

제한조건을 갖는 이동로봇의 유전알고리즘에 의한 예측제어

최영규¹ · 박진현^{2*}

Predictive Control based on Genetic Algorithm for Mobile Robots with Constraints

Young-Kiu Choi¹ · Jin-Hyun Park^{2*}

¹Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Pusan 46241, Korea

^{2*}Dept. of Mechatronics Engineering, Kyeognam National Univ. of Science and Technology, Jinju 52725, Korea

요 약

예측제어는 제어대상의 예측모델을 이용하여 기준명령과 상태의 미래 오차를 예측하고 최소화시키는 현재 입력을 구하며, 상태와 입력의 제한조건도 고려할 수 있는 매우 실용적인 방법이다. 이동로봇에 대해 예측제어가 적용된 연구들이 있었으나 제어성능을 결정하는 여러 제어 파라미터들이 임의로 지정됨에 따라 성능이 최적화되지 못하였다. 본 논문에서 입력제한조건을 갖는 이동로봇의 궤적추종 예측제어에 유전알고리즘을 적용하여 제어 파라미터 튜닝을 통해 궤적추종오차를 최소화하며, 입력의 제한조건을 반영하기 위해서 quadratic programming을 Hildreth 방법을 적용한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 방법의 우수성을 기존 방법과 비교하여 확인한다.

ABSTRACT

Predictive control is a very practical method that obtain the current input that minimizes the future errors of the reference command and state by use of the predictive model of the controlled object, and can also consider the constraints of the state and input. Although there have been studies in which predictive control is applied to mobile robots, performance has not been optimized as various control parameters for determining control performance have been arbitrarily specified. In this paper, we apply the genetic algorithm to the trajectory tracking control of a mobile robot with input constraints in order to minimize the trajectory tracking errors through control parameter tuning, and apply the quadratic programming Hildreth method to reflect the input constraints. Through the computer simulation, the superiority of the proposed method is confirmed by comparing with the existing method.

키워드 : 이동로봇, 예측제어, 제한조건, 유전알고리즘, 제어파라미터

Key word : Mobile Robots, Predictive Control, Constraints, Genetic Algorithm, Control Parameters

Received 29 August 2017, Revised 01 September 2017, Accepted 25 September 2017

* Corresponding Author Jin-Hyun Park(E-mail:uabut@gntech.ac.kr, Tel:+82-55-751-3386)

Department of Mechatronics Engineering, Kyeognam National University of Science and Technology, Jinju 52725, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkice.2018.22.1.9>

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

로봇에 대한 연구는 소량 다품종의 산업적 요구로 시작되었고 로봇 매니플레이터에 집중되었다. 근래에는 지능과 이동성을 갖춘 이동로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이동로봇은 산업현장에서 가공 물품들을 이동시키는 컨베이어벨트를 대신할 수 있으므로 유연한 생산라인시스템 구축에 매우 유리하다[1].

이동로봇 연구 분야에는 시각 및 각종센서, 지능시스템, 기구학과 동력학 관련 동적제어 등이 있다. 이러한 이동로봇의 동적제어에 대해 많은 연구[2-4]가 진행되어 왔으나 이동로봇의 상태와 입력이 무한히 큰 값을 가질 수 없으므로 실제 적용할 때 성능이 달라질 수 있다. 한편 예측제어는 제어대상의 예측모델을 이용하여 기준명령과 상태의 미래 오차를 예측하고 최소화시키는 현재 입력을 구하며, 상태와 입력의 제한조건도 고려할 수 있는 매우 실용적인 방법이다. 유한한 예측구간에서 미래 오차를 최소화시키는 제어입력들을 구하고 그중에서 첫 번째 입력만을 사용하여 제어하며, 이러한 작업을 매 제어시간마다 반복한다. 예측제어는 제어성능이 우수하지만 실시간 계산량이 과중하여 회공정시스템과 같이 응답이 아주 느린 시스템에 주로 적용되었다[5]. 그러나 컴퓨터 하드웨어의 발달로 매우 복잡한 연산도 실시간 처리가 가능하여짐에 따라 로봇과 같이 빠른 시스템에도 예측제어방법 적용 연구가 진행되고 있다[6-9]. 실시간으로 이동로봇의 예측제어가 구현된 바 있었으나 입력의 제한조건이 직접적으로 고려되지 못했고 또한 제어성능을 결정하는 여러 제어 파라미터들이 임의로 지정됨에 따라 성능이 최적화되지 못하였다[8]. 제어 파라미터 중 기준모델에 관련된 파라미터에 대해 최적화시키는 연구가 있었으나 입력제한조건을 직접적으로 고려하지는 못하였다[9].

