

로봇 매니플레이터 개발을 위한 기구학적 분석

Kinematics for Development of the Robot Manipulator

민병로* 김 옹* 김동우* 서광욱* 이창우* 이대원*
정희원 정희원 정희원 정희원
B.R. Min* W. Kin* D.W. Kim* K.W. Seo* C.W. Lee* D.W. Lee*

1. 서론

산업의 발전과 더불어 농업인구는 해마다 감소하고 있으며 농업 연령층은 고령화 현상이 나타나고 있다. 전체 농가인구와 호당 농업인구가 줄어들고 있는데 반해 호당 경지면적은 매년 증가하고 있다. 노동력은 농업생산비의 가장 큰 비중을 차지하고 있고, 농가의 연령층 또한 고령화가 되어가고 있음을 고려해 본다면 농업의 기계화·자동화의 필요는 절대적이다.

수확은 재배 과정 가운데 노동력, 시간 및 비용이 가장 많이 소요되는 작업이다. 본 연구는 수확용 매니플레이터의 개발을 위한 기구학적 분석을 하는 것이다. 구체적인 연구 목적은 매니플레이터의 정방향 기구학 및 역방향 분석을 통해 방정식을 구한 후 장치를 작동시켜 반복오차를 측정 한 후 이 값을 이론 값과 비교하여 검증하도록 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 매니플레이터의 Kinematics

본 연구에 사용된 매니플레이터는 엔드이펙터까지 한 개의 수직 관절과 두개의 회전관절을 포함 총 3개의 자유도로 구성되어 있다.

Fig. 1은 매니플레이터 각 부분의 길이와 엔드이펙터의 위치를 나타낸 것이고, Fig. 2에서 매니플레이터 링크계는 1개의 수직관절, 2개의 회전관절과 엔드이펙터 부분까지 총 네 쌍의 인자로 구성되었다.

계를 전달함수 ${}^i-1T$ 의 일반적 형태를 이용하여 각각의 링크인자를 구하면 Table 1과 같다.

* 성균관대학교 생명공학부 바이오메카트로닉스학과

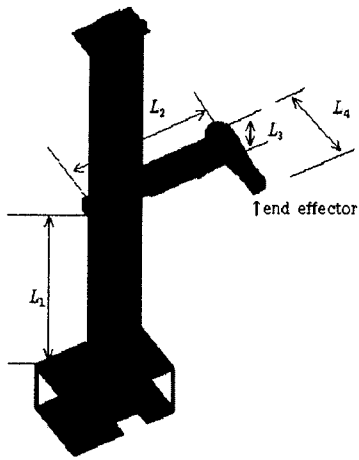


Fig. 1 Schematic diagram of manipulator

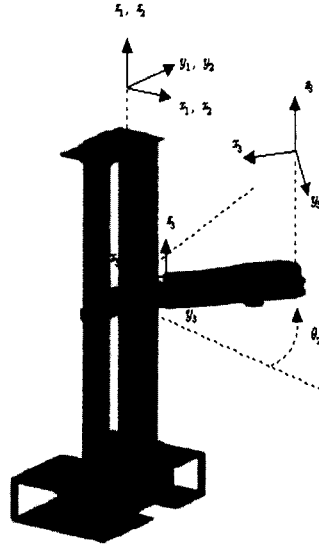


Fig. 2 Denavit-Hartenberg parameters of the links of a manipulator

Table 1 Link factors of the cucumber harvesting robot

Link \ Factor	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	L_1	45°
2	0	0	0	θ_2
3	L_2	0	L_3	$180 + \theta_3$
4	L_4	0	0	0

각 링크인자로부터 각각의 Transformation matrix를 구하면

$${}^0_1T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{pmatrix} -\cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & L_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

이고, 이를 이용해 0_2T , 2_4T 를 구하면 다음과 같다.

$${}^0_2T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^2_4T = {}^2_3T \cdot {}^3_4T = \begin{pmatrix} -\cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 & -L_4 \cos \theta_3 + L_2 \\ -\sin \theta_3 & -\cos \theta_3 & 0 & -L_4 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

