

논문 2005-42SC-5-1

능동카메라기반 이동매니플레이터의 물체위치추정 및 최적동작계획

(Object Position Estimation and Optimal Moving Planning of
Mobile Manipulator based on Active Camera)

진 태 석*, 이 장 명**

(TaeSeok Jin and JangMyung Lee)

요 약

이동로봇과 작업로봇의 직결연결 형태인 이동매니플레이터는 원자로 내부와 같은 위험한 작업환경에서 다양한 일한 처리하기 위해 유용한 시스템이라 할 수 있다. 하부의 이동로봇은 non-holonomic 시스템이고 상부의 작업로봇의 결합으로 인하여 기구학적 잉여자유도를 갖고 있다. 그러나 주행 중 작업공간 확보로 인하여 고정식 매니플레이터보다 더 효율적인 작업이 가능하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 영상정보에 의한 물체인식 및 최적주행을 수행하기 위하여 이동로봇에 장착된 능동카메라에 인식된 영상과 실제 물체간의 기하학적 관계를 이용하여 직교좌표상의 물체의 위치를 추정할 수 있도록 하였다. 두 번째로 시스템의 위치변위 및 영상정보를 이용하여 물체위치를 추정하고 동차행렬을 이용하여 이동매니플레이터의 현 위치와 물체간의 최적경로를 결정하는 방법을 제시하였다. 제시한 방법을 시뮬레이션과 이동매니플레이터를 이용한 실험데이터분석을 통하여 유효성을 제시하였다.

Abstract

A Mobile manipulator - a serial connection of a mobile robot and a task robot - is a very useful system to achieve various tasks in dangerous environment, because it has the higher performance than a fixed base manipulator in regard to the size of it's operational workspace. Unfortunately the use of a mobile robot introduces non-holonomic constraints, and the combination of a mobile robot and a manipulator generally introduces kinematic redundancy. In this paper, first a method for estimating the position of object at the cartesian coordinate system acquired by using the geometrical relationship between the image captured by 2-DOF active camera mounted on mobile robot and real object is proposed. Second, we propose a method to determine a optimal path between current the position of mobile manipulator whose mobile robot is non-holonomic and the position of object estimated by image information through the global displacement of the system in a symbolic way, using homogenous matrices. Then, we compute the corresponding joint parameters to make the desired displacement coincide with the computed symbolic displacement and object is captured through the control of a manipulator. The effectiveness of proposed method is demonstrated by the simulation and real experiment using the mobile manipulator.

Keywords : Mobile manipulator, kinematics, position estimation, active camera, mobile planning

I. 서 론

* 정회원, 동경대학 생산기술연구소
(IIS, The University of Tokyo)

** 정회원, 부산대학교 전자공학과
(Department of Electronics Engineering, Pusan
National University)

접수일자: 2004년12월15일, 수정완료일: 2005년9월2일

최근 산업계의 자동화, 무인화 추세와 더불어 산업현장의 무인창고 시스템이나 물자 운반용으로, 그리고 서비스 로봇으로 청소용이나 경비용, 안내용으로 각 분야

에서 그 활용성과 필요성이 높아지고 있다. 또한 고정된 작업공간을 갖는 고정 매니플레이터에 비해 이동매니플레이터는 작업영역이 자유로울뿐더러, 이동능력에 작업능력을 갖추고 있으므로 그 응용할 수 있는 분야는 매우 다양하게 되었다^[1,2,3].

이동매니플레이터는 이동로봇과 작업로봇이 직렬형태로 결합되어 여러 가지 작업을 수행할 수 있는 로봇을 말하는데 원자로 내부와 같은 극한 작업환경에서의 검사, 고장수리작업이나 해저, 달, 혹성 탐사 등의 작업과 같이 위험한 환경에서의 작업이나 사람이 작업하기 어려운 극한 상황에서 사람을 대신하여 로봇이 작업을 수행하는 경우에 이는 더욱 유용하게 적용 될 수 있다^[4,5]. 이러한 작업을 수행하기 위해 이동능력을 가진 이동로봇과 작업능력을 가진 작업로봇이 결합된 이동매니플레이터 형태의 로봇이 적합하다고 할 수 있다. 이동로봇은 작업이 불가능하고, 작업로봇은 작업공간이 한정되어있으며, 불확실한 환경에 지능적으로 대처하면서 작업을 수행하도록 지각을 위한 센서정보가 필요하다. 이러한 한계점을 극복하고자 본 연구에서는 카메라를 사용하여 미지의 작업공간에 도달하고, 독립된 작업수행능력을 가지고 있는 두 시스템을 직렬로 결합하여 협동제어를 실현하기 위한 이동매니플레이터 시스템을 구성하여 작업영역 밖의 작업도 상호 협조적으로 원활하게 수행될 수 있도록 제어하였다. 그러나, 이동로봇과 작업로봇의 결합에 의해 발생하는 잉여 자유도는 고정식 구조를 가진 작업로봇의 잉여 자유도와는 다르기 때문에 이동로봇에서 발생하는 잉여 자유도 문제를 고려한 이동매니플레이터의 궤적계획에 관한 연구가 필요하다^[6]. 이동매니플레이터의 제어에 관한 연구는 최근에 들어 활발히 이루어졌다. H. Seraji는 이동매니플레이터를 이동로봇과 작업로봇인 두 개의 시스템으로 분리하여 이동로봇의 궤적 계획을 이용해 작업로봇의 위치제어를 수행하였으며^[7], K. Shibata는 이동매니플레이터를 하나의 통합 시스템으로 간주하고 자세제어를 수행하였으며^[8], F.G. Pin은 미리 생성된 궤적을 추종해가는 알고리즘을 제시하였다^[9].

본 논문에서 제안된 이동매니플레이터 시스템은 작업을 직접 수행할 작업로봇과 작업범위를 확장하기 위한 이동로봇으로 구성되어 있으며, 이동로봇의 시스템 구성에서는 각 관절의 제어와 카메라 기구부 제어에 관련된 많은 작업들을 실시간으로 제어하기 위하여 다수개의 제어기들이 네트워크를 통하여 제어를 수행하는 분산제어방식을 채택하였다. CAN(Controller Area

Network) 방식을 이동로봇시스템에 도입하여 주 제어기가 4개의 하위제어기에 네트워크를 통하여 명령을 내리며 하위제어기는 주어진 자세 및 속도명령에 대하여 분산적으로 제어를 수행한다. CAN 방식을 사용하여 각 제어기의 독립성과 처리속도를 증대시키고 로봇의 기능별 확장이 용이하도록 구성되었다^[10].

작업대상 인식은 카메라로 하며 물체를 능동적으로 탐색 및 인식할 수 있도록 Pan/Tilt 2-자유도의 능동구조로 카메라 기구부를 설계하였다. 임의의 위치에 있는 물체를 인식하기 위하여 이동매니플레이터에 부착된 2자유도의 능동카메라에 의해 입력되는 영상데이터와 능동카메라의 기구학적 관계를 이용하여 물체의 공간상의 위치를 구하며, 그 위치에 도달하여 이동매니플레이터가 작업을 수행할 수 있도록 최적의 경로를 생성한다.

