

멜론 재배작업용 하이브리드 매니퓰레이터 개발

김유용 조성인 황 현 황규영 박태진

Development of Hybrid Manipulator for Melon Harvesting Works

Y. Y. Kim S. I. Cho H. Hwang K. Y. Hwang T. J. Park

Abstract

Various robots were developed for harvesting fruits and vegetables. However, each robot was designed for a specific task such as harvesting apples or vegetables. This has been a big hurdle in application of robots to agriculture. A new type of hybrid manipulator with both parallel and serial joints was developed and designed to apply to various kinds of field operations.

The hybrid manipulator had 2 extra degree of freedom in serial joints which made it flexible in switching one to the other type of hybrid manipulator, for example, PUMA to SCARA. And it was designed to harvest heavy fruits such as musky melons or water melons even behind leaves or branches of tree. This hybrid manipulator showed less than $\pm 1\text{mm}$ position error. It was concluded that the hybrid manipulator was an effective and feasible tool to perform various works and to increase working performance.

Keywords : Robot, Parallel Manipulator, Hybrid Manipulator, Harvesting

1. 서론

국민소득 수준의 향상과 함께 식생활이 변화하여 맛과 향이 좋고, 외관이 수려한 고급 과채류의 소비가 급격하게 증가하고 있다. 이러한 이유로 고품질 과채류로 분류되는 멜론 (*Cucumis melo* L.)을 재배하는 농가 또한 증가되고 있다.

이러한 이유로 기후 및 기상조건 등에 영향을 받지 않고, 고품질 멜론을 사계절 안정적으로 생산하여 소득증대를 꾀하기 위해 우리나라 멜론 재배 농가 대부분은 시설재배 방식을 선택하여 재배하고 있다.

멜론 재배는 과종부터 수확까지 50~60일의 긴 재배기간 및 다양한 단위작업, 시설내의 열악한 환경으로 인한 노동인력의 작업 기피, 농촌 노동력의 노령화, 그리고 90년 이후 매년 12.8% 정도 상승되는 임금으로 인한 생산비의 40%를 차

지하는 인건비 등의 많은 어려움에 직면하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 멜론 재배에서 기계화 작업이 이루어지고 있으나, 총 노동 시간(876시간) 중 12%에 해당하는 관수(100시간)와 경운정지 작업(4시간)만이 기계화가 이루어졌다. 총 노동 시간 중 전체 작업의 27%를 차지하고 있는 수확, 교배 그리고 방제의 기계화는 전무한 실정이다(농촌진흥청, 표준영농교본 과채류 재배, 1987).

단위작업용 전용장치는 투입설비가 다양해져서 농가의 경제적 부담을 가중시키고, 실제 작업가동시간을 고려한 작업 공정별 전용작업기계의 가동률을 떨어뜨리는 단점이 있다. 이러한 문제의 해결책으로 다양한 작업을 수행할 수 있는 다목적 농업용 로봇이 대안으로 제시되고 있다.

현재까지 농업분야의 로봇에 대한 연구는 농업기계의 무인화 및 직렬 로봇(serial robot)을 이용한 수확용 로봇과 축산용

This study was conducted by the research fund supported by Agricultural R&D Promotion Center (ARPC). The article was submitted for publication in February 2006, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in February 2006. The authors are You Yong Kim, Junior Researcher, National Institute of Agricultural Engineering, Suwon, Korea, Seong In Cho, Professor, School of Biosystems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea, H. Hwang, Professor, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, Kyu Young Hwang, Graduate Student, and Tac Jin Park, Graduate Student Biosystems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea. The corresponding author is Seong In Cho, Professor School of Biosystems Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-921, Korea; Fax : +82-2-880-4606; E-mail : <sicho@snu.ac.kr>

로봇이 주류를 이루고 있다(농업기계화 연구소, 1996). 일반적으로, 6 자유도 수직 다관절 로봇 구조를 이용하는 직렬 로봇의 경우, 큰 작업공간을 가질 뿐만 아니라 작은 공간에서도 효과적으로 유연하게 작업할 수 있는 장점이 있다. 그러나 직렬 로봇의 구조는 긴 외팔보 형상이므로, 강성이 높지 못하여 큰 하중이나 진동이 걸리는 작업에 취약하고 각 링크의 오차가 로봇의 끝단에 누적되어 나타나게 되는 단점이 있다. 이러한 일례로 Kondo 등(1996)은 토마토 수확을 위해 유연성이 있으며, 다목적으로 사용될 수 있는 7 자유도 매니플레이터를 개발하였으나 많은 액추에이터와 무거운 무게로 인해 제어하기 어려웠다고 하였다.

