

여유자유도 로봇을 이용한 과실 수확에 관한 연구 (I)

- 장애물 회피 알고리즘과 시뮬레이션 -

A Study on Fruit Harvest Using a Redundant Robot

- Obstacle Avoidance Algorithm and Simulation -

| | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 류관희* | 박정인* | 류영선** | 김기영* |
| 정희원 | | | 정희원 |
| K. H. RYU | J. I. PAK | Y. S. RYU | G. Y. KIM |

1. 서론

로봇의 생물생산에의 적용은 작업환경이 일반 산업과 매우 다르고 작업대상이 일정하지 않기 때문에 많은 어려움이 있다. 특히 과실수확과 같이 복잡한 작업환경에서는 로봇이 장애물과 충돌하는 문제가 발생하기 때문에 선단 작업부의 작업위치 및 속도가 관절부의 여유자유공간 내의 움직임에 대해 영향을 받지 않아 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 어렵고 장애물 환경 인식이 까다로운 점 때문에 광범위하게 적용되지 않고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 환경정보를 이용하여 과실 수확용 로봇의 여유자유도 관절이 장애물을 피하여 과실을 수확할 수 있도록 3차원 공간상에서 무작위로 발생하는 장애물에 대하여 선단 작업부의 안전한 운동 경로를 생성하는 방법과 생성된 경로를 추종하며 장애물을 피할 수 있는 방법을 개발하고, 이 방법들의 과실 수확 작업에의 적용 가능성을 시뮬레이션을 통하여 검증하는데 있다.

2. 방법

2.1. 여유자유도 로봇 관절의 최적해

속도 수준에서 주어진 그리퍼의 궤적을 따라 머니플레이터가 움직일 때 인식된 장애물의 거리 혹은 밀도를 이용하여 머니플레이터의 각 관절이 위치한 구간별로 안전한 방향을 갖는 속도 벡터, 즉 기준 속도를 정의한다. 이렇게 정의된 기준 속도를 각 관절의 제한 조건으로 삼아 기준속도에

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

** 삼주기계

서 지시하는 장애물이 없는 방향으로 링크의 움직이는 방향을 유도할 수 있도록 성능지수함수(cost function, performance criteria)를 도출하여 관절의 최적해를 구하였고(류영선, 1997), 로봇을 움직일 수 있도록 제어 프로그램을 개발하였다.

2.2. 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.”

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 의해서 구해진 속도 성분과 장애물에 의해서 구해진 속도 성분을 찾아낸 후 그리퍼의 안전한 경로를 생성하는 기준속도를 다음과 같이 설정하였다.

$$X_{end}^* = |V_{end}^{ref}| \vec{v} \quad (1)$$

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

Here,

$|V_{end}^{ref}|$ = pre-set limit of reference velocity vector of end-effector

이렇게 구해진 기준속도를 바탕으로 4차의 Runge-Kutta 적분을 이용하여 안전한 경로를 생성하였다. 가상 위치에너지 장에서 장애물과 목표물에 의한 속도 성분의 변화를 그림 1에 나타내었다. 장애물 주위에서 속도 성분의 방향이 바뀌는 것을 볼 수 있다.

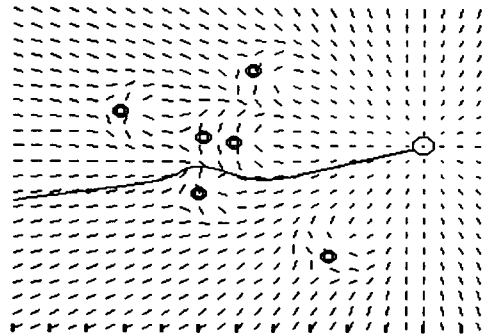


Fig. 1 Example of artificial potential field and calculated safe trajectory.

2.3. 관절의 기준속도 벡터 설정

그리퍼가 수확 대상 과실까지의 안전한 경로를 따라서 운동하게 되는데, 주어진 그리퍼의 기준속도를 만족하는 관절 각속도 해는 2.1절에서와 같이 하였으며, 나머지 관절들이 작업 영역 내에 위치한 장애물과 충돌하지 않고 이동할 수 있도록 각 관절들의 기준속도의 크기와 방향을 설정하였다.

