

기계시각과 퍼지제어를 이용한

3 자유도 상추 수확 로봇 개발⁺

Development of a 3-DOF Robot for Harvesting a Lettuce Using Machine Vision and Fuzzy Logic Control

조 성 인*
정회원
S.I.Cho

장 성 주*
정회원
S.J.Chang

남 기 찬*
정회원
K.C.Nam

1. 서론

우리나라의 시설 작물 경지면적은 90년 1.9%에서 97년 4.8%로 증가하고 있으며(한국농기계공업협동조합, 1998), 유리 온실도 많이 보급되고 있다. 그러나 자동 파종기, 복합 환경제어 및 자동 양액 관리 시스템 등 일부분만 자동화가 진행되고 이식, 선별 및 수확 등의 작업은 아직도 대부분 인력에 의존하고 있다(윤진하, 1996).

농촌진흥청에서 시설상추의 작업단계별 투입노동력 내역을 조사한 바에 따르면 전체 노동 투입시간에 대하여 수확작업에 47%의 노동 시간이 소모되고 있다. 따라서, 수확작업의 자동화를 통해 상당부분 노동력 부족을 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

최근 들어 농공학 분야에서 end-effector의 설계를 중심으로 한 농용 로봇 수확 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 멜론(Weber 등, 1991), 제라늄(Simonton 등, 1991) 등에 농용 로봇 수확 시스템이 적용된 사례가 있다. 그러나 대부분 산업용 로봇을 이용하여 개발된 시스템으로 비용이 비싸다는 단점이 있다. Tillet 등(1995)은 공압 장치를 이용한 2자유도 로봇을 제작하여 정확도와 비용 면에서 유리한 토마토 포장 로봇 시스템을 개발하였다.

본 연구는 성능과 비용면에서 경쟁력이 있는 수확 공정 자동화 시스템 구축을 위한 것으로, 연구의 목적은 다음과 같다.

(1) 상추 수확을 위한 매니플레이터와 end-effector를 설계·제작하고, 이를 제어할 퍼지 제어기를 구성한다.

(2) 구축한 전체 시스템의 성능을 실제 실험하여 평가한다.

2. 재료 및 방법

2.1 상추 수확 로봇 시스템 구성

개발된 상추 수확 로봇 시스템은 상추의 영상을 획득하는 기계시각 시스템, 높이를 측정하는 광 센서 장치, 수확위치로 공급하는 공급 장치, 수확하는 3 자유도 매니플레이터와

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

+ 본 연구는 '99년도 농림부 첨단연구 지원사업(과제번호: 98-3033)에 의해서 수행되었음.

end-effector, 처진 잎을 부상시켜 주는 잎 부상 장치 그리고 이러한 공정을 제어하는 제어기로 구성된다. 그림 1에 상추 수확 로봇 시스템의 구성도를 나타내었다.

2.2 상추 수확 알고리즘

상추 수확 알고리즘은 그림 2와 같다.

- ① 기계시각 시스템에서 상추 영상을 획득하고, 광 센서가 상추 높이를 측정한다.
- ② 상추 공급 장치에 의해 상추 압지 위치까지 상추를 하나씩 정위치 시킨다.
- ③ 매니플레이터가 상추 위치로 접근하고, 상추 잎 부상 장치가 상추 잎을 띄운다.
- ④ 퍼지제어에 의해 파지력이 제어되는 그리퍼가 상추를 압지한 후, 절단 칼날이 상추를 절단한다.
- ⑤ 매니플레이터가 회전하여 상추를 포장부로 이송한다.
- ⑥ 매니플레이터는 초기위치로 돌아가고, 단계 ①부터 반복한다.

2.3 매니플레이터

본 연구에서의 매니플레이터는 AC 서보 모터의 z축 회전 운동, 공압 실린더의 y축 전·후진 운동 그리고 스테핑 모터의 y축 회전 운동 등 3 자유도로 구성하였다.

