

# 농용 로봇의 장애물 회피 알고리즘 Control Strategy for Obstacle Avoidance of an Agricultural Robot

류 관 희*	김 기 영*	박 정 인*	류 영 선**
정회원	정회원		정회원
K. H. Ryu	G. Y. Kim	J. I. Park	Y. S. Ryu

## SUMMARY

This study was carried out to develop a control strategy of a fruit harvesting redundant robot. The method of generating a safe trajectory, which avoids collisions with obstacles such as branches or immature fruits, in the 3D(3-dimension) space using artificial potential field technique and virtual plane concept was proposed. Also, the method of setting reference velocity vectors to follow the trajectory and to avoid obstacles in the 3D space was proposed. Developed methods were verified with computer simulations and with actual robot tests. For the actual robot tests, a machine vision system was used for detecting fruits and obstacles. Results showed that developed control method could reduce the occurrences of the robot manipulator located in the possible collision distance. With 10 virtual obstacles generated randomly in the 3D space, maximum rates of the occurrences of the robot manipulator located in the possible collision distance, 0.03 m, from the obstacles were 8% with 5 degree of freedom (DOF), 8% with 6-DOF, and 4% with 7-DOF, respectively.

**주요용어(Key Words)** : 로봇(Robot), 장애물회피(Obstacle avoidance), 기계시각(Machine vision), 기준속도(Reference velocity), 경로추적(Trajectory following)

### 1. 서 론

생물생산에의 로봇의 적용은 작업환경이 일반 산업과 매우 다르고 작업대상이 일정하지 않기 때문에 많은 어려움이 있다. 특히 과실수확과 같이 복잡한 작업환경에서는 로봇이 장애물과 충돌하는 문제가 발생하기 때문에 이러한 복잡한 환경에서 작업하는 로봇은 작업의 유연성이 크게 요구되며 기존의 2-링크 시스템의 6자유도 이하의 로봇으로서 작업수행이 불가능한 경우도 발생하게 된다.

이와 같은 복잡한 환경에서는, 선단 작업부의 작업위치 및 속도가 관절부의 여유자유공간 내의 움직임에 대해 영향을 받지 않기 때문에 장애물

회피 및 특이점 회피에 매우 유리한, 여유자유도를 가진 머니플레이터가 매우 유용하다.

가 지나 미숙 과실 등의 장애물을 피해서 대상물에 접근해야 하는 과실 수확 작업의 경우 여유자유도 머니플레이터에 의해 유연한 작업이 이루어질 수 있는 로봇과 장애물 환경 인식 시스템의 사용이 유용할 것으로 판단된다. 그러나 작업 유연성이 있고 장애물 회피에 유리한 여유자유도 머니플레이터는 제어가 어려워 광범위하게 적용되지 않고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 환경정보를 이용하여 과실 수확용 로봇의 여유자유도 관절이 장애물을 피하여 과실을 수확할 수 있도록, 3차원 공간상에

\* 서울대학교 생물자원공학부 농업기계전공

\*\* (주)삼주기계

서 무작위로 발생하는 장애물에 대하여 선단 작업부의 안전한 운동 경로를 생성하는 방법 및 생성된 경로를 추종하며 장애물을 피할 수 있는 방법을 제시하고, 과실 수확 작업에의 적용 가능성을 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션 및 산업용 로봇과 모의과수를 이용한 실험을 통하여 검증하는데 있다.

## 2. 연구사

로봇 사용이 증대됨에 따라서 머니플래이터의 제어를 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나 일반적인 산업환경에 관한 것이 일반적이고 생물생산과 같이 특수한 환경에서의 작업 방법에 대한 연구는 상대적으로 매우 미약하다. 일반화 된 알고리즘 중 특히 장애물 회피와 관련된 제어 알고리즘은 크게 다음 두 가지 방법으로 나눌 수 있다.

첫째 방법은, 로봇의 초기 자세 및 그리퍼의 위치와 대상물의 정보가 정확히 알려져 있고 주변 환경 정보, 즉 장애물의 위치 및 형상, 크기가 알려진 경우 초기 위치에서 목표물까지의 경로를 장애물 회피를 고려하여 찾아가는 것으로, 일반적으로 경로 탐색 문제로서 알려져 있다. 이 방법은 최적의 경로를 생성하는 동안 주어진 조건, 즉 장애물 회피 등을 고려하여 관절의 자세와 경로를 생성하도록 하는 것이다. 주어진 조건은 주로 그리퍼의 최소 경로 생성 혹은 에너지의 최적화로 주어지고 부차적으로 장애물 회피가 주어지기도 한다(Lozano-Perez, 1983; Brooks, 1985).