본 연구에서 입력제한조건을 갖는 이동로봇의 궤적 추종 예측제어에 유전알고리즘[10]을 적용하여 제어 파라미터 튜닝을 통해 궤적추종오차를 최소화한다. 입력의 제한조건을 반영하기 위해서 각 샘플링 타임에서 유한 시간 구간의 최적제어문제를 풀어야 하며 이를 위해 quadratic programming을 Hildreth 방법[11]을 사용한다. 유한 시간 구간에서의 제어량을 계산하고 그 첫 번째 제어입력을 이동로봇의 직선속도와 회전각속도 명령으로 출력하며, 이러한 값들은 이동로봇 바퀴의 속도

제어시스템의 속도명령으로 변환되어 인가되고 속도제어를 하게 된다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 제어방법의 우수성을 기존 방법의 성능과 비교하여 확인한다.

II. 이동로봇의 기구학 선형화

그림 1과 같은 차동 구동형 이동로봇의 모델의 기구학을 수학적으로 나타낸다. 이동로봇의 자세는 식(1)과 같이 직교좌표와 각도로 나타낼 수 있다.

$$q = [x \ y \ \theta]^T \quad (1)$$

위에서 x 와 y 는 이동로봇의 무게중심위치 좌표이고, θ 는 이동로봇의 진행방향 각도를 나타낸다.

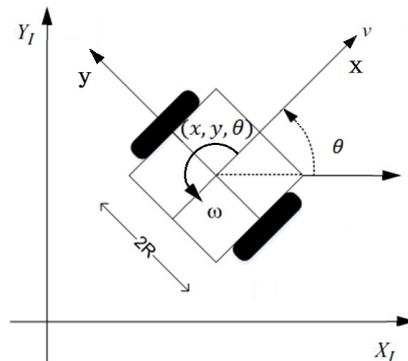


Fig. 1 Mobile Robot

식(1)의 미분은 이동로봇의 선속도 및 각속도로 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

단 v 와 ω 는 각각 이동로봇의 선속도와 각속도를 나타낸다.

그림 2에서 기준로봇과 실제로봇의 오차를 실제로봇 좌표계에서 표현한 상태추적오차 $e(t) = [e_1(t) \ e_2(t) \ e_3(t)]^T$ 는 식(3)과 같이 된다[8].

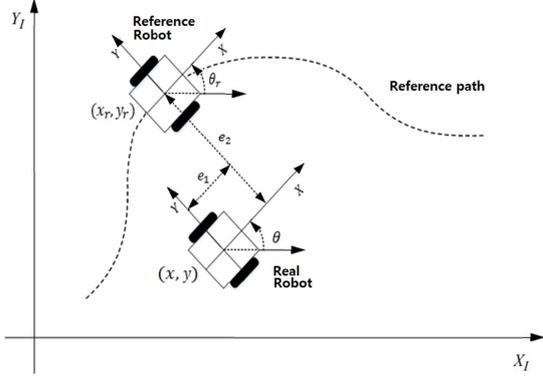


Fig. 2 Robot following error transformation

$$e = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (q_r - q) \quad (3)$$

여기서 q_r 은 기준로봇의 자세이고, q 는 실제로봇의 자세이다.

