

스미스 예측기와 그레이 예측 방법을 적용한 시간 지연이 있는 비 가시 환경에서의 원격로봇제어

Teleoperation by using Smith prediction and Grey prediction with a Time-delay in a Non-visible Environment

정재훈¹, 김덕수², 이장명⁺

JaeHun Jung¹, DeokSu Kim², Jangmyung Lee⁺

Abstract A new prediction scheme has been proposed for the robust teleoperation in a non-visible environment. The positioning error caused by the time delay in the non-visible environment has been compensated for by the Smith predictor and the sensory data have been estimated by the Grey model. The Smith predictor is effective for the compensation of the positioning error caused by the time delay with a precise system model. Therefore the dynamic model of a mobile robot has been used in this research. To minimize the unstable and erroneous states caused by the time delay, the estimated sensor data have been sent to the operator. Through simulations, the possibility of compensating the errors caused by the time delay has been verified using the Smith predictor. Also the estimation reliability of the measurement data has been demonstrated. Robust teleoperations in a non-visible environment have been performed with a mobile robot to avoid the obstacles effective to go to the target position by the proposed prediction scheme which combines the Smith predictor and the Grey model. Even though the human operator is involved in the teleoperation loop, the compensation effects have been clearly demonstrated.

Keywords Grey prediction, Smith prediction, Time delay, Mobile robot

1. 서론

시간 지연이 존재하는 시스템에 대한 제어 문제는 로봇 분야뿐만 아니라, 자동화 공정, 자동차, 가전 등 많은 산업 영역에서 다루지고 있다. 특히 군사, 항공, 해양, 발전소 등의 분야에서 위험지역이나 사람이 접근할 수 없는 공간에서의 특정한 업무 수행을 위해 로봇이 활용되면서 로봇의 원격

제어와 시간 지연에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁾.

시간 지연은 원격제어 시스템에서 가장 문제점으로 부각된다. 원격제어에서 제어기에서의 연산에 의한 시간 지연 및 통신 거리에 대한 지연은 제어기를 통하여 나오는 가공된 데이터의 오차를 발생시키기 때문이다. 이러한 시간 지연을 적절하게 보상해주지 않는다면 원격 환경에서는 통신 지연으로 시스템이 불안정해질 수 있다²⁻⁴⁾. 스미스 예측기(Smith predictor)는 시간 지연 요소를 제거하여 안정성을 확보하는 것으로 시간 지연 제어기에서 필수적으로 나타내는 시간 지연 문제를 해결할 수 있다⁵⁻⁷⁾. 또한 그레이 모델(Grey model)의 GM(1,1)은 샘플 값을 이용한 일반화를 통하여 다음 값을 예측하는 알고리즘이며, 실제 응용 프로

Received : May. 16. 2016; Revised : Jul. 17. 2016; Accepted : Oct. 27. 2016
※This work was supported by a 2-year Research Grant of Pusan National University.

⁺Corresponding author: Electronics Engineering, Pusan National University, Jangjeon-2-Dong, Geumjeong-Gu, Pusan, Korea (jmllee@pusan.ac.kr)

¹Electronics Engineering, Pusan National University, (jachoon1696@pusan.ac.kr)

²Electronics Engineering, Pusan National University, (deoksu1696@pusan.ac.kr)

그램에 많이 사용되고 있는 알고리즘이다^[8-9]. 따라서 본 논문에서는 스미스 예측기를 이용하여 이동로봇 제어에서의 시간 지연 오차를 보상하고, GM(1,1)을 이용하여 이동로봇에 부착된 센서에서 획득하는 센서 값의 예측을 통하여 사용자의 시간 지연에 의한 오조작을 감소시키는 것을 목표로 한다. 먼저 시뮬레이션을 통하여 각 알고리즘을 검증하고 햅틱 장비(Haptic device)와 이동로봇을 이용한 가상 환경에서의 원격제어를 통해 본 논문에서 제안하는 시스템을 검증한다.

