

탐색기 주사루프의 강인 제어기 설계와 성능분석

이 호 평*, 황 흥 연*, 송 창 섭**

Robust Controller Design and Performance Analysis of Seeker Scan-Loop

Ho-Pyeong Lee*, Hong-Yeon Hwang*, Chang-Seop Song**

ABSTRACT

The Robust Controller for scan-loop is designed using LQG/LTR Methodology. The design and analysis of spiral, rosette and conical scan patterns are discussed. The performance and robustness of the LQG/LTR controller are analyzed through experiments and compared with those of the P-controller. Especially to improve the scan performance at large look angle, the cage coil output is linearized using a binomial equation. It is demonstrated that the scan-loop system by the LQG/LTR control is very robust to phase uncertainties.

Key Words : Seeker Scan-Loop(탐색기 주사루프), Scan Pattern(주사파형), LQG/LTR Controller(LQG/LTR제어기), Binomial Equation(이항식)

1. 서 론

탐색기는 자전안정화된 자이로(Spin-stabilized Gyroscope)를 구동하여 지상에 있는 레이더에서 제공되는 표적의 위치에 근거하여 표적을 탐색하게 된다. 그러나 레이더에서 제공되는 표적의 위치정보가 2차원 가우시안(Gaussian)으로 분포하고 있고 상대적으로 탐색기의 순간시계가 작을 경우 주어진 위치정보를 중심으로 주사시킬 필요가 있다. 따라서 탐색기의 표적포착확률을 높이기 위해서는 유도된 최적 주사파형을 기준신호로 하는 주사계의 보다 우수한 성능이 요구됨을 알 수 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 탐색기의 주사계에 대한 정확한 수학적 모델링, 루프해석, 강인한

제어기 및 최적의 주사파형의 설계등이 필수적이다. 그러나 주사계의 정확한 모델링이 쉽지 않다는 점을 고려하면 주사계의 제어방법으로 LQG/LTR제어와 같은 모델링오차에 강인한 제어기법이 요구되며, 단일입출력 개념의 고전적인 제어방법으로는 성능측면 뿐만 아니라 안정도-강인성문제를 주사계와 같은 다변수 시스템에 적용하기는 근본적으로 한계가 있다.

전형적인 2입력 2출력계인 탐색기의 주사계와 같은 다변수 제어시스템을 설계하는 방법에는 여러가지가 있으나 그 중 명령추종, 외란제거등의 시스템 성능과 모델링 오차에 대한 안정도-강인성 문제에 관한 설계사양들을 설계시에 직접 고려할 수 있는 LQG/LTR(Linear Quadratic Gaussian Control with Loop Transfer

* 국방과학연구소

** 한양대학교 정밀기계공학과

의 정밀도를 증가시키기 위해서는 2차원적으로 매우 많은 자료를 기억시키고 있어야 하므로 프로세서의 기억 용량에 큰 부담을 주게 된다. 따라서 본 연구에서는 선형기법으로 전자의 방법을 채택하였다.

우선 다항식의 형태를 피치, 요 각 측사이에 커플링이 없는 독립된 다항식으로 가정하고 최소오차자승법으로 커브 피팅하였으나, 그 결과가 피치, 요측상에서는 비교적 만족스러운 반면, 그의 Off-axis에서는 커플링에 기인하여 Look Angle이 커질수록 주사파형이 매우 찌그러지는 결과를 초래하였다. 따라서 한 방향성분의 차이로 위치는 그 방향으로 측정된 전압과 다른 방향의 전압 또한 두방향사이의 곱의 함수로 가정하여 피치, 요방향의 위치는 각각 다음과 같은 다항식의 함수로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Y_{pitch} &= c_0 + c_1 X_p + c_2 X_p^2 + \dots + c_n X_p^n \\
 &+ d_1 X_y + \dots + d_m X_y^m + \sum q_k X_p^i X_y^j + e_p \\
 &= \boldsymbol{\varphi}^T \boldsymbol{\theta}_p + e_p \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_{yaw} &= a_0 + a_1 X_y + a_2 X_y^2 + \dots + a_n X_y^n + b_1 X_p \\
 &+ \dots + b_m X_p^m + \sum p_k X_y^i X_p^j + e_y \\
 &= \boldsymbol{\phi}^T \boldsymbol{\theta}_y + e_y \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\varphi} |_{(n+m+k+1) \times 1} &= [1 \quad X_p \quad X_p^2 \quad \dots \quad X_p^n \quad X_y \\
 &\quad \dots \quad X_y^m \quad X_p X_y \quad X_p^2 X_y \quad \dots \quad X_p X_y^{n-1}]^T \\
 \boldsymbol{\phi} |_{(n+m+k+1) \times 1} &= [1 \quad X_y \quad X_y^2 \quad \dots \quad X_y^n \quad X_p \\
 &\quad \dots \quad X_p^m \quad X_y X_p \quad X_y^2 X_p \quad \dots \quad X_y X_p^{m-1}]^T
 \end{aligned}$$

$$\boldsymbol{\theta}_p |_{(n+m+k+1) \times 1} = [c_0 \quad c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_n \quad d_1 \quad \dots \quad d_m \quad q_1 \quad \dots \quad q_k]^T$$

$$\boldsymbol{\theta}_y |_{(n+m+k+1) \times 1} = [a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n \quad b_1 \quad \dots \quad b_m \quad p_1 \quad \dots \quad p_k]^T$$

