

무인자동차 궤적 추적 제어 시스템에 관한 연구

한아균¹ · 강신출² · 김관형³ · 탁한호^{4*}

Trajectory tracking control system of unmanned ground vehicle

Ya-Jun Han¹ · Chin-Chul Kang² · Gwan-Hyung Kim³ · Han-Ho Tac^{4*}

^{1,4*}Department of Electronic Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Gyeongnam 52725, Korea

²Department of Electricity, University Of Gyeongnam Namhae, 52422, Korea

³Department of Computer Engineering, Tongmyong University, Busan 608-711, Korea

요 약

본 논문에서는 시간에 따라 방향 속도와 위치가 변하는 무인자동차의 궤적 추적 제어시스템에 대해 논한다. 무인자동차는 운전자의 도움이 없어도 스스로 주위환경을 인식하여 지정된 도로를 주행할 수 있는 자동차로 올바른 주행을 위해 고려해야 할 변수가 다양하다. 무인자동차의 궤적 추적 시스템에서 인식한 정보는 이산적인 값을 가지므로 센스 간의 간격으로 인하여 비연속성 및 비선형성을 가지고 있다. 이로 인하여 목표 궤적을 정확하게 추적하는 것이 어렵다. 본 논문은 차량의 운동학 모델링을 통하여 선형오차, 제약 조건, 제어 목표함수의 세 가지 조건을 갖는 무인자동차 궤적 추적시스템을 제안한다. 제안된 궤적 추적시스템을 기반으로 동적 시뮬레이션 소프트웨어-카심(Dynamic Simulation Software-CarSim)의 결합시뮬레이션을 통해 시스템의 성능을 평가하였고, 그 결과로 더욱 정밀하게 목표 궤적을 추적할 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

This paper discusses the trajectory tracking system of unmanned ground vehicles based on predictive control. Because the unmanned ground vehicles can not satisfactorily complete the path tracking task, highly efficient and stable trajectory control system is necessary for unmanned ground vehicle to be realized intelligent and practical. According to the characteristics of unmanned vehicle, this paper built the kinematics tracking models firstly. Then studied algorithm solution with the tools of the optimal stability analysis method and proposed a tracking control method based on the model predictive control. The controller used a kinematics-based prediction model to calculate the predictive error. This controller helps the unmanned vehicle drive along the target trajectory quickly and accurately. The designed control strategy has the true robustness, simplicity as well as generality for kinematics model of the unmanned vehicle. Furthermore, the computer Simulink/Carsim results verified the validity of the proposed control method.

키워드 : 궤적 추적 제어, 무인자동차, 운동학 모델링, 운동학적 제어

Key word : Kinematics control, Kinematics tracking models, Neural unmanned ground vehicle, Trajectory tracking control

Received 05 September 2017, Revised 12 September 2017, Accepted 18 September 2017

* Corresponding Author Han-Ho Tac(E-mail:fmtack@gntech.ac.kr, Tel:+82-55-751-3332)

Department of Electronic Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Gyeongnam 52725, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.10.1879>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

무인자동차(UGV: Unmanned Ground Vehicles)란 일반적으로 운전자의 조작 없이 스스로 주행환경을 인식하여 목표지점까지 운행할 수 있는 자동차를 말한다 [1]. 유럽의 한 연구에 의하면 자동차 운전자는 교통사고 발생 0.5초전에 경고를 받을 경우 추돌이나 충돌사고를 60% 줄이고, 전면 충돌사고를 30% 방지하며, 노면관련 사고를 50% 감소시킬 수 있는 것으로 밝혀졌다. 반면에 교통사고 1초전 경고를 받을 경우 교통사고를 90% 까지 방지할 수 있다는 연구결과가 밝혀졌다. 자동차를 첨단기술로 인간의 운전을 대신하면 교통사고가 줄어든다는 연구결과이며, 무인자동차로 온라인 네트워크를 형성하면 네트워크의 자동차들이 지능교통정보 시스템에 교통정보를 제공하여 보다 안전하고 편리한 무인자동차 운행이 가능하다[2-4].

