

# 네트워크 기반 이동로봇에 대한 이득 스케줄러 제어

## Gain Scheduler Control for Networked Mobile Robot

윤상석\*, 박기환\*\*

Sangseok Yun, Kyihwan Park

**Abstract** - This paper characterizes the performance for a remote path tracking control of the mobile robot in IP network via middleware. The middleware is used to alleviate the effect of the delay time on a mobile robot path tracking in Network-Based Control environment. The middleware also can be implemented in a modular structure. Thus, a controller upgrade or modification for other types of network protocols or different control objectives can be achieved easily. A case study on a mobile robot path-tracking with IP network delays is described. The effectiveness of the proposed approach is verified by experimental results.

**Key Words** :Network-Based Control, Gain Scheduler Middleware, Tracking Control, Networks, Mobile Robot

### 1. 서론

최근 주목받고 있는 인터넷 및 네트워크 기술은 원자로 시설이나 폭발물 시설 같은 위험한 환경에서 작업하는 이동로봇을 원격지에서도 편리하고 안전하게 제어할 수 있도록 개발되어 왔다. 특히 네트워크 기반 제어 기술은 데이터를 통한 단순 정보공유 뿐만 아니라 로봇 활동에 있어서의 공간적 제약성을 극복하고 자율성을 부여하여 실제 임무와 관련된 새로운 작업공간과 기능을 창출하면서 인간과의 긴밀한 상호작용을 만들고 있다 [1].

본 논문에서는 이득 스케줄러 미들웨어 (GSM: Gain Scheduler Middleware)를 이용한 원격지 이동로봇의 제어와 관련된 내용을 소개한다. 이동로봇 시스템은 2차 방정식 곡선을 이용하여 미리 설계된 경로를 추적 하도록 하였고 라우터를 이용한 무선통신 접속으로 이동로봇의 공간 제약성을 극복하였으며 미들웨어를 이용하여 원격지에서 네트워크 통신의 신뢰성 확보 및 시간지연 효과를 개선하였다. 또한, 실험 결과를 통하여 이득 스케줄러 미들웨어의 효율성을 검증하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 시스템 구성

본 논문에서의 전체 시스템은 그림 1과 같다. 시스템의 구성은 크게 로봇 구동부, 경로추적 제어부, 그리고 네트워크 제어부의 세 부분으로 나뉘어 진다.

로봇 구동부는 이동로봇의 구동 및 위치정보를 처리하는 마이크로프로세서와 독립 IP 네트워크 기능을 탑재한 호스트 컴퓨터가 병렬통신으로 연결된 부분을 나타낸다. 경로추적 제어부는 클라이언트 컴퓨터가 패킷을 통하여 전송된 피드백 데이터를 처리하여 미리 설정된 경로를 추종하도록 속도 지령을 생성한다. 마지막으로 네트워크 제어부는 4계층 프로토콜인 UDP (User Datagram Protocol)을 사용하여 이동로봇 시스템과 중앙 제어 시스템을 연결 한다 [5].

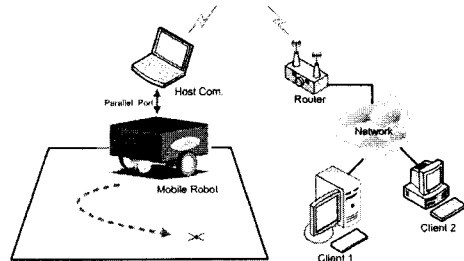


그림 1. 네트워크 기반의 이동로봇 제어 시스템

#### 2.2 이동 로봇 모델

경로추적 제어기법을 적용하기 위한 이동로봇의 기본 모델은 그림 2에서 보는바와 같이 두 개의 주 바퀴와 두 개의 보조바퀴를 사용하는 구조이다 [3,4]. 이동로봇의 운동 역학 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} \\ \frac{R}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$x = v \cos \theta \quad (2)$$

$$y = v \sin \theta \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (4)$$

저자 소개

\*光州科學技術院 機電工學科 碩士課程

\*\*光州科學技術院 機電工學科 教授 · 工學博士

여기서  $(x, y)$ 는 이동로봇의 고유좌표,  $(x_M, y_M)$ 은 로봇좌표의 위치를 나타낸다. 또한,  $\beta$ 는 방위각,  $L$ 은 양 바퀴사이의 길이,  $R$ 은 바퀴의 반지름,  $\omega$ 는 이동로봇의 각속도,  $\omega_L$ 과  $\omega_R$ 은 각 바퀴의 각속도로 표시된다.

