

IN-LINE 진원도 측정을 위한 비접촉식 3점점법

배종일*, 제창우*, 김도**, 이만형***, 정영일****

*부경대학교 전기제어계측공학부, **한국선급엔지니어링, ***부산대학교 기계공학부, ****전기안전시험연구소

Real-Time Measurement Technology for Bi-directional Diameter in Ground Spindles

Jong-Il Bae*, Chang-Woo Je*, Do Kim**, Man-Hyung Lee***, Young-Il Jung****

*Division of Electrical Control & Instrumentation Engineering Pukyong National University

**K.R Engineering Co., Ltd.

***School of Mechanical Engineering, Pusan National University

****Electrical Safety Laboratory Research Institute

Abstract - This paper presents an in-process measurement system for shaft radius measurement during grinding process. This system does not require to stop the grinding process, which can enhance productivity and quality. For data analysis, the measurement system is modeled as a linearized discrete form where the states with noise are estimated by an extended Kalman filter. This system has been validated through simulations and experiments

1. 서론

많은 작업현장은 정밀 측정을 수행하기에는 열악한 환경인 경우가 대부분이다. 특히, 소음, 진동, 절삭유, 냉각수 등이 정밀 측정작업을 어렵게 하는 요인들이다. 그러므로, 이러한 환경속에서도 정밀 측정을 수행할 수 있는 측정시스템을 개발할 수 있다면 생산성 향상을 기대할 수 있으리라 생각된다.

본 연구에서는 원통의 연삭 가공에 있어서 가공물을 연삭기의 고정 chuck에 장착 상태에서 측정하는 시스템을 구현하는 것을 목적으로 한다. 즉, 측정시 가공물을 연삭기에 부착한 상태에서 비접촉식 센서를 사용하여 측정을 수행하고, 잡음이 포함된 측정 데이터를 확장 칼만 필터(EKF, Extended Kalman Filter)^(2,6)를 이용하여 리하고, 그 측정된 결과를 이용하여 측정물의 형상 및 치수를 판단할 수 있는 시스템을 개발하였다.

2. 본론

측정시스템의 모델링 및 확장 칼만필터 알고리즘

측정시스템(센서와 측정물)의 기하학적인 형태는 Fig. 1과 같다. 이 측정시스템을 모델링하여 그 모델을 근거로 확장 칼만필터를 구성하고자 한다.

2.1 확장 칼만필터 알고리즘

일반적인 이산시간 비선형 차분방정식은 다음과 같다. 식(1)의 비선형방정식을 아래와 같이 선형화할 수 있다.

$$\begin{cases} X_{k+1} = f(X_k, k) + g(X_k, k)w_k & : \text{System} \\ Z_k = h(X_k, k) + v_k & : \text{Measurement} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_{k+1} = \Phi_k X_k + w_k \\ Z_k = H_k X_k + v_k \end{cases} \quad (2)$$

여기서, X_k : 상태변수 벡터, Z_k : 측정변수 벡터

$$\Phi_k = \frac{\partial f}{\partial x_k} (\hat{X}_k^-, k), H_k = \frac{\partial h}{\partial x_k} (\hat{X}_k^-, k)$$

\hat{X}_k^- : k 스텝까지의 측정데이터로부터 k 스텝의 추정값

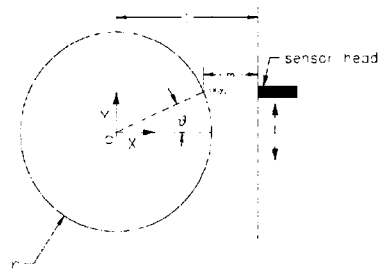


Fig. 1 Jig frame and eddy current sensor model for measurement system

\hat{X}_k^- : k-1 hinge 스텝까지의 추정데이터로부터 k 스텝의 추정값
 w_k : 시스템잡음
 v_k : 측정잡음

식(2)의 시스템에 대해서 확장 칼만필터는 아래와 같이 구성된다.

$$\hat{X}_k^- = \Phi(\hat{X}_{k-1}, k-1) \quad (3)$$

$$\hat{Z}_k^- = H(\hat{X}_k^-, k) \quad (4)$$

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (5)$$

$$P_k^- = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + G_{k-1} Q_{k-1} G_{k-1}^T \quad (6)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (7)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (Z_k - \hat{Z}_k^-) \quad (8)$$

여기서, Q_k 의 R_k 는 각각 시스템잡음과 측정잡음의 자기상호분산행렬, P_k 는 추정오차의 상호분산행렬, K_k 는 칼만게인이다.

