

확장칼만필터를 이용한 수중운동체의 6자유도 운동을 위한 동유체력계수 추정에 관한 연구

· 전 창 완, 박 성 택, 이 장 규
서울대학교 공과대학 제어계측공학과

이 동 권, 최 중 락, 양 승 운
국 방 과 학 연 구 소

A study on the hydrodynamic coefficients estimation for the 6-DOF model of an underwater vehicle with EKF

C. W. Jeon, S. T. Park, J. G. Lee
Dept. of Control & Instrumentation Eng.
Seoul National University

D. K. Lee, J. L. Choi, S. Y. Yang
Agency for Defence Development

Abstract

The hydrodynamic coefficients estimation problem is important to develop an underwater vehicle and design a controller for it. In this paper, an identification theory, the Extended Kalman Filter, is applied to this parameter estimation problem.

In the case that a process noise is not used, all of the parameters are almost exactly converged to the true values respectively. When a process noise is used, all of the parameters are converged to the true values, too, although some parameter estimates are slightly biased. The comparisons of the two trajectories between those generated by the true parameters and those by the estimated parameters show that the parameter estimation problem is well-solved.

과 위험성때문에 비효율적인 방법으로 알려져 있다. 그리고 해석적인 방법은 구성인자들의 복잡성으로 인하여 아직까지 잘 개발되어 있지 않은 상태이다.

한편, 앞에서 언급한 단점들을 극복하기 위하여 시스템 식별법을 수중운동체의 동유체력 계수의 추정에 적용하는 연구가 수행되었다.[2][3] 그러나, [2][3]에서는 수중운동체의 수직면상 운동, 즉 2자유도 운동만이 고려되어 있으므로 그 적용에 불완전함이 있었다. 본 논문에서는 수중운동체의 수직면상 운동을 고려한 2자유도 운동에 수평면상 운동까지 함께 고려함으로써, 수중운동체의 움직임을 완전히 나타낼 수 있는 6자유도 운동에 대한 계수추정을 시도하였다. 계수추정 방법으로는 확장칼만필터를 사용하였는데, 이는 모형 시험법보다 더 정확한 계수 추정치를 제공하는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 추정된 동유체력 계수는 수중운동체 시스템의 설계 및 성능 분석, 제어기 구성 등에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

수중운동체를 개발하고자 할 때에 일반적으로 사전에 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 개발하고자 하는 수중운동체의 인장도, 타각에 대한 응답 특성, 운전 특성, 제어 특성 등 여러가지 특성들에 대한 예측을 하게 된다. 또한 이미 개발된 수중운동체에 대한 제어기를 구성할 때에도 개발된 수중운동체의 정확한 모델을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행함으로써 제어기를 구성하는 것이 일반적인 방법으로 알려져 있다. 이와같이 수중운동체를 개발하거나 제어기를 구성할 때에 필수적으로 따르는 과정이 컴퓨터 시뮬레이션으로 이러한 컴퓨터 시뮬레이션을 위해서는 대상 운동체의 운동 특성을 가장 잘 묘사하는 수학적 모델이 필요하게 된다. 이러한 모델을 구성하기 위해서는 수중운동체의 동유체력계수를 추정하는 과정이 필수적으로 따르게 된다. 이 동유체력계수를 추정하는 방법에는 수중운동체의 축소 모형을 만들어서 시험하는 모형시험법, 실선을 이용한 실선시험법, 해석적인 방법 등이 시도되어 왔다.[1] 그러나 모형시험법은 척도효과(scale effect)등의 이유로 정확한 계수를 구하기에는 한계가 있고 실선시험법은 비용

2. 6자유도 수중운동체 운동 및 동유체력계수 추정

수중운동체의 운동은 운동체를 강체로 모델링하여 병진 및 회전 운동방정식으로 나누어 기술할 수 있다. 본 장에서는 수중운동체의 병진 및 회전 운동에 대한 운동방정식과 이를 표현하기위한 계수구조, 측정기의 모델링, 그리고 계수추정기법으로 사용한 확장칼만필터에 대하여 설명한다.

