JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 22, No. 4: 602~610, Apr. 2018

일반제한조건의 이동로봇예측제어기 최적화

박진현[1] · 최영규[2*]

Optimization of Mobile Robot Predictive Controllers Under General Constraints

Jin-Hyun Park[1] · Young-Kiu Choi[2*]

[1]Department of Mechatronics Eng., Kyeongnam National Univ. of Science and Technology, Jinju 52725, Korea
[2*]Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Pusan 46241, Korea

요 약

모델예측제어는 기준 궤적이 알려져 있을 경우 제어시스템의 예측모델을 이용하여 현재 제어상태 및 미래오차 등을 예측하여 현재 제어입력을 최적화시킬 수 있는 효과적인 방법이다. 모바일로봇의 제어입력이 물리적으로 무한히 큰 값을 가질 수 없으므로 제한조건을 갖는 예측제어기 설계가 고려되어야 한다. 또한 예측제어기의 제어성능을 결정하는 기준모델행렬 A_r과 가중치행렬 Q, R들이 임의로 설정됨에 따라 성능이 최적화되지 못한 부분도 설계에 고려되어야 한다. 본 연구에서는 제한조건을 갖는 quadratic programming 문제로 변형하여 모바일로봇의 예측제어기를 구성하고, 모바일 로봇의 제어성능을 결정하는 예측제어기의 제어파라미터인 기준모델행렬 A_r과 가중치행렬 Q, R에 대하여 유전알고리즘을 적용하여 제어파라미터들을 최적화함으로써 제어성능을 높일 수 있었다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 본 연구에서 제안한 제어방법이 기존의 예측제어기의 추종성능보다 뛰어남을 확인하고자한다.

ABSTRACT

The model predictive control is an effective method to optimize the current control input that predicts the current control state and the future error using the predictive model of the control system when the reference trajectory is known. Since the control input can not have a physically infinitely large value, a predictive controller design with constraints should be considered. In addition, the reference model A_r and the weight matrices Q, R that determine the control performance of the predictive controller are not optimized as arbitrarily designated should be considered in the controller design. In this study, we construct a predictive controller of a mobile robot by transforming it into a quadratic programming problem with constraints, The control performance of the mobile robot can be improved by optimizing the control parameters of the predictive controller that determines the control performance of the mobile robot using genetic algorithm. 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 5 January 2018, **Revised** 15 January 2018, **Accepted** 8 February 2018

*** Corresponding Author** Young-Kiu Choi(E-mail:ykichoi@pusan.ac.kr, Tel:+82-51-510-2371)
Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Pusan 46241, Korea

Open Access http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.4.602 pISSN:2234-4772

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/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

과거에는 로봇공학의 발전으로 산업용 로봇의 기구학과 궤적계획의 최적화 문제에 많은 연구가 진행되어 왔다[1-2]. 현재는 상품의 대량생산뿐만 아니라 소량의 다품종 생산이 요구받고 있으며, 특히 고정된 매니퓰레이터에서의 기구학 및 궤적계획에 한정되지 않고, 시각 및 센서 시스템, 기구학설계 및 동역학 제어방법 등 자율성이 높은 모바일 로봇에 대한 연구에 집중되고 있다. 따라서 모바일로봇은 생산성 증대뿐만 아니라 인간을 대체할 수 있는 이동성과 자율성으로 인해 유연한 생산 시스템에 매우 적합하다[3].

모델예측제어(MPC:model predict control)는 기준 궤적이 알려져 있을 경우 제어시스템의 예측모델을 이용하여 현재 제어상태 및 미래오차 등을 예측하여 현재 제어입력을 최적화시킬 수 있는 효과적인 방법이다. 그러나 유한한 예측구간에서 미래 오차를 최소화시키는 제어입력들을 구하기 위해 매 샘플링마다 같은 작업을 반복하는 단점을 가지고 있다. 따라서 시정수가 매우 큰 시스템에는 적합하나, 모바일 로봇과 같은 응답이 빠른 시스템에 적용하기에는 한계점을 가지고 있다[4]. 현재는 제어시스템을 구성하는 마이컴 및 컴퓨터 CPU와 GPU의 발달로 복잡한 행렬 연산처리가 가능하여 실시간 처리가 필요한 모바일 로봇 및 제어시스템에 예측제어방법을 적용한 연구가 많이 진행되었다[5-9]. 그러나 모바일로봇의 제어입력이 물리적으로 무한히 큰 값을 가질 수 없으므로 제어입력에 대한 제한조건을 고려한 예측제어기의 설계가 고려되어야 한다. 또한 예측제어기의 제어성능을 결정하는 기준모델 A_r과 가중치행렬인 Q, R 들이 임의로 지정됨에 따라 성능이 최적화되지 못한 부분도 설계에 고려되어야 한다[7]. 제어 파라미터 중 기준모델 A_r과 관련된 파라미터를 최적화시킨 연구는 있으나 입력에 제한조건을 고려하여 예측제어기를 설계하지는 않았다[8].