2.2 측정시스템의 수학적 모델링

Fig. 1로 부터 (r, θ) 와 (x, y) 의 기하학적인 관계를 이용하여 본 측정시스템의 측정방정식을 구하면, (r, θ) 와 (x, y) 는 아래와 같다.

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \end{cases} \quad (9)$$

$$x = l - m \quad (10)$$

여기서, m 은 센서가 실제로 측정하는 데이터이다. 측정시스템의 상태변수를 아래와 같이 반경, 각 그리고 각속도로 선정하였다.

$$X_k = [r_k \ \theta_k \ \dot{\theta}_k]^T$$

측정시스템에서 센서는 수직(Y축)방향으로 일정속도로 이동하는 것이 효과적이다. 센서의 수직방향으로 이송속도가 일정하다면, 측정지점의 각속도가 일정한 것으로 가정하여 선형화된 시스템과 측정방정식을 유도할 수 있다. 선형화된 식(2)의 시스템행렬과 측정행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad h(X_k, k) = \begin{bmatrix} r_k \cos \theta_k \\ r_k \sin \theta_k \end{bmatrix}$$

$$H_k = \begin{bmatrix} \cos \theta_k & -r_k \sin \theta_k & 0 \\ \sin \theta_k & r_k \cos \theta_k & 0 \end{bmatrix}$$

2.3 모델링 오차

측정시스템의 모델링시 선형화로 인한 오차를 구해보자. 측정시스템에서 θ 와 y 축 방향의 위치와의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$\theta_r = \sin^{-1}(y/r) \quad (11)$$

그리고, Y축 방향으로의 변위에 대한 각의 변화량이 미소하다는 가정으로 선형화하면 다음과 같다.

$$\theta_l = y/r \quad (12)$$

여기서, 아래첨자 r 와 l 은 각각 측정시스템과 선형화된 시스템을 나타낸다. 위 식에서 측정시스템과 선형화된 시스템의 각에 대한 오차를 구하면 다음과 같다.

$$\text{error } \theta = \theta_r - \theta_l \quad (13)$$

같은 방법으로 측정시스템에서의 각속도를 구하면

$$\dot{\theta}_r = \frac{\dot{y}}{r \cos \theta_r} \quad (14)$$

각 변위가 미소하다는 가정 하에 식(14)를 선형화하면

$$\dot{\theta}_l = \frac{\dot{y}}{r} = \text{const} \quad (15)$$

측정시스템과 선형화된 시스템의 각속도에 대한 오차를 구하면 다음과 같다.

$$\text{error } \dot{\theta} = \dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l \quad (16)$$

식(14)과 식(15)로부터 반경이 35(mm)인 가공물에 대한 각각 각속도에 대한 오차를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 횡축은 측정지점의 각도가 $-10^\circ \sim +10^\circ$ 위치 범위에서 Y축 방향의 이동을 나타내고, 외전류 센서의 출력 오차의 표준편차를 Table 1을 참조하여 구하면 각에 대해서는 $2.3593 \times 10^{-4} [\text{rad}]$, 각속도에 대해서는 $0.0015 [\text{rad/sec}]$ 이며, 이 값은 확장 칼만필터의 설계시 설계 파라미터를 결정하는 기준으로 사용할 수도 있다.

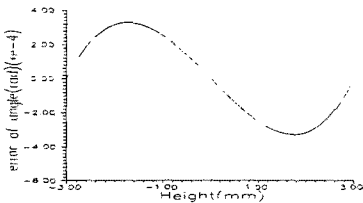


Fig. 2 Error of the linearized angles

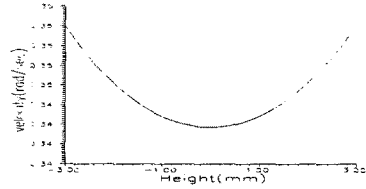


Fig. 3 Real angular velocity with respect to the real angles

Table 1 The measurement of height gauge

변위 (*0.1mm)	첫 번째 실험		두 번째 실험	
	실험치	오차	실험치	오차
0	0.08000	-0.080000	0.002040	-0.00204
1	0.126800	-0.026800	0.068800	0.031200
2	0.262400	-0.062400	0.241720	-0.041720
3	0.315040	-0.015040	0.324700	-0.024700
4	0.418280	-0.018280	0.404860	-0.004860
5	0.517080	-0.017080	0.512880	-0.012880
6	0.621100	-0.021100	0.607340	-0.007340
7	0.728840	-0.028840	0.698000	0.002000
8	0.822620	-0.022620	0.804980	-0.004980
9	0.954720	-0.054720	0.902600	-0.002600
10	1.024900	-0.024900	1.024880	-0.024880