둘째 방법은, 로봇의 초기 자세 및 그리퍼의 위치와 궤적, 그리고 대상물의 정보가 정확히 알려져 있으나 센서의 입력을 바탕으로 하여 주변의 환경정보를 받아들여 각 관절이 장애물과 충돌하지 않도록 관절의 해를 구해 나가는 것으로 여유자유도 로봇의 제어와 관련이 있다. 미지의 환경에서 장애물 회피를 위한 것은 매 순간 최적화를 위한 국부 최적화 방법을 통해 자세 제어가 이루어지도록 하고 있다. 그러나, 이 경우 점점 복잡한 환경으로 이동함에 따라 정보의 양이 많아지고 운동이 제한된 머니플래이터에 영향을 주는 환경요인이 점점 증가하여 결국 충돌을 피할 수 없는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위하여 Khatib(1983, 1986)는 인위적인 반력을 가진 영역을 설정하여

머니플래이터의 이동시 반력의 작용에 의해 해당 영역으로의 접근을 막는 방법을 통해 머니플래이터가 장애물을 피해가도록 제어하는 방법을 사용하였다. Whitney(1972)는 여유자유도를 가진 머니플래이터에 전체적인 시스템의 운동에너지를 최적화하는 방법을 제시하였다. 그러나 계산이 너무 어려워 속도항의 정방 제곱행렬의 시간에 대한 적분항을 이용한 총체적인 성능지수를 제안하였는데 그 해를 찾지는 못하고 최근의 연구에서 그 효율성을 밝힌 바 있다(Nakamura, 1993). 또한 Hanafusa 등(1978)은 관절각과 관절 토크, 장애물에 의해 기구학적 제한조건을 고려한 자코비안 행렬의 의사역행렬로 표현된 일반해를 이용하여 여유자유도 머니플래이터의 관절의 경로를 계획하는 수학적 알고리즘을 제안하였다.

## 3. 재료 및 방법

### 가. 여유자유도 로봇 관절의 최적해

속도 수준에서 주어진 그리퍼의 궤적을 따라 머니플래이터가 움직일 때 인식된 장애물의 거리 혹은 밀도를 이용하여 머니플래이터의 각 관절이 위치한 구간별로 안전한 방향을 갖는 속도 벡터, 즉 기준 속도를 정의한다. 이렇게 정의된 기준 속도를 각 관절의 제한 조건으로 삼아 기준속도에서 지시하는 장애물이 없는 방향으로 링크의 움직이는 방향을 유도할 수 있도록 성능지수함수(performance criteria)를 도출하여 다음 식(1)과 같이 관절의 최적해를 구하였고(류, 1997), 로봇을 움직일 수 있도록 제어 프로그램을 개발하였다.

$$\theta = J^* \dot{X} + (I - J^* J) \hat{\Sigma}_1^{-1} \hat{\Sigma}_2 \dots \dots \dots (1)$$

여기서,

$$J^* = \hat{\Sigma}_1^{-1} J_n^T (J_n \hat{\Sigma}_1^{-1} J_n^T)^{-1}$$

$$\hat{\Sigma}_1 = \sum_{i=1}^n 2k_i J_i^T J_i$$

$$\hat{\Sigma}_2 = \sum_{i=1}^n 2k_i J_i^T \dot{X}_i$$

$k_i$  = 加重值로서 임의의 상수

$\dot{X}_i$  = i-번째 관절의 基準速度 벡터

$J_i = i$ -번째까지의 局部 자코비안행렬

나. 장애물 환경을 고려한 안전한 경로 생성

장애물 환경을 고려한 안전한 경로생성을 위해 가상 위치에너지 장(artificial potential field) 개념을 응용하였다. 가상 위치에너지 장에서의 기본 원리는 다음과 같다.

“머니플레이터가 가상의 force field에서 이동한다. 목표 대상물은 머니플레이터를 잡아당기는 인력점(attractive pole)으로써 작용하고, 장애물은 반대로 밀어내는 척력면(repulsive surface)으로 작용한다.”

우선 장애물까지의 최단거리를 이용하여 식 (2), (3)과 같은 가상 위치에너지 장이 제안된 바 있는데(Khatib, 1986), 본 연구에서는 식 (2), (3)을 가상 평면의 개념과 함께 연관시켜 안전한 경로를 생성시키는 데 사용하였다.

$$U_{ob}(x) = \eta \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, \text{ if } \rho < \rho_0 \dots\dots (2)$$

$$F_{ob} = -grad[U_{ob}(x)], \text{ if } \rho < \rho_0 \dots\dots (3)$$

여기서,

- $\rho_0$  : 위치에너지 장 영향력 범위
- $\rho$  : 장애물까지의 최단거리
- $U_{ob}$  : 장애물에 의한 위치에너지
- $F_{ob}$  : 장애물 표면에서 인위적인 척력을 유도하는 힘
- $\eta$  : 상수

본 연구에서는 로봇 관절의 운동방향을 충돌이 일어나지 않는 방향으로 제어하고, 이를 제한 조건으로 삼아 관절의 움직임을 안전한 방향으로 유도하도록 하는데 기준속도라는 개념을 사용하였다. 따라서 이미 알고 있는 대상물의 위치와 설정된 가상평면 내의 장애물 정보를 이용하여 가상 위치에너지 장에서 목표물과 장애물에 의한 기준속도를 구하였다.

