

조직배양체 이식로봇 시스템의 개발 (II) - 기계시각 시스템 -

Development of a Transplanting Robot System for Tissue Culture Plants (II) - Machine Vision System -

이 현 동*	김 기 대*	김 찬 수*	김 정 필*	정 혁**
정회원	정회원	정회원	정회원	
H. D. Lee	K. D. Kim	C. S. Kim	J. P. Kim	H. Jung

ABSTRACT

This study aims at detecting the three dimensional gripping points for the transplanting robot system to grip in the process of developing transplanting robot system, which is one of the automation systems for transplanting tissue culture. The stereo vision system equipped with two cameras has been used to detect the gripping points of the plant stem. The method for matching the plants of the image information which came from two cameras was to measure the total numbers of pixels, leaves, and the heights of the plants. The gripping points were detected near the roots after extracting the stem parts by the standard deviation of the X axis according to the Y axis. The performance test of the developed program showed that the detecting errors of the gripping points were 0~1mm for X axis and 1~2mm for Y & Z axis. The mean running time of the program was about 3 seconds.

주요용어(Key Words): 조직배양(Tissue culture), 식물(Plants), 악점(Gripping points), 스테레오 비전시스템 (Stereo vision system), 이식(Transplanting)

1. 서 론

식물 조직배양이란 세포, 조직, 또는 기관 등을 식물체로부터 무균적으로 분리하여 적당한 조건하에서 배양하여 생육시키는 기술을 말한다. 조직배양의 대상작물로 인공씨감자를 들 수 있는데 인공씨감자란 감자줄기의 눈이나 캘러스를 추출하여 인공배지에 배양하면서 몇가지 특정한 처리(고농도 탄수화물, 저온, 단일조건)를 통하여 생성한 완두콩만한 초

소형 감자를 말한다. 이 초소형 감자는 파종시 일반 씨감자의 바이러스, 곰팡이, 박테리아 등의 병원균 감염현상을 막을 수 있으며, 인공씨감자로 재배된 감자는 일반 씨감자로 재배된 감자보다 양질이며 다량으로 생산된다.

인공씨감자의 조직배양에서는 이식과정이 필수적인 요소이지만 이 이식과정에서는 숙련된 노동자가 무균환경하에서 작업을 행하기 때문에 생산비의 60~70% 정도가 인건비로 소요된다. 따라서 생산비

* 충남대학교 농과대학 농업기계공학과

** 생명공학 연구소

에서 차지하는 인건비의 절감을 위하여 조직배양체의 이식 자동화가 요구되고 있는 실정이다.

조직배양을 비롯한 원예작물의 이식 작업에 있어서 식물의 위치 및 식물의 악점(gripping point)에 대한 3차원 정보는 필수적인 요소가 된다. 3차원 위치 정보를 얻기위한 방법으로는 1대의 카메라와 초음파를 이용하는 방법, 1대의 카메라와 구조광을 이용하는 방법¹⁾, 그리고 2대의 카메라를 이용하는 방법^{1,2)} 등이 있다. 1대의 카메라와 초음파 또는 구조광을 이용한 3차원 정보 인식은 식물의 위치검출시 식물 1개만이 있을 경우에는 어느정도 정확한 위치를 검출할 수 있지만 여러 개의 식물을 동시에 인식하게 되면 인식하지 못하는 경우가 있다. 카메라 2대에 의한 스테레오 비전시스템을 이용한 3차원 위치검출은 각각의 카메라에서 얻어진 2차원 정보로부터 3각측량법을 이용하여 3차원 정보를 추출한다.

본 논문은 식물 조직배양의 생산비를 낮추기 위한 자동화의 하나인 조직배양체 이식을 위한 이식로봇 시스템 개발을 목적으로 로봇 그리퍼가 집어야 할 식물줄기부의 3차원 악점(握點)을 검출하는 방법을 기술하였고, 그 구체적인 목적은 다음과 같다.

1) 자동화에 적절한 대상작물의 배양용기 및 배양 방법의 개선.

2) 식물의 3차원 위치정보와 카메라 영상정보간에 영향을 미치는 인자를 추출하기 위한 영상 측도 설정을 수행하고, 최적 인식영역 분석.

3) 각각의 카메라에서 얻은 영상정보에서, 대응하는 식물영상의 매칭(matching) 방법과 식물 줄기부 추출 알고리즘의 개발.

4) 우측 카메라의 렌즈중앙을 원점으로 하여, 스테레오 비전시스템을 이용한 식물줄기부의 악점(X, Y, Z)좌표 추출.

2. 재료 및 방법

가. 대상 작물

본 연구에서는 2주간 조직배양한 대지품종의 인공 씨감자 줄기부를 대상작물로 하였다. 그림 1은 실험에 사용한 인공씨감자의 줄기부를 보여주며, 인공씨감자가 열리기 바로 직전의 식물체를 실험에 사용하였다.