제안한 이동매니플레이터의 제어구조와 경로계획 알고리즘의 효율성을 검증하기 위하여 임의의 위치에 있는 목표위치를 인식하고 최적경로 주행을 하여 물체를 내려놓는 작업을 수행하고 그 결과를 분석한다. 결과에서 특히 이동매니플레이터의 최적 경로 및 협동을 통해 작업로봇이 작업영역 밖의 작업에 대해서도 원활하게 작업을 성공적으로 수행할 수 있음을 보인다. 또한 CAN 방식을 이용한 분산제어방식의 도입은 이동로봇운행에 요구되는 많은 제어작업들을 실시간으로 효율성 있게 수행할 수 있음을 보여준다.

본 논문에서는 이동매니플레이터를 구성한 주행을 담당하는 이동로봇의 주행 시스템(Navigation System)에 관하여 연구를 수행하였다. 이동매니플레이터는 어

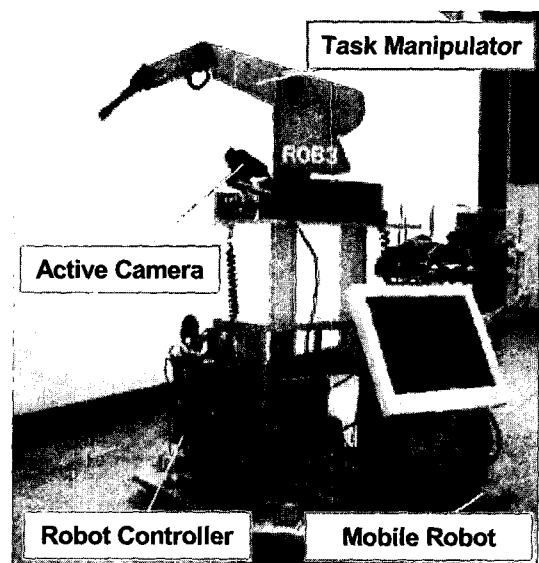


그림 1. 이동매니플레이터 구성
Fig. 1. mobile manipulator configuration.

면 한 장소에 고정되어 작업을 하는 로봇과는 달리 한 지점에서 작업을 수행한 것뿐만이 아니라 다른 장소를 이동하여 작업이 가능하여야 한다. 이러한 이동매니플레이터는 원하는 작업을 원활히 수행하기 위하여 자율적으로 환경을 인식하고 최적 경로주행을 하는 것이 가능하여야 한다.

현재의 위치에서 원하는 목표 지점까지 충돌 없이 자유롭게 이동할 수 있게 하기 위해서는 충돌회피 알고리즘이 필요하고, 효율적인 작업 수행(즉, 원하는 목표점까지의 효과적인 경로를 통하여 이동)을 가능하게 하는 경로계획 알고리즘, 그리고 이러한 경로를 따라 목표점까지 이동할 수 있도록 하는 제어기가 필요하다. 위와 같은 여러 가지의 알고리즘을 통하여 이동로봇의 항법 시스템이 구성된다. 본 논문에서는 자율이동로봇의 항법 시스템을 구성하기 위한 연구를 수행함에 있어 이동로봇의 이동거리를 최소화하는 경로를 보장하는 계획 알고리즘에 보다 큰 비중을 두어 연구가 진행되었으며, 효율적인 경로 생성을 위한 알고리즘으로 동차행렬 기법을 채택하였다.

II. 이동매니플레이터의 구성

1. 이동매니플레이터의 기구학

독립적인 목적으로 설계된 두 개의 로봇을 결합하여 하나의 작업수행을 위하여 각각의 로봇이 동시에 제어되어야 하므로 전체시스템의 기구학을 해석하여 이동매니플레이터가 제어되어야 한다. 이동로봇은 non-holonomic 시스템이고, 작업로봇은 holonomic 시스템이므로 이동매니플레이터의 기구학은 속도기구학을 통해 이동로봇과 작업로봇을 결합한다^[2]. 그림 2에서는 제작한 이동매니플레이터의 모델링을 나타내었다^[3]. 작업로봇의 조인트 변수를 $q_t = q_{t1} \ q_{t2} \ q_{t3} \ q_{t4} \ q_{t5}^T$, 이동로봇의 조인트 변수를 $q_m = q_{m6} \ q_{m7} \ q_{m8} \ q_{m9}^T$ 라 정의하면, 이동매니플레이터의 시스템 변수는 식 (2)과 같다.

$$q = \begin{bmatrix} q_t \\ q_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$q = [q_{t1} \ q_{t2} \ q_{t3} \ q_{t4} \ q_{t5} \ q_{m6} \ q_{m7} \ q_{m8} \ q_{m9}]^T \quad (2)$$

이동로봇의 각 축에 대한 조인트 변수에 의해서 형성되는 이동로봇의 end-effector의 위치(작업로봇의 베이

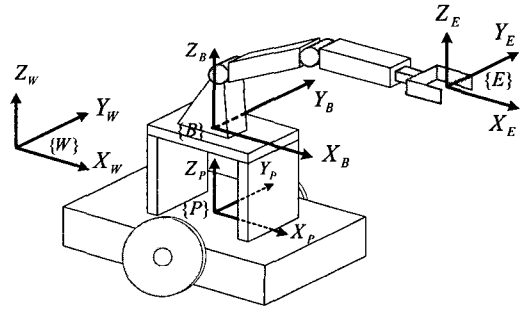


그림 2. 이동매니플레이터의 기구학 해석
Fig. 2. Kinematic analysis of the mobile manipulator.

스 위치)인 $P_B = p_x \ p_y \ p_z \ \theta_m^T$ 를 프레임 {B}으로 설정하였다. ${}^W P_B$ 은 프레임 {W}에서 프레임 {B}까지의 위치벡터이다. 이동매니플레이터의 기구학은 우선 이동로봇은 3축이므로 조인트 변수 $\dot{\theta}_m$ 은 바닥 면의 고정 프레임에 대한 직교좌표 공간상에서 이동로봇의 선, 각 속도는 식 (3)과 같이 나타난다.

$${}^W \dot{P}_B = \begin{bmatrix} {}^W V_B \\ {}^W w_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^W J_{B,v} \\ {}^W J_{B,w} \end{bmatrix} \dot{q}_m = {}^W J_{Bm} \dot{q}_m \quad (3)$$

그리고 작업로봇의 조인트 변수 $\dot{\theta}_t$ 의 Jacobian을 프레임 {B}의 기준으로 기술해 보면 식 (4)과 같이 나타난다.

$${}^B \dot{P}_E = \begin{bmatrix} {}^B V_E \\ {}^B w_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B J_{E,v} \\ {}^B J_{E,w} \end{bmatrix} \dot{q}_t = {}^B J_{Et} \dot{q}_t \quad (4)$$

따라서 각 로봇의 Jacobian이 ${}^W J_B$, ${}^B J_E$ 로 주어질 때, 이동매니플레이터의 Jacobian은 식 (5)과 같다.

$$\begin{aligned} {}^W \dot{P}_E &= \begin{bmatrix} {}^W V_E \\ {}^W w_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^W w_B + {}^W R_B {}^B V_E \\ {}^W R_B {}^B w_E \end{bmatrix} \\ &= [{}^W J_B \quad {}^W J_E] \begin{bmatrix} \dot{q}_m \\ \dot{q}_t \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

${}^W R_B$ 은 {W}에서 작업로봇의 {B}까지의 회전변환행렬이다. 즉, 식 (2)~식 (5)에 의해 end-effector의 운동은 이동로봇과 작업로봇이 함께 관여함을 알 수 있다^[4].

