

토마토 수확로봇 개발(1)
- 토마토의 3차원 위치검출기술

Development of Tomato Harvesting Robot(1)
- 3-D Detection Technique for identifying Tomatoes

손재룡*	강창호*	한길수*	정성립*	권기영*
정회원	정회원	정회원	정회원	정회원
J.R. Son	C.H. Kang	K.S. Han	S.R. Jung	K.Y. Kwon

1. 서론

토마토의 재배면적은 '70년에 노지와 시설재배가 약 50%를 차지하였으나 '98년에는 4,106ha로 약 94%가 시설재배로서 고온 다습한 환경에서 농작업이 불가피하다. 또한 총 노동투하량의 약 30%가 수확작업이 점하고 있어 이의 생력화를 위한 기계화기술 개발이 필요한 실정이다.

한편, 산업분야에서 많이 이용되는 로봇화 기술은 과채류나 과실의 수확, 채소의 접목 및 이식작업 등 농업분야에 응용하기 위한 연구가 많이 수행되고 있다. 따라서 토마토의 수확작업과 같이 노동투하량이 많은 작업의 로봇화기술 개발은 의미가 있다고 생각된다.

토마토 수확작업의 로봇화를 위해서는 토마토를 인식하고 3차원 위치를 검출하는 시각장치, 머니플레이터, 손상없이 수확할 수 있는 엔드이펙터 등의 개발이 필요하다.

대상물의 인식 및 위치검출에는 카메라를 이용한 스테레오영상처리기술이 많이 이용되고 있으나 입력되는 영상의 색성분, 노출정도, 초점 등의 물리적 특성이 일치하지 않기 때문에 Software에 의한 어느 정도의 보정이 필요하다. 그리고 카메라를 고정하여 스테레오영상을 취득할 경우 렌즈의 중심으로 벗어나면 렌즈의 왜곡현상, 너무 가까운 거리에 목표물이 있으면 카메라간의 공통 시야각에서 벗어나는 현상이 발생할 수 있어 정확한 위치검출이 불가능한 단점이 있다.

더욱이 토마토는 크기 및 형상 등이 일정하지 않고 토마토간 중첩 또는 잎, 가지 등에 가려진 경우가 많기 때문에 어려운 환경에서도 정확하게 3차원 위치를 검출할 수 있는 시각장치의 개발이 필요한 실정이다.

따라서 이 연구는 토마토 수확로봇의 개발을 위하여 수확대상 토마토가 잎 등에 일부 가려져 있거나 카메라 렌즈의 중심에 위치하지 않고 상하좌우 임의의 위치에 열려있는 경우에도 정확한 위치를 검출할 수 있는 시각장치를 개발하기 위하여 수행하였다.

* 농업기계화연구소 기초기술기계과

2. 재료 및 방법

이 연구는 토마토의 수확로봇 개발에 적용할 3차원 위치검출기술을 개발하는데 있으므로 먼저, 그림 1과 같이 대상물의 인식 및 위치검출용 시각장치, 모니터, 엔드이펙터 등의 로봇시스템을 구성하였다. 여기서 매니퓰레이터는 산업용으로 사용되는 6축 수직다관절이며, CCD 카메라와 레이저센서 등으로 구성된 시각장치는 그림 2와 같이 CCD 카메라는 매니퓰레이터의 3축 윗 부분에 부착하여 매니퓰레이터의 원점과 일치되도록 하였으며, 직선 거리 검출용 레이저센서는 두 카메라 사이에 부착하여 카메라의 광축과 수평을 유지하고 수직방향도 같은 높이에서 빔 발사가 되도록 하였다.

