

## 우주로봇 자율제어 테스트 베드

### Test Bed for Autonomous Controlled Space Robot

최종현\*, 백윤수\*\*, 박종오\*

\*한국과학기술연구원 기전연구부(Tel:+82-02-958-5616; Fax:+82-02-958-5629; E-mail:jhchoi@robot.kist.re.kr)

\*\*연세대학교 기계공학과(Tel:+82-02-361-2827; Fax:+82-02-362-2736; E-mail:ysbaek@bubble.yonsei.ac.kr)

**Abstracts** This paper, to represent the robot motion approximately in space, deals with algorithm for position recognition of space robot, target, and obstacle with vision system in 2-D. And also there are algorithms for precise distance-measuring and calibration using laser displacement system, and for trajectory selection for optimizing moving to object, and for robot locomotion with air-thrust valve. And the software synthesizing of these algorithms helps operator to realize the situation certainly and perform the job without any difficulty.

**Keywords** Position recognition, Vision system, Distance-measuring, Trajectory selection, Air-thrust valve

### 1. 서론

인류가 우주에 첫발을 디딘 이후 수많은 연구와 실험이 진행되어온 지금, 제한적인 우주공간의 환경 속에서, 요구되는 작업을 수행하기 위한 우주로봇의 개발은 필수적이다. 우주 탐험이 보다 많이 진행되어 짐에 따라 적은 제작비용, 조작성의 용이성, 자율제어 기능 등을 가진 우주로봇에 대한 연구와 제작이 필요하게 되었다. 인간을 대신하여, 주어진 임무를 보다 정확하고 안전하게 수행하기 위해서는 우주로봇과 작업 대상의 위치에 대한 정확한 정보와 작업가능영역으로의 정확하고 신속한 이동, 그리고 최적의 임무수행을 위한 판단능력이 필요하며 무중력이라는 특수한 상황에서, 로봇의 운동에 관한 동력학적 해석이 선행되어야 한다.

우주로봇은 무인 인공위성 시스템에 매니플레이터를 장착한 것을 말한다. 이것은 일종의 자유비행 우주로봇이다. 이것은 작고, 경제적이며 실용적이다. 우주로봇은 인공위성에 대한 서비스(포획, 수리, 에너지 공급 등)와 우주 정거장의 건설 등에 주로 사용된다. 현재, 이런 작업들은, 우주로봇에 자율제어 기능이 없기 때문에, 우주 비행사들에 의하여 되어지고 있다. 이에 자율제어가 가능한 우주로봇의 근사적인 실현을 위하여 지상에 테스트 베드(Test Bed)를 만들고 시뮬레이션과 실험을 하였다.

본 논문은 Vision을 통한 우주로봇과 물체의 2차원 위치인식과 거리측정장치를 이용한 거리측정 및 보정, 물체까지의 최적이동을 위한 궤적 설정 그리고 공압밸브를 이용한 로봇의 이동에 관한 알고리즘들을 통해 향후 우주로봇 개발에 가능성을 제시하고자 한다.

### 2. 기구학적 모델링

우주로봇과 땅에 고정된 로봇의 가장 큰 차이점은 기저 판의 고정 여부이다. 우주로봇은 무중력 환경에서 작업을 하기 때문에 기저 판이 고정되어 있지 않다. 따라서 우주로봇에서 매니플레이터와 기저가 동력학적으로 상호 작용을 하여 매니플레이터의 운동이 기저 판의 위치와 자세를 변경시킨다. 팔의 움직임이 몸체에 미치는 영향의 정도는 팔과 몸체의 질량비에 의하여 정해진다. 만약 이 영향이 고려되지 않고, 또한 땅에 고정된 로봇에 사용되는 제어 기술을 그대로 우주로봇에 사용한다면, 우주로봇은 계획된 작업을 완수하지 못할 것이다. 이 문제를 해결하기

위하여, 상호 작용이 고려된 모델링과 제어 방법을 찾아야 한다.

매니플레이터의 순기구학은 매니플레이터의 관절 각으로부터 매니플레이터에 있는 임의 점(일반적으로 말단효과장치)의 위치와 자세를 계산하는 것이다. 그리고 역기구학은 임의 점의 위치와 자세로부터 관절 각을 구하는 것이다. 말단효과장치의 위치와 자세 변화( $dx$ )와 관절 각의 변화( $dq$ )를 식으로 표현하면  $dx = J(q)dq$ 이며 여기서  $J$ 는 자코비안이다.  $dx$ 로부터  $dq$ 를 찾아내기 위해서는  $J^{-1}$ 을 구하여야 한다. 만약  $J^{-1}$ 이 존재하지 않으면, 매니플레이터는 특이상태(Singular state)에 있다고 한다.