2. 조이스틱 및 이동로봇의 모델링

본 논문에서는 시중에서 판매하는 Phantom omni를 이용하여 이동로봇을 제어한다. Phantom omni의 기구학을 분석하고, 여기서 도출되는 θ_1 을 이용하여 이동로봇의 원격제어에서 정면 진행 방향을 결정한다. 여기서 θ_1 은 Phantom omni가 X축을 기준으로 회전 한 각도이다.

2.1 시스템 구성

본 논문의 시스템은 원격제어를 위한 Phantom omni와 전체 시스템 제어를 위한 PC 그리고 이동로봇이 사용되었으며, 시스템 구성과 신호의 흐름은 아래의 Fig. 1에서 나타난다.

2.2 Phantom omni 기구학적 모델링

Fig. 2에서는 Phantom omni의 기구학 정보를 도시해 놓았다. Phantom omni의 1, 2, 3축은 이동로봇의 위치 및 방향 정보(x, y, θ)를 위하여 사용된다. 일반적으로 4, 5, 6축은 말단장치의 방향을 나타내기 위하여 활용되며 본 연구에서는 힘 피드백을 위하여 활용된다.

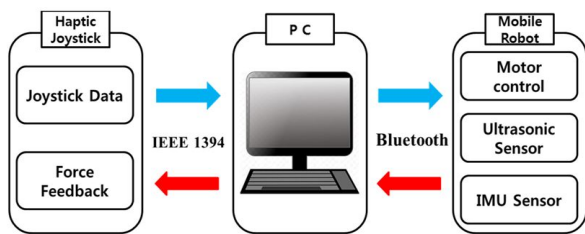


Fig. 1. Block diagram of the entire system

Fig. 2의 L_1, L_2, L_3 는 Phantom omni의 링크 1, 2, 3의 길이를 나타내며, L_5 는 L_1 의 시작점에서 4, 5, 6축 시작점까지의 거리이다. 각 관절의 각도 θ 와 링크의 길이 L 을 이용하여 말단 장치의 위치를 구할 수 있다.

링크 1, 2, 3 정보를 이용하여 위의 D-H Table을 작성하였다. D-H Table로부터 말단 장치의 위치를 나타내는 식 (1)이 유도된다.

$$\begin{cases} y_m = [l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin (\theta_2 + \theta_3)] \cos \theta_1 \\ z_m = [l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin (\theta_2 + \theta_3)] \sin \theta_1 \\ x_m = l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos (\theta_2 + \theta_3) + l_1 \end{cases} \quad (1)$$

2.3 이동로봇의 모델링

두 개의 바퀴와 하나의 보조바퀴로 동작하는 이동로봇의 개요도는 아래 Fig. 3와 같다.

또한, 이동로봇에 대한 매개변수는 아래의 표와 같다.

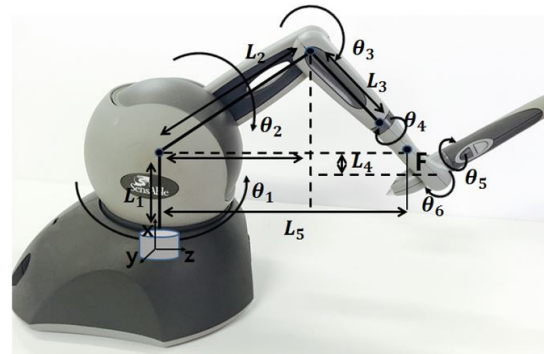


Fig. 2. Axis of Phantom omni

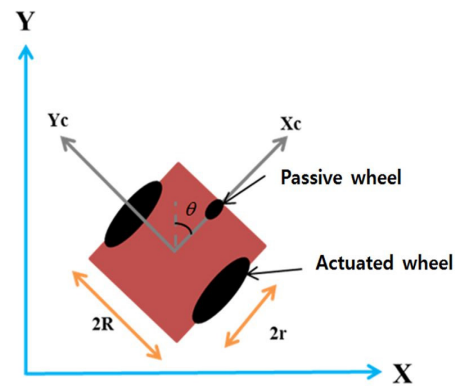


Fig. 3. Kinematic modeling of the mobile robot

Table 1. D-H Table of the manipulator

θ	d	a	α
θ_1^*	d_1	0	-90°
θ_2^*	0	a_2	0
θ_3^*	0	a_3	0

Table 2. Parameters of the mobile robot

m	Mass of mobile robot(5.61 kg)
I	Inertia Moment of mobile robot (0.05 kgm ²)
$2R$	Distance between wheels(0.290 m)
r	Radius of wheel(0.075 m)
O, X, Y	Global coordinates
C, X_c, Y_c	Moving coordinate (mobile robot)
x, y	Center position of mobile robot on Cartesian coordinates
θ_m	Angle between X and X_c

