
β_v	0.09	β_p	0.7

단순보상 알고리즘에서 드리프트의 보상은 6초마다 행하였다. 위의 경우에서 일정 드리프트의 보상은 양호하게 이루어지나, 주기적으로 변하는 경우는 오차가 발생한다. 여기서 드리프트의 보상 주기를 가감 가능하나, 계산을 마이크로 컴퓨터에서 직접 이용하는 경우는 계산 산술오차가 누적되며, 이에 따라 실제적인 보상 주기에 따라 드리프트 보상 정도가 달라질 수 있다.

이에 반하여, 주기보상 알고리즘의 경우는 초기에 오차가 다소 발생하나, 일정 및 주기적인 드리프트의 경우에도 시간이 경과함에 따라 일정한 오차 범위 내에 수렴함을 알 수 있다.

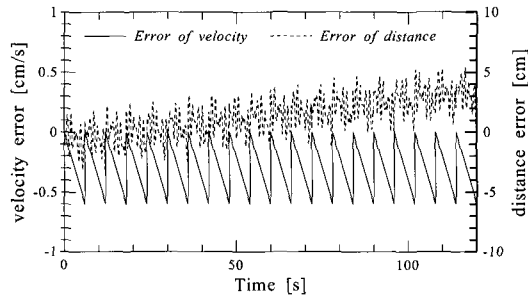


Fig. 5 Errors at constant drift by constant compensation.

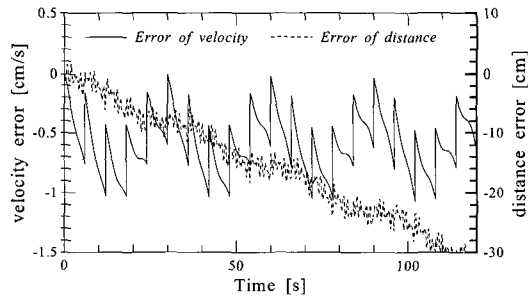


Fig. 6 Errors at period drift by constant compensation.

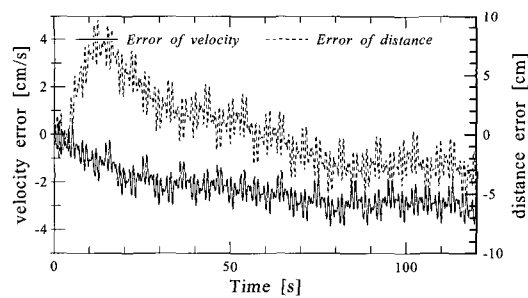


Fig. 7 Errors at constant drift by period compensation.

위의 결과에서와 같이, 단순보상의 경우는 일정 드리프트에 대해서는 간단하며 확실한 방법이며, 드리프트의 크기 변화 및 주기성을 지니고 있

는 경우는 주기보상이 안정적으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이로부터, 가속도 드리프트 오차를 지니는 경우에도 주기성을 이용하여 적절한 수준으로 위치오차를 저감시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

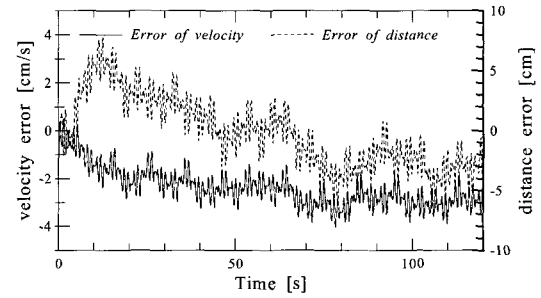


Fig. 8 Errors at period drift by period compensation.

본 연구에서는 종래의 INS에서 사용되는 복잡한 수식 모델 및 칼만필터 등을 이용하여 가속도 센서의 드리프트를 보상하는 것과는 달리, 송전선의 환경적인 제약 조건을 이용한 간단한 산술적 방법으로서 쉽게 센서의 드리프트를 보상하는 방법을 보였다. 이에 대한 응용으로서는 일정한 공간 내에서 움직이는 차량 등으로 확대가 가능하다.

5. 결 론

본 논문에서는 송전선의 궤로핑 측정을 위한 가속도 센서의 드리프트 보상에 관하여 다루었다. 가속도 센서의 드리프트 보상법으로서 일정시간 동안의 평균 드리프트를 이용하여 보상하는 단순보상법과 궤로핑의 주기적인 특성을 보상하는 주기보상법을 제안하였다.

각각의 경우에 대해 시뮬레이션으로 그 유효성을 확인하였다. 그 결과, 단순보상법은 일정 드리프트의 경우에 효과적이며, 주기보상법은 주기적으로 변하는 드리프트 보상에 유효함을 알 수 있었다. 그러나, 필터링과의 연계관계 및 이에 대한 보상법은 차후 논의가 필요하다.

참고문헌

- [1] C.B. Rawlins, Galloping Conductors, In Transmission Line Reference Book: Wind induced conductor motion, Palo Alto, CA: Electric Power Research Institutes, Ch. 4, pp. 113-168, 1979.
- [2] T. Ohkuma, et.al., Numerical Analysis of Overhead Transmission Line Galloping Considering Wind Turbulence, Japan Institute of Electrical Engineers, Vol. B-118, No. 12, pp. 1386-1397, 1998.
- [3] 김환성, 변기식, 송전선의 진선도약 해석에 관한 연구, 한국박용기관학회, 제25권, pp. 106-113, 2001.
- [4] K.R. Britting, Inertial Navigation System Analysis, Wiley, New York, 1971.
- [5] F.A. Faruqi, Non-linear Mathematical Model for Integrated Global Positioning/Inertial Navigation System, Applied Mathematics and Computation, Vol. 115, pp. 191-212, 2000.
- [6] F.A. Faruqi, K.J. Turner, Extended Kalman Filter Synthesis for Integrated Global Positioning/Inertial Navigation System, Applied Mathematics and Computation, Vol. 115, pp. 213-227, 2000.
- [7] 김환성, 변기식, 소상균, 궤로핑 측정 시스템의 가속도 센서 Bias 보상 알고리즘, Proc. of Inter. Conference on Control,

Automation and Systems, pp. 2775-2778, 2001.

후 기

이 논문은 부경대학교 학술연구비 지원사업에 의해 수행되었으며, 관계자에게 감사드립니다

저 자 소 개



변기식 (邊基埴)

1957년 7월 5일생. 1981년 중앙대학교 전기공학과 학사. 1983년 중앙대학교 전기공학과 석사. 1990년 미국 Wichita State University 전기공학과 박사. 현재 부경대학교 공과대학 전기제어계측공학부 정교수



안영주 (安永株)

1957년 1월 22일생. 1986년 부산공업대학교 전기공학과 졸업. 1995년 부산대학교 전기공학과(공학박사). 현재 부경대학교 공과대학 전기제어계측공학부 조교수



김환성 (金煥成)

1965년 6월 13일생. 1991년 부경대학교(구, 부산수대) 기관공학과 졸업. 1993년 동대학원 석사. 1996년 일본 쿠마모토대학 박사. 1998 - 1998년 8월 부경대학교 해양산업개발연구소 박사후과정. 1998년 9 - 현재 한국해양대학교 물류시스템공학과 조교수.