

칼만필터를 이용한 초대형 용접구조물의 용접선 추적에 관한 연구

주해호*, 이화조*, 김석환**

A Study on Welding Path Finding For The Large Structure Using Kalman Filter

Hea Ho Joo*, Hwa Cho Yi*, and Seok Hwan Kim**

ABSTRACT

In this paper a basic technique of gantry robot control system has been developed to weld the curved part of a large structure. A welding robot is designed to rotate torch and make the torch angle normal to the welding surface. The Kalman filter is applied to obtain the smooth welding path signal from the noised sensing data. A welding path finding algorithm has been developed in Turbo-C language.

Key Words : Box-Column(박스칼럼), Welding Robot(용접로봇), Kalman Filter(칼만필터), White Noise(백색 잡음), Multi Motion Control Board(MMC : 다운동제어반)

1. 서론

오늘날 많은 생산, 제작분야에 있어 생산성의 향상을 위해서는 용접자동화가 필수적인 것으로 인식되고 있다. 특히 초대형 용접구조물에 있어서도 용접불량 방지 및 작업생산성 향상을 위한 용접자동화의 필요성이 요구되고 있다. 교각 및 고속도로 인터체인지에 사용되는 박스칼럼(Box Column)은 국내뿐 아니라 해외에서 활동하고 있는 국내외업체들도 많이 사용하고 있어 국제 경쟁력향상과 구조물의 안정성 향상을 위하여 용접공정의 자동화가 절실한 실정이다. 용접공정이 자동화되면 일정한 품질의 박스칼럼을 생산할 수 있게 되어 박스칼럼을 사용하는 각종 교각과 고속도로의 인터체인지의 안정성에 대한 신뢰도가 향상될 것으로 기대

된다. 그러나, 직선부와는 달리 곡선부를 포함하는 박스칼럼 용접공정은 우수한 시스템을 보유하고 있는 업체의 경우에도 완전한 자동화에는 미치지 못하고 있어 이에 대한 기술개발의 필요성이 커지고 있다. 박스칼럼 용접시에 용접시간 단축을 통한 생산성 향상을 위해서는 실시간으로 센싱과 동시에 용접을 하는 것이 바람직하나, 용접시 접촉식 센서에서 A/D보드를 거쳐 입력되는 용접선 데이터에는 각종 잡음이 포함되어 있어 이에 대한 고려가 필요하다. 강한 용접불꽃의 영향 및 용접모재 자체의 표면특성과 모재가 접촉식 센서와 접촉함에 기인하는 노이즈의 발생, 센서에서 A/D보드를 거치는 과정에서 발생하는 노이즈, A/D변환시에 발생하는 오차 등은 모두 센싱 데이터의 노이즈로 나타나게 된다. 또한 곡선부 용접을 위한 용접선 추적의 경우

* 영남대학교 기계공학부
** 영남대학교 대학원

에는 직선부에서와 달리 용접선이 계속적으로 변화하므로 노이즈의 영향을 용접선과 분리하는 것이 더욱 어려워진다. 이러한 노이즈는 용접선내에서 불규칙한 굴곡부로 나타난다.

본 논문에서 계속 변화하는 곡선부의 용접선을 따라가며 용접을 행하기 위해서 토치가 용접선과 항상 직각을 유지할 수 있도록 회전가능한 장치를 설계하였다. 이러한 회전시에 심한 굴곡부를 만나게 되면 용접토치는 그 회전각이 급격히 변화하게 되어 오히려 용접품질에 심각한 악영향을 끼칠 수 있으므로, 노이즈의 영향을 최대한 줄이고, 용접선 추적이 최적으로 실제의 곡선부를 따라갈 수 있도록 데이터를 처리할 필요가 있다. 또한 실시간 용접에 따르는 시간적인 제한조건도 고려할 필요가 있다. 이러한 조건을 만족할 수 있는 계산 알고리즘으로 최적의 추정기 및 칼만필터(Kalman filter)를 적용한다.^[1,2] 칼만 필터는 노이즈와 같이 직접적인 방법으로는 이해할 수 없는 정보에 대해 간접적인 접근방법을 제시해 준다. 상대공간에 대한 확률론적인 접근에 의하여 센싱된 데이터에서 노이즈의 영향을 최소화하는 최적의 용접선을 구할 수 있다.

Shinobu등^[3]은 이동중인 차량을 칼만필터를 사용하여 차량의 위치를 추정 및 제어하였고, Mark E. Campbell^[4]은 확장칼만필터를 이용하여 시스템에서 발생하는 불확실성을 추정하였다. 임양남^[5]은 화상처리를 위한 목표물의 실시간 시각추적에 칼만필터를 이용하였으며, 원종훈^[6]은 GPS위성의 가시성이 제한을 받는 도심지 환경하에서의 차량항법제어에 칼만필터를 적용하였다.

