

로봇 착유시스템을 위한 매니퓰레이터의 기구 해석

Kinematic Analysis of a Manipulator for Robot Milking System

김 응 민병로 김동우 서광욱 김해성 홍준택 이대원
정회원 정회원 정회원 정회원
W.Kim B.R.Min D.W.Kim K.W.Seo H.S.Kim J.T.Hong D.W.Lee

1. 서론

우리 낙농에서 사육농가 수는 감소하는 반면 호당 사육두수는 크게 증가하여 50두를 넘어서고 있다. 이로 인해 경영의 전업화가 가속되고 노동력부족현상이 발생하고 있으며, 이를 해결하기 위해서는 낙농기자제의 자동화, 기계화가 이루어져야 한다⁽¹⁾.

낙농에서의 기계화는 최근까지 많은 부분에서 이뤄지고 있으며, 가장 노동강도가 높은 착유작업을 기계화하기 위하여 노력하고 있다. 유럽의 선진낙농국을 중심으로 개발 보급 중인 로봇 착유시스템의 매니퓰레이터는 여러 가지 형태를 가지고 개발되고 있다⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾. 국내에서도 로봇 착유시스템의 개발을 위하여 직교좌표형태를 가진 매니퓰레이터의 연구를 수행하였다⁽³⁾.

로봇 착유시스템은 사람의 팔 대신 착유컵을 젖소의 유방으로 이동시켜주는 매니퓰레이터가 필수적이라 하겠다. 본 연구에서는 로봇 착유시스템을 위한 다관절 매니퓰레이터를 개발하기 위하여 설계된 매니퓰레이터의 기구학적 분석을 통해 적용가능성을 판단하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 매니퓰레이터 구성 및 D-H 파라미터(Denavit-Hartenberg parameter)

로봇 착유시스템을 위한 매니퓰레이터는 총 5관절로 구성하였다. 각 구성을 살펴보면 스톤에 부착되는 몸체에서 수직으로 상하운동을 위한 수직관절과 X-Y 평면좌표의 움직임을 위한 2, 3, 4관절 및 착유컵과 젖소의 유두간 평행을 유지하기 위한 5번 축으로 구성하였다.

기구학은 순기구학(Forward Kinematics)과 역기구학(Inverse Kinematics)으로 나눌 수 있다. 순기구학은 기구의 기준 좌표계로부터 각 관절의 위치와 방향이 결정되었을 때 선단장치(End-Effecter)의 공간적 위치와 방향을 구하는 것이며, 역기구학은 선단장치의 공간적 위치와 방향이 주어졌을 때 각 관절의 위치와 방향을 결정하는 방법이다.

기구해석을 위해서 우선적으로 각 링크간의 조인트 상태를 구하기 위하여 D-H 파라미터를 구해야 하는데 이를 위하여 설계된 매니퓰레이터에 대하여 각 축의 좌표계를 설정하면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

D-H 파라미터는 인접한 두 좌표계의 상대적인 위치와 방향 파라메터 4개로 표현할 수 있다. a_i 는 X_i 를 따라 측정한 Z_i 에서 Z_{i+1} 까지의 거리를 나타내며, α_i 는 X_i 를 중심축으로 하여 측정한 Z_i 와 Z_{i+1} 사이의 각도, d_i 는 Z_i 를 따라 측정한 X_{i-1} 에서 X_i 까지의 거리, θ_i 는 Z_i 를 중심축으로 하여 측정한 X_{i-1} 에서 X_i 사이의 각도를 나타낸다. 본 연구에서 설계된 매니퓰레이터는 수직이동축과 회전관절로 이뤄진 다관절 매니퓰레이터이며 D-H 파라미터는 표 1과 같다.