그림 2에 경로추종을 위한 기준속도를 적용하여 각 관절의 관절해를 구하고, 관절들이 그리퍼의 진행 궤적을 추종하는 것을 나타내었다. 2차원에서 장애물과의 거리가 충분히 멀어 장애물에 의한 속도 성분의 변화가 없을 때 각 관절들이 주어진 경로를 정확히 추종하는 것을 볼 수 있다.

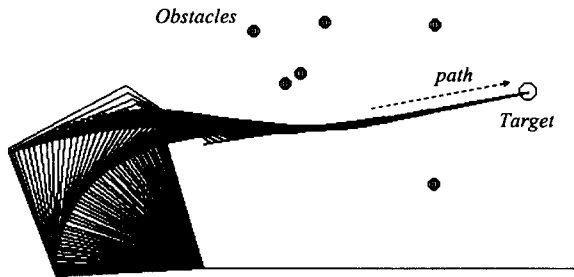


Fig. 2 An example application of the reference velocity for following a trajectory.

그림 3에서는 장애물 회피를 위한 기준속도를 적용하여 각 관절의 관절해를 구한 다음 로봇의 관절들이 장애물과 충돌하지 않는 방향으로 구동되는 것을 보여주고 있다. 장애물 사이를 지나갈 때 장애물 회피를 위해 관절의 궤적들이 한 점으로 모이는 것을 볼 수 있다.

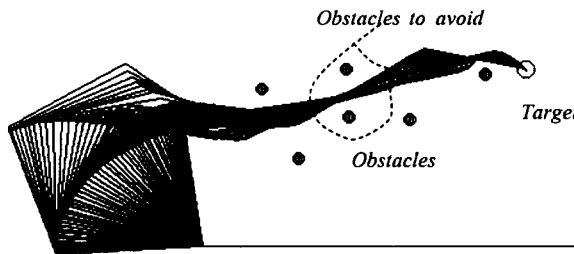


Fig. 3 An example application of the reference velocity for avoiding obstacles.

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 이를 위하여 경로 추종을 위한 기준속도 벡터와 장애물 회피를 위한 기준속도 벡터를 합하여 관절의 기준속도 벡터를 최종적으로 설정하였다.

3. 모의실험 결과

3.1. 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 1과 같이 설정하였고, 10개의 장애물을 무작위로 생성하고 10개중 3개의 비율로 직선을 이루는 형태의 장애물을 생성하여 50회씩 4번 반복하였다.

Table 1 Parameters for artificial potential field , $\eta = m k^3 \rho_0^3 / (1 - k)$.

| | ρ_0 | m | $k\rho_0$ |
|---------------------------|----------|-----|-----------|
| for trajectory generation | 0.2 | 0.6 | 0.1 |
| for target direction | 0.4 | 1 | 0.2 |
| for obstacle avoidance | 0.2 | 0.6 | 0.1 |

3.1.1. 5자유도 로봇의 장애물 회피 시뮬레이션

5자유도 로봇으로 장애물 환경에서 시뮬레이션을 수행한 결과를 표 2에 나타내었다. 장애물과 관절과의 최소거리가 충돌위험이 있는 0.03m 이하로 근접하는 것이 대략 6-8% 정도로 나타났다.

Table 2 Shortest distances to 10 obstacles from the 5-dof robot moving in the 3D space (m).

| times | average(m) | standard deviation(m) | number of less than 0.03 m / total |
|-------|------------|-----------------------|------------------------------------|
| 1 | 0.0834 | 0.0414 | 4 / 50 |
| 2 | 0.0890 | 0.0402 | 3 / 50 |
| 3 | 0.0991 | 0.0497 | 3 / 50 |
| 4 | 0.0926 | 0.0461 | 3 / 50 |

3.1.2. 6자유도 로봇의 장애물 회피 시뮬레이션

6자유도 로봇으로 장애물 환경에서 시뮬레이션을 수행한 결과를 표 3에 나타내었다. 장애물과 관절과의 최소거리가 충돌위험이 있는 0.03m 이하로 근접하는 것이 대략 6-8% 정도로 나타났다.

