

## 가격 함수 및 비전 정보를 이용한 이동매니퓰레이터의 작업 수행

강진구\*, 이관형\*\*

# Task Performance of a Mobile Manipulator using Cost Function and Vision Information

Jin-Gu Kang\*, Kwan-Houng Lee\*\*

### 요 약

이동매니퓰레이터는 -이동로봇과 작업로봇이 직렬로 결합된 형태 - 작업 공간 밖에 존재하는 작업에 대하여 높은 성능으로 작업을 수행할 수 있으므로 고정 베이스 구조의 매니퓰레이터에 비하여 다양한 작업 환경에서 유용하다. 임의의 위치에 있는 물체를 인식하기 위하여 이동매니퓰레이터에 부착된 2 자유도의 능동카메라에 의해 입력되는 영상과 능동카메라의 기하학적 관계에 기초를 두는 직각좌표계를 이용하여 물체의 위치와 이동로봇의 위치를 구하는 방법을 제시한다. 동차행렬을 이용하여 이미지정보와 물체의 위치를 해석하므로 이동매니퓰레이터의 최적경로를 생성한다. 최종적으로, 물체의 인식을 통하여 작업로봇을 제어할 수 있는 조인트변수의 값을 계산한다. 제안된 방법은 제작된 이동매니퓰레이터로 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인되어지고 논의된다.

### 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 terms of its operational workspace size as well as efficiency. A method for estimating the position of an object in the Cartesian coordinate system based upon the geometrical relationship between the image captured by 2-DOF active camera mounted on mobile robot and the real object, is proposed. With this position estimation, a method of determining an optimal path for the mobile manipulator from the current position to the position of object estimated by the image information using homogeneous matrices. Finally, the corresponding joint parameters to make the desired displacement are calculated to capture the object through the control of a manipulator. The effectiveness of proposed method is demonstrated by the simulation and real experiments using the mobile manipulator.

▶ Keyword : Mobile Manipulator, Kinematics, Position Estimation, 2-DOF Active Camera, Optimal Path

• 제1저자 : 강진구

• 접수일 : 2005.10.13, 심사완료일 : 2005.11.10

\* 극동정보대학 방송영상미디어과 조교수, \*\* 청주대학교 전자정보공학부 전임강사

## 1. 서론

로봇의 사용 범위가 다양해지고 있는 현재, 로봇을 이용한 효율적 활용은 현 산업계에서 크게 기대되어지고 있다. 그러나 현실적으로 로봇의 사용은 실제 환경에서 로봇을 제어할 경우 많은 불확실성이 포함되어 있으므로 로봇의 활용도 측면에서는 큰 기대에 부응하지 못하고 있는 실정이다. 또한 기존의 6축 이하의 자유도를 가지는 로봇의 경우 작용점의 작업 위치가 가능하더라도 로봇의 자세측면에서 볼 때 그 안정도가 낮아 효율적인 작업을 수행하기 어렵다[1]. 따라서 다중 로봇에 대한 관심이 증가되었으며 다수개의 로봇이 상호 협동에 의한 작업을 수행하므로써 작용점의 안정도와 효율성을 높이는데 관심이 증가되고 있다. 또한 다수개의 매니퓰레이터가 협동하여 작업을 하는 경우 병렬로 매니퓰레이터들이 하나의 작업을 실행하는 경우와 직렬로 결합된 여러 개의 로봇이 협동하여 작업효율을 향상시키는 연구가 진행되고 있다[1][2]. 본 연구에서는 이동로봇과 작업로봇의 직렬 결합에 의한 잉여자유도를 가지는 이동매니퓰레이터를 제작하여 실험하였다.

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 이동매니퓰레이터 시스템을 구성하여 작업영역 밖의 작업도 상호 협조적으로 원활하게 수행될 수 있도록 제어하였다. 그러나, 이동로봇과 작업로봇의 결합에 의해 발생하는 잉여 자유도와 고정식 구조를 가진 작업로봇의 잉여 자유도의 사용방법과는 다르다[1]. 이러한 이동로봇과 작업로봇의 직렬결합에 의해 발생하는 잉여 자유도 문제를 고려한 이동매니퓰레이터의 궤적계획에 관한 연구가 필요할 것이다.

본 논문에서는 이동로봇과 직렬로 결합된 로봇을 이동매니퓰레이터라 정의하고, 이는 고정식 잉여로봇과는 다르므로 주어진 작업환경에 따라 특이자세 회피, 충돌 회피, 기계적 부위의 효율적인 활용 등의 이점을 가진다.

제안된 이동매니퓰레이터 시스템은 (그림 1)과 같이 작업을 직접 수행하는 작업로봇과 작업범위를 확장하기 위한 이동로봇으로 구성되어 있으며, 작업 대상 인식은 카메라로 하며 물체를 능동적으로 탐색 및 인식할 수 있도록 Pan/Tilt 2-자유도의 능동구조로 카메라 기구부를 설계, 제작 하였다. 임의의 위치에 있는 물체를 인식하기 위하여 이동매니퓰레이터에 부착된 2 자유도의 능동카메라에 의해 입력되는 영상데이터와 능동카메라의 기구학적 관계를 이용하여 물체의 공간상의 위치를 구하며, 그 위치에 도달하여 이동매니퓰레이터가 작업을 수행할 수 있도록 최적의 경로를 생성한다.