본 연구에서 최대 선속도(v_{MAX}), 최대 선가속도(a_{MAX}), 최대 각속도(ω_{MAX}), 최대 각가속도(α_{MAX})의 제한조건을 갖는 quadratic programming 문제로 변형하여 모바일로봇의 예측제어기를 구성하였다. 예측제어기의 quadratic programming 문제는 Hildreth 방법[9]을 사용하여 해결하였다. 그리고 모바일 로봇의 제어성능을 결정하는 예측제어기의 제어파라미터인 기준모델행렬 A_r과 가중치행렬 Q, R 에 대하여 최적화 기능이 뛰어난 유전알고리즘을 적용하여 예측제어기의 제어파라미터들을 최적화함으로써 제어성능을 높일 수 있었다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 본 연구에서 제안한 제어방법이 기존의 예측제어기의 추종성능보다 뛰어남을 확인할 수 있었다.

Ⅱ. 모바일로봇의 기구학 및 선형추적오차

본 연구에서 그림 1은 차동 구동형 모바일로봇 모델과 모바일로봇의 기준로봇과 실제로봇의 상태추적오차를 정의하였다. 먼저 모바일로봇은 기준좌표계 $X_I - Y_I$에 대하여 모바일로봇의 무게중심 위치좌표 x, y와 모바일로봇의 진행방향에 대한 각도를 θ로 나타낸다. 식(1)은 모바일로봇의 자세 및 각도로 표시하였다[7,8].

$$q = [x \quad y \quad \theta]^T \tag{1}$$

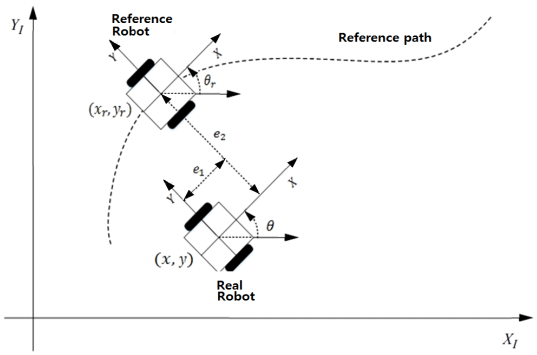

Fig. 1 Robot following error transformation

모바일로봇의 선속도 및 각속도는 식(1)을 미분함으로써 식(2)와 같이 구할 수 있다.

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

단 v와 ω는 각각 모바일로봇의 선속도와 각속도를 나타낸다.

그림 1에서 기준로봇과 실제로봇의 상태추적오차 $e(t) = [e_1(t)\ e_2(t)\ e_3(t)]^T$는 식(3)과 같이 나타낼 수 있

다[8,9].

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

여기서 q_r은 기준로봇의 자세이고, q는 실제로봇의 자세이다.

일반적으로 그림 1에서처럼 실제로봇은 기준경로 추적오차를 가지고 있다. 기준로봇은 기준경로 위를 이상적으로 움직이는 가상의 로봇이며, 실제로봇은 기준경로를 추적하는 로봇을 의미한다. 따라서 기준로봇과 실제로봇과의 상태추적오차는 존재하며, 이러한 오차 값을 줄이기 위해 다양한 제어알고리즘들을 사용하여 기준경로추적 오차가 줄여야 한다.

식(2)와 (3)으로부터 기준경로오차의 미분방정식을 구할 수 있다[7,8].

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

여기서 $u=[v\ \omega]^T$는 선속도와 각속도 입력벡터이다.

로봇의 속도 입력 벡터 u는 피드포워드 입력 u_F와 피드백 입력 u_B의 합으로 식(5)와 같다.

$$u=u_F+u_B \tag{5}$$

여기서 피드포워드 입력은 기준입력의 비선형변환 형태인 $u_F=[v_r\cos e_3\ \ \omega_r]^T$이며, 피드백 입력은 $u_B=[u_{B_1}\ u_{B_2}]^T$로 나타낸다[7,8].