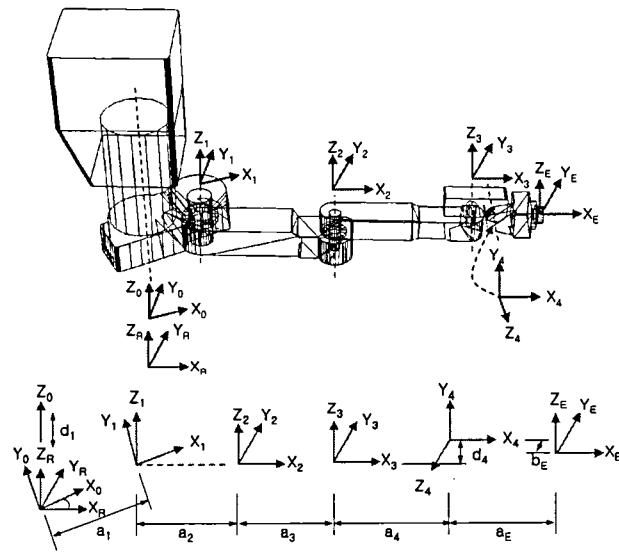


Fig. 1 Geometrical modeling of the developed manipulator.

Table 1 D-H parameter of the manipulator

Joint i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
0	0	0	d_1	30
1	0	202.57	-11	q_2-30
2	0	450	0	q_3
3	0	450	44.5	q_4
4	90	100	0	0
E	-90	149.64	0	0

나. 순기구학

매니퓰레이터의 기준좌표에서부터 선단장치까지의 관계는 식 1과 같이 쓸 수 있다.

$${}^R T^E = {}^R T^0 \ {}^0 T^1 \ {}^1 T^2 \ {}^2 T^3 \ {}^3 T^4 \ {}^4 T^E \quad (\text{식 } 1)$$

여기서, ${}^R T^0 = \text{Rot}(Z, \theta)$

${}^0 T^1 = \text{Tran}(Z, d_1) \text{ Tran}(X, a_1)$

${}^1 T^2 = \text{Rot}(Z, q_2 - \theta) \text{ Tran}(X, a_2) \text{ Tran}(Z, d_2)$

${}^2 T^3 = \text{Rot}(Z, q_3) \text{ Tran}(X, a_3)$

${}^3 T^4 = \text{Rot}(Z, q_4) \text{ Tran}(X, a_4) \text{ Tran}(Z, d_4)$

${}^4 T^E = \text{Rot}(X, \theta) \text{ Tran}(X, a_E) \text{ Tran}(Y, b_E) \text{ Rot}(X, \theta_5)$

위에 나열한 각 관절의 회전과 병진운동을 나타내는 변환행렬로부터 전체 ${}^R T^E$ 의 변환행렬(Transformations)을 나타내면 식 2와 같다.

$${}^R T^E = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & P_x \\ n_y & s_y & a_y & P_y \\ n_z & s_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{식 } 2)$$

여기서,

$$n_x = (C\theta C(q_2 - \theta) - S\theta S(q_2 - \theta))(Cq_3 Cq_4 - Sq_3 Sq_4) + (-C\theta S(q_2 - \theta) - S\theta C(q_2 - \theta)) \\ (Sq_3 Cq_4 + Cq_3 Sq_4)$$

$$n_y = (S\theta C(q_2 - \theta) + C\theta S(q_2 - \theta))(Cq_3 Cq_4 - Sq_3 Sq_4) + (-S\theta S(q_2 - \theta) + C\theta C(q_2 - \theta)) \\ (Sq_3 Cq_4 + Cq_3 Sq_4)$$

$$n_z = 0$$

$$s_x = (C\theta C(q_2 - \theta) - S\theta S(q_2 - \theta))(C\theta_5 C\theta'_5 + S\theta_5 S\theta'_5) \times (a_4 Cq_3 Cq_4 - a_4 Sq_3 Sq_4 + a_3 Cq_3) + \\ (-C\theta S(q_2 - \theta) - S\theta C(q_2 - \theta))(C\theta_5 C\theta'_5 + S\theta_5 S\theta'_5)(-Sq_3 Sq_4 + Cq_3 Cq_4)$$

$$s_y = (S\theta C(q_2 - \theta) + C\theta S(q_2 - \theta))(C\theta_5 C\theta'_5 + S\theta_5 S\theta'_5) \times \\ (a_4 Cq_3 Cq_4 - a_4 Sq_3 Sq_4 + a_3 Cq_3) + (-S\theta S(q_2 - \theta) + C\theta C(q_2 - \theta))(C\theta_5 C\theta'_5 + S\theta_5 S\theta'_5) \\ (-Sq_3 Sq_4 + Cq_3 Cq_4)$$