우주로봇의 모델은 그림 1과 같다. 여기서,  $(X_A, Y_A, Z_A)$ 는 관성 좌표계를 나타내고, 링크0은 우주로봇의 몸체를 나타내고, 링크  $i(i=1, \dots, n)$ 은  $i$ 번째 링크를 나타낸다. 관절  $j$ 는 링크  $j-1$ 과 링크  $j$ 를 연결한다.

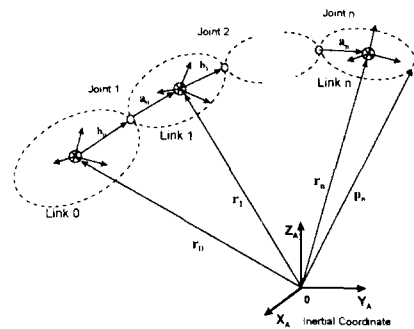


그림 1. 우주로봇의 모델  
Fig. 1. Model of space robot

이 모델에 사용된 심벌들은 다음과 같이 정의되어 진다:

- $\Sigma I$ : 관성 좌표계
- $\Sigma i$ : 링크  $i$ 의 좌표계,  $z$  축이 회전축과 일치
- $r_i$ : 링크  $i$ 의 무게 중심에 대한 위치 벡터
- $p_n$ : 매니플레이터의 말단효과장치의 위치 벡터
- $a_i$ : 관절  $i$ 에서 링크  $i$ 의 무게 중심까지의 벡터
- $b_i$ : 링크  $i$ 의 무게 중심에서 관절  $i+1$ 까지의 벡터
- $l_i$ : 관절  $i$ 에서 관절  $i+1$ 까지의 벡터,  $l_i = a_i + b_i$
- $m_i$ : 링크  $i$ 의 질량
- $W$ : 시스템 전체 질량
- $I_i$ : 무게 중심에 대한 링크  $i$ 의 관성 행렬
- $\omega_i$ : 링크  $i$ 의 각속도

$\psi_i$  : 관절  $i$ 의 회전 각

$\mu_j$  : 관절  $j$ 의 회전축을 나타내는 단위 벡터

$q$  : 관절 공간 벡터( $\psi_0, \psi_1, \dots$ )

이 모델은  $n$ 개의 능동 관절들과  $n+1$ 개의 링크들을 가지고 있는 시스템으로 생각할 수 있다. 이 모델에서 다음과 같은 가정을 하였다.

- (a) 시스템의 모든 링크들은 변형이 없다고 생각한다.
  - (b) 모든 관절들은 제어가 가능한 회전 자유도를 가지고 있다.
  - (c) 외부로부터 시스템에 힘 또는 토크가 가해지지 않는다. 그러므로, 시스템은 팔의 동작 시에 전체 모멘텀 보존 법칙에 따라 조정된다.
  - (d) 시스템의 초기 모멘텀은 0이다.
- 전체 시스템의 무게 중심은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sum_{i=0}^n m_i r_i = W r_G \quad (1)$$

여기서, 전체 시스템의 무게 중심과 일치하게 기준 관성 좌표계를 설정하면, 식(1)은 다음과 같이된다.

$$\sum_{i=0}^n m_i r_i = 0 \quad (2)$$

그럼 1로부터 다음의 위치 벡터 관계식을 구할 수 있다.

$$r_i - r_{i-1} = a_i + b_{i-1} \quad (3)$$

이 식을 반복적으로 계산하면,

$$r_i = r_0 + \sum_{j=1}^i (a_j + b_{j-1}) \quad (4)$$

과 같이 표현된다.

식(4)를 식(2)에 대입하면, 다음의 식을 구할 수 있다.

$$m_0 r_0 + \sum_{i=1}^n m_i \left[ r_0 + \sum_{j=1}^i (a_j + b_{j-1}) \right] = 0 \quad (5)$$

식(5)로부터  $r_0$ 를 구할 수 있다.

$$r_0 = -\frac{1}{M} \left[ \sum_{i=1}^n m_i^n a_i + \sum_{i=1}^n m_i^n b_{i-1} \right] \quad (6)$$

여기서,  $m_i^n = \sum_{j=1}^i m_j$  이다.