무인자동차가 복잡한 도로에서 더 안전하고 정확하게 운전하기 위해서는 궤적 추적 기능이 매우 중요하다. 현재 실용화되고 있는 대부분의 무인자동차는 도로 표면에 자기 유도선 또는 광학 테이프 등을 설치하여 연속적 고정 궤적을 따라 운행하는 방식을 따르고 있다 [5,6]. 이와 같은 방식은 쉽게 구현할 수 있지만 주행 중에 발생하는 다양한 오차를 효과적으로 처리하기 힘들고, 추적오차가 항상 존재하며, 주행속도를 높일 경우 궤적을 이탈할 가능성이 크다는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 오차 문제를 해결하기 위해 차량의 운동학 모델링을 통하여 선형오차, 제약조건, 제어 목표함수의 세 가지 조건을 갖는 무인자동차 궤적 추적 제어기를 설계하였다. 제어기의 안정도 판별을 위해 Lyapunov 방법을 이용하였고, 제어 목표 함수는 소프트 제약(soft constraint) 방법을 사용하며, 제어량 대신 제어증량을 직접 제어할 수 있게 하였다. 이를 바탕으로 일반적인 방법보다 더 정확하고 정밀하게 제어목표를 계산하고, 예측하는 궤적을 완벽하게 추행할 수 있도록 하였다.

II. 무인자동차의 기하학적 해석

차량 운동학 모델링은 기하학적 각도변화를 통해 물체의 변화를 파악하는 동시에 시간에 따른 물체의 위치

와 속도 등을 연구한다[7]. 운동학 모델링을 궤적추적에 적용하면 무인자동차의 운행궤적에 대한 예측이 가능하다. 운동학 모델링에 근거하여 궤적추적을 하는 경우, 궤적추적의 결과가 운동학의 기하학적 조건을 만족한다[8-10]. 이는 운동학 모델링에 근거한 궤적추적이 안전한 제어기능과 우수한 성능을 가지고 있다는 것을 보여준다. 그림 1은 관성 좌표계에서 무인자동차의 절대 위치와 방향을 표현한 것이다.

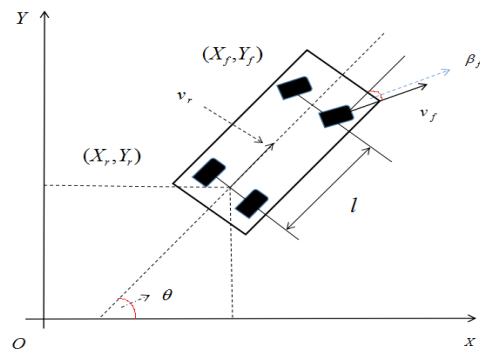


Fig. 1 Kinematics of Unmanned Ground Vehicle

그림 1에서 관성 좌표계 OXY에서 (X_r, Y_r) , (X_f, Y_f) 는 각각 차량의 뒷 차축과 앞 차축의 중심좌표를 의미하며, θ 은 무인자동차의 조향각이고, β_f 는 앞바퀴의 각속도, v_r 은 뒷 차축의 중심속도, v_f 는 앞 차축의 중심속도를 나타내며, l 은 앞 차축과 뒷 차축간 거리를 나타낸다. 결론적으로 차량의 뒷 차축 중심의 속도는 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$v_r = \dot{X}_r \cos\theta + \dot{Y}_r \sin\theta \quad (1)$$

차량의 앞, 뒷 차축의 운동학 미분 방정식은 다음 식 (2)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{X}_r \sin\theta - \dot{Y}_r \cos\theta = 0 \quad (2)$$

식 (1), (2)을 통해서 차체의 회전 선속도는 다음 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$w = \frac{v_r}{l} \tan\beta_f \quad (3)$$