기존의 식물 조직배양방법은 배양병이나 삼각플라스크 등의 용기를 이용한 배양 방법을 사용하기 때문에 이식작업을 하기 위해서는 사람이 직접 핀셋으로 식물을 집어 꺼내는 식으로 작업 하였다. 그러나 이러한 배양 및 이식방법은 자동화에 어려움이 있으므로 이식작업을 자동화 하기 위해서는 로봇 그

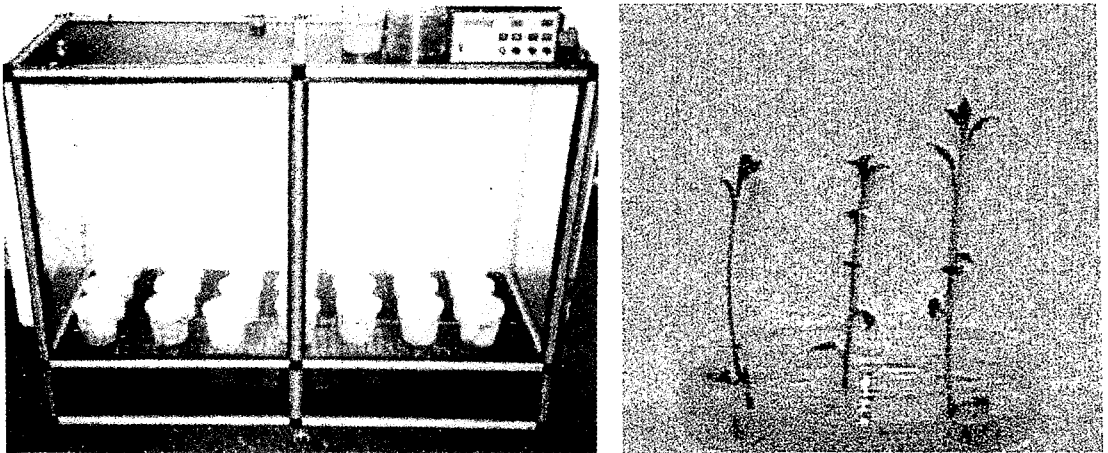


Fig. 1 Cultivating of artificial potato seedling.

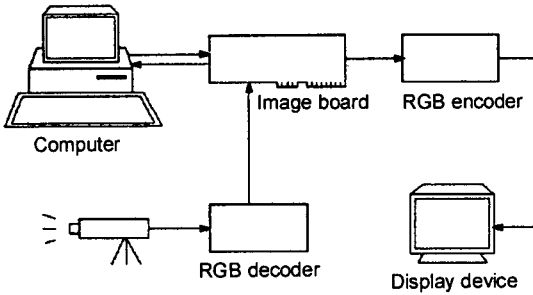


Fig. 2 The schematic diagram of stereo vision system.

리퍼의 접근이 용이하고 식물의 위치를 정확하게 추출하기 용이하도록 그림 1과 같이 배양액을 담고 임의로 3개의 식물을 카메라가 인식하기 쉽도록 일정 간격을 유지시키며 이식시킨 페트리디쉬(petri-dish)를 윗부분이 넓고, 깊은 용기에 넣어 배양시켰다.

나. 하드웨어 설계

본 연구의 하드웨어는 영상정보를 입력받는 영상 인식부, 입력받은 영상정보를 PC에 전달하는 디코더와 칼라 영상처리 보드, 그리고 입력받은 영상을 실시간 주사할 수 있는 엔코더 및 모니터로 구성하였다. 그림 2는 스테레오 비전시스템의 구성도를 보여준다. 또한 영상 인식부는 식물을 올려놓는 탁자, 식물과 배경을 분리시키기 위해 용이한 배경판, 영상을 입력받는 카메라 2대, 그리고 광원으로 구성하였다. 특히 탁자와 배경판은 연결되어 있으며 카메라와의 거리를 조절할 수 있도록 탁자 밑에 캐스터를 부착하여 식물과 카메라간의 사이를 조절할 수 있도록 하였다. 광원은 220V, 0.13A, 20W 삼파장 주광색 형광등을 사용하였으며 광원의 위치에 따른 식물의 그림자가 영상에 입력되지 않도록 영상입력 방향과 동일한 방향으로 광원을 설치하였다. 그림 3은 영상인식부의 구성도를 나타낸 것이다.