2.1 수중운동체의 운동방정식

수중을 항해하는 항체의 위치와 자세를 나타내기 위해서는 먼저 기준좌표계(reference frame)와 항체의 동체좌표계(body frame)를 정의하여야 한다. 기준좌표계는 수중항체가 출발하는 지점에 대한 해수면상의 한 점을 원점으로 하여 항체가 출발하는 방향이 해수면에 투영된 방향을 X1축, 해수면에 수직인 아래쪽 방향을 Z1축, 그리고 오른손 법칙에 따라 이미 구해진 두 축으로부터 결정되는 방향을 Y1축으로 정한다. 다음으로는 수중항체의 동체좌표계를 정의하기로 한다. 일반적으로 수중항체는 비교적 가볍고 긴 동체로서, 잘 정의된

(well-defined) 전단과 후단을 가지고 있으며, 또한 좌우대칭을 이루는 경계면이 되는 주대칭면(principal plane of symmetry)이 존재한다고 가정한다. 만약 동체의 무게중심점(center of gravity)이 주대칭면상에 위치하는 경우에는 그 무게중심점을 동체좌표계의 원점으로 정하며, 그렇지 않은 경우에는 주대칭면상의 편리한 어느 한 점을 원점으로 정하는 것이 보통이다. 본 논문에서는 무게중심점을 동체좌표계의 원점으로 잡기로 한다. 이 원점에서 선수(bow)로 향하는 주대칭면상의 축을 X^B축, 이 축에 수직으로 주평면상에서 아래쪽으로 향하는 방향을 Z^B축, 그리고 오른손법칙에 의해 결정되는, 우현(starboard)으로 향하는 방향을 Y^B축으로 정한다. 따라서 X^B-Z^B 평면이 주대칭면이 된다. 한편 부력중심점은 동체상의 고정된 점이므로 x_B와 y_B가 영이 되도록 좌표계의 원점을 잡을 수 있다. 또한 앞에서 수중운동체는 좌우대칭이라고 가정했으므로 I_y와 I_z는 동일한 값을 가지게 되며, I_{xy}, I_{xz}, 및 I_{yz}를 모두 영으로 가정한다. 이와 같은 가정하에서 6개의 자유도(degree of freedom)를 가지는 수중항체는 12개의 상태변수를 사용하여 아래와 같이 비선형 미분방정식(nonlinear differential equation)으로 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} m[\dot{u} + qw - rv - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})] &= \sum X \\ m[\dot{v} + ru - pw + x_G(qr + \dot{r}) + z_G(qr - \dot{p})] &= \sum Y \\ m[\dot{w} + pv - qu + x_G(rp - \dot{q}) - z_G(p^2 + q^2)] &= \sum Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - m z_G(\dot{v} - wp + ur) &= \sum K \quad (2.1) \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[-x_G(\dot{w} - uq + vp) \\ &\quad + z_G(\dot{u} - vr + wq)] = \sum M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m x_G(\dot{v} - wp + ur) &= \sum N \end{aligned}$$

여기서 $\sum X$, $\sum Y$, 및 $\sum Z$ 는 항체에 작용하는 힘벡터의 각방향 성분율, $\sum K$, $\sum M$, 및 $\sum N$ 는 항체에 작용하는 모멘트벡터의 각방향 성분율을 나타내는 것으로써, 힘과 모멘트의 합을 나타내는 이 항들은 유체역학적인 항, 부력과 중력에 의한 항, 프로펠러(propeller)에 기인하는 항 등으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 이 항들은 NSRDC 표준 운동 방정식을 기초로하여 몇 개의 항을 선정하였는데 그 항들은 다음과 같다.[4][5]