여기서 v_r 은 좌표계에서 무인자동차의 조향 각속도를 나타내며, v_r 를 x 축과 y 축의 성분으로 분해하고 조향각 θ 와 함께 미분 방정식으로 표시하면 다음 식 (4)

과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_r \\ \dot{Y}_r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ \tan\frac{\beta_r}{l} \end{bmatrix} v_r \quad (4)$$

여기서 v_r 과 θ 는 무인자동차의 무게 중심점 x 가 이동하는 속도와 방향을 각각 나타내고, 방향오차 β 는 식 (5)과 같이 나타내며, 무인자동차의 진행방향각 θ 와 예측하는 위치의 접선과의 각도로 방향각 θ_r 의 차이로 표현된다.

$$\beta = \theta - \theta_r \quad (5)$$

그리고 그림 1에서 앞바퀴의 전향도에 대해 무게 중심점 x 와 기준 궤적에 있는 가상의 무게 중심점 x_n 은 다음 식 (6) 및 식 (7)과 같이 정의된다.

$$x = [x \ y \ \theta]^T \quad (6)$$

$$x_n = [x_o \ y_o \ \theta_o]^T \quad (7)$$

여기서 $[x \ y \ \theta]^T$ 는 시간이 T일 때 차량에 대한 무게 중심점의 가로위치, 세로 위치, 방향각을 각각 나타내며, $[x_o \ y_o \ \theta_o]^T$ 는 시간이 T일 때 기준 궤적에 있는 가상의 무인자동차에 대한 무게 중심점의 가로위치, 세로 위치, 방향각을 나타낸다. 그리고 x 와 x_n 의 오차로 표현되는 오차 모델링 \hat{x} 는 다음 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_o & -1 \\ -x_o & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_o \cos\theta_o \\ v_o \sin\theta_o \\ \omega_o \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)로 표현되는 오차 미분 방정식을 이용하여 무인자동차의 궤적 추적 제어기는 위치 및 방향에 대한 오차값 x_r, y_r, θ_r 이 0으로 수렴하도록 한다.

III. 궤적추적 제어기의 설계

무인자동차의 궤적 추적 제어기는 무인자동차가 시간에 따라 변화하는 속도가 기준 궤적에 수렴하기 위해 필요한 방향 속도와 각속도를 계산하는 운동학적 제어기로 구성되며, CarSim을 이용하여 무인자동차의 정확한 파라미터를 설정하고 궤적을 추적한다.

3.1. 운동학적 제어기 설계

운동학적 제어기의 목적은 무인자동차가 예측하는 궤적을 정확하게 추적할 수 있도록 Lyapunov 함수를 이용하며, 위치와 방향의 오차가 0이 되도록 방향 속도와 각속도를 제어하는 것이다. 먼저 궤적 추적 제어기 설계를 위한 Lyapunov 함수 V_0 를 다음 식 (9)와 같이 표현한다.

$$V_0 = \frac{1}{2}(x_r^2 + y_r^2) + K_1(1 - \cos(\theta_r)) \quad (9)$$

식 (9)에서 x_r 은 무인자동차에 대한 무게 중심점의 가로위치 오차이고, y_r 은 무게 중심점의 세로위치 오차이며, θ_r 은 무게중심점의 방향오차이다. 그리고 Lyapunov 함수 V_0 에 대해 미분하면 다음 식 (10)과 같다.

$$\dot{V}_0 = x_r [\dot{\theta}_r \cos(\theta_r) + y_r \omega - v] + y_r [v_r \sin(\theta_r) - x_r \omega] + K_1(\omega_r - \omega) \sin(\theta_r) \quad (10)$$

식 (10)에서 $\dot{x}_r, \dot{y}_r, \dot{\theta}_r$ 은 무게 중심점의 가로위치, 세로위치, 방향각도에 대한 오차 미분값을 각각 나타낸다.