Y_{pitch}, Y_{yaw} : 피치, 요방향의 추정값

X_p, X_y : 피치, 요방향의 측정전압

위 식에서 총 N별에 대한 요방향 행렬표현식은

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

이고 여기서 각 행렬의 차원과 구성은 다음과 같다.

$$\mathbf{Y} |_{N \times 1} = [Y_{yaw}(1) \quad Y_{yaw}(2) \quad \dots \quad Y_{yaw}(N)]^T$$

$$\boldsymbol{\Psi} |_{N \times (n+m+k+1)} = [\boldsymbol{\phi}(1) \quad \boldsymbol{\phi}(2) \quad \dots \quad \boldsymbol{\phi}(N)]^T$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & X_y(1) & X_y^2(1) & \dots & X_y^n(1) & X_p(1) \\ 1 & X_y(2) & X_y^2(2) & \dots & X_y^n(2) & X_p(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_y(N) & X_y^2(N) & \dots & X_y^n(N) & X_p(N) \\ \dots & X_p^m(1) & X_y(1)X_p(1) & \dots & X_y(1)X_p^{n-1}(1) \\ \dots & X_p^m(2) & X_y(2)X_p(2) & \dots & X_y(2)X_p^{n-1}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & X_p^m(N) & X_y(N)X_p(N) & \dots & X_y(N)X_p^{n-1}(N) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta} |_{(n+m+k+1) \times 1} = [a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n \quad b_1 \quad \dots \quad b_m \quad p_1 \quad \dots \quad p_k]^T$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} |_{N \times 1} = [e_y(1) \quad e_y(2) \quad \dots \quad e_y(N)]^T$$

성능평가지수를

$$\text{Minimize } J(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=1}^N e_y^2(k; \boldsymbol{\theta}) \quad (6)$$

와 같이 정의하면 정규식(Normal Equation)은

$$\boldsymbol{\Psi}^T \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{Y} \quad (7)$$

으로 유도된다. 일반적으로 다항식의 차수(n+m+1)가 커질수록 피팅오차가 줄어으나 실시간 계산시간의 제약 조건과 유효자리수 때문에 적절히 절충하여야 한다. 본 연구에서는 다항식의 차수를 점차적으로 증가시키면서 식(6)으로 표현된 성능평가지수의 값을 관찰하여 n=5, m=2, k=2로 결정하였다. 또한 자료벌수는 Look Angle ±30°까지 피치-요평면을 각각 1° 간격의 원행렬 형태로 구분하여 총 2812개를 측정하였다. 참고로 m=k=0일 경우가 종래의 1차원 최소오차자승법이 된다.

3. 주사루프의 LQG/LTR 제어기 설계

3.1 주사계의 설계사양

성능 요구규격중의 하나는 각각의 제어 채널에서 제 단입력에 대해 정상상태 오차가 0이 되도록 하는 것이며, 또 다른 성능 요구규격은 저주파수에서 외란제거 성능과 우수한 명령추종 성능이다. 상기 성능 요구규격은 감도 전달함수행렬, $S(j\omega)$ 이 설정된 주파수 영역에서 다음과 같은 구속조건식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\max} [S(j\omega)] &< -20 \text{ dB} \\
 \text{for all } \omega &< 0.8 \text{ rad/s} \quad (8)
 \end{aligned}$$

강인성 요구규격은 고주파수에서의 센서잡음과 모델링 오차에 대한 강인성을 보장하는 것으로서 페루프 전달함수행렬, $T(j\omega)$ 가 설정된 주파수 영역에서 다음과 같은

구속조건을 만족해야 한다.

$$\sigma_{\max} [T(j\omega)] < -20 \text{ dB}$$

$$\text{for all } \omega > 90 \text{ rad/s} \quad (9)$$

그의 주사 정밀도 규격으로서 요구되는 각속도를 고려하면 교차주파수가 약 15rad/s 이상 되어야 하고, 10deg/s의 속도로 원형주사시 주사 정밀도 10% 이내, Look Angle 10°에서의 위치정밀도 1'미만, 출력간에 상호 커플링이 적어야 하며 적당한 시스템 감쇠비를 가져야 한다.

3.2 LQG/LTR 제어기 설계

LQG/LTR제어기의 설계절차는 참고문헌(4,5)에 자세히 나와 있으며, 본 논문에서는 설계과정중 필요한 주요 식은 구체적인 유도나 증명없이 도입하여 사용하였으며 설계결과만 언급하고자 한다. 프로세스와 센서에 가상적인 백색잡음을 고려한 주사계 플랜트 $G(s)$ 는 다음과 같은 상태방정식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) + \Gamma \zeta(t) \quad (10)$$

$$y(t) = C x(t) + \theta(t) \quad (11)$$

여기서 Γ 는 가상적인 외란입력행렬이고, $\zeta(t)$ 는 프로세스 백색잡음으로서 0-평균, 공분산의 강도가 일원행렬이며, $\theta(t)$ 는 센서의 백색잡음으로서 $\zeta(t)$ 와는 비상관된 0-평균, 공분산의 강도가 일원행렬의 μ 배로 표현된다고 가정한다.

$$E [\zeta(t) \zeta^T(\tau)] = I \delta(t-\tau) \quad (12)$$

$$E [\theta(t) \theta^T(\tau)] = \mu I \delta(t-\tau) \quad (13)$$

주사계는 고유값 0을 이미 포함하고 있으므로, 임의의 일정한 입력에 대하여 0-정상상태오차를 만족시키기 위하여 자유적분요소를 첨가시킬 필요는 없다.