식(4)와 (5)를 이용하여 기준궤적 주위에서 선형화시켜 선형 추적오차모델을 얻을 수 있다[7,8].

$$\begin{aligned}\dot{e}&=\begin{bmatrix}0 & \omega_r & 0\\ -\omega_r & 0 & v_r\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}e+\begin{bmatrix}-1 & 0\\ 0 & 0\\ 0 & -1\end{bmatrix}u_B\\ \dot{e}&=A_c e+B_c u_B\end{aligned} \tag{6}$$

식(6)은 상태 공간 형태이며, 제어성 행렬 $[B_c\ A_cB_c\ A_c^2B_c]$는 v_r과 ω_r이 0이 아닐 경우 full rank를 가지면 가제어성을 갖는다. 그러므로 smooth 정적 피드백으로 시스템을 안정화시킬 수 있다[7,8].

Ⅲ. 유전알고리즘을 사용한 예측제어기설계

3.1. 제한조건을 갖는 예측제어기 설계

주어진 모바일로봇의 예측제어기 설계를 위해 연속시간의 오차함수 식(6)을 식(7)과 같이 이산시간 영역으로 변환하여 사용하였다[7~8,10].

$$e(k+1)=A\,e(k)+Bu_B(k) \tag{7}$$

여기서 이산행렬 $A\in R^n\times R^n$, $B\in R^n\times R^m$이며, n과 m은 각각 상태변수의 개수와 입력의 개수를 나타낸다. 이산행렬 $A=I+A_cT_s$, $B=B_cT_s$이다. 위의 이산행렬 식 안에 있는 샘플링 시간 T_s가 매우 짧아야 예측제어기가 매우 효율적으로 동작한다.

또한 제어입력 $u_B(k)$는 식(8)과 같이 정의하며, 제어입력과 제어입력 변화분의 최대 최소 제한 조건을 적용하여 사용한다.

$$u_B(k)=u_B(k-1)+\Delta u_B(k) \tag{8}$$

따라서 식(7)과 식(8)의 이산영역에서의 오차함수로부터 입출력 예측모델을 구하면 식(9)와 같다.

$$E^*(k)=G\Delta U_B(k)+Fe(k)+\tilde{g} \tag{9}$$

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

$$G=\begin{bmatrix}B & 0 & \cdots 0\\ (A+I)B & B & \cdots 0\\ \vdots & \vdots & \ddots\ \vdots\\ (\sum_{i=0}^{N-1}A^i)B & (\sum_{i=0}^{N-2}A^i)B\cdots & B\end{bmatrix}\in R^{n\cdot N}\times R^{m\cdot N},$$

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

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

$\tilde{g}=[B^T\cdots\ (\sum_{i=0}^{N-1}A^i)B^T]^Tu_B(k-1)\in R^{n\cdot N}\times R^n$,

N은 prediction horizon이다.

$1\le i\le N$ 인 정수 i에 대한 추적궤도에 대한 기준추

적오차 $e_r(k+i)$은 식(10)과 같이 정의하였다. 기준모델 행렬(reference model matrix) A_r에 따라 기준추적오차가 감소함을 의미한다.

$$e_r(k+i) = A_r^i e(k) \tag{10}$$

모바일 로봇의 기준 추적오차 벡터를 식(11)과 같이 정의하면

$$E_r^*(k) = [e_r(k+1)^T \cdots e_r(k+N)^T]^T \tag{11}$$

단, $E_r^*(k) \in R^{n \cdot N}$이며, 이를 식(12)와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$E_r^*(k) = F_r e(k) \tag{12}$$

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

일반적인 모델예측제어는 임의의 구간에서 기준추적오차와 실제 로봇의 예측궤적오차와의 차이를 최소화하는 방법으로 다음과 같이 식(13)의 이차 비용함수를 최소화하도록 설계하는 것이다.

$$J(\Delta U_B) = (E_r^* - E^*)^T \overline{Q} (E_r^* - E^*) + \Delta U_B^T \overline{R} \Delta U_B \tag{13}$$

단, $\overline{Q} = \begin{bmatrix} Q & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q \end{bmatrix}$, $\overline{R} = \begin{bmatrix} R & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R \end{bmatrix}$이고, $\overline{Q} \in R^{n \cdot N} \times R^{n \cdot N}$, $\overline{R} \in R^{m \cdot N} \times R^{m \cdot N}$ 이며, 각각 자세오차와 입력변화분에 대한 가중치 벡터를 의미한다.