로봇공학자들은 역기구학의 해를 구하기 쉽고, 강성도(stiffness)가 높으며, 관성이 적고, 가반 하중이 높은 장점이 있는 병렬 매니플레이터를 이러한 문제점의 해결책으로 제시하고 있다. 그러나 병렬 매니플레이터는 작업공간이 적고, 설계하기 어려우며, 로봇의 현재위치를 구하는 순기구학 문제를 풀기 어려운 단점이 있다.

이러한 병렬과 직렬의 단점을 보완하기 위해 산업로봇분야에서 많은 연구자들은 병렬과 직렬을 혼합한 하이브리드(hybrid) 매니플레이터에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다. 이러한 일례로 Yuasa 등(1999)은 건설과 선박 제조분야의 무거운 물건을 취급하고 조립하기 위한 매니플레이터를 개발하기 위해 부족한 스튜어트 플랫폼의 작업공간을 확장할 수 있는 방법으로 4개의 와이어와 3개의 실린더로 구동되는 하이브리드 구동 병렬 매니플레이터를 제안하였으며, Waldron 등(1989)은 7 자유도의 직렬 관절에 3 자유도 병렬 매니플레이터를 결합한 10 자유도 하이브리드 매니플레이터 시스템에 대해 기구학적으로 분석하였다. 또한 Tanio 등(2000)은 직렬과 병렬 매니플레이터의 장점을 갖도록 3 자유도 병렬 매니플레이터 2개를 직렬 연결한 하이브리드 매니플레이터를 개발하였다.

또한 일반 산업용 로봇과 달리 농업은 특성상 다양한 작업을 수행할 수 있어야 하므로 작업에 따라 구조를 쉽게 변경할 수 있어야하나 기존의 산업분야에서 개발된 하이브리드 로봇은 전용형식이므로 구조를 변경하기 어려운 문제가 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구의 목적은 산업분야에서 많이 이용되고 있는 직렬 매니플레이터와 병렬 매니플레이터를 혼합하여 직렬 매니플레이터처럼 넓은 작업공간을 갖고 병렬 구조처럼 높은 가반 하중 및 정밀 위치제어 능력을 가지며, 작업에 따라 구조를 쉽게 변경할 수 있는 온실 멜론 재배 작업에 적합한 하이브리드 매니플레이터를 개발하기 위해 수행하였다.

2. 재료 및 방법

가. 다목적 매니플레이터의 설계조건

2002년 충남 논산의 온실멜론 재배농가와 농업기술센터의 설문조사를 기초로 멜론 재배를 위한 매니플레이터의 설계조건은 다음과 같다.

- 조건 1 : 시설 내에서 멜론을 재배하기 위한 멜론 재배시스템은 자유롭게 이동 가능하여야 하므로 차량시스템에 탑재한다.
- 조건 2 : 시설 내의 멜론의 중간거리는 2 m이나 차량의 이동을 위한 통로 폭은 1.5 m이다. 따라서 차량의 폭은 1.5 m보다 작아야 한다.
- 조건 3 : 멜론 재배시스템은 차량에 탑재하기 위해 가벼워야 한다.

매니플레이터의 대략적인 강성과 제원을 결정하기 위하여 멜론의 재배작업 중 가장 많은 노동력이 소요되는 수확, 교배, 그리고 방제작업에 대하여 작업 공간, 자유도 및 가반 하중을 조사하였다. 조사결과는 다음과 같다.

수확작업 시에 그림 1에 도식된 바와 같이 멜론의 위치는 지면으로부터 높이 120 cm, x 와 y 방향의 평균위치에 원점을 좌표하면 y 방향으로 ± 10 cm, x 방향으로 ± 15 cm, 그리고 z 방향으로 ± 10 cm 이내에 위치되어 있다.

멜론의 무게(4 kg 이하)와 멜론을 수확하기 위한 선단장치(모터무게 포함)의 무게(6 kg 이상)를 고려하여 매니플레이터의 가반 하중은 10 kg 이상이어야 한다.