기본적으로 목표물을 확인한 후 목표물을 향한 방향으로 기준속도의 방향이 설정되고 그에 따라

로봇의 경로가 결정된다. 그러나 진행 경로 가까이에 장애물이 위치하는 경우 방향을 바꾸어야 하는데, 그럴 경우 각각의 거리를 비교하고 가상 위치에너지에 의한 식을 적용하여 속도의 방향을 결정하게 된다. 가상 위치에너지 장에서 목표물에 의한 속도 성분은 식 (4)와 같다.

$$|\vec{v}_d| = \begin{cases} 1 + \eta \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{1}{d^2} & (d \leq d_0) \\ 1 & (d > d_0) \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

여기서,

- $d_0$  = 목표물로부터의 위치에너지 장 영향력 범위
- $d$  = 목표까지의 최단거리
- $\eta$  = 상수
- $\vec{v}_d$  = 목표물에 의한 속도 성분

가상 위치에너지 장에서 장애물에 의한 속도 성분은 식(5)와 같다.

$$|\vec{v}_{ob}| = \begin{cases} \eta \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2} & (\rho \leq \rho_0) \\ 0 & (\rho > \rho_0) \end{cases} \dots (5)$$

여기서,

- $\rho_0$  = 위치에너지 장 영향력 범위
- $\rho$  = 장애물까지의 최단거리
- $\eta$  = 상수
- $|\vec{v}_{ob}|$  = 장애물에 의한 속도 성분

특정 거리  $\rho = k\rho_0$ 에서 관절의 기준속도 성분이 비교적 큰 값  $m$ 을 갖도록 다음 식 (6)과 같이  $\eta$ 를 결정하였다.

$$\eta \left( \frac{1}{k\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{(k\rho_0)^2} = m \dots\dots\dots (6)$$

본 연구에서는  $m = 0.4 \sim 1$  정도의 값을 가지도록 하여 대략  $20 \sim 45^\circ$ 의 각으로 장애물을 피할 수 있도록 하였다.

앞에서 제시한 바와 같이 식 (4), (5)에 의해, 가

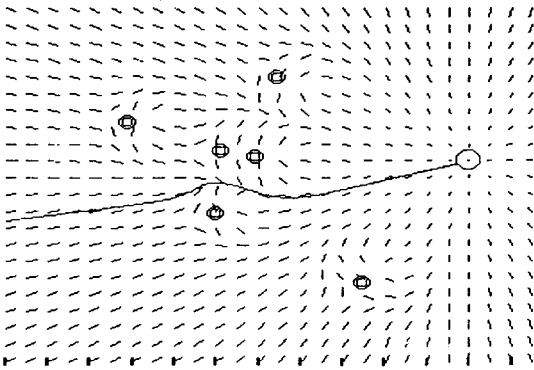


Fig. 1 Example of artificial potential field and calculated safe trajectory.

상 위치에너지 장에서 목표물에 의해서 구해진 속도 성분과 장애물에 의해서 구해진 속도 성분을 찾아낸 후 그리퍼의 안전한 경로를 생성하는 기준 속도를 다음과 같이 설정하였다.

$$X_{end}^{\dot{}} = |V_{end}^{ref}| \vec{v} \dots\dots\dots (7)$$

$$\vec{v} = (\vec{v}_d + \vec{v}_{ob}) / |\vec{v}_d + \vec{v}_{ob}|$$

여기서,

$$|V_{end}^{ref}| = \text{그리퍼의 기준속도 설정범위}$$

이렇게 구해진 기준속도를 바탕으로 4차의 Runge-Kutta 적분을 이용하여 안전한 경로를 생성하였다.

가상 위치에너지 장에서 장애물과 목표물(큰 원)에 의한 속도 성분의 변화를 그림 1에 나타내었다. 장애물(작은 원들) 주위에서 속도 성분(작은 직선)의 방향이 바뀌는 것을 볼 수 있다 (위의 그림에서 긴 실선은 그리퍼의 안전한 이동경로를 나타냄).

다. 관절의 기준속도 벡터 설정

그리퍼가 수확 대상 과실까지의 안전한 경로를 따라서 운동하게 되는데, 주어진 그리퍼의 기준속도를 만족하는 관절 각속도 해는 앞에서 제시한 식 (1)에 의해서 구할 수 있다. 이 때 나머지 관절들이 작업 영역 내에 위치한 장애물과 충돌하지

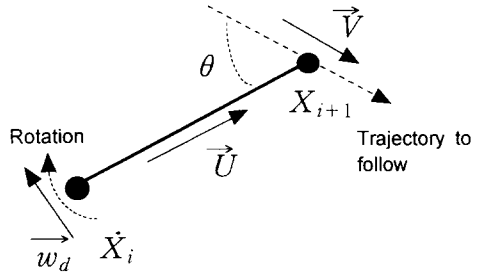


Fig. 2 Reference velocity for trajectory following.