식(9)를 사용하여 식(13)의 $J(\Delta U_B)$를 ΔU_B에 대하여 변환하면 식(14)와 같다.

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

단, $S = 2G^T \overline{Q} G + 2\overline{R}$, $H^T = -2(E_r^* - Fe - \tilde{g})^T \overline{Q} G$이다.

실제 모바일로봇에 적용 시 제어입력 U_B와 제어입력 변화분 ΔU_B는 물리적인 제약 조건을 가지므로 어떠한 유한한 범위 내에서 존재하도록 설정하여야 하며, 이러한 제약조건에 맞는 제어기를 설계하여야 한다.

제어입력 U_B와 제어입력 변화분 ΔU_B에 대한 제약조건은 아래 식(15-a), (15-b)와 같이 설정하다면

$$\begin{aligned} &U_{\min} \le U_B(k) \le U_{\max} \\ &U_{\min} \le \Delta U_B(k) + U_B(k-1) \le U_{\max} \end{aligned} \tag{15-a}$$

$$\Delta U_{\min} \le \Delta U_B(k) \le \Delta U_{\max} \tag{15-b}$$

식(15-a), (15-b)는 식(16)과 같은 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -I \\ I \\ -I \\ I \end{bmatrix} \Delta U_B(k) \le \begin{bmatrix} -U_{\min} + U_B(k-1) \\ U_{\max} - U_B(k-1) \\ -\Delta U_{\min} \\ \Delta U_{\max} \end{bmatrix} \tag{16}$$

위의 부등식을 간단한 행렬 벡터로 나타내면 식(17)과 같다.

$$M \Delta U_B(k) \le \gamma \tag{17}$$

단, $M \in R^{4m \cdot N} \times R^{m \cdot N}$, $\gamma \in R^{4m \cdot N}$.

예측제어문제는 아래와 같은 제한조건을 갖는 quadratic programming 문제로 치환될 수 있다.

$$\text{Minimize} \ \ J(\Delta U_B) = \frac{1}{2} \Delta U_B^T S \Delta U_B + H^T \Delta U_B$$
$$\text{subject to} \ M \Delta U_B \le \gamma$$

그러므로 위의 quadratic programming 문제는 매 샘플링 주기마다 Hildreth 방법[10]을 사용하여 해를 구하고, U_B의 첫 번째 요소 값인 $u_B(k)$를 이동로봇의 제어입력으로 사용하여 예측제어기를 구성한다. 그러나 모바일 로봇의 제어성능을 결정하는 여러 제어 파라미터들인 기준모델행렬 A_r과 Q, R에 대하여 임의로 지정함에 따라 성능이 최적화되지 못하는 문제가 발생한다. 본 논문에서 이동로봇의 궤적추종제어에 최적화 기능이 뛰어난 유전알고리즘을 적용하여 최적의 제어성능을 이끌어 내고자 한다.

3.2. 유전 알고리즘에 의한 파라미터 최적화

유전 알고리즘은 자연계의 생물 유전학에 근거한 병렬탐색 알고리즘으로 전역적인 최적화 탐색 알고리즘이다. 자연계 생물의 유전자 염색체를 통하여 개체간의 체계적인 정보교환과 세대 간의 진화를 통해 주위환경에 가장 적합한 해를 선택하는 최적화 기법중 하나이다[8,10]. 따라서 유전 알고리즘은 Darwin의 적자생존이론을 기반으로 60년대 John Holland에 의해 처음 발표되었으며, 복재, 교배 돌연변이 과정을 거치는 자연 진화의 과정을 그대로 따르고 있다[8,10]. 유전자알고리즘은 적용은 최적화 기법으로써 발전과 더불어 이미지 프로세싱, 시스템 식별, 제어기 설계 등의 많은 분야에서 발전 적용되어 왔다. 특히 유전 알고리즘은 기존의 다른 최적화 방법들과는 달리 목적함수에 대한 연속성과 미분가능 등의 제약조건이 없으며, 기타 부수의 정보가 필요치 않아 여러 시스템에 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가진다[8,10].