3.2. 목표함수 설계

목표 함수의 목적은 무인자동차가 예측하는 궤적을 빠르고 안전하게 추적하는 것이다. 이 목적을 달성하기 위해 시스템 상태량과 편차 제어량이 최적화가 되어야 하며, 목표 함수는 다음 식 (11)과 같이 나타낸다.

$$j(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(k+it) - \eta_{ref}(k+it)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U(k+it)\|_R^2 + \rho \varepsilon^2 \quad (11)$$

식 (11)에서 N_p 는 예측 시간영역, N_c 는 제어 시간영역, Q 와 R 은 상태 가중행렬(state weighting matrix)을 의미하며, η 는 예측 제어시스템의 입력, η_{ref} 는 예측 제어시스템의 출력, k 는 시간, i 는 예측제어의 횟수이다. $\eta(k+it)$ 는 시간이 k 일 때 횟수 i 에서 예측제어시스템의 입력이고, $\eta_{ref}(k+it)$ 는 시간이 k 일 때 횟수 i 에서 예측제어시스템의 출력이다. 그리고 ΔU 는 제어증량, ρ 는 증량계수, ε 는 이완계수를 나타낸다. 그리고 식 (11)의 첫 항목은 시스템의 추적 성능이고, 두 번째 항목은 제어증량의 제약을 나타낸다. 식 (11)에서 제어량을 치환하여 제어 증량을 넣고 이완계수를 삽입하면 목

표 함수를 정확하게 제어할 수 있다.

3.3. 제한조건 설계

본 논문에서 무인자동차가 예측하는 궤적을 정확하게 추적할 수 있도록 하는 제어량은 다음 식 (12)와 같이 나타낸다.

$$u_{\min}(t+k) \leq u(t+k) \leq u_{\max}(t+k) \quad (12)$$

여기서 $k=0,1,\dots,N_c-1$ 이고, 제어증량은 다음 식 (13)과 같이 표현된다.

$$\Delta u_{\min}(t+k) \leq \Delta u(t+k) \leq \Delta u_{\max}(t+k) \quad (13)$$

궤적 추적 제어시스템의 추적 제어 알고리즘은 그림 2와 같고, 본 논문에서 제안한 궤적 추적 제어기의 블록 선도는 그림 3과 같이 나타낸다.

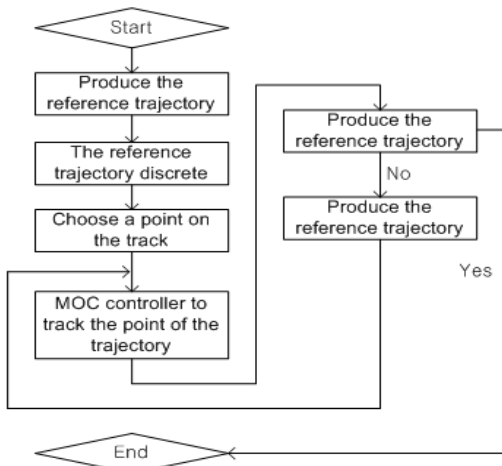


Fig. 2 The flow chart of trajectory tracking system

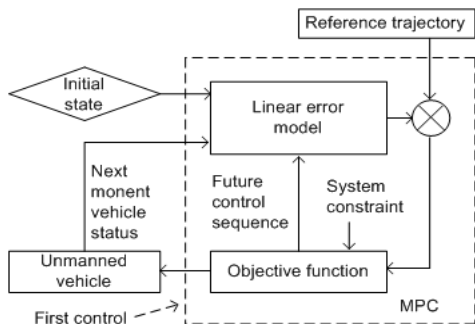


Fig. 3 Block diagram of the controller

예측제어기는 선형오차, 제약 조건, 목표함수인 세 가지 조건으로 구성한다. 선형 오차방정식은 운동학 모델링식인 식 (8)의 앞부분에 나타나고, 제약조건은 차량의 성능안전을 효과적으로 제한할 수 있다. 본 논문은 Simulink/CarSim 결합시뮬레이션을 이용하여 궤적 추적시스템을 분석한다.