않고 이동할 수 있도록 각 관절들의 기준속도의 크기와 방향을 적절히 설정하여야 한다. 본 연구에서는 관절들이 주어진 경로를 추종하면서 장애물을 회피하기 위한 기준속도 벡터의 설정 방법을 제시하였다.

회전운동을 하는 링크에 대하여 기준속도의 방향은 링크에 대하여 직각 방향으로 결정된다. 링크의 방향으로  $\vec{U} = X_{i+1} - X_i$ 를 설정하고, 그리퍼의 진행 방향으로  $\vec{V}$ 를 설정한다면 경로추종을 위한 관절의 기준속도 성분 벡터  $\vec{w}_d$ 와 기준속도 벡터  $\dot{X}_i$ 를 다음 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{X}_i = |V_i^{ref}| \vec{w}_d \dots\dots\dots (8)$$

$$\vec{w}_d = (\vec{v} \times \vec{u}) \times \vec{u}, \quad \vec{u} = \vec{U} / |\vec{U}|, \quad \vec{v} = \vec{V} / |\vec{V}|$$

여기서,

$$|V_i^{ref}| = \text{링크 i의 기준속도 설정범위}$$

식 (8)에 의해 구해진 경로추종을 위한 기준속도를 적용하여 각 관절의 관절해를 구하였고, 그 결과 관절들이 그리퍼의 진행 궤적을 정확히 추종함을 볼 수 있었다. 2차원에서 장애물과의 거리가 충분히 멀어 장애물에 의한 속도 성분의 변화가 없을 때 각 관절들이 주어진 경로를 정확히 추종하는 예를 그림 3에 나타내었다.

i번째 링크에서 i+1번째 링크의 방향으로  $\vec{U} = X_{i+1} - X_i$ 를 설정하고, i번째 링크에서 장애물의 방향으로  $\vec{C} = Ob_j - X_i$ 를 설정하고,  $\rho = |\vec{C}| \sin \theta$ 가  $\rho_0$ 보다 작을 경우와  $0 \leq$

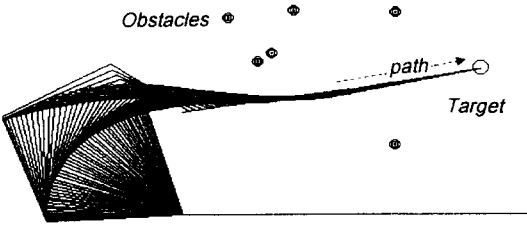


Fig. 3 An example application of the reference velocity for following a trajectory.

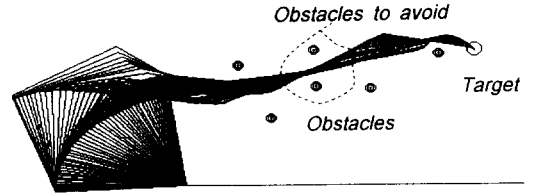


Fig. 5 An example application of the reference velocity for avoiding obstacles.

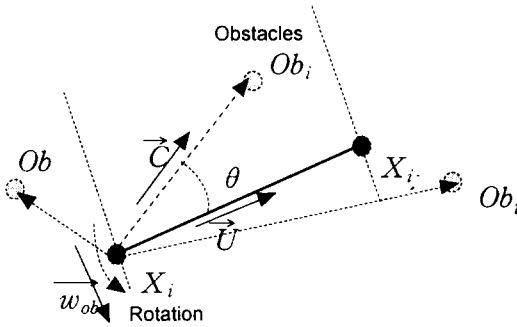


Fig. 4 Reference velocity for avoiding obstacles.

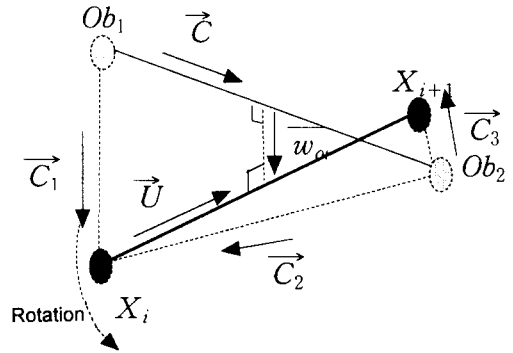


Fig. 6 Reference velocity for avoiding bar-type obstacles.

