

자동 과일 수확을 위한 드론 탑재형 과일 인식 알고리즘 및 수확 메커니즘

주기영¹ · 황보현² · 이상민^{1,2} · 김병규^{1,2,†} · 백중환³

¹한국항공대학교 스마트 항공 모빌리티 학과

²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

³한국항공대학교 항공전자정보공학과

Drone-mounted fruit recognition algorithm and harvesting mechanism for automatic fruit harvesting

Kiyoung Joo¹, Bohyun Hwang², Sangmin Lee^{1,2}, Byungkyu Kim^{1,2,†} and Joong-Hwan Baek³

¹Smart Air Mobility, Korea Aerospace University, Korea

²Department of Aerospace and mechanical engineering, Korea Aerospace University, Korea

³School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, Korea

Abstract

The role of drones has been expanded to various fields such as agriculture, construction, and logistics. In particular, agriculture drones are emerging as an effective alternative to solve the problem of labor shortage and reduce the input cost. In this study therefore, we proposed the fruit recognition algorithm and harvesting mechanism for fruit harvesting drone system that can safely harvest fruits at high positions. In the fruit recognition algorithm, we employ “You-Only-Look-Once” which is a deep learning-based object detection algorithm and verify its feasibility by establishing a virtual simulation environment. In addition, we propose the fruit harvesting mechanism which can be operated by a single driving motor. The rotational motion of the motor is converted into a linear motion by the scotch yoke, and the opened gripper moves forward, grips a fruit and rotates it for harvesting. The feasibility of the proposed mechanism is verified by performing Multi-body dynamics analysis.

초 록

최근 드론의 역할은 농업·건설·물류등의 다양한 영역으로 확대되고 있으며 특히 농업인구가 고령화되는 현 상황에 따라 드론은 노동력 부족 문제를 해결할 효과적인 대안으로 떠오르고 있다. 이에 본 논문에서는 농업 현장에서의 부족한 노동력을 보완하고 높은 위치의 과일도 안전하게 수확할 수 있는 드론 탑재형 과일수확 시스템을 제안한다. 과일수확 시스템은 과일인식 알고리즘과 과일수확 메커니즘으로 구성되어 있다. 과일인식 알고리즘은 딥러닝 기반의 객체탐지 알고리즘인 You Only Look Once를 사용하였고, 가상 시뮬레이션 환경을 구축하여 가능성을 검증하였다. 또한, 하나의 모터로 구동이 가능한 과일수확 메커니즘을 제안하였다. 모터의 회전운동을 기반으로 Scotch yoke을 구동시켜 선형운동으로 변환하여 gripper가 전개된 상태에서 과실에 접근 후 과실을 잡고 돌려 수확하는 메커니즘이다. 제안된 메커니즘에 대한 다물체동역학 해석을 수행하여 구동 가능성을 검증하였다.

Key Words : Drone(드론), Agriculture(농업), Harvesting system(수확 시스템), Deep-learning(딥러닝), Object recognition(객체 인식), Harvesting mechanism(수확 메커니즘)

1. 서 론

Received: Dec. 15, 2021 Revised: Jan. 28, 2022 Accepted: Feb. 04, 2022

† Corresponding Author

Tel: +82-2-300-0101, E-mail: bkim@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

과거 군사용 목적이거나 취미용으로만 사용되던 드론이 기술 발전을 거듭하면서 현재는 상업적 활용의 증가로 일상 생활에서 드론을 어렵지 않게 발견할 수 있