멜론 교배작업 시 필요한 작업공간은 수술로부터 암술까지 z 방향으로 20 cm 내외, y 방향으로 10 cm 내외, x 방향으로 10 cm 내외이다. 꽃가루의 무게가 거의 없으므로 가반 하중

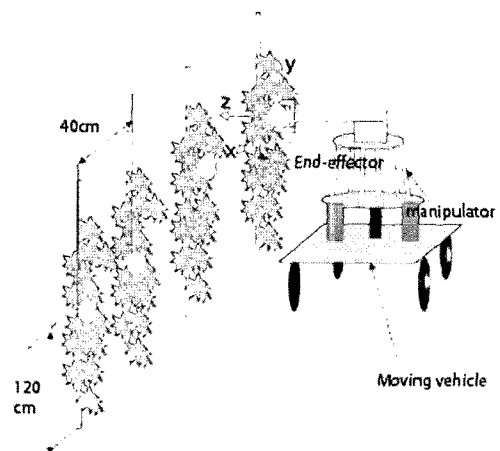


Fig. 1 Workspace needed to harvest melon fruit.

에 의한 영향은 고려하지 않아도 되나, 암술과 수술에 선단장치 접근 시 잎에 의해 방해받을 수 있으므로, 가능한 여유 자유도를 가져야 하며, 교배작업 시 실제 교배가 이루어지는 부분은 직경 1 cm 이하이므로 매우 정교한 위치제어가 가능한 매니플레이터가 필요하다.

멜론의 병해충 방제작업은 멜론 잎의 전반부에 대하여 방제작업이 가능하여야 한다.

나. 하이브리드 매니플레이터 구성

하이브리드 매니플레이터는 그림 2에서 보는 바와 같이 병렬 매니플레이터, 병렬 매니플레이터를 z축에 대하여 회전시킬 수 있는 베이스 조인트, 병렬 매니플레이터 위에 붙이는 방향에 따라 구조를 변경할 수 있는 시리얼 조인트로 구성하

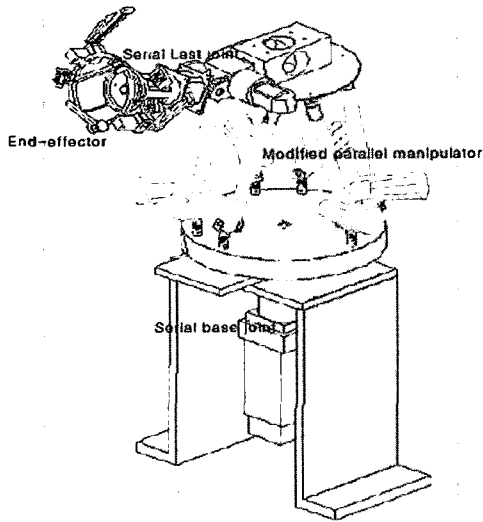


Fig. 2 Construction of the hybrid robot.

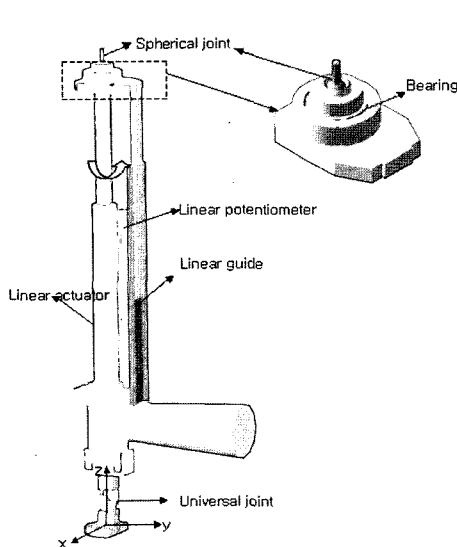


Fig. 3 Construction of actuator for the parallel manipulator.

였다.

병렬 매니플레이터는 플랫폼, 베이스, 선형 액추에이터의 3 부분으로 구성되며, 선형 액추에이터의 길이변화에 의해 플랫폼의 위치 및 자세가 변화하게 된다. 본 연구에서 사용된 액추에이터(EasyCat 33 series, SKF, Sweden)는 볼 스크루와 DC모터가 일체형으로 이루어진 선형 액추에이터이다. 피드백 제어를 위해 액추에이터의 현재위치 검출은 필요하다. 그러나 액추에이터는 z축에 대하여 회전하면서 상승하므로, 센서를 부착하기 위해 그림 3과 같이 선형 가이드와 구면 관절(SRJ 008C, Hephaist, Japan) 아래에 부착된 z축에 대한 회전 베어링을 이용하여 액추에이터 상승 시 발생하는 z축에 대한 회전을 방지하고, 선형 변위센서(LT, Data Instruments, USA)를 부착하여 현재위치를 검출하였다.