설계파라미터 Γ 를 선정하는 방법은 어느 주파수영역에서 특이값들의 형상을 일치시키느냐에 따라 달라지나, 본 연구에서는 이미 특이값들의 형상이 잘 일치하고 있고 대역폭을 제외하고는 안정도-강인성 성능을 만족하고 있으므로 $\Gamma=B$ 로 선정하였다. 즉 목표필터루프의 형상을 주사계 개루프의 특이값형상이 되도록 한다.

또 다른 설계파라미터인 μ 는 목표필터루프의 DC게인을 조절하는데 이용되며, 이 값을 변화시키에 따라서 개루프의 특이값 선도가 위로 또는 아래로 움직이므로 요구되는 시스템 대역폭을 고려하여 선택을 하게 된다.

제시된 설계사양중 대역폭을 고려하여 $\mu=0.2$ 로 선택하였다.

다음은 루프전달회복단계로서 이때의 설계파라미터는 LQ레귤레이터의 가격함수에 포함되어있는 제어가중변수 ρ 값이며, 주사계와 같이 허수축상에 영점이 존재하는 경우 ρ 값이 0에 수렴할수록 제어기의 극점중 일부는 플랜트의 영점으로 수렴하게 되므로, 루프전달회복을 과도하게 수행하면 할수록 제어기 출력은 진동하게 되는 경향을 보이게 된다. 따라서 제어가중변수 ρ 는 전술한 성능요구규격과 제어기출력의 응답특성을 고려하여 최종적으로 $\rho=0.005$ 로 선정하였다. Fig.2는 설계된 목표필터루프와 $\rho=0.005$ 로 정했을 때 목표필터루프의 루프전달회복된 결과를 보이고 있다.

Fig.3은 $\rho=0.005$ 일 때 감도 및 페루프 전달함수행렬의 특이값 선도를 도시하고 있다. Fig.3에 의하면 $\omega=0$ 부근에서 페루프 특이값의 크기가 1이므로 정상상태오차가 0이고 대략 $\omega=15\text{rad/s}$ 이하에서는 양호한 명령추종성능과 외란제거성능을 보이고 있으며, 또한 페루프 특이값선도로부터 고주파영역에서의 센서잡음제거성능도 우수함을 알 수 있다.

이상의 설계결과를 이용하여 구해진 10차의 LQG/LTR제어기를 실제 디지털제어로 구현하기 위해서는 실시간 계산량때문에 제어기의 차수를 축소할 필요가 있다. 본 연구에서는 내적균형법을 이용하여 제어기의 차수를 축소하였으며, 구체적인 방법론은 참고문헌(3, 6)에 나와 있으며 본 논문에서는 결과만을 기술하고자 한다. 내적균형법을 주사계의 LQG/LTR제어기에 적용하면, 가제어성 그라미언, W_c 와 가관측성 그라미언, W_o 의

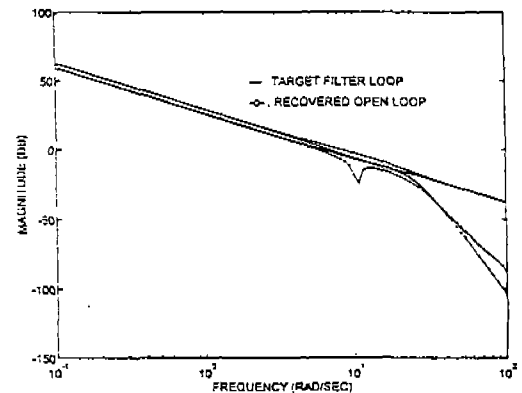


Fig.2 Target filter loop and loop transfer recovery result

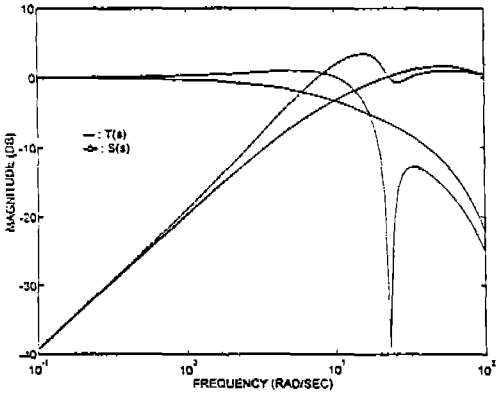


Fig.3 Singular values of $S(j\omega)$ and $T(j\omega)$

특이값은 각각 $\sigma_1 = \sigma_2 = 3.4$, $\sigma_3 = \sigma_4 = 0.8$, $\sigma_5 = \sigma_6 = 0.2$, $\sigma_7 = \sigma_8 = 0.006$, $\sigma_9 = \sigma_{10} = 0.000003$ 로 구해지고, 구해진 특이값들로부터 설계된 10차 LQG/LTR제어기는 6차로 축소할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 주사파형의 설계

4.1 나선형 주사파형(Spiral Scan Pattern)

원하는 총 주사영역을 중복하지 않으면서도 빠진 곳 없이 주사하려면 임의의 회전각 θ 에서의 순간시계와 $(\theta + 2\pi)$ 에서의 순간시계가 겹치면 된다. 나선형 주사를 위한 기준 주사신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R(\theta) = (\gamma / \pi) \theta \quad (14)$$

