

케이블센서를 이용한 2 차원 위치측정 시스템

홍대희*

A Two-Dimensional Position Sensor Using Cable Extension Transducers

Daehie Hong*

ABSTRACT

Based on the cable-extension transducers, a new technique for two dimensional position measurement is developed in this paper. This new technique includes the use of two such transducers and the planar position is determined through triangulation. This paper also presents uncertainty analysis results for establishing sensor design specifications. An actual prototyped sensor system is built and its accuracy is verified through both experiments with coordinate measurement machines and its application to the real-time control of a high load wheeled mobile robot. This new type of position sensor can be easily used in a wide variety of automation applications in industry for two dimensional position measurements with high accuracy over a relatively large range, and it is both cost effective and robust against hostile environments.

Key Words : Cable-extension transducer (케이블센서), Coordinate Measurement Machine (3 차원 좌표측정기), Wheeled Mobile Robot (이동로봇), Factory automation (공장자동화)

1. 서론

케이블센서는 케이블의 길이에 비례하는 전기 신호를 발생시키는 1 차원 길이측정 센서이다. 케이블이 원통형의 스펀에 감겨있고 그 끝 부분에는 태입스프링과 회전각 측정센서가 장치되어 있어서 케이블을 당기거나 놓으면 케이블의 길이가 회전각으로 변환되어 측정할 수 있도록 설계되어 있다. 회전각 측정센서로는 적당한 인터페이스 회로로 비교적 용이하게 디지털 신호로 변환할 수 있는 회전형의 엔코더나 포텐서미터 등이 이용된다. 이 케이블센서는 보통 40m 정도의 긴 거리 내에서 0.01%의 측정 정밀도를 가지고 있으며, 초음파센서, 적외선센서, 비전센서, 또는 LIDAR 등과 같은

기존의 센서들과 비교하여 가격이 저렴하고 사용이 용이하며 내구성이 큰 장점이 있다. 또한, 케이블센서는 센서와 관련된 전기회로 부분을 케이블과 분리하여 밀폐시키고 케이블은 화학약품과 열 등에 견딜수 있는 재료를 사용함으로써 극한환경 하에서 사용할 수 있는 시스템으로 용이하게 구성할 수 있다. 이와 같은 장점으로 인하여, 일 차원 길이측정 센서인 이 케이블센서는 유압 램이나 밸브의 운동 감지, 로봇의 위치결정기구, 또는 자동분류 등과 같이 공장자동화용으로 많이 쓰이고 있다.^{1,2)}

본 논문에서는 자동화용으로 많은 분야에서 쓰이고 있는 일 차원 케이블센서를 이용하여 이 차원 위치결정 시스템을 설계하는 방법과 이에 따

* 고려대학교 기계공학과

르는 제반 문제에 대해 논하고자 한다. 이 자원 센서시스템은 한 쌍의 일차원 케이블센서로 구성되며, 각 케이블은 고정된 센서의 베이스와 함께 삼각형 모양을 형성하게 된다. 케이블이 만나는 꼭지점의 위치는 삼각법에 기초한 방법으로 계산을 할 수 있다. 그러나, 케이블의 특성 상 센서의 베이스를 이루는 삼각형의 두 꼭지점에서 삼각법을 적용할 수 있도록 날카롭게 굽힐 수가 없기 때문에, 시스템의 설계 시 폴리라와 같이 일정 반경을 가지고 방향을 전환할 수 있게 해주는 기구를 필요로 한다. 이 폴리라로 인하여 위치를 결정하기 위한 방정식은 기존의 삼각법에서 많이 벗어나서 미선형 방정식이 된다.

