

선형 매개변수 가변 방식을 이용한 개인 이동체의 강인 제어

안 대 용 · 강 창 목*

인천대학교 전기공학과

Robust Control for Personal Mobility Using Linear Parameter Varying Method

Dae-Young An · Chang Mook Kang*

Department of Electrical Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea
(Received 19 September 2023 / Revised 24 October 2023 / Accepted 13 November 2023)

Abstract : In this paper, a Linear Parameter Variable(LPV) controller is proposed to ensure the velocity control of personal mobility by varying the system's mass and inertia. Particularly, we will be testing robust control techniques on electric wheelchair-type personal mobility devices used by many people in hospitals or government offices. To validate the effectiveness of the proposed LPV approach, a kinematics-based controller, a single linear quadratic regulator(LQR) controller, and an LPV controller were compared and analyzed under the ROS Gazebo environment. Simulation results confirmed that the proposed LPV-based control method improved control performance, compared to kinematics-based controllers or LQR controllers that used fixed control values.

Key words : Linear parameter varying control(선형 매개변수 가변 제어), Linear quadratic regulator(선형 2차 조절기), Personal mobility(개인 이동체), Electric wheelchair(전동 휠체어), Parameter interpolation(매개변수 보간)

Nomenclature

v	: wheelchair velocity, m/s
ω	: wheelchair angular velocity, rad/s
\dot{x}	: velocity of x-axis, m/s
\dot{y}	: velocity of y-axis, m/s
ψ	: heading angle in global coordinate, rad
θ	: wheel angular velocity, rad/s
τ	: wheel torque, Nm
J	: wheelchair moment of inertia, kgm^2
J_W	: wheel moment of inertia, kgm^2
B_W	: friction coefficient
r	: wheel radius, m
W	: distance between wheels, m
T_S	: sampling time, s

Subscripts

l, r : left, right

1. 서론

최근 전기를 동력으로 하는 1인용 교통수단인 전동 휠체어, 전동 킥보드, 전기 자전거 등의 개인형 이동수단(PM: Personal Mobility)은 관심도와 사용자가 급격하게 증가하고 있다. 이와 더불어 개인형 이동수단과 관련되어 구조, 배터리, 안전, 제어 등 여러 분야에서의 연구도 활발하게 이루어지고 있다.^{1,2)} 그 중 전동 휠체어는 거동이 불편한 고령자, 사회적 약자, 장애인 등의 이동수단으로 널리 사용되고 있으며 최근 수년간에 걸쳐서 모터, 브레이크, 배터리 등의 여러 기술이 많이 개발되고 있다. 하지만 기존의 전동 휠체어는 크기와 무게 때문에 휴대가 편리하지 않은 단점이 있어 교통약자들이 주 거주공간 이외에서 전동 휠체어를 사용하는 것이 상당한 어려움으로 다가오고 있다.³⁾ 그에 따라서 병원 등의 의료기관과 여러 관광지에서 사회적 약자에게 전동 휠체어형 개인 이동체를 대여하는 서비스들이 점차 증가되고 있

*A part of this paper was presented at the KSAE 2022 Fall Conference and Exhibition

*Corresponding author, E-mail: mook@inu.ac.kr

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.

다. 조이스틱을 이용하여 수동으로 조종하는 휠체어와 더불어 휠체어 탑승자가 휠체어를 조작하기 힘들거나 휠체어 조작의 편의성을 증가시키기 위해 탑승자의 개입 없이 주행할 수 있도록 자율주행 기술이 탑재된 자율주행 전동 휠체어형 개인 이동체 개발도 여러 분야에서 연구 중에 있다.^{4,5)}