R : 주사중심으로부터 순간시계 중심까지의 거리 [deg]

γ : 순간시계(Instantaneous Field-of View), [rad]

θ : 회전 각(Rotation Angle), [rad]

원하는 총 주사시계가 $\pm R_{sfov}$ [deg]일 때 나선형 주사파형의 최대 회전각, θ_{max} 는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$R(\theta_{max} - 9\pi) + \gamma = R_{sfov} \quad (15)$$

식(14)를 이용하면 식(15)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\theta_{max} = (\gamma / \pi) R_{sfov} \quad (16)$$

따라서 직교좌표계에서의 기준 주사신호는 다음과 같이 표현된다.

$$R_x(t) = (\gamma / \pi) \theta(t) \cos\{\theta(t)\} \quad (17)$$

$$R_y(t) = (\gamma / \pi) \theta(t) \sin\{\theta(t)\} \quad (18)$$

또한 순간 주사속도, $V_s(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_s(t) = [R_x^2(t) + R_y^2(t)]^{1/2} \\ = (\gamma / \pi) \omega [1 + \theta^2(t)]^{1/2} \quad (19)$$

만약에 순간 주사속도, $V_s(t)$ 를 최대 주사속도, V_{max} 로 제한한다고 가정하면 이때의 요구되는 각속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\pi V_{max}}{\gamma [1 + \theta^2(t)]^{1/2}} \quad (20)$$

1회의 나선형 주사파형을 발생시키는데 소요되는 시간을 구하면 다음과 같다.

$$T_s = \frac{\gamma}{\pi V_{max}} \int_0^{\theta_{max}} [1 + \theta^2(t)]^{1/2} d\theta \\ = \frac{\gamma}{\pi V_{max}} [\theta_{max} (1 + \theta_{max}^2)^{1/2} \\ + \log\{\theta_{max} (1 + \theta_{max}^2)^{1/2} + 1\}] \quad (21)$$

4.2 장미꽃형 주사파형(Rosette Scan Pattern)

탐색기의 순간시계와 총 주사영역을 고려하여 앞의 수를 4개로 정하면, 4잎 장미꽃형 주사를 위한 직교좌표계에서의 기준 주사신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_x(t) = 2\gamma \cos(3\theta) - \gamma \cos(\theta) \quad (22)$$

$$R_y(t) = 2\gamma \sin(3\theta) - \gamma \sin(\theta) \quad (23)$$

순간시계 중심의 최대, 최소점의 좌표를 P_{max} 와 P_{min} 으로 정의하면 최대, 최소 주사범위 R_{max} 와 R_{min} 은 다음과 같이 구해진다.

$$P_{max} = (\pm 3\gamma / \sqrt{2}, \pm 3\gamma / \sqrt{2}) \quad (24)$$

$$P_{min} = \pm 3\gamma / \sqrt{2} \quad (25)$$

$$R_{max} = |P_{max}| + \gamma = 4\gamma \quad (26)$$

$$R_{min} = |P_{min}| + \gamma = 3.12\gamma \quad (27)$$

또한 순간 주사속도, $V_s(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_r(t) = [R_x^2(t) + R_y^2(t)]^{1/2} \\ = \gamma \omega [7 + 12 \cos(4\theta)]^{1/2} \quad (28)$$

그리고 최대, 최소 주사속도는 식(28)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$V_{rmax} = 7 \gamma \omega \quad (29)$$

$$V_{rain} = 5 \gamma \omega = 0.71 V_{rmax} \quad (30)$$

따라서 최소속도가 최대속도의 0.71배가 되므로 나선형 주사방식처럼 속도를 일정하게 유지시킬 필요는 없으며, 주사주기 T_r 은 다음과 같다.

$$T_r = 2 \pi / \omega = 14 \pi \gamma / V_{rmax} \quad (31)$$

4.3 원형 주사파형(Conical Scan Pattern)

원형 주사를 위한 직교좌표계에서의 기준 주사신호는 다음과 같이 표현된다.

$$R_x(t) = \gamma \cos(\theta) \quad (32)$$

$$R_y(t) = \gamma \sin(\theta) \quad (33)$$

최대 주사범위는 $R_{max} = \pm 2\gamma$ 이고, 주사속도는 $V_c = \gamma \omega$ 이며, 주사주기는 다음과 같이 표현된다.

$$T_c = 2 \pi / \omega \quad (34)$$

4.4 주사방식에 따른 성능 비교

전 절에서 논의된 주사파형의 분석으로부터 $\gamma=1.3$, 주사속도 20deg/s, $R_{sfov}=5$ 를 기준으로 설계된 각 주사파형의 성능은 Table 2.와 같다.

