

# 방향성 매니플러빌리티를 이용한 주행 매니플레이터의 운동 계획

신동현<sup>#</sup>

## Motion Planning for a Mobile Manipulator using Directional Manipulability

Dong Hun Shin<sup>#</sup>

### ABSTRACT

The coordination of locomotion and manipulation has been the typical and main issue for a mobile manipulator. This is particularly because the solution for the control parameters is redundant and the accuracies of controlling the each joints are different. This paper presents a motion planning method for which the mobile base locomotion is less precise than the manipulator control. In such a case, it is appropriate to move the mobile base to discrete poses and then to move the manipulator to track a prescribed path of the end effector, while the base is stationary. It uses a variant of the conventional manipulability measure that is developed for the trajectory control of the end effector of the mobile manipulator along an arbitrary path in the three dimensional space. The proposed method was implemented on the simulation and the experiments of a mobile manipulator and showed its effectiveness.

**Key Words** : mobile manipulator(주행 매니플레이터), motion planning(운동 계획), directional manipulability(방향성 매니플러빌리티)

### 1. 서론

주행 매니플레이터는 바퀴 등으로 주행하는 이동 로봇에 로봇 팔로 이루어진 매니플레이터가 결합된 형태의 로봇이다. 이러한 로봇은 이동 로봇과 로봇 매니플레이터의 장점을 결합하여 사용할 수 있다. 예를 들어, 이동 로봇부분 즉 주행부(Mobile base)는 로봇의 작업 공간을 확대시켜주며, 매니플레이터는 팔이 할 수 있는 많은 기능을 제공함으로써, 결합형태인 주행 매니플레이터는 미래의 공장과 가정에서 많은 일을 담당할 것이다.

이러한 좋은 기대와 더불어 약 15년 전부터 이에 관한 많은 연구가 이루어져왔는데, 특히 주행과

매니플레이션의 제어 조정(Coordination)에 관한 연구가 가장 중심을 이루어왔다. 이것은 주행부와 매니플레이터의 자유도를 합치면 실제 작업에 필요한 자유도를 증가하는 이른바 잉여자유도의 문제를 야기하는데 이를 효율적으로 이용하는 것에 대한 연구이다. 일찌기 Carriker<sup>1</sup> 등은 이러한 잉여자유도를 비선형 최적화 문제로 유도하였는데 비용함수를 단지 주행부의 이동거리를 최소화하도록 하였다. 유사한 접근방법으로 단지 비용함수를 다르게 하는 많은 연구가 있었는데<sup>2, 3, 4</sup>, 특히 Yamamoto<sup>5</sup>는 매니플러빌리티<sup>6</sup>를 최대화하는 매

접수일: 2004년 3월 23일; 게재승인일: 2005년 3월 11일

<sup>#</sup> 교신지자: 서울시립대학교 기계정보공학과

E-mail: shin@uos.ac.kr Tel. (02) 2210-2542

니플레이터의 형상을 유지하도록 주행부를 제어하도록 하였으며, 또한 운동 가능한 관절영역에서 동역학적 매니플러빌리티 (Dynamic manipulability)<sup>7</sup> 를 최적화하도록 하는 주행부 제어를 제시하였다.<sup>8</sup>

한편, 주행부와 매니플레이터의 동역학적 상호작용에 관한 연구도 시작되었는데<sup>9</sup>, 로봇의 전복안정도 (Tip-over stability)<sup>10</sup>, 주행부의 Suspension 효과<sup>11</sup>, 동역학적 모델링<sup>12</sup> 이 있으며, 또한 다수의 주행 매니플레이터 (Multiple mobile manipulators)의 운동 제어 및 계획에 관한 연구<sup>13, 14, 15</sup>는 기본적으로 로봇의 힘 제어 (Force control)의 방법을 쓰고 있다.

