

# 토마토 수확로봇 개발

— 토마토의 3차원 위치검출기술 —

## Development of Tomato Harvesting Robot

— 3-D Detection Technique for identifying Tomatoes —

손재룡	강창호	한길수	정성림	권기영
정희원	정희원	정희원	정희원	정희원
J. R. Son	C. H. Kang	K. S. Han	S. R. Jung	K. Y. Kwon

### SUMMARY

It is very difficult to mechanize tomato harvesting because identifying a target tomato which is partly covered by leaves and stalks is not easy. This research was conducted to develop tomato harvesting robot which can identifying a target tomato, determining its three dimensional position, and harvesting it in a limited time. Followings were major findings in this study.

The first visual system of the robot was composed of two CCD cameras, however, which could not detect tomato not placed on the center of lens and partly covered by leaves or stalks. Secondary visual device, combined with two cameras and pan tilting was designed which could decreased the positioning errors within  $\pm 10\text{mm}$  but still not enough for covered tomato by any obstacles. Finally, laser detector was added to the visual system that could reduce the position detecting errors within 10mm in X-Y direction and 5mm in Z direction for the covered tomatoes.

**주요용어(Key Words)** : 토마토(Tomato), 영상처리(Image processing), 수확로봇(Harvesting robot)

#### 1. 서론

토마토의 시설재배면적은 '70년에 50%를 차지하였으나 '98년에는 약 94%(4,106ha)로 고온 다습한 환경에서의 농작업이 크게 증가하였다. 또한 총 노동투하량의 약 30%가 수확작업으로 이의 생력화를 위한 기계화 기술 개발이 필요한 실정이다.

최근, 산업분야에서 많이 이용되는 로봇화 기술을 과채류나 과실의 수확, 채소의 접목 및 이식작업 등 농업분야에 응용하기 위한 연구가 많이 수

행되고 있다.

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

대상물의 3차원 공간상에서의 인식 및 위치검출에는 두 대의 카메라를 이용한 스테레오 영상처리 기술이 많이 이용되고 있으나 각 카메라에서 입력되는 영상의 색성분, 노출정도, 초점 등의 물리적 특성이 일치하지 않기 때문에 software에 의한 보정이 필요하다. 또한 카메라를 고정하여 스테레오

This article was submitted for publication in august 2000; reviewed and approved for publication by editorial board of KSAM in september 2000.

The corresponding author is J. R. Son, Researcher, Div. of Fundamental Engineering and Technology, National Agricultural Mechanization Research Institute, 249 Suhdun-dong, Kwonson-ku, Suwon City, 441-100, Korea. E-mail:<son1892@namri.go.kr>.

영상을 취득할 경우 렌즈의 중심으로 벗어나면 렌즈의 왜곡현상에 의한 거리측정오차가 증가할 수 있고, 카메라로부터 너무 가까운 거리에 물체가 존재하면 두 카메라의 공통 시야에서 벗어나기 때문에 스테레오영상 입력이 불가능하므로 거리를 계산할 수 없게 된다. 더욱이 토마토는 크기 및 형상 등이 일정치 않으며, 하나의 화방에 3~5개의 토마토가 열려 있어 과실간에 중첩되거나 잎, 가지 등의 장애물에 가려진 경우가 많기 때문에 3차원 위치검출시 오차가 커지는 원인이 된다.