$\vec{C} \cdot \vec{U} \leq |\vec{U}|^2$  일 경우에 경로추종을 위한 관절의 기준속도 방향성분  $\vec{w}_{ob}$ 와 기준속도 벡터  $\dot{X}_i$ 를 다음 식 (9)와 같이 구하였다.

$$\dot{X}_i = |V_i^{ref}| \vec{w}_{ob} \dots\dots\dots (9)$$

$$\vec{w}_{ob} = (\vec{C} \times \vec{u}) \times \vec{u}, \vec{u} = \vec{U} / |\vec{U}|, \vec{c} = \vec{C} / |\vec{C}|$$

$$\text{if } (\rho \geq \rho_0 \text{ or } \vec{C} \cdot \vec{U} < 0 \text{ or } \vec{C} \cdot \vec{U} \geq |\vec{U}|^2) \text{ then } \dot{X}_i = 0$$

여기서,

$|V_i^{ref}|$  = 링크 i의 기준속도 설정범위

식 (9)에 의해 구해진 장애물 회피를 위한 기준속도를 적용하여 각 관절의 관절해를 구하였고, 그 결과 로봇의 관절들이 장애물과 충돌하지 않는 방향으로 구동됨을 볼 수 있었다. 2차원에서 장애

물을 회피하여 각 관절들이 움직이는 예를 그림 5에 나타내었다. 특히 장애물 사이를 지나갈 때 장애물 회피를 위해 관절의 궤적들이 한 점으로 모이는 것을 볼 수 있다.

그림 6에서와 같이 나뭇가지처럼 장애물이 직선의 형태를 가지는 경우에는, 장애물과 관절과의 최소거리  $\rho$ 가 가상 위치에너지의 영향이 미치는 한계거리  $\rho_0$ 내에 있을 때 기준속도 벡터의 방향성분  $\vec{w}_{obl}$ 와 기준속도 벡터  $\dot{X}_i$ 를 다음 식 (10)과 같이 구하였다.

$$\dot{X}_i = |V_i^{ref}| \vec{w}_{obl} \dots\dots\dots (10)$$

$$\vec{w}_{obl} = (\vec{C} \times \vec{U}) / (|\vec{C}| |\vec{U}|)$$

$$\rho = \vec{C}_1 \cdot \vec{w}_{obl}$$

$$\text{if } (\rho < 0) \text{ then } \rho = -\rho, \vec{w}_{obl} = -\vec{w}_{obl}$$

$$\text{if } \rho \geq \rho_0 \text{ or}$$

$$[(\vec{w}_{obl} \times \vec{C}) \cdot \vec{C}_1] \times [(\vec{w}_{obl} \times \vec{C}) \cdot \vec{C}_3] \geq 0$$

or

$$[(\vec{w}_{obl} \times \vec{U}) \cdot \vec{C}_1] \times [(\vec{w}_{obl} \times \vec{U}) \cdot \vec{C}_2] \geq 0$$

then apply eq. (10)

여기서,

$$|V_i^{ref}| = \text{링크 } i \text{의 기준속도 설정범위}$$

목표물을 확인한 후 로봇의 경로가 목표물을 향한 방향으로 생성되었을 때, 기본적으로 관절의 기준속도 벡터는 주어진 안전한 경로를 추종하도록 설정되어 있다. 그러나 그리퍼가 진행하는 도중 나머지 관절들 가까이에 장애물이 위치하는 경우 장애물 회피를 위해서 기존의 기준속도 방향을 바꾸어야 하는데 위에서 제시한 경로 추종을 위한 기준속도 벡터와 장애물 회피를 위한 기준속도 벡터를 합하여 관절의 기준속도 벡터를 다음 식 (11) 과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_i &= |V_i^{ref}| \vec{w} \dots\dots\dots (11) \\ \vec{w} &= (\vec{w}_d + \vec{w}_{ob}) / |\vec{w}_d + \vec{w}_{ob}| \quad (|\vec{w}_d + \vec{w}_{ob}| > 1) \\ &= (\vec{w}_d + \vec{w}_{ob}) \quad (|\vec{w}_d + \vec{w}_{ob}| \leq 1) \end{aligned}$$

라. 소프트웨어를 이용한 장애물 회피 시뮬레이션

(1) 2차원 평면상에서의 시뮬레이션

2차원 평면에서 위치결정에 3자유도, 4자유도, 5자유도의 여유자유도를 갖는 로봇관절을 구성하여 장애물 회피 시뮬레이션을 수행하였다. 가상 위치에너지 장에서 장애물 회피를 위한 계수를 표 1과 같이 설정하였고, 8개의 장애물을 무작위로 생성하여 50회씩 4번 반복하였다.

(2) 3차원 공간상에서의 시뮬레이션

실제 구동에 쓰인 것과 같은 형태의 5자유도 로봇과 6자유도, 7자유도의 여유자유도를 갖는 로봇을 구성하여 장애물 회피 시뮬레이션을 수행하였다. 가상 위치에너지 장에서 장애물 회피를 위한 계수를 표 2와 같이 설정하였고, 10개의 장애물을 무작위로 생성하고 10개중 3개의 비율로 직선을 이루는 형태

Table 1. Parameters for artificial potential field

	$\rho_0$	$m$	$k\rho_0$
For trajectory generation	0.2	0.6	0.1
For target direction	0.4	1.0	0.2
For obstacle avoidance	0.2	0.6	0.1

Table 2. Parameters for artificial potential field

	$\rho_0$	$m$	$k\rho_0$
For trajectory generation	0.2	0.6	0.1
For target direction	0.4	1.0	0.2
For obstacle avoidance	0.2	0.6	0.1

Table 3. Specifications of the A465 robot manufactured by CRS Robotics, Inc.