그러나, 본 논문에서는 주행부의 제어가 매니플레이터의 제어보다 훨씬 부정확하다는 사실에 기초하여 주행 매니플레이터의 운동계획에 관한 방법을 제시한다. 실제 로봇의 주행부의 제어 정밀도는 매니플레이터에 비하여 매우 떨어지는데 이것은 주행부의 바퀴 등의 지면과의 마찰에 의한 상대운동에 따른 부정확성, 미끄러짐 등에 기인하는 것이다. 예를 들어 본 연구에 사용한 ATRV-2<sup>16</sup> 로봇도 1cm 의 오차이내로의 경로추종이 불가능하였으나 매니플레이터는 반복정밀도가 1mm 였다. 이러한 사실을 인정할 때 주행 매니플레이터는 우선 주행부를 작동하여 주어진 작업을 하기에 적당한 위치로 로봇을 이동한 후에 주행부를 정지시킨 상태에서 상대적으로 정밀도가 좋은 매니플레이터를 작동시켜서 실제 작업을 하는 것이 바람직하다. 따라서 주어진 작업이 매니플레이터의 작업영역보다 크다면 작업을 잘 분리하고 이에 알맞은 주행부의 위치를 정하는 계획이 필요하다. 본 논문은 이와 같은 문제에 대한 해답을 제시한다.

## 2. 제시되는 방법

### 2.1 방향성 매니플러빌리티

본 논문에서 로봇은 주행 매니플레이터로서 주행부는 평면 위를 3 자유도를 가지고 움직이고, 그 위에 부착된 매니플레이터는  $n$  개의 연속적으로 연결된 링크로 이루어져있으며  $n$  자유도를 가지고 있다고 가정한다. 한편, 로봇에 주어진 작업(Task)은 매니플레이터 말단장치(End effector)의 위치와 방향을 묘사하는  $\mathbf{r}(i) = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$  의 연속된 값으로 이루어진 경로를 로봇이 추종(Tracking)하는 것으로 한다.

또한, 로봇의 주행부의 운동 정밀도가 매니플레이터에 비하여 상대적으로 매우 떨어지므로 경로 추종시에 주행부를 먼저 움직여서 적당한 위치를 정한 후에 정지한 상태에서 매니플레이터를 움직이는 방법을 사용한다면 로봇의 운동 계획은 주어진 매우 긴 경로를 매니플레이터의 작업 능력을 고려하여 나누어야 하며 나누어지는 각 경로에 대응하여 필요한 주행부의 3 자유도 자세(Posture)  $\mathbf{x}_b = [x, y, \phi]$  로 이루어진 다음과 같은 집합을 구하는 문제로 된다.

$$\mathbf{S} = \{\mathbf{x}_{b_1}, \mathbf{x}_{b_2}, \mathbf{x}_{b_3}, \dots\} \quad (1)$$

이 문제에 대하여 많은 해답이 있을 수 있으므로, 다음과 같은 조건을 가장 잘 만족시키는 해를 찾도록 한다. 첫째, 나누어지는 각 경로는 해당하는 주행부의 자세  $\mathbf{x}_b$  로부터 매니플레이터의 도달가능 영역(Reachable space)에 있어야 한다. 둘째 조건으로 본 논문에서는 매니플러빌리티를 사용한다. 통상적인 매니플러빌리티는 다음과 같이 표현되는데<sup>6</sup>

$$w = \sqrt{\det \mathbf{J}(\theta) \mathbf{J}^T(\theta)} \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{J}(\theta)$  는 매니플레이터의 자코비안 (Jacobian) 행렬이고  $\theta \in \mathbf{R}^n$  는  $n$  자유도 매니플레이터의 관절(Joint) 벡터인데, 잉여자유도가 없는 로봇의 경우에는 매니플러빌리티가  $w = |\det \mathbf{J}|$  로 되며, 보통 현재의 위치에서 말단장치가 모든 방향으로 움직일 수 있는 능력의 척도를 나타낸다.<sup>6</sup> 즉, 매니플러빌리티 값이 0 으로 가까워지는 경우에는  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\dot{\theta}$  이므로 어떤 방향으로든 말단장치를 움직일 수 없어진다. 그러므로, 주어진 경로가 주행부의 위치로부터 매니플레이터로 도달가능할 때 매니플러빌리티는 그 주행부의 위치가 경로에 대하여 얼마나 좋은 위치인가를 판별하는 척도로 쓰일 수 있다. 즉, 매니플러빌리티 값이 아주 작으면, 그 주행부의 위치에서는 말단장치가 경로에서 어떤 방향으로든 못 움직이므로 그 주행부의 위치는 매니플레이터가 경로를 추종하는데 좋지 않다고 평가될 것이다.