$$\begin{aligned} \sum X &= (\frac{1}{2})\rho l^3 X_u \dot{u} \\ &\quad + (\frac{1}{2})\rho l^2 u^2 [X_{\delta_r \delta_r} \delta_r^2 + X_{\delta_s \delta_s} \delta_s^2 + X_{\delta_b \delta_b} \delta_b^2] \\ \sum Y &= (\frac{1}{2})\rho l^3 [Y_r ur + Y_p up] \\ &\quad + (\frac{1}{2})\rho l^2 [Y_v uv + Y_{v|v|} |v|(v^2 + w^2)^{1/2}] \\ &\quad + (\frac{1}{2})\rho l^2 [Y_w uw + Y_{\delta_r} u^2 \delta_r] \\ \sum Z &= (\frac{1}{2})\rho l^3 [Z_q uq + Z_v vp] \quad (2.2) \\ &\quad + (\frac{1}{2})\rho l^2 [Z_s u^2 + Z_w uw + Z_{\delta_s} u^2 \delta_s + Z_{\delta_b} u^2 \delta_b] \\ \sum K &= (\frac{1}{2})\rho l^4 K_p up \\ &\quad + (\frac{1}{2})\rho l^3 [K_v uv + K_{\delta_r} u^2 \delta_r + K_s u^2] \\ \sum M &= (\frac{1}{2})\rho l^4 M_q uq \\ &\quad + (\frac{1}{2})\rho l^3 [M_w uw + M_{\delta_s} u^2 \delta_s] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum N &= (\frac{1}{2})\rho l^4 [N_p up + N_r ur] + (\frac{1}{2})\rho l^3 N_{\delta_r} u^2 \delta_r \\ &\quad + (\frac{1}{2})\rho l^3 [N_v uv + N_{v|v|} |v|(v^2 + w^2)^{1/2}] + N_s u^2 \end{aligned}$$

위 식에서 사용된 기호의 정의는 다음과 같다.

ρ : 물의 밀도(water density)

l : 동체의 전체 길이

전술한 축방향과 제어 편각의 부호 관계가 그림 2.1과 같다.

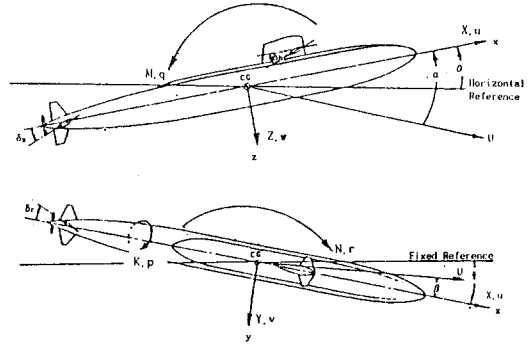


그림 2.1 축방향과 제어 편각의 부호 관계

2.2 측정기의 모델링

위치, 속도, 자세, 잠수 깊이 등을 측정할 수 있는 여러 항법 센서들이 계수 추정에 이용될 수 있는데 본 논문에서는 가속도계, 자이로스코프, 전진속도측정기(EMLOG), 깊이측정기(depth sensor)를 이용하였다. 이들 센서의 측정치와 운동방정식에 사용된 상태변수 사이의 관계식은 아래와 같이 모델링할 수 있다.[6][7]

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_m &= [I + \text{SFE}_a] \{ \mathbf{F}_0 / m + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_s) + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_s \} \\ &\quad + \mathbf{b}_a + \boldsymbol{\xi}_a \\ \boldsymbol{\omega}_m &= [I + \text{SFE}_\omega] \boldsymbol{\omega} + \text{ASE } \mathbf{a}_\omega + \mathbf{b}_\omega + \boldsymbol{\xi}_\omega \quad (2.3) \\ u_m &= u + \xi_u \\ z_m &= z + \xi_z \end{aligned}$$

여기서, 사용된 기호의 정의는 다음과 같다.