$$s_z = S\theta_5 C\theta'_5 + C\theta_5 S\theta'_5$$

$$a_x = (-C\theta S(q_2 - \theta) - S\theta C(q_2 - \theta))(-Sq_3 Sq_4 + Cq_3 Cq_4) \times (-C\theta_5 S\theta'_5 - S\theta_5 C\theta'_5)$$

$$a_y = (-S\theta S(q_2 - \theta) + C\theta C(q_2 - \theta))(-Sq_3 Sq_4 + Cq_3 Cq_4) \times (-C\theta_5 S\theta'_5 - S\theta_5 C\theta'_5)$$

$$a_z = -Sq_3 Sq_4 + Cq_3 Cq_4$$

$$P_x = (C\theta C(q_2 - \theta) - S\theta S(q_2 - \theta))(a_E(Cq_3 Cq_4 - Sq_3 Sq_4) + b_E C\theta_5 \times (-Cq_3 Sq_4 - Sq_3 Cq_4) + \\ (a_4 Cq_3 Cq_4 - a_4 Sq_3 Sq_4 + a_3 Cq_3) + (-C\theta S(q_2 - \theta) - S\theta C(q_2 - \theta)) \\ (a_E(Sq_3 Cq_4 + Cq_3 Sq_4) + b_E C\theta_5 \times (-Sq_3 Sq_4 + Cq_3 Cq_4) + \\ (a_4 Sq_3 Cq_4 + a_4 Cq_3 Sq_4 + a_3 Sq_3) + (a_2 C\theta C(q_2 - \theta) - a_2 S\theta S(q_2 - \theta) + a_1 C\theta))$$

$$P_y = (S\theta C(q_2 - \theta) + C\theta S(q_2 - \theta))(a_E(Cq_3 Cq_4 - Sq_3 Sq_4) + b_E C\theta_5 \times (-Cq_3 Sq_4 - Sq_3 Cq_4) + \\ (a_4 Cq_3 Cq_4 - a_4 Sq_3 Sq_4 + a_3 Cq_3) + (-S\theta S(q_2 - \theta) + C\theta C(q_2 - \theta)) \\ (a_E(Sq_3 Cq_4 + Cq_3 Sq_4) + b_E C\theta_5 \times (-Sq_3 Sq_4 + Cq_3 Cq_4) + \\ (a_4 Sq_3 Cq_4 + a_4 Cq_3 Sq_4 + a_3 Sq_3) + (a_2 S\theta C(q_2 - \theta) - a_2 C\theta S(q_2 - \theta) + a_1 S\theta))$$

$$P_z = b_E S\theta_5 + d_1 + d_2 + d_4$$

다. 역기구학

역기구학의 해를 구하는 방법은 여러 가지 접근방법이 있지만 각 관절의 X_i 축 주위로 측정한 Z_i 와 Z_{i+1} 사이의 각도를 나타내는 α_i 의 값이 0° 또는 90° 인 매니퓰레이터의 해석에 많이 사용하는 기하학적(Geometric solution)방법을 사용하여 적용하였다.

본 연구에서 설계된 매니퓰레이터는 모두 5관절을 가지고 있으나, 1번 축에 의해 Z 축 좌표가 결정되며, 2번, 3번, 4번 관절에 의해 X , Y 좌표가 결정되므로 2번, 3번, 4번 관절의 평면기하를 직접 적용하여 구할 수 있다.

2번, 3번, 4번 관절을 평면적으로 간략히 그리면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

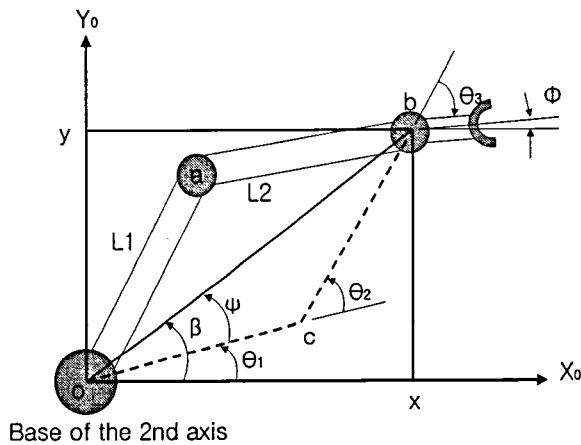


Fig. 2 Geometric relation among links.