다. 하이브리드 매니플레이터 제어시스템

하이브리드 매니플레이터 제어시스템은 ①직렬 관절 회전 각과 병렬 매니플레이터의 링크길이를 계산하는 주 제어기, ②직렬 관절 제어시스템, ③병렬 매니플레이터 제어시스템, ④위치 측정 시스템, 그리고 ⑤1개의 주 제어기로부터 8개의 액추에이터 제어기와 직렬 관절 제어기로 제어신호를 전송할 수 있게 연결하는 RS-485 멀티플렉서로 구성하였다.

라. 하이브리드 매니플레이터 역기구학 해석

하이브리드 매니플레이터는 그림 4의 기하학적 도식에서 보는 바와 같이 하이브리드 매니플레이터에 추가된 선단장치의 위치와 베이스 프레임을 회전시키는 회전행렬이 추가되어 해석된다.

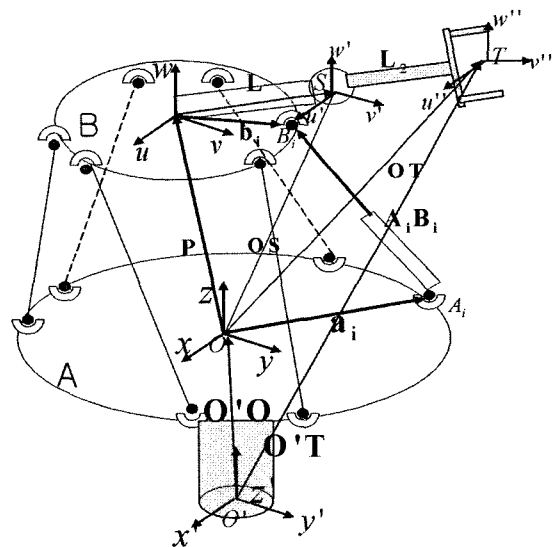


Fig. 4 Geometrical figure of a PUMA type hybrid manipulator.

하이브리드 매니플레이터의 최종 관절에 추가된 선단장치의 중심 위치벡터는 \vec{L}_2 , 고정된 기준점 O' 으로부터 베이스 프레임의 중심 O 까지 위치벡터는 $\vec{O'O}$ 이고, 기준점 O' 으로부터 선단장치의 중심 $\vec{O'T}$ 까지 위치벡터는 이다.

일반적인 병렬 매니플레이터의 링크길이 벡터는 식 (1)과 같다.

$$\vec{A_i B_i} = \vec{P} + {}^A R_B \vec{b_i} - \vec{a_i} \quad (1)$$

기준점 O' 으로부터 선단장치의 중심까지 위치벡터 $\vec{O'T}$ 는 식 (2)와 같이 기준점으로부터 베이스 프레임까지 위치벡터 $\vec{O'O}$ 에 베이스 프레임의 중심으로부터 선단장치의 중심까지 위치벡터를 더하여 z 축에 대하여 회전한 것과 같다.

$$\vec{O'T} = R_{(z',\beta)} (\vec{O'O} + \vec{O'T}) \quad (2)$$

여기서,

$R_{(z',\beta)}$: z' 축에 대한 회전행렬

베이스 프레임의 중심으로부터 선단장치의 중심까지 위치벡터 $\vec{O'T}$ 는 식 (3)과 같이 하이브리드 매니플레이터의 위치벡터 \vec{OS} 에 최종 관절로부터 선단장치의 중심까지 위치벡터 \vec{L}_2 를 u 축에 대하여 회전시켜 더한 결과와 같다.

$$\vec{O'T} = \vec{OS} + {}^A R_B R_{(u',\alpha)} \vec{L}_2 \quad (3)$$

여기서,

${}^A R_B$: 병렬 매니플레이터의 A 프레임에 대한 B 프레임의 rotation matrix

$R_{(u',\alpha)}$: u' 축에 대한 rotation matrix

최종관절의 중심 S 를 나타내는 좌표 벡터는 식 (4)와 같다.

$$\vec{OS} = \vec{P} + {}^A R_B \vec{L} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하면 식 (5)와 같다.

$$\vec{O'T} = \vec{P} + {}^A R_B \vec{L} + {}^A R_B R_{(u',\alpha)} \vec{L}_2 \quad (5)$$

따라서 식 (5)를 식 (2)에 대입하면 $\vec{O'T}$ 는 식 (6)이 된다.