이와 같은 이차원 케이블센서 시스템은 도로 건설 및 보수 자동화에 사용할 목적으로 하는 큰 외력과 하중에서도 정상 작동이 가능한 이동로봇(WMR, Wheeled Mobile Robot)을 설계 제작하는 과정에서 도출되었다.^{13,4,5} 이 이동로봇은 차동구동 조향 방식의 자체 추진 능력을 갖춘 것으로, 파워, 허터를 비롯한 작업에 필요한 각종 재료나 장비를 탑재하고 있는 지원 차량의 근접 영역에서 작업을 수행하도록 설계되었다. 따라서, 지원 차량에 대한 이동로봇의 상대 위치가 제어목표가 되며, 이를 위해서는 둘 사이의 상대위치를 측정할 수 있는 센서시스템이 필요하였다. 기존에 존재하는 이동로봇의 위치추적 센서 시스템에는 다음과 같은 것들이 있었다: 로봇 바퀴의 회전측정에 의한 방법(dead reckoning), 시각센서 시스템, 적외선 센서, 초음파 센서, 또는 LIDAR (Laser Radar).^[6,7,8,9,10,11,12] 그러나, 이러한 방법들은 도로 건설과 보수와 같은 열악한 환경과 비교적 넓은 작업 범위에서 높은 정확도를 필요로 하는 작업의 자동화 센서로는 적당치 않았다. 이러한 이유 때문에 이차원 케이블센서 시스템이 개발되었으며, 이 센서 시스템은 도로 건설과 보수 작업 자동화에 필요한 정확도 조건과 견고성 등에서 만족할 만한 결과를 보여주었다.

케이블센서가 이차원 센서시스템으로 확장됨으로써, 일차원 케이블센서의 많은 장점을 그대로 유지하면서 공장자동화나 로봇의 위치결정기구로서 응용범위를 넓힐 수 있다. 즉, 이차원 케이블센서 시스템은 열악한 환경에 대한 견고성이 우수하며, 가격이 기존의 센서와 비교하여 저렴하고, 사용과 필요에 따른 시스템의 재구성이 용이하다는

장점이 있는데 이러한 장점을 유지하면서 측정범위는 이차원까지 확대할 수 있다. 이 센서 시스템의 기본 아이디어는 Hong 등 (1995)에 의해 발표되었으며¹³, 본 논문에서는 이를 더욱 발전시켜 미선형 운동방정식의 실시간 해석, 오차 해석에 기반을 둔 센서 시스템의 체계적 설계 방법에 대해 논하며, 실제 제작된 시스템의 유용성을 검증하기 위하여 3차원 좌표 측정기 (Coordinate Measuring Machine; CMM)를 이용한 실험 결과를 보여준다. 또한, 일반적인 강체의 평면 운동을 표현하기 위해서는 위치뿐 아니라 방향의 측정이 요구되는데, 이 논문에서는 이 센서를 이용해 방향을 측정하는 방법을 제시하고 있다.

2. 센서 시스템의 구성

Fig. 1은 센서시스템의 개략적인 구조와 각 부의 치수를 나타내기 위한 변수들을 보여주고 있다. 두개의 케이블센서로부터 끌어낸 케이블들이 폴리 A와 B를 지나 꼭지점 P에서 결합되고 이 곳에 측정하고자 하는 대상이 위치하게 된다. 폴리는 센서의 베이스에 고정된 케이블센서 LT1, LT2로부터 나온 케이블이 측정 대상의 운동에 따라 점 P를 항상 향하도록 만들어준다. 따라서, 2차원 평면 상에서 측정대상의 자유로운 운동이 가능하고, 케이블의 굽힘에 의한 손상이 방지된다. Fig.에서 폴리의 크기는 이해를 돕기 위해 실제보다 크게 과장되게 나타내었다. P 점이 움직임에 따라 케이블이 반복적인 피로굽힘하중을 받기 때문에 폴리의 직경은 시스템의 목표수명과 케이블의 크기 등을 이용하여 계산하여야 한다.

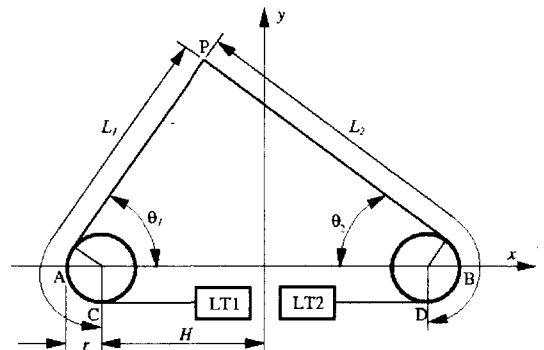


Fig. 1 Schematic of the 2D sensor system

Velinsky (1988)에 따르면 일반적으로, 케이블의 직경보다 풀리의 곡경이 비교적 작아 하더라도, 본 시스템은 10 배 이상의 크기로 설계되어 피로하중의 영향을 최소화 하였다.