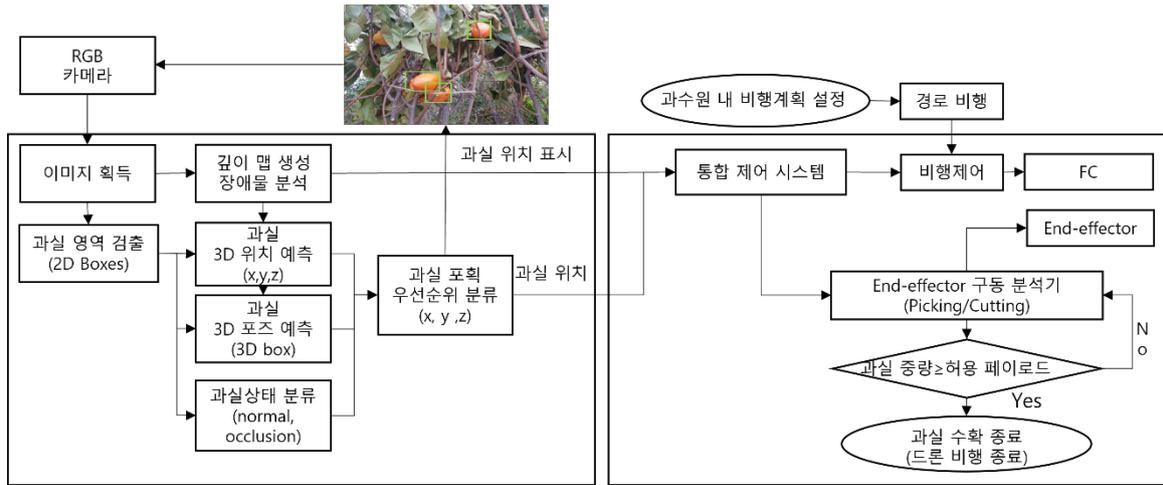


Fig. 1 Structure diagram of drone system for fruit harvesting

게 되었다. 특히, 드론 산업은 고부가가치 산업으로 활용할 수 있는 응용 분야가 많아 기업 및 연구소등에서 관련 연구개발이 활발히 수행되고 있다[1]. 드론 연구개발은 새로운 형식의 드론 기체 연구개발과 비행 목적에 따른 탑재 장비 개발 두 가지로 나뉠 수 있다. 최근에는 다양한 임무에 적합한 드론 탑재장비를 활용하기 위한 다목적 manipulator 연구개발이 진행중이다 [2]. 이러한 드론 탑재형 manipulator는 극한 직업 종사자들을 대신해 생명을 위협하거나 사고 위험성이 있는 화재진화, 생명구조, 사회기반시설의 유지관리 및 초 고압 송전선로 점검과 같은 극한 임무에 활용되고 있다[1-5]. 또한 농업용 드론을 이용한 대단위 농경지의 방제, 모니터링 등의 임무를 수행하고 있다. 농업용 드론의 경우 국내 농업 현장의 고령화 및 인구 감소로 인한 노동력 부족 문제를 해결할 효과적인 방안으로 각광받고 있어 농경지뿐만 아니라 과실 농가로의 활용도 확대되고 있다. 과실 농가는 과실 수확 기간 동안에 과일 수확을 위해 많은 노동력과 시간을 소비하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 현재 국내외에서 과채류 수확을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 일부 상용화를 이룬 스타트업 회사들이 있다[6-8]. 실제, 과실을 수확하기 위해 지상형 로봇을 활용한 과일 수확 시스템 개발이 진행되고 있다[6,7]. 하지만, 지상형 로봇을 활용한 과일 수확 시스템은 고지대에 있는 과실은 수확하기 어려워 고지대의 과실을 수확하는 추가 작업이 필요하며 높은 위치까지 올라가 작업을 해야 하는 작업자의 안전성을 확보할 수 없다. 반면 드론을 이용한 과실 수확 manipulator 연구는 시작 단계에 머무르고 있고 단지 소수의 스타트업 회사와 대학에서 연구가 이루어지고 있다. 대표적인 스타트업 회사인 이스라엘의 Tevel Aerobotics Technologists사는 인공지능 알고리즘으로 과일을 수확하는 드론 FAR (Flying Autonomous Robots)을 개발하였다[8]. FAR은

