

반복학습에 의한 MIMO Nonminimum Phase 자율주행 System의 Feedforward 입력신호 생성에 관한 연구

김 경 수^{*,1)}

¹⁾ 국방대학교 국방과학학과

Feedforward Input Signal Generation for MIMO Nonminimum Phase Autonomous System Using Iterative Learning Method

Kyongsoo Kim^{*,1)}

¹⁾ Defense Science Department, Korea National Defense University, Korea

(Received 11 May 2017 / Revised 29 January 2018 / Accepted 23 March 2018)

ABSTRACT

As the 4th industrial revolution and artificial intelligence technology develop, it is expected that there will be a revolutionary changes in the security robot. However, artificial intelligence system requires enormous hardwares for tremendous computing loads, and there are many challenges that need to be addressed more technologically. This paper introduces precise tracking control technique of autonomous system that need to move repetitive paths for security purpose. The input feedforward signal is generated by using the inverse based iterative learning control theory for the 2 input 2 output nonminimum-phase system which was difficult to overcome by the conventional feedback control system. The simulation results of the input signal generation and precision tracking of given path corresponding to the repetition rate of extreme, such as bandwidth of the system, shows the efficacy of suggested techniques and possibility to be used in military security purposes.

Key Words : Input Signal Generation, Autonomous System, Output Trajectory Tracking, Precision Tracking Control

1. 서 론

미래의 무기체계는 인공지능 기반의 자율주행 능력이 필수적인 요소로 자리 잡을 것으로 전망된다. 과학화 경계시스템과 순찰 시스템 도입을 위한 자율주행

기반 무인 경계차량 도입 시도는 이미 시작되었지만 아직 빅 데이터와 데이터 마이닝을 이용한 인공지능 무기체계를 구현하는 것은 아직 멀기만 하다¹⁾.

지상·해상·공중에서 운용되는 자율주행 시스템을 탑재한 장비는 센서와 컨트롤러, 구동기로 구성 된다²⁾. 각 구성품의 제어는 안정성 확보를 위해 Feedback 제어 시스템을 많이 사용하고 있다³⁾. 그런데 자율주행 시스템에 많이 사용되는 전기적 모터 구동기⁴⁾는 모터

* Corresponding author, E-mail: kyongsoo@kndu.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

의 회전속도와 발생 토크와의 관계가 Nonminimum-Phase 시스템으로 표현되며 내연기관을 사용하는 자율주행 시스템의 경우도 연료 공급의 지연현상에 의해 시스템 반응이 Nonminimum-Phase 시스템으로 특징지을 수 있다^[5]. 이러한 Nonminimum-Phase 시스템에 대한 많은 Feedback 제어 시도가 있었으나 시스템의 독특한 특성으로 만족할 만한 응답성능을 기대하기는 어려운 편이다^[6,7]. 또한 내부 시스템이 안정화된 Minimum-Phase 시스템이라 할지라도 Feedback 제어를 통해 시스템의 안정성은 확보할 수 있으나 Bandwidth를 초과하는 빠른 속도의 정밀 주행 성능확보는 대단히 어려운 편이다.

이를 극복하기 위해 Feedforward 제어방식을 제안한다. Feedforward제어는 시스템의 반응을 역이용해 원하는 경로를 통과할 수 있는 입력 신호를 생성해내고 활용하는 방법이며 Feedback 제어와 다르게 시스템을 구동하기 전에 생산한 입력신호를 이용한다는 면에서 차이가 있다. 시스템의 반응을 역이용하기 때문에 시스템에 대한 정확한 모델 측정이 가능하고 불확실성을 배제할 수 있다는 조건이 만족될 때 정밀 추종에 적합한 제어방법이라고 말할 수 있다.

