

구륜 이동 로봇의 동적 모델링과 관성측정장치를 이용한 경로추적 알고리즘에 관한 연구

(A Study on Dynamic Modeling and Path Tracking Algorithms of Wheeled Mobile Robot using Inertial Measurement Units)

金棋烈*, 林 號**, 朴鍾國*

(Ki yeoul Kim, Ho Im, and Chong Kug Park)

요 약

본 논문에서는 4-구륜 2-자유도 이동 로봇의 체계적인 동적 모델링과 경로설계 및 추적 알고리즘을 제안한다. 실시간에서 이동 로봇의 위치 측정을 위해 관성측정장치중의 3가지 요소를 이용한다. 이러한 장치들은 지구의 회전속도 및 중력가속도 등의 여러 요인으로 인해 초기 오차를 가진다. 그래서 초기오차 모델을 유도하고, 실제 데이터와 유도된 모델의 추정 데이터의 확률적 특성을 분석·비교하여 적합도를 판정하여 사용한다. 관성측정장치의 동작특성은 오차모델과 칼만 필터와 연계된 경우와 배제된 일반적인 경우와 비교한다. 모의실험 결과들은 제안된 경로설계 및 추적 알고리즘이 기존의 방식과 비교하여 보다 유용함을 입증한다.

Abstract

In this paper, we propose the dynamic modeling, path planning and tracking algorithms of 4-wheeled 2-d.o.f.(degree of freedom) mobile robot(WMR). The gaussian functions are applied to design the smooth path of WMR. To calculate the WMR position in real time, we use three components of inertial measurement units(IMU). These units have initial error because of the rotation rate of earth, gravity acceleration and so on. Therefore we derive the initial error model of IMU, and compare the fitness diagnosis about probability characteristics of real data and estimated data. The performance of IMU with error model and Kalman filter is compared to that without filter and error model. The simulation results show that the proposed dynamic model, path planning and tracking algorithms are more useful than the conventional control algorithm.

I. 서 론

산업 현장에서 생산 효율을 높이기 위하여 널리 사용하고 있는 대부분의 산업용 로봇 매니플레이터는

작업공간이 한정되어 있고 작업수행에 많은 제약을 받고있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 이동의 기능을 갖추고, 인간의 간섭 없이 지능적으로 움직일 수 있는 이동 로봇은 잠재적인 능력과 활용범위가 무한히 넓기 때문에 이에 대한 관심과 연구 또한 활발히 이루어지고 있다. 이러한 이동 로봇(Mobile Robot)은 보행용 로봇(legged robot)와 구륜 이동 로봇(wheeled mobile robot, WMR)로 구분된다. 구륜 이동 로봇은 구조가 단순하고 이동속도가 빠르며 작업반경이 넓고 제어가 용이한 장점을 갖고 있다. 특히

* 正會員, 慶熙大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyung Hee Univ.)

** 正會員, 서울技能大學校 電子技術學科
(Dept. of Electronic, Seoul Polytechnic College)

接受日字: 1997年10月24日, 수정완료일: 1998年7月3日

이동 로봇에 매니플레이터를 탑재할 경우 활용범위는 더욱 확대될 수 있다.

이동 로봇의 각각의 형태에 대한 연구는 Yilin Zhao와 L.Bement^[1]에 의하여 이루어 졌으며, 그 외에도 Tournassoud^[2], Thomas^[3] 등에 의하여 이동 로봇의 여러 분야에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 그러나 이동 로봇의 이동을 수행하는 부분이 구동기를 포함한 구동 시스템임에도 불구하고 지금까지의 대부분의 연구는 비전, 음향감지기, 비이콘 등의 감지기들을 이용한 기구학적인 면에 편중되어 왔다. 이러한 현상은 이동 로봇의 정확한 구동을 어렵게 하는 한 요인이 되고있다. 시스템의 효율적인 제어를 위해 구조적 특성을 반영하는 기구학적인 모델을 기초로한 동력학적인 모델링 과정은 필수적이라 할 수 있다.

2-자유도 이동 로봇은 양 구륜의 속도차에 의해 회전하게 되므로 일부 자유도는 종속성분이 되어 한정된 자유도만이 허용되며 다중 폐연쇄(multi-closed chains) 구조의 특성을 가진다. 특히 이동 로봇의 non-holonomic 제약^[1]으로 인해 시스템의 동작을 서술하기 위한 좌표의 수($(x, y, \theta)^T$)가 자유도를 초과하게 되므로 모델링과 제어 방법은 복잡하게 된다. 또한 매개변수의 불확실성에 따른 위치추정의 부정확성과 감지기의 측정잡음을 고려하지 않았으므로 실제 주행에서 많은 문제점을 유발시킬 수 있다.

본 논문에서는 먼저 4-바퀴 2-자유도를 갖는 이동 로봇의 기구학적 구조를 도해하고 각각에 설정된 좌표시스템을 토대로 체계적인 동력학 동작 방정식을 전개한다. 실제 이동 로봇에서 원하는 정확한 경로의 추적을 위하여 본 논문에서는 뉴턴의 평형법칙(Newton's equilibrium laws)과 조인트 커플링 행렬, 링크 자코비안 행렬로 결합된 전파행렬에 의한 이동 로봇의 동력학 방정식을 유도한다. 또한 이동 로봇의 위치 제어를 위해 관성측정장치(Inertial Measurement Unit : IMU)들로 구성된 스트랩다운형 관성항법시스템(Strapdown Inertial Navigation System : SDINS)을 이용하고자 한다. 스트랩다운 관성항법시스템은 대상체의 몸체 좌표계에서 측정된 각속도에 의하여 항법기준 좌표계에 대한 대상체의 자세를 실시간으로 계산함으로써 안정판의 기능을 대체한다^[4]. 현재 대부분의 항공분야에서 적용되고 있는

관성측정장치를 지상에서 행하는 대상체에 직접적으로 사용하려고 한다면, 대상체의 규모와 특성으로 인해 오차문제의 심각성은 더욱 가중될 것이다. 특히 현재의 위치를 구하기 위해 가속계의 이중적분으로 인한 오차누적은 시간에 따라 증가하게 된다. 자이로스코프의 편류(drift)와 바이어스(bias)도 고려되어야 한다^[5].

이러한 문제들을 해결하기 위한 방안으로 본 논문에서는 이동 로봇의 모델링을 수행한 후 이를 관성센서들과 연계하기 위한 방법을 제시한다. 관성센서의 편류와 초기 바이어스 오차에 의한 영향을 보상하기 위해 실제 초기오차 데이터를 바탕으로 수학적 오차모델을 구성한다. 시간의 경과에 따른 시스템의 누적오차를 최소화시키기 위해 Kalman filter를 적용하고 제안된 제어시스템의 동작특성을 평가하고자 한다. 그리고, Kalman filter와 초기오차의 수학적 모델을 연계한 이동 로봇의 경로추적 알고리즘을 구성하여 모의실험을 통해 그 유용성을 입증한다.

II. 이동 로봇의 기구학 모델

1. 좌표계 할당 및 변환행렬

다중폐연쇄(multiple closed-chains)의 특성을 갖는 구륜 이동 로봇의 좌표 할당은 Sheth-Uicker 표기법^[6]을 사용한다. 구륜 이동 로봇은 2개의 전륜이 구동기에 의해 구동되는 구동구륜이며 2개의 후륜은 구륜 이동 로봇의 안정을 위한 보조구륜(caster)이다. 즉, 구륜 이동 로봇의 구조는 그림 1과 같다. 좌표계의 할당은 그림 1에서 보는바와 같이 20개의 좌표계를 할당한다. 그림 1의 좌표계는 다음과 같다.