배터리 차량에 유선으로 연결된 상태에서 탑재된 manipulator를 통해 과일을 옮겨주고 회전하여 수확하는 방식이다. 하지만 FAR의 과실을 수확하기 위해 비행하는 방식은, 차량에 유선으로 연결되어 전력 공급하여 비행하는 방식이기 때문에, 넓은 공간의 비행에 제약이 따른다. 또한, 1회 비행시 수확할 수 있는 과일은 1개로 제한되어 생산성 측면에도 비효율적이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는, 과실수확의 자동화를 위한 과실 인식 알고리즘과 과실 수확 메커니즘을 개발하였다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이 딥러닝을 활용한 과일인식 알고리즘은 영상정보 내에서 과일 객체의 픽셀단위 위치와 깊이정보를 파악하여 과일의 상대 위치를 파악할 수 있다. 본 연구에서 개발된 과일 인식 알고리즘을 활용하여 과일 위치를 좌표로 변환하여 드론 비행경로를 제어할 수 있다면 과일 수확을 위한 자동 비행을 수행할 수 있을 것이다. 추가적으로 수확하고자 하는 타겟 과일에 접근 후 구동되는 과실 수확 메커니즘은 하나의 서보모터로 구동된다. 드론 하부에 장착된 서보모터의 회전운동은 Scotch yoke에 의해 선형운동으로 변환되어 gripper link가 전·후방 telescopic 운동을 할 수 있게 한다. Gripper link가 완전히 전개된 후 과실에 접근하여 움켜잡고 link의 회전을 통해 줄기에서 과실을 분리하여 수확하게 된다. 단 하나의 서보모터를 사용함으로써 메커니즘의 배터리 소모를 최소화하여 비행시간을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서 제안하는 과실인식 SW의 성능을 확인하기 가상 시뮬레이션을 활용하여 무인항공기에 탑재된 카메라로 과일 탐지 실현가능성을 확인하였고, 상용 시뮬레이션 SW인 Recurdyn(FunctionBay corporation, Republic of Korea)을 활용하여 다물체 동역학 시뮬레이션을 수행하여 과실 수확 메커니즘에 대한 신뢰성을 확보하였다.

2. 딥러닝 기반 과일 탐지 알고리즘

2.1 과일 탐지 알고리즘

본 연구에서는 과일의 상대위치를 파악하기 위해 카메라를 통한 영상정보를 사용하는 딥러닝 기반의 객체 탐지 알고리즘인 You Only Look Once(YOLO)[9]을 사용하였다. 사용한 YOLO는 학습을 통해 Input으로 받아들인 영상정보 내에서 객체의 위치를 탐지하고 영상 내 픽셀 단위 위치정보(x,y)를 Output으로 반환한다. 이때 사용하는 영상이 스테레오 카메라를 통해 깊이 정보(z)를 가질 수 있다면 이를 조합하여 카메라로부터 객체까지의 상대좌표(x,y,z)를 구할 수 있다. 이를 통해 드론은 수확하고자 하는 과일의 위치까지 비행제어를 통해 이동할 수 있다.

2.2 학습 조건 및 결과

데이터셋으로는 미국 미네소타 주에서 사과 농장의 사진을 통해 제작한 오픈소스 데이터셋을 사용하였다 [10]. 해당 데이터셋은 사과의 사진과 각 사과들의 위치 정보를 가진 Mask로 약 670장의 이미지 속에 41,000개의 사과 위치 정보가 있다. 670장의 이미지를 80%의 학습 데이터셋과 20%의 검증 데이터셋으로 나눠 학습을 진행하였다. 학습된 네트워크는 무인항공기에 탑재되어야 하며 실시간으로 과일을 탐지해야 함으로 네트워크 종류를 이에 적합한 YOLOv3-tiny로 결정하였다. 해당 데이터셋으로 300회의 epoch와 0.001의 초기 학습률로 SGD optimizer를 통해 학습을 진행하여 검증 데이터셋에서 78.2%의 mAP@IOU=0.5를 얻었다.

2.3 시뮬레이션 환경 구성

학습된 딥러닝 네트워크가 무인항공기에 탑재되어 과일 탐지 가능 여부를 검증하기 위해 Fig. 2와 같이 가상 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 이는 ROS 통신

을 지원하는 Gazebo9으로 구축되었으며, PX4의 SITL(Software In The Loop)로 무인항공기(3DR Iris, Arducopter)를 제어한다. 이때, 시뮬레이션 상에서 무인항공기에 부착된 3D 카메라(Realsens D435, Intel)로 획득한 영상정보에서 내부 파라미터 **K**와 외부파라미터 **R**, **T**로 표현되는 카메라 이미지 투영행렬의 역행렬을 통해 2차원 픽셀 위치를 실제 좌표로 나타낼 수 있으며 이에 사용되는 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ 1 \end{bmatrix}$$