본 논문에서 제안한 이동매니퓰레이터의 제어구조와 경로계획 알고리즘의 효율성을 검증하기 위하여 임의의 위치에 있는 물체를 인식하여 그 물체를 포획하는 작업을 수행하고 그 결과를 분석한다. 결과에서 특히 이동매니퓰레이터의 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.

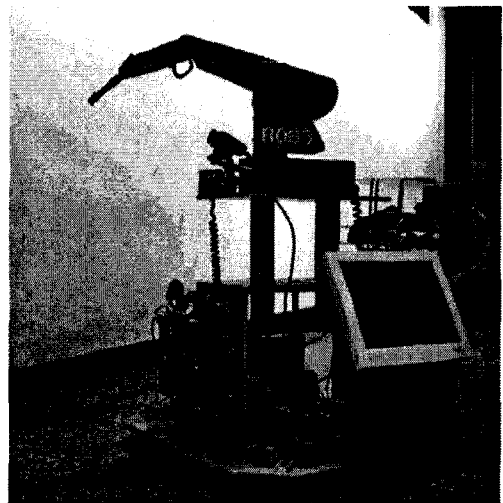


그림 1. 이동매니퓰레이터 PURL-II  
Fig. 1. mobile manipulator PURL-II

## II. 이동매니퓰레이터의 구성

### 2.1 이동매니퓰레이터의 기구학 해석

독립적인 목적으로 설계된 두 개의 로봇을 결합하여 하나의 작업수행을 위하여 각각의 로봇이 동시에 제어되어야 하므로 전체시스템의 기구학을 해석하여 제어되어야 한다. 이동로봇은 non-holonomic 시스템이고, 작업로봇은 holonomic 시스템이므로 이동매니퓰레이터의 기구학은 속도기구학을 통해 이동로봇과 작업로봇을 결합한다[2][3]. (그림 2)에서는 제작한 이동매니퓰레이터의 모델링을 나타내었다[4]. 작업로봇의 조인트 변수와 이동로봇의 조인트변수를  $q_t = [q_1 q_2 q_3 q_4 q_5]^T$ ,  $q_m = [q_{m6} q_{m7} q_{m8} q_{m9}]^T$  라 정의하면 이동매니퓰레이터의 시스템 변수는 식 (1)과 같다.

$$q = \begin{bmatrix} q_t \\ q_m \end{bmatrix}^T = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_{m6} \ q_{m7} \ q_{m8} \ q_{m9}]^T \dots (1)$$

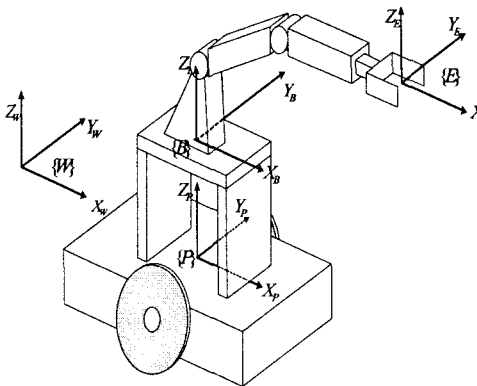


그림 2. 이동매니퓰레이터의 기구학 해석  
Fig. 2. Kinematic analysis of the mobile manipulator

이동로봇의 각 축에 대한 조인트 변수에 의해서 형성되는 이동로봇의 End-effect의 위치(작업로봇의 베이스 위치)인  $P_B = [p_x \ p_y \ p_z \ \theta_m]^T$  를 프레임 {B} 로 설정하였다.  ${}^W P_B$ 은 프레임 {W}에서 프레임 {B}까지의 위치 벡터이다. 이동매니퓰레이터의 기구학은 우선 이동로봇은 3축이므로 조인트 변수  $\theta_m$ 은 바닥 면의 고정 프레임에 대한 직교좌표 공간상에서 이동로봇의 선속도  ${}^W V_B$ 와 각속도  ${}^W \omega_B$ , 조인트 변수  $q_m$ 은 식 (2)와 같이 나타난다.

$${}^W \dot{P}_B = \begin{bmatrix} {}^W V_B \\ {}^W \omega_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^W J_{B,v} \\ {}^W J_{B,\omega} \end{bmatrix} \dot{q}_m = {}^W J_B \dot{q}_m \dots (2)$$

(그림 2)에서와 같이 작업로봇의 조인트 변수  $\theta_t$ 의 Jacobian을 프레임 {B}를 기준으로 {E}까지를 기술해 보면 식 (3)과 같이 나타난다.

