

서비스 로봇의 서빙 트레이 자세 제어 방안

정영호*, 한동윤*, 이동현*, 백민석*, 반재필*

Attitude Control of Serving Tray on Service Robots

Yeongho Jeong*, DongYoon Han*, DongHyun Lee*, MinSeok Baek*, Jaepil Ban*

요약

본 논문에서는 짐벌 트레이를 가진 서비스 로봇을 개발하고, 짐벌 트레이의 최적 자세 제어 방안을 제안한다. 먼저, 서비스 로봇의 서빙 쟁반에 짐벌 기능을 추가하기 위해 쟁반 아래면에 2개의 모터를 부착하여 쟁반이 2축 자유도를 가지도록 설계하였다. 설계한 서비스 로봇과 짐벌 트레이를 MSC Adams 프로그램으로 3D 모델을 구축하여 동역학 시뮬레이션이 가능하도록 하였다. 서빙 로봇의 각 축에 대한 각도와 각속도를 측정한다고 가정하였고, 측정 값을 이용하여 각 모터의 토크를 LQR 최적 제어 기법을 통해 제어하였다. 두 가지의 충돌 상황에 대해 동역학 시뮬레이션을 진행하였으며, 제안한 짐벌 트레이 및 트레이 자세 제어방법이 트레이 위의 음식물을 안정적으로 보존함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we development a service robot with a gimbal tray, and propose an attitude control method of the gimbal tray. First, we use two electric motors under the tray to implement the gimbal function for the serving tray, enabling the tray has two degrees of freedom. We use MSC Adams program to implement 3D dynamic model of the service robot and gimbal tray. Then, we develop a linear quadratic regulator for controlling tray attitude using motor torque, assuming that the angle and angular velocity are measured. Dynamic simulations for two collision cases are performed and the results show the proposed system and control method effectively preserve the food on the gimbal tray.

Key words

Attitude control, gimbal systems, optimal control, service robots

I. 서 론

최근 서비스 로봇의 대중화가 가속화되고 있다 [1]. 서비스 로봇 중 음식 서빙 로봇은 사람 대신 로봇이 음식을 전달하는 기능을 하며, 무겁거나 뜨거운 음식 등을 효과적으로 전달할 수 있어 점점 보급이 증가하고 있다. 하지만, 현재 시장에서 사용

되는 서빙 로봇은 서빙 로봇과 쟁반이 일체화되어 있다. 따라서, 서빙 로봇의 몸체가 기울어지면 쟁반도 따라 기울어져 뜨거운 음식 혹은 무거운 물체가 사람에게 떨어지거나 하는 안전상의 위험이 존재한다.

최근 대기업에서 서빙로봇에 의해 대물, 대인 사

* 금오공과대학교 전자공학부(Kumoh National Institute of Technology Electronic Engineering)

고가 발생했을 때를 위한 보험이 출시되었다. 이것은 산업용 로봇뿐 아니라 서비스 로봇도 안전사고를 일으킬 수 있음을 로봇을 이용하고 있는 서비스 매장 점주와 서비스 로봇 제조사가 인식하고 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 보험의 존재가 안전사고를 예방할 수 있는 것은 아니다.

본 연구에서는 사고의 후 조치가 아닌 사고 예방 위한 서비스 로봇을 개발하는 것을 목적으로 한다. 즉, 서빙 로봇의 몸체가 기울어도 서빙 접시가 기울어지지 않도록 짐벌 시스템을 추가하고자 한다. 여기에서 짐벌 시스템은 외란이 인가되는 경우에도 처음 상태의 각도를 유지하도록 제어하는 기능을 가지는 시스템이다 [2-4]. 서빙 로봇의 쟁반이 흔들림 방지가 이루어진다면 기존 서빙 로봇에 비해 안정성이 확보될 것이다.

따라서, 본 논문에서는 쟁반 아래에 짐벌 시스템을 추가하기 위해 모터를 부착하고 이를 제어하여 쟁반 위 물체에 대한 안정성을 확보하고자 한다.

II. 서빙 로봇 모델링

짐벌 기능을 추가하기 위해, 그림 1과 같이 서빙 로봇의 쟁반 아래에 2개의 모터를 부착하여 쟁반의 롤 각도(roll angle)과 피치 각도(pitch angle)을 제어 할 수 있도록 설계한다.

