바이오시스템공학 (*J. of Biosystems Eng.*)
Vol. 32, No. 1, pp. 44~49 (2007)

로봇 착유시스템의 3차원 유두위치인식을 위한 스테레오비젼 시스템

김 웅 민병로 이대원

A Stereo-Vision System for 3D Position Recognition of Cow Teats on Robot Milking System

W. Kim B. R. Min D. W. Lee

Abstract

A stereo vision system was developed for robot milking system (RMS) using two monochromatic cameras. An algorithm for inverse perspective transformation was developed for the 3-D information acquisition of all teats. To verify performance of the algorithm in the stereo vision system, indoor tests were carried out using a test-board and model teats. A real cow and a model cow were used to measure distance errors. The maximum distance errors of test-board, model teats and real teats were 0.5 mm, 4.9 mm and 6 mm, respectively. The average distance errors of model teats and real teats were 2.9 mm and 4.43 mm, respectively. Therefore, it was concluded that this algorithm was sufficient for the RMS to be applied.

Keywords : Inverse perspective transformation, Monochromatic cameras, RMS, Stereo vision

1. 서 론

농가규모가 커지고 경영형태에서 전업화가 이루어지고 있는 낙농은 노동력 부족 현상이 발생하고 있다.

로봇 착유시스템은 부족한 노동력 해결과 착유 시 외부로부터 감염을 방지하는 효과에 의해 유질이 상승됨으로써 농가의 경제소득을 높일 수 있다(Klungel et al., 2000; Pomies and Bony, 2000).

여러 유럽 선진낙농국을 중심으로 개발·보급 중인 로봇 착유시스템의 유두인식 방법은 레이저, 초음파, 카메라 등 여러 가지 장치를 복합적으로 사용하고 있다(Lee et al., 1998; Rossing and Hogewerf, 1997; 新出 陽三, 1994). 국내에서도 로봇 착유시스템의 개발을 위한 기초연구로 카메라를 이용한 착유컵 착탈에 관한 연구가 수행되었다(Lee and Chang, 1999).

본 연구에서는 로봇착유시스템에서 유두를 인식하고 거리정보를 획득하기위한 방법으로 카메라를 이용한 스테레오비젼 시스템을 이용하였다.

로봇 착유시스템에 적용 가능한 스테레오비젼 시스템을 개발하고, 거리인식을 위한 역투사 변환기법의 알고리즘을 이용하여 유두의 거리정보를 획득하고자, 제작된 시스템성능을 확인하기 위하여 실내실험과 착유우실험을 통해 시스템 적용 가능성을 알아보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험재료

1) 스테레오비젼

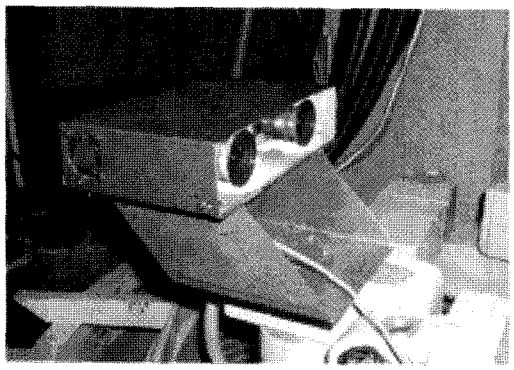
착유우의 각 유두의 거리정보를 획득하기 위하여 흑백 카메라를 이용한 스테레오비젼 시스템을 제작하여 매니퓰레이터 4번 링크에 장착하였다(Fig. 1(a)).

The article was submitted for publication in November 2006, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in December 2006. The authors are Woong Kim, Assistant Professor, KSAM member, Dept. of Bio-Industrial Mechanic Engineering, Kong-Ju University, Chungnam, Korea, Byeong Ro Min, Assistant Professor, KSAM member, and Dea Weon Lee, Professor, KSAM member, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, Sung-Kyun-Kwan University, Suwon, Korea. Corresponding author: D. W. Lee, Professor, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, Sung-Kyun-Kwan University, Suwon, 440-746, Korea; Fax: +82-31-290-7826; E-mail: <daeweon@skku.edu>.