그러나 매니플러빌리티 값이 비록 작다고 하더라도 반드시 주어진 경로가 매니플레이터로 추

중 불가능한 것은 아니다. 예를 들어, Fig. 1 에서와 같은 두개의 관절로 이루어진 매니플레이터의 경우에 매니플러빌리티는 다음과 같이 계산되는데

$$w = |\det \mathbf{J}| = a_1 a_2 |\sin \theta_2| \quad (3)$$

첫째 링크와 둘째 링크가 일직선을 이루는 경우에 즉  $\theta_2 = 0$  일 경우에 매니플러빌리티는 0 이 되고 말단 장치는 링크의 바깥방향으로는 움직일 수 없다. 그러나, 링크의 수직된 방향으로 아주 작은 관절운동으로도 말단 장치가 크게 움직여지고, 만약 주어진 경로가 그 방향으로 진행된다면 경로 추종이 가능할 것이다. 즉, 여기에서 주목할 점은 경로 추종 가능여부는 관절의 위치로만 결정되는 매니플러빌리티 뿐만 아니라 주어진 경로 역시 고려되어 판단하여야 한다는 것이다.

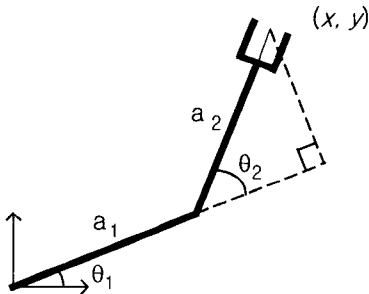


Fig. 1 Two-link manipulator.

로봇 말단장치의 경로 추종 속도 및 각속도 벡터가  $\mathbf{v}$  와  $\boldsymbol{\omega}$  라고 하면,  $\hat{\mathbf{k}} = [\mathbf{v}/|\mathbf{v}|, \boldsymbol{\omega}/|\boldsymbol{\omega}|]$  를 경로의 직선 및 회전 방향 벡터이며,  $\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}]^T = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}}$  이므로, 경로를 추종하기 위한 스피드는 다음과 같아지므로

$$\hat{\mathbf{k}} \cdot [\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega}] = \hat{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}} = \hat{\mathbf{k}}^T \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (4)$$

만약  $\hat{\mathbf{k}}^T \mathbf{J}$  벡터의 모든 원소 값이 너무 작지 않다면 경로는 적당한 관절운동  $\dot{\boldsymbol{\theta}}$  으로 적당한 말단장치의 경로추종 스피드가 가능할 것이다.

또한,  $\hat{\mathbf{k}}^T \mathbf{J}$  는 매니플레이터에 필요한 관절의 토크(torque)를 예측하는 데에도 쓰인다. 즉,  $\mathbf{f} \in \mathbf{R}^m$  이 말단 장치가 대상물에 작용하는 힘 혹은 토크라고 하고  $\boldsymbol{\tau} \in \mathbf{R}^n$  를 관절에 필요한 토크

크라고 하면, 그 둘사이에 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{f} \quad (5)$$

그런데  $\hat{\mathbf{k}}$  가 경로의 진행방향 벡터이므로, 말단장치가 대상물에 가하는 힘이나 마찰력은 대체로  $\hat{\mathbf{k}}$  방향으로 작용할 것이다. 그러므로, 관절에 필요한 토크는  $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \hat{\mathbf{k}}$  에 비례하는 값일 것이고, 만약  $\mathbf{J}^T \hat{\mathbf{k}}$  의 원소값이 매우 크다면 실제로 관절의 토크의 한계로 이는 실행되기 어려울 것이다. 그러므로,  $\hat{\mathbf{k}}^T \mathbf{J}$  를 이용하여 다음과 같은 사항을 알 수 있다.