일반적인 예측제어기에서는 모바일 로봇의 제어성능을 결정하는 예측제어기의 여러 제어 파라미터들인 A_r, Q, R에 대하여 임의로 선택함으로써 제어성능이 최적화되지 못하는 문제가 나타난다. 따라서 제어성능을 최적화시키기 위해 본 연구와 같이 유전알고리즘을 사용하여 제어 파라미터들을 최적화한 연구가 있었으나, 실제 제어시스템에서 존재하는 제어입력과 제어입력 변화분의 제한조건을 고려하지 않고 단순히 제어성능만을 고려한 연구였다[8]. 그러므로 본 연구에서는 예측제어기의 실제적 제어입력과 제어입력 변화분의 범위를 고려하여 예측제어기를 구성되고, 기준모델행렬 A_r과 가중치행렬 Q, R의 요소들은 전역탐색알고리즘으로 알려진 유전알고리즘을 사용하여 최적의 파라미터들을 선정하는 최적제어 문제로 해결하고자 한다.

예측제어기의 기준모델행렬 A_r과 가중치행렬 Q, R의 파라미터 성분들을 유전 알고리즘의 최적화변수로 설정하고, 기준궤적 및 로봇의 위치 및 각도오차 값들을 최적화하도록 하였다. 유전알고리즘의 적합도 함수 f는 식(18)과 같이 정의한다.

$$f = \sum [C_x (x_r - x)^2 + C_y (y_r - y)^2 + C_\theta (\theta_r - \theta)^2] \quad (18)$$

여기서 C_x, C_y, C_θ는 적합도 요소에 대한 가중치를 나타낸다.

초기의 모바일 로봇의 위치가 기준궤적에 빠르게 수렴하도록 위치 가중치인 C_x, C_y 값을 높게 설정하고, C_θ의 값은 작게 설정한다. 전체 제어시스템의 블록선도는 그림 2와 같다.

Ⅳ. 모의실험

실제 모바일로봇에 적용 시 제어입력 U_B와 제어입력 변화분 ΔU_B는 물리적인 제약 조건을 가지므로 어떠한 유한한 범위 내에서 존재하도록 설정하여야 한다. 식(5)로부터 식(19)와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r(t)\cos e_3(t) \\ \omega_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{B1}(t) \\ u_{B2}(t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

제어입력 U_B는 식(8)과 같이 제어입력 변화분 ΔU_B로 표현되므로, 제어입력 변화분 ΔU_B의 제약조건으로 $1 \le i \le N$ 인 정수 i에 대해 $-v_{MAX} \le v(k+i) \le v_{MAX}$, $-\omega_{MAX} \le \omega(k+i) \le \omega_{MAX}$가 주어질 경우 다음 식(20)과 같이 표현될 수 있다.

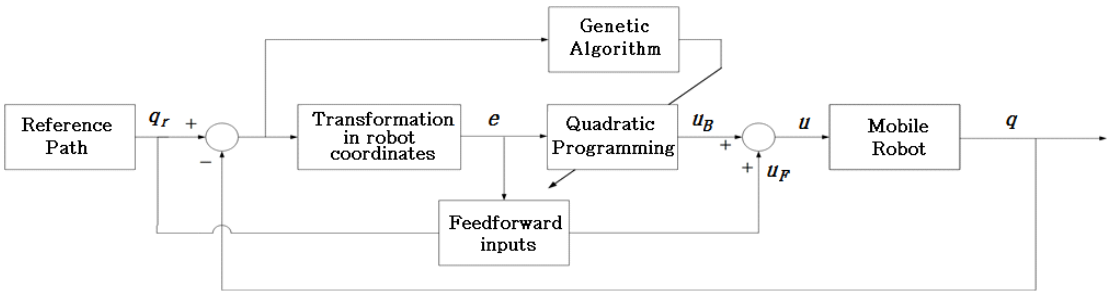

Fig. 2 Block diagram of the system

$$
\begin{aligned}
-\Delta u_{B1}(k+i) &\le -u_{B1\min}(i)+u_{B1}(k-1+i)\\
&= v_{MAX}+v_r(k+i)\cos e_3(k+i)\\
&\quad +u_{B1}(k-1+i)\\
\Delta u_{B1}(k+i) &\le u_{B1\max}(i)-u_{B1}(k-1+i)\\
&= v_{MAX}-v_r(k+i)\cos e_3(k+i)\\
&\quad -u_{B1}(k-1+i)\\
-\Delta u_{B2}(k+i) &\le -u_{B2\min}(i)+u_{B2}(k-1+i)\\
&= \omega_{MAX}+\omega_r(k+i)+u_{B2}(k-1+i)\\
\Delta u_{B2}(k+i) &\le u_{B2\max}(i)-u_{B2}(k-1+i)\\
&= \omega_{MAX}-\omega_r(k+i)-u_{B2}(k-1+i)
\end{aligned}
\tag{20}
$$