2. 이동매니플레이터의 제어 구조

그림 3은 본 연구에서 개발한 로봇의 전체 시스템 구성을 나타낸 것이다. 전체적으로 6개의 제어기가 있으며 이들은 하나의 상위제어기와 5개의 하위제어기로 구분된다. 상위제어기는 PC를 사용하여 여기에 영상정보 획득을 위한 USB-TO-PCI 카드가 PCI버스를 통해 인

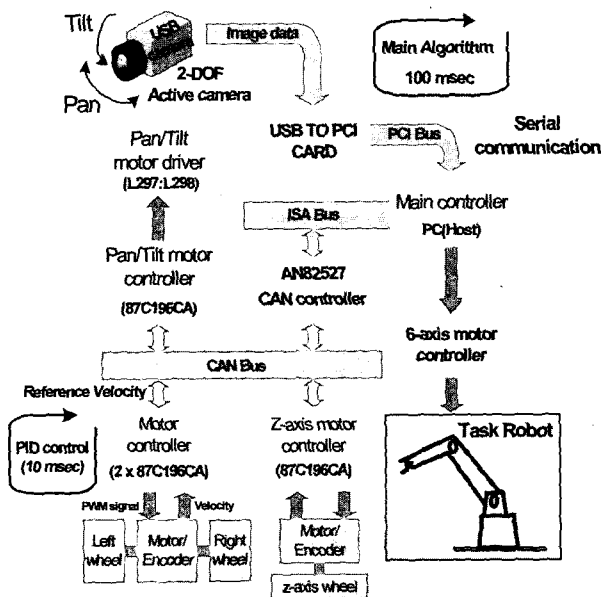


그림 3. 이동매니플레이터의 제어 구성도
Fig. 3. Overall system of mobile manipulator.

터페이스 되며 또한 이동로봇의 3축과 능동카메라의 Pan/Tilt 제어가 네트워크를 위한 4개의 CAN 컨트롤러 카드와 상위제어기(PC)와의 CAN통신을 위한 ISA 인터페이스 카드가 장착되어 있다. 그리고 작업로봇을 제어하기 위한 8051 컨트롤러가 상위제어기와 직렬통신을 하도록 설계되어져 있다. 상위제어기는 100msec의 주기로 영상정보와 로봇 상태정보의 획득, 영상처리 및 로봇동작 계획과 하위제어기로의 명령전송 처리과정이 이루어진다.

능동카메라의 제어기는 ISA 인터페이스 카드의 병렬 포트를 통하여 상위제어기가 전송하는 자세명령을 받는다. Pan/Tilt는 하나의 제어기에서 다른 ID가 할당되어져 각 축이 동시에 제어되며 가감속 기능과 Holding 기능을 구현하여 고속 정밀제어를 실현하였다. 각 바퀴의 속도를 제어하는 하위제어기 모듈은 상위제어기로부터 네트워크를 통해 받은 속도명령에 추종하기 위하여 10msec의 제어주기로 PID제어를 수행한다. PID제어기는 로봇의 운동으로 인한 동역학 성분에 강인한 특성을 나타내도록 설계되었다. 작업로봇의 제어기는 RS-232C 직렬통신을 통해 하위제어기에 각각의 관절값을 상위제어기에 의해 전송받는다. 하위제어기 모듈은 각 축의 위치를 추종하기 위하여 PD제어를 수행한다.

III. 카메라 시스템 및 물체 위치 추정

1. 카메라 모델링 및 기구학 해석

본 논문에서 사용한 능동카메라의 기구부는 두 개의 관절을 사용하여 2 자유도의 Pan/Tilt 동작이 가능하도록 구성되었다. 각 관절의 구동기로는 스텝모터를 사용하였으며 Pan/Tilt 동작은 0.9[deg/pulse] 제어된다. 영상정보에서 물체의 거리를 추정하기 위해서는 기저(base) 좌표계에 대한 카메라의 위치 및 방향에 대한 정보가 필요하며 따라서 각 관절의 각도에 대한 기저 좌표계와 마지막 좌표계의 관계를 나타내는 순방향 기구학 해석이 선행되어야 한다.

순방향 기구학 해석을 위하여 그림 4와 같이 D-H법에 의해 좌표축을 설정한다. 여기서 α 는 Tilt 각도를 나타내며, β 는 Pan 각도를 나타낸다. 이로부터 기저 좌표계와 마지막 좌표계 사이의 변환관계를 나타내는 동차행렬 식 (6)을 얻게 된다.

$${}^0H_4 = \begin{bmatrix} c(\alpha)c(\beta) & -c(\alpha)s(\beta) & s(\alpha) & l_2s(\alpha) + l_3c(\alpha)c(\beta) + d_1 \\ s(\alpha)c(\beta) & s(\alpha)s(\beta) & c(\alpha) & l_2c(\alpha) + l_3s(\alpha)c(\beta) \\ -s(\alpha)c(\beta) & 0 & 0 & l_1 + l_2c(\alpha) - l_3s(\alpha)c(\beta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

동차행렬의 변위벡터는 능동카메라 기구부의 관절각 α, β 에 대한 기준 좌표계에서의 카메라의 위치로 x, y, z 각 축에 대하여 식 (7)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} x_{ccd} &= l_2 \sin(\alpha) + l_3 \cos(\alpha) \cos(\beta) \\ y_{ccd} &= l_3 \sin(\beta) \\ z_{ccd} &= l_1 + l_2 \cos(\alpha) - l_3 \sin(\alpha) \cos(\beta) \end{aligned} \quad (7)$$

동차행렬의 자세벡터는 기준좌표계에 대한 카메라의 Roll, Pitch, Yaw 각에 대한 동차행렬의 회전변환행렬

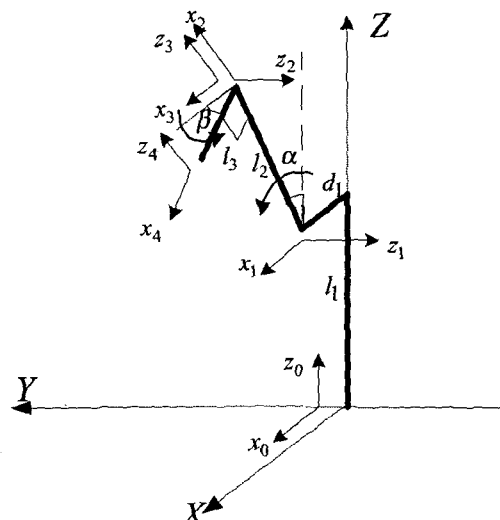


그림 4. 능동카메라 기구부의 좌표계
Fig. 4. Coordinates of the active camera actuator.

이며 각 방향성분에 대하여 Roll각 θ_R , Pitch각 θ_P , Yaw각 θ_Y 는 식 (8)과 같다.

$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(\alpha)\cos(\beta)}{\sqrt{\cos^2(\alpha)\cos^2(\beta) + \sin^2(\beta)}}\right)$$

$$\theta_R = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(\alpha)\sin(\beta)}{\sqrt{\cos^2(\alpha)\sin^2(\beta) + \cos^2(\beta)}}\right) \quad (8)$$

$$\theta_Y = \beta$$

2. 영상정보로부터 물체 위치 추정 알고리즘

영상정보에서 실제물체의 위치를 추정하기 위하여 핀 홀 카메라 모델을 사용하였다^[11]. 핀 홀 카메라 모델에서는 그림 5와 같이 모든 영상이 하나의 점으로 모이며 영상센서의 각 셀들은 중심과의 각으로 모델링 된다.