전동 휠체어형 개인 이동체는 기존 모바일 로봇과 같이 LiDAR 기반 또는 카메라 기반의 네비게이션을 통해 자율주행 알고리즘을 구성할 수 있다. 보통의 모바일 로봇 네비게이션 과정은 Mapping을 통해 구축된 지도 안에서 LiDAR 또는 카메라를 이용해 Localization을 수행한다.^{6,7)} 이후 Path planning을 통해 목표 속도를 산출한 뒤 기구학 기반의 제어기를 사용하여 로봇의 위치를 제어하게 된다. 기구학 기반의 제어기는 간단하고 보통의 환경에서는 적절한 제어 성능을 기대할 수 있지만, 시스템의 변화가 생기거나 외란이 발생하게 될 경우 제어 성능이 감소할 수 있다.⁸⁾ Fig. 1은 전동 휠체어형 개인 이동체의 총 질량이 20 kg과 100 kg일 경우 기구학 기반 제어기의 속도제어 결과를 나타낸다. 두 시뮬레이션 모두 동일한 기구학 기반 제어기를 사용했지만, 질량이 20 kg인 모델에서는 속도를 잘 추종하는 반면 질량이 100 kg일 경우 제어 성능이 크게 감소한다. 따라서 총 질량 변화에 따라 시스템의 매개변수가 변경될 경우 제어 성능에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

공공기관, 의료시설, 관광지 등에서 대여할 수 있는 휠체어의 특성상 탑승자의 존재 유무와 탑승자에 따라 시스템의 총 질량이 변할 수 있다. 시스템의 총 질량은 속도 제어에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 요소이기 때문에 질량 변화에 따른 최적화된 속도 제어 전략을 구상해야 할 필요성이 있다.

본 논문에서는 전동 휠체어형 개인 이동체의 속도 제어를 위하여 동역학기반 모델을 이용하는 Linear Quadratic Regulator(LQR)과 매개변수 변화에 강인한 Linear Parameter Varying(LPV)을 결합해 구성하여 시스템의 총 질량 변화에 따라 최적화된 제어 전략을 제안한다. LPV 시스템은 Gain-scheduling 문제를 분석하기 위해 처음 제시되었고 매개변수의 변화에 따라 강인하게 제어 가능한 특성을 가지기 때문에 여러가지 제어 분야에서 많이 적용되고 있다.^{9,10)} 기구학 기반 제어기와 동역학기반의 LQR 제어기만 적용된 속도 제어 성능과 LPV를 적용한 시스템의 제어기 성능을 ROS Gazebo 시뮬레이션 환경을 통해 비교 및 분석한다. 본 논문에서 제안한 LPV 속도제어 시스템은 기구학 기반 제어기와 동역학기반의 단일 LQR 제어 시스템보다 매개변수 변화에 강인한 제어 성능을 보인다.

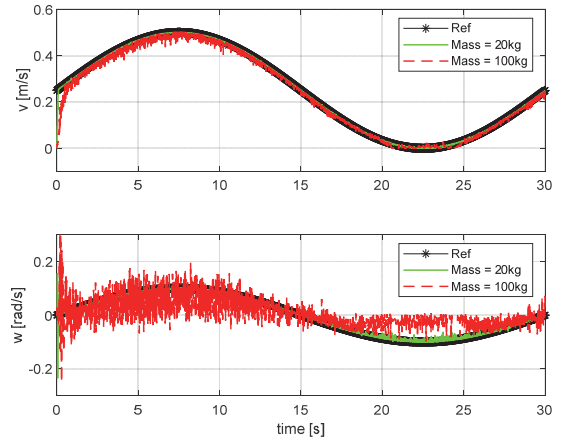


Fig. 1 Comparison of kinematics based controller according to total mass change (20 kg: green, 100 kg: dashed red)

2. System Modeling

양쪽에 부착된 두개의 바퀴를 기반으로 주행하는 전동휠체어형 개인이동체는 Fig. 2와 같이 Two-Wheeled Mobile Robot(TWMR)으로 표현할 수 있다.^{11,12)} 2장에서는 TWMR의 기구학적 모델과 전동 휠체어의 동역학 모델을 사용하여 속도 제어를 위한 시스템을 모델링한다.

Fig. 2의 기구학 기반 모델은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)을 사용해 시스템의 속도 v , 회전속도 ω 에 대한 도함수를 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.¹⁶⁾

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{R}{2}(\dot{\theta}_l + \dot{\theta}_r) \cos \psi \\ \dot{y} &= \frac{R}{2}(\dot{\theta}_l + \dot{\theta}_r) \sin \psi \\ \dot{\psi} &= \omega = \frac{R}{W}(\dot{\theta}_l - \dot{\theta}_r) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \frac{R}{2}(\ddot{\theta}_l + \ddot{\theta}_r) \\ \dot{\omega} &= \frac{R}{W}(\ddot{\theta}_l - \ddot{\theta}_r) \end{aligned} \quad (2)$$