Link	1	2	3	4	5	6
Range of motion(°)	±175	±90	±110	±180	±105	±180
Torque rating(Nm)	39.5	39.5	39.5	6.89	6.89	2.50
Max.speed (rad/s)	3.14	3.14	3.14	2.99	3.02	2.99
Dimension(m)	0.3302	0.3048	0.3302	0	0.076	0

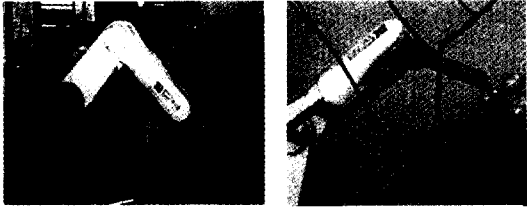
의 장애물을 생성하여 50회씩 4번 반복하였다.

마. 모의 과수에 대한 장애물 회피 실험

기계시각에 의해 수확 대상물의 3차원 공간상의 위치를 결정하고 장애물 회피 알고리즘에 의해 개발된 프로그램에 의하여 로봇 머니플레이터를 구동하여 수확 대상물의 위치에 정확히 도달하는 것을 목표로 하였고, 수확 대상물은 실험실 내에 설치한 모의 과수를 이용하였다.

실험에 사용된 로봇 시스템은 CRS Robotics사(캐나다)의 A465 모델을 이용하였고 그 명세를 표 3에 나타내었다.

이 로봇은 공간상의 위치결정에 3자유도, 손목 부위의 자세 결정에 3자유도를 가진 6자유도 로봇이므로 장애물 회피에 필요한 여유자유도를 갖지 않는다.



[a] Original robot [b] Modified robot with an additional link

Fig. 7 Robot system used in the experiment.

따라서, 로봇 매니플레이터의 손목 부위에 링크를 하나 더 부착하여 자세 결정에 사용되는 자유도 중 2자유도를 새로 부착된 링크의 위치 결정에 이용함으로써 공간상의 위치 결정에 5자유도를 구현하여 장애물 회피에 필요한 여유자유도를 확보하였다. 본 연구에서는 선단 작업부의 자세 결정에 사용되는 자유도를 희생하여 위치결정에 여유자유도를 구현하였기 때문에 선단 작업부의 자세는 고려하지 않았다.

그림 7은 원래 로봇의 모습과 링크를 더 부착하여 여유자유도를 구현한 로봇의 모습을 보여주고 있다.

주어진 목표물과 장애물의 환경정보를 이용하여 목표물까지의 안전한 경로를 구하고, 그 경로를 추종하면서 장애물을 회피하도록 하는 제어 프로그램과 위치결정에 5자유도를 사용하는 여유자유도 로봇으로 장애물 회피를 만족하면서 목표물에 정확하게 도달하는지를 모의로 설치한 과수를 이용하여 검증하였다.

로봇 매니플레이터를 구동하여 수확 대상물의 위치에 정확히 도달하는 것을 목표로 하였고, 수확 대상물은 실험실 내에 설치한 모의 과수를 이용하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 가. 2차원 평면상에서의 시뮬레이션

3자유도, 4자유도 및 5자유도 로봇을 이용하여 8개의 장애물에 대하여 2차원 평면상에서 시뮬레이션을 수행한 결과를 각각 표 4, 5, 6에 나타내었

Table 4. Shortest distances to 8 obstacles from the 3 degree of freedom (DOF) robot moving in the 2D plane (m)

Times	Average (m)	Standard deviation (m)	Percentage of less than 0.03 m (%)
1	0.0732	0.0350	8
2	0.0700	0.0394	22
3	0.0786	0.0352	12
4	0.0796	0.0407	14

Table 5. Shortest distances to 8 obstacles from the 4 DOF robot moving in the 2D plane (m)

Times	Average (m)	Standard deviation (m)	Percentage of less than 0.03 m (%)
1	0.0668	0.0273	8
2	0.0691	0.0347	12
3	0.0772	0.0452	6
4	0.0737	0.0288	4

Table 6. Shortest distances to 8 obstacles from the 5 DOF robot moving in the 2D plane (m)

Times	Average (m)	Standard deviation (m)	Percentage of less than 0.03 m (%)
1	0.0681	0.0220	4
2	0.0748	0.0237	0
3	0.0745	0.0228	2
4	0.0685	0.0245	4

다. 장애물과 관절과의 최소거리가 충돌위험이 있는 0.03m 이하로 근접하는 것이 3자유도에서는 대략 8~22% 정도, 4자유도에서는 4~12%, 5자유도에서는 대략 4% 정도로 나타났다. 동일한 장애물 환경에 대하여 자유도가 증가함에 따라서 충돌위험 거리 이하로 접근하는 횟수가 현저히 감소함을 알 수 있다.