그림 2에서 기준로봇의 정의에 따라 기준로봇의 기준경로 추적오차는 없지만 실제로봇은 기준경로 추적 오차를 가진다. 그러므로 제어알고리즘이 적용되어 실제로봇의 기준경로 추적오차가 최소화되어야 한다.

식(2)와 (3)에서 다음 식을 구할 수 있다[8,9].

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} \cos e_3 & 0 \\ \sin e_3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & e_2 \\ 0 & -e_1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} u \quad (4)$$

여기서 $u = [v \ \omega]^T$ 는 선속도 및 각속도 입력 벡터이다. 로봇의 속도 입력 벡터 u 는 식(5)와 같이 피드포워드 입력 u_F 와 피드백 입력 u_B 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$u = u_F + u_B \quad (5)$$

여기서 피드포워드 입력 $u_F = [v_r \cos e_3 \ \omega_r]^T$ 는 기준입력의 비선형변환 형태이고, 피드백 입력은 $u_B = [u_{B1} \ u_{B2}]^T$ 로 나타낸다.

식(4)와 (5)을 이용하여 다음의 추적오차모델을 구할

수 있다.

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & 0 \\ -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} 0 \\ \sin e_3 \\ 0 \end{bmatrix} v_r + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} u_B \quad (6)$$

윗식을 기준궤적 주위에서 선형화시켜, 다음의 선형 모델을 얻을 수 있다.

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_r & 0 \\ -\omega_r & 0 & v_r \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} u_B \quad (7)$$

윗식은 $\dot{e} = A_c e + B_c u_B$ 인 상태 공간 형태이다. 제어성 행렬 $[B_c \ A_c B_c \ A_c^2 B_c]$ 는 v_r 과 ω_r 이 0이 아닐 때 full rank를 갖고 이 때 제어가능하다. 이 경우에 smooth 정적 피드백으로 시스템을 안정화시키는 것이 가능하다 [8,9].

III. 이동로봇 예측제어기설계

3.1. 예측제어기 구성

궤적추적을 위한 예측제어기를 설계하기 위해 연속 시간 식(7)을 이산시간으로 변환해야 한다.

$$e(k+1) = A e(k) + B u_B(k) \quad (8)$$

여기서 $A \in R^n \times R^n$, $B \in R^n \times R^m$ 은 이산행렬이며, n 과 m 은 각각 상태변수의 개수와 입력의 개수를 나타낸다. 이산행렬 A , B 는 아래와 같다.

$$A = I + A_c T_s \quad B = B_c T_s \quad (9)$$

위에서 샘플링 시간 T_s 가 매우 작아야 의미가 있다. 식(8)로부터 입출력 예측모델을 구하면 다음과 같다.

$$E^*(k) = F e(k) + G U_B(k) \quad (10)$$

단, $E^*(k) = [e(k+1)k]^T \dots e(k+N)k]^T \in R^n \cdot N$,

$$F = [A^T \dots (A^N)^T]^T \in R^{n \cdot N \times R^n},$$

$$G = \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & 0 \\ AB & B & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N-1}B & A^{N-2}B & \dots & B \end{bmatrix} \in R^{n \cdot N \times R^m \cdot N},$$

$$U_B(k) = [u_B(k)^T \dots u_B(k+N-1)^T]^T \in R^{n \cdot N},$$

N 은 prediction horizon이다.

기준추적오차는 $1 \leq i \leq N$ 인 정수 i 에 대해서 다음과 같이 정의한다.

$$e_r(k+i) = A_r^i e(k) \quad (11)$$

위에서 A_r 은 기준모델 행렬이며 이에 따라 기준추적 오차가 감소하게 된다. 기준 추적오차를 벡터 형태로 나타내면,

$$E_r^*(k) = F_r e(k) \quad (12)$$

$$\text{단, } E_r^*(k) = [e_r(k+1)^T \dots e_r(k+N)^T]^T \in R^{n \cdot N},$$

$$F_r = [(A_r)^T \dots (A_r^N)^T]^T \in R^{n \cdot N \times R^n}$$

모델예측제어의 기본개념은, 어떤 시간 구간에서 기준추적오차와 실제 로봇의 예측계적오차와의 차이를 최소화하는 것이다. 이러한 모델예측제어는 다음 이차식의 최소화로 표현될 수 있다.