운동방정식을 유도하기 위하여 다음과 같은 좌표계를 설정하였다. 두 풀리의 중심을 통과하는 직선을 x 축으로 정하고 중점을 좌표계의 원점으로 한다. 케이블의 길이는 풀리 원주 위의 점 C 와 D 에서 점 P 까지의 거리로 정의한다. 이 케이블 길이는 센서로부터의 펄스신호를 세는 카운터 회로를 정해진 초기위치에서 초기화하고 이 곳에서의 초기 길이를 더해줌으로써 쉽게 계산할 수 있다. 일반적으로 삼각형의 세변의 길이를 알면 꼭지점의 좌표를 각변의 길이의 함수로 표현할 수 있으나, 풀리의 영향 때문에 점 P 의 좌표를 두 케이블 길이를 독립변수로 가지는 양함수의 형태로 표현할 수 없다. 점 P 의 좌표를 x 축과 두 케이블이 이루는 두 개의 내각 θ_1 과 θ_2 의 매개변수를 가지고 표현하면 다음과 같다.

$$L_1 - r(\pi - \theta_1) - (y_p - r \cos \theta_1) / \sin \theta_1 = 0 \quad (1)$$

$$y_p / \tan \theta_1 - H - x_p - r / \sin \theta_1 = 0 \quad (2)$$

$$L_2 - r(\pi - \theta_2) - (y_p - r \cos \theta_2) / \sin \theta_2 = 0 \quad (3)$$

$$y_p / \tan \theta_2 - H + x_p - r / \sin \theta_2 = 0 \quad (4)$$

이 운동방정식에서 케이블 길이 L_1 과 L_2 가 센서로부터 측정하는 값이고, 이들을 가지고 종속변수 x_p 와 y_p 를 결정해야 한다. 그러나, 이 방정식이 매개변수 θ_1 과 θ_2 에 대해 비선형이기 때문에 x_p 와 y_p 를 L_1 과 L_2 의 양함수 형태로 나타낼 수가 없다. 따라서, 이 방정식은 Newton-Raphson 방법과 같은 수치해석으로 해를 구해야 한다.^[5] 이 때, 방정식의 특성 때문에 유일해가 존재하지 않고 같은 케이블 길이에 대해 두 세트의 해가 존재한다. 즉, 같은 길이의 케이블에 대해 x 축에 대칭인 위치에 위 방정식을 만족하는 또 하나의 해가 존재한다. 따라서, 의미 있는 해를 구하기 위해서는 수치해석의 반복계산에서 초기조건을 알맞게 선택해야 한다.^[6]

3. 실시간 해석

케이블센서를 자동화용으로 사용할 때 수치해석적 방법으로 해를 구하게 되면 실시간으로 동작

해야 하는 응용 분야에는 적용을 할 수 없다. 매우 엄격한 실시간 제어에서는 정확한 샘플링 시간이 중요하기 때문에 부정기적인 반복계산이 필수적인 수치해석은 적당하지 않다. 따라서, 이 논문에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 룩업테이블과 내삽방법을 채용하였다. 즉, 수치해석을 이용하여 등 간격의 L_1 과 L_2 를 가지는 다수의 점에 대해 미리 계산을 수행한 후 이들을 메모리에 저장하고 사이 점들에 대해서는 내삽법을 이용하여 근사해를 구하였다. 이 센서시스템의 운동방정식 해는 상당한 정도의 비선형성을 갖기 때문에 필요한 정확도를 확보하기 위해서는 2 차 이상의 내삽함수를 사용하거나 룩업테이블의 간격을 작게하는 것이 필요하다. 그러나, 후자는 많은 양의 메모리를 필요로 하기 때문에 적당치 않다.

내삽함수로써 일반적인 다항함수를 사용하면 계산시간을 많이 차지할 뿐 아니라 전체계산시간이 일정치 않은 역행렬 계산이 필요하기 때문에 실시간 계산에 적용하기에는 적당치 않다.