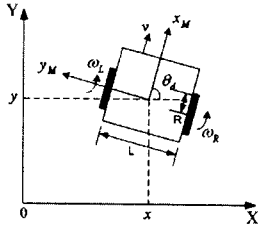


그림 2. 이동로봇 좌표 시스템

### 2.3 경로추적 알고리즘

경로추적 알고리즘으로 2차 방정식 곡선을 이용하는 방법을 사용하였다 [3]. 주요 개념은 이동로봇이 현재의 위치에서 미리 설정된 경로상의 한 기준점으로 2차 방정식 곡선을 따라 이동하는 방법이다. 경로상의 기준점은  $(x_p(s), y_p(s))$ 로 표시된다. 여기서  $s$ 는 경로상의 초기 위치로부터의 이동거리이다. 2차 방정식 곡선을 통해 생성되는 속도지령의 계산과정은 다음과 같다 [2].

1) 현재 이동로봇의 위치로부터 설정된 경로상의 한 지점과의 최단거리를 계산한다.

$$\sqrt{\min(x_p(s)-x(i))^2+(y_p(s)-y(i))^2} \quad (5)$$

여기서  $i$ 는 시간간격  $t_{i+1}-t_i$ 을 가지는 로봇의 현재 상태를 나타내는 지수이다.

2) 경로상의 기준점으로부터 로봇의 다음상태 예상거리를 계산한다.

$$s(i) = s_0 + \frac{s_{\max}}{1 + \beta \max x(s)}, \quad x(s) = \frac{d\theta_p(s)}{ds} \quad (6)$$

$$X_r(i) = [x_r(i) \ y_r(i) \ \theta_r(i)] \quad (7)$$

여기서  $s_0$ 는 이전상태 경로상의 최단거리지점,  $s_{\max}$ 는 최대 예상거리,  $\beta$ 는 양의 상수,  $x(s)$ 는 경로상의 곡률을 나타낸다. 또한,  $x_r(i) = x_p(s(i))$ ,  $y_r(i) = y_p(s(i))$ ,  $\theta_r(i) = \theta_p(s(i))$ 로부터 계산되어지며  $\beta$ 의 값이 커질수록 곡선 경로상의 예상거리  $X_r(i)$ 가 줄어든다.

3) 거리오차  $X_r(i) - X(i)$ 을 계산하고 이를 로봇좌표 값으로 변환한다.

$$\alpha(i) = [e_x \ e_y \ e_\theta] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (X_r(i) - X(i)) \quad (8)$$

4) 주어진 오차 값을 이용하여 2차 방정식 곡선을 구한다.

$$y_m = A(i)x_m^2, \quad A(i) = \text{sgn}(e_x) \frac{e_y}{e_x^2} \quad (9)$$

5) 계산된 2차 방정식 곡선을 추종할 수 있는 기준 선속도와 각속도를 계산한다.

$$v_r(i) = \text{sgn}(e_x) \sqrt{\bar{x}_m^2 (1 + 4A(i)x_m^2)} \quad (10)$$

$$\omega_r(i) = \frac{2A(i)\bar{x}_m}{v_r(i)} \quad (11)$$

만약  $t_i \leq t < t_{i+1}$ 일 때  $x_M$ 은 다음과 같다.

$$x_M = K(i)(t - t_i), \quad K(i) = \text{sgn}(e_x) \frac{\alpha}{1 + |A(i)|} \quad (12)$$

여기서  $\alpha$ 는 속도지수인 양의 상수로 사용된다. 만약  $t-t_i$ 의 시간이 매우 짧다고 가정하면 식 (10)과 (11)은 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$\widehat{v}_r(i) \approx K(i) \quad (13)$$

$$\widehat{\omega}_r(i) \approx 2A(i)K(i) \quad (14)$$

그리고 각 바퀴에 대한 기준속도는 다음과 같이 계산되어진다.

$$\omega_{R,r}(i) = \frac{\widehat{v}_r(i)}{R} + \frac{L\widehat{\omega}_r(i)}{2R} \quad (15)$$

$$\omega_{L,r}(i) = \frac{\widehat{v}_r(i)}{R} - \frac{L\widehat{\omega}_r(i)}{2R} \quad (16)$$

6) 상태변화  $i=i+1$ 로 설정하고 1의 과정부터 반복한다.