전동 휠체어형 개인 이동체 주행 시 미끄러짐이 발생

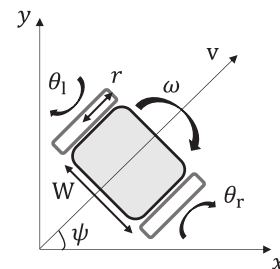


Fig. 2 Wheelchair model

하지 않는다고 가정한다면 시스템의 총 질량 m , 양 바퀴의 부하 토크 τ_r, τ_l 와 개인 이동체의 관성 모멘트 J , 바퀴 관성 모멘트 J_w 와 마찰계수 B_w 를 사용하여 개인 이동체의 양 바퀴 회전 가속도의 합과 차를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.¹¹⁾

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_l + \ddot{\theta}_r &= \frac{(\tau_r + \tau_l) - B_w(\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l)}{\frac{mR^2}{2} + J_w} \\ \ddot{\theta}_l - \ddot{\theta}_r &= \frac{(\tau_r - \tau_l) - B_w(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l)}{2\frac{JR^2}{W^2} + J_w} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (1) ~ (3)을 사용하여 전동 휠체어형 개인 이동체의 속도와 회전속도가 포함된 식 (4)를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \frac{R(\tau_r + \tau_l) - B_w \frac{2}{R} v}{\frac{mR^2}{2} + J_w} \\ \dot{\omega} &= \frac{(\tau_r - \tau_l) - B_w \frac{W}{R} \omega}{2\frac{JR^2}{W^2} + J_w} \end{aligned} \quad (4)$$

이후, 식 (4)를 통해 상태변수 $x = [v \ w]^T$, 입력 $u = [\tau_r \ \tau_l]^T$ 을 가지는 휠체어형 개인 이동체의 연속시간 상태공간 모델을 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.¹³⁾

Table 1 Parameter table

Parameter	Value	Parameter	Value
m	20	R	0.3
J	2.5	J_w	0.18
W	0.5	B_w	0.55

또한 매 샘플 시간마다 계산하기 위해 식 (5)를 이산화해 나타낼 필요가 있다. Zero-order hold 이산화 기법을 사용하여 시스템을 이산화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ A &= \begin{bmatrix} \frac{2B_w}{mR^2 + 2J_w} & 0 \\ 0 & -\frac{W^2 B_w}{2JR^2 + W^2 J_w} \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} \frac{R}{mR^2 + 2J_w} & \frac{R}{mR^2 + 2J_w} \\ \frac{R}{W(2JR^2 + W^2 J_w)} & -\frac{R}{W(2JR^2 + W^2 J_w)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

3. Linear Parameter Varying System Approach

전동 휠체어형 개인 이동체의 특성상 사용자에 따라

시스템의 총 질량 값이 변할 수 있고 그에 따라 시스템의 관성 모멘트 값도 변화한다. 전동 휠체어형 개인 이동체의 이산시간 상태 공간 모델에서 질량과 시스템의 관성 모멘트가 포함된 항을 시간에 따라 변할 수 있는 매개변수로 선정하여 LPV 시스템을 설계한다.

3.1 LPV Systems

식 (6)은 시스템의 총 질량이 포함된 항을 σ_m , 관성모멘트가 포함된 항을 σ_j 로 정의한다. 이후 정의된 매개변수 $\sigma = [\sigma_m \ \sigma_j]^T$ 에 따라 변화하는 이산시간 상태공간 모델을 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{1}{mR^2 + 2J_w} \\ \sigma_j &= \frac{1}{2JR^2 + W^2 J_w} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi(\sigma)x(k) + \Gamma(\sigma)u(k) \\ \Phi(\sigma) &= \begin{bmatrix} 1 - 2B_w\sigma_m T_s & 0 \\ 0 & 1 - W^2 B_w\sigma_j T_s \end{bmatrix} \\ \Gamma(\sigma) &= \begin{bmatrix} R\sigma_m & R\sigma_m \\ R\sigma_j & -R\sigma_j \\ W & -W \end{bmatrix} * T_s \end{aligned} \quad (7)$$

이때, σ_m 과 σ_j 의 범위를 각각 최소값과 최대값으로 제한할 수 있다.