또한 식(19)로부터 아래의 수식 (21)과 같이 유도할 수 있다.

$$
\begin{bmatrix}\dot{v}(t)\\ \dot{\omega}(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a(t)\\ \alpha(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_F(t)\\ \alpha_F(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dot{u}_{B1}(t)\\ \dot{u}_{B2}(t)\end{bmatrix} \tag{21}
$$

단 $a(t)$, $\alpha(t)$는 모바일로봇의 가속도와 각가속도를 나타내며, $a_F(t)=\dot{v}_r(t)\cos e_3(t)+v_r(t)\omega(t)\sin e_3(t)$, $\alpha_F=\dot{\omega}_r(t)$이다. 식(21)을 이산시간시스템으로 근사 유도하면 아래와 같이 유도된다.

$$
\begin{bmatrix}a(k)\\ \alpha(k)\end{bmatrix}\simeq\begin{bmatrix}a_F(k)\\ \alpha_F(k)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\Delta\dot{u}_{B1}(k)/T_s\\ \Delta\dot{u}_{B2}(k)/T_s\end{bmatrix} \tag{22}
$$

여기서 T_s는 샘플링 시간이다.

그러므로 제어입력 변화분 ΔU_B의 제약조건으로 $1\le i\le N$ 인 정수 i에 대해 $-a_{MAX}\le a(k+i)\le a_{MAX}$, $-\alpha_{MAX}\le\alpha(k+i)\le\alpha_{MAX}$가 주어질 경우 식(23)과 같이 표현된다.

$$
\begin{aligned}
-\Delta u_{B1}(k+i) &\le -\Delta u_{B1\min}(i)=(a_{MAX}+a_F(k+i))T_s\\
\Delta u_{B1}(k+i) &\le \Delta u_{B1\max}(i)=(a_{MAX}-a_F(k+i))T_s\\
-\Delta u_{B2}(k+i) &\le -\Delta u_{B2\min}(i)=(\alpha_{MAX}+\alpha_F(k+i))T_s\\
\Delta u_{B2}(k+i) &\le \Delta u_{B2\max}(i)=(\alpha_{MAX}-\alpha_F(k+i))T_s
\end{aligned}
\tag{23}
$$

그러므로 선속도 및 각속도 제약조건 v_{MAX}, ω_{MAX}를 고려한 제어입력 ΔU_B의 행렬 부등식 (20)과 선가속도 및 각가속도 제약조건 a_{MAX}, α_{MAX}를 고려한 행렬 부등식 (23)은 앞의 식 (16)과 같음을 알 수 있다. 따라서 예측제어문제는 제한조건을 갖는 quadratic programming 문제로 변환될 수 있다.

본 논문의 모의실험에 사용된 모바일 로봇의 기구학적 변수는 $m=0.6kg$, $R=3.75cm$, $r=2.5cm$ 이다. 실제 구동 로봇의 초기 위치는 $[x\ y\ \theta]^T=[1.1\ \ 0.7\ \ \pi/4]^T$이고, 가상의 기준 로봇은 식(24)와 같은 궤적으로 설정하여 실제 로봇이 추적하도록 하였다.

$$
\begin{aligned}
x_r &= 1.1+0.7\sin(\frac{2\pi t}{30})\\
y_r &= 0.9+0.7\sin(\frac{4\pi t}{30})
\end{aligned}
\tag{24}
$$

여기서 시간 t는 시간을 나타내며, 최고 선속도와 가속도는 $v_{MAX}=0.5m/s$, $a_{MAX}=3m/s^2$이고, 최고 각속도와 각가속는 $\omega_{MAX}=13rad/s$, $\alpha_{MAX}=80rad/s^2$ 이다.

