

자율주행 밭농업로봇의 로터리 경작을 고려한 모델 기반 제어 연구

Study on the Model based Control considering Rotary Tillage of Autonomous Driving Agricultural Robot

송하준¹·양건모²·오장석³·송수환²·한종부[†]·서갑호⁴
Hajun Song¹, Kyon-Mo Yang², Jang-Seok Oh³, Su-Hwan Song²,
Jong-Boo Han[†], Kap-Ho Seo⁴

Abstract: The aims of this paper is to develop a modular agricultural robot and its autonomous driving algorithm that can be used in field farming. Actually, it is difficult to develop a controller for autonomous agricultural robot that transforming their dynamic characteristics by installation of machine modules. So we develop for the model based control algorithm of rotary machine connected to agricultural robot. Autonomous control algorithm of agricultural robot consists of the path control, velocity control, orientation control. To verify the developed algorithm, we used to analytical techniques that have the advantage of reducing development time and risks. The model is formulated based on the multibody dynamics methods for high accuracy. Their model parameters get from the design parameter and real constructed data. Then we developed the co-simulation that is combined between the multibody dynamics model and control model using the ADAMS and Matlab simulink programs. Using the developed model, we carried out various dynamics simulation in the several rotation speed of blades.

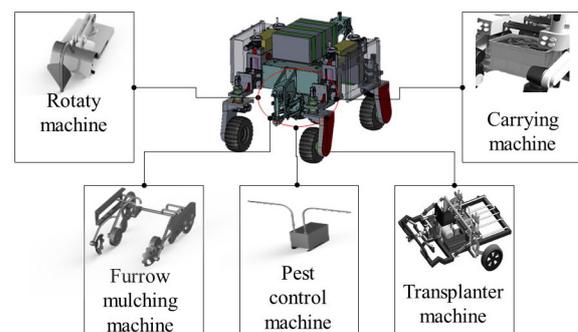
Keywords: Agricultural Robot, Autonomous Control Algorithm, Rotary Machine, Multibody Dynamics, Co-simulation

1. 서론

최근에 농업의 자동화 및 무인화에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있으며¹⁻⁴, 특히 한국에서는 농촌 인력의 고령화 및 여성화로 인한 지능형 농업 로봇에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 논 농사에 활용되는 자율주행 트랙터^{5,6}와 밭농업에 활용되는 지능형 농업 로봇^{7,8}이 대표적인 예이다. 본 논문은

서는 이 중에서도 밭농업의 다양한 작업을 할 수 있는 모듈형 밭농업 로봇의 자율 주행에 관련한 내용을 다루고자 한다.

현재 개발중인 밭농업용 [Fig. 1]과 같이 정식기, 운반기방제기, 휴림피복기, 로터리로 5가지의 작업이 가능하도록 모듈형으로 개발되고 있다⁸.



[Fig. 1] The concept of modular type agricultural robot

Received : Feb. 24. 2020; Revised : May. 25. 2020; Accepted : May. 25. 2020

※ This work was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture and Forestry (IPET) through Advanced Production Technology Development Program, funded by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (317072-04)

1. Assistant Researcher, KETI, Bucheon, Korea (hajunsong90@keti.re.kr)

2. Assistant Researcher, KIRO, Pohang, Korea (kmryang, shsong@kiro.re.kr)

3. Senior Researcher, KIRO, Pohang, Korea (dueleldi@kiro.re.kr)

4. Principal Researcher, KIRO, Pohang, Korea (neoworld@kiro.re.kr),
Affiliate Professor, POSTECH, Pohang, Korea

† Senior Researcher, Corresponding author: KRISO, Daejeon, Korea (jbhan@kriso.re.kr)

[Fig. 1]과 같이 각 기능을 하는 모듈은 이동형 로봇의 중심에 위치하도록 설계되었고, 이동형 로봇의 전원부를 같이 공유하도록 설계되었다. 따라서 이동형 로봇과의 직접연결이 이루어지므로 작업기의 동적 특성이 이동형 로봇의 주행제어에 큰 영향을 미칠 수 밖에 없다. 특히 로터리작업기는 회전날과 노면과의 접촉으로 인하여 발생하는 수직/수평 방향의 반력은 이동형 로봇의 자율주행성을 높이기 위하여 반드시 고려되어야 한다.