2.4 시뮬레이션 결과

Figure 3는 시뮬레이션 상에서 카메라를 통해 받은 영상 정보를 통해 실시간으로 과일의 위치 정보를

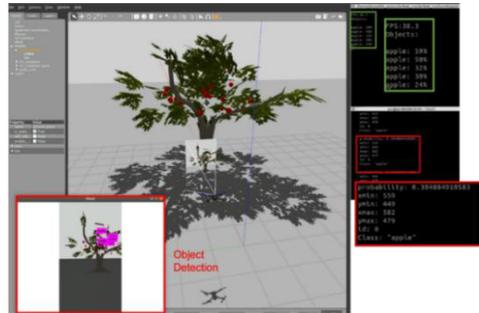


Fig. 3 Simulation result using Gazebo 9[11]

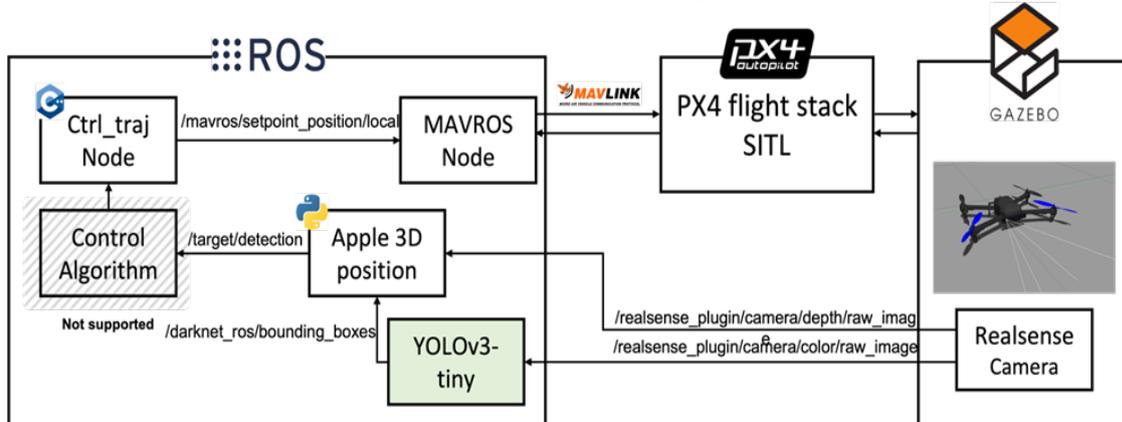


Fig. 2 Configuration of simulation system[11]

반환하는 결과를 보여준다. Ubuntu 18.04 LTS / Ryzen 5 2600 / NVIDIA GTX 1050Ti의 환경에서 약 30fps의 속도로 딥러닝 네트워크를 통해 예측한 위치정보와 확률을 ROS topic으로 받아 과일 탐지를 실시간으로 진행할 수 있음을 보인다.

3. 과일 수확 메커니즘

3.1 메커니즘 구성

과실 수확 메커니즘을 탑재할 드론은 WMD-1200 헥사콥터로 축간 거리는 1200 mm이고 허용 payload는 5 kg이다. 드론의 축간 거리와 payload를 참고하여 과실수확 메커니즘의 Dimension을 최소 900 mm로 설정하고 설정된 목표 과실 수확 질량인 3 kg을 제외한 과실 수확 메커니즘의 질량을 1 kg으로 설계하였다 (Fig.4(a, b)). 과실 수확 메커니즘의 부품 별 질량과 총 질량은 Table 1과 같다.

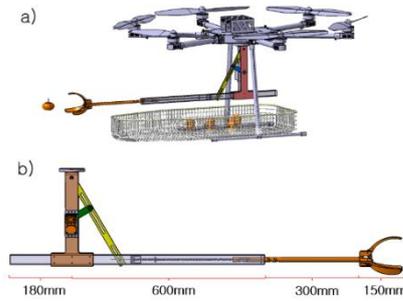


Fig. 4 Drone mechanism for fruit harvesting[12]

- a) drone mounted harvesting system
- b) fruit harvesting mechanism

Table 1 Parts & material & weight of system

부품	재질	질량[g]
Center link	PLA	269
Fixed link	Carbon fiber	110
Gripper link	PLA	143
Out barrel	PLA	97
Motor	Robotis XM540	165
Motor case	PLA	45
Motor flange	SUS304	11
Scotch yoke(crank)	AL70	17
Scotch yoke(slides)	AL70	70
Spring	STEEL	13
Push pull load	SUS304	25
Shaft (motor & slider)	SUS304	20
Total		985

3.2 메커니즘 설계

과실 수확 메커니즘은 Scotch yoke mechanism (Fig. 5 (a)), Barrel cam(Fig. 5 (b)), Lock & Release mechanism(Fig. 5 (c))으로 구성되어 있다. Scotch yoke mechanism은 servo motor, crank arm, slider, push & pull load로 구성되어 있다.