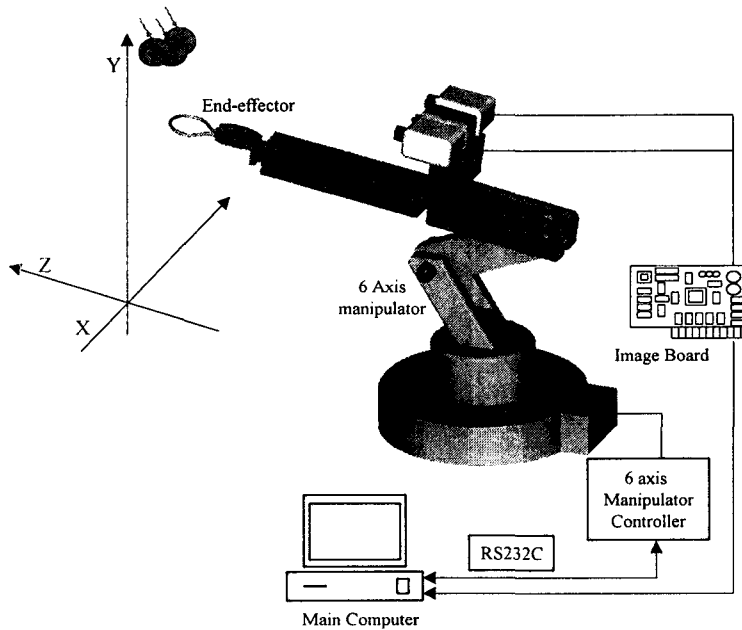


Fig. 1 Schematic diagram of experiment system

대상물의 3차원 위치를 검출하기 위하여 두 대의 CCD카메라를 Pan·Tilting시켜 두 카메라에서 입력된 영상의 위치변화량을 이용하는 스테레오영상처리로 X, Y, Z축의 거리를 구하는 방법과 X, Y축의 거리는 CCD카메라의 Pan·tilting에 의한 스테레오영상처리로, Z축의 거리는 두 대의 CCD카메라 사이에 부착한 레이저센서로 구하는 방법 등을 개발하였다.

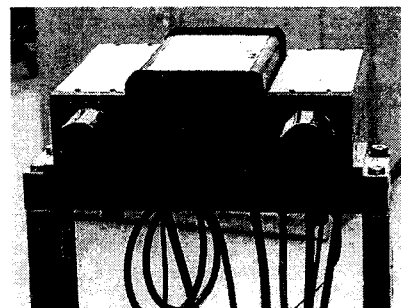
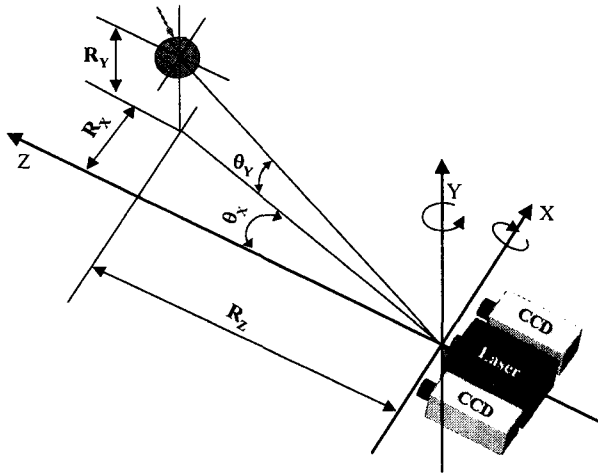


Fig. 2. Vision system with camera & laser detector.

가. 카메라의 Pan · Tilting 알고리즘

그림 3은 스테레오영상처리기법(Rafael c. Gonzalez, Digital Image Processing)을 이용하여 X, Y, Z축 거리인 R_x , R_y , R_z 를 구하고 그 값을 이용하여 레이저센서의 빔 발사 중심을 토마토의 중심에 맞추기 위한 Pan · Tilting 각도를 식 (1) 및 식 (2)에 의해 θ_x , θ_y 를 구하여 그 각도만큼 이동시켜 레이저센서에 의해 R_z 값을 구하고 R_x 와 R_y 는 두 카메라



의 스테레오영상처리 계산식으로부터 구한 값을 이용하였다. 카메라의 Pan · Tilting은 별도의 구동장치 없이 수확용 로봇의 머니플레이터 3축 위에 부착하여 머니플레이터를 θ_x , θ_y 만큼 움직여 X, Y, Z 축 방향의 거리를 구하였다.

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{R_x}{R_z} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{R_y}{\sqrt{R_x^2 + R_z^2}} \right) \dots \dots \dots (2)$$

Fig 3. Schematic diagram of detection method of Pan · Tilting degree

그림 4는 Pan · Tilting에 의해 3차원 위치를 검출하는 과정으로서 먼저 머니플레이터의 x축을 -15° 만큼 수평으로 움직여 두 카메라에서 영상을 입력받는다. 그 위치에서 영상이 존재하지 않으면 $+15^\circ$ 될 때까지 5° 씩 이동하면서 영상을 입력받아 영상이 존재하면 좌측 및 우측 카메라의 동일물체를 찾아 카메라에 의한 X, Y, Z축 방향의 거리를 구하고, 그 거리에 의해 Pan · Tilting 각도를 계산해서 머니플레이터의 1축과 3축을 그 각도만큼 움직여 두 카메라의 중심에 부착된 레이저센서의 빔 발사 중심 축과 토마토의 중심 축을 일치시킨 후 레이저센서로부터 Z축 방향의 직선거리를