1. 만약  $\hat{\mathbf{k}}^T \mathbf{J}$  의 원소가 모두 매우 작다면, 이는 매우 큰 관절 운동을 필요로 하므로 피하여야 한다.
2. 만약  $\hat{\mathbf{k}}^T \mathbf{J}$  의 원소가 모두 매우 크다면, 이는 매우 큰 관절 토크를 필요로 하므로 피하여야 한다

그래서 본 논문에서는  $\hat{\mathbf{k}}^T \mathbf{J}$  를 방향성 매니플러빌리티라고 명명하고  $\hat{\mathbf{k}}^T \mathbf{J}$  를 너무 크거나 작지 않도록 한다. 그러나,  $\hat{\mathbf{k}}^T \mathbf{J}$  가 벡터이므로 본 논문에서는 그 원소 중에서 가장 큰 절대값이 너무 크지도 작지도 않도록 한다. 즉,  $\hat{\mathbf{k}}^T \mathbf{J} = [j_1, \dots, j_n]$  일 때  $j_i$  가  $\hat{\mathbf{k}}^T \mathbf{J}$  의 원소 중에서 가장 큰 절대값이라고 하면, 이 값은  $b_{\min} \leq j_i \leq b_{\max}$  을 만족하도록 하는데, 식 (4)에서 말단장치 최소 스피드와 최대허용관절속도로부터 최소값  $b_{\min}$  을 결정하고  $b_{\max}$  는 식 (5)에서 관절의 최대허용토크와 말단장치에 가해지는 최대허용 힘과 토크로서 결정된다. 이를 위하여 식 (6)과 같은 성능함수를 정의하여 쓰는데,  $\hat{\mathbf{k}}^T \mathbf{J}$  가 중간 값을 취하기 위한 방법이다.

$j_x \in [b_{\min}, b_{\max}]$  이면,

$$f(\theta, \mathbf{x}, \mathbf{r}) = \frac{b_{size} - |j_x - b_{mean}|}{b_{size}} \times \text{Re}$$

$j_x \notin [b_{\min}, b_{\max}]$  이면,  $f(\theta, \mathbf{x}, \mathbf{r}) = 0$  (6)

여기서  $b_{size} = (b_{\max} - b_{\min})/2$ ,  $b_{mean} = (b_{\max} + b_{\min})/2$

인데, 만약 주행부 위치  $x$  에서 경로  $r$  이 도달가  
 능하면 식 (6)에서  $Re = 1$  이고 도달 불가능하면  $Re$   
 $= 0$  이다.

이러한 성능함수를 사용하면, 주행 매니플레이터의  
 운동계획문제는 모든 가능한 주행부 위치  $x$  에 대  
 하여, 경로  $r$  의 모든 점을 따라 구하였을 때에,  
 성능함수의 합 즉  $\int_{r(i)} f(\theta, x, r) dr$  을 최대화 하는  
 주행부 위치  $x$  와 그에 따라 나누어진 경로를 구  
 하는 문제로 된다.

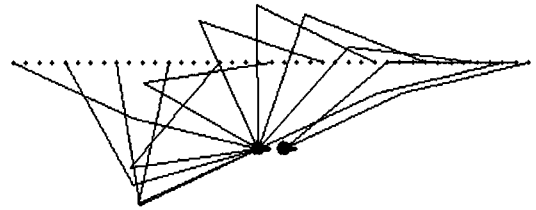
그러나, 이러한 문제의 답은 경로의 각 점에  
 대하여  $f(\theta, x, r)$  을 최대화시키는 로봇 주행부의  
 각 위치로 이루어진 무한개의 경로 분리가 답이  
 되며, 결과적으로 주행부가 움직이며 매니플레이터  
 가 작동하는 경우가 된다. 그러나, 우리의 주행 패  
 러다임은 이러한 경우를 배제하므로, 우선 경로를  
 따라서  $\int_{r(i)} f(\theta, x, r) dr$  을 최대화 하는 하나의 주  
 행부 위치를 찾고, 나머지 남은 경로에 대하여  
 $\int_{r(i)} f(\theta, x, r) dr$  을 최대화 하는 또 하나의 주  
 행부 위치를 찾는 것을 반복하여 모든 경로를 분리하는  
 (동시에 각 분리 경로에 해당하는 주행부 위치를  
 찾는) 준 최적화(Suboptimal)방식을 사용한다.

한편, 실제적으로  $\int_{r(i)} f(\theta, x, r) dr$  의 계산은 불가  
 능하므로, 본 논문에서는 주행부 위치  $x$  와 경로  
 $r$  을 이산화하여  $\sum_{r(i)} f(\theta, x, r)$  을 최대화하도록 한  
 다.