$$\vec{O'T} = R_{(z',\beta)} \{ \vec{O'O} + \vec{P} + {}^A R_B \vec{L} + {}^A R_B R_{(u',\alpha)} \vec{L}_2 \} \quad (6)$$

위치벡터 \vec{P} 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\vec{P} = R_{(z',\beta)}^{-1} \vec{O'T} - \{ \vec{O'O} + {}^A R_B \vec{L} + {}^A R_B R_{(u',\alpha)} \vec{L}_2 \}$$

병렬 매니플레이터의 링크길이 벡터를 구하기 위해 위치벡터 \vec{P} 를 식 (1)에 대입하면 식 (7)과 같다.

$$\vec{A_i B_i} = R_{(z',\beta)}^{-1} \vec{O'T} - \{ \vec{O'O} + {}^A R_B \vec{L} + {}^A R_B R_{(u',\alpha)} \vec{L}_2 \} + {}^A R_B \vec{b_i} - \vec{a_i} \quad (7)$$

목표위치 T 의 orientation matrix ${}^O R_T$ 는 식 (8)과 같다.

$${}^A B_B R_{(z',\beta)} {}^T R_{(w'',\phi')} R_{(w'',\theta')} R_{(u'',\phi')} R_{(u',\alpha')} {}^T \quad (8)$$

병렬 매니플레이터의 링크길이는 식 (7)을 내적 하여 구한다.

마. 작업공간분석

병렬 매니플레이터의 액추에이터 치수는 그림 5와 같다. 액추에이터의 고정된 길이 M_a 과 N_a 은 각각 38.4 cm, 7.35 cm 이고 L_a 의 범위는 0.63~20.8 cm이다. 그러므로 $A_i B_{i_{min}}$ 는 46.38 cm이다.

다음과 같은 알고리즘을 적용하여 위의 제약조건을 만족하는 작업공간을 구한다.

- ① 병렬 매니플레이터의 역기구학 해석에서 구해진 식에 위치 좌표(x 좌표 범위, y 좌표 범위, z 좌표 범위)와 방향($\theta = \phi = \psi = 0$)을 대입하여 6개의 링크길이를 구한다.
- ② 구한 링크길이로부터 최소 링크길이를 뺀다.
- ③ 결과한 링크길이가 액추에이터의 변화량 범위 이내일 때 좌표를 좌표계에 표시한다.

병렬 매니플레이터의 작업공간은 matlab 6.1(The Mathworks, USA)에 위의 알고리즘을 적용하여 분석되었다. 분석된 결과는 그림 6에 나타내었다. 분석된 작업공간은 최대 x 축 방향

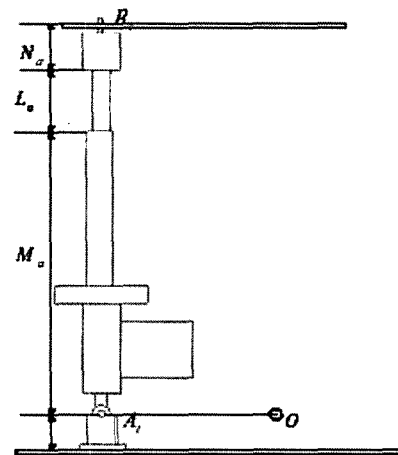


Fig. 5 Dimension of used link.

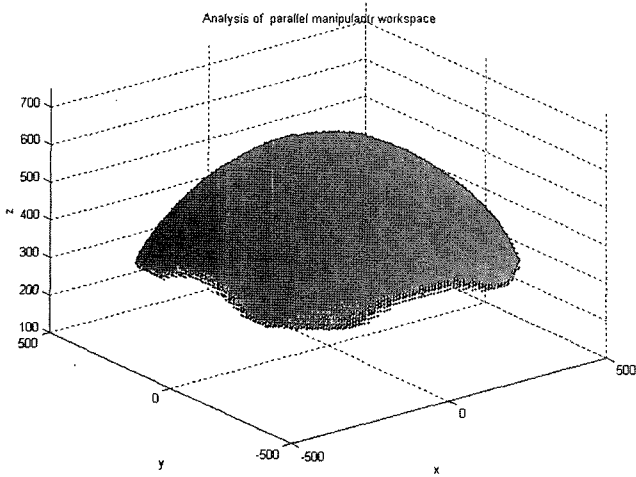


Fig. 6 Workspace of the parallel manipulator.