이동로봇은 직선운동 성분인 x, y 성분과 이동로봇의 회전 성분인 θ 성분의 3자유도 운동을 $\dot{q} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T$ 로 나타낼 수 있으며, 이동로봇의 기구학 모델은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{q} = J(\theta) \vec{v} \tag{2}$$

이식에서 $J(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\vec{v} = [v, \omega]^T$, v 은 직선운동

의 속도, 그리고 ω 는 회전운동의 속도를 나타낸다, 또한, 이동 로봇의 동역학 모델^[10]은

$$\tau = E^{-1} \cdot \dot{v} \tag{3}$$

로 주어지며, $E = M^{-1}B$ 이며, $M^{-1} = \frac{1}{mI} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}$,

$B = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ R & R \end{bmatrix}$ 로 주어진다.

3. 예측 제어 알고리즘

3.1 스미스 예측기

스미스 예측기는 제어기 및 플랜트에 존재하는 시간 지연

을 해결하기 위해 사용되며, 플랜트 전달함수의 추정식과, 시간 지연량을 피드백 하는 방식으로 시간 지연 요소로 기 인하는 불안정성을 보상한다^[11-14].

본 논문에서는 이동로봇 제어에서 제어기에서 이동로봇으 로 가는 신호의 시간 지연을 보상하기 위해 사용되었다. 또한 스미스 예측기에 사용되는 플랜트 전달함수는 2.3절에서 유 도한 이동로봇의 모델을 사용하고 있으며 E 로 표현된다.

Fig. 4에서 \hat{E} 는 플랜트 전달함수의 추정식, τ 는 토오크 입력, \dot{v} 는 가속도 출력을 나타낸다. 기본 모델을 수식화하 면 다음과 같다.

$$\left(\tau - e^{-\frac{T}{2}s} \dot{v} - (\hat{E}w - e^{-sT} \hat{E}w) \right) e^{-\frac{T}{2}s} CE = \dot{v} \tag{4}$$

이 식을 정리하면 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$e^{-\frac{T}{2}s} CE \tau - e^{-sT} CE \dot{v} - e^{-\frac{T}{2}s} CE \hat{E}w + e^{-\frac{3T}{2}s} CE \hat{E}w = \dot{v} \tag{5}$$

한편, 제어기 출력은 다음과 같다.

$$w = \frac{\dot{v}}{e^{-\frac{T}{2}s} E} \tag{6}$$

식 (6)를 (5)에 대입하면,

$$\frac{\dot{v}}{\tau} = \frac{e^{-\frac{T}{2}s} CE}{1 + e^{-sT} CE + CE - e^{-sT} C \hat{E}} \tag{7}$$

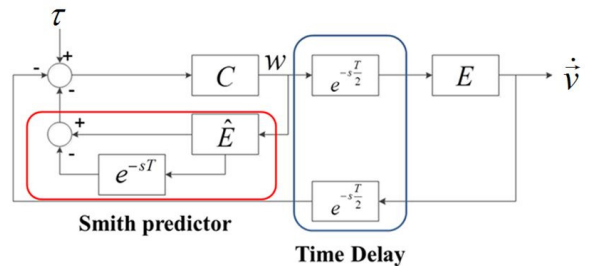


Fig.. 4. Basic model of Smith predictor

와 같이 나타낼 수 있다.

만약 식 (7)에서 $\hat{E}=E$ 가 되면 이를 정리하게 되면 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{\dot{v}}{\tau} = \frac{CE}{1+CE} \cdot e^{-\frac{sT}{2}} \quad (8)$$

이는 Fig. 5에서와 같이 제어기에서 플랜트로 입력되는 정보가 시간 지연에 영향을 받지 않고 시간 지연이 제어 루프 바깥에 놓이게 되는 것을 의미한다. 즉, 요구되는 성능을 만족하는 제어기 설계 시 시간 지연으로부터 자유로울 수 있게 된다.