Motor 1은 롤, Motor 2는 피치의 변화를 위해 작동하는 모터이다. 그림 1에서 롤의 변화를 α , 피치의 변화를 β 로 정의한다. 이를 3D 모델링 프로그램인 MSC Adams 프로그램을 사용하여 모델링한다. 그림 2는 구현한 서빙 로봇의 3D 모델의 전후좌우 모습이다. 구현한 서빙 로봇의 크기는 440*440*1050(mm)이며, 무게는 서빙 로봇의 하단부에 모터와 프로세서 등으로 인해 실제 서빙 로봇의 무게 중심이 낮은 것을 고려하여, 하단부 30kg, 쟁반 0.5kg, 몸체와 바퀴 4.5kg로 설계하여 총 무게는 35kg이다. 또한 바퀴와 식당에서 흔히 사용하는 바닥 소재의 정지 마찰력 1.0과 운동 마찰력 0.7을 인가하여 실제 서빙 로봇 규격과 사용되는 상황을 고려하여 실제 상황과 유사하게 모델링하였다.

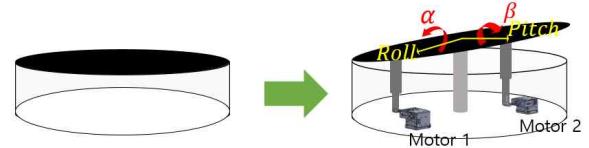


그림 1. 쟁반 아래 모터 부착

Fig. 1. Place motor under tray

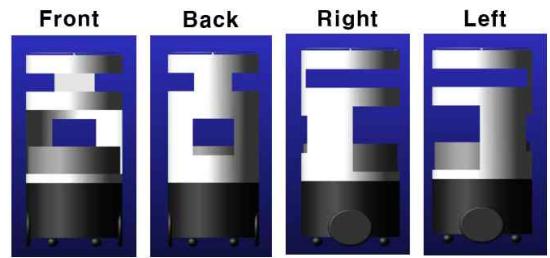


그림 2. 3D 모델의 앞, 뒤, 좌, 우 형태

Fig. 2. Front, Back, Left, Right shape of the 3D model

III. LQR 제어

짐벌 트레이의 자세제어를 위해 트레이의 동적 모델을 기반으로 최적 제어기를 설계하고자 한다. 짐벌 트레이의 동역학은 다음과 같은 상태공간방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \ddot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \\ \beta \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{J_x} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \\ \beta \\ \dot{\beta} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \end{bmatrix} = -K_c \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \\ \beta \\ \dot{\beta} \end{bmatrix}.$$

J_x, J_y 는 각 모터의 관성 모멘트, τ_x, τ_y 는 각 모터의 토크, K_c 는 제어 이득을 나타낸다. 짐벌 트레이의 최적 자세제어를 위하여 본 최적제어 방법인 linear quadratic regulation (LQR) 기법을 활용하여 제어 이득을 설계하고자 한다. 최적 제어를 위해 다음과 같이 목적함수를 정의한다.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (2)$$

여기에서 $u = [\tau_x, \tau_y]^T$, $x = [\alpha \ \dot{\alpha} \ \beta \ \dot{\beta}]^T$ 이며, Q와 R은 각각 상태와 입력에 대한 가중치이다. 위 목적함수를 최소화하는 제어 이득은 다음과 같다.

$$K_c = -R^{-1}B^T P. \quad (3)$$

여기에서 P 는 다음 리카티 방정식으로부터 얻어진다.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0. \quad (4)$$

IV. 시뮬레이션

본 시뮬레이션에서 모터의 관성 모멘트는 다음과 같이 주어진다.

$$J_x, J_y = 0.005 \quad (5)$$

짐벌 트레이의 최적 자세제어를 위한 가중치는 다음과 같이 설정하였다.

$$Q = \begin{bmatrix} 10^4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^2 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 10^{-2} & 0 \\ 0 & 10^{-2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

수식 (3) - (4)와 가중치 (6)를 통해 구한 최적 제어 이득 K_c 는 다음과 같다.

$$K_c = \begin{bmatrix} 10^3 & 10^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^3 & 10^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

실제 상황에서의 자세제어의 효과를 확인하기 위해 어린 아이가 식당에서 뛰다가 부딪힌 상황으로 가정하여 그에 맞는 충격량을 계산하여 부여하였다.

$$F = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} \frac{v_{10}}{\Delta t} \quad (8)$$

여기에서 F 는 충격량, m_1 은 아이의 체중, m_2 는 서빙 로봇의 무게, v_{10} 은 아이의 속도, Δt 는 부딪힌 시간이며 그 값은 아래와 같다.

$$v_{10} = 2[\text{m/s}], \Delta t = 0.1[\text{s}] \quad (9)$$

식 (8)에 값 (9)를 대입하면 충격량은 다음과 같이 구해진다.

$$F = 525[\text{N}] \quad (10)$$

자세제어의 효과를 확인하기 위해 두 가지의 경우로 나누어 실험을 진행하였다. 첫 번째 경우는 로봇의 측면 45도에 충격을 주었을 경우에 대해 진행하였고, 두 번째 경우에는 정면으로 충돌하였을 때에 대해 시뮬레이션을 진행하여 쟁반의 기울어짐을 확인하였다.