과실 수확용 로봇의 시각장치에 관한 연구로는 Kondo 등(1996)이 카메라의 2차원 평면에 투영된 영상의 위상차를 이용하여 미니토마토의 3차원 거리를 검출하는 시각장치와 다관절 머니플레이터, 주행장치 및 진공으로 대상물을 흡인하여 꼭지를 절단하여 수확하는 연구를 수행하였다. 또한 Subrata 등(1996, 1998)도 미니토마토 수확용 3차원 시각센서를 개발하였는데 이 센서는 적색(파장 685nm)과 근적외(파장 830nm) 파장의 반사율 차이로 경엽, 미숙과, 완숙과 등을 식별하였다. Sakaue 등(1997)은 카메라에서 입력된 영상의 색성분을 추출하여 적숙 토마토, 미숙 토마토 및 경엽 등을 식별할 수 있는 시각장치와 공압패드에 의한 흡착과 갈날회전으로 꼭지를 절단하는 엔드이펙터를 개발하였다. 국내에서는 류 등(1989), 조(1991)는 폐쇄회로 TV 카메라를 이용하여 일정거리 만큼 떨어진 두 카메라의 위상차를 이용하여 3차원 위치를 검출하였고, 농촌진흥청(1993)은 사과 수확용 로봇의 시각장치에 대한 연구를 수행하였는데 잎 등의 장애물에 30%정도 가려진 사과의 인식이 가능하였고, 3개의 평거로 구성된 엔드이펙터의 편심 원운동에 의해 사과를 수확하였다.

대부분의 수확용 로봇의 연구는 과실간 중첩된 경우와 잎 등의 장애물에 일부 가려진 경우에 대한 위치검출정도가 낮아 이에 대한 개선의 여지가 남아 있다.

따라서 본 연구에서는 수확대상 토마토가 과실간 중첩되거나 잎 등에 일부 가려져 있는 경우와 카메라 렌즈의 중심에 위치하지 않고 임의의 위치에 열려있는 경우에 대해서도 정밀한 3차원 위치검출이 가능한 시각 기술을 개발하기 위하여 수행되었다.

2. 재료 및 방법

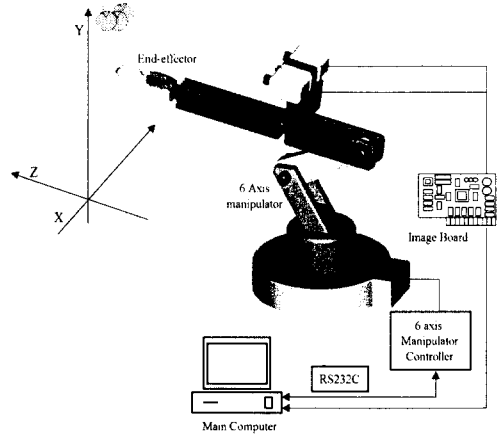


Fig. 1 Schematic diagram of experiment system.

Table 1 Specification of tomato harvesting robot

Item	Specification	
Manipulator	Number of axis	6 joint
	Repeatability precision	±0.05mm
	Work envelope	Radius 708mm
Visual system	CCD camera(2set)	PULNIX TMC-74
	Image board	Matrox Meteor-II
	Laser detector	Emitter 780nm Accuracy 2.5mm
Main computer	IBM Pentium-II	

가. 로봇시스템 구성

토마토 수확로봇은 그림 1과 같이 완숙토마토의 인식 및 3차원 위치검출을 위한 스테레오 영상처리시스템 및 레이저센서로 구성된 시각장치와 pan·tilting을 하기 위한 6축 머니플레이터 및 제어용 콘트롤러, 영상처리와 카메라의 pan·tilting 수행에 필요한 데이터 전송 등의 일련의 동작을 종합적으로 제어할 수 있는 주컴퓨터 등으로 구성하였다. 본 연구에 사용된 수확용 로봇의 주요 제원은 표 1과 같다.

나. 위치검출 방법

CCD 카메라에 의한 스테레오 영상처리시스템과

Z축방향의 직선거리를 보정하기 위한 레이저센서 등으로 구성된 시각장치는 그림 2와 같다. CCD 카메라는 머니플레이터의 3축 윗 부분에 수평으로 부착하여 머니플레이터의 원점과 일치되도록 하였으며, 직선거리 검출용 레이저센서는 두 카메라 사이에 부착하여 카메라의 광축과 수평을 유지하고 같은 높이의 수직방향에서 빔이 발사되도록 하였다.