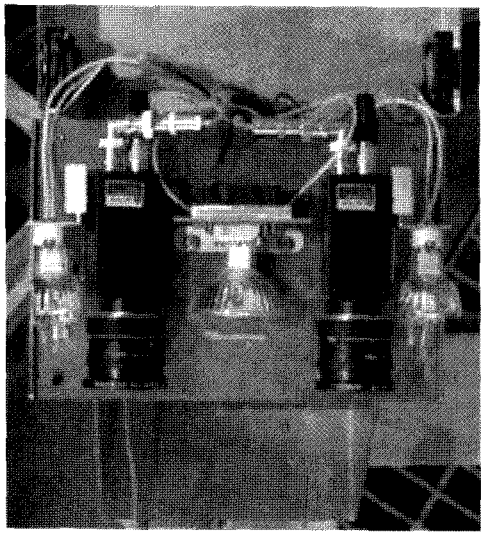
시스템 구성은 스테레오비젼을 구현하기 위해 흑백 카메라와 렌즈, 근적외선 필터, 조명장치, 화상 입력을 위한 프레임 그레버 및 영상처리를 위한 컴퓨터로 구성하였다.

카메라는 근적외선 영역의 화상을 받을 수 있으며, 1/2" CCD를 가진 흑백카메라(STC-400, SENTECH, Japan) 2대를 사용하였다.

카메라 간격은 매니퓰레이터와 착유컵 착탈시스템의 모양과 크기(Kim and Lee, 2005a) 및 각 유두간 상대적 위치(Kwon et al, 2002)를 고려하여 120 mm의 간격으로 나란히 설치하였다(Fig. 1(b)). 렌즈(3.5 Spacecom, Japan)는 카메라와 유두의 거리, 화상 면적을 고려하여 수평 화각이 85°, 초점거리가 3.5 mm 렌즈를 사용하였다. 유두인식을 개선하기위한 근적외선 필터는 유두의 광학적 특성분석을 통해 얻은 결과에 의해 950~1000 nm의 영역만을 통과시키는 밴드패스(Band pass) 필터를 사용하였다(Kim and Lee, 2005b). 조명은 가시광선영역인 400 nm에서부터 적외선 영역인 3,000 nm까지의 광을 발산하며, 집중조명을 위해 갓이 달린 텅스텐 할로겐램프(MR-16, DSE)를 사용하였다.



(a)



(b)

Fig. 1 The stereo vision system for RMS.

카메라의 화각을 고려하여 20 W, 12 V 램프를 카메라의 양쪽과 카메라 사이에 3개를 장착하였고, 할로겐램프의 발열에 대하여 카메라와 렌즈를 보호하기 위하여 방열판과 40 mm ×40 mm 크기의 팬을 각 램프의 후면에 설치하였다.

카메라로부터 전송받은 영상을 처리하기 위해 4대의 카메라를 동시에 연결할 수 있는 Matrox사의 Meteor-II 프레임 그래버와 펜티엄III 800 ㎒ CPU를 탑재한 데스크탑 컴퓨터를 사용하였다.

그림 2는 영상처리시스템의 구성도를 나타낸 것이다.

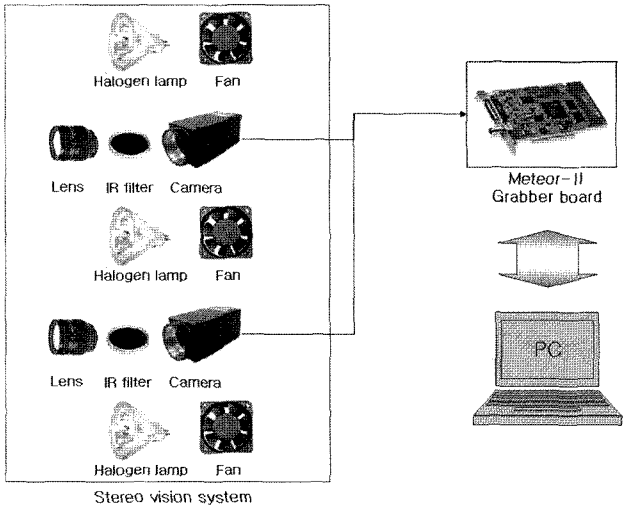


Fig. 2 Block diagram of image processing system.