3.2 그레이 예측법

그레이 예측법은 부분적으로 알 수 없는 매개 변수가 시스템에 존재할 때 대처하기 위해 사용된다. 본 논문에서는 GM(1,1)을 사용하며 여기서 GM은 Grey model의 약자이며, 괄호 안의 처음 숫자는 미분의 차수를 뜻하며, 두 번째 숫자는 변수의 개수를 뜻한다. GM(1,1)을 이용하여 이동로봇에 부착된 센서에서 나오는 센서 값을 예측하여 시간지연으로 인한 사용자가 받는 힘 피드백을 예측하는데 사용하고 자 한다.

GM(1,1)의 예측 순서는 다음과 같다^[15-17]. 시스템의 출력을 대표하는 데이터를 다음과 같이 표기한다.

$$y^{(0)} = \{y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), y^{(0)}(3), \dots, y^{(0)}(n)\} \quad (9)$$

여기서 $y^{(0)}(i) \geq 0$, ($i=1, \dots, n$)이고, $n \geq 4$ 로 예측을 위하여 최소 4개의 측정치가 필요하다. 또한, $y^{(0)}$ 의 원본 데이터를 그레이 공간에 옮기는 일반화 과정이 필요하다.

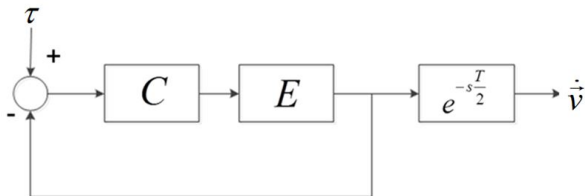


Fig. 5. Time delay separating system of Smith predictor

$$y^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k y^{(0)}(i) \quad (10)$$

여기서 $k=1, 2, 3, \dots, n$.이다. 이후 그레이 공간의 $y^{(1)}$ 데이터들의 평균값으로 이루어진 $z^{(1)}$ 을 정의하기 위해 아래 식들을 이용하여 그레이 모델을 수립하는 조건을 만족시키는지 검사를 실시한다.

$$0 \leq \frac{y^{(1)}(k)}{y^{(1)}(k-1)} \leq 0.5: \text{Quasi-smooth} \quad (11)$$

$$1 \leq \frac{y^{(1)}(k)}{y^{(1)}(k-1)} \leq 1.5: \text{Quasi-exp} \quad (12)$$

여기서 $k=4, \dots, n$.이다.

이 조건을 만족하게 되면, 아래 식과 같이 $y^{(1)}$ 을 이용하여 중간값 $z^{(1)}$ 을 정의하게 된다.

$$z^{(1)}(k) = 0.5y^{(1)}(k) + 0.5y^{(1)}(k-1) \quad (13)$$

여기서 $k=2, 3, \dots, n$.이다.

위에서 정의된 식 (13)을 이용하여 그레이 모델의 미분 방정식을 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$y^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (14)$$

식 (14)의 매개변수 $[a \ b]^T$ 는 최소 자승법을 적용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (D^T D)^{-1} D^T Y \quad (15)$$

여기서 배열 D 와 Y 는

$$D = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad \text{및} \quad Y = \begin{bmatrix} y^{(0)}(2) \\ y^{(0)}(3) \\ \vdots \\ y^{(0)}(n) \end{bmatrix} \text{로 주어진다.}$$

식 (13)을 식 (14)에 대입하여 식 (14)의 차분방정식을 풀면 다음과 같다.

$$\hat{y}^{(1)}(k+1) = \left(y^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (16)$$

그리고 식 (16)을 $\hat{y}^{(0)}(k+1) = \hat{y}^{(1)}(k+1) - \hat{y}^{(1)}(k)$ 에 대입하여 $y(k+1)$ 의 예측 값 즉 $\hat{y}^{(0)}(k+1)$ 을 구할 수 있다.