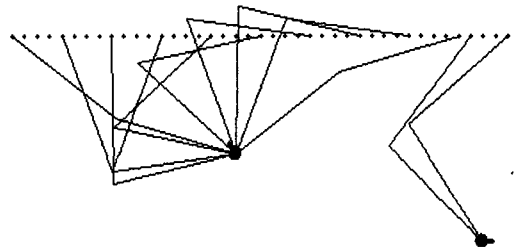
**2.2 예제: 두 회전관절로 된 매니플레이터**

여기서는 앞 절에서 제시된 방법에 따라서 가  
 장 간단한 경우의 경로 분리를 하고 그 결과를 다  
 른 방법에 의한 결과와 비교하여 본다. 즉, Fig. 1 에  
 서와 같은 두 개의 회전관절로 구성된 주행 매니  
 플레이터가 매니플레이터의 도달가능영역보다 조  
 금 긴 직선 경로를 왼쪽에서 오른쪽으로 추종하는  
 경우에, 우선 매니플레이터의 도달가능 조건만으로  
 경로 추종을 계획하면 Fig. 2-(a)와 같이 경로가 분  
 리되고, 도달가능 조건에 더불어 식 (2)와 같은 통  
 상적인 매니플러빌리티를 최대화하는 조건을 사용

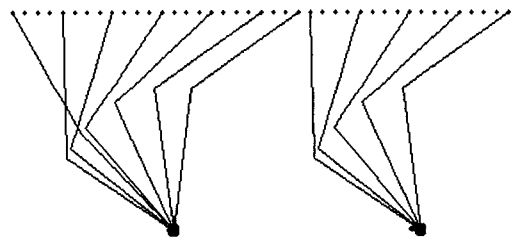
하면 Fig. 2-(b)와 같은 결과를 얻는다.



(a) only with reachability



(b) with reachability and conventional manipulability



(c) with reachability and directional jacobian

Fig. 2 Path division for a two revolute joint robot.

이 두 경우의 그림에서 모두 첫번째의 분리된 경  
 로가 긴 것은 위 절에서 말한 바와 같은 준 최적  
 화방식을 사용하였기 때문이다. 한편, Fig. 1 에 보  
 인 매니플레이터의 자코비안 행렬은 다음과 같으  
 므로

$$J = \begin{bmatrix} -a_1 \sin \theta_1 - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

통상적인 매니플러빌리티는 식 (3)과 같이 되므로,  
 $\theta_2 = 90^\circ$  일 때에 최대값이 된다. 그러므로, Fig. 2-  
 (b)에서 보이는  $\theta_2$  관절 값은 대략적으로  $90^\circ$  이다.

앞 절에서 이야기한 바와 같이 이 각도를 유지하는 모습에서 모든 방향으로의 움직임이 가능하다. 한편, Fig. 2-(c)는 앞절에서 제시된 방향성 매니플러 빌리타를 사용한 방법에 의한 결과로서 Fig. 2-(a) 및 (b)의 경우보다 경로를 따라서 움직이기 편안하게 보이는 매니플레이터의 팔 모양을 유지하도록 주행부의 위치가 경로에서 가장 떨어져 있으며, 또한 주행부의 한 위치에 할당된 경로가 적당히 짧다.

### 3. 실제 적용

#### 3.1 실험용 주행 매니플레이터

본 논문에서 제시된 방법의 실제 적용은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 대형 굴삭기의 붐의 표면에 매우 긴 용접선을 따라서 주행 매니플레이터의 말단장치가 움직이도록 하는 작업이다. 사용된 주행 로봇은 4 개의 바퀴를 가진 미국 iRobot 사의 ATRV-2 이고, 그 위에 부착된 매니플레이터는 미국 Metrica 사의 5 관절 로봇으로서 손목의 Yaw 운동이 없는 형태로 되어 있다. 한편, 로봇 주행부의 위치를 Arcsecond 사의 Constellation 3Di 시스템으로 측정하였는데 이 것은 작업실 안의 4 곳에 부착된 방출기로부터 나오는 레이저를 검출하는 반응기를 로봇 주행부에 설치하여 그 위치를 1 mm 이내의 오차로 계산하는 실내용 GPS 시스템이다. 로봇 단말 장치의 위치는 주행부의 위치에서 매니플레이터의 관절각도와 순기구학을 이용하여 구하였다.