AC 서보 모터

AC 서보 모터는 상추 수확 위치 및 포장 위치로의 회전 운동을 담당하며, 모터의 위치는 상추를 수확하는 위치와 포장되는 위치에 각각 1개의 광 센서를 설치하여 제어하였다. 사용된 AC 서보 모터는 비례·적분 제어(PI control) 방식이 적용되었다.

공압 실린더

공압 실린더는 매니플레이터가 수확 위치에 놓인 상추에 접근하도록 전·후진 운동을 담당한다. 공압 실린더의 전·후진 운동시 고려해야 할 사항들은 다음과 같다.

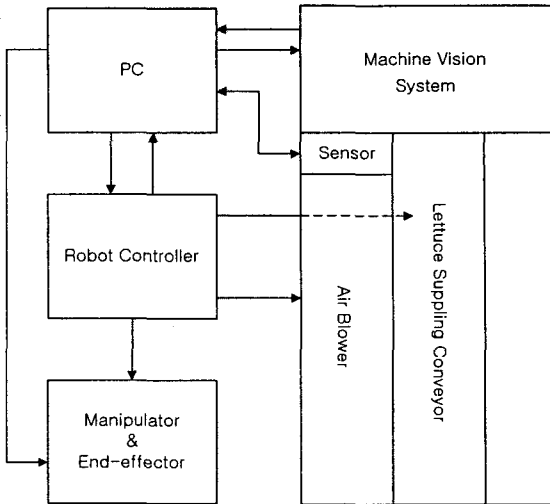


Fig. 1 Schematic diagram of a robot system for harvesting a lettuce.

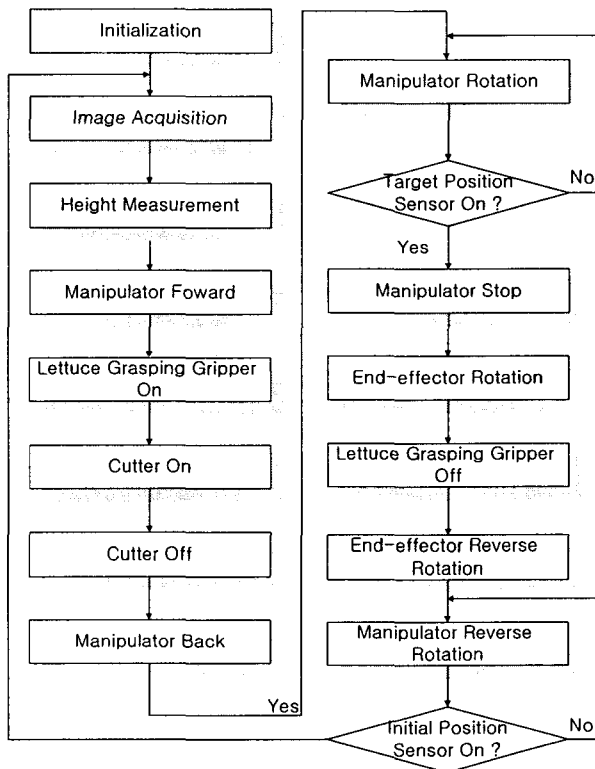


Fig. 2 Algorithm for harvesting a lettuce.

① 매니플레이터가 상추에 접근할 때 처진 잎의 손상을 방지하기 위하여 적당한 행정거리를 유지(200mm 정도)해야 한다.

② end-effector의 하중에 의한 공압 실린더(가이드 부착)의 처짐 정도를 고려해야 한다.
스텝핑 모터

상추를 포장부에 떨어뜨릴 때 end-effector에 의한 상추의 잎 손상을 줄이기 위해 상추의 자세를 보정할 필요가 있다. 상추의 자세 보정을 위해 end-effector를 180° 회전시켰다.

제어 장치

매니플레이터의 제어는 PIC 16C73A를 개선한 PB-1S라는 원칩 마이크로 컴퓨터를 이용하였다. 표 1에 PB-1S의 입·출력포트가 제어하는 내용을 정리하였다.