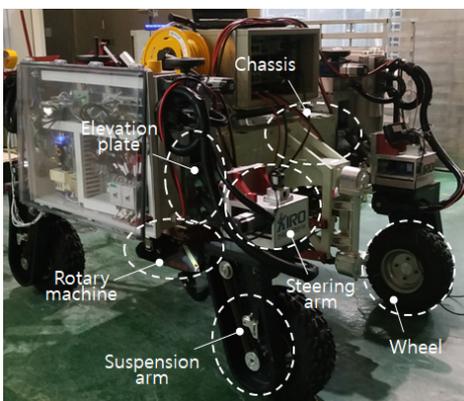
본 논문에서는 로터리 작업기의 동적 특성을 고려한 모델 기반 제어기 개발을 위하여 이동형 플랫폼의 3차원 다물체 동역학 기법을 이용하여 개발되었고, 로터리작업기와 노면의 접촉에 의한 동적 특성 모델을 개발하여 이동형 로봇의 동역학 모델에 포함시켰다. 모델에 기반한 자율주행 제어기는 연성해석(Co-simulation) 기법을 통하여 검증되었다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 챗터2의 1절에서는 로터리 작업기를 포함한 이동형 로봇의 다물체동역학 모델링에 대해서 기술하였다. 2절에서는 모델 기반의 자율주행 제어 알고리즘을 기술하였고, 개발된 두 모델의 연성해석을 위한 해석 환경에 대하여 설명하였다. 챗터 3에서는 개발된 해석 모델을 이용하여 노면 상태를 변경해 가면서 개발된 제어기의 성능을 평가하였다. 끝으로 챗터 4에서는 결론과 추후 연구에 대하여 기술한다.

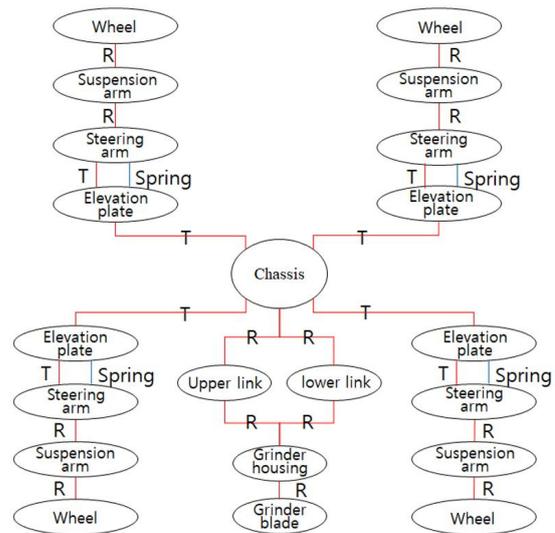
2. 모델링

2.1 발농업로봇의 다물체 동역학 모델링

개발된 모듈형 자율주행 발농업로봇은 [Fig. 2]와 같이 구성되어 있다. 전체 구성은 차체와 상승판, 조향암, 서스펜션암, 구동휠로 구성되어 있고, 추가로 로터리작업기가 연결되어 있다. 이 로봇의 특징은 4개의 독립구동형 주행 휠과 조향 휠이 각각 차체와 서스펜션암에 연결되어 있다. 또한 차체의 자세를 일정하게 유지시키기 위하여 각 모서리 수직방향 위치한 상승



[Fig. 2] The concept of modular type agricultural robot



[Fig. 3] The topology of agricultural robot considering the rotary machine

[Table 1] The specification of body parameters

	Mass (kg)	Moment of inertia (kgm ²)
Chassis	321.29	Ixx=137.23, Iyy=20.80, Izz=142.91
Elevation plate	6.05	Ixx=5.56, Iyy=3.5, Izz=2.21
Suspension arm	30.15	Ixx=2.48*10 ³ , Iyy=2.48*10 ³ , Izz=9.95*10 ⁴
Housing	18.28	Ixx=1.23*10 ² , Iyy=6.2*10 ³ , Izz=6.2*10 ³
Wheel	100.0	Ixx=2.6, Iyy=2.6, Izz=2.6
Rotary - L/U arm	1.32	Ixx=2.78*10 ³ , Iyy=2.49*10 ³ , Izz=1.34*10 ³
Rotary - housing	30.00	Ixx=1.64, Iyy=1.47, Izz=0.53*10 ³
Rotary - blade	7.78	Ixx=0.22, Iyy=0.22, Izz=6.83*10 ²

[Table 2] The specification of force elements

	Spring stiffness (N/m)	Damping coef. (N/m/s)
Spring-Damper (suspension)	1.0E+008	1.0E+004
Spring-Damper (Tire contact)	250000	10000
Grinder-Ground	1.0E+007	20.0
Rotation spring damper	600.0 (Nm/rad)	50(Nms/rad)

판을 제어하는 자세제어모터가 연결되어 총 12개의 구동기가 연결되어 있다. 이때, 이동형 플랫폼의 총 크기는 전장 1850 mm, 전폭 1725 mm, 전고 1100 mm이고, 일반 동작 속도 1 m/s로 제작되었다.