### 2.4 이득 스케줄러 미들웨어

미들웨어의 기본 개념은 각기 분리된 두 개 이상의 시스템 혹은 프로그램 사이에서 둘 사이의 매개 역할을 하거나 연합시켜주는 프로그래밍 서비스를 의미한다. 이는 애플리케이션 프로그램과 네트워크 운영체제의 중간 영역에 위치하며 광범위하게 이용되고 있다. 본 논문에서는 네트워크 기반 제어시스템에서의 시간지연효과를 절감하기 위해서 이득 스케줄러 미들웨어(GSM)라 명명된 미들웨어를 사용 한다 [1]. 이득 스케줄러 미들웨어는 원격지 로봇 시스템과 제어가 탑재된 중앙 시스템 사이를 네트워크 연결하며 송수신 패킷을 통한 데이터 송수신을 관리하고 네트워크 통행감시를 통하여 흐름을 조절하는 역할을 담당한다. 그림 3은 기본적인 이득 스케줄러 미들웨어의 구조이다.

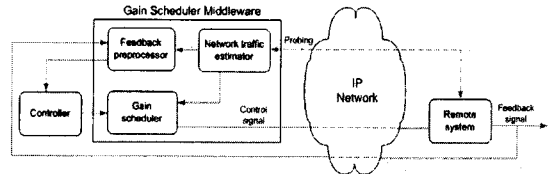


그림 3. Structure of gain scheduler middleware (GSM)

이득 스케줄러 미들웨어의 구성 모듈은 다음과 같다.

1) 네트워크 통행 측정 모듈(NTE): 네트워크상에서 중앙 시스템과 원격지 시스템 사이의 패킷 전송시간 측정을 통하여 현재 네트워크의 통행 상태를 측정한다.

2) 피드백 전처리기(FP): 원격지 시스템으로부터 전송된 피드백 신호에 네트워크 시간지연 측정을 더하여 현재 위치를 선행처리한 후 독립 분리된 제어기로 선행 처리된 신호를 전송한다.

3) 이득 스케줄러(GS): 속도지수를 조절하는 모듈로써 네트워크 상태에 따른 최적화된 제어기 출력 값을 획득하기 위하여 제어기 출력과 네트워크 통행 측정 모듈에서 측정된 시간지연을 연산하여 원격지 시스템으로 새로운 속도지령을 전송한다.

## 2.5 경로 추적에 대한 이득 스케줄러 제어

네트워크를 통한 원격지 이동로봇의 경로 추적 제어에 사용될 이득 스케줄러 미들웨어는 다음과 같은 절차에 따라 구성되어 진다. 중앙시스템은 시간  $t=t_i$ 일 때 원격지의 이동로봇으로부터 로봇위치  $X_c(t_i)$ 을 전송받게 된다. 그러나 네트워크를 통한 데이터 패킷 전송 시 네트워크 시간지연 ( $\tau_{RC}$ )으로 인하여 로봇의 실질적인 현재 위치가 바뀌게 된다. 또한, 중앙 시스템의 경로추적 제어기로부터 계산된 속도지령  $\omega(t_i)$ 도 이동로봇 시스템으로 제어신호가 전달되는 동안 네트워크 시간지연 ( $\tau_{CR}$ )으로 인하여 예상위치를 벗어나거나 기준 경로를 탈선하는 경우가 발생하게 된다. 이러한 두 가지 네트워크 시간지연 현상을 절감하면서 효율적인 네트워크 통신이 이루어지도록 하기위해 이득 스케줄러 미들웨어가 사용되었고 다음의 위치예측과 성능예측을 통하여 구체적인 시간지연 현상을 조절하는 방법을 나타내었다 [6,7].

그림 4는 이득 스케줄러 미들웨어를 사용하는 이동로봇의 경로 추적 제어 시스템을 보여준다.