말단효과장치까지의 벡터를  $P_r$ 이라고 하면, 다음의 식이 성립된다.

$$P_r = r_0 + b_0 + \sum_{i=1}^n (a_i + b_{i-1}) \quad (7)$$

식(6)을 식(7)에 대입하여 정리하면,

$$P_r = \sum_{k=1}^n (\overline{a}_k + \overline{b}_{k-1}) \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \overline{b}_k &= \frac{m_0^k}{W} b_k & (k < n) \\ \overline{a}_k &= \frac{m_0^{k-1}}{W} a_k & (k < n) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\overline{b}_k = -\frac{m_{k+1}^n}{W} b_k \quad (k = n)$$

$$\overline{a}_k = -\frac{m_0^{k-1}}{W} a_k \quad (k = n)$$

이며,  $\overline{a}_k$ 와  $\overline{b}_k$ 은  $\overline{a}_k$ 와  $\overline{b}_k$ 를  $k$ 번째 링크에 고정된 좌표계로 표현한 것이며, 다음의 관계가 성립한다.

$$\overline{a}_k = R_1^k \overline{a}_k^k \quad \overline{b}_k = R_1^k \overline{b}_k^k \quad (10)$$

여기서,  $R_1^k$ 은 관성좌표계로부터  $k$ 번째 링크에 고정된 좌표계까지의 회전 변환 행렬이다.

식(10)을 식(8)에 대입하면,

$$P_r = \sum_{k=1}^n (R_1^k \overline{a}_k^k + R_1^{k-1} \overline{b}_{k-1}^{k-1}) \quad (11)$$

이 된다. 식(11)을 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{P}_r = \left\{ \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^k \left[ \left( \frac{\partial R_1^k}{\partial q_i} \overline{a}_k^k + \frac{\partial R_1^{k-1}}{\partial q_i} \overline{b}_{k-1}^{k-1} \right) s_i \right] \right\} \dot{q} \quad (12)$$

여기서,  $S_i$ 는  $1 \times n$  행벡터로 이것의  $i$ 번째 요소가 1이고 나머지는 0이다. 식(12)는 말단효과장치의 선속도와 관절의 각속도를 규명하는 1차 기구학 식이다. 우주로봇 시스템의 매니플레이터와 기저판은 작용-반작용 힘과 토크에 의하여 서로 연관되어져 있다. 그러므로  $q$ 에 포함된 상태 변수 중 기저에 해당하는  $\psi_0$

( $\psi_s$ )와 관절에 해당하는  $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ ( $\psi_m$ )는 각각 따로 결정되는 것이 아니라 모멘텀 보존 법칙에 좌우된다.

회전 모멘텀 보존 법칙은 다음과 같다.

$$\sum_{i=0}^n (I_i \omega_i + m_i r_i \times \dot{r}_i) = 0 \quad (13)$$

이 식(13)에 식(4)와 식(12)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$I_s \dot{\psi}_s + I_m \dot{\psi}_m = 0 \quad (14)$$

여기서,  $I_s \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 로 인공위성 본체의 관성질량을 나타내고,

$I_m \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 는 매니플레이터의 관성 질량을 나타낸다.

식(14)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{\psi}_s = -I_s^{-1} I_m \dot{\psi}_m \quad (15)$$

식(12)를  $q = (\psi_s, \psi_m)$ 를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{P}_r = J_s \dot{\psi}_s + J_m \dot{\psi}_m \quad (16)$$

여기서,  $J_s$ 는 인공위성 본체의 자코비안이고  $J_m$ 는 매니플레이터의 자코비안이다. 이 식(16)에 식(15)를 대입하면, 다음과 같다.

$$\dot{P}_r = (J_m - J_s I_s^{-1} I_m) \dot{\psi}_m = J^* \dot{\psi}_m \quad (17)$$

여기서,  $J^*$ 는 일반화된 자코비안 행렬(Generalized Jacobian Matrix, GJM)이라고 부른다.

역기구학은 다음과 같이 구한다.

$$\dot{\psi}_m = J^{*-1} \dot{P}_r \quad (18)$$

기구학적 관계식은 먼저 선형, 회전 속도 관계식으로부터 출력공간과 상태공간과의 관계식을 구하였고 다음 선형, 회전 모멘텀 보존 법칙에 의하여 상태공간과 입력공간의 관계식을 구하였다. 위의 두 관계식을 이용하여 출력공간과 입력공간을 연결시켜 주는 GJM를 구하였다.