Table 1 Input · Output ports of the PB-1S

0		8	Input signal for stepping motor
1	Conveyor	9	Frequency signal for AC servo motor
2	Air blower	10	
3	Relay off (for end-effector)	11	Input from photoelectric sensor (start)
4		12	Input from photoelectric sensor (end)
5	Relay on (for end-effector)	13	PC signal
6	Input signal for stepping motor	14	Relay off (for air cylinder)
7	Direction signal for AC servo motor	15	Relay on (for air cylinder)

2.4 End-Effector

End-effector는 절단 칼날과 상추 압지 그리퍼로 구성하였다. 절단 칼날은 포트를 압지하면서 상추를 절단하도록 설계하였다. 솔레노이드 밸브와 릴레이를 이용하여 구동하며, PB-1S 원칩 마이크로 컴퓨터로 제어된다. 상추 압지 그리퍼는 상추에 손상을 주지 않는 적절한 파지력을 가지고 상추를 압지하는 동작이 이루어져야 한다. 이때 적절한 파지력을 결정하기 위해서는, 'stable grasp'를 유지하기 위해 요구되는 최소 파지력이나 상추에 손상을 일으키지 않고 가할 수 있는 최대 파지력에 대한 정보가 요구된다. 그리퍼가 상추를 파지할 때에는 그리퍼의 최대·최소 파지치수, 파지력 정도, 파지면의 강성, 상추의 중량, 크기, 기하학적 모양 등에 대한 정보가 필요하다. 개폐구간이 0°~180°인 에어척을 이용하였고, 핑거부는 MC(monomer cast)나일론과 압지하는 순간의 충격력을 줄이기 위해 스펀지를 접착하여 구성하였다. 그림 3에 end-effector가 부착된 매니플레이터를 나타내었고, 그림 4에 구동 제어기를 나타내었다.

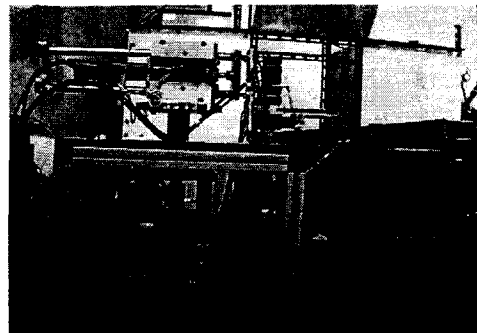


Fig. 3 Manipulator and end effector.

2.5 기계 시각 장치

상추의 영상을 획득하여 상추의 앞면적 및 기하학

적 형상 정보를 추출하기 위하여 기계 시각을 이용하였다. 기계 시각 장치는 PULNiX사의 칼라 CCD 카메라와 Matrox사의 Corona-LC/8 프레임 그래버를 이용하여 구성하였다. 획득된 영상은 8방향 체인 코딩(chain coding)을 통하여 앞면적을 계산하였다. 추출된 앞면적 정보는 상추 압지 그리퍼를 제어하는 퍼지 제어기의 입력변수로 사용되었다.

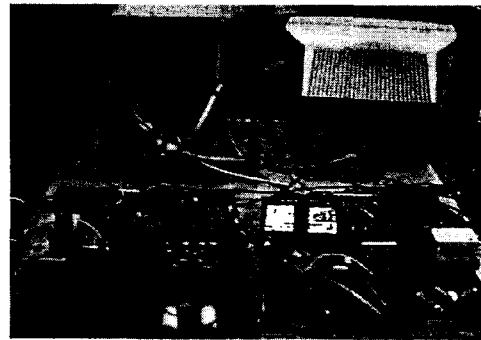


Fig. 4 Controller.

2.6 광 센서 장치

상추의 기하학적 형상 중 높이 정보를 추출하기 위하여 광 센서 6개를 3cm 간격으로 설치하여 상추의 높이 정보를 추출하였다. 추출된 상추의 높이정보는 퍼지 제어기의 입력변수로 사용되었다.