$$\sigma_m \in [\underline{\sigma}_m \ \bar{\sigma}_m], \sigma_j \in [\underline{\sigma}_j \ \bar{\sigma}_j] \quad (8)$$

$\xi_i(\sigma) \geq 0, \sum_{i=1}^{n_v} \xi_i(\sigma)$ 를 만족하는 Interpolation parameter vector ξ 와 Vertices V 를 통해 σ 는 다음과 같은 Polytopic 형태로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = V\xi(\sigma) \quad (9)$$

이후 LPV 시스템의 Polytopic decomposition을 다음과 같이 표현한다.^{9,15)}

$$\begin{aligned} \Phi^{(1)} &= \Phi(\underline{\sigma}_m) = \Phi(0) + \underline{\sigma}_m \hat{\Phi}^{(1)} \\ \Phi^{(2)} &= \Phi(\underline{\sigma}_j) = \Phi(0) + \underline{\sigma}_j \hat{\Phi}^{(2)} \\ \Phi^{(3)} &= \Phi(\bar{\sigma}_m) = \Phi(0) + \bar{\sigma}_m \hat{\Phi}^{(1)} \\ \Phi^{(4)} &= \Phi(\bar{\sigma}_j) = \Phi(0) + \bar{\sigma}_j \hat{\Phi}^{(2)} \\ \Phi(0) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \hat{\Phi}^{(1)} &= \begin{bmatrix} -2B_w T_s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \hat{\Phi}^{(2)} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -W^2 B_w T_s \end{bmatrix} \\ \Phi(\sigma) &= \sum_{i=1}^{n_v} \xi_i \Phi^{(i)} \end{aligned} \quad (10)$$

$\Gamma(\sigma)$ 또한 같은 과정을 통해 계산할 수 있으며, Vertices V 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V = [v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad v_4] = \begin{bmatrix} \underline{\sigma}_m & 0 & \bar{\sigma}_m & 0 \\ 0 & \underline{\sigma}_j & 0 & \bar{\sigma}_j \end{bmatrix} \quad (11)$$

$\xi_i(\theta) \geq 0, \sum_{i=1}^{n_v} \xi_i(\sigma) = 1$ 인 ξ 의 성질을 이용하여 역행렬을 계산할 수 있도록 $\hat{v}, \hat{\sigma}$ 를 다음과 같은 형태로 정의할 수 있고, \hat{v} 의 가역성을 만족한다면 고유한 Interpolation parameter vector인 $\xi(\sigma)$ 를 구할 수 있다.^{9,14)}

$$\hat{V} = \begin{bmatrix} 2\underline{\sigma}_m & 0 & 2\bar{\sigma}_m & 0 \\ 0 & 2\underline{\sigma}_j & 0 & 2\bar{\sigma}_j \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma \\ \xi \end{bmatrix}_{2 \times 1} = [\underline{\sigma}_m \quad \underline{\sigma}_j \quad 0.5 \quad 0.5]^T$$

$$\xi(\sigma) = \hat{V}^{-1} \hat{\sigma}$$

3.2 LPV Controller

Fig. 3은 전동 휠체어형 개인 이동체의 속도제어 시스템을 나타낸다. 제안하는 시스템은 Reference 속도 값과 시스템의 속도와의 차이를 LPV 제어기로 전달한다. LPV 제어기에서는 가변하는 매개변수에 따라 제어이득 값을 계산하여 시스템의 입력 $u = -K(\sigma)x$ 을 결정한다.

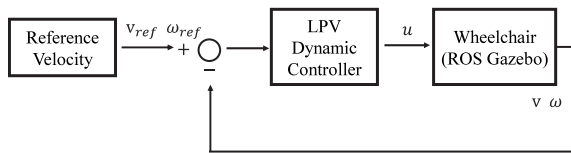


Fig. 3 LPV control system

LPV 제어기의 제어이득 $K(\sigma)$ 는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있고, 각 Vertex에 따른 최적의 제어이득 $K^{(i)}$ 는 LQR 계산을 통해 얻을 수 있다.