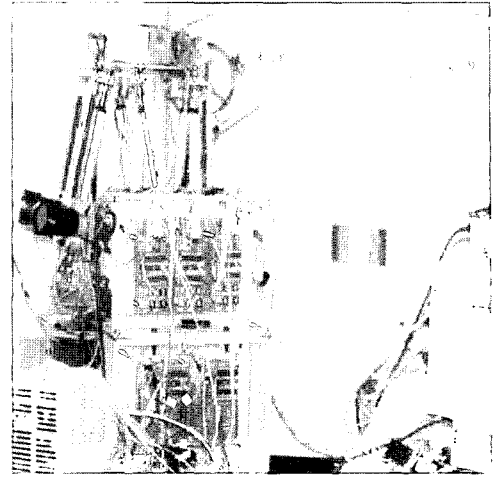


Fig. 7 The manufactured hybrid manipulator.

으로 ± 28 cm, y 축 방향으로 ± 28 cm, z 축의 방향으로 17 cm 이었다. 따라서 본 연구에서 개발된 병렬 매니플레이터는 멜론 재배에 필요한 작업공간을 만족하였다.

바. 성능평가 방법

그림 7의 개발된 하이브리드 매니플레이터 제어 성능 평가를 위해 임의의 입력된 목표위치(x, y, z)와 방향(ψ, θ, ϕ)에 대해 6개의 병렬 매니플레이터의 링크길이를 2개의 직렬 관절 회전각을 구하고 구한 값을 병렬 매니플레이터의 액추에이터 제어기와 직렬 관절 제어기에 링크길이를 관절 회전각을 송신 하도록 비주얼 C++ 6.0을 이용하여 프로그램 하였다. 2개의 직렬 관절 회전각은 상용화된 서보장치를 이용하여 제어하므로 성능평가를 수행하지 않고 병렬 매니플레이터의 제어성능을 통해 하이브리드 매니플레이터의 제어성능을 평가한다.

임의의 목표위치와 방향을 입력하여 5회 반복 실험하고 계산된 A/D 변환 값과 제어된 링크길이 A/D 변환 값을 비교하여 하이브리드 매니플레이터의 제어성능을 평가한다.

- ① 임의의 목표위치(x, y, z)와 방향(ψ, θ, ϕ)을 주 제어기에 입력한다.
- ② 주 제어기는 목표위치와 방향이 입력되었을 때 하이브리드 매니플레이터의 역기구학 해석 식을 이용하여 링크길이를 계산한다.
- ③ 계산된 링크길이를 선형 변위센서 보정 식을 통해 링크 12 bit 분해능의 A/D 값(0~4095)으로 변환한다.
- ④ 통신상에서 일어나는 오류를 줄이기 위해 A/D 변환된 값에 11000을 더하여 일정한 형태로 액추에이터 제어기에 송신한다.
- ⑤ 병렬 매니플레이터의 링크길이를 제어하는 액추에이터 제어기는 역기구학에서 계산된 링크길이 A/D 값으로

복원하기 위해 수신된 값의 뒤 4자리를 읽고 1000을 뺀 후 링크길이를 제어한다.

3. 결과 및 고찰

가. 위치제어 성능평가

목표위치 $x=5$ cm, $y=27.15$ cm, $z=58.15$ cm, $\psi=0^\circ$, $\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$ 를 입력하여 역기구학과 선형 변위센서 보정 식을 통해 계산된 결과에 11000을 더하여 얻어진 결과를 그림 6에 나타내었다.

링크 1에서 링크 6의 위치제어 결과는 그림 9에 나타내었으며 결과에서 보는 바와 같이 목표위치 값(링크 1=1418, 링크 2=1542, 링크 3=1295, 링크 4=1635, 링크 5=1699, 링크

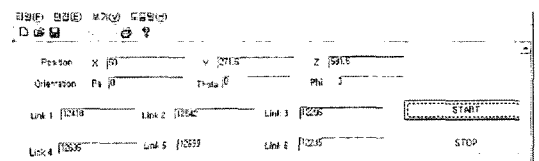


Fig. 8 Length of hybrid manipulator links calculated by inverse kinematics.

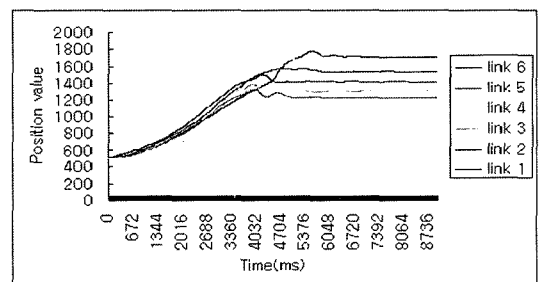


Fig. 9 Position control performance of hybrid manipulator links.