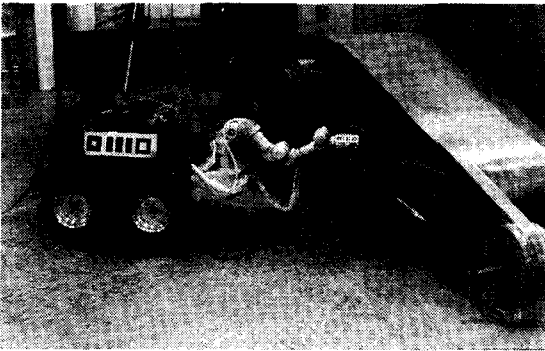
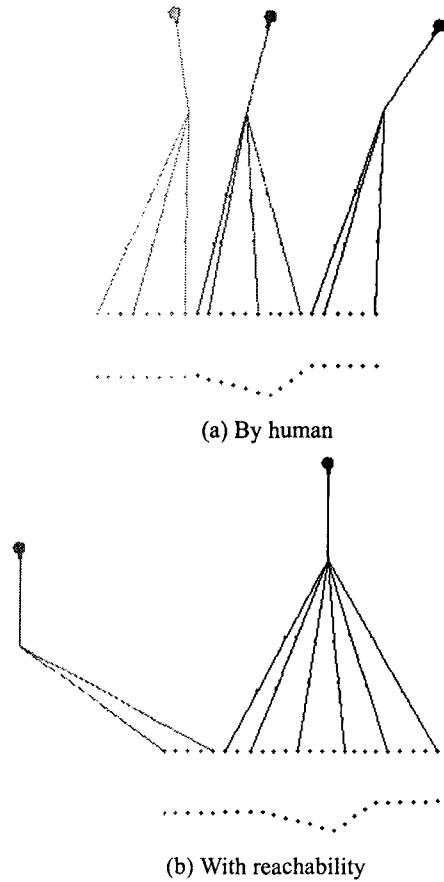


Fig. 3 Experimental robot system and the boom.

#### 3.2 경로 분리

Fig. 3의 붐 표면상에 있는 경로를 실험용 로봇으로 추적하기 위하여 본 논문에서 제시된 방법에 의하여 분리된 경로 및 각 경로에 해당하는 로봇의 형태가 Fig. 4에 그려져 있는데 각 그림에서 아래 부분의 점선이 경로의 정면도이고 위 부분이 평면도로서 경로인 점선과 위에서 본 로봇의 모습과 함께 그려져 있다.



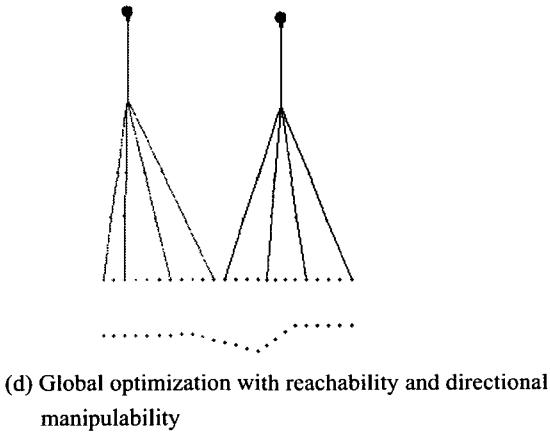
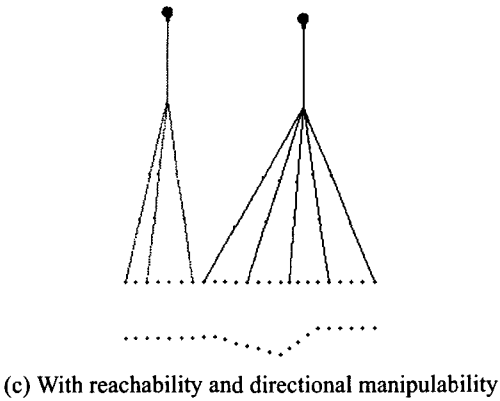


Fig. 4 Path division on the boom.