2대의 카메라는 서로간의 간격을 조절할 수 있도록 LM 가이드 위에 설치하였으며, 이로 인하여 두 카메라의 X축을 일치시켜 X축이 에피폴라 라인(epipola line)이 되도록 설정하였다. 표 1은 본 연구

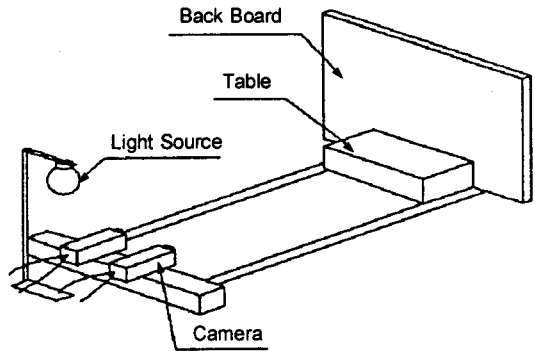


Fig. 3 The schematic diagram of the image acquisition apparatus.

Table 1 The specification of stereo vision system

Item	Maker	Model
Computer	Samsung	Pentium pro
Camera	Pulnix America	TMC-7
Image board	Data Translation	DT2871
RGB decoder	Kramer	VM-19
RGB encoder	Kramer	4041C

에 사용된 시스템의 사양을 보여준다.

다. 영상 측도설정

본 연구는 입력받은 영상정보를 통해 식물의 악점(握點)을 검출하는 것이 목적이며, 그에 따라 영상정보로부터 거리를 추출하여야 한다. 이는 영상에 나타난 거리 1 화소당 실제 길이의 산출이며, 본 연구에서는 실험을 통하여 X, Y축의 영상 측도설정을 실시하였다.

먼저, X축의 경우 그림 4에서 보는 바와 같이 a, b, c, d를 일정하게 위치시킨 물체를 Z값을 변환(400, 450, 500, 550, 600mm)시켜 좌측 영상과 우측 영상에서 얻은 화소단위인 X_{LP} , X_{RP} 를 얻은 후 삼각형의 닦은 조건으로 구한 식(1), 식(2) 값과의 관계에 의하여 1 화소당의 실제길이(mm)를 산출하였다.

물체의 위치 좌표는 그림 4에서 보듯이 a값을 일정하게 하고, 카메라에서 일정거리(Z축 거리) 떨어진 곳에 Y축 값을 알 수 있도록 특정 표시를 해 둔 못을 세워놓고, 개발된 알고리즘으로 측정된 X, Y, Z축 값을 실제 거리와 비교, 분석 하였다.

$$X_L = \frac{f \cdot c}{Z} = \frac{f \cdot (a-b)}{Z} \dots\dots\dots (1)$$

$$X_R = \frac{f \cdot X}{Z} = \frac{f \cdot (d-c)}{Z} \dots\dots\dots (2)$$

또한, Y축의 경우 그림 5에서 보는 바와 같이 카메라의 수직 중앙으로부터 길이 20mm의 물체를 Z축을 변환(400, 450, 500, 550, 600mm)시켜 Z축 값의 변화에 따른 영상상의 20mm에 해당하는 화소수를 측정하였다. 각 Z축값에 따른 20mm에 해당하

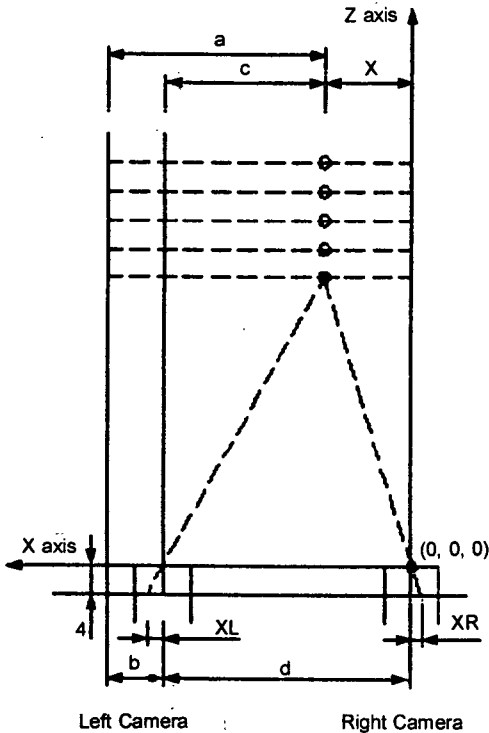


Fig. 4 The schematic diagram of image calibration (X axis).

는 화소수로 20을 나눔으로서 Z축값에 따른 1 화소 당 실제길이(Y)를 산출할 수 있는 계산식을 얻어내었다.