Lagrangian 다항함수를 사용하면 이러한 역행렬 계산이 불필요하다. n 개의 절점을 갖는 1 자원 요소에 대한 Lagrangian 다항함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_p(x) &\equiv \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq p}}^n \frac{x - x_i}{x_p - x_i} \\ &= \frac{(x - x_1) \cdots (x - x_{p-1})(x - x_{p+1}) \cdots (x - x_n)}{(x_p - x_1) \cdots (x_p - x_{p-1})(x_p - x_{p+1}) \cdots (x_p - x_n)} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 Π 는 괄호 안의 어항식들의 곱을 나타낸다. 이 식은 분모 분자에 각각 $n-1$ 개의 항이

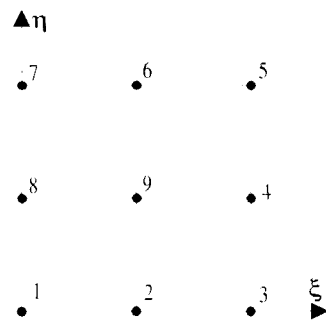


Fig. 2 Two-dimensional quadratic element

존재하고 $x=x_p$, 즉, 노드 p 에서 분모 분자의 값이 같아지며, 따라서 전체 내삽함수가 1의 값을 갖는다. 그러나, 다른 노드, $x \neq x_p$, 에서는 이 함수는 0의 값을 가진다. Lagrangian 내삽함수는 경계에서 C^0 의 연속성을 갖는다.

이러한 1차원 Lagrangian 내삽함수를 Fig. 2와 같은 정규화된 좌표 ξ, η 를 갖는 2차원 사각요소 에 대해 다음과 같이 확장할 수 있다. 이 요소는 9개의 노드로 구성되며, 필드변수 ϕ 의 이차 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = \sum_{i=1}^9 N_i \phi_i \quad (6)$$

여기서, p 노드에서 함수 N 은 ξ, η 방향의 Lagrangian 다항함수를 가지고 표현할 수 있다.

$$N_p(\xi, \eta) = \mathcal{L}_p(\xi) \mathcal{L}_p(\eta) \quad (7)$$

일 차원 요소와 마찬가지로, 이 내삽함수도 노드 p 에서 1의 값을 가지며, 다른 노드에서는 0의 값을 가진다. 이 내삽함수를 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} N_1(\xi, \eta) &= \frac{(\xi - \xi_2)(\xi - \xi_3)(\eta - \eta_8)(\eta - \eta_7)}{(\xi_1 - \xi_2)(\xi_1 - \xi_3)(\eta_1 - \eta_8)(\eta_1 - \eta_7)} \\ N_2(\xi, \eta) &= \frac{(\xi - \xi_1)(\xi - \xi_3)(\eta - \eta_9)(\eta - \eta_6)}{(\xi_2 - \xi_1)(\xi_2 - \xi_3)(\eta_2 - \eta_9)(\eta_2 - \eta_6)} \\ &\vdots \\ N_9(\xi, \eta) &= \frac{(\xi - \xi_8)(\xi - \xi_4)(\eta - \eta_2)(\eta - \eta_6)}{(\xi_9 - \xi_8)(\xi_9 - \xi_4)(\eta_9 - \eta_2)(\eta_9 - \eta_6)} \end{aligned} \quad (8)$$

4. 오차 해석 및 센서 설계

이차원 케이블센서 시스템을 적당히 설계하기 위해서는 측정위치 (x_p, y_p) 를 계측할 때 일 차원 센서의 오차가 전체 오차에 어떻게 영향을 미치는 가를 이해한 후에 이를 최소화 하도록 각 부의 치수를 결정해야 한다. 측정점이 작업범위 내에서 움직일 때 측정값의 정확도는 운동방정식의 비선형성 때문에 일정하지 않다.

일 차원 케이블센서에서 오차를 발생시키는 원인 요소는 다음과 같은 것이 있다: 센서 분해능의 한계에 따른 오차, 케이블 자중에 의한 처짐으로 인한 오차, 케이블 자체의 인장에 의한 오차 등. 이러한 오차들은 케이블 길이 L_1, L_2 에 걸친