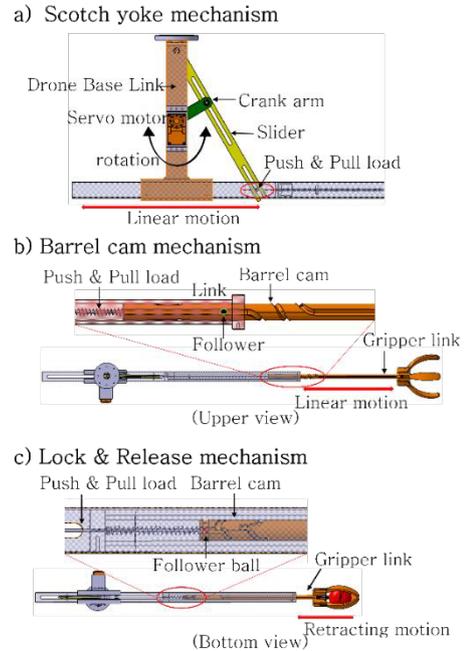


Fig. 5 Mechanism of fruit harvesting with Scotch yoke mechanism and barrel cam [12]

3.3 메커니즘 작동 방식

최종적으로, 제안된 메커니즘은 Fig.6와 같이 아래의 절차를 따라 작동한다.

- a) Servo motor driving: drone base link에 장착된 서보모터의 회전으로 crank arm과 slider를 통해 회전운동을 전·후 선형운동으로 변환시킨다.
- b) Access to fruit: slider의 선형운동은 gripper에 고정되어 있는 push & pull load와 연결되어 모터가 정 방향(시계방향)으로 회전 시 slider는 push & pull load를 전방으로 이동하게 하여 gripper link가 과실에 접근한다.
- c) Grasping and rotating: 과실에 안정적으로 접근한 gripper는 모터의 역방향(시계반대방향) 회전에 의해 gripper가 과실을 움켜잡게 된다. 동시에 gripper link 자체에 설계된 barrel cam이 follower를 통해 회전을 하게 되며 과실을 줄기에서 탈과 시킨다.
- d) Retracting: gripper link는 탈과 된 과실을 움켜

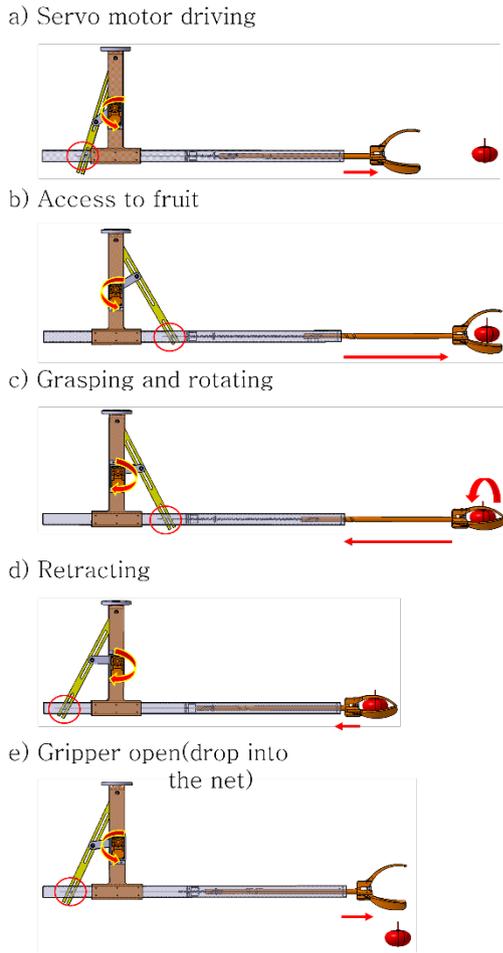


Fig. 6 Procedure of fruit harvesting[12]

잡은 상태에서 모터의 역방향 회전에 의해 원 위치로 돌아가게 된다.