이 논문은 반복적인 순찰경로를 주행해야하는 무인 경계시스템을 빠르고 정확하게 이동시키기 위한 제어입력신호의 설계와 그에 필요한 경로 분해에 관한 것이다. Feedback 제어가 설계에 어려움이 많은 Nonminimum-Phase System을 대상으로 정밀 경로 추종에 대한 이론과 시뮬레이션 결과를 담고 있다. 실시간 입력신호를 생성하는 Feedback 제어의 단점을 극복하기 위해 사전에 입력신호를 생성하는 Feedforward 제어 시스템을 설계하였다. 이때 대상이 되는 시스템은 시스템 식별과정을 통해 정확한 모델을 만들지 않고 몇 차례의 학습 과정을 통해 시스템의 반응 특성을 예측하고 Feedforward 제어 입력 신호를 생성하도록 했다. 또한 역함수를 이용한 반복학습기반 입력 신호생성^[8] 방법에서 사용한 단일입력·단일출력(Single Input Single Output) 반복학습제어 이론(Iterative Learning Control Theory)을 2차원 평면에서 서로 독립인 X,Y축 움직임을 구현 할 수 있도록 다입력·다출력(Multi Inputs Multi Outputs)시스템에 대한 반복학습 제어를 제시했다.

이 논문의 가치는 SISO 시스템에 한정되어 사용된 역함수 기반 반복학습기반 입력 신호생성 방법(MIIC)을 MIMO시스템으로 확장했다는 점에 있다.

본고의 구성은 다음과 같다. 반복적으로 이동해야

하는 경로를 2차원 분해하는 과정에 대하여 2장에서 설명하고 사전에 시스템에 대한 정확한 정보 없이 시스템 반응 특성을 추정하고 반복학습을 통해 제어 입력 신호 형성해내는 방법에 관해 3장에서 설명한다. 실제 복잡한 경계 경로를 대상으로 무인 시스템의 이동 성능을 확인하기 위해 MIIC를 정사각형 MIMO 시스템에 응용한 시뮬레이션 결과를 각각 4장에 제시하고 다중입력, 다중출력 시스템에 대한 실효성을 검증한다. 마지막으로 5장에서 결론을 제시한다.

2. 경계활동 경로 설계와 분해

시스템의 특성을 파악하고 모델링하는 것은 복잡한 과정을 필요로 한다. 본 논문에서는 모델링이 되지 않은 시스템을 대상으로 한다. 그러나 시스템의 반응특성 파악은 중요한 부분을 차지하기 때문에 간단한 입력신호에 의해 형성되는 정상상태 주파수 응답 분석만을 통해 시스템의 특성을 파악하고 이를 역 이용해 경로추종에 필요한 입력신호를 형성하는 방법을 제시한다.

2차원 평면에서 움직이는 시스템에 대한 X-Y축 방향의 움직임 경로 형성을 위해 Haiming Wang은 B Spline Decomposition 방법^[9]을 통해 선형시스템에 사용할 수 있는 경로분해 방법을 제시했다. 이를 통해 형성된 각 축 방향 경로정보는 특정지점을 통과해야 하는 시간 정보와 결합해 최종적으로 시간영역에서 시스템이 달성해야할 경로가 된다. 본고에 소개된 경로형성 방법은 B Spline Decomposition에 방법을 사용하였다. 무인 무기체계에 의한 자율주행 경계활동의 경우 경유해야하는 경로는 경계 작전 의도에 따라 다를 수 있으나 간략하게 X-Y 2차원 평면에서의 주기적인 움직임으로 표현할 수 있다. 부대나 기지의 순찰 경로는 통상 부대의 울타리를 연해 설치된다고 가정했을 때 자율주행 경계 장비의 움직임은 울타리를 연하는 단한 폐구간의 움직임으로 묘사할 수 있으며 연속적인 직선구간의 연결로 볼 수 있다. 그렇지만 경계 작전을 수행하는 무인 체계 입장에서 작전수행 경로는 적절한 경로 이동속도의 변화를 통해 시간을 기준으로 X-Y축에 대한 충분히 부드러운 연속적인 곡선 형태로 표현이 가능하다.

Fig. 1은 무인 경계시스템의 경계활동을 삼각형과 사각형이 결합된 단순한 것으로 묘사한 것이다. 무인

경계 시스템은 좌표 (0,0)을 출발 지점으로 시계반대 방향으로 사각형 경로를 먼저 통과하다가 시계방향으로 삼각형 경로를 경유한 후 원점으로 돌아오는 경로이다.