2) 프로그램

영상처리 프로그램은 획득 영상과 처리영상을 나타낼 수 있는 화면과 히스토그램, 임계값의 설정, 로봇 컨트롤을 위한 통신상태 및 데이터, 각 유두의 위치데이터를 표시해주는 부분으로 구성하였으며, Visual C^{++} 6.0(Microsoft, USA)을 사용하여 개발하였다.

3) 카메라보정 및 성능시험

스테레오비젼 시스템의 카메라보정을 위하여 가로 1 m× 세로 1.5 m의 판에 모눈종이를 부착하고 지름 10 mm 검정색 점을 가로 100 mm×세로 100 mm 간격으로 총 8개를 부착하여 보정실험을 수행하였다(Fig. 3).

카메라 보정 후 거리인식성능을 판단하기 위하여 실물크기의 모형유두를 이용하여 실내실험을 수행하였다(Fig. 4). 또한, 농촌진흥청 축산기술 연구소에서 보유하고 있는 착유우(홀스타인종, 초산)를 대상으로 거리측정실험을 수행하였다(Fig. 5).

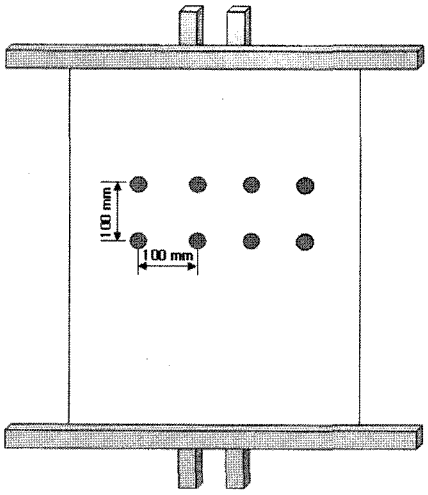


Fig. 3 Test board for camera calibration (a) and main screen of program (b).

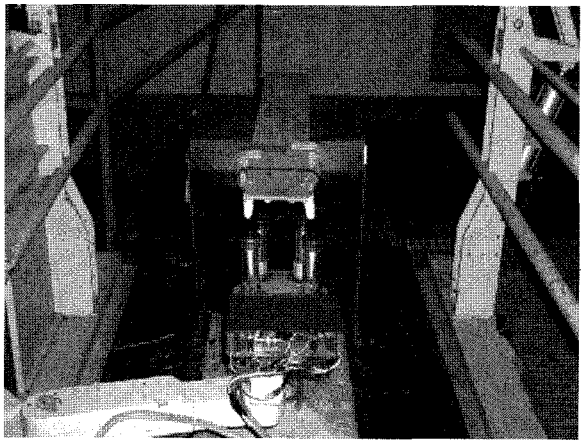


Fig. 4 Experiment of teat-model.

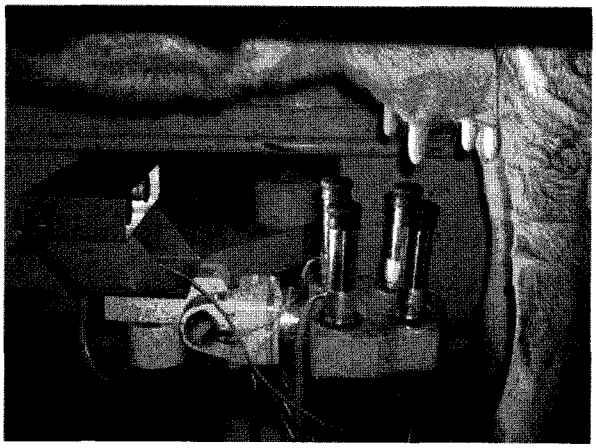


Fig. 5 Experiment of stereo vision by cow.