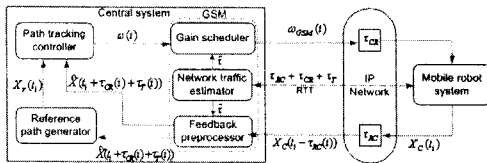


그림 4. GSM을 사용한 이동로봇의 경로추적 제어 시스템

### 2.5.1 위치예측

이동로봇의 위치예측은 중앙 시스템 내 전 처리기에서 로봇시스템으로부터 전송된 위치데이터  $X_c(t_i)$ 에 네트워크 시간지연  $\tau_{RC}$  (로봇-제어기)를 더하여 로봇위치  $X(t_i - \tau_{RC}(t_i))$ 을 선행처리한 후 기준 경로 생성기와 경로 추적기로 선행처리된 피드백 데이터를 보낸다. 기준 경로 생성기는 시간  $t=t_i + \tau_{CR}(t_i) + \tau_T(t_i)$ 일 때의 이동로봇의 다음위치  $X_c(t_i)$ 을 예측하고 경로 추적기는 2차 방정식 곡선을 이용하는 경로 추적 알고리즘에 따라서 이동로봇의 속도지령을 생성한다. 여기서  $\tau_T$ 는 이동로봇 시스템의 업데이트 시간이다. 특히 경로 추적 알고리즘에서 네트워크 시간지연  $\tau_{CR}$  (제어기-로봇)을 감안한 속도지령  $\omega_L(t_i)$ 과  $\omega_R(t_i)$ 를 생성하기 위하여 예측위치  $X(t_i + \tau_{CR}(t_i) + \tau_T(t_i))$ 을  $X(t_i)$ 대신 사용해야 한다. 위치예측과 관련된 관계식은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\Delta X(t_i) = [\Delta x(t_i) \Delta y(t_i) \Delta \theta(t_i)] \quad (17)$$

$$= X(t_i + \tau_{CR}(t_i) + \tau_T(t_i)) - X(t_i - \tau_{RC}(t_i))$$

각 좌표별 이동거리는 식(18)~(20)을 통하여 예상할 수 있다.

$$\Delta \theta(t_i) = 2A(i-1)K(i-1)(\tau_{CR}(t_i) + \tau_T(t_i) + \tau_{RC}(t_i)) \quad (18)$$

$$\Delta x(t_i) \approx \frac{1}{2A(i-1)} [\sin(\theta(t_i + \tau_{CR}(t_i) + \tau_T(t_i))) - \sin(\theta(t_i - \tau_{RC}(t_i)))] \quad (19)$$

$$\Delta y(t_i) \approx \frac{1}{2A(i-1)} [\cos(\theta(t_i - \tau_{RC}(t_i))) - \cos(\theta(t_i + \tau_{CR}(t_i) + \tau_T(t_i)))] \quad (20)$$

여기서  $i-1$ 은 이전 상태의 지수이며  $A(i-1)$ 는 2차 방정식 곡선 지수,  $K(i-1)$ 는 속도지수를 나타낸다. 그리고 로봇의 선속

도와 각속도는 일정한 값을 유지하며 다음 상태의 값으로 바뀔 때까지 기존의 값을 지속한다고 가정한다.

### 2.5.2 성능예측

이득 스케줄러 미들웨어가 얼마만큼의 효율을 가지는가를 살펴보기 위해서는 성능지수가 필요하다. 여기서 성능지수는 이동로봇이 네트워크 시간지연 상황에서 주어진 경로를 얼마만큼 잘 추종하는가를 가리킨다. 이동 로봇의 경로 추적에 대한 성능지수로는 경로 추적 오차  $J_1$ 와 최종 목적지 도달시간  $J_2$ 가 있다.

$$J_1 = \int_{t_0}^{t_f} D(x(t), y(t), \theta(t)) dt \quad (21)$$

$$D(x) = \sqrt{\frac{1 - \cos \Delta \theta(t_i)}{2A^2(i-1)} + \Delta^2 \theta(t_i)} \quad (22)$$

$$J_2 = t_f - t_0 \quad (23)$$

여기서  $D(x)$ 은 삼각공식을 이용한 추종경로와 이동로봇의 위치사이의 최소거리를 나타낸다.  $t_0$ 은 출발시간,  $t_f$ 는 목적지 최종 도달시간을 나타낸다.  $J_1 \leq \epsilon$ 을 통하여 이동로봇의 최대 허용오차를 설정할 수 있으며 이 범위를 만족하는 속도지수  $K(t_i)$ 의 조절을 통하여 속도지령을 재 생성해 낸다.  $\epsilon$ 은 사용자의 요구 성능에 따라 설정할 수 있다.