라. 소프트웨어 설계

(1) X, Z축 약점 검출

그림 6의 스테레오 비전 시스템의 기하학적 구조 (X, Z축)에서 살펴보면 삼각형의 닮음 조건으로 식 (3)과 식(4)를 나타낼 수 있다. 여기서 식(3)과 식(4)를 같다고 보면 식(5)와 같은 식이 성립되어 Z축 약점을 얻을 수 있으며, 식(3) 또는 식(4)에서 X축 약점을 구할 수 있다. 여기서 X_L, X_R 은 영상상의 X_{LP}, X_{RP} 와 영상 축소설정에서 나온 1화소당 실제길이와의 곱으로 나타낼 수 있다.

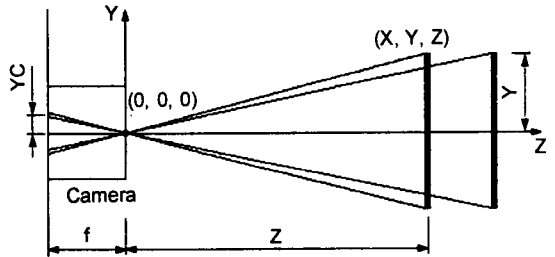


Fig. 5 The schematic diagram of image calibration (Y axis).

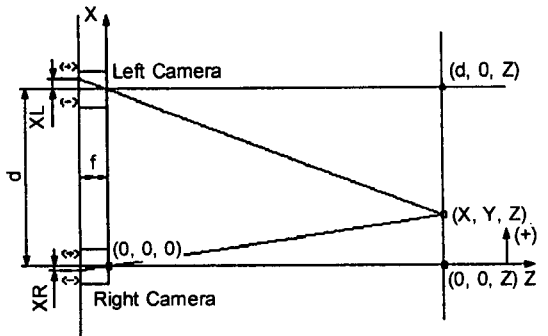


Fig. 6 The schematic diagram of geometric construction of stereo vision system (X, Z axis).

$$X_L : f = (d - X) : Z$$

$$X = d - \frac{X_L \cdot Z}{f} \dots\dots\dots (3)$$

$$X_R : f = X : Z$$

$$X = \frac{X_R \cdot Z}{f} \dots\dots\dots (4)$$

$$\therefore Z = \frac{fd}{X_L + X_R} \dots\dots\dots (5)$$

(2) Y축 약점 검출

Y축 약점의 계산은 식(5)에서 얻은 Z축 값을 Y축 영상 축소설정에서 나온 계산식에 대입하여 Z축 값에 따른 1 화소당 실제 길이를 산출하였고, 화소 단위의 Y축 약점값과 영상 중앙과의 차이로 계산한 1 화소당 실제 길이와의 곱으로 Y축 약점의 실제 길이를 산출하였다. 또한, 산출된 Y축 약점의 부호가 (+)일 경우에는 영상 중앙 위쪽에 약점이 위치하고, (-)의 경우 영상 중앙 아래쪽에 약점이 위치하는 것으로 판단하도록 하였다.

(3) 영상간의 식물 매칭방법 및 식물 줄기부 약점 검출

본 연구에서는 좌측 카메라에서 얻은 영상 정보와 우측 카메라에서 얻은 영상 정보에서 같은 식물을 찾아 내기 위해서, 두 영상간의 매칭방법으로 각각의 식물별 라벨링을 실시하여 식물별 총 화소수, 잎수, 식물 높이를 측정하여 두 영상으로부터 같은 식물을 찾아내었다. 먼저 총 화소수는 라벨링된 식물의 총 화소수를 세어서 두 식물영상의 총 화소수 차이가 15개 이하가 될 때, 잎수는 각 식물을 줄기부분과 잎부분으로 구분한 후 잎으로 판단된 부분의 개수를 세어 두 영상간의 개수가 일치할 때, 그리고 식물의 높이는 영상에서 식물의 윗끝 화소좌표를 입력받아 두 식물영상간의 윗끝좌표 차이가 5 이하일 때 같은 식물로 판단하였다.

식물줄기부 약점 검출은 그림 7에서 보는 바와 같

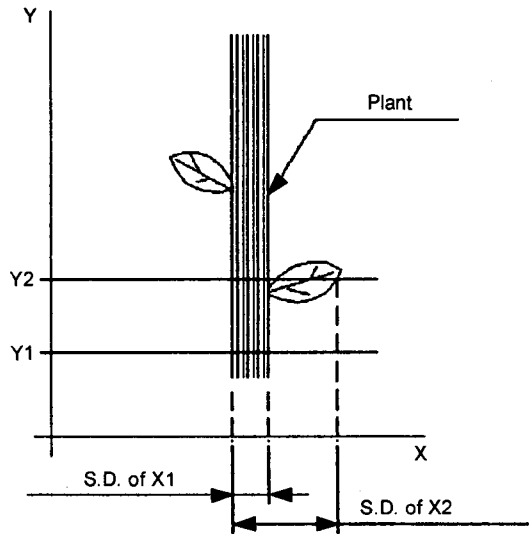


Fig. 7 The schematic digram of detecting plant stem and gripping point.