2.7 잎 부상 장치 및 상추 공급 장치

잎 부상장치는 잎을 공압으로 띄워 상추의 손상을 방지하기 위하여 제작되었다. 솔레노이드 밸브와 릴레이를 이용하여 구동되며, PB-1S 원칩 마이크로 컴퓨터에서 나오는 제어신호에 의해 제어된다. 상추 공급 장치는 재배상의 상추를 하나씩 정해진 위치로 이동시키기 위해 제작되었다. 상추 공급 장치의 구동은 AC 모터를 사용하였으며, line driver인 MC34C87과 릴레이를 이용하여 구동하였다.

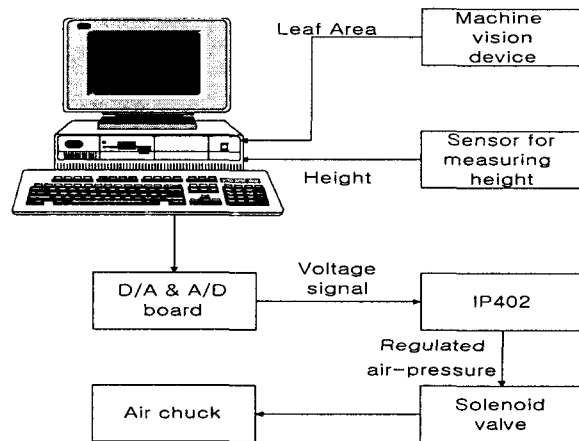


Fig. 5 Components of the fuzzy logic controller.

2.8 퍼지 제어기 구성

상추 압지 그리퍼의 파지력을 제어하기 위하여 퍼지 제어기를 사용하였다. 그림 5에 퍼지 제어기의 구성을 나타내었다. 입력은 앞면적과 높이를 사용하였고, 출력은 전압을 사용하였다. 퍼지 변수들의 값을 표 2, 3, 4와 같이 결정하였으며, 25개의 퍼지규칙을 사용하였다.

Table 2 Linguistic fuzzy variables of "Leaf area index"

VN	NA	ME	WI	VW
Very Narrow	NArrow	MEdium	WId	Very Wide

Table 3 Linguistic fuzzy variables of "Height index"

VS	SM	MD	TA	VT
Very Small	SMAll	MeDium	TAl	Very Tall

Table 4 Linguistic fuzzy variables of "Voltage"

VL	LO	LM	MM	MH	HI	VH
Very Low	Low	between Low & Medium	Medium	between Medium & High	High	Very High

3. 결과 및 고찰

3.1 매니플레이터 제어기

PI 제어가 적용된 AC 서보 모터의 모델링을 그림 6에 나타내었다. 그림 6을 이용하여 식 (1)과 같은 페루프 전달 함수를 구하였다.

$$\frac{\theta}{u} = \frac{K_p K_v K_r S + K_p K_i K_r}{J S^3 + K_v K_r S^2 + (K_i K_r + K_p K_v K_r) S + K_p K_i K_r} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 K_p : 위치비례계수

K_v : 속도비례계수

K_i : 적분계수 K_r : 토크상수 J : 모터의 관성

matlab을 이용하여 위치 비례계수는 500, 속도 비례계수는 500, 적분계수는 5로 선정하였다.

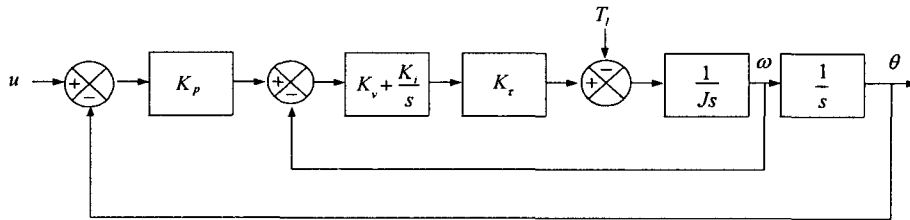


Fig. 6 Modeling of AC servo motor with the PI controller.