우선, Fig. 4-(a)는 로봇운전자에게 적당히 경로를 분리하여 운행하도록 하였을 때의 결과로서 경로의 모양과 길이에 자연스럽게 3 부분으로 분리되었는데, 분리된 각각의 경로에 해당하는 로봇 주행부의 위치 및 방향은 맨 위의 작은 원과 원의 꼭지로 표현되어 있다. 한편, 매니플레이터는 Fig. 3에서와 같이 주행부의 앞 부분에 설치되어 있으며, 이 첫번째 관절에서만 Yaw 운동이 가능하고, 손목의 Yaw 운동이 불가능하므로 Fig. 4-(a)에서와 같이 두 번째 관절부터는 위에서 보았을 때 경로로 향하여진 형태로 되어 있다. 세 네 번째의 관절은 아주 작은 원으로 표시되어 있다. Fig. 4-(b)는 도달가능(Reachability) 조건만을 사용하였을 때의 결과인데, 경로를 오른쪽으로부터 추종하기 시작하고 2.1 절에서 언급한 준 최적화방식을 사용하였으므로 오른쪽의 첫 번째로 분리된 경로가 다른 어느 경우보다 가장 길다. Fig. 4-(c)는 도달가능 조건 및

방향성 매니플러빌리티를 남아있는 경로에 대하여 가능한 한 최대화하는 경로를 분리하는 것을 반복하는 준 최적화적으로 사용하였을 때의 결과이고 Fig.4-(d)는 도달가능 조건 및 방향성 매니플러빌리티를 전체 경로에 대하여 최적화시킨 결과로서 분리된 두개의 경로의 영역의 크기가 매우 비슷하여 준 최적화시킨 경우에 비하여 보다 자연스러워 보이나 실제 계산량이 매우 많아 오래 시간이 걸렸다. 이러한 준 최적화와 전체 최적화 (Global optimization) 선택은 주어진 경로의 길이에 따른 계산시간을 고려하여 선택되어야 할 것이다.

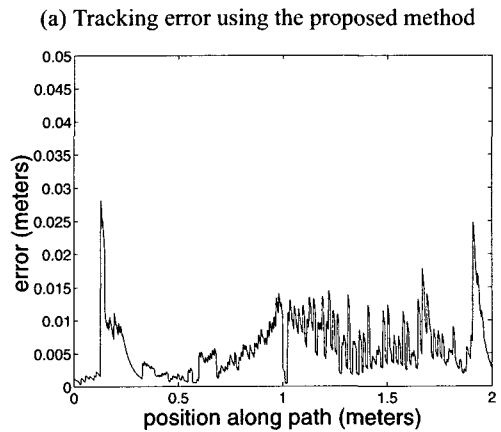
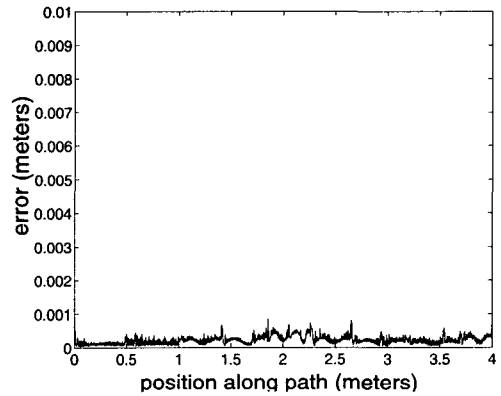


Fig. 5 Position errors for tracking a path on the boom.

한편 Fig. 4-(c)로 분리된 경로를 본 논문에서 제시된 방법에 의하여 추종하여, Fig. 5-(a)와 같이 오차 1mm 이하의 좋은 작업결과를 얻은 것에 비하여,

로봇 주행부와 매니플레이터를 동시에 움직이는 경우에는 경로 추종 오차가 Fig.5-(b)에서와 같이 최대 25 mm 이상으로 기록되어서, 본 논문에서 제시한 방법의 효용성을 보였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 주행 매니플레이터가 매니플레이터만의 작업영역보다 큰 작업을 수행하는 경우의 작업 분리에 관한 방법을 제시하였다. 우선, 로봇 주행부의 정밀도가 매니플레이터의 정밀도보다 매우 떨어진다는 점을 인정하여 기본적인 작업 방법으로서 로봇 주행부가 이동하여 적당한 위치와 자세를 잡은 후에 정지상태에서 매니플레이터만이 작업하고 다시 주행부가 적당한 위치 및 자세를 이룬 정지상태에서 매니플레이터가 작업하는 것을 반복하는 방식을 가정하였다. 이것은 여태까지의 대부분의 연구가 주행부와 매니플레이터가 함께 움직이며 최대한의 잉여자유도를 효과적으로 사용하는 것에 중점을 둔 것에 비하여 매우 실용적인 방법이다.