- F : 외부 기준 좌표계
- B : 이동 로봇의 몸체 중심 좌표계
- C_i : 구륜의 접촉점 좌표계
- W_i : 구륜의 회전 좌표계

바다 좌표계의 Z축은 로봇 이동의 표면에 직교하게 설정하며 로봇 좌표계 B는 바다에 대해 수직인 Z축을 갖는 로봇 본체에 할당한다. 구륜 이동 로봇 좌표계의 동작은 로봇의 동작으로서 해석된다. 그림 1의 구조를 갖는 이동 로봇은 Y방향의 병진운동과 양 구륜의 속도차에 의해 Z축을 중심으로 한 회전운동을 하는 2-자유도를 갖는다.

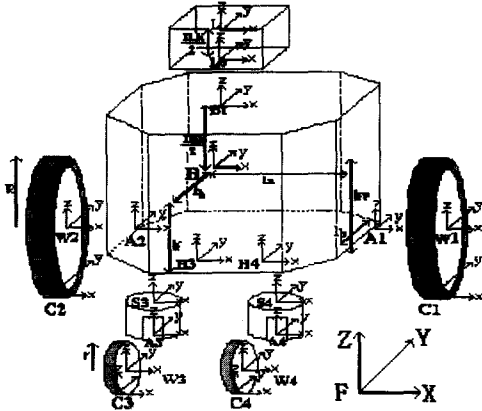


그림 1. 구륜 이동 로봇 구조 및 좌표계 할당
Fig. 1. Configuration and coordinates assignment of WMR.

동차변환 행렬은 할당된 좌표계의 상대적인 위치와 방향을 표시한다. 동차변환 행렬 ${}^A\Pi_B$ 는 좌표축 B에서의 점 B_r 의 좌표를 좌표축 A에서의 점 A_r 로 변환을 나타내며 표기법은 다음과 같다.

$$A_r = {}^A\Pi_B B_r \quad (1)$$

$${}^A\Pi_B = \begin{bmatrix} \cos^A\theta_B & -\sin^A\theta_B & 0 & A_{dBx} \\ \sin^A\theta_B & \cos^A\theta_B & 0 & A_{dBy} \\ 0 & 0 & 1 & A_{dBz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 변환행렬 ${}^A\Pi_B$ 는 좌표계 A에 대한 좌표계 B의 위치와 방향을 나타낸다. 변환행렬 ${}^A\Pi_B$ 는 좌표계 A의 Z축에 대한 회전 ${}^A\theta_B$ 와 치인 ${}^A d_{Bx}, {}^A d_{By}, {}^A d_{Bz}$ 로 표현된다.

자코비안 행렬 J_i 는 구륜 속도 \dot{q}_i 의 선형결합으로 로봇의 속도와 구륜 속도사이의 관계를 나타낸다. 구륜 이동 로봇의 모델링에 필요한 매개변수는 그림 1과 표 3에서 정의한 값을 이용한다. 구륜에 대한 동작방정식은 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{B} \dot{p}_B &= \begin{bmatrix} \cos^B\theta_{C,z} & -\sin^B\theta_{C,z} & B d_{C,y} \\ \sin^B\theta_{C,z} & \cos^B\theta_{C,z} & -B d_{C,x} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ R & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \omega_{W,x} \\ C_1 \omega_{C,z} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -R \sin^B\theta_{C,z} & B d_{C,y} \\ R \cos^B\theta_{C,z} & -B d_{C,x} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \omega_{W,x} \\ C_1 \omega_{C,z} \end{bmatrix} \\ &= J_i \dot{q}_i \quad \text{for } i=1,2 \end{aligned} \quad (3)$$

2. 구륜 이동 로봇의 기구학 해

구륜 이동 로봇은 다중 폐연쇄 구조이기 때문에 각각의 구동구륜에 대하여 모든 구륜의 변수 $\theta_{W,x}, \theta_{W,z}$ 를 다 구동할 필요는 없다. 즉 $C_1 \omega_{C,z}$ 와 $C_2 \omega_{C,z}$ 는 좌우 구륜의 속도차 $A_1 \omega_{W,x} - A_2 \omega_{W,x}$ 에 의해 발생하는 종속적인 비구동 성분(unactuated component)이며, 이동 로봇을 실제적으로 구동시키는 독립적인 구동 성분(actuated component)은 $A_1 \omega_{W,x}, A_2 \omega_{W,x}$ 이다. 따라서 이동 로봇이 기준경로를 추종하도록 하기 위해 독립적인 구동 성분만을 산출해야 한다. 구륜의 동작방정식을 구동 성분과 비구동 성분으로 구분하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{B} \dot{p}_B = J_{iu} \dot{q}_{iu} + J_{ia} \dot{q}_{ia} \quad \text{for } i=1,2 \quad (4)$$

여기서 “a”는 구동되는 부분을 나타내고 “u”는 구동되지 않는 부분을 나타낸다. 식(4)에서 B_{op} 는 행의 수가 열의 수를 초과하는 정방행렬이 아닌 overdetermined 시스템이므로 $[a_a \ \dot{q}_{ia}]$ 에 대한 해를 구하기 위해 pseudo-inverse의 한 방법인 최소-자승해(least-square solution)를 사용한다^[7]. 구동 성분 \dot{q}_a 로 구성된 역기구학 해는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_1 \omega_{W,x} \\ A_2 \omega_{W,x} \end{bmatrix} = \frac{1}{R(l_b^2 + 1)} \begin{bmatrix} -l_a l_b & -l_b^2 - 1 & -l_a \\ l_a l_b & -l_b^2 - 1 & l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_v B_x \\ B_v B_y \\ -B_v B_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

위와 같은 과정을 통해 구륜 이동 로봇의 구동된 역기속도 해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_1 \omega_{W,x} \\ A_2 \omega_{W,x} \end{bmatrix} = \frac{1}{R(l_b^2 + 1)} \begin{bmatrix} -l_a l_b & -l_b^2 - 1 & -l_a \\ l_a l_b & -l_b^2 - 1 & l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{a_x} \\ B_{a_y} \\ B_{a_z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

4-구륜 2-자유도의 구륜 이동 로봇에 대한 모든 구륜의 자코비안 행렬은 비특이(nonsingular)하기 때문에 각각의 구동된 구륜의 속도 및 가속도에 대하여 독립된 방정식에 의해 구동된 역기구학 해를 구한다.

측정된 전향기구학 해는 구륜의 속도로부터 로봇의 몸체 속도를 구한다. 구륜의 속도 ω 는 기준경로가 주어질 경우 이동 로봇이 기준경로를 추적하기 위해 요구되는 항을 의미한다. 엔코더(encoder)에 의해 측

정될 수 있는 성분은 구륵의 속도 $A_1\omega_{W_1x}$ 와 $A_2\omega_{W_2x}$ 이며 $\bar{c}_1\omega_{C_1z}$ 와 $\bar{c}_2\omega_{C_2z}$ 는 엔코더에 의해 측정될 수 없는 성분이다. 따라서 검출된 구륵 속도로부터 본체의 속도를 산출하기 위해 구륵의 속도를 감지 성분(sensed component) "s"와 비감지 성분(not-sensed component) "n"으로 구분한다.

$$\bar{B}\dot{P}_B = J_{is}\dot{q}_{is} + J_{in}\dot{q}_{in} \text{ for } i=1, 2 \quad (7)$$

식(7)은 열의 수가 행의 수를 초과하는 underdetermined 시스템이므로 역기구학 해를 구하는 과정과 같이 pseudo-inverse의 한 방법인 최소-자승해를 적용한다^[7]. 측정된 전향기구학 해는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \bar{B}v_{Bx} \\ \bar{B}v_{By} \\ \bar{B}\omega_{Bz} \end{bmatrix} = \frac{R}{2l_a} \begin{bmatrix} -l_b & l_b \\ -l_a & -l_a \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1\omega_{W_1x} \\ A_2\omega_{W_2x} \end{bmatrix} \quad (8)$$