## 2.6 실험

실험은 이동로봇이 그림 5와 같이 미리 설정된 (1m 직선코스, 직경 2m의 반원 곡선코스, 직경 0.6m의 반원 곡선코스) 경로를 추종하도록 설정하였고 목적지 주변 반경 5cm 이내에 도달하였을 경우 자동 정지하도록 하였다. 원격지에서는 이동로봇을 구동하는 호스트 시스템의 운영체제는 Linux Redhat ver.9.0이고 PC사양은 Pentium III-850 CPU, 라우터와의 무선통신을 위한 Linksys사의 WPC11 ver 3, 그리고 구동모터의 제어 및 위치 데이터 획득을 위해 마이크로프로세서 AVR (Atmega128)을 사용하였다.

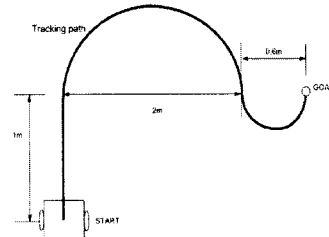
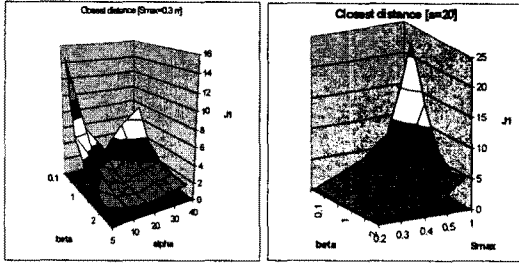


그림 5. 경로추적 실험에 대한 기준 경로

사용자를 위한 클라이언트 컴퓨터에는 Linux기반의 OS에 GCC로 컴파일된 UDP 소켓 프로그램을 실행하였다. 또한, 실제 원격지 네트워크 통신을 구현하기 위하여 이전에 측정되었던 ADAC Lab in USA에서 Thailand까지의 네트워크 시간지연 데이터를 사용하였다. 네트워크상에서 전송 패킷을 보내기 위한 샘플링 주기는 100ms이며 속도지령을 처리하기 위한 로봇의 샘플링 주기는 200us로 설정하였다.

우선, 이동로봇의 자체성능을 측정하기 위하여 로봇성능에 영향을 미칠 주요변수  $\alpha$ ,  $\beta$  그리고  $S_{max}$ 의 최적화된 값을 도출하였다. 그림 6과 7은 각 변수에 대한 경로추적오차  $J_1$ 을 나타낸다. 속도요소인  $\alpha$ 의 경우 값이 20일 때 최소의 누적오차 값을 나타내었고  $\beta$ 의 경우는 곡률요소로써 값이 증가 할수록 완만한 곡률의 변화로 누적오차 값을 줄일 수 있지만 대략 1.5일 때 최적화 값을 나타내었다.  $S_{max}$ 의 경우는 다음상태 투영거리 값이 적을수록 누적오차의 값이 줄어들지만 30cm일 때 최적의 성능을 나타내었다.



a)  $S_{max}=0.3m$  b)  $\alpha=20$   
 그림 6. 주요 변수에 대한 경로추적 오차 값

다음으로 구해진 주요변수에 대한 최적화 값을 이용하여 이득 스케줄러 미들웨어의 성능 검증에 위해 다음의 세 단계를 통하여 실험을 수행하였다.

- 1) 로컬 영역에서 GSM을 가지지 않는 이동로봇의 경로추적
  - 2) 네트워크상에서 GSM을 가지지 않는 이동로봇의 경로추적
  - 3) 네트워크상에서 GSM을 가지는 이동로봇의 경로추적
- 그림 8은 시간에 따른 이동로봇과 경로상의 최단거리 지점과의 경로일탈오차  $D$ 을 나타낸다.