$${}^B \dot{P}_E = \begin{bmatrix} {}^B V_E \\ {}^B \omega_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B J_{E,v} \\ {}^B J_{E,\omega} \end{bmatrix} \dot{q}_t = {}^B J_E \dot{q}_t \dots (3)$$

따라서 각 로봇의 Jacobian이  ${}^W J_B$ ,  ${}^B J_E$ 로 주어질 때, 이동매니퓰레이터의 {W}에서 {E}까지의 Jacobian은 식 (4)과 같다.

$${}^W \dot{P}_E = \begin{bmatrix} {}^W V_E \\ {}^W \omega_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^W \omega_B + {}^W R_B {}^B \omega_E \\ {}^W R_B {}^B v_E \end{bmatrix} \dots (4)$$

$$= {}^W J_B \dot{q}_m + {}^W J_E \dot{q}_t = \begin{bmatrix} {}^W J_B & {}^W J_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_m \\ \dot{q}_t \end{bmatrix}$$

${}^W R_B$ 은 {W}에서 작업로봇의 {B}까지의 회전변환행렬이다. 즉, 식(1)~식(4)에 의해 End-effect의 운동은 이동로봇과 작업로봇의 운동에 의해 공유되어 짐을 알 수 있다[5].

### 2.2 이동매니퓰레이터의 제어 구조

(그림 3)은 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 인터페이스 되며 또

한 이동로봇의 3축과 능동카메라의 Pan/Tilt 제어기 네트워크를 위한 4개의 CAN 컨트롤러 카드와 상위제어기(PC)와의 CAN통신을 위한 ISA 인터페이스 카드가 장착되어 있다. 작업로봇을 제어하기 위한 8051 컨트롤러가 상위제어기와 직렬통신을 하도록 설계되어져 있다. 상위제어기는 100 msec의 주기로 영상정보와 로봇 상태정보의 획득, 영상처리 및 로봇동작 계획과 하위제어기로서의 명령전송 처리 과정이 이루어진다. 능동카메라의 제어기는 ISA 인터페이스 카드의 병렬포트를 통하여 상위제어기가 전송하는 자세명령을 받는다. Pan/Tilt는 하나의 제어기에서 다른 ID가 할당되어져 각 축이 동시에 제어되며 가/감속 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 강한 특성을 나타내도록 설계되었다.

므로 역기구학을 통한 작업계획은 로봇 자세에 따라 많은 해가 존재하게 된다. 로봇이 효율적인 작업을 수행하기 위해서는 제약조건을 정의하여 최적의 작업 수행과 효율성을 동시에 만족하는 최적의 해를 구해야 한다(6)(7). 본 논문에서는 최적의 작업수행을 위하여 로봇 전체 움직임을 최소화하는 것으로 정의하였으며, 이동매니플레이터의 상태를 나타내는 벡터는 식 (5)와 같이 나타내었다.

$$p = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = [x, y, z, \theta]^T \dots\dots\dots (5)$$

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$$

여기서 p는 로봇의 상태를 나타내는 벡터이며 이동로봇의 직교좌표 공간에서의 위치와 방향을 나타내는 x와, 작업로봇의 n 개의 각 링크에 대한 관절변수 q로 이루어져 있다. 따라서 이동로봇과 작업로봇각각의 움직임은 식 (6), (7)으로 나타낼 수 있다.

$$L_m = \int_{t_0}^{t_f} \dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2 + \dot{z}_m^2 + \dot{\theta}_m^2 dt \dots\dots\dots (6)$$

$$= \int_{t_0}^{t_f} \dot{\mathbf{x}}^T \cdot \dot{\mathbf{x}} dt$$

$$L_t = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{k=1}^n \dot{q}_k^2 dt, \quad n = \text{link 개수} \dots\dots\dots (7)$$

$$= \int_{t_0}^{t_f} \dot{\mathbf{q}}^T \cdot \dot{\mathbf{q}} dt$$

이동매니플레이터 전체의 움직임은 식 (8)과 같으며 가격함수 L이 최소가 되도록 작업을 계획 한다

$$L = \int_{t_0}^{t_f} \dot{\mathbf{x}}^T \cdot \dot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{q}}^T \cdot \dot{\mathbf{q}} dt \dots\dots\dots (8)$$

$$= \int_{t_0}^{t_f} \dot{\mathbf{p}}^T \cdot \dot{\mathbf{p}} dt$$

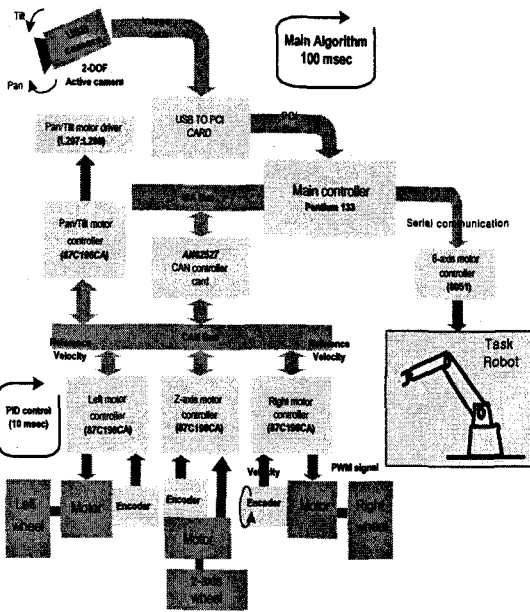


그림 3. 이동매니플레이터의 제어 구성도  
Fig. 3. Overall system of mobile manipulator

2.3 가격함수의 정의

작업로봇의 작용점을 임의의 위치에서 원하는 지점으로 이동하는 작업에서, 이동매니플레이터는 작업로봇의 베이스 프레임의 위치가 이동로봇의 움직임에 따라 변화한다. 그러