$\mathbf{a}_m, \boldsymbol{\omega}_m, u_m, z_m$: 센서의 측정치

$\text{SFE}_a, \text{SFE}_\omega$: 스케일 팩터(scale factor) 오차 행렬

\mathbf{F}_0 : 항체에 작용하는 힘벡터 ($\sum X, \sum Y, \sum Z$)

$\boldsymbol{\omega}$: 항체의 회전 각속도벡터

\mathbf{r}_s : 기준점에 대한 측정기의 위치벡터

$\mathbf{b}_a, \mathbf{b}_\omega$: 편향 오차(bias error)

$\boldsymbol{\xi}_a, \boldsymbol{\xi}_\omega, \xi_u, \xi_z$: 각 센서의 불규칙 오차(perturbation error)

ASE : 가속도에 따른 부동오차

\mathbf{a}_ω : 자이로 위치에서의 가속도

u : 항체의 X^B축 방향의 속도

z : 항체의 Z^B축 방향 좌표

2.3 확장칼만필터에 의한 계수추정

본 논문에서는 계수추정 기법으로 확장칼만필터를 사용하였다. 확장칼만필터를 이용한 계수 추정법은 시스템의 상태변수 x_s 에 계수 벡터 a 를 덧붙인 새로운 상태변수 x 를 이용하여 확장칼만필터 알고리즘을 수행하는 방법이다.[8] 새로운 상태변수 x 에 대한 칼만 필터 적용식 중 치이가 있는 부분은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}_s(t) \\ \dot{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_s(t), a, t) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G w(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$z_k = h_k [x_s(t), a] + v_k \quad (2.4)$$

계수 벡터 a 를 시간에 따라 변화하는 불규칙변수(random variable)로 간주하여 나타내었다. $w(t)$ 는 공분산행렬이 P_{ss} 로 표현되는 영평균 백색정규잡음(zero mean white Gaussian noise)이다. 새로운 상태변수의 오차분산 행렬을 P 라고 할 때 다음과 같은 식을 만족한다.

$$P = \begin{bmatrix} P_{ss} & P_{sa} \\ P_{sa} & P_{aa} \end{bmatrix}$$

$$\dot{P}_{ss} = F_{xs} P_{ss} + P_{ss} F_{xs}^T + F_a P_{sa}^T + P_{sa} F_a^T + G Q G^T$$

$$\dot{P}_{sa} = F_{xs} P_{sa} + F_a P_{aa}$$

$$\dot{P}_{aa} = 0 \quad (2.5)$$

여기서, F_{xs} , F_a 는 아래와 같이 정의되는 행렬이다.

$$F_{xs} = \frac{\partial f[x_s(t), a, t]}{\partial x_s(t)}$$

$$F_a = \frac{\partial f[x_s(t), a, t]}{\partial a} \quad (2.6)$$

위 식에서 알 수 있는 바와 같이 확장칼만필터 알고리즘을 적용하기 위해서는 실시간으로 시스템 상태변수 및 계수에 대한 편미분치를 계산하여야 한다.[9] 확장칼만필터를 이용한 계수 추정 방법은 새로운 측정치가 들어오면 측정 오차를 계산하여 시스템의 상태변수 뿐만 아니라 계수까지도 개선시키므로, 시스템 모델 및 계수 모델이 부적절하거나 계수들의 초기 공분산 설정이 불합리할 경우, 또한 시스템의 공정잡음의 예측이 부적절할 경우에는 확장칼만필터가 발산하거나 추정치가 다른 값으로 수렴하는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 계수 구조의 결정과 계수들의 초기 공분산의 설정, 시스템의 공정잡음의 예측 등에 정확성을 기해야 한다.

3. 시뮬레이션 및 결과 분석

3.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션은 2장에서 설명한 수중운동체의 운동방정식을 이용하여 제어타각을 변화시켜 가상의 측정치를 발생시키고, 이 측정치를 이용하여 확장칼만필터 알고리즘으로 계수추정을 하였다. 측정치 발생에 이용된 계수의 참값은 수조시험 결과 얻어진 계수들을 이용하였으며 모든 계수의 초기치는 영(zero)으로 하였다. 이때 측정 및 적분주기는 0.02초로 하고 추력은 항력(drag force)과 같다고 보았으며 제어타각의 궤적은 구형파를 사용하였다. 구형파는 모든 주파수 성분을 포함하고 있어 계수추정에 효과적인 것으로 알려져 있다.[10] 측정기 모델에서 가속도계와 레이트자이로스코프의 스케일팩터, 가속도에 따른 부동오차등은 영행렬로 간주하였다. 이상의 조건하에서 추정된 계수들의 참값으로 수렴하는 정도를 시뮬레이션을 통하여 알아 보았다.