IV. 실험 및 결과 분석

본 논문은 CarSim을 이용하여 무인자동차의 파라미터를 설정하며, Simulink/CarSim 결합시뮬레이션을 이용하여 실험을 하였다. 무인자동차 초기 시간 $t_0=0$, 방향각 $\theta=\pi/2$, 각속도 $v_r=0.3m/s$ 으로 설정하였다. 실제 상황과 유사한 환경을 모사하기 위하여 제어 입력 예측 시간영역 $N_p=6$, 제어 시간영역 $N_c=3$ 으로 설정하였다. 그리고 무인자동차의 참고속도는 4m/s, 6m/s, 10m/s에서 직선 궤적추적과 원형 궤적추적에 대해 시뮬레이션하였고, 차량의 조향각, 차량 앞 차축과 뒷 차축 추적의 위치 오차에 대해서도 시뮬레이션하였다. 그 결과 참고속도 4m/s, 6m/s, 10m/s에서 직선 궤적추적과 실제 궤적추적의 비교결과를 그림 4와 같이 나타내고, 궤적 추적오차는 그림 5와 같이 나타낸다.

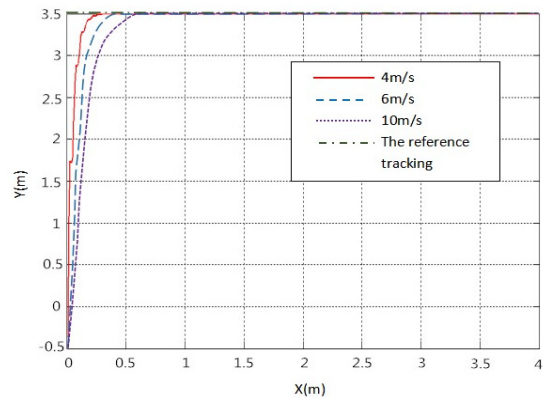


Fig. 4 Linear reference trajectory and actual trajectory

그림 4에서 가로축은 운행거리, 세로축은 오차거리를 나타내며, 참고속도 4m/s에서 운행거리 0.2m에 예측 궤적을 추적하고, 참고속도 6m/s에서 운행거리 0.4m에 예측 궤적을 추적하며, 참고속도 10m/s에서 운행거리

0.6m에 예측 궤적을 추적할 수 있다. 운행거리 0.6m안에 3가지의 속도 모두 예측 궤적을 추적하는 것으로 나타났다.