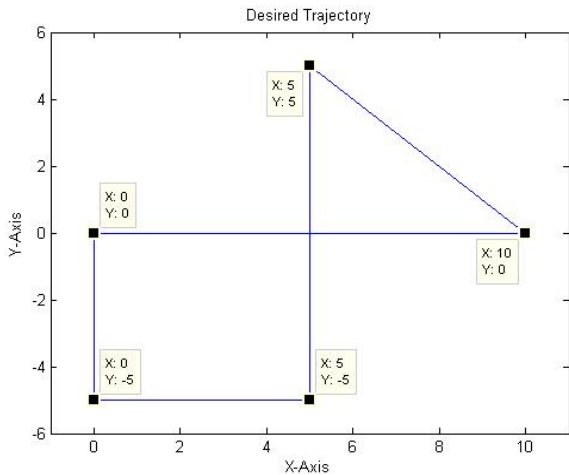


Fig. 1. Complex trajectory with triangle and square patrol route

이들 경로에 대한 좌표 정보는 경계 목적에 따라 경계 지점을 통과해야 하는 시간요구사항을 함께 고려해서 Fig. 2의 좌측 상하 그림에서 제시된 것처럼 X-Y 각 축 방향에 대한 경로 정보로 분할해서 생성할 수 있다. 중요 지점의 각 좌표와 요구되는 통과시간은 Table 1에 제시 했다.

그런데 일반적으로 각진 경로를 통과할 때 경로변경에 필요한 힘은 관성의 법칙에 의해 큰 에너지를 필요로 하게 되므로 각 경로의 각진 부분을 부드럽게 연결하면 에너지의 소모를 대폭 줄일 수 있다.

Table 1. Trajectory coordinates and its time to pass

구분	X 좌표	Y 좌표	통과시간
출발/도착	0	0	0
경로점 #1	0	-5	2
경로점 #2	5	-5	4
경로점 #3	5	5	6
경로점 #4	10	0	8
경로점 #5	0	0	10

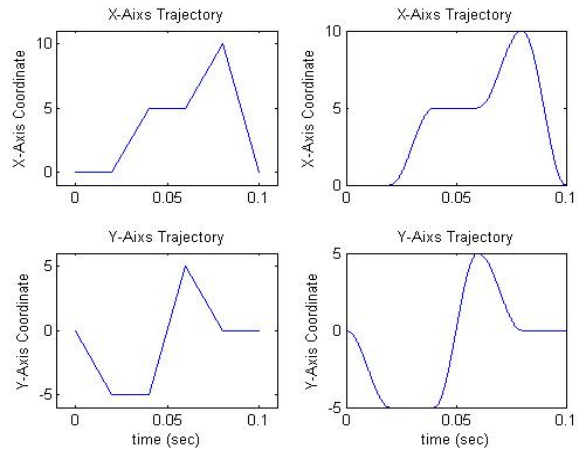


Fig. 2. Decomposed X-Y directional trajectory information with time

Fig. 2의 우측 상하의 그림은 각진 모서리를 상현파의 일부를 포함한 부드러운 곡선으로 연결시키고 B Spline Decomposition 방법에 의해 통과시간을 조절해 방향을 전환하도록 했다. 부드럽게 형성된 X-Y축 경로는 Fig. 1의 경계경로를 정확하게 묘사하며 반복적으로 순찰할 수 있도록 설계 했다.

3. 제어 입력신호 형성

Model-free Iterative Learning Controller로 알려진 반복 학습 제어 방법은 John Bechhoefer와 Quinz Zou 연구진에 의해 제시되었고 단일입출력(Single Input Single Output, SISO) 시스템에 대한 제어입력 신호를 형성하는데 사용되었다. Quinz Zou 연구진이 제시한 SISO 시스템에 대한 입력신호 형성 방법을 3.1장에 간단히 요약하고 Nonminimum-Phase 2 Input 2 Output 시스템에 대한 Feedforward 반복학습 제어 입력 신호 형성에 관한 방법을 이어서 설명한다.