3.2 시뮬레이션 결과 분석

먼저, 3.1절의 조건하에서 모든 계수의 초기치가 영(zero)이고 시스템 공정잡음이 없는 경우와 시스템의 공정잡음이 있는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 후자의 경우에 대하여 계수의 참값에 의한 운항궤적과 추정된 계수에 의한 운항궤적과의 비교를 하였다.

표 3.1은 시스템 공정잡음이 없는 경우의 시뮬레이션 결과를 정리한 것이다. 표의 첫번째 열부터 계수의 참값, 계수의 초기치, 계수의 추정치, 초기 계수 오차 표준편차, 계수의 최종 오차 표준편차, 정규화된 오차, 계수 개선도를 각각 나타내고 있다. 정규화된 오차는 계수의 추정치와 초기치와의 차이를 마지막 오차 표준편차로 나눈 것으로서 자세한 식은 다음과 같다.

$$E_{normal} = (C_{estimated} - C_{true}) / P_{final}$$

여기서 E_{normal} 은 계수의 정규화 오차, $C_{estimated}$ 은 계수의 추정치, C_{true} 는 계수의 참값, P_{final} 은 계수의 최종 오차표준편차를 각각 나타낸다. 계수 개선도는 오차 표준편차의 감소 정도를 나타내는 것으로서 초기 오차표준편차를 최종 오차표준편차로 나눈 값으로 표시된다. 이러한 계수 개선도는 각 계수에 미치는 측정치의 영향을 나타내는 지표가 된다. 한편, 표의 결과를 분석해 보면 모든 계수가 거의 정확히 참값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이로 미루어 실선 측정치를 측정할 때에는 측정환경이 양호할수록 더 정확한 추정치를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 3.1은 시스템 공정잡음을 병진가속도축에 0.005(ft/sec², 표준편차), 각가속도축에 0.0005(ft-lb, 표준편차)를 인가했을 경우에 50초 동안의 계수추정결과를 그림으로 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 계수의 추정과정을, 점선은 계수의 오차표준편차가 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고 직선으로 된 실선은 계수의 참값을 표시한 것으로서 각축의 계수들이 약간의 바이어스는 있지만 모두 참값으로 수렴하는 것을 보여주고 있다. 이때 계수의 초기치는 참값의 절반값으로 주었다. 그림 3.2는 위와 같은 조건에서 50초동안 추정된

값을 초기치로 하여 다시 한번 50초 동안 계수추정을 시도하여 추정된 값으로 궤적을 그려 참값에 의한 궤적과 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 모든 상태변수가 참값에 의한 상태변수 궤적과 거의 정확하게 일치하는 것을 볼 수 있다. 이상의 결과에서 시스템 식별기법이 수중운동체의 계수추정에 적용되었을 때에 거의 정확하게 동유체력계수를 추정해 낼 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 확장칼만필터를 이용하여 수중운동체의 6자유도 운동에 대한 동유체력계수를 추정하였다. 추정 결과 시스템의 공정잡음이 없을 경우 추정된 계수들이 참값으로 모두 수렴하는 것을 볼 수 있었으며, 시스템 공정잡음이 존재하는 경우에도 각 계수마다 수렴속도에는 차이가 있었으나 모두 만족할 만한 수렴특성을 보였다. 이와 같은 논문의 결과는 앞으로 수중운동체의 개발 및 제어기 구성에 유용하게 사용되어질 것으로 기대된다. 앞으로의 연구과제로는 시스템 공정잡음, 측정잡음, 측정치를 측정하는 시간 간격, 적분 간격 등이 수중운동체의 계수추정에 미치는 영향 분석과, 더 많은 계수들을 더 정확하게 추정할 수 있도록 실선측정치를 위한 제어타각 시나리오 연구 등을 들 수 있겠다.