이 식 (16)을 이용하여 센서의 값을 예측하고 그에 대응하는 힘 피드백을 사용자에게 전달한다. 실제 실험을 하기 전에 시뮬레이션을 통하여 시간 지연이 길어지면 출력은 입력 명령을 따라가지 못하게 됨을 확인하였으며 이를 시간 지연 보상에 의해 안정화 시킬 수 있음을 확인하였다.

4. 예측 제어 실제 실험

실험에 사용된 조이스틱인 Phantom omni는 3.3 N까지의 힘을 사용자에게 전달 함으로써 사용자는 이동로봇의 센서 값을 통해 장애물 및 경사도를 확인할 수 있다. 관련하여 본 실험의 목표는 지연시간이 있는 원격 제어에서 예측된 데이터를 사용자에게 전달하여 조작자가 시간 지연을 최대한 느낄 수 없게 하는 것이다. 실험은 조이스틱의 조작에 숙달된 사용자를 이용하여 실험하였고, 결과는 5회 실험한 데이터의 평균값을 이용하여 분석하였다.

Fig. 6은 본 실험을 위해 제안한 시스템의 전체 블록도이다. 마스터는 컴퓨터, 슬레이브는 이동로봇으로 사용자는 컴퓨터에 앉아 블루투스(Bluetooth)를 통해 연결 되어 있는 이동로봇을 Phantom omni를 이용하여 제어하게 된다. Time delay1은 Phantom omni에서 입력한 조이스틱 데이터가 이동로봇으로 전송될 때의 시간 지연이고, Time delay2는 이동로봇의 센서 값이 컴퓨터로 전송될 때의 시간 지연이다. 각각의 시간 지연은 스미스 예측법과 그레이 모

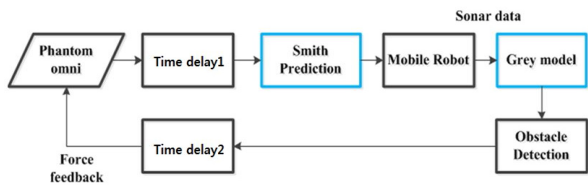


Fig. 6. System block diagram of entire system

델을 통하여 보상된다.

기본 성능 테스트를 위하여 이동로봇에 부착된 하나의 초음파 센서를 이용하여 장애물과의 거리를 50 cm에서부터 10 cm까지 이동로봇을 조작하고 GM(1,1)을 이용하여 센서 값을 예측해보았다.

Fig. 7에서와 같이 GM(1,1) 을 이용하여 예측된 센서값은 기존 데이터 4개의 값을 받은 후부터 예측이 가능하다. 이 데이터를 원격제어를 위한 힘 피드백 값으로 활용하기 위하여 5개의 구간별 힘 데이터로 변환하여 표시하면 Fig. 8과 같다.

Fig. 8의 단계별 힘의 값은 실제 사용자가 피드백되는 힘의 값을 구분하여 느낄 수 있는지를 기준으로 구간을 나누어 실험적으로 설정하였다.

실험 환경은 평지에 장애물을 놓고 조이스틱과 이동 로봇 사이에 시간 지연을 임의로 삽입하여 이동로봇이 장애물을 인지하고 이를 회피할 수 있도록 동작시켰다.

실험에 사용된 이동로봇은 3개의 초음파 센서를 사용하여 장애물을 감지하고 그레이 모델에 의하여 시간지연이 보상된 정보를 힘 피드백을 이용하여 사용자에게 장애물의 유무

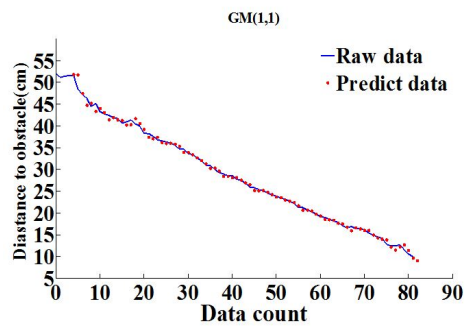


Fig. 7. GM(1.1)