$$J(U_B) = (E_r^* - E^*)^T \bar{Q} (E_r^* - E^*) + U_B^T \bar{R} U_B \quad (13)$$

$$\text{단 } \bar{Q} = \begin{bmatrix} Q & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Q \end{bmatrix}, \quad \bar{R} = \begin{bmatrix} R & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R \end{bmatrix} \text{ 이고,}$$

$$\bar{Q} \in R^{n \cdot N \times R^n \cdot N}, \quad \bar{R} \in R^{m \cdot N \times R^m \cdot N}$$

의 형태이며, 각각 자세오차와 입력에 대한 가중치의 미를 갖는다.

식(13)의 $J(U_B)$ 를 U_B 에 대한 이차식으로 변환하면 아래와 같다.

$$J(U_B) = \frac{1}{2} U_B^T S U_B + H^T U_B \quad (14)$$

$$\text{단, } S = 2G^T \bar{Q} G + 2\bar{R}, \quad H^T = -2(E_r^* - F_e)^T \bar{Q} G, \text{ 제어}$$

입력 U_B 는 물리적으로 무한히 크거나 작을 수 없기 때문에 어떤 유한한 범위 내에서 존재하게 된다. 식(5)에서

$$\begin{bmatrix} v(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r(k) \cos e_3(k) \\ \omega_r(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{B1}(k) \\ u_{B2}(k) \end{bmatrix} \quad (15)$$

제어입력의 유한성 때문에 $1 \leq i \leq N$ 인 정수 i 에 대해 $-v_{MAX} \leq v(k+i) \leq v_{MAX}$, $-\omega_{MAX} \leq \omega(k+i) \leq \omega_{MAX}$ 가 성립하며 다음과 같이 세부적으로 표현 될 수 있다.

$$-u_{B1}(k+i) \leq -u_{B1\min}(i) = v_{MAX} + v_r(k+i) \cos e_3(k+i)$$

$$u_{B1}(k+i) \leq u_{B1\max}(i) = v_{MAX} - v_r(k+i) \cos e_3(k+i)$$

$$-u_{B2}(k+i) \leq -u_{B2\min}(i) = \omega_{MAX} + \omega_r(k+i)$$

$$u_{B2}(k+i) \leq u_{B2\max}(i) = \omega_{MAX} - \omega_r(k+i)$$

위의 부등식을 행렬-벡터 부등식으로 나타내면

$$M U_B \leq \gamma \quad (16)$$

단, $M \in R^{2m \cdot N \times R^m \cdot N}$, $\gamma \in R^{2m \cdot N}$. 따라서 위의 예측제어문제는 다음과 같은 quadratic programming 문제로 귀착된다.

$$\text{Minimize } J(U_B) = \frac{1}{2} U_B^T S U_B + H^T U_B$$

$$\text{subject to } M U_B \leq \gamma$$

매 샘플링시간마다 위 문제의 해를 Hildreth 방법[11]으로 구하고 U_B 의 첫 번째 요소인 $u_B(k)$ 를 이동로봇의 제어입력으로 사용하여 예측제어기를 구동한다. 그런데 위의 예측제어문제의 해는 기준모델 A_r 과 Q, R 에 대해서 결정된다. 본 논문에서 유전알고리즘을 이용하여 A_r, Q, R 에 대해서 최적의 제어성능을 이끌어 내고자 한다.