모듈형 자율주행 발농업로봇은 다물체동역학 모델링을 위하여 [Fig. 3]과 같은 토폴로지를 구성하였다. [Fig. 3]에서는 총 21개의 물체와 8개의 병진조인트, 13개의 회전조인트로 정의 되었다. [Fig. 3]은 구동부 및 서스펜션이 연결된 서브시스템 4개가 똑같은 구조로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 하나의 서브시스템은 12자유도로 설계되었고, 차체와 로터리 기계의 자유도를 고려하면 개발된 다물체 동역학 모델은 총

21자유도를 가지고 있다. 또한 각 물체의 질량 및 관성 정보와 힘 요소 정보는 [Table 1]과 [Table 2]에 각각 나타내었다⁸⁾.

실제 노면과 유사하도록 모델링하기 위하여 평면한 노면과 일정 주파수를 가지는 정현파 함수형태로 표현하였다. 본 논문에서는 노면의 침하나 변형을 고려하지 않았다.

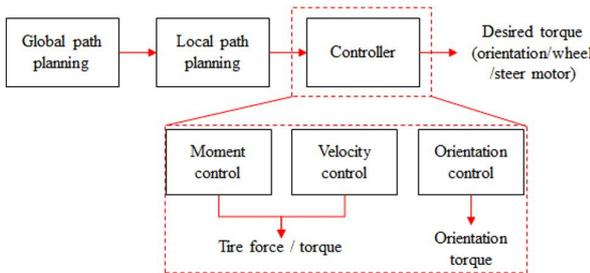
2.2 직진주행 및 자세 제어 알고리즘

2.2.1 자율주행제어 알고리즘 개념

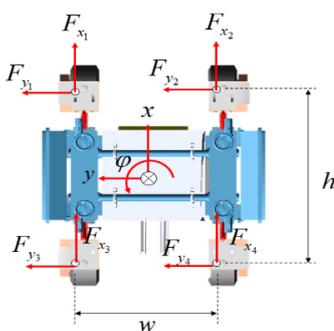
발농업 로봇의 자율주행 알고리즘 구성은 [Fig. 4]와 같이 표현 할 수 있다. 우선 작업 전 지시되는 전역경로계획에 대한 입력이 있고, 발농업 로봇이 이동하면서 장애물 회피 및 위치 오차 보정을 할 수 있도록 로컬경로계획이 있다. 이 결과에서부터 로봇이 로컬 경로 위치값과(오차 포함), 주행속도, 노면 값이 제어기 쪽에 인가되게 된다. 개발된 제어기는 해당 상황을 이용하여 주행제어모터, 자세제어모터, 조향각 제어 모터의 토크값을 각각 계산하게 된다. 이때 제어기는 각각 모멘트 제어기와 속도 및 자세 제어기가 포함되어 있다⁹⁻¹²⁾. 본 논문에서는 제어기를 자세히 다루었다.

2.2.2 차량 모멘트 및 속도 제어

본 논문에서는 차체의 회전 방향(yaw)에 대한 오차 보정을 위하여 제어 모멘트를 추정하고 그 값을 제어하기 위한 중방향 및 횡방향 타이어력을 계산하는 방식을 채택하였다^{13,14)}. [Fig. 5]와 같은 4휠 구조의 발농업로봇의 제어 모멘트는 식 (1)



[Fig. 4] Concept of autonomous algorithm of agricultural robot



[Fig. 5] Definition of force vector

과 같이 표현할 수 있다. 여기서, I_{zz} 는 차체의 관성모멘트, e_φ 와 \dot{e}_φ 는 회전 오차 및 속도 오차, K_φ^p 와 K_φ^d 는 각각 게인값을 의미한다.

$$M_c = I_{zz} (K_\varphi^d \dot{e}_\varphi + K_\varphi^p e_\varphi) - M_d - M_b \quad (1)$$

M_d 는 외부 힘에 의해 발생하는 외란 모멘트로 식 (2)와 같이 정의 할 수 있다. 여기서 F_x 와 F_y 는 각 타이어에서 발생하는 중방향, 횡방향 힘이고, w, h 는 축거, 축간 거리를 의미한다.

$$M_d = \frac{h}{2} F_{y_1} + \frac{w}{2} F_{x_1} + \dots - \frac{h}{2} F_{y_4} + \frac{w}{2} F_{x_4} \quad (2)$$

M_b 는 로터리작업기에 의해서 발생하는 외란을 의미한다. 로터리 작업기는 독립적으로 구동되며, 블레이드의 회전속도는 제어 범주가 아니다. 여기서는 블레이드의 회전속도에 따른 중방향 반력을 추정하였다. 회전에 대한 운동에너지는 $T\Delta\theta = I_y \omega^2 / 2$ 와 같이 표현할 수 있으며 식 (3)과 같이 블레이드의 회전속도(ω_b)와 노면과의 접촉되는 날과 중심까지의 거리(l_i)로 관한 식으로 표현할 수 있다. 여기서 $\Delta\theta$ 는 각 블레이드와 노면이 접촉되는 회전각으로 본 논문에서는 30 deg로 설정하였다. 총 블레이드는 8개로 되어 있고, 두 개씩 180도 위상차이로 연결되어 로터리 작업기가 반바퀴 돌 때 4번의 지면 접촉이 발생한다.