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

| times | average(m) | standard deviation(m) | number of less than 0.03 m / total |
|-------|------------|-----------------------|------------------------------------|
| 1 | 0.0838 | 0.0358 | 4 / 50 |
| 2 | 0.0775 | 0.0382 | 4 / 50 |
| 3 | 0.0861 | 0.0383 | 3 / 50 |
| 4 | 0.0917 | 0.0424 | 4 / 50 |

3.1.3. 7자유도 로봇의 장애물 회피 시뮬레이션

7자유도 로봇으로 시뮬레이션을 수행한 결과를 표 4에 나타내었다. 장애물과 관절과의 최소거리가 충돌위험이 있는 0.03m 이하로 근접하는 것이 대략 4% 이하로 나타났다.

Table 4 Shortest distances to 10 obstacles from the 7-dof robot moving in the 3D space (m).

| times | average(m) | standard deviation(m) | number of less than 0.03 m / total |
|-------|------------|-----------------------|------------------------------------|
| 1 | 0.0939 | 0.0380 | 0 / 50 |
| 2 | 0.0964 | 0.0395 | 1 / 50 |
| 3 | 0.0976 | 0.0422 | 0 / 50 |
| 4 | 0.1003 | 0.0406 | 2 / 50 |

3.1.4. 3차원 공간에서의 모의실험 결과

10개의 장애물을 무작위로 생성하여 50회씩 4번 반복하여 수행한 결과, 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 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 작성하였기 때문이다. 이것은 로봇의 관절이 장애물과 위험거리 이내로 접근할 경우 움직임을 멈추도록 프로그램을 작성하거나 전체 기준 좌표계에 대한 로봇의 위치를 바꿈으로써 해결될 수 있다. 이 경우를 제외하곤 3차원 공간에서 자유도가 증가함에 따라서 안전한 경로 생성과 장애물 회피가 가능함을 보여 주었다.

4. 요약 및 결론

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 시뮬레이션을 수행하였다.

주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 인식된 환경정보를 이용하여 과실 수확용 로봇의 여유자유도 관절이 3차원 공간상에서 장애물을 피하여 과실을 수확할 수 있도록 가상 위치에너지 장에서 장애물과 목표물의 위치에너지 개념을 응용하여 선단 작업부의 운동 경로를 생성하는 방법을 제시하였다.

2) 생성된 경로를 따라 로봇을 구동할 수 있도록 관절의 최적해를 구하였다.

3) 여유자유도 로봇의 관절이 주어진 경로를 추종하면서 3차원 공간상의 장애물 회피가 가능한 기준속도 벡터의 설정 방법을 제시하였으며, 기준속도 벡터를 적용하여 여유자유도 로봇의 안전한 경로 생성과 제어를 위한 프로그램을 개발하였다.

4) 장애물 회피라는 실험상의 목적을 위해 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.

5) 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.

6) 동일한 장애물 환경에 대하여 자유도가 증가함에 따라서 안전한 경로 생성과 장애물 회피가 가능함을 보여 주었다.

5. 참고문헌

1. 류영선. 1997. 여유자유도 로봇 머니플레이터의 과실 수확시 장애물회피 운동제어 알고리즘 개발. 서울대학교 박사학위 논문
2. Chand, S. and Keith L. Doty. 1985. On-line polynomial trajectories for robot manipulators. *The International Journal of Robotics Research*. v4(2):38-48
3. Edan, Y. and G. E. Miles. 1993. Design of an agricultural robot for harvesting melons. *Transactions of the ASAE* 36(2):593-603
4. Fu, K. S., R. C. Gonzalez and C. S. G. Lee. 1987. *Robotics : control, sensing, vision, and intelligence*. McGraw-Hill, Inc.
5. Khatib, Oussama. 1986. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The International Journal of Robotics Research* 5(1):90-98
6. Kondo, N., Y. Nishitsuji, P. P. Ling and K. C. Ting. 1996. Visual feedback guided robotic cherry tomato harvesting. *Transactions of the ASAE* 39(6):2331-2338
7. Nakamura, Y. 1993. *Advanced robotics redundancy and optimization*. Addison-Wesley publishing company.
8. Shiller, Zvi and Steven Dubowsky. 1989. Robot path planning with obstacles, actuator, gripper, and payload constraints. *The International Journal of Robotics Research*. v8(6):3-18
9. Simonton, W. 1991. Robotic end effector for handling greenhouse plant material. *Transactions of the ASAE* 34(6):2615-2621