위와 같은 방법을 사용하여 구륵 이동 로봇트의 측정된 전향기속도 해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \bar{B}v_{Bx} \\ \bar{B}v_{By} \\ \bar{B}\omega_{Bz} \end{bmatrix} = \frac{-R \begin{bmatrix} -l_b l_a & l_b l_a \\ l_b^4 + 3l_b^2 + 2l_b^2 l_a^2 + l_a^4 + 2l_a^2 & l_b^4 + 3l_b^2 + 2l_b^2 l_a^2 + l_a^4 + 2l_a^2 \\ l_a(l_b^2 + l_a^2 + 2) & -l_a(l_b^2 + l_a^2 + 2) \end{bmatrix}}{2(l_b^4 + 3l_b^2 + 2l_b^2 l_a^2 + l_a^4 + 2l_a^2)} \begin{bmatrix} A_1\omega_{W_1x} \\ A_2\omega_{W_2x} \end{bmatrix} \quad (9)$$

3. 구륵 이동 로봇트의 가제어성

1차 Lie-Bracket 이론에 근거하여 이동 로봇트는 다음의 일반적인 non-holonomic system으로 표현된다^[8].

$$\dot{x} = f_1(x)u_1 + f_2(x)u_2 + \dots + f_m(x)u_m = F(x)u \quad (10)$$

기구학 방정식에서 기준좌표계에 대한 본체의 속도를 구륵 이동 로봇트의 구륵 속도로 표현할 수 있다. 제어점(controlled point)은 질량 중심 좌표계에서 l_b 만큼 떨어진 구동구륵 사이에 설정된다.

$${}^F\dot{P}_B = \frac{R}{2l_a} \begin{bmatrix} -l_b \cos^F\theta_B + l_a \sin^F\theta_B & -l_b \cos^F\theta_B + l_a \sin^F\theta_B \\ -l_b \sin^F\theta_B - l_a \cos^F\theta_B & l_b \sin^F\theta_B - l_a \cos^F\theta_B \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1\omega_{W_1x} \\ A_2\omega_{W_2x} \end{bmatrix} \quad (11)$$

식(11)의 열벡터는 선형 독립적이므로 각각의 열벡터를 벡터 필드 f_1, f_2 로 간주할 수 있다. 이때 Lie-Bracket $[f_1, f_2]$ 를 구하면 다음과 같다.

$$[f_1, f_2] = \begin{bmatrix} 2l_b \cos^F\theta_B \\ 2l_b \sin^F\theta_B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$[f_1, f_2] = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2$ 를 만족하는 스칼라함수가 존재하지 않으므로 식(11)로 표현되는 시스템은 적분가능하지 않다. 즉 non-holonomic 제약을 가지는 시스템이다. 그리고 Lie-Bracket Completion 행렬을 구성하면 다음과 같다.

$$C = (f_1, f_2, [f_1, f_2]) \quad (13)$$

위의 행렬이 비특이(nonsingular)하고 $\text{rank} [f_1, f_2] = \text{rank} [f_1, f_2, [f_1, f_2]] = 3$ 이므로 비선형시스템인 구륵 이동 로봇트는 가제어하다.

III. 이동 로봇트의 동역학 모델

이동 로봇트 제어의 목적은 지시된 기준경로(reference path)에 최단시간내에 수렴하여 추적하는 것이다. 이를 수행하기 위한 구륵 이동 로봇트의 구동토크를 산출하기 위해 체계적이고 정교한 동역학 모델이 요구된다. 이동 로봇트의 힘/토크 발생 요인에는 관성(inertial), 중력(gravitation), 구동기 토크(actuator torque), 점성마찰(viscous friction), 그리고 접촉마찰력(contact-frictional force)등이 있다. 본 논문에서는 이러한 요소들을 선형/회전 벡터로 수식화하여 힘/토크 전파와 뉴턴의 평형법칙을 이용하여 동역학 모델을 유도한다. 이때 마찰을 법선력과 결합으로 분석한다. 역동역학은 목적동작을 수행하는데 필요한 구동토크를 산출한다. 구륵 이동 로봇트의 위치, 속도, 가속도 및 힘/토크는 이동 로봇트의 병진운동과 회전운동을 서술하기 위해 (6×1)벡터로 나타낸다.

1. 힘/토크의 수식화

구륵 이동 로봇트에 작용하는 힘/토크 요소는 관성, 중력, 구동력, 점성마찰, 외부접촉력으로 구분될 수 있으며 각각의 요소를 밀침자 i, g, a, v, e 로 표기한다. 본체와 부하, 구륵에 대한 관성 벡터는 다음과 같다.

$${}^B f_{iB} = \begin{bmatrix} -m_B \bar{B} a_{Bx} \\ -m_B \bar{B} a_{By} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I_{Bz} \bar{B} \alpha_{Bz} \end{bmatrix} \quad L f_{iL} = \begin{bmatrix} -m_L \bar{L} a_{Lx} \\ -m_L \bar{L} a_{Ly} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I_{Lz} \bar{L} \alpha_{Lz} \end{bmatrix}$$

$${}^W_j f_{jW_j} = \begin{bmatrix} -m_W \bar{W}_j a_{W_jx} \\ -m_W \bar{W}_j a_{W_jy} \\ -m_W \bar{W}_j a_{W_jz} \\ -I_{W_x} \bar{W}_j \alpha_{W_jx} \\ -I_{W_y} \bar{W}_j \alpha_{W_jy} - (I_{W_x} - I_{W_y}) \bar{W}_j \alpha_{W_jy} \bar{W}_j \alpha_{W_jx} \\ -I_{W_z} \bar{W}_j \alpha_{W_jz} - (I_{W_y} - I_{W_x}) \bar{W}_j \alpha_{W_jx} \bar{W}_j \alpha_{W_jy} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 $i=1,2,3,4$ $j=1,2$ $k=3,4$ 이다. m_b, m_w, m_l 은 각각 본체와 구륜, 부하의 질량을 나타내며 보조구륜의 관성은 무시한다. I_w 는 구륜의 관성 모멘트를 나타낸다. 구동기에 의해 구륜에 작용되는 구동토크는 다음과 같다.

$${}^W_i f_{aW_i} = -{}^A_i f_{aB} = [0 \ 0 \ \beta \tau_j \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (15)$$

강건 링크에 적용되는 (6×1) 의 구동 힘/토크 벡터는 구륜 1,2에 부착된 구동기가 X 축 방향에 대해 토크를 발생하게 되며 이는 기어의 비율 β 에 비례한다. 구륜과 주행면사이의 접촉마찰력은 다음과 같이 표현된다.

$${}^C_i f_{eW_i} = [f_{xi} \ f_{yi} \ f_{zi} \ \tau_{xi} \ \tau_{yi} \ \tau_{zi}]^T \quad (16)$$

외부접촉마찰력은 역동역학에 의해 계산되는 미지 변수로 간주된다. 구륜이 바다와 접촉할 때 접촉된 좌표 시스템에서 접촉하는 바퀴에 작용하는 주위환경 접촉 힘/토크는 4개의 바퀴에 대하여 각각 구한다. 점성마찰력은 속도에 비례하는 요소로써 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{B} f_{vB} = [\mu_{Bx} \bar{B} v_{Bx} \ -\mu_{By} \bar{B} v_{By} \ 0 \ 0 \ 0 \ -\mu_{Bz} \bar{B} v_{Bz}]^T \quad (17)$$

여기서 μ_{bi} 는 i 축에 대한 점성마찰계수이다.