본 연구의 예측제어기 성능을 평가하기 위하여 모바일 로봇의 제어성능을 결정하는 기준모델행렬 A_r과 가중치 Q, R 에 대하여 $A_r=0.65I_{3\times3}$, $Q=diag(4,40,0.1)$, $R=10^{-3}I_{2\times2}$로 임의로 설정하여 사용한 방법[7,8,10]과 본 연구에서 제안한 유전알고리즘을 이용하여 최적의 제어 파라미터를 추정한 후 적용한 제어성능을 평가를 하였다.

그림 3(a)는 예측제어기의 제어파라미터들을 임의로 설정하여 추적성능을 나타내었다. 모바일 로봇은 임의의 제어 파라미터에 대해서도 예측제어기가 갖는 기본적 성능에 의해 기준궤적을 추적함을 보여주고 있다. 그러나 초기에 모바일 로봇의 위치 및 각도오차가 기준궤적에 비하여 클 경우, 제어입력 값에 진동이 발생하여 제어성능에 많은 영향을 끼친다. 이는 제어 파라미터들이 최적의 값을 갖지 못해 발생하는 것임을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 그림 3(b)는 각 제어입력 및 제어입력 변화분이 주어진 범위 내에 있음을 보여준다. 임의로 설정된 파라미터에 의해 모바일 로봇의 위치 및 각도 성분들의 sum of squared error (SSE)로 예측제어기의 성능을 정량적으로 표시하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
SSE_{MPC} &= [\textstyle\sum(x_r-x)^2\ \ \sum(y_r-y)^2\ \ \sum(\theta_r-\theta)^2]\\
&= [0.046172\ \ 0.974104\ \ 15.30074]
\end{aligned}
$$

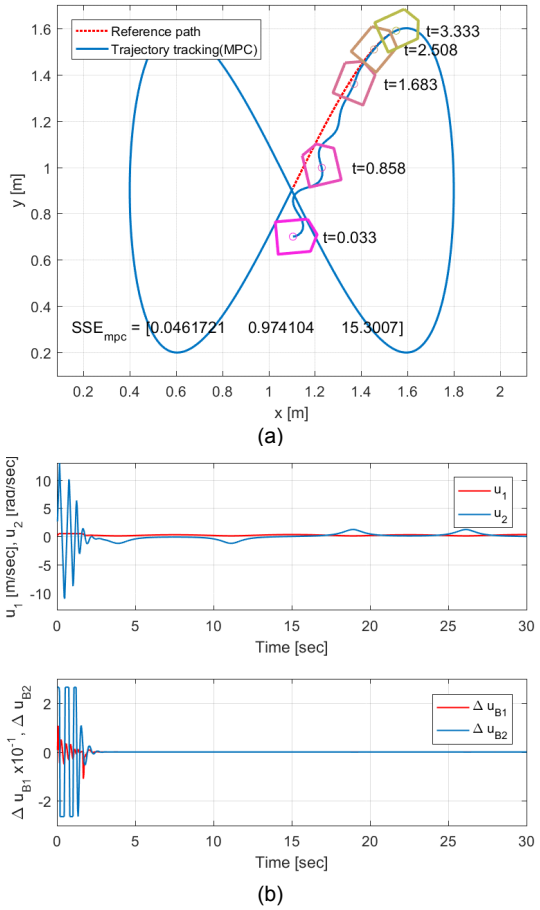

Fig. 3 Predictive controller with unoptimized parameters (a) Trajectory tracking performance (b) Control inputs and variations