3.2. 유전 알고리즘에 의한 최적화

이동로봇 예측제어기에서 제어성능을 최대로 높이기 위해 기준모델행렬 A_r 요소들을 유전알고리즘으로

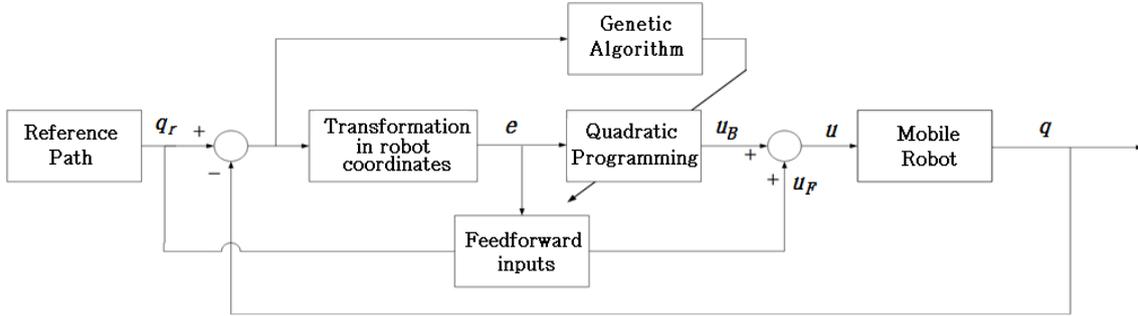


Fig. 3 Block diagram of the system

최적화한 연구가 있었으나, 이때에는 제어입력이 어떠한 범위 내에서만 존재한다는 사실을 고려하지 않고 예측제어를 미분 개념으로 간편하게 구한 구조였다[9]. 본 논문의 예측제어기는 실제적 제어입력이 어떠한 범위 내에서만 존재한다는 사실을 고려하여 구성되며 이때의 제어성능은 기준모델행렬 A_r 과 Q, R 의 요소들에 대해서 결정되며 최적제어 문제로 공식화될 수 있다. 그러나 이러한 문제는 매우 복잡한 비선형제어에 관한 것으로 일반적 최적제어이론으로 해결하기 어렵다[9]. 본 논문에서는 전역탐색알고리즘으로 널리 알려진 유전알고리즘을 사용하여, 이동로봇이 기준 궤적을 가장 잘 추적하게 하는 예측제어기를 구성한다.

유전 알고리즘은 자연선택과 자연 유전학에 근거한 병렬적이고 전역적인 최적화 알고리즘으로서 확률적인 방법과 개체간의 체계적인 정보교환을 통해 탐색공간을 조사해 나감으로써 주위환경에 가장 적합한 해를 찾아가는 최적화 기법중 하나이다. 유전 알고리즘은 “모든 생물은 주어진 다양한 환경에 적응함으로써 살아남는다.”는 Darwin의 적자생존이론을 기본개념으로 하여 1960년대 John Holland에 의해 발표되었으며, 자연 진화의 패러다임으로는 첫 번째로 개발되고 적용되어 왔다[12]. John Holland에 의해 기본적 개념 및 수학적 기초가 확립되었으며, 그 후 이미지 프로세싱, 시스템 식별, 퍼지 제어기의 설계 등 여러 분야에 적용되어 그 유효성을 입증하였다. 유전 알고리즘은 설계자가 원하는 방향에서 그 값이 증가하도록 적합도 함수를 결정한 후 단지 이 함수 값만을 계산하여 그 결과로부터 최적화를 행하므로 기존의 방법들과는 달리 목적함수에 대한 연속미분가능과 같은 제약조건이 없고 적합도 이외의 기

타 정보가 필요치 않아 실제 시스템에 비교적 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 유전 알고리즘은 기존의 방법들이 어떤 결정규칙에 의해 한 점만을 탐색하는 것과 달리 주어진 탐색 공간 내에서 해 집단을 만들어 여러 점들을 동시에 평가하고 결과적으로는 병렬연산을 행하므로 전역 해를 찾을 가능성이 높다. 그리고 유전 알고리즘은 근본적으로 결정론적 방법이 아닌 확률적 방법에 의해 탐색을 행하므로 지역 극소점에 빠질 가능성이 적다. 유전 알고리즘은 이진 스트링으로 코딩된 파라미터 공간에서 해 집단을 구성하여 이들을 모의 진화 시키므로 많은 점들을 동시에 다루게 되고 매 세대마다 다른 영역을 탐색하기 때문에 많은 지역적 극값을 탐색할 수 있고 결과적으로 전역 해로 수렴할 높은 가능성을 가지고 있다.