$$K(\sigma) = \sum_{i=1}^{n_v} \xi_i(\sigma) K^{(i)} \quad (13)$$

4. Simulation and Results

ROS Gazebo를 통해 전동 휠체어형 개인 이동체의 시뮬레이션 환경을 구성했다. 제안하는 LPV 제어기의 성능을 확인하기 위하여 두 가지 시뮬레이션을 진행했다. 먼저 시스템의 총 질량과 관성모멘트가 각기 다른 모델을 사용하여 LQR 제어기와 LPV 제어기의 속도 제어 결과를 분석했다. LQR 제어기는 $m = 20 [kg], J = 2.5 [kg \cdot m^2]$

으로 고정된 모델에 기반하여 계산되는 제어 이득을 통해 시스템의 속도를 제어했고, LPV 제어기는 가변하는 모델 변수에 따라 제어 이득을 계산하여 속도를 제어했으며 총 질량이 총 질량이 20 kg, 60 kg, 100 kg일 경우에 대해 각 시뮬레이션을 진행했다. 따라서 LQR 제어기는 고정된 제어 이득을 사용하고 LPV 제어기는 측정되는 매개 변수에 따라 제어 이득이 변화한다. 두 번째 시뮬레이션은 시스템의 총 질량이 100 kg로 고정된 환경에서 기구학 기반 제어기와 LPV 제어기의 속도 제어 결과를 비교 및 분석했다. 두 가지 시뮬레이션에 대한 선형 속도와 회전 속도의 Reference는 보통의 전동 휠체어형 개인 이동체의 직진 및 회전 운동을 모사하여 사인파 형태로 설정했다.

4.1 Control Results of LPV and LQR

Fig. 4는 LQR과 LPV 제어기의 속도 제어 결과를 나타낸다. Fig. 4의 (a), (d), (g)는 매개변수 σ_m 과 σ_j 의 값을 나타낸다. Fig. 4의 (b)와 (c)는 시스템의 총 질량이 20 [kg], 관성 모멘트가 2.5 [kg · m²]일 경우($\xi = [0 \ 0 \ 0.5 \ 0.5]^T$), (e)와 (f)는 총 질량이 60 [kg], 관성 모멘트가 7.5 [kg · m²]일 때의 선형 속도 및 회전 속도를 나타낸다 $\xi = [0.406 \ 0.411 \ 0.094 \ 0.08]^T$. 또한 (h)와 (i)는 총 질량이 100 [kg], 관성 모멘트가 12.5 [kg · m²]일 경우의 휠체어 선형 속도 및 회전 속도 그래프이다 $\xi = [0.5 \ 0.5 \ 0 \ 0]^T$. Table 2와 Table 3은 각각 선형 속도와 회전 속도의 RMSE 값이다. Table 2와 Table 3을 통해 LPV 제어기는 시스템의 총 질량과 관성모멘트가 변화하는 환경에서 제어 이득의 Gain-scheduling을 통해 속도 RMSE가 LQR 제어기보다 개선된 것을 확인할 수 있다. 두가지 시뮬레이션을 통하여 LPV 제어기는 시스템의 매개변수가 변경됨에 따라 Parameter interpolation 과정을 통해 최적의 제어 이득을 계산하여 강인한 제어 성능을 보인다는 것을 확인하였다.

Table 2 RMSE of wheelchair linear velocity

Controller \ Parameter	$m = 20$	$m = 60$	$m = 100$	Unit
	$J = 2.5$	$J = 7.5$	$J = 12.5$	
LPV	0.0077	0.0114	0.0171	[m/s]
LQR	0.0084	0.0119	0.0187	[m/s]

Table 3 RMSE of wheelchair angular velocity

Controller \ Parameter	$m = 20$	$m = 60$	$m = 100$	Unit
	$J = 2.5$	$J = 7.5$	$J = 12.5$	
LPV	0.004	0.0305	0.0443	[rad/s]
LQR	0.004	0.0313	0.0447	[rad/s]