장애물 환경의 제한과 로봇 관절 자체의 기계적 제한이 있을 경우 목표물에 도달하기 위해서 어쩔 수 없이 위험거리 이내로 접근하거나 충돌하는 상황이 발생하기도 하였는데 이는 실험을 위하여 항상 목표물까지 로봇을 움직이도록 프로그램을 작

성하였기 때문이다. 이 경우를 제외하곤 2차원 평면에서 자유도가 증가함에 따라서 안전한 경로 생성과 장애물 회피가 가능함을 보여 주었다.

나. 3차원 공간상에서의 시뮬레이션

기 개발된 프로그램을 이용하여 목표물까지의 안전한 경로를 생성하고, 주어진 경로를 추종하면서 장애물을 회피할 수 있는 기준속도 벡터를 설정하였다. 그림 8에 3차원 공간상에서 로봇(굵은 실선)이 장애물(가는 실선으로 표현된 직선)을 회피하며 목표물(속이 빈 원)로 안전한 경로(가는 실선으로 표현된 곡선)를 따라 접근하는 시뮬레이션 예를 나타내었다.

5자유도, 6자유도 및 7자유도 로봇을 이용하여 10개의 장애물에 대하여 3차원 공간상에서 시뮬레이션을 수행한 결과를 각각 표 7, 8, 9에 나타내었다. 장애물과 관절과의 최소거리가 충돌위험이 있는 0.03m 이하로 근접하는 것이 5자유도와 6자유도에서는 대략 6~8% 정도, 7자유도에서는 대략 4% 정도로 나타났다. 동일한 장애물 환경에 대하여 자유도가 증가함에 따라서 충돌위험 거리 이하로 접근하는 횟수가 현저히 감소함을 알 수 있다.

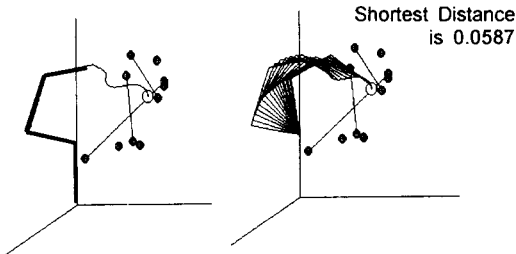


Fig. 8 A result of simulation for randomized bar-type obstacles.

Table 7. Shortest distances to 10 obstacles from the 5 DOF robot moving in the 3D space (m)

Times	Average (m)	Standard deviation (m)	Percentage of less than 0.03 m (%)
1	0.0834	0.0414	8
2	0.0890	0.0402	6
3	0.0991	0.0497	6
4	0.0926	0.0461	6

Table 8. Shortest distances to 10 obstacles from the 6 DOF robot moving in the 3D space (m)

Times	Average (m)	Standard deviation (m)	Percentage of less than 0.03 m (%)
1	0.0838	0.0358	8
2	0.0775	0.0382	8
3	0.0861	0.0383	6
4	0.0917	0.0424	8

Table 9. Shortest distances to 10 obstacles from the 7 DOF robot moving in the 3D space (m)

Times	Average (m)	Standard deviation (m)	Percentage of less than 0.03 m (%)
1	0.0939	0.0380	0
2	0.0964	0.0395	2
3	0.0976	0.0422	0
4	0.1003	0.0406	4

다. 로봇의 실제 구동

주어진 환경에 대해 모델링한 후 작성된 프로그램을 이용하여 관절각들을 구하고 실험실내에 설치한 모의 과수에 대하여 실제로 로봇을 구동시켜 경로추종과 장애물을 회피하는 모습을 그림 9와 10에 나타내었다.

그림 9와 10에 대한 설명은 다음과 같다.

- (1) 로봇의 초기위치 (점선으로 표시된 나뭇가지 부분이 로봇의 움직임에 영향을 미치는 장애물)
- (2) 장애물의 영향으로 작업 선단부가 나뭇가지 반대방향으로 방향을 바꾼다.
- (3) 작업 선단부는 이미 장애물을 돌아서 목표물인 과실을 향해 움직이고 작업 선단부의 경로를 뒤따라오던 바로 이전 관절은 나뭇가지의 영향으로 방향을 바꾸기 시작한다.
- (4) 작업 선단부는 목표물로 더욱 밀착하고 이전 관절은 나뭇가지로부터 충분한 거리를 유지하고 있다.

이상과 같이 주어진 목표물과의 안전한 경로를 생성하고 주어진 경로를 추종하면서 장애물과 충돌하지 않고 과실 수확이 가능함을 실험 결과로부터 알 수 있었다.