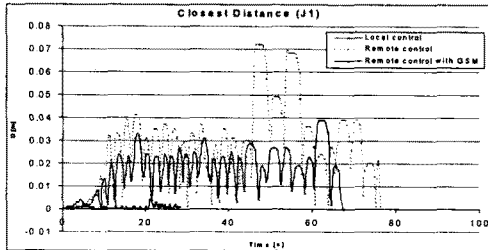
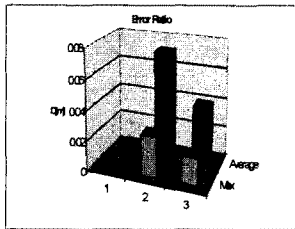


그림 8. 시간에 따른 경로추적오차



1. Local control, 2. Remote control, 3. Remote control with GSM  
 그림 9. 각 상황별 오차비율

네트워크상에서 GSM을 사용할 경우 경로일탈오차 값이 줄어들었으며 최대 오차 값도 감소함을 볼 수 있다. 또한, 경로상의 다음상태 거리를 예측함으로써  $J_2$ 의 시간단축

효과도 볼 수 있었다. 이와 같은 결과는 GSM에 의한 위치예측과 성능예측이 네트워크 상태에서의 경로추적오차를 얼마만큼 개선시킬 수 있는가를 보여준다.

그림 9를 살펴보면 네트워크 시간지연효과로 인하여 로컬지역 이동로봇의 경로추적 제어에 비해서 경로추적오차 값이나 목적지 도달시간은 증가하였지만 GSM의 사용으로 GSM을 사용하지 않은 경우보다 45%이상의 누적오차 절감효과를 확인할 수 있었고 최대 경로일탈오차도 감소함을 검증하였다. 보다 정밀한 경로 추적을 위해서는  $\epsilon$ 의 값을 감소시키는 방법이 있다. 따라서 설계자의 목적에 따라 속도와 정밀도의 범위를 정하여 그 범위에 수렴하도록 값을 조정할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 네트워크 기반 원격지 이동로봇의 경로추적에 이득 스케줄러 미들웨어 (GSM)를 사용하여 이동로봇의 속도지령을 조절함으로써 네트워크 시간지연에 따른 위치오차를 개선시키는 방법을 살펴보았다. 특히 이득 스케줄러 미들웨어는 기존의 이동로봇 경로추적 제어기의 수정이나 조정 없이 간단히 미들웨어를 추가함으로써 네트워크 시간지연 효과를 보상할 수 있는 장점이 있다. 향후 미들웨어의 일반화를 위해 다양한 크기와 무게, 그리고 여러 경로 설정을 가지는 이동로봇에 대한 이득 스케줄러 미들웨어의 적용에 대한 연구가 요구된다.

이 논문은 한국과학재단에서 지원한 해외공동연구과제 수행 결과입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Y. Tipsuwan and M.-Y. Chow, "Control methodologies in networked control system," *Control Engineering Practice*, vol. 11, no. 10, pp. 1099-1111, 2003
- [2] Y. Tipsuwan and M.-Y. Chow, "Gain Scheduling Middleware for Networked Mobile Robot Control," *Proceedings of American Control Conference 2004 (ACC2004)*, Boston, MA, USA, 2004.
- [3] K. Yoshizawa, H. Hashimoto, M. Wada, and S. Mori, "Path tracking control of mobile robots using a quadratic curve", *Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 58-63, 1996.
- [4] J.-H. Kim, D.-H. Kim, Y.-J. Kim, K.-T. Seow, "Soccer Robotics," *Springer Tracts in Advanced Robotics*, Vol. 11, 2004.
- [5] <http://www.ecst.csuchico.edu/~beej/guide/net/>
- [6] Y. Tipsuwan, M.-Y. Chow, "Neural Network Middleware for Model Predictive Path Tracking of Networked Mobile Robot over IP Network", *IEEE IECOn'03*, Roanoke, VA, USA, 2003.
- [7] R. Vanijirattikhan, M.-Y. Chow, Y. Tipsuwan, "Feedback Preprocessor for Unmanned Ground Vehicle Network-Based Controller," *Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE industrial Electronics Society(IECon'04)*, Busan, Korea, 2004.