식 (8)의 가격함수 L을 다시 전개하면 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \int_{t_i}^{t_f} \dot{\mathbf{p}}^T \dot{\mathbf{p}} dt = \Delta \mathbf{p}^T \Delta \mathbf{p} \dots\dots\dots (9)$$

$$= (\mathbf{p}_f - \mathbf{p}_i)^T (\mathbf{p}_f - \mathbf{p}_i)$$

$$+ (\mathbf{x}_f - \mathbf{x}_i)^T (\mathbf{x}_f - \mathbf{x}_i)$$

여기서  $\mathbf{P}_i = [x_i \ q_i]^T$  는 이동매니플레이터의 초기 자세를 나타내며,  $\mathbf{P}_f = [x_f \ q_f]^T$  는 작업을 수행한 최종자세를 나타낸다. 최종자세에서는 작업로봇의 작용점이 원하는 위치  $\mathbf{x}_d$ 에 위치해야 하므로 식 (10)의 조건을 만족해야 한다. 여기서  $R(\theta_f)$  는 XY 평면에 대한 회전변환을,  $f(q_f)$ 는 작업로봇의 기구학 방정식을 나타낸다.

$$\mathbf{x}_d = R(\theta_f) f(\mathbf{q}_f) + \mathbf{x}_f \dots\dots\dots (10)$$

이동로봇의 최종위치  $\mathbf{x}_f$ 를 목적좌표  $\mathbf{x}_d$ 와 변수  $\theta_f, \mathbf{q}_f$ 의 함수로 나타낼 수 있으며 로봇의 움직임을 나타내는 가격함수는 식 (11)과 같이  $\theta_f, \mathbf{q}_f$ 의  $n \times 1$  공간의 함수로 표현된다.

$$L = \{ \mathbf{x}_d - R(\theta_f) f(\mathbf{q}_f) - \mathbf{x}_i \}^T$$

$$\{ \mathbf{x}_d - R(\theta_f) f(\mathbf{q}_f) - \mathbf{x}_i \} \dots\dots\dots (11)$$

$$+ \{ \mathbf{q}_f - \mathbf{q}_i \}^T \{ \mathbf{q}_f - \mathbf{q}_i \}$$

이때 가격함수  $L$ 을 최소화하는  $\theta_f, \mathbf{q}_f$ 는 식 (12)의 조건을 만족해야 한다.

$$\nabla L = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \theta_f} \\ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}_f} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \dots\dots\dots (12)$$

가격함수가 비선형 함수이므로 식 (12)의 조건을 만족하는 최적 해는 해석적으로 구하기가 어려우며, 본 논문에서는 식 (13)과 같이 Gradient Method를 사용하여 수치적으로 구하였다.

$$\begin{bmatrix} \theta_{f(k+1)} \\ \mathbf{q}_{f(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{f(k)} \\ \mathbf{q}_{f(k)} \end{bmatrix} - \eta \nabla L \Big|_{\theta_{f(k)}, \mathbf{q}_{f(k)}}$$

If  $\| \nabla L \| < \epsilon \approx 0$ ,  $\dots\dots\dots (13)$

$\theta_{f(k)}, \mathbf{q}_{f(k)}$  : optimum solution

최적해  $\theta_f, \mathbf{q}_f$ 에 의한 최종의 로봇자세  $\mathbf{p}_f$ 는 식 (14)와 같이 구해진다.

$$\mathbf{p}_f = \begin{bmatrix} \mathbf{x}'_f \\ \mathbf{q}'_f \end{bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{x}_d - R(\theta'_f) f(\mathbf{q}'_f) \\ \mathbf{q}'_f \end{bmatrix}$$

### III. 카메라 시스템 및 물체 위치 추정

#### 3.1 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)로 제어된다. 영상정보에서 물체의 거리를 추정하기 위해서는 기저(base)좌표계에 대한 카메라의 위치 및 방향에 대한 정보가 필요하며 따라서 각 관절의 각도에 대한 기저좌표계와 마지막 좌표계의 관계를 나타내는 순방향 기구학 해석이 선행되어야 한다. 순방향 기구학 해석을 위하여 (그림 4)와 같이 D-H법에 의해 좌표축을 설정한다. 여기서  $\alpha$ 는 Tilt 각도를 나타내며,  $\beta$ 는 Pan 각도를 나타낸다. 동차행렬의 변위 벡터는 능동카메라 기구부의 관절각  $\alpha, \beta$ 에 대한 기준 좌표계에서의 카메라의 위치로  $x, y, z$  각 축에 대하여 식 (15)로 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 x_{\text{act}} &= l_2 \sin(\alpha) + l_3 \cos(\alpha) \cos(\beta) \\
 y_{\text{act}} &= l_3 \sin(\beta) \\
 z_{\text{act}} &= l_1 + l_2 \cos(\alpha) - l_3 \sin(\alpha) \cos(\beta).
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