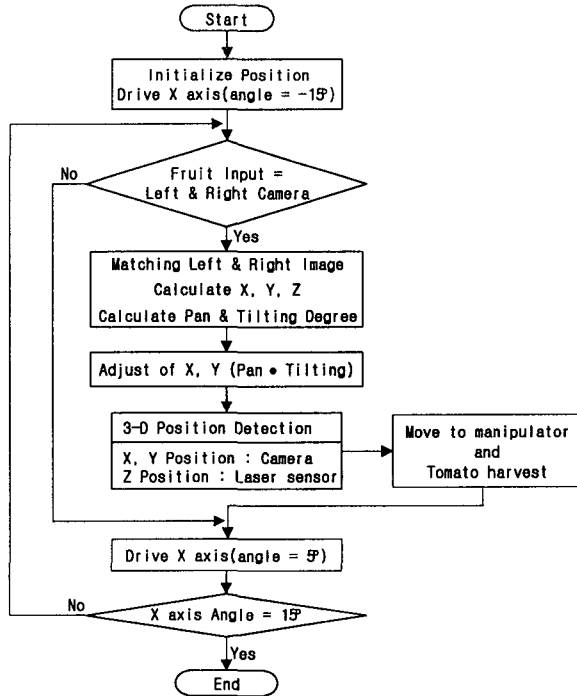


Fig. 4 Flowchart of Pan · Tilting algorithm

검출함과 동시에 X, Y축 방향의 거리는 스테레오영상처리 계산식으로부터 구한 거리를 그대로 이용하였다.

나. 위치검출방법

3차원 위치는 카메라를 고정시킨 상태에서 두 카메라에서 입력된 영상의 위치변화량을 이용하는 스테레오영상처리기법(Rafael c. Gonzalez. Digital Image Processing)에 의한 위치검출과 Pan·Tilting에 의한 스테레오영상처리 그리고 Pan·Tilting에 의한 스테레오영상처리와 레이저센서를 조합하는 방법 등을 이용하여 각 방법별 위치오차를 분석하였다.

열린 위치에 따른 위치검출 오차를 분석하기 위하여 그림 5과 같이 렌즈의 중심(O)으로부터 수평(L_O, R_O)방향, 수직(U_O, D_O)방향 및 모서리(L_U, R_U, L_D, R_D)등 9군데에 위치한 토마토를 대상으로 실제거리와 검출거리와의 관계를 분석하였으며, 또한 렌즈의 중심으로부터 떨어진 위치에 있는 토마토를 카메라의 Pan·Tilting에 의해 두 카메라의 중심에 토마토가 위치하도록 해서 거리를 구하여 실제거리와 검출거리와의 관계를 분석하였다.

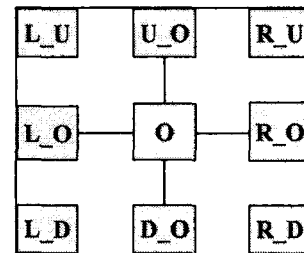


Fig 5. Position of tomatoes from lens

한편, Pan·Tilting에 의해 임의의 위치에 있는 토마토를 두 카메라의 중심에 맞추더라도 잎 등의 장애물에 일부 가려진 경우에 있어서는 두 카메라에서 입력된 영상의 편차에 의해 가려진 위치가 다르게 나타나 동일 영상에 대한 두 카메라에서 바라보는 중심위치가 일치하지 않기 때문에 위치오차가 커지는 원인이 된다. 따라서 임의의 공간상에 위치한 토마토는 Pan·Tilting에 의한 스테레오영상처리만으로 3차원 위치검출이 가능하나, 잎 등의 장애물에 가려진 경우에 있어서는 Z축 거리오차가 크기 때문에 이를 보완하기 위해서는 레이저센서를 조합함으로써 보다 정밀한 3차원 위치를 검출할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