2. 이동 로봇트의 동력학 동작방정식

수식화된 힘/토크는 링크와 관절을 통하여 본체에 전달된다. 임의의 링크에서 힘/토크는 관절에서 관절

커플링 행렬을 통하고 링크에서는 링크 자코비안 행렬을 통하여 전파된다. 전파행렬에 의해 전파되는 힘/토크 ${}^M(M) f_M$ 에 평형법칙을 적용하기 위해 메인링크의 질량중심좌표계 $M(M)$ 을 공통좌표시스템으로 선택한다. 이동 로봇트의 각각의 링크에서 발생한 힘/토크는 링크와 관절을 통하여 이동 로봇트의 몸체좌표로 전파되며 전파된 모든 힘/토크의 합은 뉴턴의 힘의 평형법칙에 의해서 '0'이된다. 즉, 다음 식으로부터 이동 로봇트의 힘/토크 동작 방정식이 구해진다.

$$\sum_X \sum_S ({}^M(M) P_{N(S,X)} N(S,X) f_{SX}) = 0 \quad (18)$$

여기서 X 는 임의의 링크를, S 는 임의의 힘/토크를 나타내며 $N(S,X)$ 는 임의의 힘/토크가 발생한 임의의 링크 X 의 좌표계를 나타낸다. 동력학 모델의 구성원인 모든 힘/토크 (f_i : 관성, f_e : 주위환경 접촉력, f_a : 구동력, f_v : 점성 마찰력)는 이동 로봇트의 몸체 좌표시스템으로 전파되고, 전파된 모든 힘/토크의 합은 식(18)로 부터 6개의 벡터요소로 구성된 제 1 힘/토크 동작방정식을 구한다.

$$\begin{aligned} & {}^B P_{W_1} W_1 f_{iW_1} + {}^B P_{G(W_1)} G(W_1) f_{iW_1} + {}^B P_{C_1} C_1 f_{eW_1} + {}^B P_{A_1} A_1 f_{aB} \\ & + {}^B P_{W_2} W_2 f_{iW_2} + {}^B P_{G(W_2)} G(W_2) f_{iW_2} + {}^B P_{C_2} C_2 f_{eW_2} \\ & + {}^B P_{A_2} A_2 f_{aB} + {}^B P_{W_3} W_3 f_{iW_3} + {}^B P_{C_3} C_3 f_{eW_3} + {}^B P_{C_4} C_4 f_{eW_4} \\ & + {}^B P_C^L L f_{iL} + {}^B P_C^C C f_{gL} + {}^B f_{iB} + {}^B f_{vB} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

이식은 마찰계수, 점성마찰력, 관성력과 주위환경 접촉력의 함수로서 이루어진 6개의 제 1 힘/토크 동작 방정식은 다음과 같은 간략화된 동력학 형태로 표현할 수 있다.

$$A \cdot \tau_a + B \cdot f_e + C \cdot \bar{B} a_B = b \quad (20)$$

여기서 A 는 (6×2) , B 는 (6×6) , C 는 (6×3) , b 는 (6×1) 행렬이다. 여기서 τ_a 는 구동기토크를, f_e 는 외부환경접촉력을, $\bar{B} a_B$ 는 구륜 이동 로봇트 본체의 가속도를 나타낸다.

3. 구동된 역동력학의 해

구륜 이동 로봇트가 원하는 목적경로를 추적하기 위해 토크 τ_a 를 구하는 것이 필요하다. 즉, 구동된 역동력학 해를 구하고자한다. 식 (20)의 동력학 동작방정

식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_i \cdot x_i = b_i \tag{21}$$

여기서 $A_i = [A \ B]$, $x_i = [\tau_a^T \ f_e^T]^T$, $b_i = b - C^B a_B$ 이다. A_i 는 열(column)의 수가 행(row)의 수를 초과하는 underdetermined 시스템이므로 $A_i \cdot x_i - b_i = 0$ 를 만족하는 해 x_i 는 무한히 많다. 가중 최소 노름 해 (weighted minimum norm solution)를 이용하여 $\|x_i\|$ 를 최소화하는 해, 즉 구동토크와 외부 접촉력을 얻을 수 있다.

$$x_i = W^{-1} A_i^T [A_i W^{-1} A_i^T]^{-1} b_i \tag{22}$$

여기서 W 는 가중 행렬(weighting matrix)이다.

IV. 스트랩다운 관성항법장치

관성항법장치는 일반적으로 김블 시스템과 스트랩다운 시스템으로 구분할 수 있다. 김블 관성항법장치는 주로 레이트(rate) 적분자이로를 사용하며 자이로와 가속도계가 부착된 안정판은 3~4개의 김블로 안정화시켜 물리적인 항법기준좌표계를 유지한다^{[4] [9]}. 스트랩다운 관성항법장치는 자이로와 가속도계가 본체에 직접 부착된다. 그러므로 자이로는 동작범위가 넓은 동조자이로가 주류를 이루며 근자에는 링레이저 자이로스코프도 많이 채택하고 있다. 이장치는 기존의 기계적 안정판을 사용하는 김블 시스템에 비하여 해석적 안정판을 사용하는 방법으로 기계적 장치가 극소화되어 기계적 구조가 단순하지만 탑재 컴퓨터에 보다 많은 기능이 요구되어 효율적인 계산 알고리즘을 필요로 한다. 본 연구에서는 저급의 스트랩다운 관성항법장치를 사용하여 보다 정확한 위치를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시한다.

1. 오차의 영향과 오차모델

관성항법장치에서 사용되는 관성센서의 단점은 입력을 가하지 않는 상태(zero input or velocity)에서 출력을 보인다는 것이다. 이는 지구의 자전을, 중력 가속도 등에서 그 원인을 찾을 수 있다. 그러므로 관성센서의 입력을 가하지 않는 초기상태의 출력 데이터로부터 오차모델을 구성하여 관성센서에 존재하는 오차를 보정한다. 본 논문에서는 AHRS-C303 관성항법시스템으로부터 측정된 초기오차 데이터를 사용하여 오차모델을 구성한다. 그 실험장치는 다음 그림 2와 같다.

약 5만개 정도의 데이터를 이용하여 보다 정확한 모델을 구현하려 하였으나 프로세서의 용량으로 인해 1만개의 데이터를 이용하였다. 수집된 관성센서의 초기오차 데이터는 비선형적인 분포를 이루고 있다. 그러므로 오차모델을 구성하기 위한 수학적 방법으로 비선형 회귀 모델(nonlinear regression model)을 사용한다. 이는 비선형 회귀식에 있어서 최소 자승의 추정방법을 이용하는데, 구체적인 방법으로는 가우스-뉴턴 방법을 이용한다^{[10] [11]}. 이 방법은 선형인 부분을 내포하고 있는 비선형 회귀모델 식으로 근접하기 위해 테일러 급수 전개를 이용한다. 비선형인 경우의 모델식은 다음과 같다.

$$Y_i = a_0 + a_1(1 - e^{-\frac{t_i}{a_2}}) \tag{23}$$

여기서 a_0, a_1, a_2 는 매개변수, t_i 는 데이터의 샘플링 시간이다. 식(54)에서 매개변수 a_0 는 수렴하는 바이어스의 오차와 반복 값의 수렴을 위함이며, a_1 와 a_2 는 시간 t_i 에 대한 반복 값의 수렴을 위해 정의한다. 오차모델의 매개변수를 결정하기 위해 최소자승법을 사용한다. 실제 데이터와 추정 회귀계수 모델의 차이를 연속적인 최소자승 기준범위내로 수렴할 때까지 반복한다. 이러한 기준이 만족되면 개정된 회귀계수가 오차모델의 매개변수로 결정된다.

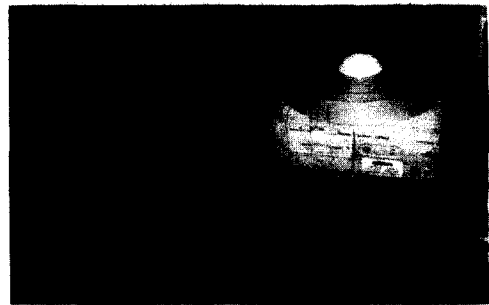


그림 2. AHRS-C303 관성항법시스템
Fig. 2. AHRS-C303 Inertial navigation system.