3.2 수확 성능 평가

수확 성능 평가를 위해서 온실재배에 적합한 적축면을 선정하여 재배하였다. 퍼지 제어에 의한 상추 압지 그리퍼의 파지력 제어 결과를 그림 7에 나타내었다. 잎면적과 높이가 커질수록 파지력도 커져 'stable grasp'를 유지하면서도 상추에는 손상을 주지 않았다. 상추 85포기를 대상으로 수확 실험을 하였다. 그림 8에 상추 수확기의 수확 장면을 나타내었다. 실험 결과, end-effector에 의한 잎 손상이 5포기 발생하였으며, 상추 한 포기를 수확하는 데 걸린 시간은 평균 5초였다. 잎 손상을 입은 경우는 상추의 맨 아래 잎 하나 정도가 부분적으로 찢겨지는 경우로 상품으로서의 가치는 충분하였다. 실험결과를 표 5에 정리하였다.

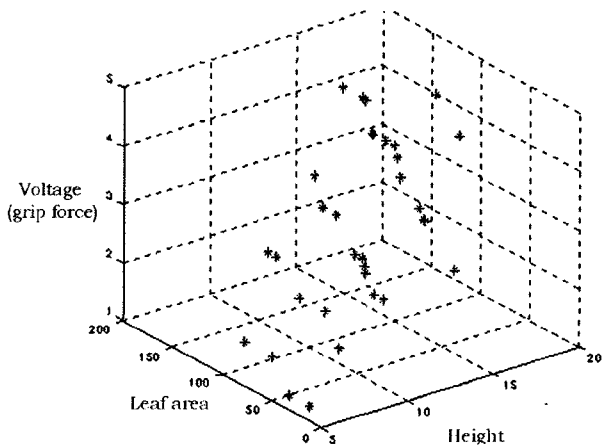


Fig. 7 Result of fuzzy logic control.