Table 2. 주사성능 비교

주사파형	주사시계 (deg)	주사주기 (sec)	요구각속도 (rad/s)	주사속도 (deg/s)
나선형	5.0-6.3	1.53	3.9-48.3	20
장미꽃형	4.1-5.2	2.86	2.2	14-20
원형	2.6	0.82	7.2	10

나선형 주사방식은 주사중심으로 갈수록 요구 각속도가 너무 크게 되어 주사계의 주파수 응답특성이 저하될 우려가 있을 뿐만 아니라, 단위 시간당 요구되는 주사속도가 크게 되어 주사정밀도가 낮아진다. 그러나 위치 정보가 가우시안으로 분포하고 있다는 사실을 고려하면 주사 중심부근에서 더욱 정밀하게 주사할 필요가 있으

며, 따라서 비록 주사중심에서 주사속도가 떨어지더라도 위에서 언급된 문제점을 고려하여 ω_{max} 이 허용 최대각속도를 넘지 않도록 하는 것이 바람직하다. 이 때의 허용 각속도는 주사루프의 대역폭, 주사정밀도, 주사시간을 고려하여 설정하여야 하며, 본 논문에서는 허용 최대각속도를 15rad/s로 정하였다.

장미꽃 주사방식은 중복되는 영역이 많고 특히 총 주사영역이 커질수록 위의 수가 늘어나게 되어 동일한 총 주사영역을 주사할 경우 나선형 주사방식보다 주사시간이 길어진다는 단점이 있다. 그러나 표적이 순간시계의 경계부근을 지나게 되어 현실적으로 표적을 포착하지 못하더라도 주사 중심부근을 집중적으로 주사하기 때문에 레이다에서 제공되는 위치정보가 가우시안으로 분포할 경우 주사중심부근에서 표적을 포착할 확률이 현저히 높아진다. 또한 각속도를 일정한 값으로 유지하더라도 최대, 최소 주사속도사이의 차이가 크지 않으며, 요구되는 주사속도에 필요한 각속도의 크기가 나선형, 원형 주사방식보다 매우 작아 주사계의 응답특성이 좋다.

원형 주사방식은 각속도를 일정하게 하더라도, 순간시계의 중심위치에 무관하게 원하는 주사속도가 유지되고 구현하기가 가장 용이하다는 장점이 있다. 그러나 주사할수 있는 영역이 앞에서 기술한 두가지 방식에 비해 매우 작기 때문에 표적신호 정보의 확률분포에서 표준편차가 매우 작은 경우나 표적 추적중 순간적으로 표적이 시계에서 벗어난 경우 등에 적용할 수 있다.

5. 실험 및 결과

본 장에서는 지금까지 설계된 LQG/LTR제어기를 80386/387 프로세서에 구현하여 주사계의 성능을 실험을 통하여 분석하며, 그 결과를 시뮬레이션 및 비례제어시의 결과와 비교한다. 실험 및 시뮬레이션을 설계된 LQG/LTR제어기를 6차로 축소한 결과를 Bilinear Transform을 이용하여 이산화시켜 수행하였다.

5.1 샘플링 간격

0차 홀딩장치(Zero-Order-Holder)는 샘플링 간격의 반의 시간지연을 유발하며 이로 인한 위상여유감소 허용분을 $5^\circ - 15^\circ$ 로 가정하면 다음과 같은 식이 성립한다(7).

$$T\omega_c = 0.15 - 0.5 \quad (35)$$

주사계의 최대 교차주파수(Maximum Crossover Frequency) ω_c 는 약 15rad/s이므로 위상여유를 고려한 샘플링 간격의 범위는 다음과 같이 정해진다.

$$T = 0.01 - 0.03 \text{ (sec)} \quad (36)$$

주사명령신호의 정밀도는 한 주사주기당 이산자료수에 의해 결정된다. 원형주사일 경우 현재 명령위치와 다음 명령위치사이의 위치 정밀도는

$$\text{Position Resolution} \approx (2\pi/N_p)\gamma$$

$$N_p = P/T = (2\pi\gamma/V)/T$$

$$\text{Position Resolution} = V \cdot T$$

여기서 γ 는 순간시계, V 는 주사속도, P 는 한주기 시간, N_p 는 한주기당 이산자료수이다. $V=20\text{deg/s}$, $\text{Position Resolution} < 0.1\text{deg}$ 일 경우

$$T > 0.005 \text{ sec} \quad (37)$$

한편 프로세서의 계산시간을 80386/387을 이용할 경우 LQG/LTR제어기의 계산량, 선형화 계산, 각 자료를 메모리에 저장하는 시간, A/D와 D/A시간 등 모두 합하여 2msec가 소요되고 있다.

$$T > 0.002 \text{ sec} \quad (38)$$

끝으로 주사계의 주파수 응답 특성을 고려해 볼 때 148Hz에 자이로의 Nutation 모드가 있고 이 모드가 감쇠가 매우 작고 쉽게 제어되지 않는 모드이므로 샘플링 주파수가 너무 클 경우 이 모드가 가진되어 출력에 잡음으로 작용할 우려가 있다. 따라서 샘플링 주파수를 148 Hz 이내로 제한시킬 필요가 있다.

$$T > 0.007 \text{ sec} \quad (39)$$

식(35)-식(39)을 종합하여 주사계의 샘플링 간격을 $T=0.01 \text{ sec}$, 즉 샘플링 주파수를 100 Hz로 정하였다.

5.2 위치제어 특성

Fig. 4는 LQG/LTR제어계의 $[1 \ 0]^T$ 계단입력에 대한 실험 및 모델에 의한 예측결과를 보이고 있다. 커플링에서 다소 차이를 보이고 있으나, 두 결과는 비교적 잘 일치하고 있다.