이를 이용하여 3개의 자유도를 갖는 전달함수 0_4T 를 구하면 다음과 같다.

$${}^0_4T = {}^0_2T \cdot {}^2_4T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

나. 매니플레이터의 Inverse Kinematics

정방향기구학은 θ_2, θ_3 의 인자 값을 이용하여 원점을 기준으로 목표 지점의 위치벡터와 방향행렬을 구하는 것이고, 역기구학은 반대의 경우를 생각하는 것이다. 원점을 기준으로 하여 공간상에 장치의 위치벡터가 주어지면 이로부터 θ_2, θ_3 값을 계산하는 것이 Inverse kinematics인 것이다. 역기구학을 구하는 여러 가지 방법 가운데 삼각함수를 이용한 기하학적 방법을 이용하기로 하였다.

매니플레이터의 원점에 대한 위치벡터 $P = (P_x, P_y, P_z)$ 를 나타내면 Fig. 3과 같다.

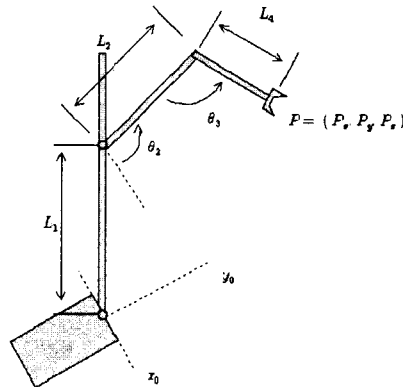


Fig. 3 Parameter signals of the position and angle vectors of links

매니플레이터는 하나의 수직 축과 두개의 회전관절로 총 3개의 자유도를 가지고 있다. 역기구학으로 얻어야 할 인자 값은 L_1, θ_2, θ_3 값이다. 기준좌표계에 대한 위치벡터 $P = ($

P_x, P_y, P_z)가 주어졌으므로 이로부터 L_1 값은 P_z 로부터 구할 수 있다. θ_2, θ_3 의 값을 구하기 위해 기준 좌표계의 x_0, y_0 로 이루어진 2차원 평면에 P_x, P_y 를 나타낸 후, 이 가운데 가장 적절한 해를 결정해야 한다. 해는 각 관절이 이동할 수 있는 범위와 장애물 및 이동 효율성 등을 고려한 후 선택한다. $\theta_{2-b} = \theta_2 - 2\alpha, \theta_{3-b}$ 에 cos 법칙을 적용하여

$$\cos \theta_3 \text{를 구하면 } d^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos \theta_3, \cos \theta_3 = \frac{L_1^2 + L_2^2 - d^2}{2L_1L_2} \text{이다.}$$

$$\text{따라서 } \theta_3 \text{는 } \cos^{-1} \left(\frac{d^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right) \text{이다.}$$

$$\phi \text{와 } \alpha \text{를 각각 구하면 } \phi = \cos^{-1} \frac{P_x}{d}, \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{L_3 \sin \theta_3}{L_2 - L_3 \cos \theta_3} \right) \text{이다.}$$

다. 실험 방법

기구학적 분석에 의한 매니플레이터의 작동은 정방향(Kinematics) 및 역방향(Inverse kinematics)의 경우에 대해 세 가지 측정변수(Factor)를 적용하여 Table 2와 같이 실험설계 하였다.

Table 2 Experimental design

Factor 2	Factor 1		θ_2 (X)								
	Value	Error	50 (-50)			60 (0)			70 (50)		
			x	y	z	x	y	z	x	y	z
θ_3 (Y)	210 (330)		A-1 (B-1)			A-4 (B-4)			A-7 (B-7)		
	240 (380)		A-2 (B-2)			A-5 (B-5)			A-8 (B-8)		
	270 (430)		A-3 (B-3)			A-6 (B-6)			A-9 (B-9)		

() : Measure by Inverse-Kinematics

()로 표시된 부분은 역방향기구학에 의해 측정된 실험이고, ()로 표시되지 않은 부분은 정방향기구학에 의한 것이다.