나. 실험 방법

1) 카메라 보정 알고리즘

카메라 보정을 위해서는 초점거리, 측정된 카메라의 각도와 위치 등의 내부 및 외부인자를 알아야한다. 본 연구에서는 내·외부 인자를 고려하지 않고 카메라 자체를 하나의 측정장치로 하여 같은 평면상에 존재하지 않는 기지의 6점을 이용하여 화상에 의해 측정된 2차원 영상좌표와 3차원 기준 좌표계를 대응시키는 카메라보정 방법을 수행하였다.

획득된 화상의 좌표P_{img}와 실세계의 좌표P_{real}는 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$P_{img} = T_P P_{real} \tag{1}$$

여기서, $P_{img} = {}^t[U\ V\ 0\ 1]$, $P_{real} = {}^t[X\ Y\ Z\ 1]$, T_P는 perspective transformation matrix를 나타내며 다음과 같은 행렬식으로 쓸 수 있다.

$$T_p = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \tag{2}$$

위의 기준 좌표계에서 투영변수 K를 고려한 균일좌표계(homogeneous coordinate)로 바꿔 화상좌표를 다시 쓰면 다음 두 식을 얻을 수 있다.

$$A_{11}X + A_{12}Y + A_{13}Z - A_{41}UX - A_{42}UY - A_{43}UZ - A_{44}U + A_{14} = 0 \tag{3a}$$

$$A_{21}X + A_{22}Y + A_{23}Z - A_{41}VX - A_{42}VY - A_{43}VZ - A_{44}V + A_{24} = 0 \tag{3b}$$

한 점에 의한 P_{img}와 P_{real} 한 세트에 대해 두 개의 식을 얻게 되며, 알지 못하는 12개의 미지수T_P가 생성된다. 즉 12개의 미지수를 풀기 위하여 서로 다른 위치에 있는 6개의 점에 대한 측정을 수행한다.

위 방법으로 얻어진 T_P의 역행렬 C^{-1}는 11 by 12 행렬로 정방행렬이 아니며, 이를 풀기위하여 pseudo inverse 방법에 의해 얻을 수 있다. 구해진 행렬을 이용하여 화상에 의해 얻은 점 B로부터 실공간상의 위치 A의 공간좌표를 구한다.

위 보정방법을 수행하기 위하여 보정판을 이용하여 서로 다른 점에 대하여 100 mm 간격으로 뒤쪽으로 이동하면서 각 카메라의 보정을 수행하였다.

2) 3차원 위치정보획득을 위한 역투사 변환

3차원 위치정보를 얻기 위해 위에서 제시한 카메라 보정방법으로 두 대의 카메라를 나란히 놓은 후 같은 기준 좌표계로 카메라 보정을 수행하였다.

카메라 보정에서 식 (3a), 식 (3b)에 의해 각 카메라에 대하

여 다음 식을 쓸 수 있다.

$$(A_{11} - A_{41} U_i) X_i + (A_{12} - A_{42} U_i) Y_i + (A_{13} - A_{43} U_i) Z_i = U_i - A_{14} \quad (4a)$$

$$(A_{21} - A_{41} V_i) X_i + (A_{22} - A_{42} V_i) Y_i + (A_{23} - A_{43} V_i) Z_i = V_i - A_{24} \quad (4b)$$

위 식 4a, 4b로부터 $\alpha_1 = (A_{11} - A_{41} U_i)$, $\alpha_2 = (A_{12} - A_{42} U_i)$, $\alpha_3 = (A_{13} - A_{13} U_i)$, $\tau_1 = U_i - A_{14}$, $\alpha_4 = (A_{21} - A_{41} V_i)$, $\alpha_5 = (A_{22} - A_{42} V_i)$, $\alpha_6 = (A_{23} - A_{43} V_i)$, $\tau_2 = V_i - A_{24}$ 를 구하고, 같은 방법으로 두 번째 카메라에 대해서 β_1, β_2, β_3, β_4, β_5, β_6, τ_3, τ_4를 구한다.