기존의 서빙 로봇과 개선된 방안의 서빙 로봇을

시뮬레이션을 통해 비교한 결과를 그림 3과 같이 시각적으로 확인하였다. 그림 3의 좌측 그림은 짐벌 기능을 추가하지 않은 모델에 충격을 인가 시, 우측 그림은 쟁반에 짐벌 기능을 추가한 모델에 충격을 인가 하였을 때를 보여준다. 짐벌 기능이 없을 경우에는 쟁반 위 접시가 기울어진 것에 비해, 본 연구에서 제안한 모델은 쟁반 위 물체가 안정한 것을 확인할 수 있었다.

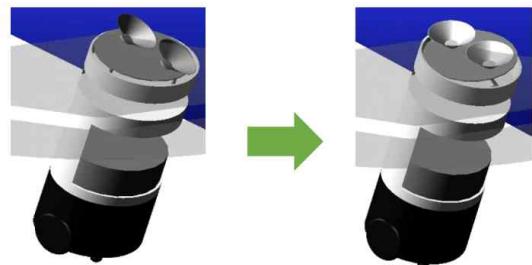


그림 3. 쟁반의 안정성 확보

Fig. 3. Securing the stability of the tray

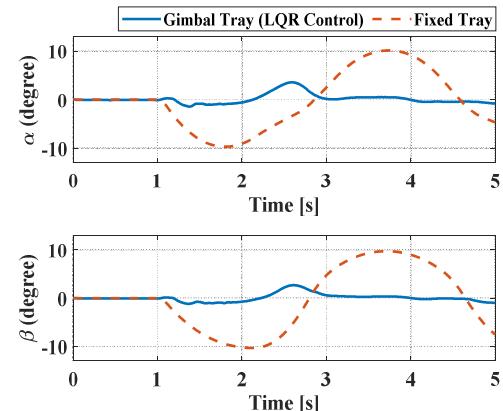


그림 4. Case 1 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Case 1 Simulation result

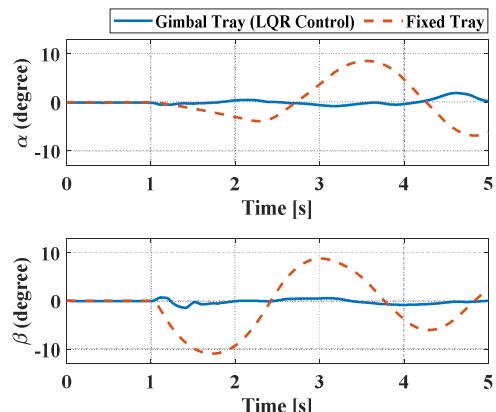


그림 5. Case 2 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Case 2 Simulation result

표 1. 각도 편차 비교

Table 1. Comparison of angle deviations

	기존 방법		제안 방법	
	case 1	case 2	case 1	case 2
α	10.25 °	8.41 °	3.46 °	1.89 °
β	10.17 °	10.85 °	2.60 °	1.44 °

그림 4, 5의 빨간 점선은 기존 서빙 로봇의 쟁반에 대한 각 축의 각도, 파란 실선은 본 연구를 통해 개선한 모델의 쟁반의 각 축에 대한 각도이다.

표 1은 그림 4, 5의 최댓값을 수치적으로 비교한 것이다. 기존 서빙로봇과 비교하여 충돌 상황에서 트레이의 롤각도 변화 α 는 71.89%, 피치각도 변화 β 는 80.58% 감소한 것을 확인할 수 있다. 어떠한 각도에서 충격이 가해져도 쟁반의 흔들림이 적도록 자세제어를 수행한 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 서빙 로봇의 쟁반이 서빙 로봇의 몸체와 같이 움직이는 기존의 방안 대신 모터를 부착하여 서빙 로봇의 쟁반이 짐벌 기능을 하도록 하는 설계하였고 트레이위의 음식이 안정적으로 전달될 수 있도록 트레이의 자세제어 방안을 제안하였다. MSC Adams 프로그램을 통한 3D 모델링을 진행하였고, MATLAB 프로그램과의 Co-simulation을 통해 모터 토크를 LQR 제어기법을 적용하여 최적 제어하였다. 이로써 롤과 피치 각도와 각속도를 활용한 모터 최적 제어를 통해 서빙 로봇의 쟁반의 안정성을 확보할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] <https://www.dona.com/news/article/all/20220719/114525249/1> (2022.11.09.)
- [2] Aytac Altan, Rifat Hacioglu, "Model predictive control of three-axis gimbal system mounted on UAV for real-time target tracking under external disturbances", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol.138, April, 2020.
- [3] SungPil Yoon, John B. Lundberg, "Equations of Motion for a Two-Axes Gimbal Systems", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, July, 2001.

- [4] Mohammad Nokhbeh, Daniel Khashab, "Modelling and Control of Ball-Plate System", Amirkabir University of Technology, 2011