기준모델행렬 A_r 과 Q, R 의 성분들을 유전 알고리즘의 염색체 즉 탐색변수로 설정하고 그 값에 따라 기준궤적과 로봇 위치의 차이인 오차를 최소화하는 값을 구한다. 이 때 적합도 함수 f 는 식(17)과 같이 정의한다.

$$f = \sum [C_x(x_r - x)^2 + C_y(y_r - y)^2 + C_\theta(\theta_r - \theta)^2] \quad (17)$$

여기서 C_x, C_y, C_θ 는 가중치를 나타낸다.

초기의 로봇 위치가 기준궤적에 빠르게 수렴하도록 C_x 의 값을 높게 설정한다. 이동로봇은 y 축으로의 움직임이 힘들지만 θ 에 대한 움직임은 쉬운 편이기 때문에 C_y 값을 높게 설정하는 반면 C_θ 의 값은 작게 설정한다. 제어시스템의 전체적인 블록선도는 그림 3과 같다.

IV. 모의실험

본 논문의 모의실험은 가상의 기준 로봇과 실제 구동 로봇으로 구성하였으며 모의실험에 사용한 기구적 변수는 $m = 0.6kg$, $R = 3.75cm$, $r = 2.5cm$ 이다. 실제 구동 로봇의 초기 위치는 $[x \ y \ \theta] = [1.1 \ 0.7 \ \pi/4]$ 이고, 가상의 기준 로봇은 아래와 같은 궤적을 따라 움직인다.

$$\begin{aligned} x_r &= 1.1 + 0.7 \sin\left(\frac{2\pi t}{30}\right) \\ y_r &= 0.9 + 0.7 \sin\left(\frac{4\pi t}{30}\right) \end{aligned}$$

여기서 시간 t 는 0초에서 30초이다. 선속도 최고치는 $v_{MAX} = 0.5m/s$ 이고 각속도 최고치는 $\omega_{MAX} = 13rad/s$ 이다. 예측제어기의 성능은 A_r, Q, R 의해 지배되며 A_r, Q, R 은 대각행렬로 설정한다.

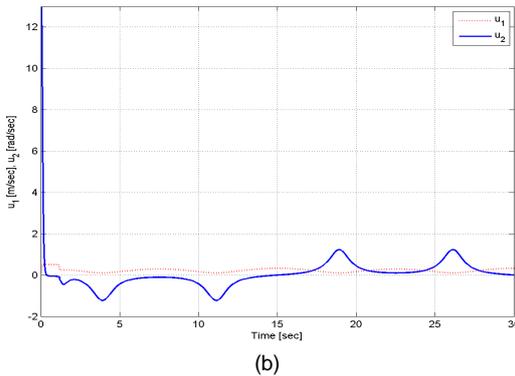
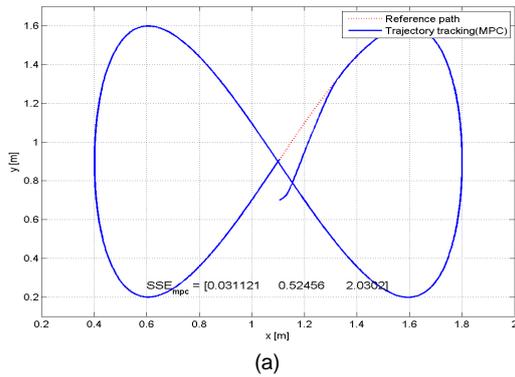


Fig. 4 Predictive controller with unoptimized parameters (a) Trajectory tracking performance (b) Control inputs

그림 4는 본 논문의 예측제어기 성능을 평가하기 위하여 예측제어기 파라미터를 유전알고리즘을 사용하지 않고, 기존의 방법[8, 9, 12]에서 제시한 임의의 $A_r = 0.65I_{3 \times 3}$, $Q = diag(4, 40, 0.1)$, $R = 10^{-3}I_{2 \times 2}$ 로 설정하여 예측제어기를 구동하였을 때의 결과이다.