위에서 구한 $\alpha_{1\sim6}$, $\beta_{1\sim6}$, $\tau_{1\sim4}$를 가지고 다음 행렬식을 구성한다.

$$AX = C \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \\ \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 \\ \beta_1 \beta_2 \beta_3 \\ \beta_4 \beta_5 \beta_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

X의 역행렬을 구하기 위해 pseudo inverse방법에 의해 X^{-1}을 얻을 수 있으며, X^{-1}를 C^{-1}라하고 이미지 좌표를 B, 알고 있는 실제좌표를 A라 놓으면 다음 식에 의해 화상에 의해 얻은 점 B로부터 실공간의 3차원 위치정보 A를 알 수 있다.

$$A = C^{-1} B \quad (7)$$

위 알고리즘을 적용하여 스테레오비젼 시스템의 성능을 알아보고자 모형유방과 실제 착유우를 대상으로 임의 위치에 대하여 성능측정실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

가) 카메라 보정에 의한 변환행렬

역투사 변환기법을 이용한 3차원 위치정보를 획득하기 위해 카메라 보정을 통해 계산된 각 카메라의 변환행렬은 다음과 같이 나타났다.

$$\text{Left camera} = \begin{bmatrix} 24.716\,46 & -10.735\,61 & 19.111\,06 & 553.953\,77 \\ 0.1996\,3 & -30.318\,32 & 14.028\,00 & 188.146\,15 \\ -0.0018\,5 & -0.0253\,8 & 0.0638\,5 & 1.00000 \end{bmatrix}$$

$$\text{Right camera} = \begin{bmatrix} 25.552\,84 & -4.7115\,8 & 24.524\,91 & 71.0701\,4 \\ -3.3430\,7 & -34.134\,86 & 17.590\,04 & 193.293\,12 \\ -0.0189\,5 & -0.0177\,2 & 0.0802\,7 & 1.00000 \end{bmatrix}$$

나) 실내실험

시스템의 성능평가를 위하여 카메라 보정에 의해 획득한 변환행렬을 이용하여 흑점이 찍힌 테스트보드와 모형유방을 이용한 거리측정 실험을 수행하였다.

테스트보드를 이용한 결과는 표 1과 같이 나타났다. 최대거리오차는 시스템으로부터 380 mm 인 지점에서 0.5 mm로 나타났다. 실험구간 내에서 거리에 따른 오차는 특별한 경향을 나타내지 않았으며, 위 결과로 정확한 유두인식이 이뤄진다면 로봇착유시스템에 적용 가능할 것으로 판단되었다.

모형유두를 대상으로 수행한 실험은 모형유두를 인식하기 위하여 영상처리 알고리즘을 모형유두에 알맞게 수정하여 실험하였으며, 각 유두끝점에 대한 위치측정결과는 표 2와 같이 나타났다.

최대오차는 앞·오른쪽 유두에서 4.9 mm가 발생하였으며, 평균오차는 2.9 mm로 나타났다. 오차원인은 유두의 끝점을 인식하는데 있어 정확한 위치를 찾지 못하였고, 계산된 값과 비교하기 위한 실측 시 발생하는 측정오차에 의한 결과로 판단되었다.