참고문헌

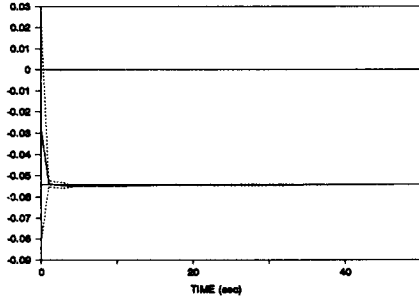
- [1] J. Feldman, Straightline and Rotating Arm Captive-Model Experiments to Investigate the Stability and Control Characteristics of Submarine and Other Submerged Vehicles, Report No. DTIC/SHD-0393-20, Nov. 1987
- [2] 이동권, 최중락, 양승윤, "확장칼만필터를 이용한 수중운동체의 유체계수식별", 한국자동제어학술회의 논문집, 1991. 10. pp.611-615.
- [3] 전창완, 박성택, 이장규, 수중운동체의 동유체력계수 식별 프로그램 개발, 서울대학교 부설 자동화시스템 공동연구소, 연구보고서, 1991.
- [4] Goodyear Aerospace Corporation, Advanced Submarine System Equations Study, Technical Report No. NAVTRADEVCEEN 68-C-0050-1, November 1969.
- [5] Morton Gortler, Grant R. Hagen, Standard Equation of Motion for Submarine Simulation, TASK, June 1967.
- [6] James E. Kain, Charles M. Brown, Jr., and Jang G. Lee, Missile Aerodynamic Parameter Identification from Flight Test Data, The Analytic Sciences Corp., Report No. AFATL-TR-77-129, 30 November 1977.
- [7] 이 장규, 이 달호, 황 병구, 무인비행체에 적합한 공력계수 식별프로그램 개발(3차년도), 서울대학교 부설 공학연구소, 연구보고서, 1992.
- [8] Gelb, A. (Ed.), Applied Optimal Estimation, MIT Press, Cambridge, 1974.

[9] 전창완, 박성택, 이장규, 수중운동체의 유체계수 식별 연구, 서울대학교 부설 자동화시스템 공동연구소, 연구 보고서, 1992.

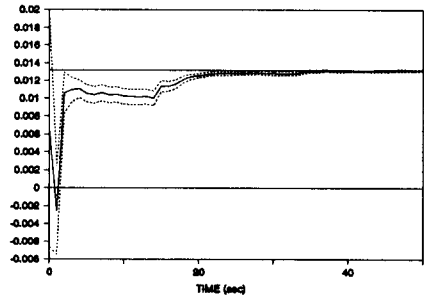
[10] Raman K. Mehra, "Optimal Input Signals for Parameter Estimation in Dynamic Systems-Survey and New Results", IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-19, No.6, Dec. 1974, pp. 753-768.