3차원 위치는 카메라를 고정시킨 상태에서 두 카메라에서 입력된 영상의 위치변화량을 이용하는 스테레오 영상처리기법(Gonzalez, 1992)에 의한 위치검출 방법과 카메라 렌즈의 중심으로부터 임의의 위치에 열려있는 토마토에 대해서도 정밀한 3차원 위치검출이 가능하도록 pan·tilting에 의한 스테레오 영상처리방법과 앞 등의 장애물에 일부 가려져 있어도 위치검출이 가능한 pan·tilting에 의한 스테레오 영상처리 및 레이저 센서를 조합하는 방법 등을 이용하여 각 방법별 위치오차를 비교 분석하였다.

과실 위치에 따른 위치검출 오차를 분석하기 위하여 그림 3과 같이 렌즈의 중심(O)으로부터 수평 방향(L\_O, R\_O), 수직방향(U\_O, D\_O) 및 모서리

(L\_U, R\_U, L\_D, R\_D) 등 9곳에 위치한 토마토를 대상으로 실제거리와 검출거리와의 관계를 분석하였다. 또한 렌즈의 중심으로부터 벗어난 위치에 있는 토마토를 카메라의 pan·tilting에 의해 두 카메라의 중심에 토마토가 위치하도록 하여 거리를 구한 후 실제거리와 검출거리와의 관계를 분석하였다.

한편, pan·tilting에 의해 임의의 위치에 있는 토마토를 두 카메라의 중심에 맞추더라도 앞 등의 장애물에 일부 가려진 경우에 있어서는 두 카메라에서 입력된 영상의 편차에 의해서 가려진 부분의 위치가 다르게 나타나 동일 영상을 두 카메라에서 바라보는 중심위치가 일치하지 않기 때문에 위치 오차가 커지는 원인이 된다. 따라서 임의의 공간 상에 위치한 토마토는 pan·tilting에 의한 스테레오 영상처리만으로도 3차원 위치검출이 가능하나, 앞 등의 장애물에 가려진 경우에 있어서는 Z축 거리오차가 크기 때문에 이를 보완하기 위하여 레이저 센서를 조합하여 보다 정밀한 3차원 위치를 검출하고자 하였다.

#### 다. 카메라의 Pan·Tilting 알고리즘

그림 4는 스테레오 영상처리기법(Gonzalez, 1992)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  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ 를 구하여 그 각도만큼 이동시켜 레이저센서에 의해  $R_z$  값을 구하고  $R_x$ 와  $R_y$ 는 두 카메라의 스테레오 영상처리 계산식으로부터 구한 값을 이용하였다.

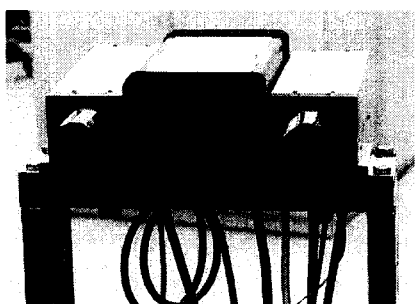


Fig. 2 Vision system with camera & laser detector.

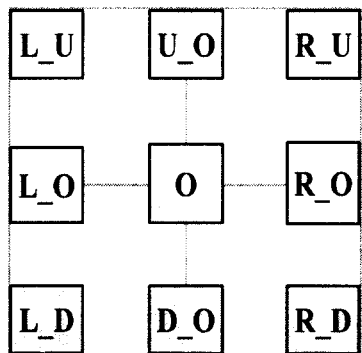


Fig. 3 Position of tomatoes from lens.

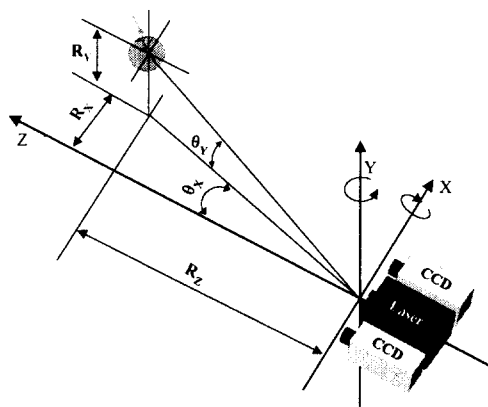


Fig. 4 Schematic diagram of detection method of Pan·Tilting degree.