$$M_b = 2 \sum_{i=1}^4 F_{x_i} l_i \quad (3)$$

where,

$$F_x = \frac{I_y \omega_b^2}{2R_b \Delta\theta}, R_b = 0.016m, \Delta\theta \approx \pi / 6rad$$

차량의 속도 제어는 식 (4)와 같이 타이어의 중방향에 의한 제어 가능 중방향 힘을 추정하고, 오차를 보정하도록 설계하였다.

$$F_{x_d} = m \left(K_v^i \int e_v dt + K_v^p e_v \right) \quad (4)$$

where,

$$e_v = \dot{v}_{x_d} - \dot{v}_x, \dot{v}_x = K_v^p e_v + K_v^i \int e_v dt$$

2.2.3 타이어력 분배

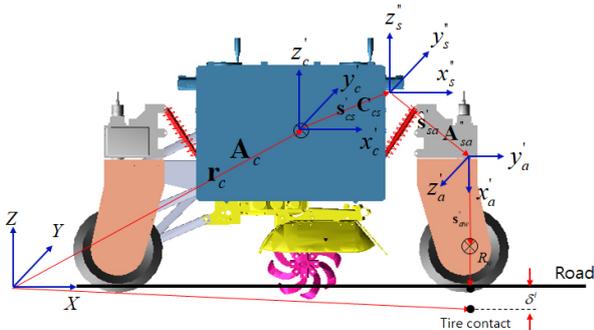
이 절에서는 타이어의 현재 상태를 고려하여 필요한 타이어력을 분배하기 위해서 개발된 알고리즘을 기술한다. 4휠에 대한 중방향 타이어력을 수직방향힘을 고려한 최적화 식 (5)를 통해서 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$J = \sum_{i=1}^4 \left[\frac{(F_{x_i})^2}{(\hat{F}_{z_i})^2} \right], \frac{\partial J}{\partial F_{x_i}} = 0 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} 2W_1/\hat{F}_{z_1}^2 + 2/\hat{F}_{z_3}^2 & 0 \\ 0 & 2W_2/\hat{F}_{z_2}^2 + 2/\hat{F}_{z_4}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x_d}^1 \\ F_{x_d}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{x_d}/\hat{F}_{z_3}^2 - 2M_c/\hat{F}_{z_3}^2 l_w \\ F_{x_d}/\hat{F}_{z_4}^2 - 2M_c/\hat{F}_{z_4}^2 l_w \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, 계산된 종방향 타이어력은 $T^i = R_w F_x^i$ 으로 휠 토크로 환산된다. 여기서, 식 (8)을 계산하기 위해서는 매 스텝마다 수직방향 타이어력을 추정해야만 한다. 수직방향 타이어력을 추정하기 위해서 [Fig. 6]과 같은 기구학적 관계를 정의하였다^{8,9)}.

기구학관계에 의해서 식 (7)과 같이 타이어가 변형될 수 있는 변형을 추정할 수 있다. 또한 추정된 변형값을 이용하여 $\hat{F}_{z_i} = K_i \delta_i^z$ 의 식을 통해 식 (6)의 수직방향 힘을 추정할 수 있다. 여기서, K_i 는 타이어의 수직방향 강성 계수를 의미한다. 여기서, \mathbf{r}_c 는 로봇의 차체 무게중심점의 전역 위치를 의미하고, GPS를 이용하여 지속적으로 계측된다. \mathbf{A}_c 행렬은 X-Y-Z 좌표에서 $x'_c - y'_c - z'_c$ 사이의 좌표변환 행렬을 의미하고, 차체에 부착된 IMU 센서를 이용하여 계측된다. \mathbf{s}'_{cs} 벡터는 상수항으로 $x'_c - y'_c - z'_c$ 좌표에서 $x''_a - y''_a - z''_a$ 사이의 좌표변환행렬을 의미한다. $\hat{\mathbf{s}}'_{sa}$ 는 $x''_s - y''_s - z''_s$ 좌표에서 $x''_a - y''_a - z''_a$ 사이의 거리 벡터로 상승판 모터의 엔코더로 측정된 회전각 및 수직방향 이동거리를 통해서 추정한다. \mathbf{A}'_{sa} 는 $x''_s - y''_s - z''_s$ 좌표에서 $x''_a - y''_a - z''_a$ 사이의 좌표변환 행렬을 의미하고, 조향 모터의 엔코더를 이용하여 회전각 계측을 통해서 계산된다. R_w 는 타이어의 반지름을 의미한다. K_{tire} 는 타이어의 수직방향 강성 계수를 의미 한다.