식 (9)는 핀 홀 카메라 모델로부터 임의의 한 픽셀과 그 이웃하는 픽셀에 대한 중심과의 각도를 표현한 것이다. k pixel 과 중심과의 각도는 식(9)와 같이 표현된다.

$$\theta_k = \tan^{-1}\left(\frac{k}{l}\right) \quad (9)$$

그리고, $k+1$ pixel 과 중심과의 각도는 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\theta_{k+1} = \tan^{-1}\left(\frac{k+1}{l}\right) \quad (10)$$

위의 두 식으로부터 각 pixel 사이와 중심점과의 각도는 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\theta = \tan^{-1}\left(\frac{k+1}{l}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{k}{l}\right), \left[\frac{k}{l} < 1\right]$$

$$\approx \frac{k+1}{l} - \frac{k}{l} = \frac{1}{l}, \left[l = \frac{P_x}{2} \cot\left(\frac{\theta_{rx}}{2}\right)\right] \quad (11)$$

$$= \frac{1}{\frac{P_x}{2} \cot\left(\frac{\theta_{rx}}{2}\right)} \approx \frac{2}{P_x} \cdot \frac{\theta_{rx}}{2} = \frac{\theta_{rx}}{P_x}$$

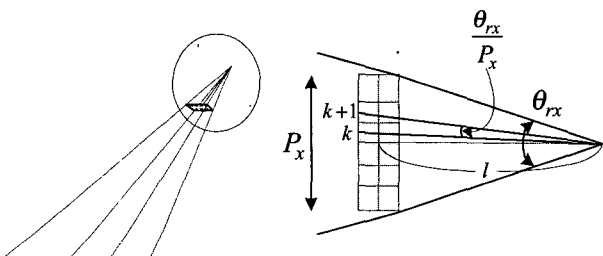
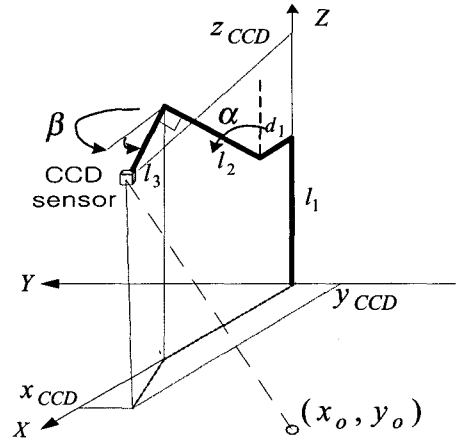
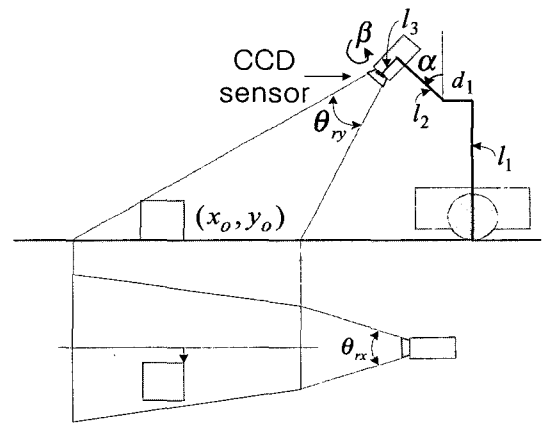


그림 5. 핀 홀 카메라 모델
Fig. 5. Pin-hole camera model.

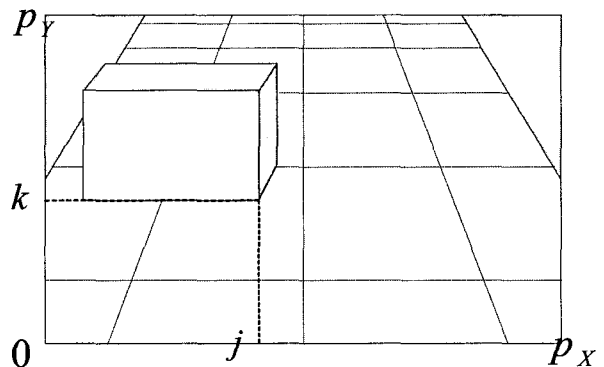
핀 홀 카메라 모델로부터 그림 6(a)와 같은 능동카메라 자세에서 영상정보와 실제환경의 관계를 구한다. 그림 6(b)에서 θ_{RX} 는 카메라의 X 방향에 대한 시각영역의 각이며 θ_{RY} 는 Y 방향에 대한 각을 나타낸다. 그림 6(c)



(a)



(b)



(c)

그림 6. 영상정보로부터 거리정보의 추정 (a)능동카메라 구성 (b) 위치추정 (c) CCD카메라의 영상
Fig. 6. Estimation of position information from CCD image (a) Active camera configuration (b) Position estimation (c) Image of CCD camera.

는 (b)의 상황에서 카메라에 입력된 영상이며 P_x, P_y 는 X, Y 방향 Pixel수 j, k 는 거리를 추정하고자 하는 Pixel의 x, y 방향의 좌표이다. 능동카메라의 자세에 의해 실제 영상은 식 (8)의 Roll 각에 의해 θ_R 만큼 회전된 영상이므로 식 (12)와 같이 회전 변환하여 식 (13)과 같이 공간상 거리 \hat{r}_o 와 방향 $\hat{\theta}_o$ 를 추정할 수 있다. 여기에서 기저 좌표계에 대한 x 방향에 대한 위치와 y 방향에 대한 위치는 식 (14)로 추정된다^[12].

$$\begin{bmatrix} j \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_R) & -\sin(\theta_R) \\ \sin(\theta_R) & \cos(\theta_R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j - \frac{P_x}{2} \\ k - \frac{P_y}{2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\hat{r}_o = z_{ccd} \cdot \cot\left(\theta_T - \frac{k'}{p_y}\theta_{ry}\right) \quad (13)$$

$$\hat{\theta}_o = \frac{j'}{p_x}\theta_{rx}$$

$$\hat{x}_o = r_{ccd} \cos(\beta) + \hat{r}_o \cos(\beta + \hat{\theta}_o)$$

$$\hat{y}_o = r_{ccd} \sin(\beta) + \hat{r}_o \sin(\beta + \hat{\theta}_o) \quad (14)$$

$$(r_{ccd} = \sqrt{x_{ccd}^2 + y_{ccd}^2})$$

IV. 이동매니플레이터의 최적경로 계획

1. 최적 경로 생성을 위한 좌표 변환

이동로봇의 초기 위치와 작업로봇의 초기 자세는 이미 알려져 있는 정보다. 문제는 이동매니플레이터에 대해 수용 가능한 일련의 연속적인 자세를 계산함으로써 초기 위치를 최종위치에 도달하도록 하는 것이다^[13]. 2장에서 설정한 이동매니플레이터의 시스템 좌표계에 따라 기저 프레임 F에 대한 이동로봇의 초기 위치는 기저 프레임 F와 초기 이동로봇의 베이스 프레임 M_V 사이의 변환행렬 ${}^F D_{V(omit)}$ 에 의해 기술되어질 수 있다. 그림 7에서 보듯이, 두 연속적인 이동로봇의 베이스 프레임 $M_{V(t)}$ 와 $M_{V(t+dt)}$ 사이의 논홀로노믹 운동은 변환행렬 ${}^V D_{V(t)}$ 에 의해 기술되어질 수 있다. 그리고 ${}^V D_{V(t)}$ 는 동차행렬(homogeneous matrices)를 사용해서 v (이동로봇의 속도)와 S (이동로봇의 곡률)의 함수로 다시 표현되어 질 수 있다.