불확실성으로 표현될 수 있다. 이러한 L_1, L_2 에 대한 불확실성 범위의 한계, 즉 발생 가능한 최대 오차를 각각 $\delta L_1, \delta L_2$ 로 나타내도록 하자. 일반적으로, 불확실성의 한계는 케이블의 길이에 비례한다고 가정하는 것이 타당하다. 이차원 센서시스템을 만드는데 사용된 일 차원 케이블센서도 사양에 의하면 케이블 길이에 대해 0.01%로 정해져 있어서 불확실성의 한계를 케이블 길이의 선형 함수로 나타낼 수 있다. 이와 같이 길이에 대한 불확실성을 나타내는 상수를 α 라 표시하고, 이를 일차원 길이센서에 대한 오차 민감도라 정의한다. 동일한 두 개의 시스템이 이차원 센서에 쓰였다면, 각 케이블에 나타날 수 있는 불확실성의 한계는 오차 민감도를 가지고 다음과 같이 표현된다.

$$\delta L_1 = \pm \alpha L_1, \quad \delta L_2 = \pm \alpha L_2 \quad (9)$$

케이블 길이의 불확실성에 의한 점 P의 좌표 (x_p, y_p) 상의 측정오차는 다음 식과 같다.

$$\delta x_p = \frac{\partial x_p}{\partial L_1} \delta L_1 + \frac{\partial x_p}{\partial L_2} \delta L_2 \quad (10)$$

$$\delta y_p = \frac{\partial y_p}{\partial L_1} \delta L_1 + \frac{\partial y_p}{\partial L_2} \delta L_2. \quad (11)$$

위에 기술한 바와 같이 일 차원 길이 측정 센서에 있어서, 오차 민감도는 길이에 대한 오차 한계의 비로 나타낸다. 이차원 케이블센서에 대해서도 유사한 정의를 사용할 수 있으며, 이 때 원점으로 부터의 반경거리와 같은 특성길이를 사용할 수 있다. 그러므로, 평면 상의 어떤 점에서 오차 민감도 S 는 그 점에서 가능한 최대오차한계와 센서 원점을 기준으로 한 반경거리의 비로 정의할 수 있다. 또한, 민감도의 정의에 있어서, 특정 센서에 종속적인 성질을 제거하기 위하여 분모에 상수 α 를 포함시키는 것이 타당하다. 종합하면, 점 P에서 오차 민감도 S 는 다음과 같이 정의된다.

$$S = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{E}{R} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\sqrt{(\delta x_p)^2 + (\delta y_p)^2}}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}} \quad (12)$$

여기서 R 은 반경거리 이고, E 는 최대 허용오차이다. 좌표 (x_p, y_p) 가 케이블 길이의 함수이기 때문에 위의 식에서 $\delta x_p, \delta y_p$ 가 L_1, L_2 에 대한 x_p, y_p 의 편미분과 미소 변화량 $\delta L_1, \delta L_2$ 로 표현된다 (식 (10), (11)). 또한, 식 (9)와 같이 $\delta L_1, \delta L_2$ 가 +와 -

부호를 가질 수 있기 때문에 오차 민감도에 대한 식도 다음과 같이 두 가지 경우가 존재하게 된다.

$$S_1 = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial x_p}{\partial L_1} L_1 + \frac{\partial x_p}{\partial L_2} L_2\right)^2 + \left(\frac{\partial y_p}{\partial L_1} L_1 + \frac{\partial y_p}{\partial L_2} L_2\right)^2}}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}} \quad (13)$$

$$S_2 = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial x_p}{\partial L_1} L_1 - \frac{\partial x_p}{\partial L_2} L_2\right)^2 + \left(\frac{\partial y_p}{\partial L_1} L_1 - \frac{\partial y_p}{\partial L_2} L_2\right)^2}}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}} \quad (14)$$

우리가 관심이 있는 것은 이들 중 최대값이다. 즉,

$$S = \max(S_1, S_2) \quad (15)$$

이차원 케이블 센서시스템을 설계할 때, 센서의 베이스 길이 H 가 가장 중요한 설계인자 중의 하나이다. 식 (13)과 (14)를 무차원수 x_p/H 와 y_p/H 의 함수로 나타냄으로써, 오차민감도는 설계변수를 외형적으로 포함하지 않는 식으로 표시된다. Fig. 3과 4는 이와 같은 무차원 변수의 함수로 나타낸 오차 민감도의 3 차원 그림과 등고선 그림이다. 오차 민감도는 점 P 가 센서의 가장자리와 중심에 가까울수록 증가함을 알 수 있다. 그리고, 민감도는 P 가 멀어질수록 증가함을 알 수 있다. 이러한 현상은 우리의 눈을 생각하면 충분히 타당하다. 센서시스템의 삼각법 원리는 사람의 눈이 물체를 인지하는 방법과 많은 유사성이 있다. 사람 시야의 가장자리와 양 미간 근처에 있는 물체는 식별이 거의 불가능하다. 또한, 사람 눈의 정확도는 물체의 거리가 증가할수록 떨어진다. 이와 같은 사실들은 Fig. 3과 4에서 잘 설명이 된다.