[Fig. 6] Vector definition for computation of vertical tire force

$$\delta^i = [\mathbf{r}_c + \mathbf{A}_c \mathbf{s}'_{cs} + \mathbf{A}_c \mathbf{C}_{cs} \hat{\mathbf{s}}'_{sa} + \mathbf{A}_c \mathbf{C}_{cs} \mathbf{A}'_{sa} \mathbf{s}'_{aw}]_3 \quad (7)$$

2.2.4 자세제어 알고리즘

발농업 로봇의 하면에 위치한 로터리작업기 성능을 확보하기 위하여 일정한 속도로 이동해야하는 것뿐만 아니라 차체의 일정한 자세 유지가 필요하다. 이를 위하여 차체 모서리에 수직으로 이동하는 상승판이 위치하고 있고, 모터 제어를 통하여 차체와 서스펜션암 사이의 로컬 위치 값을 조절해준다. 이 조절을 위해서 [Fig. 7]과 같이 차체와 각 모터의 벡터를 정의하였고, 식 (8)과 같이 각 지점의 위치 값을 추정하여 오차 제어 식을 유도하였다.

$$\eta_i = K_i^p e_i^z + K_i^d \dot{e}_i^z \quad (\text{for } i = 1, 2, 3, 4) \quad (8)$$

where,

$$W_1 K_i^d < K_i^p, W_1 : \text{damping coefficient (always positive)}$$

여기서 e_i^z 와 \dot{e}_i^z 는 각 모서리의 위치 및 속도 오차로 식 (9)와 (10)과 같이 같이 계산할 수 있다. 여기서 ϕ 와 θ 는 롤 및 피치 각이다.

$$e_i^z = [\mathbf{A}_{COG} \mathbf{s}'_i]_z \quad (\text{for } i = 1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

where,

$$P_i = \mathbf{r}_{COG} + \mathbf{A}_{COG} \mathbf{s}'_i$$

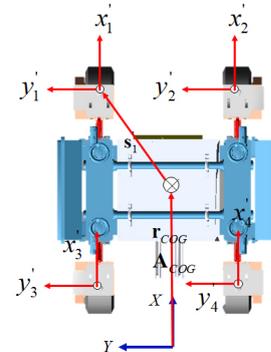
$$\mathbf{A}_{COG} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$\dot{e}_i^z = [\mathbf{B}(\theta) \mathbf{A}(\phi) \mathbf{s}'_i \dot{\theta} + \mathbf{A}(\theta) \mathbf{B}(\phi) \mathbf{s}'_i \dot{\phi}]_z \quad (10)$$

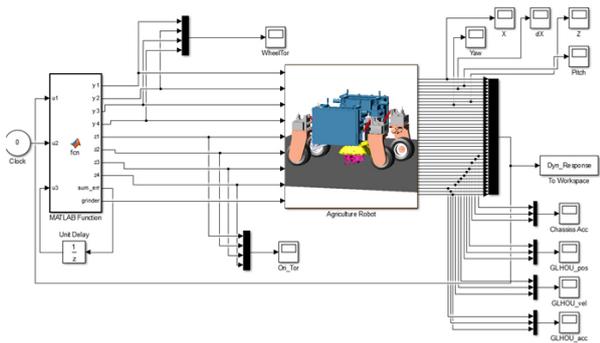
(for $i = 1, 2, 3, 4$)

where,

$$\mathbf{B}(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin \theta & 0 & \cos \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos \theta & 0 & -\sin \theta \end{bmatrix}, \mathbf{B}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \phi & -\cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \end{bmatrix}$$



[Fig. 7] Vector definition for computation of body position of elevation plate



[Fig. 8] Modeling for Matlab Simulink-ADAMS co-simulation

3. 해 석

3.1 연성해석 모델

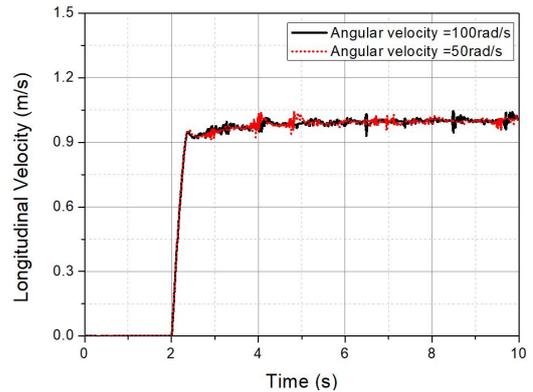
앞서 개발된 속도제어/자세제어/모멘트제어를 포함하는 자율주행제어 알고리즘을 다양한 해석 기반의 검증을 수행하였다. 이를 위하여 앞서 설명된 로터리 작업기가 연결된 발농업 로봇의 3차원 다물체 동역학 모델과 자율주행제어 알고리즘을 연성하는 [Fig. 8]과 같은 해석 모델을 개발하였다.