임의의 시간 t 에서 이동로봇의 베이스 프레임 $M_{V(t)}$

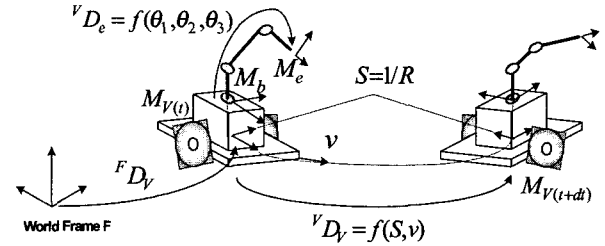


그림 7. 동작 계획에 관한 시스템 변수

Fig. 7. System variables for motion generation.

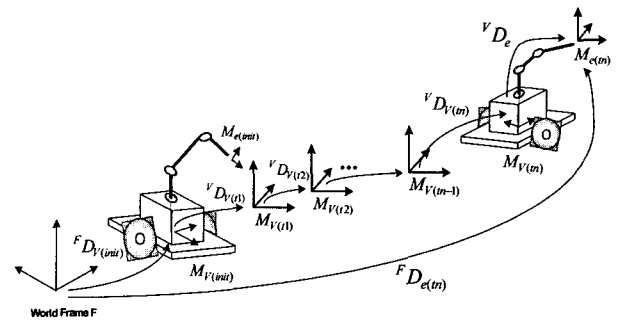


그림 8. 초기 위치와 최종 위치사이의 변환관계

Fig. 8. Transformation between initial and final position.

에 대한 작업로봇의 end-effector의 위치는 $M_{V(t)}$ 와 $M_{e(t)}$ 사이의 변환행렬 ${}^V D_{e(t)}$ 에 의해 표현되어질 수 있다. 이 변환행렬 ${}^V D_{e(t)}$ 는 관절변수 $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$ 의 함수로써 기술된다.

그래서 임의의 시간 $t+dt$ 에서의 end-effector의 기준 프레임 $M_{e(t+dt)}$ 의 위치는 이동로봇의 베이스 프레임 $M_{V(t)}$ 의 이전의 위치와 작업로봇의 현재 관절변수 값 $\theta = [\theta_1(t+dt), \theta_2(t+dt), \theta_3(t+dt)]^T$ 에 의하여 결정되어 진다. 그러므로 n 번째 이동후의 기저 프레임에 대한 end-effector의 위치는 변환행렬 ${}^F D_{e(tn)}$ 에 의해 주어지고, 식 (15)과 같이 표현되어질 수 있다.

$${}^F D_{e(tn)} = {}^F D_{V(omit)} \left(\prod_{i=1}^n {}^V D_{V(i)} \right) D_{e(tn)} \quad (15)$$

그림 8은 기저 좌표계와 end-effector 좌표계 사이의 변환 관계를 나타내는 변위 행렬 ${}^F D_{e(tn)}$ 를 구하는 과정을 보여주고 있다.

2. 동차 행렬을 이용한 최적 경로 생성

앞에서 기술한 변환관계를 이용하여 이동매니플레이터의 최적 경로 생성을 위한 구체적인 방법을 제시하고

자 한다^[14,15]. 동차행렬을 이용한 전역 좌표계에 대한 초기 변위 행렬 ${}^F D_{V(init)}$ 은 식 (16)과 같이 표현된다.

$${}^F D_{V(init)} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 & x_{Vinit} \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 & y_{Vinit} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

그리고 각 구간에서의 변위 행렬 ${}^V D_{V(ti)}$ 는 식 (17)으로 표현할 수 있다.

$${}^{i-1} D_{V_i} = \begin{bmatrix} \cos(d\psi_{V_i}) & -\sin(d\psi_{V_i}) & 0 & dx_{V_i} \\ \sin(d\psi_{V_i}) & \cos(d\psi_{V_i}) & 0 & dy_{V_i} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서, 이동로봇이 곡선 방향으로 진행된다면, 이동로봇의 위치 및 방향에 대한 변화량을 나타내는 $d\psi_{V_i}$, dx_{V_i} , dy_{V_i} 는 식 (18)과 같이 표현되고, 직선 방향으로 진행된다면, 식 (19)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} d\psi_{V_i} &= S_i \cdot v_i \cdot dt \\ dx_{V_i} &= R_i \cdot \sin(d\psi_{V_i}) \\ dy_{V_i} &= R_i \cdot (1 - \cos(d\psi_{V_i})) \\ d\psi_{V_i} &= 0 \\ dx_{V_i} &= v_i \cdot dt \\ dy_{V_i} &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} dx_{V_i} &= v_i \cdot dt \\ dy_{V_i} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

만약, $d\psi_{V_i}$ 가 충분히 작다면 식 (18)은 식 (20)을 적용해서 식 (21)으로 근사화 시킬 수 있다. 본 논문에서는 식 (17)을 표현하는데 있어서 식 (21)의 선형화된 모델을 사용한다.

$$\sin(d\psi_{V_i}) = d\psi_{V_i}, \cos(d\psi_{V_i}) = 1 - \frac{d\psi_{V_i}^2}{2} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} dx_{V_i} &= v_i \cdot dt \\ dy_{V_i} &= \frac{S_i \cdot (v_i \cdot dt)^2}{2} \\ d\psi_{V_i} &= S_i \cdot v_i \cdot dt \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, (S_i, v_i) 는 각 구간에서의 변환행렬 ${}^V D_{V(ti)}$ 에서 파라미터로 쓰이는 곡률과 속도를 뜻한다. 그러므로 식 (15)에서 나타낸 바와 같이 전체변위를 나타내는 변환행렬 ${}^F D_{e(tn)}$ 는 관절 파라미터 $\{(S_i)_{i=1..n}, (v_i)_{i=1..n}, (\theta_i)_{i=1..3}\}$ 의 함수로 표현 가능해진다. 한

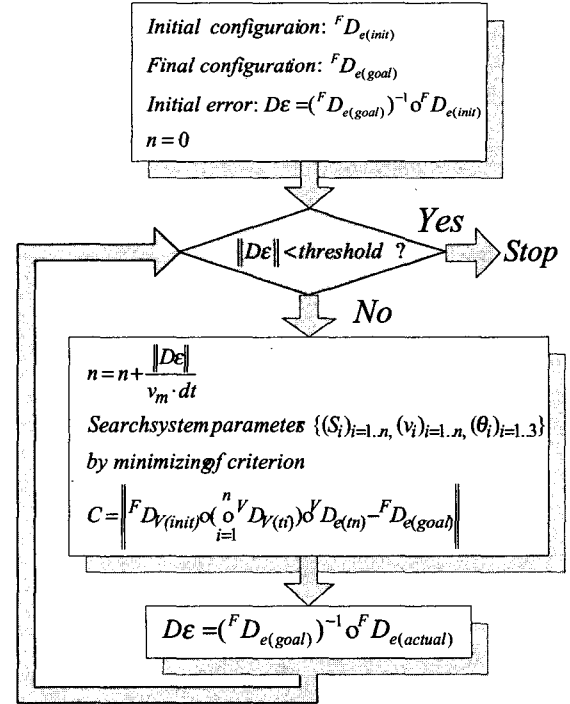


그림 9. 최적 경로 생성 알고리즘
Fig. 9. Implemented algorithm for optimal path.