이 Y축 좌표에 따른 X축 좌표의 표준편차로 줄기부분을 추출한 후 뿌리부분에 근접한 줄기부분에서 약점을 검출하였다. 각각 라벨링된 식물을 Y좌표에 따른 X좌표들의 평균 및 표준편차를 구하여 표준편차가 적정 한계 이하일 경우에는 줄기부로 인식하고 적정 한계 이상일 경우에는 잎이 있는 것으로 간주하여 줄기부를 추출하였다. 약점 검출은 줄기부에서 마디 간격이 일정길이 즉, 로봇 그리퍼의 식물 접촉부(식물을 집는 부분, 8mm)의 폭보다 긴 부분을 선택하여 그 부분의 밑에서부터 식물접촉부 폭 만큼의 길이의 반을 약점의 Y축 좌표로 설정하였으며, 이때의 Y좌표에 해당하는 X좌표의 줄기부 평균을 약점의 X축 좌표로 설정하였다.⁹⁾ 여기서 설정된 X, Y값은 화소 단위이기 때문에 우측 카메라 렌즈의 중앙을 직교좌표계의 원점으로 설정하여 (X, Y, Z) 좌표로 약점을 산출하였다. 식물줄기부 약점 검출용 프로그램은 Microsoft社의 Visual Basic 5.0을 사용하여 개발하였으며, 그림 8은 식물줄기부의 3차원 약점 검출용 프로그램의 흐름도를 나타낸 것이다.