이 해석에서는 다물체 동역학 모델은 ADAMS 내에 포함된 HHT (Hilber-Hughes-Taylor)^[15] 적분기를 선정하여 수치적으로 안정된 해를 도출시키도록 하였고, Matlab 환경에서는 로터리의 회전속도에 대한 제어기 성능평가를 위한 인터페이스 부분을 개발하였다. 여기서, ADAMS의 입력으로 구동모터, 자세제어모터, 조향 모터 및 로터리 회전 속도가 입력되고, ADAMS의 출력으로는 차체의 병진 방향 위치, 속도, 회전 방향의 롤 각, 피치 각, 요 각, 롤 각속도, 피치 각속도, 요 각속도를 출력한다. 이 값들은 추후 실제 시스템에 적용하기 위해서 반드시 계측되어야 하는 값이다.

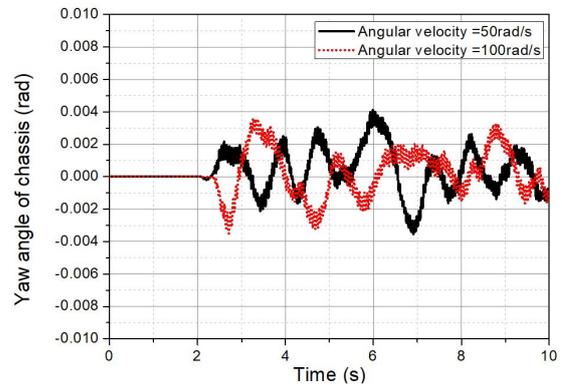
3.2 일반노면의 직진주행해석

이번 절에서는 일반 평지노면에서의 직진주행해석을 통하여 로터리 작업기의 회전 속도에 대한 직진 및 속도 추종성에 대해서 검토하였다. 해석조건에는 블레이드의 회전속도를 50 rad/s와 100 rad/s로 구동시키며, 주행해석을 수행하였다. 이때 인가된 종방향 속도는 1 m/s이고 자세 유지를 0도로 하였다. 해석의 수치안정성을 높이기 위하여 동적평형상태인 2초에서 시작된다.

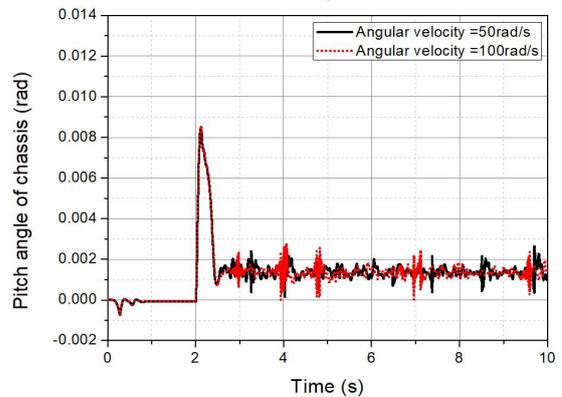
[Fig. 9]는 차체의 종방향 속도와 피치와 요각을 각각 보여 준다. 블레이드 회전에 종방향 속도가 1 m/s 부근에서 동작함을 보였고, RMS오차 약 0.11 m/s로 확인되었다. 블레이드 구동에 상관없이 유사한 결과를 보였다.



(a) Longitudinal velocity of chassis



(b) Pitch angle



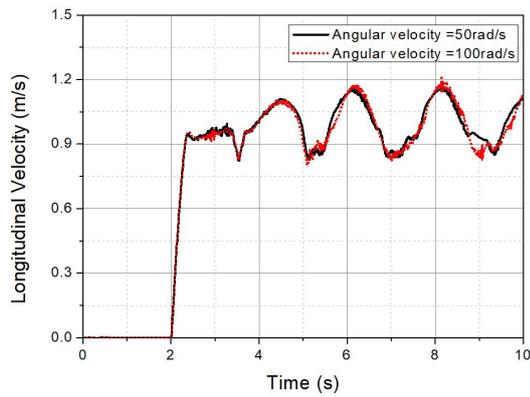
(c) Yaw angle

[Fig. 9] Simulation results on normal load

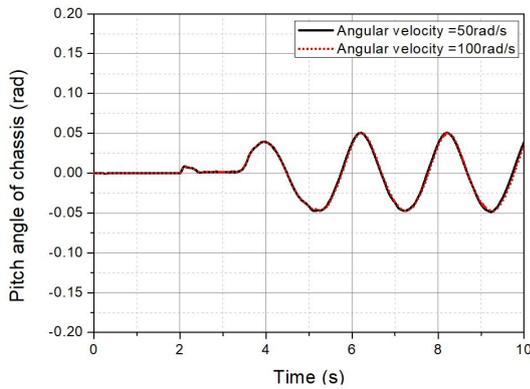
3.3 굴곡노면의 주행해석

이번 절에서는 정현파 함수로 생성된 굴곡노면에 대한 직진주행해석을 통하여 로터리 작업기의 회전 속도에 대한 직진 및 속도 추종성에 대해서 검토 하였다. 이대 사용된 범프는 0.5 hz 주기와 0.2 m의 진폭으로 설정하였다.