표 3.1 시스템 공정잡음이 없는 경우의 계수추정 결과

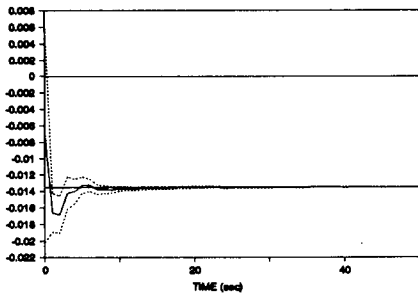
계수	참값	초기값	추정값	초기 표준편차	추정 표준편차	정규화 오차	계수 개선도
ZQ	-0.125E-01	0.000E+00	-0.126E-01	0.405E-01	0.486E-04	-0.191E+01	0.833E+03
MSTR	-0.115E-03	0.000E+00	-0.114E-03	0.360E-03	0.848E-06	0.167E+01	0.425E+03
MW	0.138E-01	0.000E+00	0.138E-01	0.354E-01	0.978E-04	0.497E+00	0.362E+03
MDS	-0.472E-02	0.000E+00	-0.469E-02	0.145E-01	0.200E-04	0.148E+01	0.724E+03
XSDSDS	-0.441E-01	0.000E+00	-0.441E-01	0.162E+00	0.246E-04	-0.516E+00	0.659E+04
XUD	-0.680E-03	0.000E+00	-0.682E-03	0.264E-02	0.195E-05	-0.104E+01	0.135E+04
ZDS	-0.872E-02	0.000E+00	-0.871E-02	0.292E-01	0.982E-05	0.740E+00	0.297E+04
ZSTR	-0.202E-03	0.000E+00	-0.203E-03	0.612E-03	0.171E-05	-0.443E+00	0.358E+03
ZW	-0.250E-01	0.000E+00	-0.248E-01	0.840E-01	0.145E-03	0.114E+01	0.579E+03
MQ	-0.573E-02	0.000E+00	-0.570E-02	0.178E-01	0.395E-04	0.694E+00	0.450E+03
YSTR	0.222E-03	0.000E+00	0.221E-03	0.726E-03	0.228E-05	-0.392E+00	0.318E+03
YDR	0.140E-01	0.000E+00	0.140E-01	0.330E-01	0.116E-04	0.220E+00	0.284E+04
YV	-0.234E-01	0.000E+00	-0.234E-01	0.792E-01	0.294E-03	-0.246E-01	0.270E+03
YVAV	-0.122E+00	0.000E+00	-0.123E+00	0.666E+00	0.117E-02	-0.115E+01	0.568E+03
NSTR	-0.292E-03	0.000E+00	-0.293E-03	0.726E-03	0.172E-05	-0.662E+00	0.422E+03
NDR	-0.525E-02	0.000E+00	-0.526E-02	0.164E-01	0.327E-04	-0.312E+00	0.502E+03
KSTR	-0.459E-05	0.000E+00	-0.464E-05	0.168E-04	0.151E-06	-0.340E+00	0.111E+03
KDR	-0.234E-03	0.000E+00	-0.236E-03	0.762E-03	0.179E-05	-0.840E+00	0.425E+03
KV	-0.482E-03	0.000E+00	-0.486E-03	0.136E-02	0.256E-04	0.219E+00	0.531E+02
KP	-0.120E-03	0.000E+00	-0.118E-03	0.420E-03	0.795E-05	0.208E+00	0.528E+02
NP	0.153E-02	0.000E+00	0.151E-02	0.309E-02	0.369E-04	-0.482E+00	0.837E+02
NR	-0.555E-02	0.000E+00	-0.557E-02	0.151E-01	0.518E-04	-0.394E+00	0.292E+03
NV	-0.268E-01	0.000E+00	-0.269E-01	0.504E-01	0.168E-03	-0.658E+00	0.300E+03
NVAV	0.589E-01	0.000E+00	0.588E-01	0.162E+00	0.101E-02	-0.135E+00	0.160E+03
ZVP	-0.276E-01	0.000E+00	-0.276E-01	0.738E-01	0.526E-03	-0.305E-01	0.140E+03
ZDB	-0.376E-02	0.000E+00	-0.376E-02	0.828E-02	0.746E-05	-0.488E+00	0.111E+04
XDRDR	-0.650E-02	0.000E+00	-0.650E-02	0.255E-01	0.751E-04	-0.538E-01	0.339E+03
YR	0.232E-01	0.000E+00	0.232E-01	0.396E-01	0.718E-04	0.486E-01	0.551E+03
YP	-0.250E-02	0.000E+00	-0.251E-02	0.600E-02	0.279E-04	-0.251E+00	0.215E+03
XDBDB	-0.153E-03	0.000E+00	-0.153E-03	0.309E-03	0.280E-04	0.315E-02	0.110E+02