카메라의 pan·tilting은 별도의 구동장치 없이 수확용 로봇의 머니플래이터 3축 위에 부착하여 머니플래이터를  $\theta_x, \theta_y$ 만큼 움직여 X, Y, Z 축 방향의 거리를 구하였다.

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

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

라. 프로그램 흐름도

그림 5는 pan·tilting과 레이저센서를 이용하여 3차원 위치를 검출하는 과정을 도시화한 것으로써

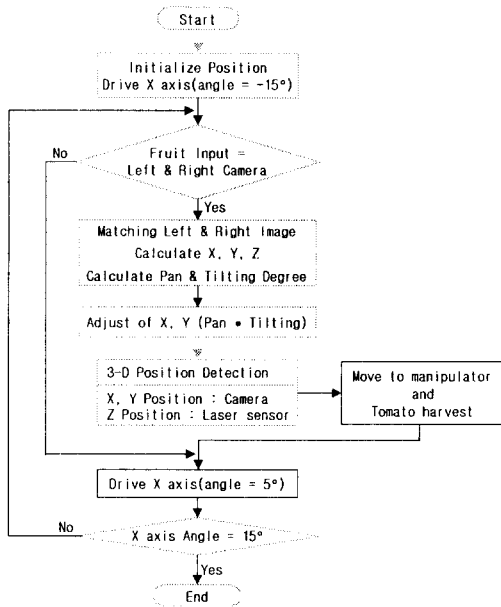


Fig. 5 Flowchart of pan·tilting algorithm.

최대  $\pm 15^\circ$  영역까지 수확할 수 있도록 하였다. 먼저 머니플래이터의 X축을  $-15^\circ$  만큼 수평으로 움직여 두 카메라에서 영상을 획득한다. 그 위치에서 영상의 유무를 검색하여 존재하지 않으면  $+15^\circ$  될 때까지  $5^\circ$  씩 이동하면서 영상을 획득하고 유무를 검색하는 루틴을 작성하였다. 만약 영상이 존재하면 좌측 및 우측 카메라에 입력된 영상들 중에서 동일물체를 찾아 스테레오 영상처리에 의해 X, Y, Z축 방향의 거리를 구하고, 그 거리를 이용하여 두 카메라의 중심에 부착된 레이저센서의 빔 발사 축과 측정하고자 하는 대상 토마토의 중심좌표가 일치하도록 pan·tilting 각도를 계산해서 머니플래이터의 1축과 3축을 그 각도만큼 움직여 두 카메라의 중심에 부착된 레이저센서의 빔 발사에 의해 Z축 방향의 직선거리를 검출하고 X, Y축 방향의 거리는 스테레오 영상처리 계산식으로부터 구한 거리를 이용하여 3차원 거리를 구하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 카메라 고정

카메라의 위치를 수평으로 고정시킨 다음 검출 대상 토마토는 카메라 렌즈의 중심으로부터 상하 좌우로 임의의 위치에 있는 경우를 대상으로 하여, 각각의 위치에 대하여 카메라에서 토마토까지의 거리를 830~1,075mm까지 변화시키면서 위치 검출시험을 실시하였다.

실제거리와 검출거리와의 위치오차는 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 큰 것으로 나타났다. 이

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

것은 영상이 카메라에 입력될 때 렌즈의 중심에 위치한 토마토에 비해 가장자리로 벗어날수록 영상의 찌그러짐 현상이 발생하여 두 카메라에서 입력된 동일 물체가 서로 다른 형상으로 보이기 때문인 것으로 생각되었다.

나. 카메라의 pan · tilting

렌즈 중심으로부터 임의의 위치에 있는 각 지점에 대해서 Z축 방향으로 830~1,075mm의 범위에 있는 토마토를 대상으로 pan · tilting에 의해 두 카메라의 중심 축을 토마토의 중심좌표에 맞춘 후 레이저센서의 빔을 발사시켜 그 빔이 토마토에 위치한 지점과 실제 토마토의 중심좌표가 위치한 지점과의 관계를 조사한 결과, 그림 6과 같이 두 카메라의 중심이 실제 토마토의 중심좌표에 근접하게 위치하였고, 이때 X, Y축 방향의 최대오차는 10mm 이내로 나타났다.