본 연구의 결과가 적용될 곡선 용접구조물을 용접하기 위한 겐트리 로봇(Gantry Robot) 제어시스템은 MMC보드 사용시 하나의 제어기로 최대 32축까지의 제어가 가능하지만, 곡선부의 용접선 추적을 위해서는 3축이 기본이 되므로, 본 논문에서는 3축로봇을 구성하여 실험을 하였다. 이와 같은 실험을 통하여 초대형 용접구조물의 곡선부 용접을 위한 최적의 용접용 겐트리 로봇 제어시스템의 기반기술을 개발하였다.

2. 박스칼럼 용접로봇

박스칼럼은 국내외적으로 많은 수요를 가지고 있음에도 불구하고 현재 국내에는 위와 같은 조건을 만족하는 완전한 용접자동화 기술을 보유하고

있는 업체가 아직 없으며 몇몇 일본 업체들이 세계 시장을 독점하고 있는 실정이다.

기존의 시스템은 접촉식 센서를 이용하여 센서가 정해진 범위안에 있을 때만 용접을 하게 되어 있다. 이러한 센서구조는 교정이 잘되어 있지 않을 경우에는 용접불량을 초래하게 된다. 특히 용접선이 직선이 아닐 경우 용접토치와 센서와의 거리차이로 인하여 용접이 되지 않는 부분이 발생할 수 있다. 또한 박스칼럼이 직선이 아닌 경우, 용접선 방향에 대하여 고정된 토치는 용접선의 방향에 직각을 이룰 수 없으므로 용접 불량을 초래할 수 있다. 이러한 현상은 곡률반경이 적은 경우에는 더욱 심각하며, 용접선이 직선이라도 용접물의 놓인 방향과 이송방향 사이의 각도가 커지면 발생할 수 있다. 또한 교각과 같은 대형구조물의 경우 용접물을 이송방향과 평행하게 위치시키는 것은 용이하지 않다.

3. 칼만 필터를 이용한 용접선 추적

3.1 칼만필터

본 논문에서는 측정된 데이터에 대한 오차를 필터링하여, 최적의 용접선을 찾기 위해 칼만 필터를 사용한다. 이때 칼만 필터는 Fig. 1과 같은 루프를 반복하는 4개의 식으로 표시되며, 각각의 식은 아래 같다.

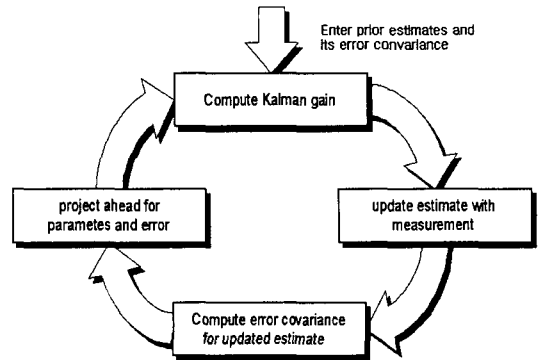


Fig. 1 Kalman filter loop

① 칼만필터의 게인 행렬

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

② 측정값을 통한 추정값의 갱신

$$\hat{x} = \hat{x}_{\bar{k}} + K_k(z_k - H_k \hat{x}_{\bar{k}}) \quad (2)$$

③ 오차의 공분산 행렬

$$P_x = (I - K_k H_k) P_{\bar{k}} \quad (3)$$

④ 변수 및 오차의 추정

$$\hat{x}_{\bar{k}+1} = \phi_k \hat{x}_{\bar{k}} \quad (4)$$

$$P_{\bar{k}+1} = \phi_k P_k \phi_k^T + Q_k \quad (5)$$

행렬 Q의 공분산은 다음의 성분을 가진다.

$$Q_{11} = E\{u_1^2\}$$

$$Q_{12} = E\{u_1 \times u_2\} = Q_{21}$$

$$Q_{22} = E\{u_2^2\}$$

R은 거리에 대한 오차의 1×1 공분산 행렬로 그 값을 결정한다 각각의 변수는 다음과 같다.

\hat{x}_{k+1} : 다음 시간 에서의 변수 추정 벡터

P_k : 현재 변수들의 오차 분산 행렬

$P_{\bar{k}}$: 현재 변수 추정치의 오차분산행렬

$P_{\bar{k}+1}$: 다음의 변수추정치 에러분산 행렬

z_k : 측정값 벡터

H_k : 시간 t_k 에서 상태벡터와 측정값 사이의 관계행렬

R_k : 측정에러 분산값을 나타내는 행렬, 알고 있거나 추정되어진 값

ϕ_k : 상태전이 행렬

K_k : $\hat{x}_{\bar{k}}$ 와 x_k 사이의 오차 상관도를 나타내는 게인 행렬

Q_k : 프로세스 노이즈의 공분산

$$x_1(k+1) = x_1(k) + t x_2(k) + \frac{1}{2} t^2 (a - v) \quad (6)$$

$$x_2(k+1) = x_2(k) + t(a - v) \quad (7)$$

여기서,

a : 가속도,

v : 가속도 성분 오차

이를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \Phi \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} at^2 \\ at \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} vt^2 \\ tv \end{bmatrix}$$

여기서

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

측정값을 y 라 하면,

$$y = x_1 + \omega \quad (9)$$

여기서 ω 는 측정 오차이고 화이트 노이즈라고 가정한다.