그림 2에서 o점과 b점을 있는 선분을 기준으로 $\triangle oab$ 와 $\triangle ocb$ 는 선단장치가 위치할 수 있는 지점에 대해 2번 링크와 3번 링크가 위치할 수 있는 두 가지의 상황을 나타낸 것이다.

삼각형에 대해서 Cosine 법칙을 적용하면 θ_2 를 구할 수 있다.

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos(180 + \theta_2) \quad (\text{식 } 3)$$

여기서, $\cos(180 + \theta_2) = -\cos(\theta_2)$ 이므로

$$\therefore \cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \quad (\text{식 } 4)$$

단, 해가 존재하기 위한 조건은 $\sqrt{x^2 + y^2} \leq l_1 + l_2$ 을 만족해야만 한다. 또한, 해가 존재한다면 θ_2 는 $\theta_2 = -\theta_2$ 와 같은 두 개의 해가 존재하게 된다.

θ_1 에 대한 해를 구하기 위해서는 β 와 ψ 에 대한 방정식을 풀어야한다. β 는 x, y 값의 변화에 의해서 사분면 어느 곳에도 위치할 수 있기 때문에 두 개의 변수를 가지는 arc tangent를 사용하게 되면 식5와 같다.

$$\beta = \text{atan2}(y, x) \quad (\text{식 } 5)$$

ψ 를 구하기 위해 Cosine 법칙을 적용하여 보면 식 6과 같다.

$$\cos \psi = \frac{x^2 + y^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{x^2 + y^2}} \quad (\text{식 } 6)$$

ψ 의 값을 구하기 위해 arc cosine을 계산하게 되면 기하학적인 형상을 유지하기 위해 $0 \leq \psi \leq 180$ 의 조건을 만족해야만 한다. 위에서 구한 β 와 ψ 를 이용하여 식 7과 같이 θ_1 을 구할 수 있다. 여기서, + 부호는 $\theta_2 < 0$, - 부호는 $\theta_2 > 0$ 일 때이다

$$\therefore \theta_1 = \beta \pm \psi \quad (\text{식 } 7)$$

θ_1 과 θ_2 를 알게 되면 4번 축이 이루는 방위각 ϕ 를 이용하여 θ_3 를 구할 수 있다.

$$\therefore \theta_3 = \phi - \theta_1 - \theta_2 \quad (\text{식 } 8)$$

3. 결과 및 고찰

가. 순기구학

설계된 매니퓰레이터의 구해진 순기구학 해를 검증하기 위해 변수 $d_1=0$, $q_2=0$, $q_3=90^\circ$, $q_4=0$ 을 대입하여 알아본 결과는 식 9와 같고, Autodesk사의 AutoCAD 2000 프로그램으로 검증한 결과는 그림 3과 같이 나타나 순기구학을 위한 해가 올바르게 구해진 것으로 판단되었다.

$${}^R T^E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 593.43 \\ 1 & 0 & 0 & 800.92 \\ 0 & 0 & 1 & 65.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{식 } 9)$$

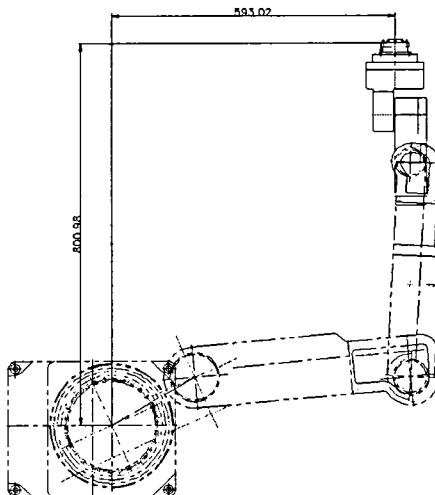


Fig. 3 Verification of forward kinematics using AutoCAD program.