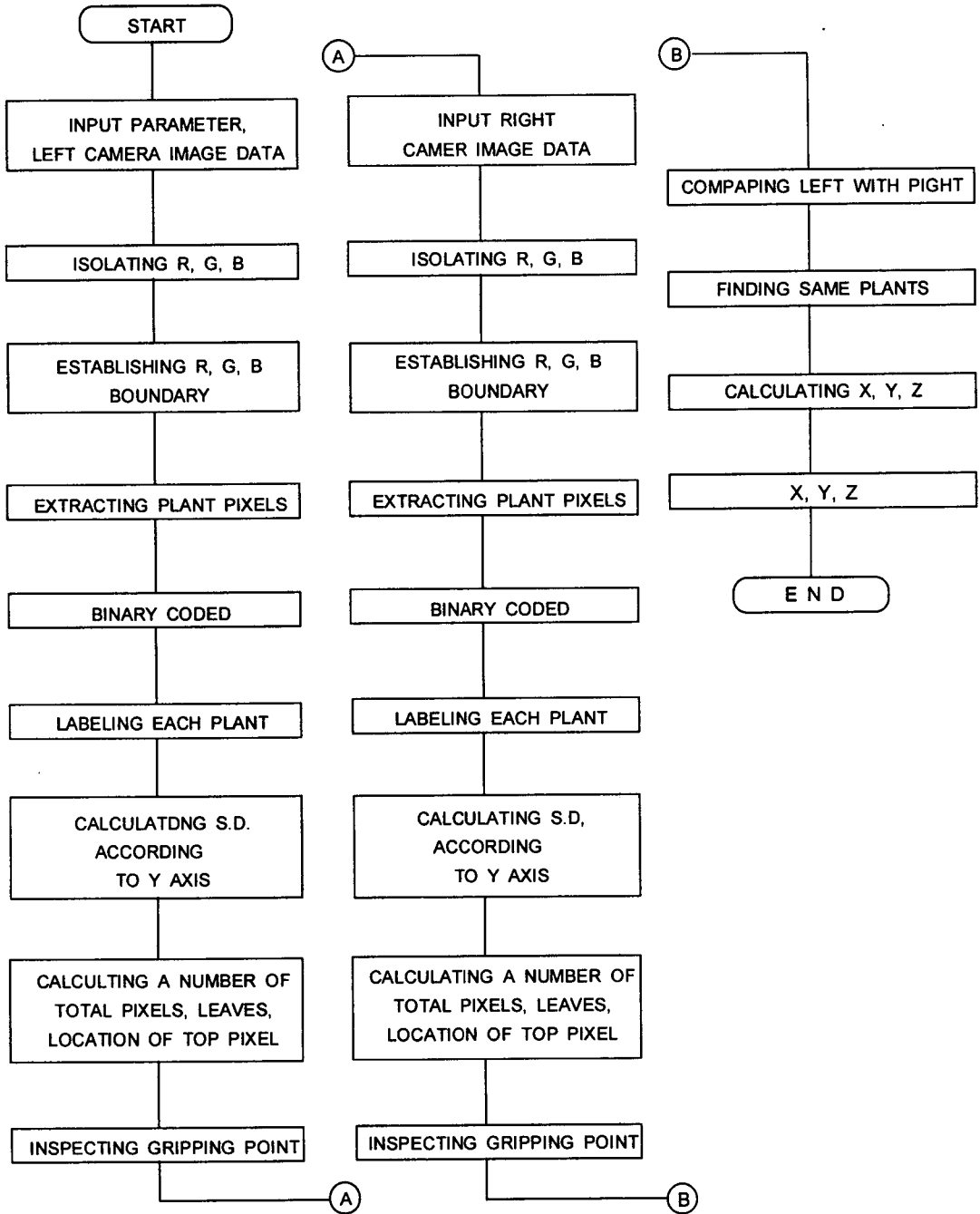


Fig. 8 The flow-chart of computer program for detecting gripping point.

마. 식물줄기부의 3차원 악점 검출 성능실험

본 연구에서는 연구에 사용된 시스템 및 식물 줄기부의 3차원 악점 검출 프로그램의 성능을 실험하기 위하여 최적 인식영역을 측정하였다. 이미 알고

(1) 최적 인식영역 측정

있는 좌표(X, Y)에 물체를 위치시킨 후 Z축 거리를 옮겨가며 실험하여 실제 거리 및 위치와 검출 결과를 비교하여 평균, 표준편차, 최대값, 최소값으로 나타내어 평균값이 가장 근사하고 표준편차가 작은 부분을 최적 인식영역으로 판단하였다.

(2) 식물줄기부의 3차원 약점 검출 성능실험

본 실험에서는 조직배양체 이식의 자동화를 위하여 교체한 배양용기에 임의로 3개의 식물을 배양시켜 실험에 사용하였다. 최적 인식영역 측정결과에서 나온 거리내에 임의로 배양체가 심겨진 배양용기를 위치시킨 후 우측 카메라 렌즈 중앙을 원점(0, 0, 0)으로 하여 3차원 약점을 길이단위(mm)로 검출하였고, 검출결과와 실제 위치를 비교·분석하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 영상 측도설정 결과

(1) X축 영상 측도설정 결과

본 연구는 입력받은 영상정보를 통해 식물의 약점(握點)을 검출하는 것이 목적이며, 그에 따라 영상정보상의 거리를 알아야 하기 때문에 영상에 나타난 길이 1 화소당 실제 길이를 산출하였으며 그 산출 결과는 표 2와 같다. 좌측, 우측 카메라 간격은

100mm 일 때 인식영역이 시스템에 적합하고 정확도가 높다고 사료되었기에 고정하여 사용하였다.²⁾

표 2에서 보듯이 Z값 변화에 상관없이 a, b, c, d 값이 일정할 경우 영상 1 화소당 실제 길이는 0.012 mm로 나타났다.

(2) Y축 영상 측도설정 결과

Y축 영상 측도설정 결과가 표 3과 같이 나타났다. 영상의 수직 중앙으로부터 길이 20mm의 물체를 Z축 거리를 변환(400, 450, 500, 550, 600mm)시켜 Z축 값의 변화에 따른 영상에 나타난 길이 20mm에 해당하는 화소수를 측정하였다. 각 Z축 값에 따른 길이 20mm에 해당하는 화소수로 20을 나누어 Z축 값에 따른 Y축 방향의 1화소당 실제길이를 산출하였다(식(6)). Y축 값은 식(6)에서 나온 값(Y_p)을 약점 검출시 나온 화소단위의 Y축값과 곱하면 Z축 거리별 실제 길이(Y)가 산출된다.

$$Y_p = \frac{20}{0.59447136 + \frac{33,998.652}{Z}} \dots\dots\dots (6)$$

where, Y_p = the length per 1 pixel according to Z axis value (mm)
 Z = Z axis value of gripping point attaining from eq(5) (mm)

Table 2 The result of image calibration (X axis)

Z (mm)	Left Image			Right Image		
	c (= a-b) (mm)	X _{LP} (num)	X _L (mm)	X (= d-c) (mm)	X _{RP} (num)	X _R (mm)
600	57	126	1.52	43	96	1.147
550		138	1.658		104	1.251
500		152	1.824		115	1.376
450		169	2.027		127	1.529
400		190	2.28		144	1.72
Result	0.012 mm/pixel			0.012 mm/pixel		

※ refer to Fig. 4.