Fig. 5는 LQG/LTR제어와 비례제어시의 $[1 \ 0]^T$ 계단 입력에 대한 시간응답특성 및 해당되는 제어입력의 실험 결과들을 각각 보이고 있다. 두 경우 제어입력의 최대크기는 비슷하나 LQG/LTR제어시 과도응답특성 및 커플링 감소 측면에서 비례제어 보다 더 향상된 결과를 보

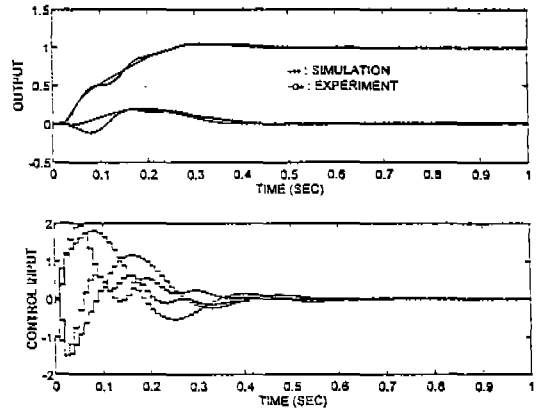


Fig. 4 Time responses of LQG/LTR control to $[1 \ 0]^T$ step input

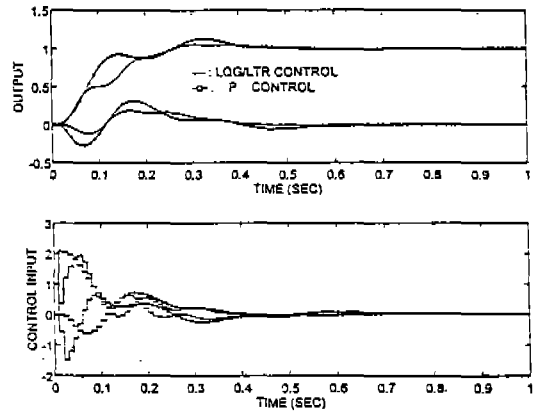


Fig. 5 Comparison of P and LQG/LTR control to $[1 \ 0]^T$ step input

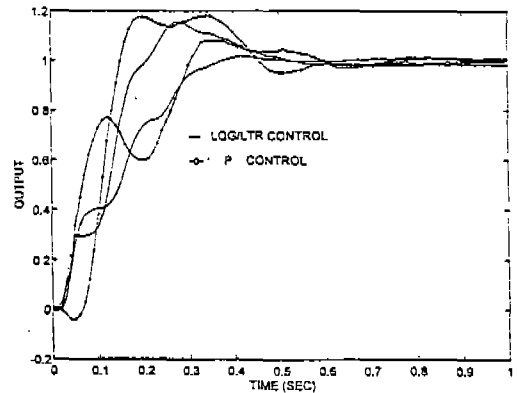


Fig. 6 Comparison of P and LQG/LTR control to $[1 \ 1]^T$ step input

이고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 LQG/LTR제어와 비례제어시의 $(1 \ 1)^T$ 계단입력에 대한 시간응답특성을 보이고 있으며, LQG/LTR제어시 다소의 진동이 존재하는 이유는 허수축에 존재했던 다변수 영점에 기인한다고 판단된다.

한편 주사계의 위치 정밀도 즉 계단입력에 대한 정상상태오차는 주사계가 각 채널당 적분기를 포함하고 있어 이론적으로는 0이나 2.2절에서 기술한 바와 같이 감지코일의 비선형 특성에 기인하여 Look Angle이 커질수록 위치 정밀도가 저하되며, 비록 이항식을 이용하여 선형화시키고는 있으나 한계를 지니고 있다. 실험실에서 측정된 위치 정밀도를 Look Angle에 따라 측정한 결과가 Table 3.에 나와 있다.

Table 3. Look Angle에 따른 위치정밀도

Look Angle(deg)	0	10	20
위치정밀도(deg)	0.3이내	0.7이내	1.0이내

5.3 주사성능

Fig. 7은 LQG/LTR제어와 비례제어시 원형 주사과형에 대한 실험결과를 보이고 있다. 실험시 초기위치는 (0, 0)이고 주사속도는 10 deg/s이다. 정상상태 응답 특성 및 주사정밀도 측면에서 LQG/LTR제어가 비례제어 보다 우수함을 알 수 있다.