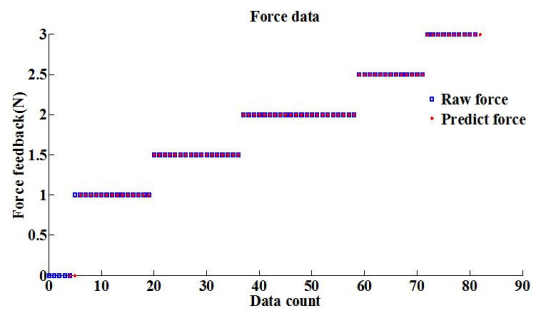


Fig. 8. Force data conversion

를 전달한다. 사용자는 이동로봇을 육안으로 확인할 수 없으며, Phantom omni에서 사용자에게 거리에 따라 전달되는 힘 정보만을 이용하여 이동로봇의 주행 상태를 확인하여야 한다. 또한 이동로봇의 속도는 일정하게 유지하였다.

Fig. 9는 이동로봇이 출발점에서부터 목표점으로 나아가는 실험 환경에 배치된 장애물의 위치를 보여준다.

5. 실험결과 및 토의

본 논문의 시스템을 검증하기 위하여 시간 지연을 삽입하지 않은 주행과, 스미스 예측기를 사용한 주행, 그리고 제안한 시스템에 대한 주행으로 나누어서 실험을 진행하였다. 실험에서 삽입된 시간 지연은 0.5 s로 센서값은 0.5 s마다 사용자에게 변화된 힘 피드백 형태로 전달하게 되고, 사용자가 이를 이용하여 이동로봇에 명령을 내리는 데이터 또한 0.5 s간격으로 로봇에게 전달 되게 하였다.

Fig. 10는 각 상황에 맞게 주행한 결과로 시간 지연을 삽입하지 않은 일반 주행이 다른 주행보다 비교적 매끄러운 이동경로를 가지는 것을 보여준다.



Fig. 9. Experiment environment

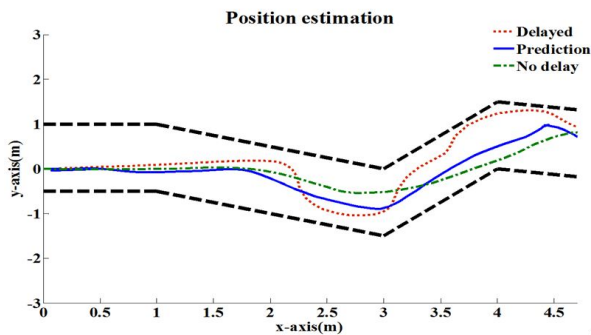


Fig. 10. Trajectory of mobile robot in a curve motion

시간 지연을 보상하지 않은 경우는 이동로봇과 장애물 사이에 충돌(Fig. 10의 붉은색 선, 4초 경)이 발생하였으나 스미스 예측법과 GM(1,1)을 이용하여 시간 지연을 보상이었을 경우에는 무난하게 장애물을 통과하는 것을 보였다(Fig. 10의 파란색 선).

Fig. 11은 Fig. 10의 주행에 대한 이동로봇과 장애물과의 거리를 나타낸다. 소나(Sonar) 센서의 최소 감지 거리에 따라서 최소 거리는 10 cm로 설정하고, 최대 거리는 50 cm로 제한하였다.

시간 지연이 없는 경우(녹색 실점선)에는 장애물과의 거리가 가까워지면 사용자가 빠르게 반응하여 무난하게 경로를 변경할 수 있기 때문에 주행 경로가 매끄럽고, 주행시간도 짧다. 하지만 시간 지연을 삽입하고, 스미스 예측기만 사용한 경우(빨간색 점선)에는 사용자가 빠르게 반응하지 못하며, 장애물과의 거리를 최소 거리(10 cm) 이하로 유지하는 시간이 길고, 그에 따라서 주행시간도 그만큼 길어지게 된다.

시간 지연을 삽입 한 후 본 논문에서 제안한 시스템을 사용하였을 경우(파란색 실선)에는 장애물과의 최소거리를 유지하며, 방향 또한 원활하게 전환하고, 주행시간도 빨라진 것을 알 수 있다.