* 위의 표에서 변위는 Height gauge[mm]의 변위를 나타내며, 실험치는 센서로부터 나온 출력을 길이로 환산한 것이다.

4. 시뮬레이션

반경 추정을 위한 확장 칼만필터의 적용 가능성을 시뮬레이션을 통해 확인하고자 하였다. 측정물의 반경은 35(mm)로 선정하고, 센서는 1초 동안 $-10^\circ \sim +10^\circ$ (± 6 (mm)) 범위를 Y축 방향으로 일정하게 이동하는 것으로 설정하였으며, 측정데이터는 1초 동안 250개 획득 되도록 설정하였다. 그리고, 시뮬레이션에 사용된 시스템 및 측정잡음의 공분산은 다음과 같다.

$$Q_k = \begin{bmatrix} 0.0005 \\ 0.0002 \\ 0.0015 \end{bmatrix}, \quad R_k = \begin{bmatrix} 0.003 \\ 0.002 \end{bmatrix}$$

시뮬레이션 결과는 Fig. 9 ~ Fig. 13에 나타내었고, Fig. 9, 10, 11은 측정된 반경, 반경의 추정오차이다. 추정된 반경이 측정된 반경에 비해 잡음성분이 제거됨을 알 수 있고, Fig. 11은 반경의 추정오차로서, 약 ± 3 (μm) 이내로 잘 추정하고 있음을 알 수 있으며, Fig. 12과 Fig. 13은 각각 각속도의 추정오차로서 역시 잘 추정하고 있음을 알 수 있다.

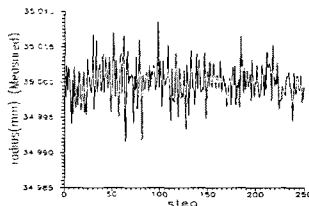


Fig. 9 Measured radius in the simul

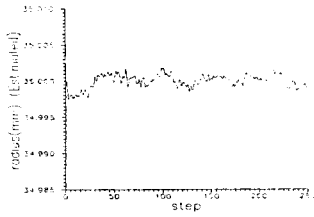


Fig. 10 Estimated radius in the simulation

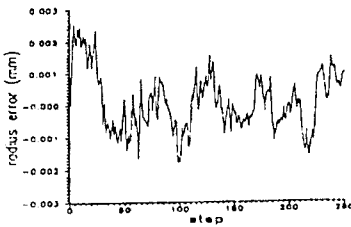


Fig. 11 Error of estimated radius

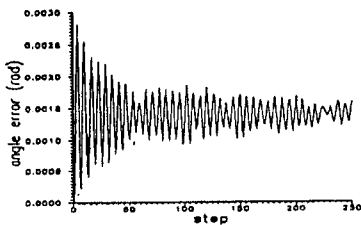


Fig. 12 Error of estimated angle in the simulation

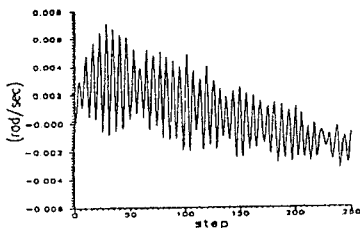


Fig. 13 Error of estimated angular velocity

5. 실험

시뮬레이션을 근거로 제작된 시스템에서 실험을 수행 하였으며, 실험에 사용된 측정물은 반경이 40[mm]이고 오차가 ± 0.04 [mm]인 연삭된 스펀들을 삼성중공업(주) 증장비사업부의 정밀측정실에서 측정한 자료이며, 센서가 1초 동안 Y축 방향으로 $+14^\circ \sim -14^\circ$ (± 10 [mm]) 범위를 일정하게 이송되도록 하여, 250개의 측정데이터를 얻을 수 있도록 설계하였다.