3.1 SISO 모델 예측과 입력신호 형성^[7]

반복학습을 통한 FF 제어는 전(前)단계 입력신호, 출력신호를 이용하여 다음 단계의 입력신호를 형성하는(학습) 과정으로 이루어져 있다($u_k = F(u_{k-1}, y_{k-1}; G)$). 단일입출력(SISO) 시스템에 대한 반복학습제어는 대상 시스템의 특성에 대한 사전 지식 없이 임의로 선택된 초기신호($u_0(t)$) 입력으로부터 시작된다. 입력된

신호에 의해 충분한 시간이 흐른 후 시스템이 정상상태(Steady State)에 도달했을 때 반응 결과($y_k(t)$) 분석을 통해 시스템 모델($G(s)$)을 선형적으로 예측하고 이를 역이용 하여 다음에 사용할 새로운 입력 신호($u_{k+1}(t)$)를 반복적으로 생성해낸다. 이때 시간 영역(Time Domain)에서 입력($u(t)$)과 출력 신호($y(t)$)는 Fourier 변환에 의해 주파수 영역(Frequency Domain)의 신호로 변환시키고 이를 이용해 식 (1), (2)에 따라 반복적인 학습과정을 통해 새로운 입력신호($u_{k+1}(j\omega)$)를 발생시킨다.

$$G(j\omega) = \frac{y_k(j\omega)}{u_k(j\omega)} \quad (1)$$

$$u_{k+1}(j\omega) = \frac{y_d(j\omega)}{G(j\omega)} \quad (2)$$

이때 k 는 원하는 결과를 얻기 위해 시도되는 반복 학습 횟수를 의미한다. 식 (1)에서 $u_k(j\omega)$, $y_k(j\omega)$ 는 주파수 영역에서 Fourier 변환(Fourier Transform)된 k 번째의 입력신호($u_k(t)$)와 출력신호($y_k(t)$)를 의미하며 ω 는 각 주파수 성분을 의미한다. 이때 $u_k = u_k(\omega_n)$ 에 대하여 T 가 수차례 반복적으로 움직임을 포함한 n 개의 데이터를 수집한 전체 시간이고 $n = \{1, 2, \dots, N\}$ 으로 표현될 때 $\omega_n = 2\pi n/T$ 이다. 시스템의 주파수 응답특성(Characteristics of frequency response) $G(j\omega)$ 은 식 (1)과 같이 $u_k(j\omega)$, $y_k(j\omega)$ 의 비율로 예측한다. 시스템을 포함한 전반적인 반복학습 과정을 간략하게 표현하면 Fig. 3과 같으며 식 (1)과 (2)에 의해 입력신호의 Fourier 계수가 결정되면 $k+1$ 번째 사용할 새로운 입

력신호 $u_{k+1}(j\omega)$ 는 Fourier 급수의 유한 가정에 의해 계산되어지는데 원하는 경로(예를 들어 반복적으로 순찰해야 하는 경로) 데이터 $y_d(j\omega)$ 와 시스템의 주파수 응답특성 $G(j\omega)$ 을 도치하여 식 (2)와 같이 생성한다.

3.2 Nonminimum-Phase 2 Input 2 Output 시스템 모델 예측과 입력신호 형성

다중입출력(Multi Input Multi Output, MIMO) 시스템의 경우 입력신호 생성의 편의를 고려해 입력과 출력 신호의 차원이 같은 정사각형 다중입출력(MIMO) 시스템($u \in R^n$, $y \in R^n$)을 대상으로 입력신호를 생성하도록 했고 본 논문의 경우 $n = 2$ 인 경우로 한정했다. 정사각형 다중입출력(MIMO) 시스템에 대한 입력신호 형성방법은 단일입출력(SISO) 시스템에 대한 학습 방법과 유사하다. 그러나 식별해야 할 주파수 응답특성이 많아진 만큼 일부 절차를 추가해서 다음과 같은 새로운 방법을 제시한다.