편, 기저 프레임 F에 대한 end-effector의 목적위치는 변위행렬 ${}^F D_{e(des)}$ 에 의해 기술되어진다. 그리고 실제 전체변위를 나타내는 ${}^F D_{e(tn)}$ 와 원하는 전체변위를 나타내는 ${}^F D_{e(des)}$ 를 일치시키기 위해 $\{(S_i)_{i=1..n}, (v_i)_{i=1..n}, (\theta_i)_{i=1..3}\}$ 에 대한 $2n+3$ 개의 관절 변수가 계산되어야 한다. 그림 9는 본 논문에서 제시하고 있는 최적 경로 생성에 적용되는 알고리즘을 보여주고 있다.

V. 시뮬레이션 및 실험

1. 영상정보를 이용한 위치추정 알고리즘

본 논문에서 제시한 영상정보와 카메라의 기구학적 관계를 이용한 거리추정의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 시뮬레이션은 능동카메라의 자세에 따라 1m 격자의 바닥이 입력되는 영상을 논문에서 제시한 기구학적 관계로 나타내었다. 그림 10은 능동카메라 Tilt 각 $\alpha=14.4^\circ$, Pan 각 $\beta=24.3^\circ$ 의 자세에서 실험한 결과이다. 그림 10은 복도에 상자의 앞면이 이동매니플레이터의 중심으로부터 III장에서 설정한 좌표계에 따라 $x=3.85m$, $y=0.5m$ 에 놓이게 한 다음, 앞서 설정한 능동 카메라 자세에서 실제 입력 영상 및 III장에서 제시한 알고리즘에 의해 처리되어진 영상과

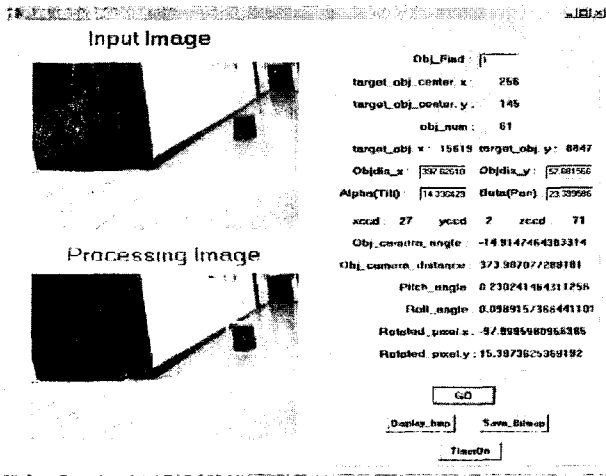


그림 10. 물체 위치 추정($\alpha=14.40$, $\beta=24.30$)
 Fig. 10. Estimation of object position($\alpha=14.40$, $\beta=24.30$).

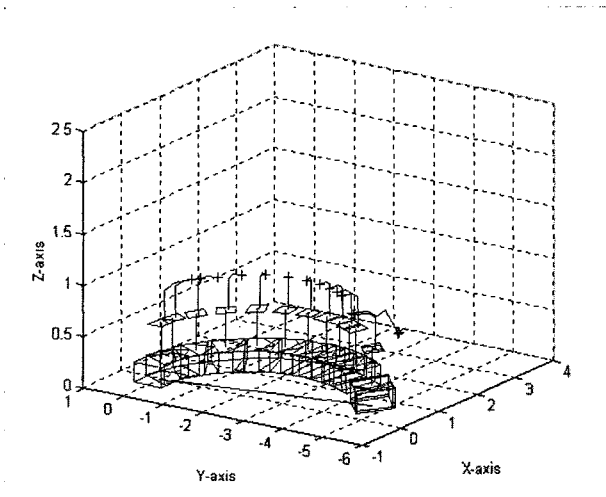


그림 11. 동차행렬을 이용한 경로 생성
 Fig. 11. Path generation using homogeneous matrix.

그에 따른 데이터를 보여주고 있다. 실험에서 볼 수 있듯이 실제 카메라 자세에 의한 영상정보와 기구학적 관계를 통해 거리정보를 추정함으로써 본 논문에서 제시한 알고리즘에 대한 타당성을 보였다.

2. 동차행렬을 이용한 최적 경로 생성

IV장에서 제시한 이동매니플레이터의 최적 경로 생성 알고리즘을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 이동물체의 초기 위치와 방향은 $(0m, 0m, 0.55m, 0^\circ)$ 이고, 작업로봇의 초기 자세는 $(-60^\circ, 20^\circ, -15^\circ)$ 로 두고, 작업로봇의 end-effector의 목표위치는 $(1m, -5m, 0.7m)$ 으로 설정하였으며, 이동로봇의 평균이동속도는 $2m/s$ 로 설정하였다. 그림 11은 초기 위치에서 출발하여 목표 위치와

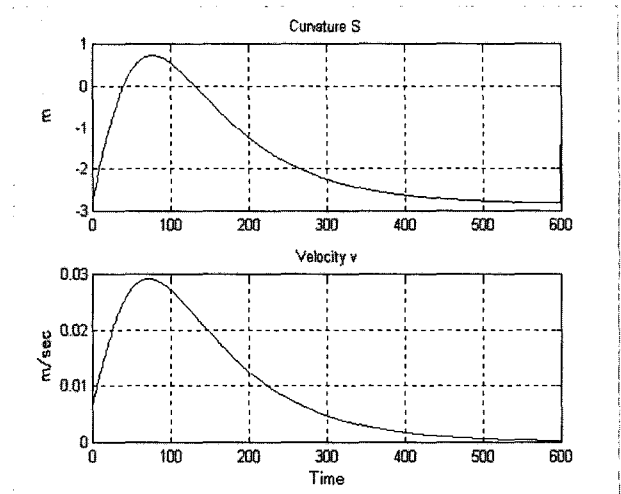


그림 12. 각 구간에서의 곡률과 선형속도
 Fig. 12. Curvature and linear velocity in each time.

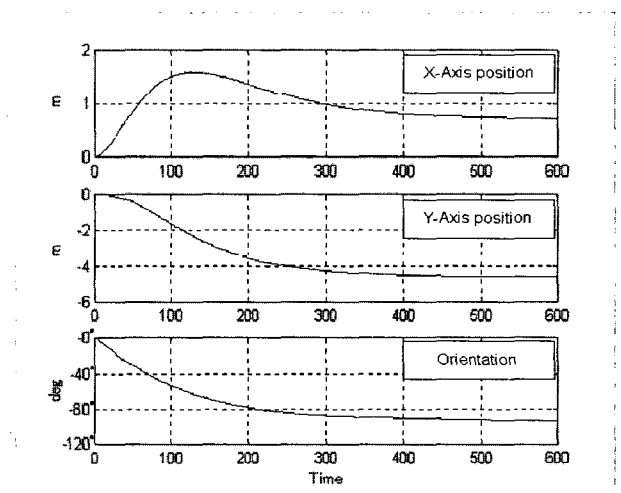


그림 13. 이동로봇의 위치 및 방향
 Fig. 13. Position and orientation of mobile robot.

의 에러를 계산하고 그다음, IV장에서 제시한 비용함수 C를 최소화시키는 시스템 파라미터인 곡률 S와 속도 v에 의해 생성되는 최적 경로를 주행하면서 목표 위치에 접근해 가는 시뮬레이션 결과를 3D로 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과에 의한 최종 위치는 $(0.9451m, -5.148m, 0.7m)$ 이다. 본 시뮬레이션에서 발생한 오차의 원인은 최소화과정이 근사적 방법에 의한 것이고, 최소 에러에 대한 한계(threshold) 값의 설정에 기인한 것이므로 향후연구에서 개선되어야 것으로 사료된다.