2. 오차모델의 적합성 진단

구성된 오차모델에 대한 적합성 여부는 실제 데이터에 대한 확률적 성질과 오차모델에 의한 추정데이터 값들의 확률적 성질을 비교하여 판단한다. 이는 각각의 공분산(covariance), 평균(mean), 그리고 표준편차(standard deviation) 등을 비교, 분석하는 것이다. 오차모델은 이러한 적합성 진단을 거친 후에서야 비로

소 의미를 부여할 수 있다.

본 논문에서 유도한 최종 초기오차모델의 계수는 표 1과 같다. 그 유도과정은 그림 3, 4, 5에서와 같이 모두 10회 이내에서 적절한 의미를 갖는 계수로의 수렴을 보인다.

표 1. 결정된 오차모델의 매개변수
Table 1. Parameters of error model.

오차모델 \ 매개변수	a(0)	a(1)	a(2)
X-축 가속도계	-0.0632	0.0174	-424.0503
Y-축 가속도계	-0.2394	-1.9737	-5902.7
자이로스코프	-0.0579	0.0526	40.1735

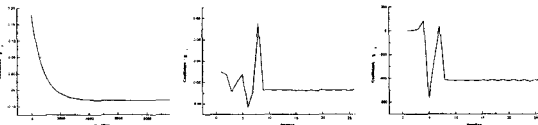


그림 3. X-축 가속계의 오차모델 계수 g(0), g(1), g(2)
Fig. 3. Error model coefficients of X-accelerometer

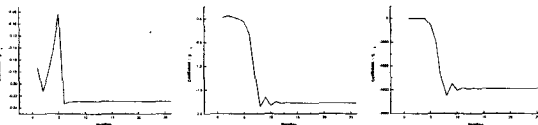


그림 4. Y-축 가속도계의 오차모델 계수 g(0), g(1), g(2)
Fig. 4. Error model coefficients of Y-accelerometer.

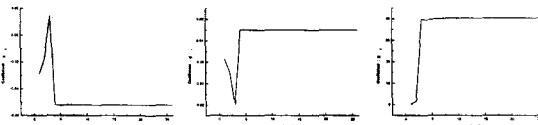


그림 5. 자이로스코프의 오차모델 계수 g(0), g(1), g(2)
Fig. 5. Error model coefficients of gyroscope.

표 2. 데이터에 대한 확률적 성질의 비교와 분석

Table 2. Statistical properties analysis of data.

확률적 특성		공분산	평균	표준 편차
실제 데이터	X-축 가속도계	0.0023	-0.0343	0.0476
	Y-축 가속도계	0.003	-0.1521	0.0552
	자이로스코프	6.4304×10^{-4}	-0.0064	0.0254
오차 모델	X-축 가속도계	2.262×10^{-5}	-0.0365	0.0048
	Y-축 가속도계	0.0025	-0.1534	0.0504
	자이로스코프	0.0023	-0.0605	0.0478

표 2의 확률적 특성 결과는 실제 초기오차 데이터와 오차모델의 데이터의 적합성을 보여주고 있다.

3. 관성센서의 출력방정식

사용된 AHRS-C303 관성항법시스템은 6개의 자유도로 구성되어 있다. 즉 x, y, z 방향의 선가속도와 각 3축의 회전가속도를 독립적으로 측정할 수 있다. 그러나 본 이동 로봇트는 한정된 평면을 움직이므로 x와 y 방향의 선가속도를 측정할 수 있는 2개의 가속도계와 z 축을 기준으로한 회전가속도를 측정할 수 있는 1개의 자이로스코프의 3개의 요소만 선택한다. 이동 로봇트의 위치를 표현하는 각 변수를 이용하여, 관성센서들의 출력방정식을 기술하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 A_x(k) &= \cos\phi(k) \cdot \cos\theta(k) \cdot a_x(k) + \cos\phi(k) \cdot \sin\theta(k) \cdot a_y(k) \\
 &\quad - \sin\phi(k) \cdot g(k) + n_x \\
 A_y(k) &= [\sin\theta(k) \cdot \sin\phi(k) \cdot \cos\phi(k) - \cos\theta(k) \cdot \sin\phi(k)] a_x(k) \\
 &\quad + [\sin\theta(k) \cdot \sin\phi(k) \cdot \cos\phi(k) - \cos\theta(k) \cdot \sin\phi(k)] a_y(k) \\
 &\quad + \sin\theta(k) \cdot \sin\phi(k) \cdot g(k) + n_y \\
 \alpha_z &= \dot{\theta} + n_z
 \end{aligned} \tag{24}$$

여기서 n_x, n_y, n_z 는 관성센서의 측정잡음이다. 식(24)의 출력방정식에서 사용하는 가속도 a_x, a_y 는 동작방정식의 해로부터 얻어지는 가속도를 이용한다. A_x, A_y, α_z 는 각각의 x, y, z 축상의 오일러각 θ, ϕ, φ 를 통한 회전 변환에 의해서 얻어진 가속도이므로 실제 이동 로봇트의 가속도가 되는 것이다.

V. 경로 추적(Path Tracking) 알고리즘

1. Dead-Reckoning 알고리즘

구륜 이동 로봇트는 non-holonomic 제약조건들을 갖기 때문에 실시간에서 위치제어를 위하여 dead-reckoning 알고리즘^[12]을 사용한다. 이 알고리즘은 구륜 이동 로봇트가 정지 상태이거나 혹은 초기속도를 알 때 시작된다. 현재 구륜 이동 로봇트의 위치는 전 단계 샘플링 순간에서의 위치와 현재 샘플링 순간에서의 구륜 이동 로봇트 본체속도 향으로 표현한다.

$${}^F P_B(nT) = {}^F P_B(n-1)T + \frac{T}{2} M [(n-1)T] \cdot \left(\bar{v}_B[(n-1)T] + \bar{v}_B(nT) \right) \tag{25}$$

측정된 전향기구학 해를 식(25)에 대입하여 확장, 간략화 하면 현재의 방향 ${}^F \theta_B(nT)$ 의 직접 계산과 현재

의 전이 ${}^F p_{B_x}(nT), {}^F p_{B_y}(nT)$ 가 순차적으로 계산된다.

$${}^F \theta_B(nT) = \frac{R}{2I_a} ({}^A \theta_{W_{1x}}(nT) - {}^A \theta_{W_{2x}}(nT)) + {}^F \theta_B(o) \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} {}^F p_{B_x}(nT) \\ {}^F p_{B_y}(nT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^F p_{B_x}((n-1)T) \\ {}^F p_{B_y}((n-1)T) \end{bmatrix} + \frac{T}{2} \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta \\ S\theta & C\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_B((n-1)T) + \bar{p}_B(nT) \end{bmatrix} \quad (27)$$

여기서 $C\theta = \cos {}^F \theta_{B_z}((n-1)T)$, $S\theta = \sin {}^F \theta_{B_z}((n-1)T)$, ${}^F \theta_B(o) = {}^A \theta_{W_{2x}}(o) - {}^A \theta_{W_{1x}}(o)$ 이다. 식(26)에서 나타내는 구륜 이동 로보트의 방향은 직접 계산되는 holonomic 제약^[11] 조건인 반면에 식(27)에서 나타내는 구륜 이동 로보트의 전이는 직접 구할 수 없는 non-holonomic 제약^[11] 조건이다. 구륜 이동 로보트의 전이에 대한 순차계산의 오차는 센서잡음, 구륜의 미끄러짐, 비-평행 평면 등에 의해 축적되어 나타난다. 반면에 holonomic 제약조건의 직접 계산에서는 이러한 오차가 발생하지 않는다.