또한, 이러한 방법하에서 효과적으로 작업을 분기하기 위하여 본 논문에서는 주어진 작업경로를 추종하는 데에 도달가능 조건과 더불어 방향성 매니플러빌리티를 사용할 것을 제안하였다. 통상적인 매니플러빌리티가 모든 방향으로 운동가능하는 것을 측정하는 관절의 자세의 함수인 것에 비하여 방향성 매니플러빌리티는 관절의 자세와 대상 작업경로의 함수로서 보다 작업에 중요하다고 판단된다. 제안된 방법은 가장 간단한 형태의 매니플레이터의 경우에 적용되어 다른 가능한 조건을 사용하였을 때보다 자연스러운 결과를 산출하였으며, 실제 굴삭기의 붐에 용접라인을 따라가도록 하는 주행 매니플레이터의 작업에 투입되어 인간이 하는 하는 경우 등과 비교되어 좋은 결과를 얻었다.

#### 참고문헌

1. Carriker, W., Khosla, P., Krogh, B., "Path planning for mobile manipulators for multiple task execution," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol 7, No. 3, pp.403-408, 1991.
2. Seraji, H., "An on-line approach to coordinated mobility and manipulation," *Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, pp.28-35, 1993.
3. Pin, F., Morgansen, K., Tulloch, F., Hacker, C., Gower, K., "Motion planning for mobile manipulator with a non-holonomic constraints using the FSP," *J. of Robotic Systems*, Vol. 13, No. 11, pp.723-736, 1996.
4. Chen, M., Alzala, A., "A genetic approach to motion planning of redundant mobile manipulator systems considering safety and configuration," *J. of Robotic Systems*, Vol. 14, No. 7, pp.529-544, 1997.
5. Yamamoto, Y., Yun, X., "Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator," *IEEE Trans. Automatic Contro*, Vol 39, No. 6, pp.1326-1332, 1994.
6. Yoshikawa, T., "Manipulability of robotic mechanisms," *Int. J. of Robotics Res.* Vol. 4, No. 1, pp.3-9, 1985.
7. Yoshikawa, T., "Dynamic manipulability of robot manipulators," *J. of Robotic Systems*, Vol. 2, No. 2, pp.113-124, 1985.
8. Miksch, W., Schroeder, D., "Performance-functionall based controller design for a mobile manipulator," *Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, pp.227-232, 1992.
9. Yamamoto, Y., Yun, X., "Effect of the dynamic interaction on coordinated control of mobile manipulators," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol 2, No. 5, pp.816-824, 1996.
10. Huang, Q., Sugano, S., "Motion planning of stabilization and cooperation of a mobile manipulator," *Proc. IROS*, pp.568-575, 1996.
11. Hootsmans, N., Dubowsky, S., "Large motion control of mobile manipulators including vehicle suspension characteristics," *Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, pp.2336-2341, 1991.
12. Yamamoto, Y., Yun, X., "A modular approach to dynamic modeling of a class of mobile manipulators," *Int. J. of robotics and Automation*, Vol 12, No. 2, pp.41-48, 1997.
13. Khatib, O., Yokoi, K., Chang, K., Ruspini, D., Homberg, R., Casal, A., "Vehicle/arm coordination and multiple mobile manipulator decentralized cooperation," *Proc. IROS*, pp.546-553, 1996.

14. Sugar, T., Kumar, V., "Decentralized control of cooperating mobile manipulators," Proc. IEEE Int. Conf. On Rob. and Automation, pp.2916-2921, 1998.
15. Osumi, H., Terasawa, M., Jojiri, H., "Cooperative control of multiple mobile manipulators on uneven ground," Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pp.3198-3203, 1998.
16. <http://www.robosoft.fr/ATRV.html>