Fig. 8은 나선형 주사과형에 대한 실험결과를 비례제어와 비교하며 보이고 있다. 원형 주사결과와 유사하게

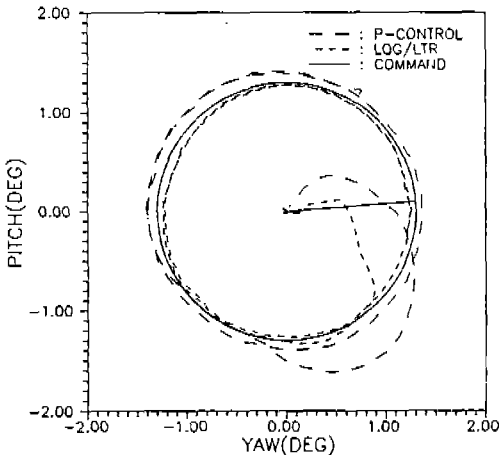


Fig. 7 Conical scan patterns of P and LQG/LTR control

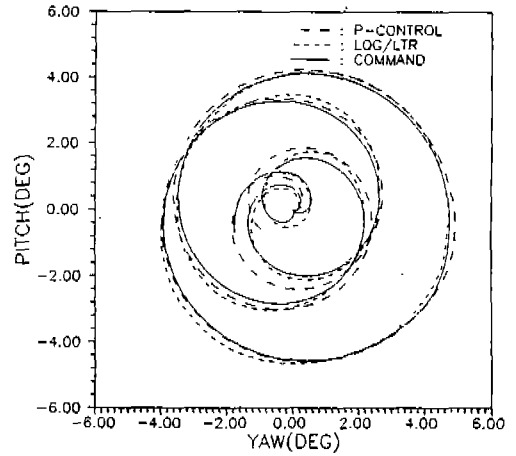


Fig. 8 Spiral scan patterns of P and LQG/LTR control

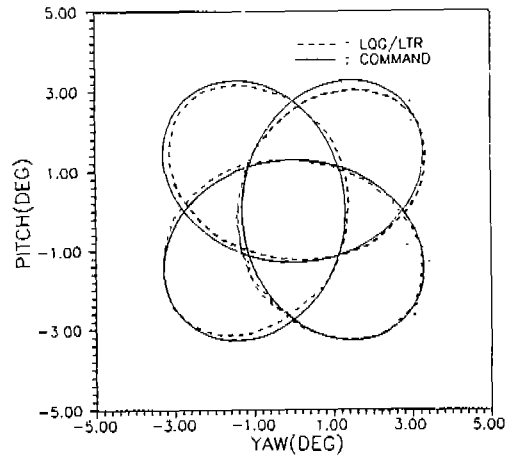


Fig. 9 Rosette scan patterns of LQG/LTR control

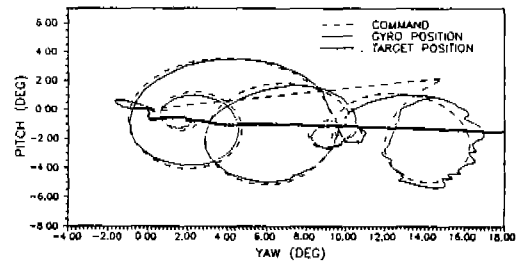


Fig. 10 Target lock-on experiment by spiral scan pattern

과도 응답특성 및 정상상태 오차 측면에서 LQG/LTR제어가 더 우수한 성능을 보이고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 9는 장미꽃형 주사파형시 정상상태 거동에 대한 실험결과를 보이고 있다. 명령추종성능 결국 주사정밀도는 요구규격을 만족하고 있다.

Fig. 10은 표적포착시험 결과의 일부로서 나선형 주사 방식에 의해 표적을 주사하여 포착한 시험결과를 보여주고 있다. 2.2절에서 언급하였듯이 Look Angle이 커짐에 따라서 주사파형이 다소 찌그러짐을 알 수 있다.

5.4 감지코일 출력의 선형화 특성

Fig. 11과 Fig. 12는 원형 주사파형에 대해 Look

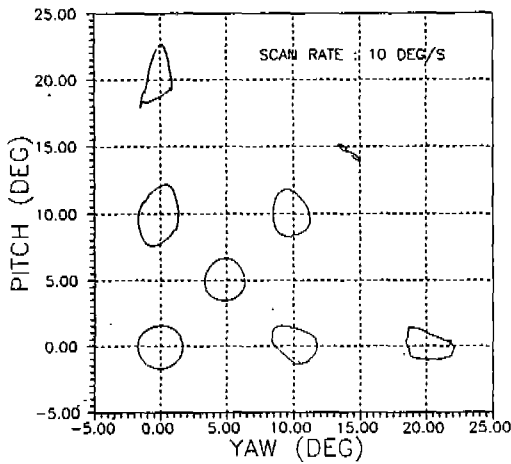


Fig. 11 Linearization using one-dim. poly. equation

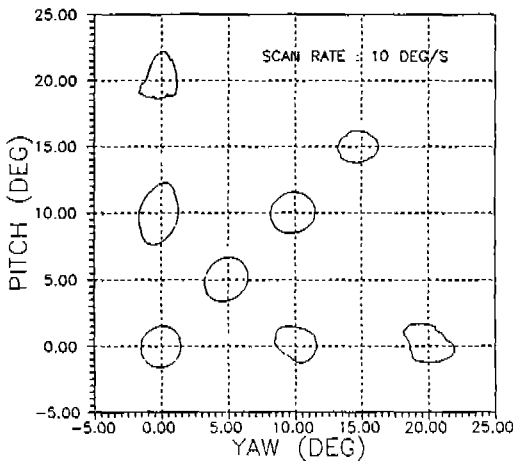


Fig. 12 Linearization using a binomial equation

Angle을 증가시키면서 1차원 다항식과 이항식으로 각각 선형화한 결과를 실험을 통하여 비교한 것이다. 여기서 이항식의 계수의 수는 2.2절에서 정한 바와 같이 한 축에 대해서 총 10개 ($a_0 \dots a_5 \ b_1 \ b_2 \ p_1 \ p_2$)이고, 1차원 다항식의 계수의 수는 총 8개 ($a_0 \dots a_7$)로 핏팅하였다. 앞에서 예측한 바와 같이 Look Angle이 작은 경우는 두 경우 모두 주사 명령신호를 잘 추종하고 있으나 Look Angle이 커질수록 파형이 찌그러지는 것을 볼 수 있고, 1차원 다항식의 경우 이 경향이 더욱 두드러짐을 알 수 있다. 특히 off-axis상, 즉 (15, 15) deg에서는 1차원 다항식으로는 전혀 요구 주사시계를 만족할 수 없음을 알 수 있다. 한편 이항식의 경우 파형의 찌그러짐은 유사하나 주어진 Look Angle 범위에서는 주사시계가 거의 확보되고 있음을 볼 수 있다.