### 3. 시스템 구성

#### 3.1 하드웨어 구성

우주로봇의 몸체는 그림 2와 같다. 각 로봇 팔에 부착된 2개의 모터는 몸체의 무게중심에 미치는 영향을 줄이기 위해 동일축 상에 고정 시켰고 로봇 몸체는 공압을 이용하여 부상(Floating)이 가능하도록 공압 베어링(Air Bearing) 구조를 갖는다. 공압이 균일하게 분출될 수 있도록 중심에서 바깥쪽으로 갈수록 분출구의 크기를 직경 1~2mm로 변화시켰으며 유량의 손실을 줄이기 위해 바닥면에 5mm 간격의 홈을 내고 그 내부에 공압 분출구가 위치하도록 설계하였다. 또한 공압밸브를 이용하여 몸체의 가장자리에 있는 8개의 분출구를 통해 로봇이 추진할 수 있도록 하였다. 8개의 분출구는 로봇의 가장자리에 2개씩 90도의 간격으로 뚫려있다. 로봇과 타겟 그리고 장애물의 위치를 포착하기 위해 CCD 카메라를 사용하고 거리 측정을 위해 레이저 변위 측정장치(Laser Displacement System, LDS)를 사용하였다. 전

해적인 우주로봇 시스템의 구성은 그림 3과 같다.



그림 2. 우주로봇 몸체  
Fig. 2. Body of space robot

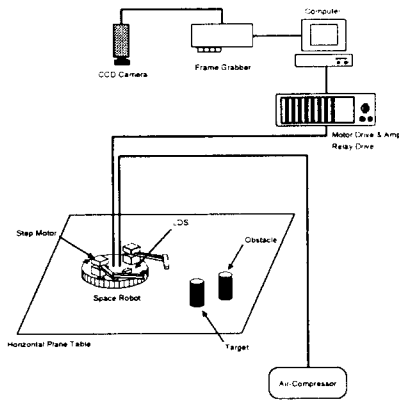


그림 3. 우주로봇 시스템 구성도  
Fig. 3. System configuration of space robot

### 3.2 시뮬레이션을 위한 알고리즘

장애물을 피해 타겟을 잡는 일련의 작업을 위한 알고리즘의 순서도는 그림 4와 같으며 그림 5는 로봇이 갖게되는 상황에서 로봇의 운동을 표현하는 개념도이다. 순서도에 표현된 알고리즘에 대한 설명은 다음과 같다.

- (1) 우주로봇의 중심으로부터, 장애물의 중심까지의 거리 ( $\overline{P_1O}$ )나 타겟의 중심까지의 거리 ( $\overline{P_1T}$ )가 우주로봇의 행동 반경(L)보다 큰지 작은지에 대한 판단문.
- (2) (1)번의 판단문을 만족하는 경우 공압의 추진에 의해 그 거리 ( $\overline{P_1O}$  이나  $\overline{P_1T}$ )가 우주로봇의 행동반경이 되도록 한다. 이때 추진방향은  $\overline{P_1O}$  (혹은  $\overline{P_1T}$ )의 좌우에서 가장 가까운 2개의 공압밸브가 작동됨으로써 결정된다. (그림 4의 Case1 참조)
- (3) (1)을 만족하지 않은 경우(우주로봇과 타겟 혹은 장애물간의 거리가 행동 반경보다 큰 경우는) (2)번과 마찬가지로 공압의 추진에 의해 거리 ( $\overline{P_1O}$  이나  $\overline{P_1T}$ )가 우주로봇의 행동반경이 되도록 한다.
- (4) (2)나 (3)을 실행하여 행동반경이 확보된 후 장애물과 타겟간의 거리와 우주로봇의 반경을 비교하는 판단문.
- (5) (4)를 만족하는 경우는 장애물과 타겟간의 거리가 짧다는 의미로써 이 때에는 우주로봇의 몸체를 회전하여  $\overline{P_1P_2}$  와  $\overline{TP_1}$ 의 방향이 같도록 한다.
- (6) (4)를 만족하지 않는 경우에 우주로봇으로부터, 장애물과 타겟까지의 거리를 비교하는 판단문.
- (7) (5)번에서 회전을 한 후 우주로봇은  $\overline{TP_1}$ 에 수직한 방향으로

로 추진하는데 이는 장애물과 타겟의 거리가 가깝기 때문에 타겟을 잡는데에 어려움이 있으므로 보다 나은 위치로 이동하기 위함이다. (그림 4의 Case2 참조)

(8) 장애물의 중심으로부터 타겟의 중심과 우주로봇의 중심을 잇는 직선  $\overline{TP_1}$ 까지의 거리를 d라고 할 때 그 거리 d와 우주로봇의 반지름간의 길이를 비교하는 판단문.