가. 카메라 고정

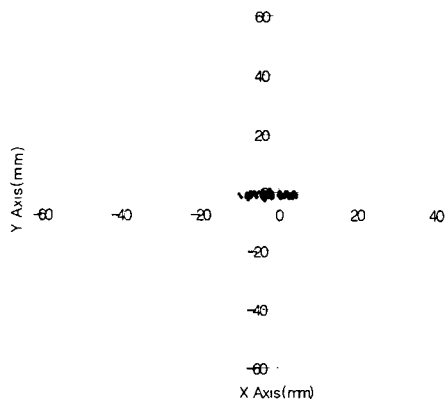
카메라에서 토마토까지의 거리별로 렌즈의 각 부분에 위치한 토마토에 대해서 실제거리와 검출거리와의 위치오차를 분석한 결과 표 2에서와 같이 렌즈의 중심(O)에 위치했을 때에 비해 모서리(L_U, R_U, L_D, R_D)부분에 위치했을 때 오차가 증가하였으며 이때 최대오차는 38.3mm로 나타나 렌즈의 중심(O)에 위치했을 때의 최대오차 8.8mm에 비해 약 4배정도 증가한 것으로 나타났다.

Table 2. Result of position detection error by position of tomato from lens

Actual distance	Position detection error(mm)								
	Center	Horizontal		Vertical		Edge			
	O	L_O	R_O	U_O	D_O	L_U	R_U	L_D	R_D
830	-0.4	7.8	13.0	10.7	11.0	14.5	20.0	14.0	16.1
900	4.2	6.7	17.9	16.1	11.9	14.4	29.3	12.8	20.5
955	6.1	8.0	32.9	13.7	15.6	15.6	28.0	10.3	29.0
1010	3.1	12.4	30.3	23.9	15.5	15.5	36.8	13.4	35.7
1075	8.8	13.4	27.4	16.9	11.1	23.9	38.3	18.0	28.6

나. 카메라의 Pan • Tilting

렌즈 중심으로부터 임의의 위치에 열려있는 각 지점에 대해서 Z축 방향으로 830~1075mm까지의 범위에 있는 토마토를 대상으로 Pan • Tilting에 의해 두 카메라의 중심 축을 대상물의 중심좌표에 맞춘 후 레이저센서의 빔을 발사시켜 그 빔이 대상물에 위치한 지점과 실제 중심좌표와의 관계를 조사한 결과 그림 6과 같이 중심좌표의 원점에 근접하게 검출되었고, 이때 X, Y축 방향의 최대오차는






10mm 이내로 나타났다.

또한 Z축의 거리 오차는 토마토의 위치가 렌즈의 중심에 위치하지 않고 임의의 위치에 존재하더라도 카메라의 Pan • Tilting에 의해 렌즈의 중심에 토마토가 위치했을 때 거리를 구하기 때문에 표 2와 같이 렌즈의 중심에 위치했을 때와 같은 최대 10mm 이내의 오차로 검출할 수 있었다.

Fig. 6 Result of position detection error

한편, 앞 등의 장애물에 가려질 때는 동일물체라 하더라도 두 카메라에서 입력된 영상의 크기가 다르고 가린 부분의 위치도 틀려지므로 두 카메라에서 동일좌표를 기준 점으로 계산하여 거리를 구하는 3각 측량방식에 있어서 오차가 발생하는 원인이 된다. 실제로 가려지지 않은 경우와 한쪽면이 가려진 경우 및 양쪽면이 가려진 경우에 대한 위치검출 결과 표 3과 같이 양쪽면이 모두 가려진 경우에는 두 카메라의 동일 기준 점 편차가 더욱 커지므로 오차가 증가하는 원인이 된다.

Table 3. Result of position detection error

Actual distance (mm)	Position detection error (mm)		
			
840	8.9	35.9	65.5
895	1.7	32.9	59.5
970	1.9	29.2	56.5
1020	5.9	29.1	51.4
1070	6.9	34.0	53.9
1130	7.0	35.8	54.3

다. 카메라의 Pan · Tilting + 레이저센서

앞 등과 같은 장애물에 가려지지 않은 경우에는 렌즈의 중심으로부터 모서리 부분에 위치한 토마토에 대해서도 카메라만 사용하여 Pan · Tilting함으로써 위치오차를 줄일 수 있으나, 가려진 경우에 있어서는 두 지점에서 입력된 대상물의 기준점이 틀려져 오차가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 카메라만 이용해서 X, Y, Z축 거리를 정밀하게 찾는 것은 어렵기 때문에 카메라의 Pan · Tilting에 의한 X, Y축 위치검출과 Pan · Tilting된 위치에서 레이저센서에 의해 Z축 거리를 구함으로써 보다 정밀한 위치검출이 가능하였다. 그림 9는 임의의 위치에 있는 토마토를 Pan · Tilting하여 두 카메라의 중심에 토마토의 중심을 맞추는 결과를 나타낸 것이고, 또한 앞에 양쪽면이 가려진 경우에 있어서도 레이저센서의 빔 발사가 토마토의 중심 부근의 한 지점을 발사함으로써 $\pm 5\text{mm}$ 이내의 오차로 검출하였다.