위 결과는 로봇착유시스템에 적용하기 위한 허용오차(착유

Table 1 Position error of each point on test-board (unit: mm)

Point \ Axis	Computed			Measured			Error			
	x	y	z	x	y	z	|x|	|y|	|z|	E
1	75.00	35.00	200.00	75.00	35.00	200.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	-74.99	84.91	259.78	-75.00	85.00	260.00	0.01	0.09	0.22	0.24
3	-75.00	35.01	320.00	-75.00	35.00	320.00	0.00	0.01	0.00	0.01
4	-24.96	85.15	380.48	-25.00	85.00	380.00	0.04	0.15	0.48	0.50
5	25.00	34.98	440.00	25.00	35.00	440.00	0.00	0.02	0.00	0.02
6	24.96	84.94	499.73	25.00	85.00	500.00	0.04	0.06	0.27	0.28

컵 내경 및 평균유두두께 20 mm 이상) 내에서 발생하는 것으로 로봇착유시스템에 적용 가능할 것으로 판단되었다.

다) 착유우실험

스테레오비전 시스템을 장착한 매니퓰레이터의 엔드이펙터를 기준점으로 하여 스톨에 입실해 있는 착유우의 각 유두의 3차원위치정보를 측정한 결과는 표 3과 같이 나타났다.

각 유두의 거리오차는 최소 3.7 mm에서 최대 6.0 mm, 평균 4.43 mm로 나타났으며, 이 결과는 움직이는 착유우와 엔드이펙터까지의 거리를 측정할 때 발생하는 측정 오차를 포함한 오차로써, 이를 감안하여도 허용오차범위를 넘지 않는 것으로 나타났다.

스테레오비전 시스템의 3차원 위치정보 획득의 정확도는 로봇 착유시스템에 적용 가능할 것으로 판단되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 로봇착유시스템에서 유두를 인식하고 거리정보를 획득하기위한 방법으로 카메라를 이용한 스테레오비전 시스템을 이용하였다.

로봇 착유시스템에 적용 가능한 스테레오비전 시스템을 개발하고, 거리인식을 위한 역투사 변환기법을 이용하여 유두

Table 2 Position error of each teats on teat-model (unit: mm)

Point no. \ Axis		Computed			Measured			Error			
		x	y	z	x	y	z	|x|	|y|	|z|	E
1	Front-Left	-79.11	-123.04	561.68	-80	-123	560	0.89	0.04	1.68	1.9
	Rear-Left	-30.23	-126.36	666.33	-30	-125	670	0.23	1.36	3.67	3.9
	Rear-Right	43.12	-119.54	667.28	45	-120	670	1.88	0.46	2.72	3.3
	Front-Right	82.67	-116.56	570.99	83	-115	570	0.33	1.56	0.99	1.9
2	Front-Left	-120.6	-145.4	546.7	-120	-145	550	0.6	0.4	3.3	3.3
	Rear-Left	-84.4	-139.5	659.6	-85	-140	660	0.6	0.5	0.4	0.9
	Rear-Right	-12.8	-153.1	666.6	-13	-155	670	0.2	1.9	3.4	3.9
	Front-Right	35.8	-136.8	570.7	35	-138	570	0.8	1.2	0.7	1.6
3	Front-Left	-40.3	-143.1	556.8	-40	-143	560	0.3	0.1	3.2	3.3
	Rear-Left	14.4	-161.0	656.0	15	-160	660	0.6	1.0	4.0	4.2
	Rear-Right	88.2	-138.2	659.9	88	-140	660	0.2	1.8	0.1	1.9
	Front-Right	121.8	-144.0	555.6	120	-145	560	1.8	1.0	4.4	4.9
4	Front-Left	-80.7	-134.5	404.5	-80	-135	400	0.7	0.5	4.5	4.6
	Rear-Left	-39.0	-137.1	503.6	-40	-138	500	1.0	0.9	3.6	3.9
	Rear-Right	32.2	-135.4	498.3	33	-135	500	0.8	0.4	1.7	1.9
	Front-Right	77.0	-132.1	404.6	78	-133	400	1.0	0.9	4.6	4.8
5	Front-Left	-89.5	-129.7	618.0	-90	-130	620	0.5	0.3	2.0	2.1
	Rear-Left	-50.1	-127.5	729.0	-50	-128	730	0.1	0.5	1.0	1.1
	Rear-Right	22.2	-128.4	739.0	23	-128	740	0.8	0.4	1.0	1.4
	Front-Right	70.3	-122.6	645.9	70	-123	650	0.3	0.4	4.1	4.1
Average								0.7	0.8	2.6	2.9