(9) (7)번을 실행한 후, 타겟을 잡기 쉬운 위치로 이동하기 위한 각도 선정을 위한 판단문. 우주로봇이 이동함에 따라서  $\angle OTP_1$ 에서  $\angle OTP_1$ 이 커지게 되고 이 각도가 기준각도(여기서는  $120^\circ$ 로 놓았다) 보다 크게 되면 판단문을 빠져나온다. (그림 4의 Case2 참조)

(10) 거리 d가 우주로봇의 반경보다 작은 경우에 우주로봇의 몸체를 회전하여  $\overline{P_1P_2}$ 와  $\overline{OP_1}$ 의 방향이 같도록 한다.

(5') (5)번과 같이 우주로봇의 몸체를 회전하여  $\overline{P_1P_2}$ 와  $\overline{TP_1}$ 의 방향이 같도록 한다.

(11) 타겟을 잡기 위해  $\overline{P_1T}$ 의 방향(타겟을 향한 방향)으로 우주로봇을 추진한다. (그림 4의 Case4 참조)

(12) (10)에서 회전된 우주로봇을  $\overline{OP_1}$ 에 수직한 방향으로 추진하여 d를 변화시킨다. (그림 4의 Case3 참조)

(13) (11)에서 타겟에 접근한 우주로봇이 타겟을 잡을 수 있는 영역에 존재하는가를 판단한다. (그림 4의 Case4 참조)

(14) (13)번을 만족하게 되면 거리측정장치(Laser Displacement System, LDS)에 의해 정밀한 거리 측정을 한다.

(15) 타겟을 잡기 위한 완전한 위치를 얻기 위해 타겟과 우주로봇간의 거리를 보정한다.

(16) 양팔을 이용하여 타겟을 잡는다.

이러한 알고리즘에는 다음과 같은 가정이 존재하였다.

- (1) 타겟과 장애물은 원형으로 같은 크기를 갖는다.
- (2) 타겟과 장애물은 초기의 위치에서 움직이지 않는다.
- (3) 타겟과 장애물은 사용자가 지정을 하여 결정한다.
- (4) 우주로봇의 이동은 공압에 의하며 외란은 존재하지 않는다