주어진 최대허용 오차와 케이블센서의 불확실성의 한계가 주어지면, 센서와 작업영역의 범위가 결정될 수 있다. 주요설계 변수는 센서의 베이스

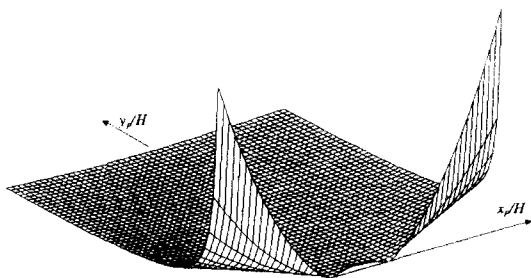


Fig. 3 Three-dimensional mesh plot of error sensitivity

길이 H 이다. Fig. 4의 등고선도는 센서를 설계하고 작업영역을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 설계에 사용하고자 하는 일 차원 케이블센서의 명세로부터 고유 상수인 α 를 결정하고, 센서를 적용하고자 하는 문제를 주의 깊게 검토한 후에 허용 오차 E 와 작업영역의 최대반경 R 을 결정하면, 식 (12)에 의해 오차 민감도가 결정이 되며, 작업영역을 Fig. 4의 해당 등고선 내에 위치시킬 수 있다. 그림에서 일정한 등고선은 필요한 민감도를 만족하는 x_p/H 와 y_p/H 양으로 표시한 최대 작업영역과 같다. 그러므로, 일정한 등고선 내에서 작업영역의 크기와 위치를 적당히 조절함으로써 최적의 작업영역과 센서 설계를 도출해낼 수 있다.

5. 실험 및 고찰

센서시스템을 상용화된 일 차원 케이블센서를 가지고 Fig. 5과 같이 제작하였다. 이 센서시스템은 아이디어의 타당성, 실시간 위치계산 알고리즘의 확인, 센서 자체의 정확도를 측정하기 위해 제작되었으며, 실제 이동로봇의 이차원 위치측정 시스템으로 사용하기 위한 것이었다. 한 쌍의 케이블은 작은 폴리를 돌아 이동로봇 상의 상하로 인접하여 설치된 두 개의 디스크 원주에 각각 연결하였다. 디스크들은 자유로운 회전이 가능하며 베어링을 설치하여 마찰을 최소화하도록 노력하였다. 디스크들이 로봇이 움직임에 따라 자유롭게 회전하기 때문에 케이블은 항상 디스크의 중심점을 향하게 되며, 이 점의 위치를 케이블 길이를 읽음으

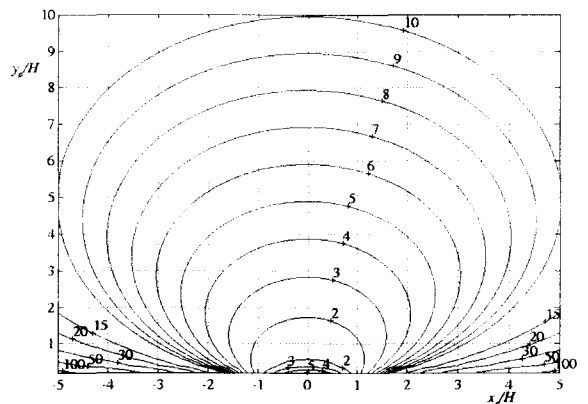


Fig. 4 Contour plot of error sensitivity

로써 항상 측정할 수 있었다. 이와 같은 구조로 이동로봇의 자유로운 평면운동이 가능하였고, 동시에 로봇의 (x, y) 좌표를 측정할 수 있었다.