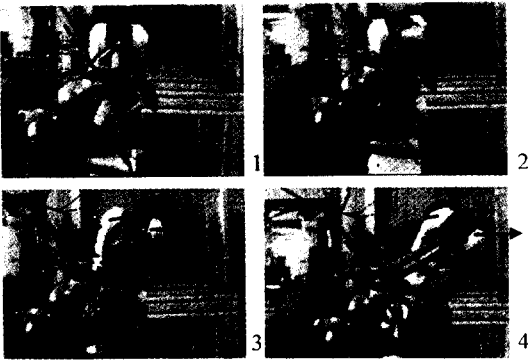


Fig. 9 Front view of robot operation.

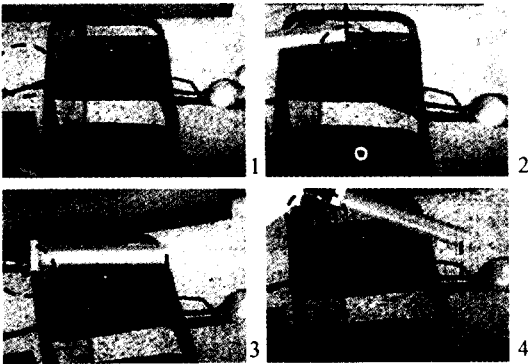


Fig. 10 Top view of robot operation.

## 5. 결 론

본 연구에서는 3차원 공간에서 여유자유도를 갖는 농업용 과실수확 로봇이 미숙과일이나 가지와 같은 장애물과 충돌을 일으키지 않으면서 수확하고자 하는 목표물까지 이동하여 이를 수확하고자 하는 목적으로, 인식된 환경정보를 이용하여 과실수확 로봇의 선단 작업부 운동경로를 생성하는 방법과 생성된 경로를 따라 여유자유도 로봇의 관절을 제어할 수 있도록 기준속도를 생성하는 방법을 제시하였다. 또한 경로 생성과 관절 제어를 위한 기준속도 생성을 위한 프로그램을 작성하였고 시뮬레이션 및 실제 로봇을 이용한 실험을 수행하였다.

장애물 회피 실험 결과 8개의 장애물을 무작위로 생성하였을 때, 장애물과 관절과의 최소거리가

충돌위험이 있는 0.03m 이하로 근접하는 것이 3자유도일 경우 최대 22%, 4자유도일 경우 최대 12%, 5자유도일 경우 최대 4%로 나타났는데, 동일한 장애물 환경에 대하여 자유도가 증가함에 따라서 충돌위험 거리 이하로 접근하는 횟수가 현저히 감소하였다.

또한 3차원 공간에서 10개의 장애물을 무작위로 생성하였을 때, 장애물과 관절과의 최소거리가 충돌위험이 있는 0.03m 이하로 근접하는 것이 5자유도일 경우 최대 8%, 6자유도일 경우 최대 8%, 7자유도일 경우 최대 4%로 나타났는데, 동일한 장애물 환경에 대하여 자유도가 증가함에 따라서 충돌위험 거리 이하로 접근하는 횟수가 감소하였다.

장애물 회피 알고리즘에 의해 주어진 경로를 추종하면서 장애물과 충돌하지 않고 과실 수확이 가능함을 실험실 내에 설치한 모의 과수를 대상으로 한 실제 로봇 실험 결과로부터 알 수 있었다. 실제 과실 수확에 사용될 수 있는 로봇을 개발하기 위해서는 실제 작업환경의 복잡성과 불규칙성을 반영한 환경의 인식 방법 및 처리에 관한 진보된 알고리즘이나 인공지능을 가미한 방법이 연구되어야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 류영선. 1997. 여유자유도 로봇 머니플레이터의 과실 수확시 장애물회피 운동제어 알고리즘 개발. 서울대학교 박사학위 논문.
2. Brooks, A. R. and T. Lozano-Perez. 1985. A subdivision algorithm in configuration space for find path with rotation. IEEE transactions on System, Man and Cybernetics Vol. SMC-15, No.2.
3. Hanafusa, H., T. Yoshikawa and Y. Nakamura. 1983. Control of articulated robot arms with redundancy. In control science and tech. for the prog. of society (In Proceedings 8th triennial world congress of IFAC), ed. H. Akashi, Vol. 4: 1927-1932.
4. Kathib, O. 1983. Dynamic control of manipulators in operational spaces. Proceedings of the sixth world congress on theory of machines and mechanism. pp. 1128-1131.

5. Khatib, O. 1986. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. The International Journal of Robotics Research 5(1):90-98.
6. Lozano-Perez, T. 1983. Spatial planning : a configuration space approach. IEEE Transactions Computer.
7. Nakamura, Y. 1993. Advanced robotics; Redundancy and optimization. addison-wesley publishing company.
8. Whitney, D.E. 1972. Resolved motion-rate control of manipulators and human prostheses. IEEE Transactions man-machine system MMS-10(2):47-53.