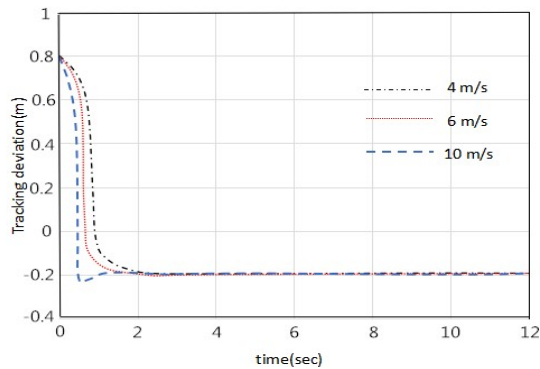


Fig. 5 Linear tracking error

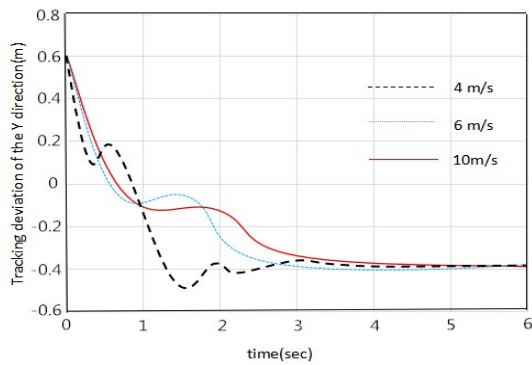


Fig. 6 Circular tracking error

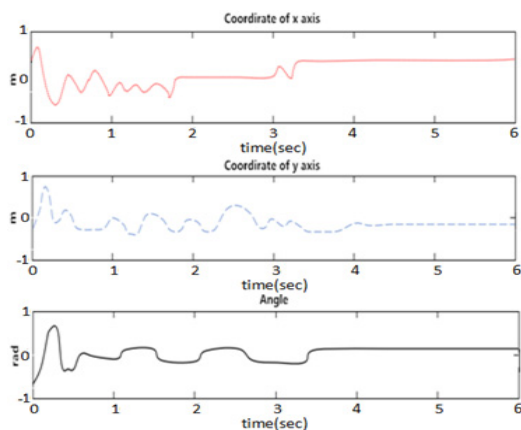


Fig. 7 Tracking position error

그림 5에서 가로축은 추적시간, 세로축은 오차거리를 나타내며, 참고속도 4m/s에서 0.8초안에 예측 궤적을 따라갈 수 있고, 참고속도 6m/s에서 1초안에 예측 궤적을 따라갈 수 있으며, 참고속도 10m/s에서 1.2초안에 예측 궤적을 따라갈 수 있다. 그림 4와 그림 5의 결과는 동일한 초기 조건으로 행하여진 결과로 3가지의 속도 모두에 무인자동차가 빠르게 예측추적이 가능하리라 판단되며, 그 중에 10m/s의 경우는 초기에 어느 정도 조정하는 거리가 필요한 것으로 나타내고 있다.

그림 6은 참고속도 4m/s, 6m/s, 10m/s에서 원형 궤적 추적에 대한 실제 궤적 추적오차를 나타낸 것으로 참고속도 모두 3초안에 원형궤적을 추적할 수 있는 것으로 나타나므로 무인자동차는 예측 제어시스템을 통해 안정적으로 궤적을 추적할 수 있는 것으로 나타났다.

그림 7은 참고속도 3m/s에서 차량의 조향각, 차량 앞 차축과 뒷 차축 추적 위치오차를 나타낸 것으로 참고속도 3.5초-4초 이내에 예측하는 궤적을 따라갈 수 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 제어가 없을 경우 기계적인 오차로 인해 양 바퀴에 속도차이가 크고 자체의 중량에 의한 관성으로 예측궤적에 도달하는 시간이 길다[11]. 반면 제안된 예측 제어시스템을 통해서서는 빠르게 예측하도록 추적이 가능함을 입증할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 운동학적 모델링 기법에 기반하여 무인자동차의 궤적 추적 제어기를 제안하였다. 무인자동차의 궤적 추적 제어기는 무인자동차가 시간에 따라 속도가 변하는 기준 궤적에 수렴하기 위해 필요한 방향 속도와 각속도를 계산하는 운동학적 제어기로 구성하였다.

Simulink/CarSim 결합시뮬레이션을 이용하여 모의 실험을 수행하고, 실험결과를 비교 검토한 결과 궤적 추적시스템의 경우 예측 제어를 기반으로 우수한 적응 성능과 강건한 성능을 보이는 것으로 나타났다. 본 연구 결과를 기반으로 향후 모의실험 결과보다 더 빠르게 궤적추적이 가능하도록 다양한 방법으로 연구를 진행할 경우 무인자동차의 안전성을 향상 시킬 수 있을 것으로 기대되며, 차후에는 본 논문에서 제안한 시뮬레이션을 바탕으로 실제 실험을 진행하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Gyeongnam National University of Science and Technology Grant 2017

REFERENCES

[1] J. H. Huh, S. Otgonchimeg and K. J. Seo, "Advanced metering infrastructure design and test bed experiment using intelligent agents: focusing on the PLC network base technology for Smart Grid system," *The Journal of Super computing, Springer*, vol. 72, no. 5, pp. 1862 - 1877, Mar. 2016.

