

Fig. 1 Geometrical modeling of the developed manipulator.

Table 1 D-H parameter of the manipulator

Joint i	a_{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

매니플레이터의 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(Transformation)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 측정된 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 Z축 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.

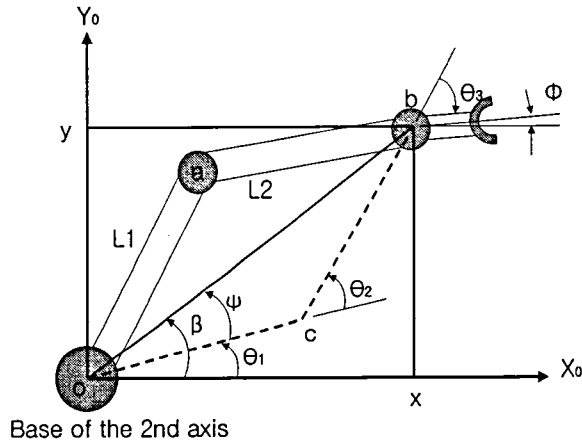


Fig. 2 Geometric relation among links.

그림 2에서 o점과 b점을 잇는 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.

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(180 + \theta_2) \quad (\text{식 3})$$

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

$$\therefore \cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \quad (\text{식 4})$$

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 을 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 매니플레이터의 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.

$$R_{TE} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 593.43 \\ 1 & 0 & 0 & 800.92 \\ 0 & 0 & 1 & 65.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{식 9})$$

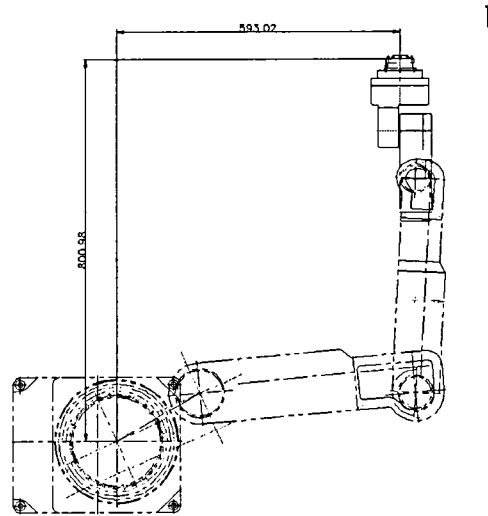


Fig. 3 Verification of forward kinematics using AutoCAD program.

나. 역기구학

설계된 매니플레이터의 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, 매니플레이터의 자세를 알아보기 위하여 시뮬레이션 프로그램을 작성하여 임의의 자세를 구해본 결과는 그림 4와 같다. 위 결과로 역기구학을 위한 해가 올바르게 구해진 것으로 판단되었다.

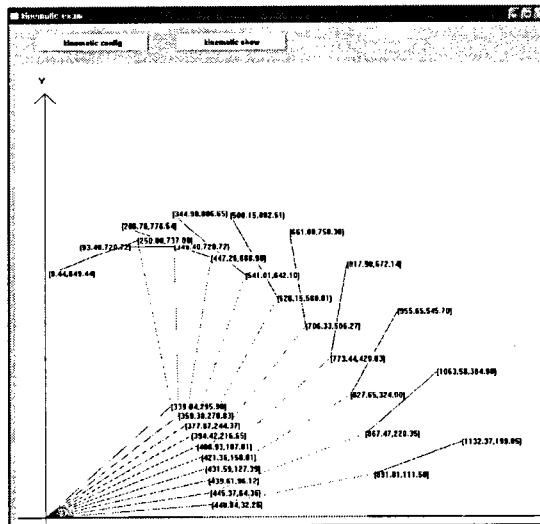


Fig. 4 Results of inverse kinematic solution.

4. 요약 및 결론

로봇 착유시스템은 사람의 팔 대신 착유컵을 젖소의 유방으로 이동시켜주는 매니플레이터가 필수적이라 하겠다. 본 연구에서는 로봇 착유시스템을 위한 다관절 매니플레이터를 개발하기 위하여 설계된 매니플레이터의 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, 매니플레이터의 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 從三, 1994, 搾乳ロボットと酪農, 酪農綜合研究所. 北海道