- 1) 입력신호 $u_i \in R^2$ 에 대하여 $i = \{1, 2\}$ 는 입력 포트의 순서를, 출력신호 $y_j \in R^2$ 에 대하여 $j = \{1, 2\}$ 는 출력 포트의 순서를, 입출력 신호를 수집하는 횟수 $k \in R$ 에 대하여 k 번째 입력과 출력은 $u_{i,k}$, $y_{i,k}$ 로 표현하기로 하자. k 값의 증가에 따라 2개의 입력과 2개의 출력 신호를 계속적으로 수집할 수 있다.
- 2) 정사각형 다중입출력(MIMO) 시스템($u \in R^2$, $y \in R^2$)은 2×2 개의 전달함수를 가지게 된다. 각 전달함수를 예측하기 위하여 최소 $2 \times 2 = 4$ (쌍)의 입출력 신호가 필요한데 k 번째 학습에 사용되는 전달함수 예측은 k 와 $k+1$ 번째의 입출력 신호를 사용한다. 결국 k 번째 학습에 총 4개의 입력신호와 4개의 출력신호를 사용한다.

k 번째 입력신호($\tilde{U}_k(t) = \{u_{i,k}(t)\}$, $i \in \{1, 2\}$)에 대하여 계산의 편의를 위해 초기 입력신호 $\tilde{U}_1(t) = \{\tilde{u}_{i,1}(t)\}$, $i \in \{1, 2\}$ 는 $\tilde{u}_i(t) = y_{i,d}(t)$ 가 되도록 입력신호를 형성하고 시스템 반응으로 나타나는 출력신호($\tilde{Y}_1(t) = \{\tilde{y}_j(t)\}$, $j \in \{1, 2\}$)를 저장 장치에 기록해서 2쌍의 입출력 신호를 얻을 수 있다. Fourier 변환에 의해 $\tilde{U}_1(t)$, $\tilde{Y}_1(t)$ 는 $\tilde{U}_1(j\omega)$, $\tilde{Y}_1(j\omega)$ 로 표현할 수 있고 $\tilde{U}_1(j\omega)$, $\tilde{Y}_1(j\omega)$ 는 각 주파수 성분 ω 에 대하여 각각 열벡터를 의미한다. 이렇게 형성된

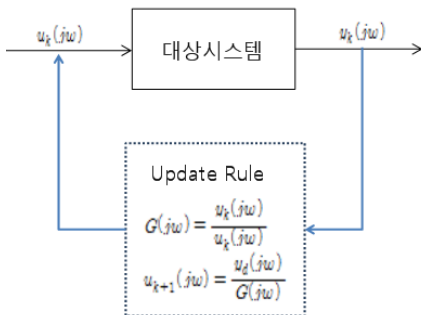


Fig. 3. Feed-forward iterative learning control basic setup diagram

$\tilde{U}_1(j\omega)$, $\tilde{Y}_1(j\omega)$ 를 이용해 다음 단계의 입력신호는 $\tilde{U}_2(j\omega) = \{\tilde{u}_{i,1}(j\omega)/\tilde{y}_{i,1}(j\omega)*y_{i,d}(j\omega)\}$, $i \in \{1,2\}$ 이 되도록 한다. 이렇게 만들어진 입력신호에 의한 출력신호 $\tilde{Y}_2(t) = \{\tilde{y}_j(t)\}$, $j \in \{1,2\}$ 는 Fourier 변환에 의해 $\tilde{Y}_2(j\omega)$ 가 된다.

3) 수집된 $\tilde{U}_1(j\omega)$, $\tilde{U}_2(j\omega)$, $\tilde{Y}_1(j\omega)$, $\tilde{Y}_2(j\omega)$ 로부터 이후 각각의 주파수 성분 ω 에 대한 입력신호 $U_k(j\omega)$ 는 식 (3), (4)와 같이 생성한다.

$$[G_{ij}(j\omega)] = [Y_{k-2}(j\omega) Y_{k-1}(j\omega)] * [U_{k-2}(j\omega) U_{k-1}(j\omega)]^{-1} \quad (3)$$

$$U_k(j\omega) = \{u_{i,1}(j\omega)\} = \{[G_{ij}(j\omega)]^{-1} y_{i,d}(j\omega)\} \quad (4)$$

이때 $U_k(j\omega), Y_k(j\omega)$ 는 각 주파수 성분 ω 에 대하여 열벡터이다. 또한 첫 번째 학습($k = 1$)을 위해 사용한 이전단계 입력과 출력 신호는 $U_{-1} = \tilde{U}_1$, $U_0 = \tilde{U}_2$, $Y_{-1} = \tilde{Y}_1$, $Y_0 = \tilde{Y}_2$ 가 되도록 하고 이후 학습은 순차적으로 새롭게 형성되는 입력과 출력 데이터를 이용했다.