2. Discrete Linear Kalman Filter

Kalman filter는 시스템의 잔차(residual)의 변동을 수용 가능한 영역에서 일어나는지를 지속적으로 확인하여 실행한다^{[13][14]}. 만일 잔차가 수용 가능한 영역을 벗어나면 항법오차가 발생한다. 이때 항법오차를 줄이기 위해 공분산(covariance)을 크게 변경한다. 이는 Kalman 이득값을 작게 하여 오차의 증가를 둔화시킨다. 관성센서의 출력은 Kalman filter의 입력으로 작용한다. 동시에 Kalman filter의 출력은 이동 로보트의 기구학의 속도입력으로 작용한다. 관성센서가 가지는 측정잡음(measure noise)은 가우스 백색 잡음(white gaussian noise)의 특성을 지닌다. 이는 Kalman filter에서 처리된다. 이동 로보트의 모델링과 관성센서의 출력방정식을 이용하여 Kalman filter의 상태방정식과 출력방정식을 다음과 같이 표현한다.

$$x_k = A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \quad (28)$$

$$y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k \quad (29)$$

여기서
$$A_k = \begin{bmatrix} \bar{v}_{B_{x_1}} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{v}_{B_{y_1}} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{v}_{B_{z_1}} \end{bmatrix}, \quad B_k = \begin{bmatrix} u_{x_k} & 0 & 0 \\ 0 & u_{y_k} & 0 \\ 0 & 0 & u_{z_k} \end{bmatrix}$$

$$C_k = \begin{bmatrix} A_x(k) & 0 & 0 \\ 0 & A_y(k) & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_x(k) \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad w_k = N(0, Q_k) \text{는 측}$$

정잡음의 정규분산, $v_k = N(0, R_k)$ 는 공정잡음의 정규분산이다.

상태추정의 개선단계는 다음과 같다.

$$\hat{x}_k(-) = A_{k-1}\hat{x}_{k-1}(+) + B_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \quad (30)$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + L_k [y_k - C_k \hat{x}_k(-) - D u_k(-)] \quad (31)$$

오차공분산 개선단계는 다음과 같다.

$$P_k(-) = A_{k-1}P_{k-1}(+)A_{k-1}^T + BQ_{k-1}B^T \quad (32)$$

$$P_k(+) = [I - L_k C_k]P_k(-) \quad (33)$$

위 개선단계의 Kalman 이득 행렬은 다음과 같다.

$$L_k = P_k(-)C_k^T [C_k P_k(-)C_k^T + R_k]^{-1} \quad (34)$$

여기서 R_k 는 센서잡음분산이다.

3. 기존 기구학 궤환제어 알고리즘

측정된 구륜의 속도에 대한 정보로부터 바닥 기준좌표계에 대한 구륜 이동 로보트 본체의 위치를 파악하기 위하여 dead-reckoning 알고리즘이 사용된다. 시간 nT 에서 구륜의 위치 $q_s(nT)$ 와 속도 $\dot{q}_s(nT)$ 는 구륜의 센서 즉, shaft encoders로부터 구할 수 있다. 로보트 위치에 대한 오차는 다음과 같다.

$${}^F e_B(nT) = {}^F p_{r,B}(nT) - {}^F p_B(nT) \quad (35)$$

여기서 밑첨자 r 은 기준경로를 의미한다. 위치에 대한 오차와 오차의 변화율에 전향이득 K_p 와 K_d 를 곱한 값은 제어입력 ${}^F U_B$ 로서 다음과 같이 표현된다.

$${}^F U_B = K_p {}^F e_B(nT) + K_d ({}^F e_B(nT) - {}^F e_B((n-1)T)) \quad (36)$$

구륜 이동 로보트의 궤환제어 시스템에서 오차와 오차의 변화율의 합은 역동작행렬에 의하여 구륜 이동 로보트의 본체 좌표계로 변환되어지고 원하는 구륜 이동 로보트의 구동속도로 변환된다.

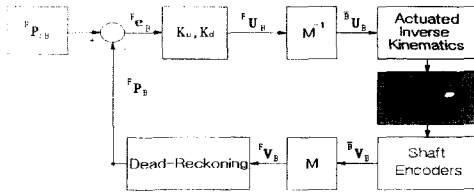


그림 6. 기존 기구학 제어 알고리즘
Fig. 6. Conventional kinematic feedback control algorithm.

4. 제안된 동력학 경로 추적 알고리즘

4-구륜 2-자유도 구륜 이동 로봇트는 수학적으로 모델링되지 못한 요소, 측정오차, 잡음 및 시스템의 불확실성(uncertainty) 등으로 인하여 기준경로에서 이탈될 수 있다. 본 제어 알고리즘의 목적은 우선 오차를 최소화하는 완만한 기준경로를 설계하고 이를 이동 로봇트가 급격한 진동 없이 신속하게 추적할 수 있도록 하는 것이다. 제어 시스템의 구성은 그림 7과 같다.

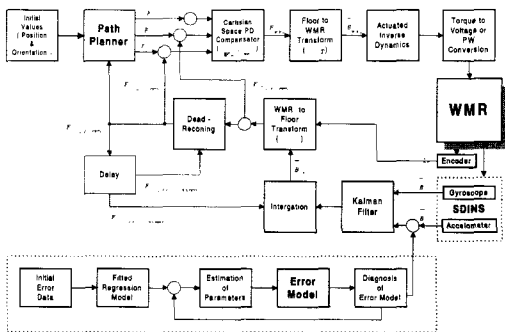


그림 7. 제안된 동력학 경로 추적 알고리즘
Fig. 7. Proposed dynamic path tracking algorithm.

경로설계기로부터 초기위치를 고려한 이동 로봇트가 추적해야할 기준경로가 생성된다. 동시에 실제 이동 로봇트의 현재위치와 측정된 실제위치를 비교하여 추적에 필요한 제어입력은 다음과 같이 결정된다.

$$F_{UB}(nT) = F_{a,B}(nT) + K_p(F_{p,B}(nT) - F_{p,B}(nT)) + K_v(F_{v,B}(nT) - F_{v,B}(nT)) \quad (37)$$

여기서 전항이득 K_p 와 K_v 는 기준경로에 대한 과도응답이나 떨림을 없애고 구륜 이동 로봇트의 빠르고 안정된 추적응답을 갖기 위해 선택되는 값으로서, 실험 결과에 의해 구한다^[15]. 식(37)의 제어입력은 바다좌표계를 기준으로 함으로 구동토크를 결정하기 위해 이동 로봇트의 몸체좌표계로 변환된다.

VI. 모의실험

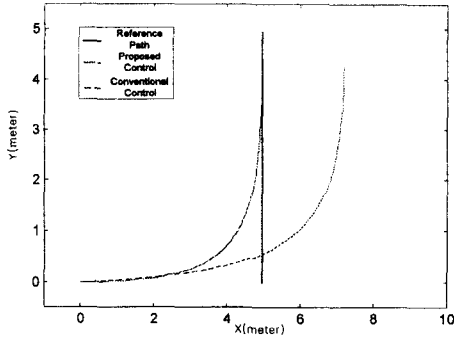
제안된 이동 로봇트의 모델과 경로추적 알고리즘의 유효성을 증명하기 위해 모의실험을 수행한다. 기준경로는 네 가지의 경우로 나누어 설계한다. 경우 1(case 1)은 벽면과 평행한 직선경로이고, 경우 2(case 2)는 주기적인 변화를 가지는 원형경로이고, 경우 3(case 3)은 90° 정도의 급격한 경로변화를 포함하는 사각형 기준경로이다. 경우 4(case 4)의 장애물회피를 위한 기준경로는 가우스함수를 이용하여 설계하였다. 이러한 기준경로는 바다좌표계에 대한 이동 로봇트 몸체좌표계를 기준으로 주어진다. 모의실험에서 사용된 4-구륜 2-자유도 이동 로봇트의 매개변수는 표 3과 같다.