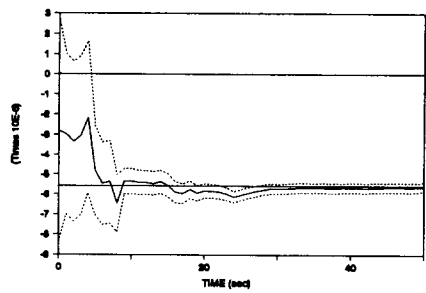
(a) XSDSDS



(b) YR

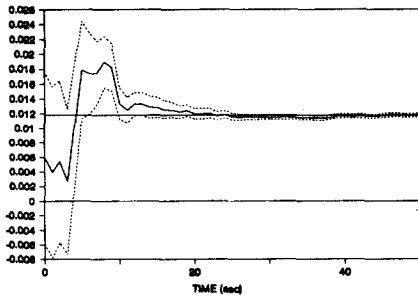


(c) ZQ

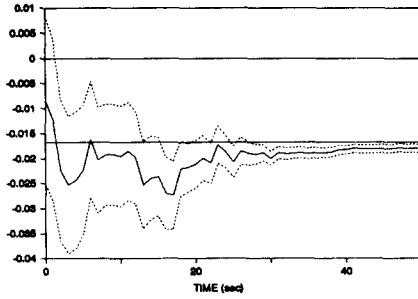


(d) KSTR

그림 3.1 시스템 공정잡음이 있는 경우의 계수추정 결과

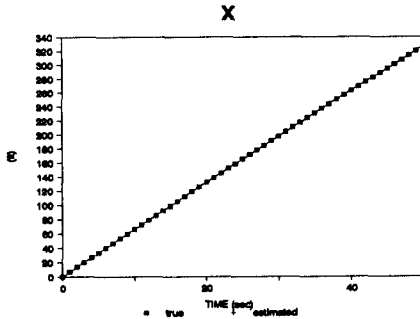


(e) MW

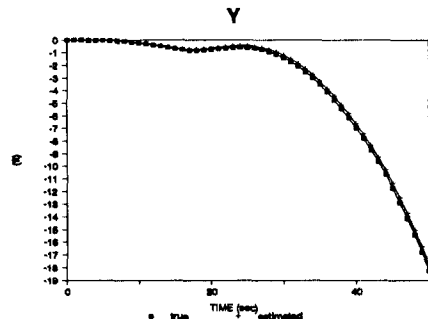


(f) NV

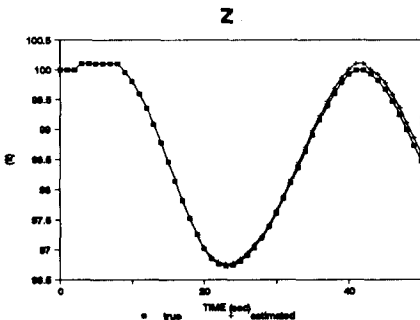
그림 3.1 시스템 공정잡음이 있는 경우의 계수추정 결과(계속)



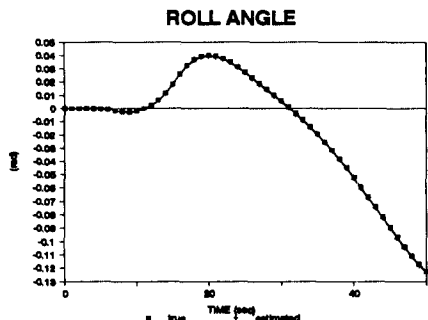
(a) x



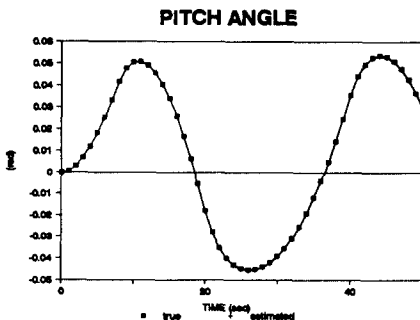
(b) y



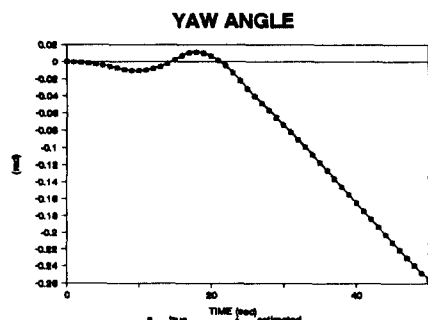
(c) z



(d) ϕ



(e) θ



(f) ψ

그림 3.2 상태변수의 궤적비교