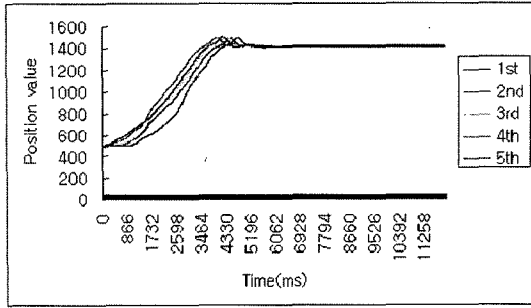


Fig. 10 Position control performance of hybrid manipulator link 1.

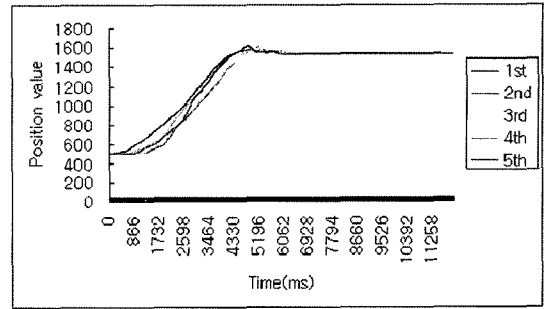


Fig. 11 Position control performance of hybrid manipulator link 2.

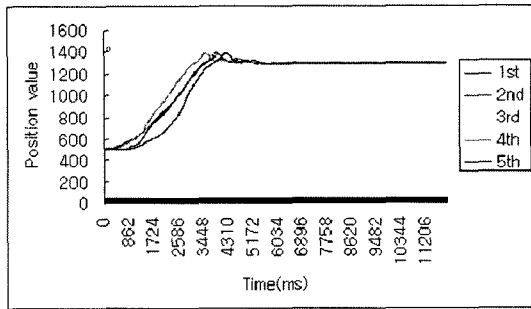


Fig. 12 Position control performance of hybrid manipulator link 3.

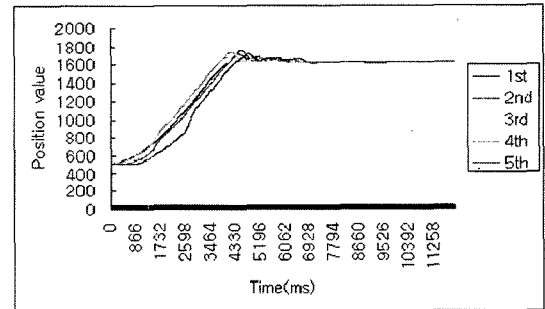


Fig. 13 Position control performance of hybrid manipulator link 4.

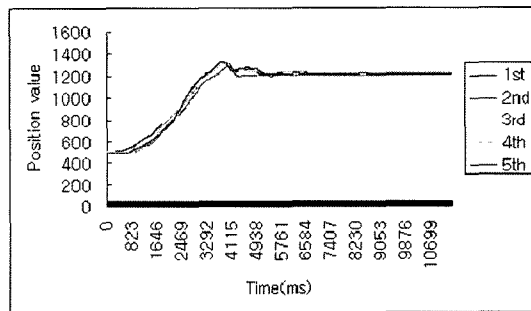


Fig. 14 Position control performance of hybrid manipulator link 5.

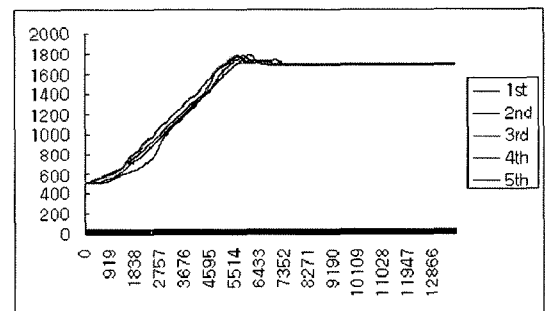


Fig. 15 Position control performance of hybrid manipulator link 6.

6=1235)에 오차범위 $\pm 10(\pm 0.05 \text{ cm})$ 이내에서 제어되고 있다.

5회 반복된 위치제어 결과는 매니플레이터의 링크 별로 그림 10부터 그림 15까지 나타내었다.