표 3. 구륜 이동 로봇트의 재원과 매개변수
Table 3. Parameter and specification of WMR.

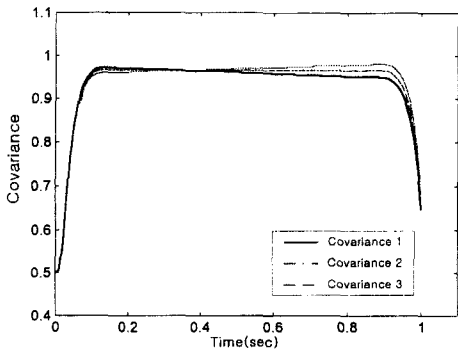
기호	값	단위	의미
$l_{LH}/2$	0.25	m	부하 높이/2
$l_{BH}/2$	0.3	m	몸체 높이/2
l_a	0.32	m	몸체 넓이/2
l_b	0.3	m	구동구륜 y방향 전치
l_c	0.3	m	구동구륜 x방향 전치
l_f	0.22	m	보조구륜 z방향 전치
l_p	0.24	m	구동구륜 z방향 전치
l_t	0.02	m	보조구륜 조향 링크 길이
R	0.1	m	구동구륜 반경
r	0.03	m	보조구륜 반경
m_B	120	kg	본체 질량
m_w	1.55	kg	구동구륜 질량
m_L	0~20	kg	부하 질량

이동 로봇트의 초기위치는 $(x, y, \theta) = (0, 0, 0^\circ)$ 로 가정하고, 기준경로의 목적위치는 $(x, y, \theta) = (5, 4, 5, 90^\circ)$ 이다. 목적 위치까지의 기준경로는 가상 벽면과 평행한 직선경로를 설정하였다. 이때의 경로추적, 속도제어, 구동토크 및 경로오차는 다음 그림 8과 같다. 그림 8의 (a)는 기존 제어기와 제안된 경로추적 알고리즘의 비교이다. 이동 로봇트의 가속 및 감속시간은 0.5초이고 최대속도는 1(m/sec)로 설정한다. 이 실험의 이득행렬 K_p 는 1이상 5이하이고 $K_v = 2\sqrt{K_p}$ 이다. 실제경로가 얼마동안의 수렴과정을 거쳐 기준경로를 적절히 추적하고 있음을 보여주고 있다. 그림 8의 (b)는 오차가 증가함에

따라 공분산값을 증가시킴으로서 오차를 조절하는 칼만 필터의 특성을 보여준다.



(a)



(b)

그림 8. (a) $1 \leq K_p < 5$ 에 대한 경로추적 (b) 칼만 필터의 공분산
Fig. 8. Path tracking and covariances of case 1 about $1 \leq K_p < 5$.

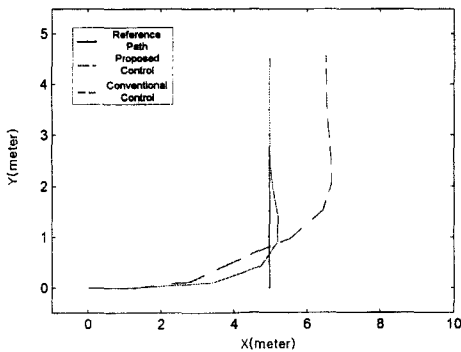


그림 9. $5 \leq K_p < 10$ 에 대한 경로추적
Fig. 9. Path tracking of case 1 about $5 \leq K_p < 10$.

이득행렬 K_p 가 5이상 10이하일 경우($K_v = 2\sqrt{K_p}$) 경로추적을 그림 9에서 나타내었다. 경로추적에서 보

듯이 이득이 커질수록 이동 로봇의 진동이 증가하였다. 또한 추적과정에서의 진동이나 이탈은 기구학 및 동역학 모델링의 불확실성의 요소들과 초기오차에 의한 것으로 여겨진다.

이동 로봇 본체 질량의 1/6정도인 20kg의 최대부하 탑재시 경로추적, 속도계적, 구동토크, 경로오차 및 공분산값은 그림 10에서 나타내었다. 이 결과로부터 같은 조건하에서도 탑재되는 부하의 증가시 이동 로봇의 이탈 및 진동이 증가됨을 알 수 있다.

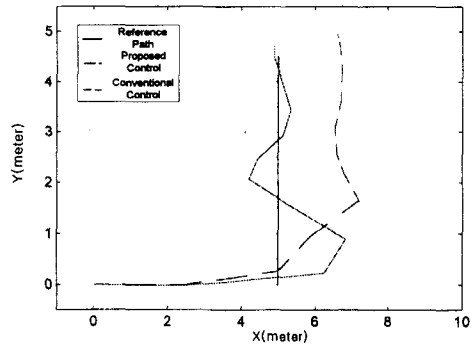
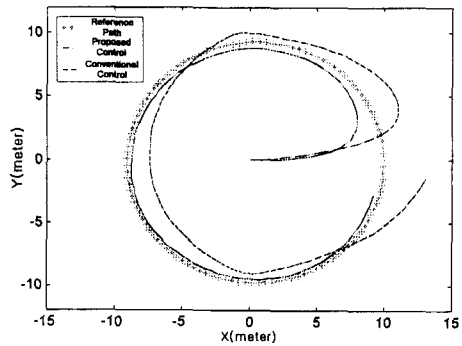
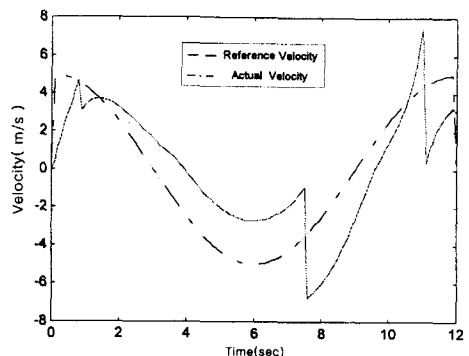


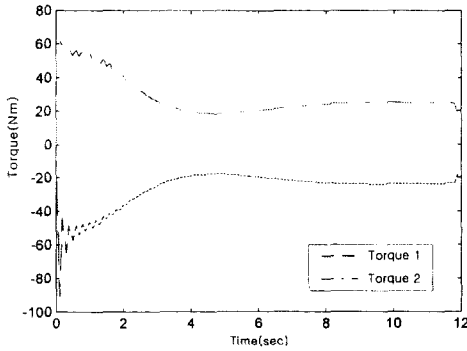
그림 10. 20kg 부하 탑재시 경로추적
Fig. 10. Path tracking of case 1 with 20kg load.



(a)



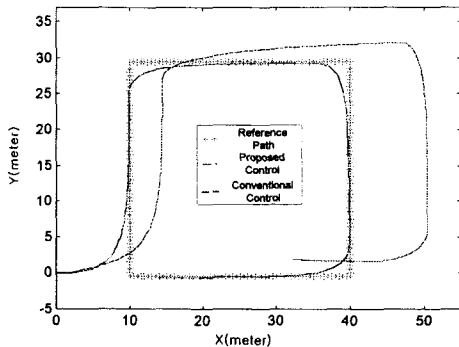
(b)



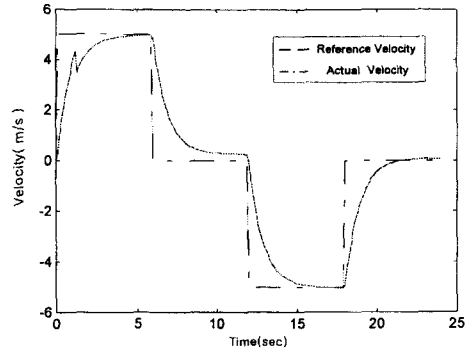
(c)

그림 11. (a) 원형 경로추적 (b) 속도궤적 (c) 구동토크
Fig. 11. Path tracking & velocity profile & torque of case 2.