실제 실험 장치에서 수행되는 작업순서는 다음과 같다.

- (1) 디지털 출력명령을 사용하여 원점 복귀명령을 내린다.
- (2) 원점 복귀 여부를 판별하고, Z축 전진명령을 인가한다.
- (3) Z축의 전진상태를 확인하고, 통신포트를 이용하여 Y축을 측정물의 측정 준비위치로 이송시킨다. (측정 준비위치 : 엔코더 신호의 영점 위치를 인가하기 위한 초기 위치로서, 측정물의 중심 위치보다 10[mm] 위의 지점)
- (4) Y축이 측정 준비위치에 정지하면, 카운터의 값을 영으로 설정하고, Y축을 측정 최종위치까지 이송시킨다. (측정 최종위치 : 측정물의 중심에서 10[mm] 아래의 지점)

- (5) Y축이 이송되는 동안, 측정센서의 정보는 A/D보드로 accept하여 PC로 전송되고, Y축의 수직위치는 카운터의 값을 카운트 보드의 DI 포트로 accept하여 PC로 전송한다. (샘플링 주기는 1/250초, 250개의 데이터를 취득)
- (6) 확장 칼만필터 알고리즘을 이용하여, 측정데이터로부터 반경을 추정한다.

실험결과는 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었고, Fig. 14는 측정된 반경이고, Fig. 15는 추정된 반경이다. 추정된 반경이 측정된 반경에 비해 잡음성분이 제거됨을 볼 수 있고, 추정된 반경이 약 4[μ m]정도의 범위를 움직이고 약 1[μ m]이내의 폭으로 추정이 됨을 알 수 있다.

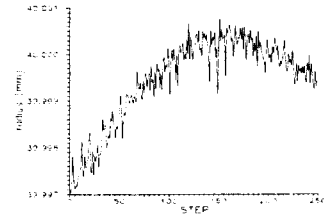


Fig. 14 Measured radius in experiment

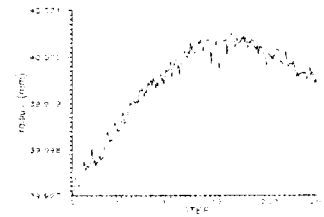


Fig. 15 Estimated radius in experiment

6. 결 론

비접촉식센서인 와전류센서를 사용하여, 공작물이 공작기계(연삭기)에 장착된 상태에서 외경을 측정할 수 있는 시스템을 구성하였다. 그리고, 측정데이터에 포함된 측정잡음을 확장 칼만필터를 이용하여 효과적으로 제거하고, 원하는 측정량인 외경을 측정할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 검증하였고, 또한 실험을 통하여 확장 칼만필터를 이용한 측정 알고리즘의 현장 적용 가능성을 입증하였다.

[참고 문헌]

- [1] Novak, A. "Sensing of Workpiece Diameter's Vibration and Out-Of-Roundness by Laser Way to Automate Quality Control," CIRP, pp. 473, 1981.
- [2] Lee, M. H. Kolodziej, W. J. and Mohler, R. R. "Stochastic Dynamic System Suboptimal Control with Uncertain Parameters," IEEE Trans. on Aero. & Elec. System, Vol. AES-21, pp. 594-600, 1985, 9.
- [3] Minkler, G and Minkler, J. *Theory and Application of Kalman Filtering*, Magellan, 1993.
- [4] Jazwinski, Andrew H. *Stochastic Processes and Filtering Theory*, Academic Press, 1970.
- [5] Doebelin, E. O., *Measurement System : Application and Design*, 4th Edition McGRAW-Hill, New York, 1990.
- [6] 한국표준연구소, *가공체 치수의 자동 측정기술 개발 (I)*, KSRI-89-93-1R, 1989.
- [7] 한국표준연구소, *가공체 치수의 자동 측정기술 개발 (II)*, KSRI-91-91-1R, 1991.
- [8] 김종건, 배종일, 이만형, "가공품의 In-Line 실시간 측정 기법의 개발," 한국자동차제어학술회의논문집, pp 217-220, 1995.
- [9] Lee, J. N., Bae, J. I., Lee, S., Lee, M. H., and Lee, J. M., "Development of Real Time and In-Process Gauging Technology for Grinding Process of Cylindrical Workpieces," Proceedings of The IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'97, pp. 160-164, 1997.