4. 추종성능 실험

자율주행 경계활동을 하는 시스템을 단순화한 시불변 선형시스템(Time Invariant Linear System)을 대상으로 수차례 반복학습이 가능하고 외란은 존재하지 않으며 센서의 측정오차나 잡음은 존재하지 않다는 가정 하에 모의 경로추종에 대한 실험을 실시했다. 실제 경계를 목적으로 구성된 이동경로는 다소 복잡할 수 있다는 점을 고려해 경계용 장비가 통과해야하는 경로를 새롭게 구성했다. 대상 장비의 전달함수는 임의로 Nonminimum-Phase 2 input 2 output 시스템으로 설정했다.

4.1 실험 모델

경계 작전에 사용되는 대상 장비는 2가지 입력이 가능한 시스템으로 가정하고 X-Y 축 방향 출력이 가능한 2 input 2 output 시스템 모델을 대상으로 했다.

(식 (5) 참고) 시간영역에서 2개의 입력신호는 $U(t) = \{u_1(t), u_2(t)\}$ 로, X축과 Y축 방향으로 움직이는 거리를 나타내는 2개의 출력신호는 $Y(t) = \{y_1(t), y_2(t)\}$ 로 했으며 각 입력과 출력은 선형적으로 결합되어 $u_1(t)$ 과 $u_2(t)$ 가 각각 $y_1(t)$, $y_2(t)$ 모두 동시에 영향을 미칠 수 있도록 전달함수를 구성했다. 각 $G_{ij}(s)$ 를 포함한 시스템 전달함수는 식 (6)과 같다.

$$Y = G * U \quad (5)$$

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

i 번째 입력과 j 번째 출력에 해당하는 전달함수 $G_{ij}(s)$ 는 Nonminimum-Phase 시스템으로 구성했으며 극점, 영점, 이득값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_{11} : pole &= [-3, -5], & zero &= [1], gain = 1 \\ G_{12} : pole &= [-1 + i, -1 - i], & zero &= [0], gain = 2 \\ G_{21} : pole &= [-3, -5, -1 + i, -1 - i], & zero &= [1], gain = 2 \\ G_{22} : pole &= [-1 + i, -1 - i], & zero &= [2], gain = 1 \end{aligned}$$

각 전달함수 $G_{ij}(s)$ 는 모두 안정된 시스템이며 영점의 위치가 복소수 평면 우측에 위치했거나 원점에 위치한 전형적인 Nonminimum-Phase 시스템으로 선정했다. 각 전달함수 $G_{ij}(s)$ 에 대한 주파수 응답특성은 Fig. 4와 같으며 각 전달함수의 대역폭(Bandwidth)은 다음과 같다.

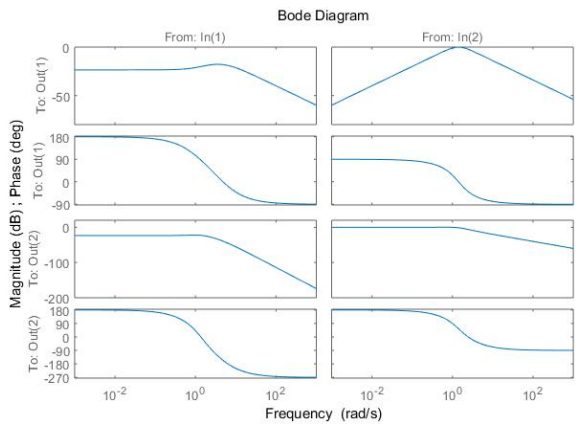


Fig. 4. Frequency response(magnitude and phase) of 2 inputs and 2 outputs nonminimum-phase system

Bandwidth(G11) = 3.2441 Hz
 Bandwidth(G12) = inf Hz
 Bandwidth(G21) = 0.34 Hz
 Bandwidth(G22) = 0.2860 Hz

5. 실험결과

반복적으로 순찰하는 경로는 대상 시스템의 한계를 보여주기 위해 시스템의 대역폭을 훨씬 뛰어넘는 10 Hz의 해당하는 반복속도로 경로를 움직이는 것으로 가정했다.