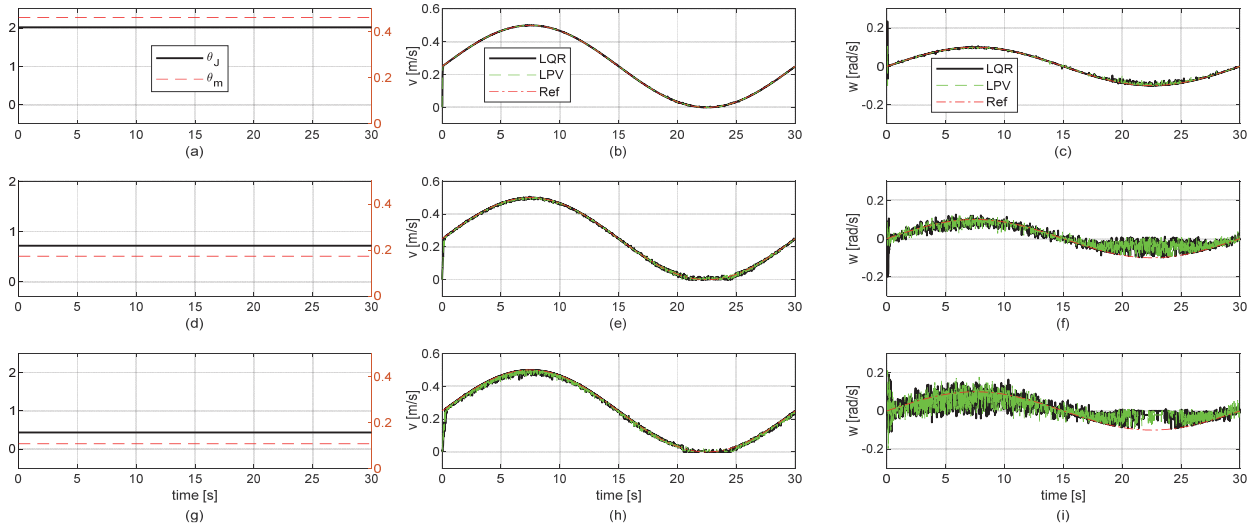


Fig. 4 Control results comparison of LQR(dash-dot red) and LPV(dashed green) controllers and reference(solid black). (b), (e), (h) are a linear velocity control result and (c), (f), (g) are an angular velocity control result according to each(solid black), (dashed red) in (a), (d), (g).

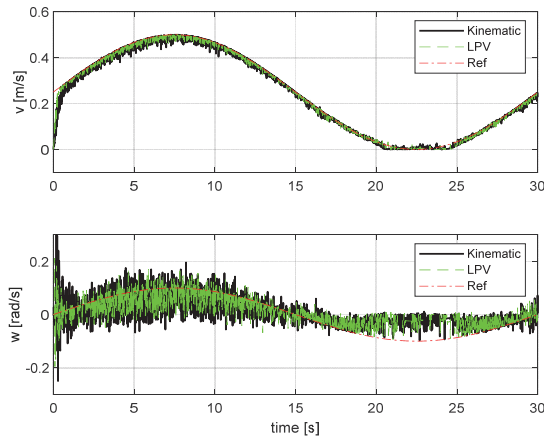


Fig. 5 LPV(solid black) and kinematics based(dashed green) control results

4.2 Control Results of LPV and Kinematic Controller

Fig. 5는 LPV 제어기와 기구학 기반 제어기의 속도 제어 결과를 나타낸다. 위의 그래프는 선형 속도를, 아래 그래프는 회전 속도를 나타낸다. LPV 제어기와 기구학 기반 제어기의 선형 속도 RMSE 값은 각각 0.0171 [m/s], 0.0232 [m/s]으로 26.29%가량 LPV 제어기의 선형 속도가 개선되었고, 회전 속도의 경우 각각 0.0448 [rad/s], 0.0519 [rad/s]으로 13.68%가량 LPV 제어기의 선형 속도 RMSE가 개선되었다. 따라서 기구학 기반 제어기보다 동역학을 고려하여 변화하는 매개변수에 따른 최적화된 제어 이득을 계산하는 LPV 제어기가 제어 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 전동 휠체어형 개인 이동체의 동역학 기반 모델을 사용하는 시스템의 속도 제어 기법을 제안한다. 개인 이동체 탑승자에 따라 시스템의 총 질량과 관성 모멘트가 변화하는 환경을 LPV 제어기법을 통해 제어한다. LPV 제어기는 시스템의 총 질량과 관성 모멘트에 관련된 항을 변화하는 매개변수로 정의하고 Parameter interpolation 과정을 통해 최적의 제어 이득 값을 계산한다.