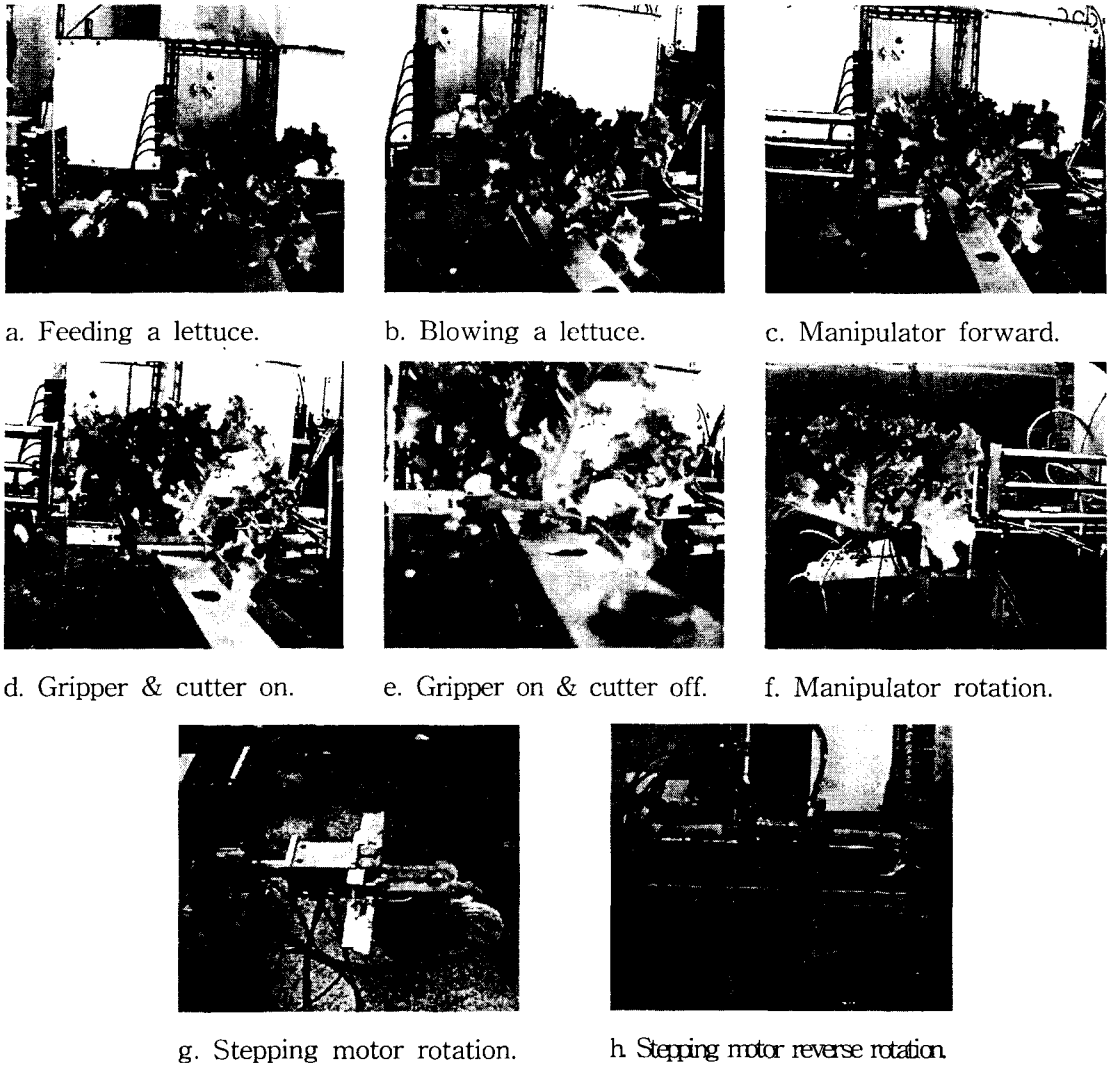


Fig. 8 Steps for the robotic lettuce harvesting.

Table 5 Performance of the robotic lettuce harvester

Result analysis	No. of lettuces	Percentage (%)
Successfully harvested	80	94.12
Harvested with little damage	5	5.88
Sum	85	100.00

4. 요약 및 결론

본 연구는 대단위 엽채류 생산 공장의 수확 자동화를 위하여 상추 수확용 로봇을 개발한 것으로, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 3자유도 매니퓰레이터, end-effector, 상추 공급 장치, 치진 잎을 부상시켜주는 잎 부상

장치, 영상 획득을 위한 기계 시각 장치, 높이 측정을 위한 광 센서 장치, 그리고 이를 제어하는 퍼지 제어기로 구성된 상추 수확 로봇 시스템을 개발하였다.

- 2) 그리퍼의 적정 파지력을 결정하기 위하여 25개의 규칙으로 구성된 퍼지 제어기를 사용하였다. 퍼지 제어기의 입력변수로는 앞면적과 높이 정보를 이용하였고, 출력변수는 에어 척 구동 전압을 이용하였다
- 3) 85포기의 적측면 상추에 대하여 수확 실험을 한 결과 94.12%의 성공률을 보였으며, 상추 한 포기를 수확하는데 평균 5초가 소요되었다.
- 4) 실험결과를 보면 개발된 상추 수확 로봇 시스템은 식물공장 자동화에 충분히 적용 가능하리라 판단된다.

5. 참고 자료

1. 한국농기계공업협동조합, 한국농업기계학회. 1998. 농업기계연감.
2. 윤진하. 1996. 한국의 원예시설 자동화 현황 및 식물공장의 발전방향. 21세기 첨단식물생산 시스템의 실용화 심포지엄.
3. Simonton, W. 1991. Robotic End Effector for Handling Greenhouse Plant Material. Transactions of the ASAE vol. 34(6):2615-2621
4. Tillet, N. D., W. He, R. D. Tillet. 1995. Development of a vision guided robot manipulator for packing horticultural produce. Journal of agricultural engineering research 61: 145-154
5. Weber, M. C., R. L. Stroshine, K. Haghighi, and Y. Edan. 1991. Melon Material Properties and Finite Element Analysis of Melon Compression with Application to Robot Gripping. Transactions of the ASAE vol. 34(3):920-929