또한 Z축의 거리 오차는 토마토의 위치가 렌즈의 중심에 위치하지 않고 상하좌우 방향으로 떨어

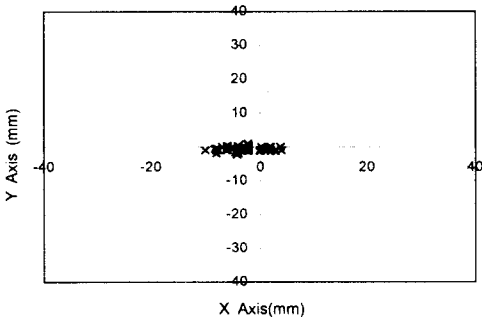


Fig. 6 Results of position detecting error.

진 위치에 존재하더라도 카메라를 pan · tilting하여 렌즈의 중심에 토마토가 위치했을 때 거리를 구하기 때문에 최대 10mm 이내의 오차로 검출할 수 있었다.

한편, 두 카메라에서 입력된 영상의 크기가 다르고, 또한 가린 부분의 위치도 틀려지므로 두 카메라에서 동일좌표를 기준 점으로 계산하여 거리를 구하는 3각 측량방식에 있어서 앞 등의 장애물에 토마토가 가려질 때는 동일물체라 하더라도 위치오차가 발생하는 원인이 된다. 실제로 스테레오 영상처리와 pan · tilting에 의해 가려지지 않은 경우와 한쪽면이 가려진 경우 및 양쪽면이 가려진 경우에 대하여 각각 위치검출 시험을 실시한 결과, 표 3과 같이 양쪽면이 모두 가려진 경우에는 좌 · 우측 카메라에서 동일물체의 중심좌표 편차가 더욱 커져 최대오차는 65.5mm로 가려지지 않았을 때의 최대오차 8.9mm에 비해 크게 증가하는 것으로 나타났다.

다. 카메라의 pan · tilting과 레이저센서의 조합

앞 등과 같은 장애물에 가려지지 않은 경우에는 렌즈의 중심으로부터 모서리 부분에 위치한 토마토에 대해서도 카메라만 사용하여 pan · tilting함으로써 위치오차를 줄일 수 있으나, 가려진 경우엔 있어서는 두 지점에서 입력된 대상물의 기준점이 틀려져 오차가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 카메라만을 사용하여 X, Y, Z축 거리를 정밀하게 찾는 것은 곤란하였으며 카메라의 pan · tilting에 의한 X, Y축 위치검출과 pan · tilting된 위치에서 레이저센서에 의해 Z축 거리를 구함으로써 보다

Table 3 Results of position detecting error

Actual Distance (mm)	Position Detection Error (mm)		
	No Hidden	One Side Hidden	Both Side Hidden
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

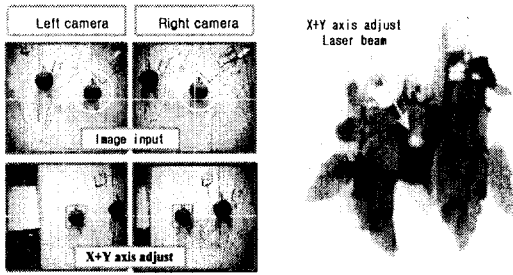


Fig. 7 Results of position detecting.

정밀한 위치검출이 가능하였다. 그림 7의 왼쪽은 임의의 위치에 있는 토마토를 pan·tilting하여 두 카메라의 중심에 토마토의 중심을 맞추는 결과를 나타낸 것이고, 오른쪽은 앞에 양쪽면이 가려진 경우에 있어서 토마토 중심부근의 한 지점에 레이저센서의 빔 발사가 되어 직선거리를 검출함으로써  $\pm 5\text{mm}$  이내의 오차로 검출된 것을 나타낸 것이다.