그림 4(a)에서 로봇이 기준궤적을 추적함을 보여주고 있다. 그림 4(b)에서 각 제어입력이 주어진 범위 내에 존재함을 확인할 수 있다. 로봇 위치 성분들의 sum of squared error (SSE)로 예측제어기의 성능을 정량적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SSE_{MPC} &= \left[\sum (x_r - x)^2 \sum (y_r - y)^2 \sum (\theta_r - \theta)^2 \right] \\ &= [0.031121 \ 0.52456 \ 2.0302] \end{aligned}$$

본 연구에서 기준모델 A_r 과 가중치 행렬인 Q, R 의 값을 유전알고리즘을 통해 최적화시키기 위하여 유전알고리즘의 학습 조건과 오차의 가중치 설정 값을 다음과 같이 설정하였다. 유전알고리즘의 세대 수는 200, 집단의 개체 수 200, 교차율 0.8, 돌연변이율 0.2로 지정하였으며, 학습을 위하여 오차의 가중치 값은 $[C_x \ C_y \ C_\theta] = [300, 150, 10]$ 으로 설정하였다.

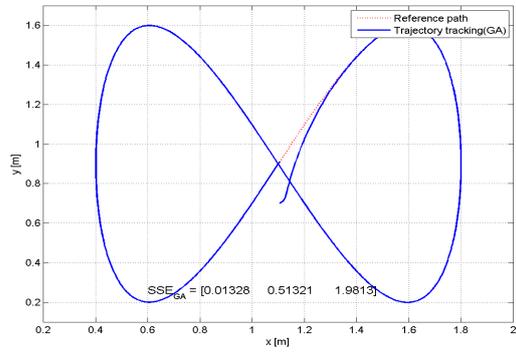
다음은 유전알고리즘을 통해 최적화 수렴된 기준모델 A_r 과 가중치 행렬인 Q, R 의 값을 나타내었다. 이때의 예측제어기 성능은 그림 5와 같다.

$$A_r = diag(0.0129 \ 0.3299 \ 0.2734)$$

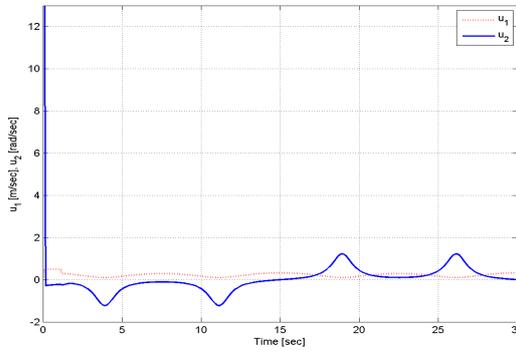
$$Q = diag(7.9872 \ 53.8743 \ 0.1280)$$

$$R = diag(0.0018 \ 0.0005)$$

그림 5(a)에서 로봇이 기준궤적을 그림 4(a)에서 보다 빠르게 잘 추적함을 보여주고 있다. 그리고 $SSE_{GA} = [0.01328 \ 0.51321 \ 1.9813]$ 이며, 이전보다 SSE가 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 유전알고리즘으로 파라미터들을 동조하였기 때문이다. 그림 5(b)에서 그림 4(b)에서와 같이 각 제어입력이 주어진 범위 내에 존재함을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5 Predictive controller with optimized parameters
(a) Trajectory tracking performance (b) Control inputs

V. 결론

이동로봇 예측제어기 성능이 관련 제어 파라미터들에 의해 지배되는데 이러한 제어 파라미터들을 실험적으로 결정하는데 많은 어려움이 있었다. 본 논문에서 입력제한조건을 갖는 이동로봇 예측제어기의 주된 제어 파라미터로 기준모델 행렬 A_r 과 가중치 행렬 Q, R 을 유전알고리즘으로 튜닝하여 궤적추종 오차를 최소화하였다.