모의실험은 대상이 되는 시스템의 반응특성을 미리 알고 있지 않다는 가정 하에 진행되었다. 학습과정에서 발생할 수 있는 오차에 대한 허용 한계는 고려하지 않았으며 모든 시뮬레이션 추종 데이터는 다음 학습단계를 위해 충분히 저장되고 활용 가능하다는 것을 전제로 했다.

식 (6)과 같이 입력과 출력 포트의 수가 같은 정사각형 시스템을 대상으로 반복학습제어를 이용해 식 (3), (4)에 따라 역함수 기반의 초기 입력 신호를 생성했다. 시스템의 특성 미리 알지 못하고 있다는 가정 하에 시스템 특성을 파악하기 위한 2회의 실험이 우선 진행되었다.

반복학습에 의한 제어를 위해 사용할 첫 번째($k = 1$) 입력신호와 이후 신호($k > 1$)는 식 (4)에 의해 반복적으로 생성시켰다.

각 입력신호에 의해 반복적으로 나타나는 출력신호는 정상상태에 도달할 때까지 수집하고 정상상태의 신호 1구간을 사용했다.

입출력 신호의 데이터는 50 kHz의 데이터 Sampling을 통해 10 Hz의 반복속도로 경계지역을 이동하는 시스템의 X-Y축 성분 데이터를 수집했다.

예측된 시스템 주파수 응답의 Magnitude 특성(Fig. 5)은 Fig. 4에서 제시한 시스템 응답특성과 다소 다르게 나왔다. 50 kHz의 속도로 10 Hz의 경로를 Sampling함에 따라 주파수 응답 특성은 10 Hz 단위로 예측되었고 고주파 성분의 입출력신호의 주파수 성분이 크기가 매우 작기 때문에 식 (3)의 결과는 수치계산 오차를 포함한 것으로 판단된다.

반복적인 학습에 의해 각 X-Y 축 방향 출력 신호는 지속적으로 수렴했다. 이동경로 오차를 RMS로 환산한 결과 9번의 반복학습 후에 RMS 오차는 5×10^{-5} 까지

감소했으며 학습 횟수에 따른 RMS 오차는 Fig. 6에서 보는 바와 같다.

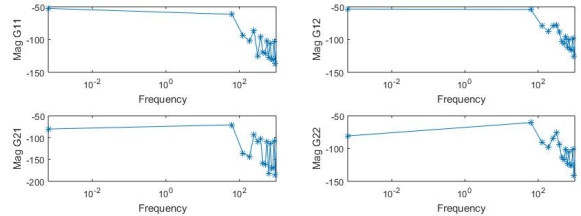


Fig. 5. Estimated system frequency response during iterative learning process

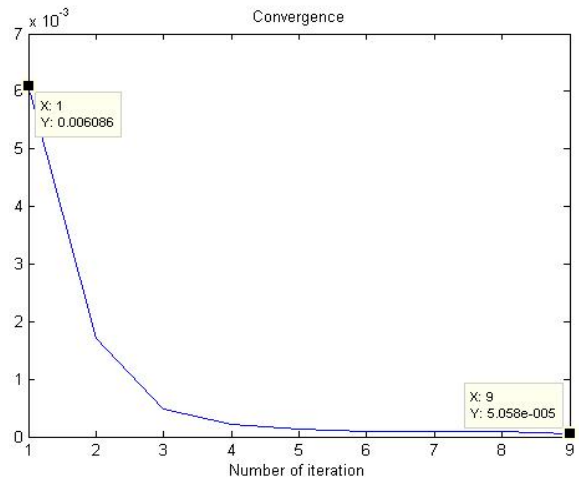


Fig. 6. Tracking errors decrement as increment of iteration(RMS of tracking error)