그림 10부터 그림 15의 결과에서 보는 바와 같이 5회 반복 위치제어 실험에서 목표위치 값(링크 1=1418, 링크 2=1542, 링크 3=1295, 링크 4=1635, 링크 5=1699, 링크 6=1235)에 오차범위 $\pm 10(\pm 0.05 \text{ cm})$ 이내에서 제어되고 있다. 링크 6의 속도저하 원인은 최종 링크와 최종 관절의 부하에 의한 영향으로 판단되며 역학적 해석을 통해 적절한 토크를 갖는 액추에이터를 선정하여 링크 6의 속도저하 문제는 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

개발된 위치 측정 센서(2004 동계학술대회논문집, 한국농업기계학회)를 이용하여 병렬 매니플레이터의 위치제어 성능평가를 수행하고 성능평가 결과 그림 16에 나타난 바와 같이 오

차범위 $\pm 0.1 \text{ cm}$ 와 0.2° 이내에서 제어되고 있음을 보여준다.

따라서 선단장치는 하이브리드 매니플레이터를 이용하여 원하는 목표위치(x, y, z)와 방향(ψ, θ, ϕ)으로 $\pm 0.1 \text{ cm}$ 와 $\pm 0.2^\circ$ 이내에서 제어될 수 있다.

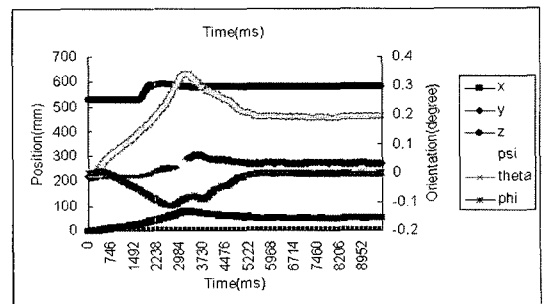


Fig. 16 Position and orientation control performance of parallel manipulator.

4. 요약 및 결론

스튜어트 플랫폼 병렬 매니플레이터는 플랫폼의 수직면에 대하여 작업을 수행할 수 있으나 수평면에 대한 작업을 수행하기 어렵다. 수확이나 교배 작업과 같이 베이스의 수평면에 대한 작업을 수행하기 위해 하이브리드 매니플레이터는 플랫폼의 상단에 최종 링크를 추가하여 개발하였다.

하이브리드 매니플레이터 작업 공간 분석 결과 최대 x 축 방향으로 ± 28 cm, y 축 방향으로 ± 28 cm, z 축 방향으로 17 cm로 멜론 재배에 필요한 작업공간을 만족하였다.

하이브리드 매니플레이터의 위치 제어를 위해 기존의 스튜어트 플랫폼에 최종 링크 백터를 추가하여 기하학적 방법으로 역기구학 분석을 수행하였다.

하이브리드 매니플레이터의 성능평가 결과 위치오차 ± 0.1 cm 이었고, 방향오차는 $\pm 0.2^\circ$ 이내이었다.

본 연구에서 개발된 하이브리드 매니플레이터는 다양한 작업을 수행할 수 있다. 따라서 다양한 작업에서 농촌 노동력을 대체할 수 있고 농가의 기계 구입비용을 절감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 농림부. 2001. 작물통계.
2. 농업기계화 연구소. 1996. 농업용 로봇 연구개발 동향과 전망.
3. 농촌진흥청. 1987. 과채류재배. 표준영농교본 -66, 218-219.
4. 김유용, 조성인, 임용우. 2004. 6자유도 직렬 링크를 이용한 병렬 매니플레이터의 순기구학 해석. 한국농업기계학회 2004년 동계 학술대회 논문집. Vol. 9, No. 1, 190-193.
4. Kondo, N., M. Monta and T. Fujiura. 1996. Fruit harvesting robot in Japan. Adv. Space Res. vol. 18, No. 1/2, 181-184.
5. Tanio, K. and Tanev. 2000. Kinematics of a hybrid (parallel-serial) robot manipulator. Mechanism and machine theory 35(2000) 1183-1196.
6. Waldron, K. J., Raghavan, M., and Roth, B. 1989. Kinematics of a hybrid series parallel manipulator system, ASME J. of Dyn., Sys., Meas., and Cont., vol. 111:211-221.
7. Yuasa, K., T. Arai, Y. Mae, K. Ionue, K. Miyawaki, N. Koyachi. 1999. Hybrid drive parallel arm for heavy material handling. Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. 1234-1240.