Table 3 Distance error of base point to teats (unit: mm)

Position \ Axis	Computed			Measured			Error			
	x	y	z	x	y	z	|x|	|y|	|z|	E
Front-Left	-83.58	-156.75	158.52	-80	-155	160	3.58	1.75	1.48	4.3
Rear-Left	-28.02	-156.33	282.92	-30	-155	280	1.98	1.33	2.92	3.8
Rear-Right	26.75	-156.67	300.63	30	-155	300	3.25	1.67	0.63	3.7
Front-Right	65.51	-148.34	176.38	70	-150	180	4.49	1.66	3.62	6.0
Average							3.33	1.60	2.16	4.43

의 거리정보를 획득하고자 하였다. 제작된 시스템성능을 확인하기 위하여 실내실험과 착유우 실험을 통해 시스템 적용가능성을 알아보고자 하였으며, 결과는 다음과 같이 나타났다.

1. 테스트보드를 이용한 결과, 최대거리오차는 시스템으로부터 0.5 mm로 나타났으며, 실험구간 내에서 거리에 따른 오차크기는 특별한 경향을 나타내지 않았다.
2. 모형유두를 대상으로 수행한 실험은 최대오차가 앞·오른쪽 유두에서 4.9 mm가 발생하였으며, 평균오차는 2.9 mm로 나타났다. 오차원인은 유두의 끝점을 인식하는데 있어 정확한 위치를 찾지 못하였기 때문인 것으로 판단되었다. 위 결과, 로봇착유시스템에 적용하기 위한 허용오차 20 mm 내에서 발생하는 것으로 로봇착유시스템에 적용 가능할 것으로 판단되었다.
3. 스톨에 입실해 있는 착유우의 각 유두의 3차원위치정보를 측정한 결과, 거리 오차는 최대 6.0 mm, 평균 4.43 mm로 나타났으며, 이 결과는 움직이는 착유우와 엔드이펙터까지의 거리를 측정할 때 발생하는 측정 오차를 포함한 오차로써, 이를 감안하여도 허용오차범위를 넘지 않는 것으로 나타났다. 스테레오 비전시스템의 3차원 위치정보 획득의 정확도는 로봇 착유시스템에 적용 가능할 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. Kim, W. and D. W. Lee. 2005a. Development of teat-cups attachment module for milking robot system. J. of Biosystems Engineering 30(3):179-184. (In Korean)
2. Kim, W. and D. W. Lee. 2005b. Image processing for recognition of cow teats and selection of a NIR filter for milking robot system. J. of Bio-systems Engineering 30(5): 299-305. (In Korean)
3. Klungel, G. H., B. A. Slaghuis and H. Hogeveen. 2000. The effect of the introduction of automatic milking on milk quality. J. Dairy Sci. 83:1998-2003.
4. Kwon, D. J., W. Kim and D. W. Lee. 2002. Position analysis of cow teats for teat-cup attachment system on robotic milking system. J. of Livestock Housing and Environment 8(3):159-164. (In Korean)
5. Lee, S. H., K. J. Choi and B. K. Yu. 1998. Research trends and their perspectives in milking robot. J. of Biosystems Engineering 23(6):641-647. (In Korean)
6. Lee, Y. J. and D. I. Chang. 1999. Basic study for the development of teat cup handling system operated by a robot. Proceedings of the Korean Society for Agricultural Machinery Conference 4(2):159-164. (In Korean)
7. Pomies, D. and J. Bony. 2000. Comparison of hygienic quality of milk collected with a milking robot vs. with a conventional milking parlor. Proceedings of the International Symposium Robotic Milking pp.122-123.
8. Rossing, W. and P. H. Hogewerf. 1997. State of the art of automatic milking systems. J. of Computers and Electronics in Agriculture 17(1):1-17.
9. 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. (In Japanese)