3. 결과 및 고찰

Table 2의 실험설계 순서를 기준으로 매니플레이터를 목표지점까지 이동시켜 발생하는 오차를 10회 반복 측정하여 평균값을 나타내었다. 정방향 기구학에 의한 측정결과는 Table 3, Table 4, Table 5에 나타내었다.

Table 3 50mm translation from Z axis by kinematics

< unit : mm >

Theta 2		θ_2									
		50			60			70			
Theta 3	Degree	Error	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	θ_3		210	2.05	1.45	1.35	1.10	1.00	1.15	1.05	1.75
240		2.20	1.85	1.20	1.20	0.83	1.05	1.85	1.20	0.90	
270		2.40	1.95	0.95	1.30	1.50	1.20	0.80	0.80	1.20	

Table 4 100mm translation from Z axis by kinematics

< unit : mm >

Theta 2		θ_2									
		50			60			70			
Theta 3	Degree	Error	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	θ_3		210	1.95	1.15	1.45	1.25	1.20	1.25	1.20	1.55
240		2.15	1.60	1.55	1.20	1.10	1.30	1.65	1.40	1.05	
270		1.80	1.90	1.25	1.35	1.45	1.20	1.00	0.95	1.10	

Table 5 150mm translation from Z axis by kinematics

< unit : mm >

Theta 2		θ_2									
		50			60			70			
Theta 3	Degree	Error	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	θ_3		210	2.15	1.40	1.50	1.55	1.30	1.20	1.25	1.40
240		2.30	1.35	1.55	1.30	1.15	1.40	1.55	1.35	1.05	
270		2.00	1.75	1.20	1.45	1.35	1.25	1.20	1.15	1.15	

Z축이 150mm일때 오차의 범위는 2.15~1.15로 나타났다. A-1, A-2 지점은 평균 1.68, 1.73mm로 가장 큰 오차가 발생하였고 A-8, A-9 지점에서는 평균 1.05, 1.15mm로 가장 작은 오차가 발생하였다.

X, Y, Z축 가운데 X축의 오차는 평균 1.56mm로 가장 크게 나타났으며, Z축 오차는 평균 1.23mm로 가장 작게 나타났다. Z축에 변화에 따른 정방향기구학의 반복오차에서 A-1, A-2, A-3 지점에서 오차는 1.65~1.77mm로 가장 크게 발생하였다. A-4, A-8, A-9 지점에서 오차는 0.93~1.23mm로 가장 작게 나타났다. A-2 지점간은 모든 경우 가장 많은 오차가 발생하여 정확성이 가장 작은 곳으로 나타났다.

역방향 기구학에 의한 측정결과는 Table 6, Table 7, Table 8과 같이 나타났다.

Table 6 50mm translation from Z axis by inverse-kinematics

< unit : mm >

Y axis		X axis		X								
		Travel	Error	-50			0			50		
				x	y	z	x	y	z	x	y	z
Y	330	2.00	1.40	1.25	1.10	1.00	0.85	1.05	0.90	1.15		
	380	2.60	1.85	1.05	1.20	1.35	0.60	1.85	1.20	1.30		
	430	2.40	1.95	1.30	1.35	1.50	1.15	0.80	0.80	1.05		

Table 7 100mm translation from Z axis by inverse-kinematics

< unit : mm >

Y axis		X axis		X								
		Travel	Error	-50			0			50		
				x	y	z	x	y	z	x	y	z
Y	330	2.10	1.30	1.30	1.30	1.20	1.05	0.85	1.20	1.00		
	380	2.45	1.65	1.25	1.20	1.15	0.80	1.65	1.20	1.35		
	430	2.35	2.05	1.10	1.15	1.40	1.35	1.20	0.90	1.15		

Table 8 150mm translation from Z axis by inverse-kinematics

< unit : mm >

Y axis		X axis		X								
		Travel	Error	-50			0			50		
				x	y	z	x	y	z	x	y	z
Y	330	2.20	1.20	1.50	1.25	0.85	1.45	1.55	1.70	1.60		
	380	2.40	1.85	1.40	1.40	0.95	1.20	1.30	1.50	1.75		
	430	1.95	1.98	1.15	1.25	1.30	1.40	0.90	1.15	1.25		

Z축이 150mm일때 오차의 범위는 2.40~0.90mm으로 나타났다. B-2, B-3 지점에서는 평균 1.88, 1.69로 가장 큰 오차가 발생하였으며, B-4, B-5, B-9 지점에서는 평균 1.1, 1.18mm로 가장 작은 오차가 발생했다.