입력 제한조건을 반영하기 위해서 각 샘플링 타임마다 quadratic programming을 Hildreth 방법으로 풀어 제어량을 계산하고 그 첫 번째 제어벡터를 이동로봇의 직선속도와 회전각속도 명령으로 출력한다. 그리고 이러한 값들은 이동로봇 바퀴의 속도제어시스템의 속도명령으로 입력되고 제어된다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해

본 논문에서 제안한 제어방법의 성능을 확인한 결과 기존의 방법보다 우수함을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University

REFERENCES

- [1] K. M. Lynch and F. C. Park, *Modern Robotics: Mechanics, Planning and Control*, New York, NY: Cambridge University Press, 2017.
- [2] R. S. Ortigoza and J. R. Sanchez, "Trajectory Tracking Control for a Differential Drive Wheeled Mobile Robot Considering the Dynamics Related to the Actuators and Power Stage," *IEEE Latin America Trans*, vol. 14, no. 2, pp. 657-664, Feb 2016.
- [3] K. Shojaei and A. M. Shahri, "Output feedback tracking control of uncertain non-holonomic wheeled mobile robots: a dynamic surface control approach," *IET Control Theory and Applications*, vol. 6, no. 2, pp. 216-228, Jan 2012.
- [4] Y. Wang, S. Wang, R. Tan, and Y. Jiang, "Motion control of a wheeled mobile robot using digital acceleration control method," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 9, no. 1, pp. 387-396, Jan 2013.
- [5] E. F. Camacho and C. Bordons, *Model Predictive Control*, London, UK: Springer-Verlag, 2007.
- [6] D. Gu and H. Hu, "Receding horizon tracking control of wheeled mobile robots," *IEEE Trans on Control System Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 743-749, July 2006.
- [7] S. Akiba, T. Zanma, and M. Ishida, "Optimal tracking control of two-wheeled mobile robots based on model predictive control," in *Proceeding of the 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Nagaoka, Niigata: Japan, pp. 454-459, May 2010.
- [8] G. Klancar and I. skrjanc, "Tracking-error model-based predictive control for mobile robots in real time," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 6, pp. 460-469, June, 2007.

- [9] H. S. Son, J. H. Park and Y. K. Choi, "Predictive control for mobile robots using genetic algorithms," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 698-707, Apr. 2017.
- [10] C. T. Lin and C. S. G. Lee, *Neural Fuzzy Systems*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.
- [11] L. Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*, London: UK, Springer Verlag, 2009.
- [12] J. H. Park and Y. K. Choi, "Control gain optimization for mobile robots using neural networks and genetic algorithms," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 698-707, Apr. 2016.



최영규(Young-Kiu Choi)

1980년 2월 서울대학교 전기공학과 공학사
1982년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 공학석사
1987년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사
1986년 ~ 현재 부산대학교 전기공학과 교수
※ 관심분야: 로봇제어, 지능제어, 신경회로망 등



박진현(Jin-Hyun Park)

1992년 2월 부산대학교 전기공학과 공학사
1994년 2월 부산대학교 대학원 전기공학과 공학석사
1997년 2월 부산대학교 대학원 전기공학과 공학박사
1997년 3월 ~ 1999년 2월 부산정보대학 전기전자계열 전임강사
1996년 7월 ~ 1997년 8월 Dept. of System Engineering, Arkansas Univ. at Little Rock, Visiting Scholar
1999년 3월 ~ 현재 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수
※ 관심분야: 지능제어, 로보틱스, 제어계측