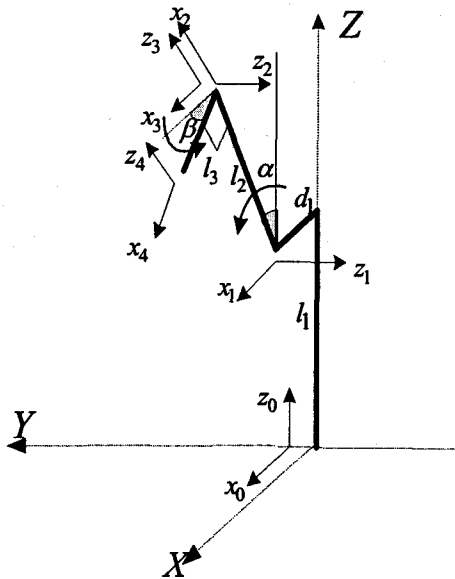


그림 4. 능동카메라 기구부의 좌표계  
Fig. 4. Coordinates of the active camera actuator

동차행렬의 자세벡터는 기준좌표계에 대한 카메라의 Roll, Pitch, Yaw 각에 대한 동차행렬의 회전변환행렬이며 각 방향성분에 대하여 Roll 각,  $\Theta_R$ , Pitch 각,  $\Theta_P$ , Yaw 각,  $\Theta_Y$ 는 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Theta_P &= \tan^{-1} \left( \frac{\sin(\alpha) \cos(\beta)}{\sqrt{\cos^2(\alpha) \cos^2(\beta) + \sin^2(\beta)}} \right) \\
 \Theta_R &= \tan^{-1} \left( \frac{\sin(\alpha) \sin(\beta)}{\sqrt{\cos^2(\alpha) \sin^2(\beta) + \cos^2(\beta)}} \right) \\
 \Theta_Y &= \beta
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

### 3.2 영상정보로부터 물체 위치 추정 알고리즘

영상정보에서 실제물체의 위치를 추정하기 위하여 핀 홀 카메라 모델을 사용하였다. 핀 홀 카메라 모델에서는 (그림 5)와 같이 모든 영상은 하나의 점으로 모여며 영상센서의 각 셀 들은 중심과의 각으로 모델링 된다. 식 (17)은 핀 홀 카메라 모델로부터 임의의 한 픽셀과 그 이웃하는 픽셀에 대한 중심과의 각도를 표현한 것이다.

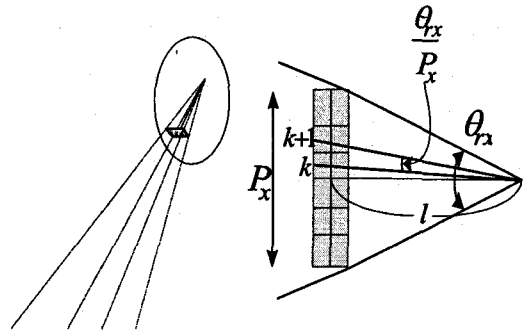


그림 5. 핀 홀 카메라 모델  
Fig. 5. Pin-hole camera model

그림에서 k pixel 과 중심과의 각도는 식 (17)과 같이 표현되어진다.

$$\theta_k = \tan^{-1} \left( \frac{k}{l} \right) \tag{17}$$

그리고, k+1 pixel 과 중심과의 각도는 식 (18)과 같이 표현되어진다.

$$\theta_{k+1} = \tan^{-1} \left( \frac{k+1}{l} \right) \tag{18}$$

위의 두 식으로부터 각 pixel 사이와 중심점과의 각도  $\Delta\theta$  는 식 (19)과 같이 표현되어질 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \Delta\theta &= \tan^{-1} \left( \frac{k+1}{l} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{k}{l} \right) \quad \left[ \frac{k}{l} < 1 \right] \\
 &\approx \frac{k+1}{l} - \frac{k}{l} = \frac{1}{l} \left[ l = \frac{P_x}{2} \cot \left( \frac{\theta_{xx}}{2} \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{\frac{P_x}{2} \cot\left(\frac{\theta_{rx}}{2}\right)} \approx \frac{2}{P_x} \frac{\theta_{rx}}{2} = \frac{\theta_{rx}}{P_x} \dots\dots\dots (19)$$

핀 홀 카메라 모델로부터 (그림 6(a))와 같은 능동카메라 자세에서 영상정보와 실제 환경의 관계를 구한다.