그림 12는 각 구간에서의 곡률과 속도의 변화를 보여주고 있다. 그림 13은 이동로봇의 주행에 따른 위치와 방향을 나타낸 것으로 약 400샘플 시간 후에 이동매니플레이터가 목표위치로 수렴하는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 제시한 알고리즘에 대한 실험을 다음과

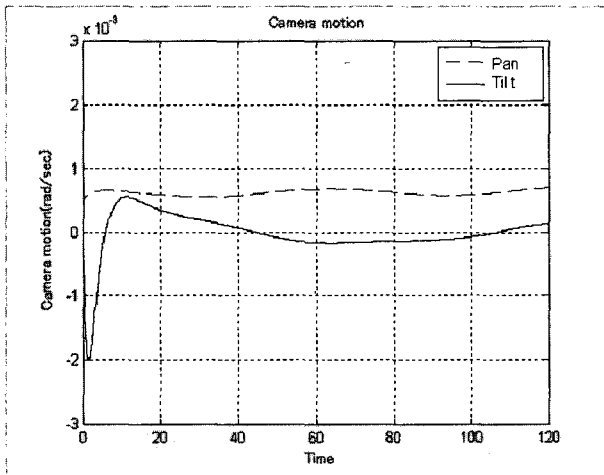


그림 14. 목표 물체의 추종시의 카메라 동작
Fig. 14. Camera motion for finding a goal position.

같이 설정하여 실행하였다. 장애물이 없는 공간에서 PURL-II를 이용하여 초기위치에서 영상정보를 이용하여 상자의 위치를 추정 할 수 있도록 하였는데, 이 때 로봇이 목표물체에 대한 위치추종에 대한 카메라 동작은 그림 14에서 보여주고 있다.

논문에서 제시한 방법으로 이동매니퓰레이터가 최적의 경로로 목표위치에 도달하여 상자에 물체를 내려놓는 실험을 수행하였다. 이동매니퓰레이터의 End-effector의 초기 위치를 $X_i = (0.15m, 0.3m, 1m)$ 로 설정하였으며 목표위치는 $X_d = (5m, 5m, 0.55m)$ 로 설정하고 이동매니퓰레이터의 초기위치와 목표위치를 각각 $(0m, 0m, 450)$, $(4.85m, 4.7m, 00)$ 으로 설정하여 실험하였다. 실험결과로 End-effector의 위치는 $X_E = (4.95m, 4.9m, 0.55m)$ 로 x방향으로 0.05m, y방향으로 0.5m 오차가 발생하였고 그림 15와 같이 이동로봇의 위치 및 방향 오차는 목표위치까지의 오차가 각각 0에 가깝게 접근하는 알 수 있다.

그림 16은 물체를 목표지점에 놓는 실험결과를 보여주고 있다. 여기서, 그림 16(1)은 물체를 옮겨야 할 목표위치를 찾는 동작을 나타내며 (2)~(4)는 찾은 목표위치에 접근하여 잡고 있는 물체를 상자에 놓기 위한 최적 자세를 보여주고 있다. (5)~(6)은 목표위치에 이동하여 물체를 내려놓고 초기 자세로 되돌아가는 동작을 보여주고 있다.

본 실험 결과에서 목표위치를 찾는 작업, 최적경로 주행 그리고 목표위치에 물체를 놓는 작업들에 대해서 상위제어기의 명령에 대한 하위제어기들의 제어 수행과 카메라의 정보와 기구부 자세를 이용한 위치추정 및 최

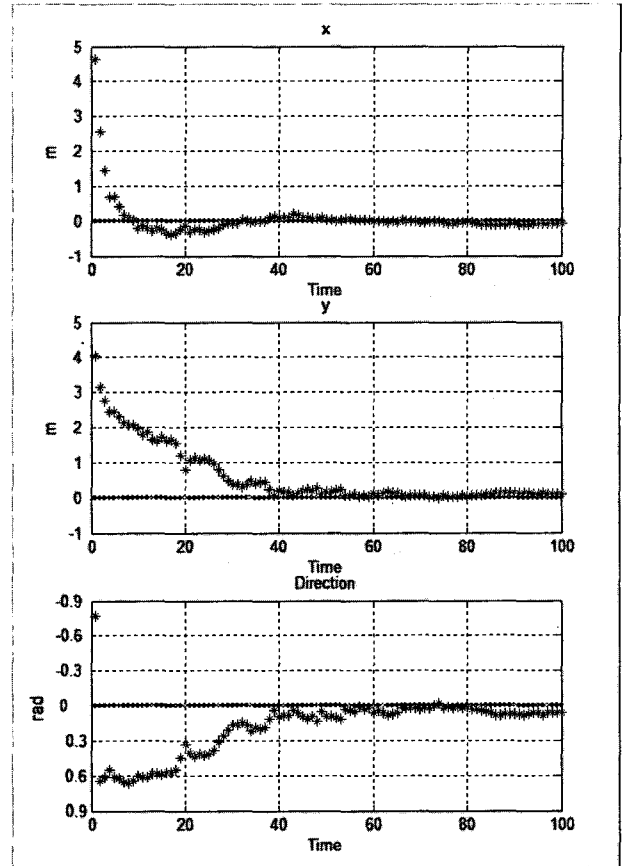


그림 15. 이동매니퓰레이터의 위치 및 방향
Fig. 15. Position and direction of mobile manipulator.

적의 경로로 주행하는 이동매니퓰레이터의 특정한 작업 수행이 원활하게 이루어졌음이 확인 할 수 있었다. 시뮬레이션 결과와 실험에서 발생하는 결과는 실험공간의 바닥면에 따른 이동로봇의 슬립현상과 이동로봇의 위치 오차와 위치 추정을 위한 카메라 기구부의 파라미터에 대한 불확실성에 기인한 것으로 보인다. 따라서 이러한 슬립에 따른 오차와 파라미터에 대한 불확실성을 보정하는 연구가 추가로 진행되어야 될 것으로 사료된다.

기존의 알고리즘을 이용한 경로계획은 초기의 오프라인(off-line)계산 과정을 거쳐 경로를 작성하고, 유전 연산을 완전히 끝낸 다음에 생성된 경로를 추종하는 방법을 취함으로써 환경에 대한 완전한 정보를 가지고 있거나 또는 작업환경을 탐색하여야 했으며, 경로를 추종하는 도중 예기치 못한 장애물 등을 만났을 경우 장애물을 발견한 지점에서 다시 연산을 하여 경로를 재 설정해야 하고, 그 동안 이동로봇은 멈춰서 경로가 재생될 때까지 기다려야 한다. 반면에, 본 논문에서는 고정된 길이를 갖는 유전자형을 제안하여 사용함으로써 유전연산을 간단히 하여 관절변수의 최소화와 동차행렬