ROS Gazebo 시뮬레이션을 통해 기구학 기반 제어기, LQR 제어기와 제안하는 LPV 제어기의 속도 제어 성능을 비교 및 분석했다. 시스템의 총 질량, 관성 모멘트 등의 매개변수가 변화하는 환경에서 LPV 제어기는 기구학 기반 제어기와 LQR 제어기보다 속도 오차 값이 더 개선되었다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 LPV 제어기는 매개변수 변화에 강인한 제어 성능을 가진다는 것을 확인했다. 향후에는 제안한 기법을 사용하여 실제 전동 휠체어형 개인 이동체 플랫폼을 통해 속도 제어 및 위치 제어 성능을 검증해 볼 예정이다.

후 기

이 논문은 인천대학교 2022년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었으며 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.20018144, 다목적 개인이동형 서비스 로봇 플랫폼 기술개발 및 실증).

References

- 1) J. Kim, "Design of a Compact 18-speed Epicyclic Transmission for a Personal Mobility Vehicle," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.17, No.6, pp.977-982, 2016.
- 2) H. Yim and K. Lee, "Preliminary Modular Design for Electric Personal Mobility with Design-engineering Collaboration," *World Electric Vehicle Journal*, Vol.7, No.3, pp.426-435, 2015.
- 3) Y. Lee, S. Han and S. Ha, "Structural Analysis of Wheelchair Lift System for Express Buses", *Transactions of KSAE*, Vol.27, No.1, pp.61-67, 2019.
- 4) Y. Jung, Y. Kim, W. H. Lee, M. S. Bang, Y. Kim and S. Kim, "Path Planning Algorithm for an Autonomous Electric Wheelchair in Hospitals," *IEEE Access*, Vol.8, pp.208199-208213, 2020.
- 5) H. Y. Ryu, J. S. Kwon, J. H. Lim, A. H. Kim, S. J. Baek and J. W. Kim, "Development of an Autonomous Driving Smart Wheelchair for the Physically Weak," *Applied Sciences*, Vol.12, No.1, Paper No.377, 2021.
- 6) H. Grewal, A. Matthews, R. Tea and K. George, "LIDAR-based Autonomous Wheelchair," *IEEE Sensors Applications Symposium(SAS)*, 2017.
- 7) Y. Sakai, H. Lu, J. K. Tan and H. Kim, "Recognition of Surrounding Environment from Electric Wheelchair Videos Based on Modified YOLOv2," *Future Generation Computer Systems*, Vol.92, pp.157-161, 2019.
- 8) S. Jeong and D. Chwa, "Sliding-Mode-Disturbance-Observer-Based Robust Tracking Control for Omnidirectional Mobile Robots with Kinematic and Dynamic Uncertainties," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.26, No.2, pp.741-752, 2020.
- 9) C. M. Kang, S. H. Lee and C. C. Chung, "Discrete-Time LPV H_2 Observer with Nonlinear Bounded Varying Parameter and Its Application to the Vehicle State Observer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.65, No.11, pp.8768-8777, 2018.
- 10) J. Mohammadpour and C. W. Scherer, "Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications," Springer Science & Business Media, 2012.
- 11) J. W. Park, W. S. Im, D. Y. Kim and J. M. Kim, "Safe Driving Algorithm of the Electric Wheelchair with Model Following Control," *16th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp.1-10, 2014.
- 12) C. B. Jabeur and H. Seddik, "Design of a PID Optimized Neural Networks and PD Fuzzy Logic Controllers for a Two-wheeled Mobile Robot," *Asian Journal of Control*, Vol.23, No.1, pp.23-41, 2021.
- 13) R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, Springer Science & Business Media, 2011.
- 14) C. M. Kang, S. H. Lee and C. C. Chung, "Linear Parameter Varying Design for Lateral Control Using Kinematics of Vehicle Motion," *Annual American Control Conference(ACC)*, 2018.
- 15) A. S. Ghersin and R. S. Sanchez Pena, "LPV Control of a 6-DOF Vehicle," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.10, No.6, pp.883-887, 2002.
- 16) D. -Y. An and C. M. Kang, "Linear Parameter Varying Control Method for Robust Against Mass Changes of Personal Mobility User," *KSAE Fall Conference Proceedings*, pp.953-957, 2022.