Z축에 변화에 따른 정방향기구학의 반복오차에서 X, Y, Z축 가운데 X축의 오차가 평균 1.58mm로 가장 크게 나타났으며, Z축 오차는 1.19mm로 가장 작았다. B-2, B-3 지점에서 오차는 1.69~1.88mm로 가장 크게 발생하였으며, B-4, B-5, B-7, B-9 지점에서 오차는 0.7~1.18mm로 가장 작게 나타났다. 역방향 기구학의 B-2 지점 역시 가장 큰 오차가 발생하여 정확성이 가장 낮은 곳으로 나타났다.

정방향 기구학 및 역방향 기구학 실험에서 모든 측정오차는 2.4mm 이내로 나타났고, Z축의 높이 변화는 X, Y, Z축 오차에 큰 영향을 주지 않았다. 정방향기구학의 A-3지점과 역방향의 B-2지점은 가장 많은 오차가 나타났다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 오이수확기의 매니플레이터 개발을 위한 기구학적 분석을 하는 것이다. 매니플레이터의 정방향 기구학 및 역방향 기구학 분석을 한 후 실제 장치의 반복오차 측정실험을 통해 이론값을 검증하였다.

본 매니플레이터는 총 세 개의 링크로서 한 개의 수직링크와 두개의 회전링크로 구성되어 있으며, 세 개의 스테핑모터가 각 관절에 장착되어 링크에 동력을 전달한다. 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. D-H Parameter를 이용하여 정방향 기구학에 의한 매니플레이터의 변환 연산자를 얻었다. 역방향 기구학의 해는 두가지로 나타났으며 삼각함수를 이용하여 해를 구하였다.
2. 매니플레이터의 반복오차를 측정한 검증 실험에서는 X, Y, Z축에 대하여 반복 오차가 최대 2.60mm, 2.05mm, 1.55mm로 나타났으며, 정방향 및 역방향 기구학에서 오차의 최대지점 및 최소지점의 실제 좌표는 일치하였다.
3. 반복오차 측정 결과는 매니플레이터의 목표지점인 오이의 직경에 비해 비교적 작게 나타났다. 측정오차는 실험중 발생한 실험오차로 판단된다.
4. 매니플레이터의 오차를 줄이고 작업능률의 향상을 위해서는 링크의 수를 줄이고 오이의 품종 및 재배환경을 고려하여야 하며, 경량이면서도 견고한 재료를 사용하여 하중을 줄여야 한다. 또한, 작동을 위한 모터의 속도를 고려해야 한다.

5. 참고문헌

1. Lee, Dae-Weon, W. F. McClure. 1993. A Robotic system for transferring tobacco seeding. International conference for agricultural machinery and process engineering. Vol. 3 p.850~p.858
2. Naoshi, Kondo, Yoshaki Nishitsuji, Yasunori Shibano, Kentaro Mohri, Mitsuji Monta and Hisaya Yamada. 1995. Bidual feedback control of pretty-tomato harvesting robot. JSAM Vol. 1, November 3~6, 181~187
3. Seii Arima, Naoshi Kondo, Tateshi Fujiura, Hiroshi Nakamura and Jun Yamashita. 1995. Basic studies on cucumber harvesting robot. JSAM Vol. 1, November 3~6, 195~202
4. Shigehiko Hayashi, Osamu SAKAUE and Mituho Sugimoto. 1995. Application of robotics for vegeTable production. JSAM Vol. 1, November 3~6, 189~194
5. Simonton. W, 1991. Robotic and effector for handling greenhouse plant material. Transactions of ASAE. Vol. 34(6) 2615~2621