(그림 6 (b))에서  $\theta_{RX}$ 는 카메라의 X 방향에 대한 시각 영역의 각이며  $\theta_{RY}$ 는 Y 방향에 대한 각을 나타낸다. 그림 (그림 6 (c))는 (b)의 상황에서 카메라에 입력된 영상이며  $P_x, P_y$ 는 X,Y 방향 Pixel 수를 나타내며, j, k는 거리를 추정하고자 하는 Pixel의 x, y 방향의 좌표이다. 능동카메라의 자세에 의해 실제 영상은 Roll 각에 의해  $\theta_R$ 만큼 회전된 영상이므로 식 (20)과 같이 회전 변환하여 식 (21)과 같이 공간상 거리  $\hat{r}_o$ 와 방향  $\hat{\theta}_o$ 를 추정할 수 있다. 여기에서 기저좌표계에 대한 x 방향에 대한 위치와 y 방향에 대한 위치는 식 (22)로 추정된다[7][8][9][10].

$$\begin{bmatrix} j' \\ k' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_R) & -\sin(\theta_R) \\ \sin(\theta_R) & \cos(\theta_R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j - \frac{P_x}{2} \\ k - \frac{P_y}{2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

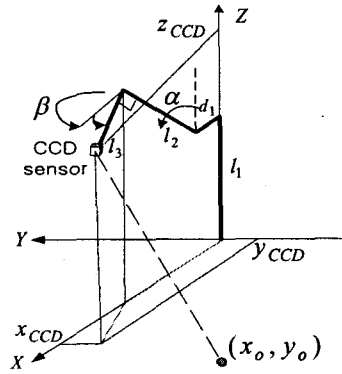
$$\hat{r}_o = z_{ccd} \cdot \cot\left(\theta_T - \frac{k'}{p_y} \theta_{ry}\right) \dots\dots\dots (21)$$

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

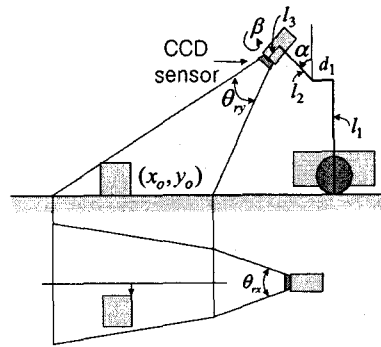
$$\hat{x}_o = r_{ccd} \cos(\beta) + \hat{r}_o \cos(\beta + \hat{\theta}_o)$$

$$\hat{y}_o = r_{ccd} \sin(\beta) + \hat{r}_o \sin(\beta + \hat{\theta}_o) \dots\dots\dots (22)$$

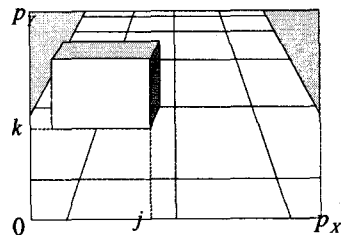
$$\left( r_{ccd} = \sqrt{x_{ccd}^2 + y_{ccd}^2} \right)$$



(a) Real position estimation



(b) Sensing configuration



(c) Image of CCD camera

그림 6. 영상정보로부터 거리정보의 추정  
Fig. 6. Estimation of position information from CCD image

### IV. 시뮬레이션 및 실험

#### 4.1 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 바다가 입력되는 영상을 논문에서 제시한 기구학적 관계로 나타내었다. (그림 7)은 능동카메라 Tilt 각,  $\alpha=14.4^\circ$ , Pan 각,  $\beta=24.3^\circ$ 의 자세에서 실험한 결과이다. (그림 7)은 복도에 상자의 앞면이 이동메니플레이터의 중심으로부터 3장에서 설정한 좌표계에 따라  $x=3.85m$ ,  $y=0.5m$ 에 놓이게 한 다음, 앞서 설정한 능동 카메라 자세에서 실제 입력 영상 및 제시한 알고리즘에 의해 처리되어진 영상과 그에 따른 데이터를 보여주고 있다. 실험에서 볼 수 있듯이 실제 카메라 자세에 의한 영상정보와 기구학적 관계를 통해 거리정보를 추정하였다.

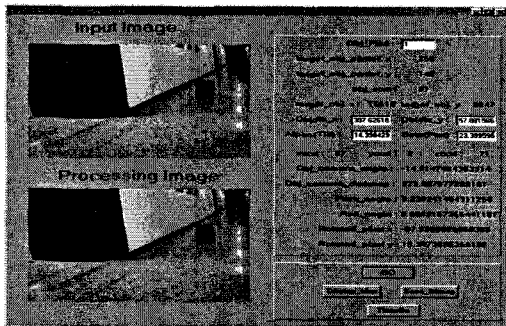


그림 7. 물체 위치 추정( $\alpha=14.4^\circ$ ,  $\beta=24.3^\circ$ )  
 Fig. 7. Estimation of object position. ( $\alpha=14.4^\circ$ ,  $\beta=24.3^\circ$ )

#### 4.2 동차행렬을 이용한 최적 경로 생성

(그림 8)은 경로생성 알고리즘을 나타내었다. 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 이동물체의 초기 위치와 방향은  $(0m, 0m, 0.55m, 0^\circ)$  이고, 작업로봇의 초기 자세는  $(-60^\circ, 20^\circ, -15^\circ)$  로 설정하였으며, 작업로봇의 End-effector의 목표위치는  $(1m, -5m, 0.7m)$  로 설

정하였다. 또한 이동로봇의 평균이동속도는  $2m/s$ 로 설정하였다.