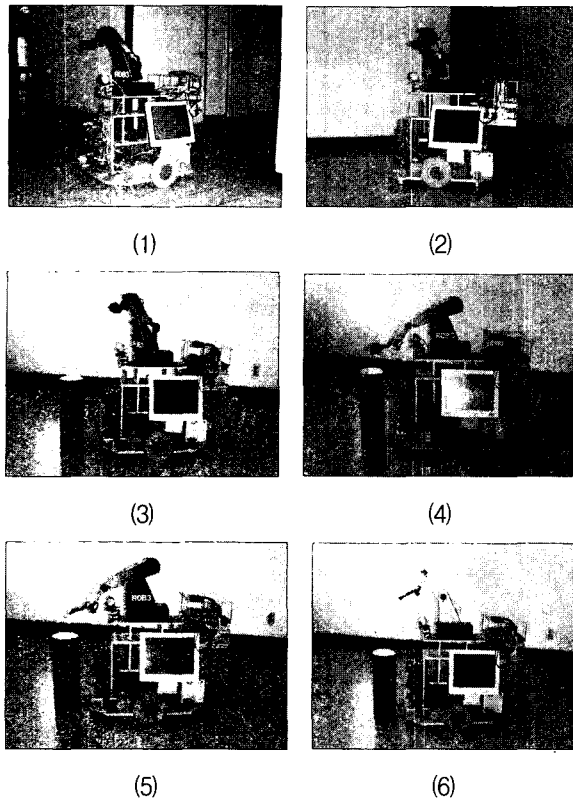


그림 16. 이동매니플레이터의 작업 수행 결과
Fig. 16. Experiment result for task performance.

연산의 시간을 줄임으로서, 이동매니플레이터가 이동하면서 실시간으로 경로계획이 가능하게 함으로서 환경에 대한 불확실한 정보를 가질 경우에도 바로 대처할 수 있어 위와 같은 문제를 해결할 수 있었다. 작업환경에 대한 자세한 정보를 가지고 있지 않기 때문에 항상 계획된 경로가 최단경로가 되는 것은 아니지만 효율적인 최적의 경로계획이 가능하고 획득된 작업환경의 바탕으로 본 알고리즘을 적용한 경우 보다 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 영상정보를 기반으로 한 이동매니플레이터의 물체추정 및 경로생성에 관한 연구로서 이동매니플레이터가 임의의 위치에 있는 물체를 포획하여 목표위치까지 최적의 경로로 주행하여 물체를 내려놓는 작업수행을 제시하였다. 이를 위한 방법으로 능동카메라의 자세와 기하학적인 영상정보로부터 물체위치를 추정하고 실제 환경과의 맵핑관계를 이용하여 대상물체의 공간상의 위치를 추정하였으며 좌표변환에 의한 동차행렬을 이용하여 이동로봇과 작업로봇을 두 개의 독립적

인 시스템으로 간주하지 않고, 하나의 시스템으로 간주하여 해석하였다. 그리고 작업로봇의 작업공간을 벗어난 추정된 위치에 도달하여 작업을 수행하기 위하여 매 제어주기마다 목표와 속도의 최적값에 따른 최적의 경로를 생성 및 주행하여 목표위치에서 작업로봇의 제약성을 극복시킴으로써 특정한 작업을 수행할 수 있었음을 시뮬레이션과 실험을 통해 보여 주었다. 한편, 이동매니플레이터의 시스템 구성에서는 각 관절의 제어와 카메라 기구부 제어에 관련된 많은 작업들을 실시간으로 제어하기 위하여 다수개의 제어기들이 네트워크를 통하여 제어를 수행하는 분산제어 방식을 채택하여 제어효율을 올릴 수 있었다.

향후 연구로써 이동로봇의 속도제어에 있어서의 위치오차의 보정을 위한 외부센서를 이용한 정확한 위치제어와 카메라에 의한 영상정보에서 조명의 영향에 대한 강인한 이미지 처리문제, 그리고 실험결과에서 언급한 위치 추정을 위한 카메라 기구부 파라미터 및 불확실성에 대한 강인성 문제에 관한 연구가 계속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] W. F. Carriker, P. K. Khosla and B. H. Krogh, "Path planning for mobile manipulators for multiple task execution," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 7 no. 3, pp. 403-408, 1991.
- [2] Homayoun Seraji, "A Unified Approach to Motion Control of Mobile Manipulator," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 17, No. 2, pp. 107~118, 1998.
- [3] Jae H. Chung, "Interaction Control of a Redundant Mobile Manipulator," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 17, No. 12, pp. 1302~1309, 1998.
- [4] Jang Myung Lee, "Dynamic Modeling and Cooperative Control of a Redundant Manipulator Based on Decomposition," *International Journal of KSME*, Vol. 12, No. 4, pp. 642~658, 1998.
- [5] Jin-Gu Kang, Min-Gyu Kim, Ki-Hong Jin, Jang-Myung Lee, "A Study on Optimal Configuration Control of the Mobile Manipulator," *International Conf. on Mechatronics Technology (ICMT'99)*, pp. 572~577, 1999.
- [6] Jea-Kyung Lee, "Mobile Manipulator Motion Planning for Multiple Tasks Using Global Optimization Approach," *Journal of Intelligent*

- and Robotic System, Vol. 18, pp. 169~190, 1997.
- [7] H. Seraji, "Reachability. Analysis for Base Placement in Mobile Manipulator," *Journal of Robotic Systems*, pp. 687~698, 1997.
- [8] K. Shibata, T. Murakami, K. Ohnishi, "Control of a Mobile Manipulator Based on Equivalent Mass Matrix," *Proc. of IEEE IECON 21st International Conf. on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, pp. 1330~1335, 1995.
- [9] F. G. Pin, J. C. Culioli, "Optimal Positioning of Combined Mobile Platform-Manipulator System for Material Handling Task," *Journal of Intelligent and Robotic System*, pp. 165~182, 1992.
- [10] Jin-woo Park, Jae-Han Park, Jang-Myung Lee, "Intelligent Control of a Mobile Robot using Fuzzy Logic," *Proc. of ITC-CSCC'99*, pp. 585~588, Japan, 1999.
- [11] H. Freemann, editor. *Machine Vision for Three-Dimensional Scenes*. Academic Press, San Diego, 1990.
- [12] Y. Bar-Shalom and X. Li. *Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques*. Storrs, Connecticut, 1995.
- [13] R. C. P. Paul, "Modeling, Trajectory Calculation, and Servoing of a Computer Controlled Arm," Ph D. Thesis, Stanford Artificial Intelligence Lab., Stanford, 1972.
- [14] C. Perrier, P. Dauchez, F. Pierrot, "A Global Approach for Motion Generation of Non-Holonomic Mobile Manipulators," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2971~2976, 1998.
- [15] E. A. Croft, B. Benhabib and R. G. Fenton, "Near-time optimal robot motion planning for online applications," *Journal of Robotic Systems*, vol. 12, no. 8, pp. 553-567, 1995.

저 자 소 개



진 태 석(정회원)

1998년 진주산업대학교
전자공학과 학사졸업.
2000년 부산대학교 대학원
전자공학과 석사졸업.
2003년 부산대학교 대학원
전자공학과 박사 졸업.

2004년~현재 동경대학 생산기술연구소 연구원
<주관심분야 : 다중센서 데이터융합, 이동로봇,
다관절로봇, 네트워크기반 지능제어>



이 장 명(정회원)

1980년 서울대학교
전자공학과 학사졸업.
1982년 서울대학교
전자공학과 석사졸업.
1990년 USC 박사졸업.
1992년~현재 부산대학교
전자공학과 교수.

1992년~현재 대한전자공학과 이사,
제어·자동화·시스템공학회 정회원
<주관심분야 : 다관절로봇, 시스템설계 및 제어,
마이크로 프로세서 응용시스템 설계 및 제어 등>