#### 4. 요약 및 결론

토마토는 한 화방에 3~5개 정도가 열리고 동시에 익지 않고 불균일하게 성숙되기 때문에 익은 것만 선택적으로 골라서 수확해야 한다. 또한 과실간 중첩되거나 잎, 가지 등의 장애물에 일부 가려진 경우가 많기 때문에 이와 같은 환경에서 수확작업을 로봇화 하기 위해서는 원숙토마토의 인식과 중첩된 토마토를 개체화할 수 있는 기술의 개발, 그리고 3차원 위치를 검출할 수 있는 시각장치의 기술 개발이 선행되어야 한다. 또한 검출된 3차원 위치로 움직일 수 있는 머니플레이터와 토마토의 꼭지를 절단하여 수확하는 엔드이펙터 등의 기술이 개발되어야 한다. 본 연구는 카메라의 pan·tilting에 의해 임의의 위치에 열려있는 토마토를 대상으로 잎 등의 장애물에 가려진 경우에 대해서도 레이저센서와 조합하여 3차원 위치를 검출할 수 있는 수확용 로봇의 시각장치를 개발하기 위하여 수행하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 시스템은 스테레오 영상처리를 위한 2대의 CCD 카메라와 영상처리용 보드, 카메라에서 토마토까지의 직선거리를 검출하기 위한 레이저센서 그리고 pan·tilting을 위한 6축 머니플레이터와 제어용 콘트롤러 등으로 구성하였다.

2) 카메라의 위치를 고정시켜 스테레오 영상처리에 의한 위치검출 결과, 토마토가 카메라 렌즈의 중심으로부터 멀리 떨어진 위치에 존재할수록 위치오차가 증가하였으나, 카메라의 pan·tilting에 의한 스테레오 영상처리로 3차원 위치를 검출함으로써 렌즈 중심으로부터 떨어진 위치에 있는 토마토에 대해서도  $\pm 10\text{mm}$  이내의 오차로 검출할 수 있었다. 그러나 앞에 가려진 경우에는 카메라만 이용할 경우 두 카메라에서 입력된 동일 토마토의 크기 및 가려진 위치가 다르기 때문에 오차가 증가하였다.

3) 스테레오 영상처리에 의한 pan·tilting과 레이저센서를 조합함으로써 앞에 가려진 토마토에 대해서도 X, Y축은 10mm, Z축은 5mm 내외의 오차로 검출할 수 있었다.

#### 참고 문헌

1. 농촌진흥청. 1993. 기계화 적응형 과수 모델과 무인로봇 개발. 농촌진흥청 특정연구보고.
2. 조용대. 1991. 과실수확용 로봇의 영상처리와 작동 알고리즘 개발. 서울대학교 석사학위논문.
3. Subrata, I. D. M., T. Fujiura, H. Yamada, M. Hida, T. Yukawa and S. Nakao. 1996. Cherry tomato harvesting robot using 3-D vision sensor(part 1). J. of the japanese society of agricultural machinery 58(4):45-52(In Japanese).
4. Subrata, I. D. M., T. Fujiura, H. Yamada, M. Hida, T. Yukawa and S. Nakao. 1996. Cherry tomato harvesting robot using 3-D vision sensor(part 2). J. of the japanese society of agricultural machinery 60(1):59-68(In Japanese).
5. Ryu, K. H., S. H. Noh and Y. H. Kim. 1989. Development of a Fruit Harvesting Robot(II). J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 14(2):104-114(In Korean).
6. Kondo, N., Y. Nishitsuji, P. P. Ling and K. C. Ting. 1996. Visual feedback guided robotics cherry tomato harvesting. Transactions of the ASAE 39(6):2331-2338.
7. Rafael c. Gonzalez. 1992. Digital Image Processing. Addison Wesley Pub. Co.:68-71.
8. Hayashi, S. and O. Sakaue. 1997. Basic Operation of Tomato Harvesting System using Robot. 野菜·茶業試驗場研究報告 12:133-142(In Japanese).