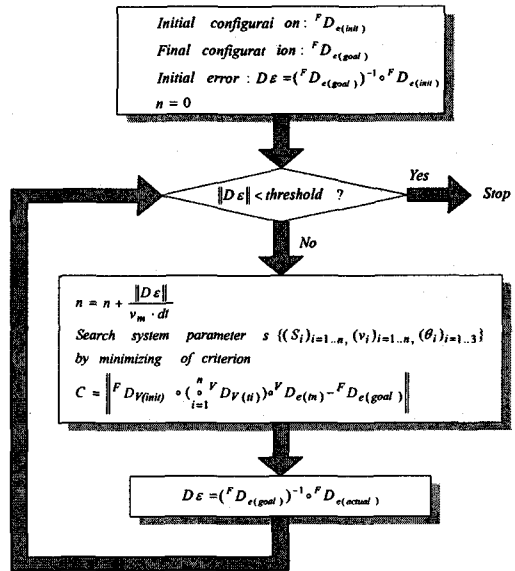


그림 8. 경로 생성 알고리즘  
 Fig. 8. Implemented algorithm for path

(그림 9)는 초기 위치에서 출발하여 목표 위치와의 에러를 계산한다. 가격함수 L를 최소화시키는 시스템 파라미터인 곡률 S와 속도 v에 의해 생성되는 최적 경로를 주행하면서, 목표 위치에 접근해 가는 시뮬레이션 결과를 3차원으로 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과에 의한 최종 위치는  $(0.9451m, -5.148m, 0.7m)$ 이다. 오차의 원인은 최소화과정이 근사적 방법에 의한 것이고, 최소에러에 대한 한계(threshold)값의 설정에 기인한 것으로 보인다. (그림 10)은 각 구간에서의 곡률과 속도의 변화를 보여주고 있다.



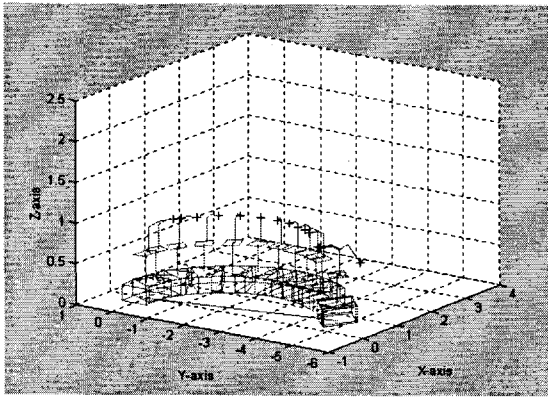


그림 9. 동차행렬을 이용한 궤적 생성  
Fig. 9. Trajectory generation using homogeneous matrix

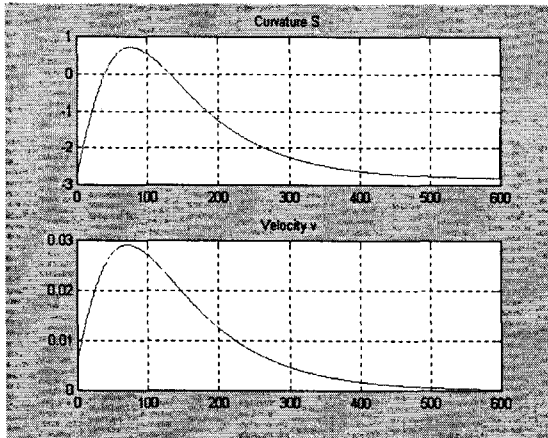


그림 10. 각 구간에서의 곡률과 선형속도  
Fig. 10. Curvature and linear velocity in each displacement

(그림 11의 (a))는 목표위치에 있는 상자를 찾는 동작을 나타내며 (b)~(f)는 상자에 다가가서 잡고 있는 물체를 목표 지점에 떨어뜨리는 동작을 나타낸다. 실험 결과에서 목표위치를 찾는 작업 및 목표위치에 물체를 떨어뜨리는 작업들에 대해서 카메라의 정보와 기구부 자세를 이용한 위치추정 및 최적의 경로로 인한 이동매니플레이터의 특정한 작업 수행이 원활하게 이루어졌음이 확인된다.