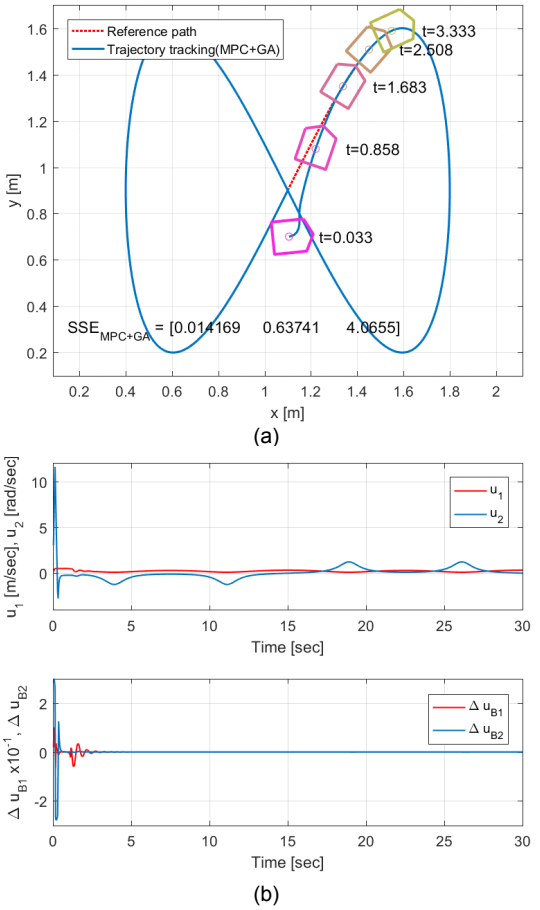

Fig. 4 Predictive controller with optimized parameters (a) Trajectory tracking performance (b) Control inputs and variations

본 연구에서 예측제어기 제어 파라미터 A_r과 가중치 행렬인 Q, R의 값을 최적화하기 위해 유전알고리즘의 학습 조건과 오차의 가중치 설정 값은 다음과 같이 설정하였다. 유전알고리즘의 집단의 개체 수 40, 교차율 0.8, 돌연변이율 0.2로 설정하였으며, 세대 수는 40으로 하였다. 학습을 위한 적합도 함수 식(18)의 가중치 값은 $[C_x \;\; C_y \;\; C_\theta] = [200, 200, 10]$으로 설정하였다.

유전알고리즘을 통해 최적화 수렴된 기준모델 A_r과 가중치행렬인 Q, R의 값은 아래와 같다.

$$A_r = diag(0.00361 \quad 0.4131 \; 0.8718)$$

$$Q = diag(0.08374 \; 11.0710 \; 0.17417)$$

$$R = diag(0.00196 \quad 0.000003)$$

그림 4(a)는 유전알고리즘을 통해 최적화된 제어파라미들을 사용한 예측제어기 성능을 나타내었다. 모바일로봇이 기준궤적에 대하여 임의의 파라미터를 설정한 예측제어기에 비하여 매우 빠르게 추적함을 보여준다. 또한 초기에 모바일 로봇의 위치 및 각도오차가 기

준 궤적에 비하여 클 경우에도 최적의 성능을 나타내었다. 또한 그림 4(b)는 각 제어입력 및 제어입력 변화분이 주어진 범위 내에 존재함을 확인할 수 있다. 이때의 모바일 로봇의 위치 및 각도 성분들의 SSE를 나타내면 다음과 같다.

$$SSE_{MPC+GA} = [0.014169 \;\; 0.637413 \;\; 4.065523]$$

이전의 예측제어기에 비하여 SSE가 많이 줄어듦을 알 수 있다. 이것은 유전알고리즘이 예측제어기의 제어파라미터들을 최적화하여 최적의 제어 성능을 나타냄을 알 수 있다.

Ⅴ. 결 론

본 연구에서 모델예측제어기에 대하여 최대선속도, 최대선가속도, 최대각속도, 최대각가속도들의 제한조건을 갖는 quadratic programming 문제로 변형하여 모바일로봇의 예측제어기를 설계하였다. 예측제어기의 quadratic programming 문제는 Hildreth 방법[9]을 사용하여 간단히 해를 도출하였으나, 모바일 로봇의 제어성능을 결정하는 예측제어기의 제어파라미터인 기준모델 행렬 A_r과 가중치행렬 Q, R에 대하여 임의로 결정함으로써 제어성능을 높이는 것에는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 제한조건들을 고려한 모바일 로봇의 예측제어기를 설계하고, 최적화 기능이 뛰어난 유전알고리즘을 적용하여 예측제어기의 제어파라미터들을 최적화함으로써 제어성능을 높일 수 있었다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 본 연구에서 제안한 제어방법이 기존의 예측제어기의 추종성능보다 뛰어남을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGEMENT

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

REFERENCES

[1] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, 2nd ed. Cambridge, Massachusetts, London, England: The MIT Press, 2013.

[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 Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 657-664, Feb. 2016.

[3] K. M. Lynch and F. C. Park, *Modern Robotics: Mechanics, Planning and Control*, New York, NY: Cambridge University Press, 2017.

[4] E. F. Camacho and C. Bordons, *Model Predictive Control*, London, UK: Springer-Verlag, 2007.

[5] D. Gu and H. Hu, "Receding horizon tracking control of wheeled mobile robots," *IEEE Transactions on Control System Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 743-749, July 2006.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] L. Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*, London: UK, Springer Verlag, 2009.

[10] 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.

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

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