- e) Gripper open(drop into the net): gripper link 가 원 위치에 도착 시 모터의 회전방향을 정방향으로 바꾸게 되면 gripper에 가해지는 부하가 해제되고 gripper 자체에 장치된 압축스프링에 의해 자동으로 열리게 된다.

3.4 분석 및 시뮬레이션

메커니즘 설계 후, 구동 서보모터 선정을 위해 메커니즘 구동에 필요한 힘 분석을 단계별로 수행하였다. Fig. 7에서 표현하였듯이 메커니즘 구동 시 주로 발생하는 반력은 메커니즘 내부의 스프링에서 발생하는 것으로 분석하였다. 과일 수확 메커니즘의 구동 조건은 2번째 스프링이 1번째 스프링보다 강한 강성을 가져야 한다. Gripper가 접히는 과정에서 2번째 스프링이 버티주지 않으면 gripper가 접히지 않는다. 따라서, 2번째 스프링이 1번째 스프링보다 높은 스프링 상수값을 갖도록 아래의 식으로부터 스프링 상수를 결정하여 설

계하였다[13].

$$k = \frac{Gd^4}{8nD^3}$$

k 는 스프링 상수, G 는 전단탄성계수, d 는 선경, n 은 감은 횟수, D 는 외경이다.

Table 2 Each spring properties [14]

	unit	1st spring	2nd spring
G	[N/mm]	7000	7000
d	[mm]	0.4	0.7
n	-	12	300
D	[mm]	8	4
k	[N/mm]	0.0357	0.1073

이와 같이 설계된 스프링 상수를 활용하여 메커니즘을 구동하기 위한 모터 토크를 분석하기 위해 multibody-dynamics 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 상용 SW인 Recurdyn (FunctionBay corporation, Republic of Korea)를 사용하였다. 시뮬레이션 결과, 설계된 스프링상수를 사용할 경우, Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 gripper의 위치에 따라 스프링에

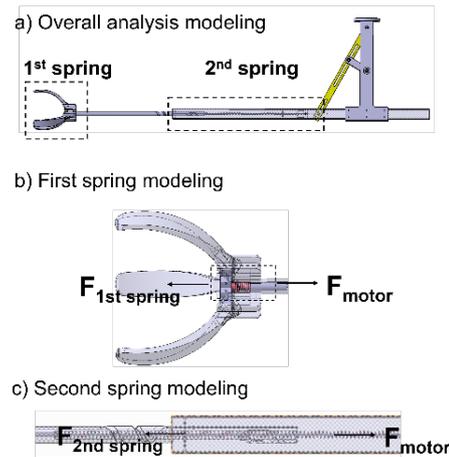


Fig. 7 Characteristic modeling at each spring

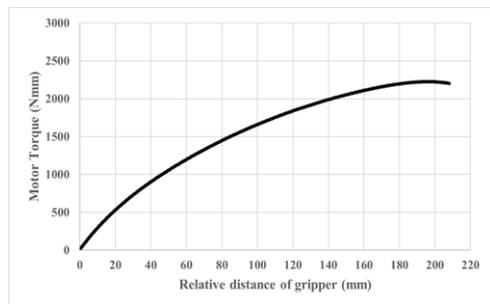


Fig. 8 Torque required to drive the motor according to the relative distance of gripper