Table 3 The result of image calibration (Y axis)

Z (mm)	A number of pixels coming under 20mm from center of image (pixel)
400	86
450	76
500	68
550	62
600	58

Table 4 The result of computed range according to various Z values

Z (mm)	Mean (mm)	S.D.	Max. (mm)	Min. (mm)
600	605.3	2.20	608	601
550	549.7	1.41	552	548
500	497.9	1.92	501	496
450	449.1	1.73	452	447
400	401.7	1.52	403	398

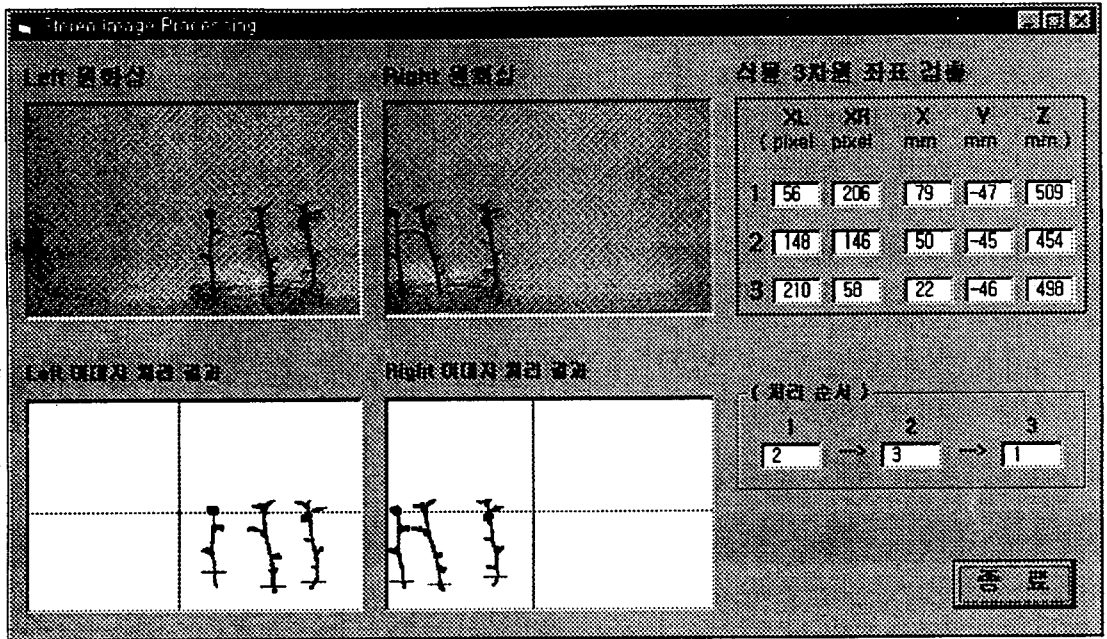


Fig. 9 The result of detecting gripping points by stereo vision system.

나. 식물줄기부의 3차원 악점 검출 성능실험 결과

(1) 최적 인식영역 측정 결과

본 연구의 시스템 및 식물 줄기부의 3차원 악점 검출 성능을 실험하기 위하여 최적 인식영역을 측정 한 결과가 표 4에 나타나 있다. 이미 알고있는 좌표 (X, Y)에 물체를 위치시킨 후 Z축 거리를 옮겨가며 실험하여 실제 길이 및 위치와 검출 결과를 비교하여 평균, 표준편차, 최대값, 최소값으로 나타내어 최

적 인식영역을 산출하였으며, 각 Z축 거리별 X, Y값을 달리하여 30번 반복하여 실험하였다. 결과를 살펴보면 카메라 렌즈 중앙부터 Z축으로 떨어진 거리가 400mm에서 550mm 사이에서 실제길이와 근사한 값이 나왔으며, 그에 따라 400mm에서 550mm 부분을 최적 인식영역으로 설정하였다.

(2) 식물줄기부의 3차원 악점 검출 성능실험 결과

본 실험에서는 조직배양체 이식의 자동화를 위하여 교체한 배양용기에 임의로 3개의 식물을 배양시

켜 실험에 사용하였다. 최적 인식영역 측정결과에서 나온 Z축 거리 400~550mm 부근에 배양체가 심겨진 배양용기를 위치시킨 후 우측 카메라 렌즈 중앙을 원점(0, 0, 0)으로 하여 3차원 악점을 길이단위(mm)로 검출하였다. 좌측, 우측 카메라에서 받은 영상정보에서 각 식물별 총 화소 수, 잎 수, 높이 등을 추출하여 두 영상간 매칭작업을 하여 같은 식물을 판단하였으며, 식물의 줄기부를 검출하여 각 식물별 악점을 검출한 후, (X, Y, Z)좌표로 악점을 검출하였다. 배양체의 악점을 검출하는데 소요되는 시간은 두 카메라에서 영상을 획득하여 이치화와 식물별 라벨링을 실시하여 화면상에 주사하는 시간 각각 평균 1초 정도, 악점 검출 프로그램의 실행 시간이 평균 1초로 약 3초 정도가 소요되었다.