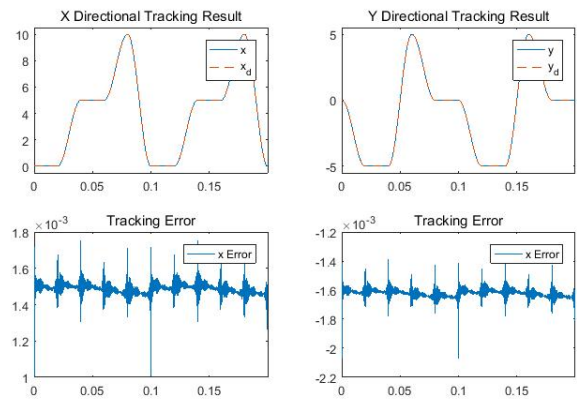


Fig. 7. X (left side) and Y (right side) directional tracking result and error

총 9번의 반복학습을 실시했고 오차는 반복학습 4회까지 큰 폭의 감소를 보인 후 5회부터 점진적인 감소를 관찰할 수 있다. 9번의 반복학습 이후 X 및 Y축 방향에 대한 추종 결과는 Fig. 7과 같았다. 만약 이동 좌표의 단위를 km로 봤을 때 이동 경로에 대한 추종 오차는 불과 수 cm 정도 나타난다고 볼 수 있다.

각 축 방향 이동 성능을 X-Y 평면에 동시에 나타내면 뾰족한 경로의 모서리 부분을 통과할 때조차 매우 적은 양의 오차만이 발생한다는 사실을 알 수 있다.

6. 결 론

경계 작전과 같이 같은 구간을 반복적으로 움직여야 하는 시스템은 이동 경로의 특성상 반복적인 경로추종이 유리한 제어시스템을 채택하는 것이 바람직하다. 기존의 Feedback 제어 시스템은 대부분의 기계장비가 가지고 있는 Nonminimum Phase System을 정밀 제어하는 데 한계가 있다. 본 논문에 제시된 Feedforward 입력신호 형성방법은 이러한 Feedback 시스템의 한계를 극복하고 2 Input 2 Output 시스템의 정상상태에서 반복적인 경로를 충분히 정밀 추종할 수 있음을 보여주었다.

Feedforward 시스템의 특성상 입력신호 형성의 결과가 최적의 입력신호일지라도 외란의 존재와 시스템이 시간에 따라 변할 경우 충분한 정밀 추종성능을 보장하기 어렵다는 단점은 극복해야 할 부분으로 남아있다. 그러나 정밀 추종에 필요한 정확한 입력신호를 알아낼 수 있었고 향후 주변 외란의 영향과 시간 경과에 따른 시스템의 변화에 대응할 수 있는 Feedback 제어기 설계를 통해 향상된 성능을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] Andreas Birk, Holger Kenn, "Applying Behavior-Oriented Robotics to a Mobile Security Device," PRICAI 2000, Advances in Artificial Intelligence, PRICAI 2000 Workshop Reader pp. 5-15.
- [2] Clarence W. de Silva, "Mechatronics: A Foundation Course," CRC Press, June 4, 2010.
- [3] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering," Prentice Hall, 2001.
- [4] H. K. Khalil and E. G. Strangas. "Robust Speed Control of Induction Motors using Position and Current Measurements," IEEE Transactions on Automatic Control, 41(8):1216-1220, Aug 1996.
- [5] Behrouz Ebrahimi, Reza Tafreshi, Javad Mohammadpour, "Second-Order Sliding Mode Strategy for Air-Fuel Ratio Control of Lean-Burn SI Engines," IEEE Transactions on Control Systems Technology, July 2014.
- [6] Swaminathan Gopalswamy & J. Karl Hedrick, "Tracking Nonlinear Nonminimum-Phase Systems using Sliding Control," International Journal of Control, Volume 57, 1993.
- [7] A Isidori, "A Tool for Semi-Global Stabilization of Uncertain Nonminimum-Phase Nonlinear Systems Via Output Feedback," IEEE Transactions on Automatic Control, 2000.
- [8] KS Kim, Q Zou, "A Modeling-Free Inversion-based Iterative Feedforward Control for Precision Output Tracking of Linear Time-Invariant Systems," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013.
- [9] Haiming Wang, Kyongsoo Kim, Qingze Zou, "B-Spline-Decomposition-based Output Tracking with Preview for Nonminimum-Phase Linear Systems," Automatica, Vol. 49, 2013.