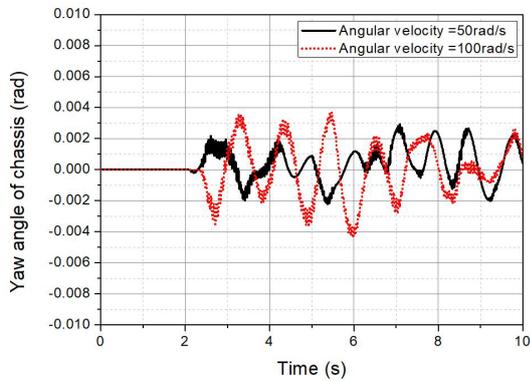
[Fig. 10]은 차체의 종방향 속도와 피치와 요각을 각각 보여 준다. 블레이드 회전에 종방향 속도가 1 m/s 부근에서 동작함을 보였다. 종방향 속도의 RMS오차는 약 0.148 m/s, 1.52 m/s, 피치각과 요각의 RMS오차는 약 0.03 rad, 0.001 rad 으로 확인되었



(a) Longitudinal velocity of chassis



(b) Pitch angle



(c) Yaw angle

[Fig. 10] Simulation results on sinusoidal bump

다. 마찬가지로 블레이드 구동에 상관없이 유사한 결과를 보였다.

이러한 두가지 결과는 블레이드 날의 좌우 균형적으로 날을 설계하고, 설치 위치를 로봇의 무게중심점과 근접하게 함으로써 외란모멘트를 낮추는 설계를 했기 때문으로 판단된다.

4. 결론 및 추후연구

본 연구를 통해서 로터리작업기가 부착된 발농업로봇 자율주행제어 알고리즘의 모델 기반 제어기를 개발하고, 이를 검증할 수 있는 연성해석모델을 개발하였다. 또한 로터리 작업

기의 속도를 변화시켜 가면서 발농업 로봇의 동적 특성을 분석하고, 제어에 의한 제어 가능성을 확인하였다. 해석결과 로터리의 회전속도와는 제어 영향이 없음을 확인하였다. 이는 회전날의 좌우 균형과 시스템의 무게중심위치와 거의 유사하도록 설계되어 로봇의 외란 모멘트를 크게 증가시키지 않았음을 알 수 있었다. 본 논문의 결과를 통해서 사전에 개발된 로봇의 동적 특성을 이해하고, 제어기 검증을 수행함으로써 개발 시간을 단축을 기대하고 있다. 또한 본 논문에서 제안된 해석 기법을 이용하여 이후 토양의 영향에 따른 제어기 평가 및 제어기 향상 연구에 활용이 가능하다.

추후, 개발된 제어기를 탑재한 실제 환경에서의 실험을 수행하고 비교할 예정이다.

References

- [1] A. Suprem, N. Mahalik, and K. Kim, "A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector," *Computer Standards & Interfaces*, vol. 35, no. 4, pp. 355-364, 2013, DOI: 10.1016/j.csi.2012.09.002.
- [2] D. Ball, B. Uproft, G. Wyeth, P. Corke, A. English, P. Ross, and A. Bate, "Vision-based obstacle detection and navigation for an agricultural robot," *Journal of field robotics*, vol. 33, no. 8, pp. 1107-1130, 2016, DOI: 10.1002/rob.21644.
- [3] R. F. Carpio, C. Potena, J. Maiolini, G. Ulivi, N. B. Rosselló, E. Garone, and A. Gasparri, "A Navigation Architecture for Ackermann Vehicles in Precision Farming," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 1103-1110, 2020, DOI: 10.1109/LRA.2020.2967306.
- [4] P. Huang, Z. Zhang, and X. Luo, "Feedforward plus pro-portional-integral-derivative controller for agricultural robot turning in headland," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 1, 2020, DOI: 10.1177/1729881419897678.
- [5] M. Watanabe and K. Sakai, "Numerical analysis of steering instability in an agricultural tractor induced by bouncing and sliding," *Biosystems Engineering*, vol. 192, pp. 108-116, 2020, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2020.01.014.
- [6] W. Purbowaskito and M. Telaumbanua, "Simulation Study of Kalman-Bucy filter Based Optimal Yaw Rate Control System for Autonomous Tractor," *Earth and Environmental Science*, vol. 355, no. 1, 2019.
- [7] J. B. Han, K. M. Yang, D. H. Kim, and K. H. Seo, "A Modeling and Simulation based on the Multibody Dynamics for an Autonomous Agricultural Robot," *In 2019 7th International Conference on Control (ICCMA)*, pp. 137-143. IEEE. 2019, DOI: 10.1109/ICCMA46720.2019.8988607.
- [8] E. J. Haug, *Computer aided kinematics and dynamics of mechanical systems*, Boston: Allyn and Bacon, 1989, [Online], https://books.google.co.kr/books/about/Computer_Aided_Kinematics_and_Dynamics_o.html?id=n1ZGAAAAYAAJ&redir_esc=y.