그림 9에서는 식물 줄기부의 3차원 악점 검출 프로그램 성능실험결과의 한 예를 보여주고 있다. 악점 검출 결과를 살펴보면 실제 측정길이와 X축은 0~1mm, Y축은 1~2mm, Z축은 1~2mm의 오차를 냈다. 이 오차는 화소단위(pixel)로부터 길이단위(mm)로 환산할 때 반올림에 의한 오차, 시스템 구성의 부정확성 등에 따른 오차의 누적에 의해 일어난 오차라 사료된다.

4. 요약 및 결론

조직배양에서는 이식과정이 필수적인 요소이지만 이식과정에서는 숙련된 노동자가 무균환경하에서 작업을 행하기 때문에 생산비의 60~70% 정도가 인건비로 소요된다. 따라서 생산비에서 차지하는 인건비를 감소시킴으로 인한 생산비의 감소를 위하여 조직배양체 이식의 자동화가 요구되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 식물 조직배양의 생산비를 낮추기 위한 자동화의 하나인 조직배양체 이식을 위한 이식로봇 시스템의 개발에서 로봇 그리퍼가 집어야 할 식물줄기부의 3차원 악점(握點)을 검출하는데 목적이 있으며 연구결과는 다음과 같다.

(1) 식물줄기부의 악점(握點)을 검출하기 위하여 카메라 2대를 이용한 스테레오 비전 시스템을 사용하였으며 카메라간 X축을 일치시켜 X축이 에피폴

라 라인이 되도록 설정하였다.

(2) 조직배양 식물에 로봇 그리퍼의 접근이 용이하고 식물의 위치를 정확하게 알 수 있도록 배양액을 담아 식물을 이식시킨 페트리디쉬(petri-dish)를 윗부분이 넓고, 깊은 용기에 넣어 배양시켰다.

(3) 식물의 3차원 위치정보와 카메라 영상정보간에 영향을 미치는 인자를 추출하기 위한 영상 축소 설정을 수행한 결과 X축이 0.0125mm/pixel로 나타났다. 최적 인식영역 측정결과 카메라 렌즈 중앙으로부터 400mm에서 550mm 떨어진 부분에서 최적 인식을 하였다.

(4) 2대의 카메라에서 얻은 영상정보간의 영상 매칭방법으로는 각 식물별 총 화소 수, 잎 수, 식물 높이 등을 측정하여 두 영상간의 같은 식물을 찾아내었으며, Y축에 따른 X축의 표준편차로 줄기부분을 추출한 후 뿌리부분에 근접한 줄기부분에서 악점을 검출하였다.

(5) 식물줄기부 악점 검출용 프로그램 성능실험 결과, 실제 측정길이와 X축은 0~1mm, Y축은 1~2mm, Z축은 1~2mm의 오차를 냈으며, 악점 검출 프로그램의 실행시간은 평균 약 3초 정도의 시간이 소요되었다.

이상의 결과에서 살펴보면, 실측길이와 검출길이의 오차는 화소단위(pixel)로부터 길이단위(mm)로 환산할 때 반올림에 의한 오차 및 시스템 구성의 부정확성 등에 따른 오차의 누적에 의해 일어난 오차라 사료되며, 영상을 획득할 때의 그림자 및 산란 등의 조명작용 보정, 획득한 영상에서의 식물 분리 및 악점 검출 알고리즘 보정, 시스템 조립시 조립오차의 보정 등이 수행 된다면 보다 정확한 악점 검출이 가능하리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김중준. 1994. 스테레오 비전시스템을 이용한 3차원 물체의 인식에 관한 연구. 청주대학교 대학원.
2. 손재룡, 홍종태, 박환중, 최 용, 최규홍. 1997. 스테레오 영상처리를 이용한 토마토 위치검출 알고리즘 개발. 한국농업기계학회 1997년 동계학술대

- 회 논문집. 409-414.
3. 송무섭. 1991. Stereo matching 방법에 의한 물체의 거리측정에 관한 연구. 동아대학교 대학원.
 4. 이현동, 김기대, 김찬수. 1998. 조직배양체 이식로봇 시스템의 개발(I) : 소프트 그리퍼. 한국농업기계학회지 23(5):491-498.
 5. 황 현, 장영창, 임동혁. 1998. 컴퓨터 시각과 레이저 구조광을 이용한 물체의 3차원 정보 추출. 한국농업기계학회지 23(4). 381-390.
 6. Vanderchaeghe, A. M. and P. C. Debergh. 1988. Automation of tissue culture manipulations in the final stages. ACTA horticulturae 227:399-401.
 7. Vandercook, C. E. and B. Tisserae. 1985. Development of an automated plant culture system. Plant Cell Tissue Organ Culture 5:107-117.
 8. Watake, H. and A. Kinase. 1990. Robot for plant tissue culture. Robot No. 64:74-79.