Fig. 12은 Fig. 10의 주행 설정을 곡선 주행이 아니라 직선을 이용한 코스에 적용하여 실험하고, 이동로봇의 주행 경로를 나타낸 것이다. Fig. 10와 마찬가지로 GM(1,1)을 적용한 경우 스미스 예측법만을 사용한 주행보다 원만하게 주행하는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 Fig. 12의 주행에 대한 이동로봇과 장애물과의

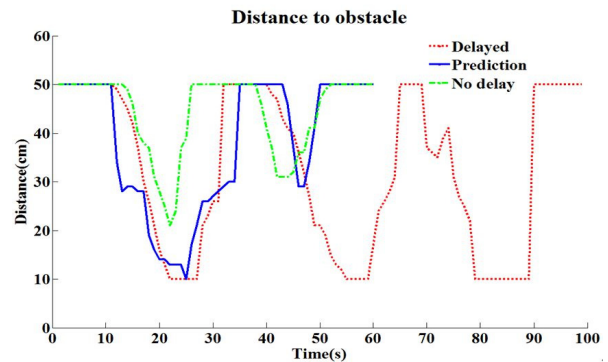


Fig. 11. Distance between object and mobile robot (curve)

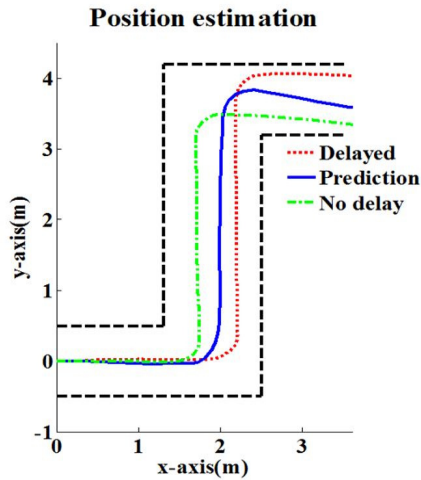


Fig. 12. Trajectory of mobile robot in a rectangular motion

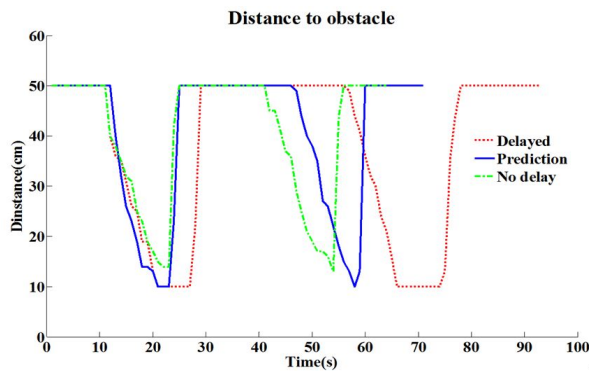


Fig. 13. Distance between object and mobile robot (rectangular)

거리를 나타낸다. 이전 실험과 마찬가지로 소나 센서의 최소, 최대 거리를 각각 10 cm, 50 cm로 제한하여 실험하였다. 이 또한 이전과 마찬가지로 스미스 예측기만을 사용하였을 경우에 장애물을 회피하는 과정에서 많은 시간이 소요되지만, GM(1,1) 과 스미스 예측기를 함께 사용하게 되면 보다 원활하게 장애물을 회피하는 것을 볼 수 있다.

6. 결론

시뮬레이션과 실제 실험을 통하여 시간 지연이 존재하는 비 가시 환경에서의 제어기의 오차를 스미스 예측법과 GM(1,1)로 보상하여 안정된 제어가 가능함을 확인하였다. 다양한 통신방법이나 통신환경에서 야기될 수 있는 시간 지연을 해결하기 위한 방법을 제시하였고, 이런 방법은 통

신장비나 환경에 상관없이 제어방법의 변화만으로 해결이 가능하기에 다양한 활용이 예상된다. 본 연구에서는 출력 변수 하나를 센서 값으로 이용한 것이며, 여러 개의 출력이 요구되는 보다 복잡한 실험 환경에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 또한 스미스 예측법을 위하여서는 정확한 모델이 요구되며 본 연구에서는 자체적으로 유도한 동적 모델을 활용하였으며 모델링 오차를 적응적으로 줄이는 연구도 필요할 것이다.