- [9] C. Woo, N. U. Lee, and T. S. Yoon, "Mecanum wheel, Mobile robot, Trajectory tracking, Impedance control, Integral sliding mode control," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 13, no. 4, pp. 265-271, 2018, DOI: 10.7746/jkros.2018.13.4.256.
- [10] H. Hong, J. B. Han, H. Song, S. Jung, S. S. Kim, W. S. Yoo, M. Won, and S. Joo, "Path Tracking Control of 6X6 Skid Steering Unmanned Ground Vehicle for Real Time Traversability," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, vol. 41, no. 7, pp. 599-605, 2017, DOI: 10.3795/KSME-A.2017.41.7.599.
- [11] J. Kang, W. Kim, J. Lee, and K. Yi, "Design, Implementation, and Test of Skid Steering-based Autonomous Driving Controller for a Robotic Vehicle with Articulated Suspension," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 793-800, 2010, DOI: 10.1007/s12206-010-0115-z.
- [12] S. Hong, J.-S. Choi, H. W. Kim, M. C. Won, S. C. Shin, J. S. Rhee, and H. Park, "A Path Tracking Control Algorithm for Underwater Mining Vehicles," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 23, pp. 2030-2037, 2009, DOI: 10.1007/s12206-009-0436-y.
- [13] K. Krzysztof and P. Dariusz, "Modeling and Control of a 4-wheel Skid-steering Mobile Robot," *International journal of applied mathematics and computer science*, vol. 14, pp. 477-496, 2004, [Online], <http://matwbn.icm.edu.pl/ksiazki/amc/14/amc1445.pdf>.
- [14] J. Yi, D. Song, J. Zhang, and Z. Goodwin, "Adaptive Trajectory Tracking Control of Skid-steering Mobile Robots," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 10-14, 2007, DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363858.
- [15] M. H. Kim, H. J. Song, and S. S. Kim, "A non-iterative implicit integration method using a HHT- α integrator for real-time analysis of multibody systems," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 33, no. 3, pp.1087-1096, 2019, DOI: 10.1007/s12206-019-0208-2.



송 하 준

2015 충남대 메카트로닉스공학(학사)
2018 충남대 메카트로닉스공학(석사)
2015~현재 한국전자부품연구원 주임연구원

관심분야: 다물체 동역학, 실시간 물리엔진, 다관절 매니퓰레이터 제어



송 수 환

2014 안동대 기계설계공학(학사)
2016 안동대 기계설계공학(석사)
2018~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원

관심분야: 기구설계, 농업용로봇



양 견 모

2011 세종대 디지털콘텐츠 학과(학사)
2014 연세대 컴퓨터과학(석사)
2018~현재 한국로봇융합연구원 주임연구원

관심분야: 인공지능, 지식추론, 상황인식



한 종 부

2009 충남대 메카트로닉스공학(학사)
2011 충남대 메카트로닉스공학(석사)
2018 충남대 메카트로닉스공학 (박사)
2020 한국로봇융합연구원 선임연구원
2020~현재 선박해양플랜트연구소 선임연구원

관심분야: 다물체동역학, 유연체동역학, 실시간 물리엔진, 자율주행로봇



오 장 석

2004 고려대 전자및정보공학과(학사)
2006 고려대 전자정보공학과(석사)
2016 고려대 전자정보공학과(박사)
2018~현재 한국로봇융합연구원 선임연구원

관심분야: 3차원 복원, 딥러닝, 농업용 로봇, 영상처리, 자율주행



서 갑 호

1999 고려대 전기공학과(학사)
2001 KAIST 전기전자공학과(석사)
2009 KAIST 전기전자공학과(박사)
2009~현재 한국로봇융합연구원 책임연구원
2020 포항공과대학교 기계공학과 겸임교수

관심분야: 지능제어, 임베디드 시스템, 영상처리