나. 역기구학

설계된 매니퓰레이터의 역기구학 해를 검증하기 위해 위치 $x=593$, $y=800$, $z=65$ 를 대입하여 Mathworks사의 MATLAB 6.1 프로그램으로 알아본 결과 $d_1=0$, $q_2=0$, $q_3=90^\circ$, $q_4=0$ 로 나타났으며, 매니퓰레이터의 자세를 알아보기 위하여 시뮬레이션 프로그램을 작성하여 임의의 자세를 구해본 결과는 그림 4와 같다. 위 결과로 역기구학을 위한 해가 올바르게 구해진 것으로 판단되었다.

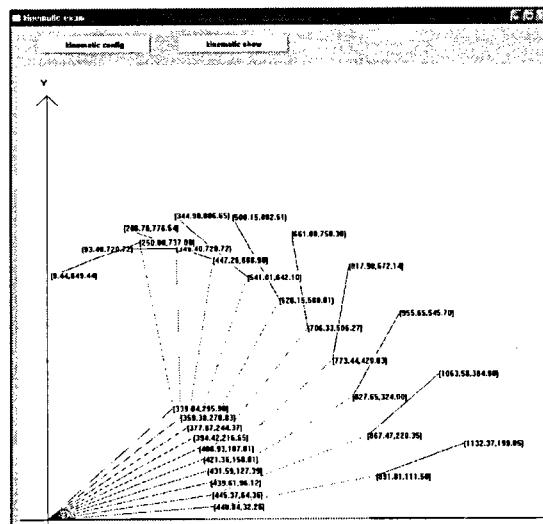


Fig. 4 Results of inverse kinematic solution.

4. 요약 및 결론

로봇 착유시스템은 사람의 팔 대신 착유컵을 젖소의 유방으로 이동시켜주는 매니퓰레이터가 필수적이라 하겠다. 본 연구에서는 로봇 착유시스템을 위한 다관절 매니퓰레이터를 개발하기 위하여 설계된 매니퓰레이터의 기구학적 분석을 통해 적용가능성을 판단하는데 목적이 있다. 구체적인 결과는 다음과 같다.

1. 기구해석을 위한 축을 설정하고 D-H 파라미터를 구하였다, 또한 구해진 파라미터를 바탕으로 순기구해와 역기구해를 구하였다
2. 구해진 순기구해를 검증하기 위하여 임의의 변수를 대입하여 결과를 구하였고 Autodesk사의 AutoCAD 프로그램으로 검증하였다. 그 결과, 순기구해가 올바르게 구해진 것으로 판단되었다.
3. 구해진 역기구학 해를 검증하기 위하여 임의의 위치값을 대입하여 Mathworks사의 MATLAB 6.1 프로그램으로 결과를 구하고, 매니퓰레이터의 자세를 알아보기 위하여 시뮬레이션 프로그램을 작성하여 자세를 구해보았다. 위 결과로 역기구해가 올바르게 구해진 것으로 판단되었다.

5. 참고 문헌

- (1) Choi, H. R and Yuen, J. H., 1999, "The Present and the Comparative standardization of livestock farming utensils of the Korean Trends with Foreign Data ", 5th Symposium of Livestock Housing and Environment, pp. 7~19.(In korea)
- (2) Frpst, A. R., t. t. Mottram, M. J. Street, R. C. Hall, D. S. Spencer and C. J. Allen. 2002, "A Field Trial of a Teatcup Attachment Robot for an Automatic Milking System", J. of agriculture Engineering Research, pp. 325~334.
- (3) Lee, d. w., Kim W., Kim H. T.. Kim D. W., Choi D. Y.. Han J. D.. Kwon D. J. and Lee S. K., 2001, "A Robotic Milking Manipulator for Teat-cup Attachment Modules", J. of Bio-systems Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 163~168.(In korea)
- (4) Lee, S. H., Choi K. J., and Yu B. K., 1998, "Research Trends and Their Perspectives in Milking Robot", J. of Bio-systems Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 641~647.(In korea)
- (5) Rossing, W. and P. H. Hogewerf, 1997, "State of the art of automatic milking systems", J. of Computers and Electronics in Agriculture. Vol. 17, No. 1, pp. 1~17
- (6) 新出 陽三, 松田 従三, 1994, 窪乳ロボットと酪農, 酪農綜合研究所. 北海道