평면상의 강체의 운동은 (x, y) 위치와 각위치 θ 를 포함하는 3 자유도로 기술될 수 있다. 위치를 제외한 나머지 자유도 θ 를 측정하기 위해 다음과 같은 방법을 이용하였다. 케이블의 장력 때문에, 케이블이 연결된 디스크는 항상 케이블이 디스크의 중심을 향하도록 회전한다. 따라서, 하나의 디스크와 로봇 또는 측정대상 강체 사이에 각위치를 측정할 수 있는 센서를 설치하면, 해당 케이블과 강체 사이의 각도를 항상 측정할 수 있다. 또한, 케이블이 센서의 베이스와 이루는 각도 (Fig. 1에서 θ_1 또는 θ_2)는 케이블의 길이를 가지고 계산이 가능하기 때문에, 이 각도와 강체와 케이블의 각도를 조합하면 센서의 베이스에 대한 강체의 각도를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 중공형 광엔코더를 직접 설계 제작하여 디스크의 원주에 장착하여 사용하였다.

이와 같은 센서시스템을 설계 제작한 후에, 폴리의 반경, 이들 사이의 거리 등과 같은 센서의 지수를 3 차원 좌표측정기 (Coordinate Measurement Machine; CMM)를 이용하여 정확히 측정하였다. 이들 측정치를 실시간 계산 알고리즘에 대입하여 정확한 계산이 이루어지도록 하였다. 또한, CMM을 이용하여 개발된 센서의 정확도를 확인하였다. Table 1은 실험결과를 보여주고 있다. 처음에는 Mitutoyo 모델 BHN 706 를 가지고 비교적 좁은 범위에서 테스트를 수행하였으며 이 결과는 Table 1에서 * 마크가 표시된 데이터이다. 개발된 센서시스템은 비교적 넓은 범위 (반경 350cm)에서 사용

가능하며, Mitutoyo CMM 으로는 테이블 크기의 한계 때문에 측정이 불가능하여 LK Tool 사의 모델 HCMM 7101-2418 CMM 을 사용하였다. 이 때의 테스트 결과는 Table 1의 * 마크가 없는 데이터로 표시되었다. LK Tool CMM 의 정확도는 x, y, z 방향으로 각각 305*122*137cm 범위에서 0.001cm 이었다.

Table 1에서 보여준 오차 민감도는 실험 데이터를 가지고 4 질에서 기술한 방법으로 계산한 것이며, 조음과 센서나 비전 센시 등과 같은 다른 센시들과 비교하여 상당히 정확도가 높음을 알 수 있다. Table 1은 또한, 본 연구에서 개발한 센서가 오차 해석 질에서 기술한 바와 같이, 정확도가 센서의 양쪽 구석 부분과 센서 중심, 그리고 거리가 증가할수록 떨어짐을 알 수 있다. 따라서, 우리가 기술한 오차해석 방법의 타당성이 입증되었으며, 이를 기반으로 한 센서 설계 방법의 타당성이 확인되었다. 이러한 케이블센서 시스템은 다른 센서와 비교하여 노이즈와 환경에 강인하며, 가격이

Table 1 Experimental data for sensor accuracy determination, short range test with Mitutoyo, BHN 706 CMM*, and long range test with LK Tool, HCMM 7101-2418 (r/H=0.0831)

CMM Measurement		CET Measurement		Error Sensitivity
x/H	y/H	x/H	y/H	
1.5243*	1.0854	1.5244	1.0863	5
1.7881*	1.6881	1.7874	1.6891	5
1.2650*	1.6850	1.2649	1.6854	2
0.7359*	1.6857	0.7357	1.6851	4
-1.6568	4.8708	-1.6574	4.8697	2
1.3721	4.8740	1.3721	4.8734	1
-1.6665	7.8930	-1.6615	7.8928	6
1.3636	7.9084	1.3668	7.9076	4
6.4266	4.2597	6.4354	4.2456	22
4.2703	6.3883	4.2751	6.3845	8
4.2897	2.1052	4.2935	2.0968	19
2.1429	4.2422	2.1449	4.2402	6
-4.5044	1.8129	-4.5081	1.8020	24
-6.6487	3.9425	-6.6522	3.9347	11
-4.5181	6.0968	-4.5160	6.0966	3
-2.3656	3.9577	-2.3669	3.9564	4