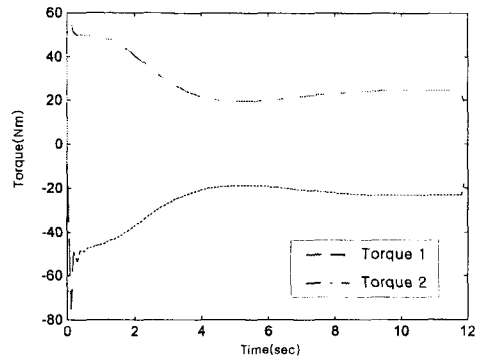
기준경로의 변화에 따른 이동 로봇의 추적성을 나타내기 위해 그림 11, 12에서 원형 및 사각형 기준경로를 설계하였다. 이러한 경로는 주기적인 경로의 변화 및 90° 정도의 급격한 변화를 포함하여 이동 로봇의 효율적인 추적성을 입증하기 위해 설계하였다. 기존의 제어기와 비교한 결과 그림에서 보듯이 상당히 근접된 추적성과 최종 목적지점의 오차가 상당히 감소되었음을 알 수 있다. 이러한 실험결과는 본 논문에서 제시된 동력학 모델의 정확성과 이에 기초한 이동 로봇의 추적 알고리즘의 효율성을 보여 주고 있다. 그림 13에서는 주행중 장애물을 회피할 수 있는 경로를 본 논문에서 제시된 방법을 사용하여 간단히 구현하였고, 동시에 설계된 장애물 회피경로를 적절히 추적하고 있음을 보여주고 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 12. (a) 사각형 경로추적 (b) 속도궤적 (c) 구동토크
Fig. 12. Path tracking & velocity profile & torque of case 3.

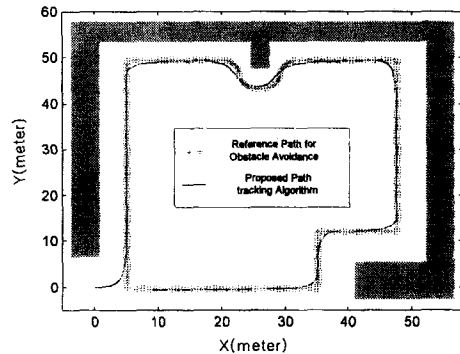


그림 13. 장애물 회피 경로추적
Fig. 13. Path tracking case 3.

VII. 결론 및 고찰

본 연구에서는 이동 로봇의 정확한 위치 추정을 위해 스트랩다운 관성항법장치를 이용한 경로추적 알

고리즘을 구성하여 그 유용성을 평가하였다. 관성항법 장치의 이용을 위해서 관성센서의 초기오차 특성을 분석한 후, 초기오차모형을 구성하여 경로추적 알고리즘에 적용하였다. 기존의 기구학을 기초로한 궤환제어 알고리즘만을 이용한 경우에는 센서의 신호에 의한 위치경로는 기준위치 경로에서 이탈됨을 확인하였다. 이러한 오차의 누적은 시간이 경과함에 따라 더욱 큰 오차를 발생시킨다. 이를 해결하기 위해 관성센서의 초기오차, 시스템 오차 등을 처리하는 방안으로 관성센서의 초기신호에서 존재하는 실제 오차를 측정하여 수학적 모델링 방법에 적용하였다. 이 오차모형은 discrete linear Kalman filter에 연계하여 사용되었다. Kalman filter만을 이용했을 경우에는 속도의 변화가 없는 등속구간에서 뿐만 아니라 가속과 감속이 있는 구간에서도 센서신호 오차의 누적을 어느 정도 감소시킬 수 있었다. 그리고 이동 로봇트가 경로추적시 장애물이 감지될 때 이를 회피할 수 있는 간단한 경로설계 알고리즘도 추가하여 수행하였다.

향후에는 구륜의 미끄러짐, 마찰, 불확실성 등으로 인하여 발생하는 근본적인 오차문제의 해결방법과 많은 제약을 극복 할 수 있는 보다 체계적이고 포괄적인 항법 알고리즘의 연구개발이 지속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Yilin. Zhao and Spencer L. Bement, "Kinematic, Dynamics and Control of Wheeled Mobile Robots", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 91-96, 1992.
- [2] P. tournassoud and O. Jehl, "Motion Planning for a Mobile Robot with Constraint", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1785-1790, 1988.
- [3] Thomas and Hugh F. Durrant : "Kinematics for Modular Wheeled Mobile Robots ", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1130-1135, Apr. 1991.
- [4] Insung Chung, Kihyung Lee, "Structure and Technology of INS", Journal of Korea for Aeronautical and Space Science, pp. 142-147, 1992.
- [5] J. Borenstein and L. Feng, "Measurement and Correction of Systematic Odometry Error in Mobile Robots", IEEE Trans. on R&A, Vol. 12, No. 6, pp. 869-880, December, 1996.
- [6] P. N. Sheth and J. J. Uicker, Jr., "A generalized symbolic notation for mechatronics", Journal of Engineering for Industrial, Vol. 93, No.7019, 102-112, 1971.
- [7] John J. Craig : Introduction Robotics Mechanics & Control, Addison-Wesley Publishing Company. 1955.
- [8] Zexiang Li and J. F. Canny : Nonholonomic Motion Planning, Kluwer Academic Publishers. 1992.
- [9] P. S. Maybeck : Stochastic Models, Estimation and Control, New York: Academic Press Vol. I-III, pp. 291-321, 1979.
- [10] W. H. Press, B. P. Flannrey, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling : Numerical recipes in C, Cambridge University Press, Cambridge, U. K., pp. 520-549, 1988.
- [11] Steven C. Chapra and Raymond P. Canale : Numerical Methods for Engineers, MacGraw-Hill, pp. 336-361, 1990.
- [12] A. Meystel : Autonomous Mobile Robots, World Scientific Publishing. 1991.
- [13] Robert Grover Brown & Patric Y.C Hwang : Introduction Random Signals and Applied Kalman Filtering, John Wiley & Sons Inc., pp. 210-240, 1992.
- [14] G. Minkler & J. Minkler : Theory and Application of Kalman Filtering, Magelan, pp. 247-314, 1991.
- [15] Brian D. O. Anderson and John B. Moore : Optimal Control : Linear Quadratic Methods, Prentice-Hall International, Inc., 1989.

저 자 소 개



金 棋 烈(正會員)

1968年 3月 7日生 1993年 2月 경희대학교 공과대학 전자공학과(공학사). 1996年 2月 경희대학교 공과대학 전자공학과(공학석사). 1998年 2月 경희대학교 공과대학 전자공학과

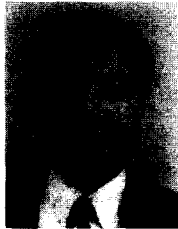
박사과정 수료. 주관심분야 : 이동로봇 제어, 자동항법시스템, GPS응용 등.



林 號(正會員)

1966年 11月 27日生 1988年 2月 경희대학교 공과대학 전자공학과(공학사). 1992年 2月 경희대학교 공과대학 전자공학과(공학석사). 1996年 2月 경희대학교 공과대학 전자공학과

박사과정 수료. 1996年 9月~현재 서울기능대학 전자기술학과 전임강사. 주관심분야 : 적응제어, 비행체 자세제어, 관성항법시스템 등.



朴 鍾 國(正會員)

第 29卷 第 10號 參朝

현재 경희대학교 전자공학과 교수