[2] M. Diehl, S. Schwarzkopf, F. Uslu I. Allowor, H. G. Bock, R. Findeisen, E. Dieter Gilles and J. P. Schloder, "An efficient algorithm for nonlinear model predictive control of large scale systems part 1: description of the method," *Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs, Regelungs-und Informationstechnik*, vol. 50, no. 12, pp. 557-567, Dec. 2002.

[3] H. R. Song, "Performance enhancement of launch vehicle tracking using GPS-based multiple radar bias estimation and sensor fusion," *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, vol. 20, no. 6, pp. 47-56, Dec. 2015.

[4] K. A. Kyoung, I. Y. Jong and K. Lee, "A study on the path- tracking of electric wheelchair robot," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 28, no. 11, pp. 1265-1271, Nov. 2011.

[5] S. Kato, and K. W. Wong, "Intelligent automated guided vehicle controller with reverse strategy," *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics(JACIII)*, vol. 15, no. 3, pp. 304-312, 2011.

[6] H. S. Jang and Y. E. Moon, "A Study on the development of the small vessel monitoring system using single board," *The Journal of Internet Electronic Commerce Research*, vol. 15, no. 6, pp. 157-168, 2015.

[7] X. H. Yin, Z. Q. Yu, Z. Cao, C. Yang and H. Zhao, "Energy-optimization tracking control for automatic guided vehicle," *Light Industry Machinery*, vol. 31, no. 1, 40-43, Jan. 2013.

[8] J. S. Oh and Y. H. Choi, " Path tracking control using a wavelet based fuzzy neural network for mobile robots," *International Journal of Fuzzy logic and Intelligent Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 111-118, Jun. 2004.

[9] H. H. Tack and S. G. Kwon, "The injection petrol control system about CMAC neural networks," *Journal of The Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 395-400, Feb. 2017.

[10] A. Alaeddini and K. A. Morgansen. "Bioinspired navigation for a nonholonomic Mobile Robot," *Journal of Aerospace Information Systems*, vol. 12, no. 12, pp. 688-698, 2015.

[11] Y. H. Choi and K. J. Kim "Robust ath tracking control for autonomous underwater vehicle with variable speed," *Korea Institute of Intelligent Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 476- 482, Jun. 2010.



한아균(Ya-Jun Han)

경남과학기술대학교 전자공학과 공학사
 경남과학기술대학교 대학원 전자공학과 공학석사
 경남과학기술대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료
 ※관심분야 : 로봇틱스, 공장자동화,



강신출(Chin-Chul Kang)

부경대학교 전기공학과 공학사
 동아대학교 전자공학과 공학석사
 동아대학교 전자공학과 공학박사
 경남도립대학교 전기과 교수
 ※관심분야 : 컴퓨터제어, 퍼지 및 인공지능



김관형(Gwan-Hyung Kim)

2000년 동명대학교 컴퓨터공학과 전임강사
2011년~현재 동명대학교 컴퓨터공학과 조교수
※ 관심분야 : 인공지능, 임베디드시스템 설계, 제어공학



탁한호(Han-Ho Tac)

부경대학교 전자공학과 공학사
동아대학교 전자공학과 공학석사
한국해양대학교 전자통신공학과 공학박사
신일전기<주> 전기기기설계담당
<주> 흥창 부설연구소(연구원)
University of British Columbia(UBC),
Vancouver, CANADA, 연구교수
경남과학기술대학교 융합기술공과대학 전자공학과 교수
※관심분야 : 멀티미디어시스템, 지능시스템, 로봇틱스, 공장자동화, 트랜스포테이션, 기계진동 및 동역학