의해 반력이 발생하여 모터에 적용되는 최대 부하는

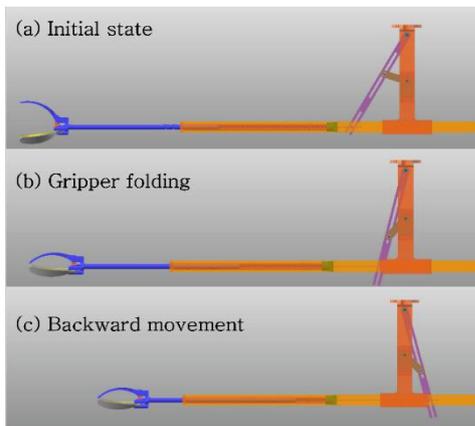


Fig. 9 Multibody Dynamics simulation results

약 2.4 Nm의 토크가 필요한 것을 확인하였다. 석 결과를 바탕으로, 스톱 토크는 10.6 Nm이며 3 Nm 내외의 토크에서 최대 성능을 발휘하는 XM540-W270(ROBOTIS corporation)을 선정하였다. 최종적으로, 시뮬레이션을 통해 메커니즘이 초기상태에서(Fig.9 (a)) gripper가 먼저 접힌 후(Fig.9 (b)) 후방으로 움직이는 것(Fig. 9 (c))을 확인함으로써 과실 수확 메커니즘 구동이 가능한 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 농업 현장에서의 부족한 노동력을 보완하고 안전성을 확보하는 과실 수확용 드론 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 과일 인식 알고리즘과 과일 수확 메커니즘으로 구성되어 있다. 과일 인식 알고리즘은 딥러닝 네트워크 기반으로 구성하였고, 시뮬레이션을 수행하여 실시간으로 과일을 인식하는 것을 검증하였다. 또한, 과일 수확 메커니즘은 과일 수확량을 극대화할 수 있도록 드론 허용 페이로드의 20% 이내인 1 kg이내로 설계하였다. 메커니즘의 구동 신뢰성을 확보하기 위해 상용 시뮬레이션 SW인 Recurdyn을 활용하여 multibody dynamics 시뮬레이션을 수행하였고, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 구동 서보모터를 선정하였다. 최종적으로 서보모터의 구동 토크 범위 내에서 메커니즘이 과실수확을 위한 모션을 수행함을 확인함으로써 과일을 수확할 수 있는 가능성을 확인하였다. 추후에 과일인식 알고리즘과 과일수확 메커니즘을 드론에 통합/탑재하여 운용한다면 높은 위치에 맺힌 과일도 수확할 수 있어 작업 안전성을 높일 수 있을 것이며 여러 대의 드론을 동시에 운용 시 생산성 또한 극대화될 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2020년도 한국항공대학교 교비지원 연구비와 한국연구재단의 4단계 두뇌한국21 사업(과제번호 : 5199990714521)의 지원을 받아 작성되었습니다.

References

- [1] S. Jung, N.V. Sy, T. An, and B. Kim, "Design and test of cable based airborne capture mechanism for drone," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol.14, No.3, pp. 10-16, 2020
- [2] J.Kim, "Mid to Long Term R&D Direction of UAV for Disaster & Public Safety," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol.14, No.5, pp. 83-90, 2020
- [3] M. A. Khan, B. A. Alvi, and A. Safi, and I. U. Khan, "Drones for good in smart cities: a review," *Proc. Int. Conf. Elect., Electron., Comput., Commun., Mech. Comput.*, pp. 1-6, January 2018.
- [4] Y. H. Lee, S. J. Bae, W. Jung, J. Y. Cho, S. H. Hong, W. S. Nam, and J. Y. Kim, "Performance Evaluation Method for Facility Inspection and Diagnostic Technologies," *Journal of the Society of Disaster Information*, vol.16, pp 178-191, 2020.
- [5] I. Bruns, "Drones for power line inspections," *Retrieved December*, Vol.1, 2020.
- [6] Z. Zhang, C. Igathinathane, J. Li, H. Cen, Y. Lu, and P. Flores, "Technology progress in mechanical harvest of fresh market apples," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.175, pp 105606, 2020.
- [7] W. Jia, Y. Zhang, J. Lian, Y. Zheng, D. Zhao, and C. Li, "Apple harvesting robot under information technology: A review," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol.17, pp 1729881420925310, 2020.
- [8] Tevel (tevel-tech.com)
- [9] R. Joseph and A Farhadi. "YOLOv3: An Incremental Improvement." ArXiv. abs/1804.02767, 2018.
- [10] N. Häni, P. Roy, and V. Isler, "MinneApple: A Benchmark Dataset for Apple Detection and Segmentation," *IEEE Robotics and Automation Letters*, pp. 1-1, 2020.
- [11] S. Lee, and B. Kim. "Deep Learning based Real-time Fruit

- Detection System for Harvesting UAV," *Proc. Conf. SASE.*, November 2021.
- [12]K. Joo, B. Hwang, and B. Kim. "Development of Drone mechanism for fruit harvesting," *Proc. Conf. SASE.*, November 2021.
- [13]P. S. Valsange, "Design of helical coil compression spring: A review," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol.2, pp 513-522, 2012.
- [14]M. Taktak, "Dynamic optimization design of a cylindrical helical spring," *Applied acoustics*, vol.77, pp 178-183, 2014.