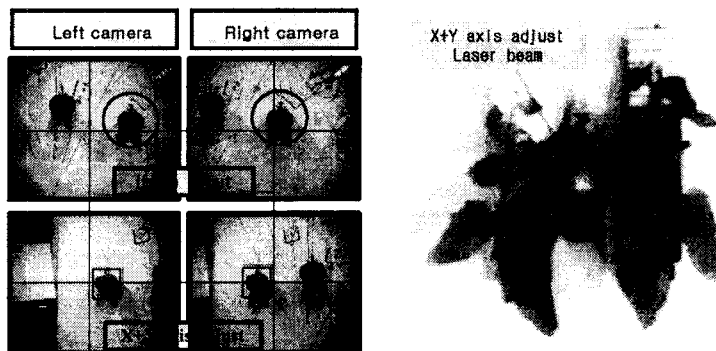


Fig. 7 Result of position detection

4. 요약 및 결론

본 연구는 카메라의 Pan·Tilting에 의해 임의의 위치에 열려있는 토마토를 대상으로 앞 등의 장애물에 가려진 경우에 대해서도 레이저센서와 조합하여 3차원 위치를 검출할 수 있는 수확용 로봇의 시각장치를 개발하기 위하여 수행하였다. 연구결과는 다음과 같다.

1) 스테레오영상처리를 위한 CCD 카메라 2대와 영상처리용 보드, Z축 방향의 거리를 검출하기 위한 레이저센서 그리고 Pan·tilting을 위한 6축 머니플레이터와 제어용 콘트롤러 등으로 구성하였다.

2) 카메라렌즈의 중심으로부터 멀리 떨어진 위치에 토마토가 존재할수록 영상의 찌그러짐 현상이 발생하여 오차가 증가하는 것으로 나타났다.

3) 카메라의 Pan·Tilting에 의해 렌즈 중심으로부터 떨어진 위치에 있는 토마토에 대해서도 $\pm 10\text{mm}$ 이내의 오차로 검출 가능하였으나, 앞에 가려진 경우에는 두 카메라에서 찾고자 하는 동일물체의 기준좌표가 일치하지 않아 오차가 증가하였다.

4) 카메라만 이용하여 X, Y, Z축의 위치를 검출하는 것은 토마토가 앞 등에 가려진 경우에는 오차가 크기 때문에 수확용 로봇의 시각장치로 이용하기에 어려움이 있었으나, Z축 방향의 위치오차를 줄이기 위하여 레이저센서를 조합함으로써 X, Y축은 10mm, Z축은 5mm 내외의 오차로 검출할 수 있었다.

참고문헌

1. 손재룡, 홍종태, 최규홍, 박환중, 윤진하. 1998. 영상처리에 의한 수확용 토마토 인식시스템 개발. 농업과학논문집 Vol. 40(2) : 200~208
2. Ming SUN. et al. 1998, Discrimination Based on Image Processing at Apple Harvest (Part 2). Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery Vol. 60(5) : 75~82
3. Rafael c. Gonzalez. Digital Image Processing : 68~71
4. N.Kondo, Yoshiaki Nishitsuji. 1995. Visual feedback control of petty-tomato harvesting robot. Processings of ARBIP95, Kobe, Japan : 181~188
5. N.Kondo, Y.Nishitsuji, P.P.Ling, K.C.Ting. 1996. Visual feedback guided robotics cherry tomato harvesting. Transactions of the ASAE 39(6) : 2331~2338
6. Shigehiko. et al. 1997, Basic Operation of Tomato Harvesting System using Robot. 野菜・茶業試験場研究報告 12 : 133~142
7. N.Kondo. 1994. Basic studies on robot to work in vineyard(part 2). Journal of the japanese society of agricultural machinery 56(1) : 45~53
8. Ikuo Matsuda, Hiroshi Morishima. 1992. Studies on sorting of cucumber by image processing. Journal of the japanese society of agricultural machinery 54(3) : 93~96