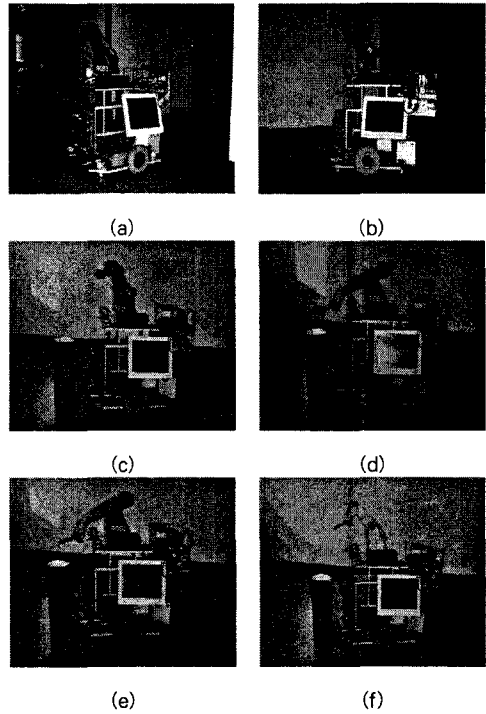


그림 11. 이동매니플레이터의 작업 수행 결과  
Fig. 11. Experiment result for task performance

## V. 결론

이동매니플레이터를 이용하면 고정 베이스 구조의 잉여 로봇에 비하여 현재의 작업공간 밖에 존재하는 작업에 대하여 유리하다. 본 논문에서는 특정 작업에 대한 이동매니플레이터의 작업능력에 관한 연구로서 이동매니플레이터는 임의의 위치에 있는 물체를 인식하여 목표지점에서 물체를 포획하는 작업을 목표로 하였으며, 그를 위한 시스템 구성, 작업 대상을 인식하기 위한 카메라 시스템 구성, 이동매니플레이터의 제어구조 및 가격함수를 이용한 경로 생성에 대한 방법과 연구 내용을 제시하였다. 본 논문에서는 능동카메라의 자세와 영상의 물체위치로부터 앞에서 제시했던 실제 환경과의 맵핑 관계를 이용하여 대상물체의 공간상의 위치를 추정한다. 또한 좌표변환에 의한 동차행렬을 이용하여 이동 로봇과 작업로봇을 두 개의 독립적인 시스템으로 간주하지

않고, 하나의 시스템으로 간주하여 해석한다. 최종적으로 작업 로봇의 작업공간을 벗어난 추정된 위치에 도달하여 작업을 수행하기 위하여 매 제어주기마다 목표속도와 속도의 최적 값에 따른 최적의 경로를 생성한다. 이로써 이동로봇의 협동아래 작업로봇의 제약성을 극복시킴으로써 특정한 작업을 수행할 수 있었음을 시뮬레이션과 실험을 통해 보여 주었다. 이동매니퓰레이터의 시스템 구성에서는 각 관절의 제어와 카메라 기구부 제어에 관련된 많은 작업들을 실시간으로 제어하기 위하여 다수개의 제어기들이 네트워크를 통하여 제어를 수행하는 분산제어 방식을 채택하였다. 향후 과제로서 이동로봇의 속도제어에 있어서의 위치오차의 보정을 위한 외부센서를 이용하여 정확한 위치제어가 필요하며, 카메라에 의한 영상정보에서 조명의 영향에 대한 강인한 이미지 처리문제, 그리고 위치 추정을 위한 카메라 기구부 파라미터 및 불확실성에 대한 강인성 문제에 관한 연구가 계속되어야 할 것이다.

### 참고문헌

[1] 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.

[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] 이관형, 송우영. "WTDL을 이용한 개인통신망의 최적 접속방법에 관한 연구", 한국OA학회 논문집 제3권 제3호, pp.121-127, 1998

[4] Jae H. Chung, "Interaction Control of a Redundant Mobile Manipulator," The International Journal of Robotics Research, Vol. 17, No. 12, pp. 1302~1309, 1998.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 김재진, 이관형 "상관관계에 의한 CLB구조의 CPLD 저전력 기술 매핑 알고리즘", 한국컴퓨터정보학회 논문집 제10권 제2호, pp.49-58, 2005

[8] Jin-woo Park, Jae-Han Park, Jang-Myung Lee, "Intelligent Control of a Mobile Robot using Fuzzy Logic," Proc. of ITC-CSCC'99, Japan sado, 1999.

[9] 박재한, 노동규, 박진우, 이장명, "분산명령구조를 이용한 이동로봇의 지능적 운행", 1999년도 한국통신학회 대한전자공학회 부산·경남지부 춘계 합동 학술발표회 논문집 제8권 제1호, pp. 224~229, 1999.

[10] 박재한, 노동규, 이장명, 김종형, "이동물체 포획을 위한 이동로봇의 동작계획", 1999년도 한국자동제어학회 학술발표회 논문집 A권, pp. 373~376, 1999.

### 저자소개



**강진구**  
2001년 2월 부산대학교 전자공학과  
공학박사  
2001년~현재 극동정보대학  
방송영상미디어과 조교수



**이관형**  
2004년 8월 청주대학교 전자공학과  
공학박사  
2005년~현재 청주대학교  
전자정보공학부 전임강사