5.5 안정도-강인성 시험

Fig. 13은 지연시간의 크기를 변화시키면서 LQG/LTR제어와 비례제어의 안정도-강인성을 실험을 통하여 비교한 결과이다. LQG/LTR제어시 샘플링 간격 8배의 시간지연, 비례제어시 2배의 시간지연시 각각 안정한계에 이르르고 있음을 보이고 있다. 이 결과는 동일한 주파수에서 LQG/LTR제어계는 비례제어계 보다 4배 이상의 위상여유를 가지고 있음을 함축하고 있다. 즉 LQG/LTR제어계는 비례제어계 보다 시간지연으로 표현되는 모델링 오차에 대해서 더욱 강인한 안정성을 가지고 있다.

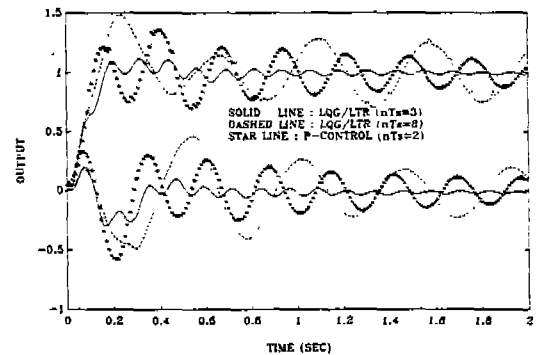


Fig. 13 Stability-robustness test for time-delays

6. 결 론

감지코일의 동특성을 고려한 탐색기 주사계의 수학적

모델에 의한 예측결과는 커플링측면에서 기존의 모델보다 실제 실험결과와 더욱 잘 일치하였다. 제시된 설계 요구조건을 만족하는 LQG/LTR제어기를 설계하여 적용한 결과 주사계의 과도응답, 주사점밀도, 성능측면 뿐만 아니라 특히 안정도-강인성이 현저히 개선되었다. 또한 표적포착확률을 높이기 위해 나선형, 장미꽃형, 원형 주사파형 등을 설계 및 분석하였으며, 표적포착시 험을 한 결과 기존의 비례제어 보다 LQG/LTR제어를 이용한 주사방식이 훨씬 우수한 표적포착 성능을 발휘함을 알 수 있었다.

특히 지금까지의 연구가 대부분 수학적 분석 및 이론적 예측에 국한된 반면, 본 연구에서는 내적균형법에 의해 차수가 축소된 LQG/LTR제어기를 80386/80387 프로세서를 이용하여 디지털로 구현하였다. 또한 감지코일의 비선형 특성을 피팅된 이항식을 이용하여 실시간 선형화하였으며 Look Angle이 큰 off-axis영역에서 종래의 1차원 다항식 방법보다 주사성능이 훨씬 개선됨을 입증하였다.

참고문헌

1. Zhang, Z. and Fuedenberg, J. S., "Loop Transfer Recovery for Non-minimum Phase Plants", IEEE Trans. on AC, Vol. 35, No. 5, pp. 547~553, 1990.
2. Athans, M., Kapsouris, P., Kappos, E. and Spang, H. A., "Linear-Quadratic Gaussian with Loop-Transfer Recovery Methodology for the F-100 Engine", J. Guidance, Vol. 9, No. 1, pp. 45~52, 1986.
3. 황홍연, 이호평, "탐색기의 주사루프 모델링과 LQG/LTR제어", 제1회 응용수학 워크샵 논문집, pp. 721~751, 1993.
4. Doyle, J. C. and Stein, G., "Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical/Modern Synthesis", IEEE Trans. on AC, Vol. AC-26, pp. 4~16, 1981.
5. Stein, G. and Athans, M., "The LQG/LTR Procedure for Multivariable Feedback Control Design", IEEE Trans. on AC, Vol. AC-32, pp. 105~114, 1987.
6. Moore, B. C., "Principal Component Analysis in Linear Systems, Controllability, Observability and Model Reduction", IEEE Trans. on AC, Vol. AC-26, pp. 17~32, 1981.
7. Karl J. Åström and Bjorn Wittenmark, Computer-Controlled System Theory and Design, Prentice-Hall International Editions, 1990.
8. Maciejowski, J. M., Multivariable Feedback Design, Addison-Wisley, 1988.
9. Anderson, B. D. O. and Moore, J. B., Optimal Control, Prentice-Hall, 1989.
10. 김종식, 선형 제어시스템 공학, 청문각, 1988.
11. Lehtomaki, N. A., Sandell, N. R. and Athans, M., "Robustness Results in Linear Quadratic-Gaussian Based Multivariable Control Design", IEEE Trans. on AC, Vol. AC-26, pp. 75~93, 1981.
12. Singh, A. and Triebel, W. A., The 8088 Microprocessor, Prentice-Hall, 1989.
13. White, S. A., "Dynamics of Solenoidal-Torqued Gyro-Stabilized Seeker Assembly for Guidance and Tracking", IEEE Trans. on AES, Vol. AES-10, pp. 113~122, 1973.