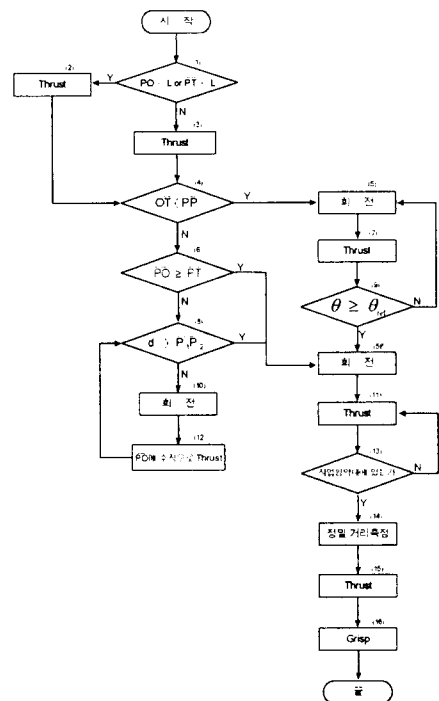


그림 4. 작업을 위한 순서도  
Fig. 4. Flowchart for performance

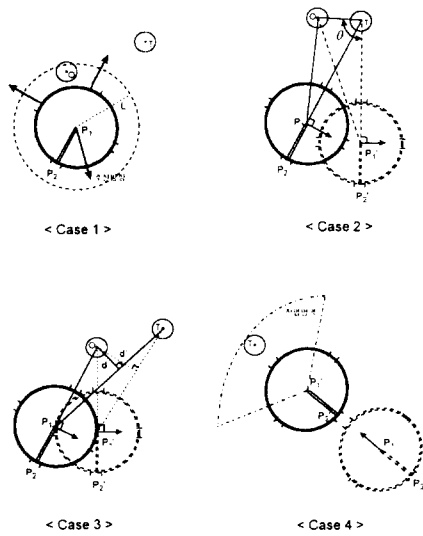


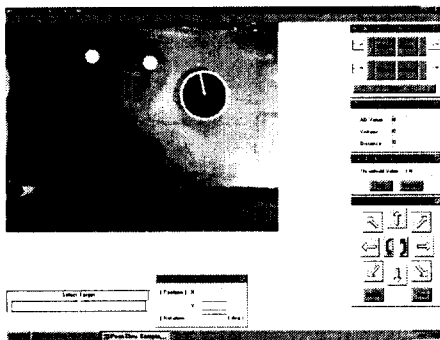
그림 5. 로봇의 운동을 위한 개념도

Fig 5. Concept drawing for the motion of robot

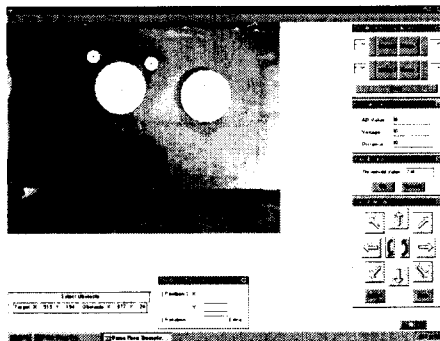
### 3.3 프로그램 실행결과

그림 6은 프로그램을 실행하여, 우주로봇의 자세와 타겟과 장애물의 위치를 비전을 통해 인식하고 장애물을 피해 타겟을 잡기 위한 궤적을 설정한 후 로봇의 이동을 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 여기서는 모형이 사용되었으며 실제 로봇과 같은 크기를 갖는다. (a)는 초기 화면이며 여기서 로봇의 모형과 가까운 위치에 있는 것이 장애물이며 나머지가 타겟이다. (b)는 시뮬레이션 상에서, 장애물을 피해 타겟에 이르는 궤적을 따라 로봇이 이동한 최종 결과를 보여준다.

그림 7은 로봇이 타겟을 잡는 작업을 시뮬레이션한 것이다. (a)는 타겟을 잡기까지의 로봇의 움직임을 보여주며 (b)는 이 때의 팔의 조인트 회전 값을 그래프로 나타낸 것이다.



(a)



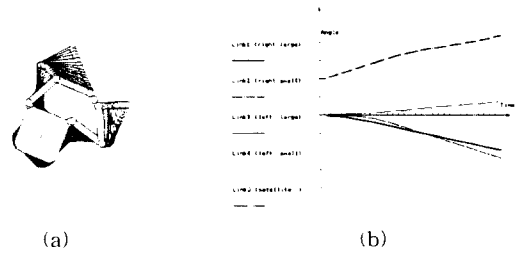
(b)

그림 6. 프로그램의 실행결과

- (a) 초기화면
- (b) 결과화면

Fig 6. Program Result

- (a) Initial Screen
- (b) Result Screen



(a) (b)

그림 7. 시뮬레이션 결과

- (a) 타겟의 그리핑
- (b) 각 조인트값의 결과

Fig. 7 Result of simulation

- (a) Gripping target
- (b) Result of each joint value

## 4. 결론

이 논문에서는 우주공간의 특수한 환경 속에서 요구되는 작업을 수행하는 자율이동 우주로봇의 개발을 위한 알고리즘 개발과 시뮬레이션 및 실험을 소개하였다.

비전을 통해 로봇, 타겟 그리고 장애물의 위치를 파악하고 타겟을 잡는 작업을 수행하기 위한 로봇의 궤적을 설정한 후 이동하는 일련의 과정을 프로그램으로 구현하였다. 또한 무중력상태를 근사적으로 표현하기 위하여 공압으로써 로봇의 부동(Floating)과 이동을 구현하였다.

실험결과는 로봇에 작용하는 외력과 비선형적인 요인들의 복합적인 작용으로 인하여 이상적인 상황 속에서 구현되는 시뮬레이션의 결과와 제대로 일치하지 못하였다. 실제 우주공간처럼 보다 근사적인 환경 속에서 실험이 이루어진다면 오차를 상당히 줄일 수 있을 것이며 앞으로도 이를 위한 연구가 계속 진행되어야 하겠다.

## 참고문헌

- [1]F.Nagashima and Y. Nakamura, "Efficient Computation Scheme for the Kinematics and Inverse Dynamics of a Satellite-Based Manipulator", Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France-May 1992
- [2]S.Agrawal, R.Garimella, and J. Rambhaskar, "Workspace Boundaries of Freefloating Closed-Chain Planar Manipulators", In Proceedings, Applied Mechanisms and Robotics Conference, Cincinnati, OH-Nov. 1991.
- [3]Y.Nakamura and R.Mukherjee, "Nonholonomic Path Planning of Space Robots via a Bidirectional Approach", IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 7, No. 4, pp.500-514,1991