References

- [1] G.J. Jeong, I.H. Kim, and Y.I. Son, "Design of a Robust Controller for Position Control, of a Small One-Link Robot Arm with Input Time-Delay," The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol.65, No.6, pp.1179-1185, 2010.
- [2] Y. Yokokohji, T. Imaida, and T. Yoshikawa, "Bilateral control with energy balance monitoring under time-varying communication delay," IEEE Conf. on Robotics and Automations, pp.2684-2689, 2000.
- [3] H. Arioui, M. Mana, A. Kheddar, and S. Mammari, "Master-model based time-delayed force feedback interaction experimental results," IEEE Symposium on Intelligent Control, pp.896-901, 2002.
- [4] H.J. Choi and S. Jung, "Design of a Time-delay Compensator Using Neural Network In a Tele-operation System," Journal of Intelligence and Information System, vol.21, no.4, pp.449-455, 2011.
- [5] R.C. Miall, D.J. Weir, D.M. Wolpert, and J.F. Stein, "Is the cerebellum a Smith predictor," Journal of Motor Behaviour, vol.25, no.3, pp.203-216, 1993.
- [6] A.C. Smith and K. Hashtrudi-Zaad, "Smith predictor type control architectures for time delayed teleoperation," The International Journal of Robotics Research, vol.25, no.8, pp.797-818, 2006.
- [7] C.C. Hang, K.W. Lim, and B.W. Chong, "A dual-rate adaptive digital Smith predictor," Automatica, vol.25, no.1, pp.1-16, 1989.
- [8] D.Q. Truong, K.K. Ahn, and N.T. Trung, "Design of An Advanced Time Delay Measurement and A Smart Adaptive Unequal Interval Grey Predictor for Real-Time Nonlinear Control Systems," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, vol.60, no.10, 2013.

- [9] J.S. Lee, S.M. Seong, and K.H. Kang, "Sliding Mode Control Design for Passenger Car ABS Considering Grey Model Prediction," The Korean society Of Automotive Engineers, pp.99-105, 2013.
- [10] D.S. Kim, S.G. Han, H.Y. Ha, and J.M. Lee "Sliding mode control for two-wheeled mobile platform with 3 DOF manipulator," Society of Instrument and Control Engineers, Japan, Sept. 20-23, 2016.
- [11] M.R. Matausek, and A.D. Micic, "A Modified Smith Predictor for Controlling a Process with an Integrator and Long Dead-Time," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.41, pp.1199-1203, 1996.
- [12] K.J. Astro, C.C. Hang, and B.C. Lim, "A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time," IEEE Trans. Automat. Contr, vol.39, no.2, pp.343-345, 1994.
- [13] S. Majhia and D.P. Atherton, "Obtaining controller parameters for a new Smith predictor using autotuning," Automatica, vol.36, pp.1651-1658, 2000.
- [14] S. Majhi and D.P. Atherton, "Modified Smith predictor and controller for processes with time delay," IEE Proceedings-Control Theory and Applications, vol.146, pp.359-366, 1999.
- [15] Y.F. Wang, "Predicting stock price using fuzzy grey prediction system," Expert Systems with Applications, vol.22, pp.33-39, 2002.
- [16] S.J. Huang and C.L. Huang, "Control of an inverted pendulum using grey prediction model," IEEE Transactions on Industry Applications, vol.36, pp.452-458, 2000.
- [17] Y.P. Huang and C.H. Huang, "Real-valued genetic algorithms for fuzzy grey prediction system," Fuzzy Sets and Systems, vol.87, pp.265-276, 1997.



정재훈

2014 경남과학기술대학교 메카트로닉스 공학과 학사 졸업

2016 부산대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석사 졸업

관심분야: Haptic device, 지능로봇제어, Micro processor 응용



김덕수

2015 부산대학교 전자공학과 학사 졸업

~ 현재 부산대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석사 재학

관심분야: non-linear system control, 지능로봇제어



이장명

1980 서울대학교 전자공학과 졸업

1982 동 대학원 석사

1990 USC 공학박사

~ 현재 부산대학교 전자전기공학부 정교수

관심분야: 지능로봇 시스템 설계 및 제어, Micro processor 응용, Navigation/Localization