Fig. 5 Picture of prototyped sensor system

적당한 장점이 있다. 마지막으로, 센서시스템은 두 케이블센서를 하나의 케이블에 통합하는 등 설계를 최적화하면 Fig. 5에서 보여진 시제품보다 소형으로 제작이 가능할 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 케이블센서와 삼각법에 기초한 새로운 개념의 이차원 위치측정센서를 제안하였고 설계 제작에 따르는 제반 문제를 해결하였다. 개발된 센서시스템에서 이차원 위치를 결정하기 위한 방식식은 비선형으로 나타나며, 이는 실시간 응용에는 부적당하기 때문에 보간 방법에 의한 실시간 계산방법을 유도하였다. 오차해석 결과를 이용하여 센서시스템의 체계적인 설계 방법을 구축하였다. 실제 케이블센서를 이용하여 시제품을 제작하여 센서의 개념을 확인하였고, 센서의 정확도를 3차원 좌표측정기를 이용하여 상당히 넓은 범위에 걸쳐 확인하였다. 또한, 이 센서시스템은 이동로봇의 위치측정시스템으로 사용되었으며 이와 같은 실험과 응용 예를 통하여 센서시스템의 유용성이 확인되었다.

참고문헌

1. Driels, M.R. and Swayze, W.E., "Automated Partial Pose Measurement System for Manipulator Calibration Experiments," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 4, pp. 430-440, 1994.
2. Geng, Z.J. and Haynes, L.S., "A "3-2-1" Kinematic Configuration of a Stewart Platform and its Application to Six Degree of Freedom Pose Measurements," *Robotics & Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 11, No. 1, pp. 23-34, 1994.
3. Hong, D., Velinsky, S.A., and Yamazaki, K., "Tethered Mobile Robot for Automating Highway Maintenance Operations," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 13, No. 4, pp. 297-307, 1997.
4. Mueller, K.J., Hong, D., and Velinsky, S.A., "A Wheeled Mobile Robot for Automated Crack Sealing," *Proc. of the ASCE Conference on Robotics for Challenging Environments*, pp. 178-184, 1996.
5. Winters, S.E., Hong, D., Velinsky, S.A., and Yamazaki, K., "A New Robotic System Concept for Automating Highway Maintenance Operations," *Proc. of ASCE Conference on Robotics for Challenging Environments*, pp. 374-382, 1994.
6. Sugimoto, G., et al., "Practical Course Follow Performance of an AGV Without Fixed Guideways," *Proc. of the USA-Japan Sym. on Flexible Automation*, pp. 651-655, 1988.
7. Culley, G. and Buldar, R., "A Free Wheel Approach to AGV Navigation," *Proc. of Int. Computers in Engineering Conference*, Vol. 2, pp. 267-275, 1988.
8. Cox, I. J., "Blanche: Position Estimation for an Autonomous Robot Vehicle," *Autonomous Robot Vehicles*, Springer-Verlag, pp. 221-228, 1990.
9. Chen, Y. D., et al., "Dynamic Calibration and Compensation of a 3D Laser Radar Scanning System," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 3, pp. 318-323, 1993.
10. Beckerman, M. and Oblow, E. M., "Treatment of Systematic Errors in the Processing of Wide-Angle Sonar Sensor Data for Robotic Navigation," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 2, pp. 137-145, 1990.
11. Figueroa, F. and Mahajan A., "A Robust Method to Determine the Coordinates of a Wave Source for 3-D Position Sensing," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 116, pp. 505-511, 1994.
12. Crowley, J.L., "World Modeling and Position Estimation for a Mobile Robot Using Ultrasonic Ranging," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 674-680, 1989.
13. Hong, D., Mueller, K.J., and Velinsky, S.A., "Mobile Robot Localization by Cable-Extension Transducers," *Computational Kinematics '95*, J.-P. Merlet and B. Ravani eds., Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 19-30, 1995.
14. Velinsky, S.A., "Design and Mechanics of Multi-Lay Wire Strands," *J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Transactions ASME*, Vol. 110, No. 2, pp. 152-160, 1988.
15. Press, W.H., Flannery, B.H., Teukolsky, S.A., and Vetterling, W.T., *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, pp. 286-289, 1990.