3.2.2 상호관련 노이즈

3.2.1에서는 모든 노이즈가 화이트 노이즈라고 가정하였다. 그러나, 노이즈가 화이트 노이즈가 아닌 것을 아는 경우에는 이를 고려해줄 필요가 있다. 상호관련 노이즈에 대한 해석은 지수적 상호관련 노이즈가 있다. 이때 노이즈는 시정수에 지수적으로 상호관련되어 있다.

$$E\{n(k) \times n(k+m)\} = \sigma^2 \times \beta^{|m|} \quad (10)$$

여기서 σ 는 오차에 대한 표준편차이고, β 는 1보다 작은 상수이다.

$$\text{시정수} = -\frac{t}{\ln \beta} \quad (11)$$

여기서 $u_3(k)$ 가 화이트 노이즈로 그 분산이 $(1 - \beta^2) \times \sigma^2$ 일 때

$$x_3(k+1) = \beta \times x_3(k) + u_3(k) \quad (12)$$

$$E\{x_3(k) \times x_3(k+m)\} = \sigma^2 \times \beta^{|m|} \quad (13)$$

여기서 $u_3(k)$ 은 지수적 상호관련 노이즈이다. 위의 식(9)는 다음과 같이 된다.

$$y = x_1 + x_3 + \omega \quad (14)$$

x_3, x_4 를 각각 시간 정수를 달리하는 지수적 상호관련 노이즈라 하면 다음식으로 나타낼 수 있

3.2 용접선 추적 모델링^[6,7,8]

3.2.1 화이트 노이즈

모든 노이즈는 화이트 노이즈라 가정한다. 각각의 변수는 다음과 같다.

$x_1(k)$: 시간 t_k 에서의 거리

$x_2(k)$: 시간 t_k 에서의 속도

여기서 $x_1(k), x_2(k)$ 는 두 개의 성분을 가지는 $x(k)$ 의 첫 번째, 두 번째 성분들이다. t 가 측정 시간일 때, 거리와 속도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

다.

$$y = x_1 + x_3 + x_4 + \omega \quad (15)$$

식(15)에 대하여 3.2.1에서와 같이 행렬형식으로 변환하여 모델링을 하고, 이를 3.1의 칼만필터 루프에 적용한다.

4. 실험 장치 및 방법

4.1 시스템 구성 및 실험 개요

다음은 시스템의 구성에 대한 간략도이다.

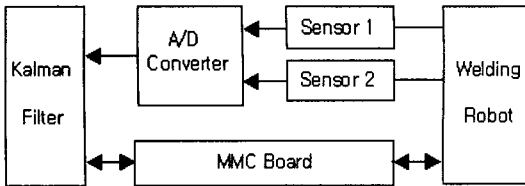


Fig. 2 System Configuration

일반적인 박스 칼럼 용접로봇의 경우, 토치선단부가 직선용접부를 따라가며 작업을 수행한다. 이러한 직선 용접부에서는 토치선단부가 용접선과 항상 직각을 이루고 있음에 반하여, 용접모재에 휨이 발생하는등 용접선의 각이 변화하는 경우, 토치선단부와 용접선이 직각을 이룰 수 없게 되어 용접품질의 불량을 초래할 수 밖에 없다. 물론 곡선부를 가지는 용접모재에는 그 적용이 불가능하다.

이에 본 논문에서는 직선부 및 곡선부에 대해서도 용접이 가능하도록 용접토치부가 곡선부를 따라서 회전가능한 구조로 설계하였다. 그러나, 센서부는 고정하여 보다 안정적으로 용접선 데이터를 읽어들이 수 있도록 하였다. 이러한 센싱부의 고정으로 인해 정확한 센싱이 가능한 곡선부의 변각(變角)범위(용접모재가 가지는 각의 변화)는 감소하나, 센싱부의 고정으로 인하여 센싱된 데이터에 노이즈가 감소하며, 용접토치의 회전각에 대한 계산이 용이해지는 이점을 얻을 수 있다.

Fig. 2에서 Sensor 1은 수평방향, Sensor 2는 수직방향 센서이고 접촉식인 FASTAR FS-1K 센서를 사용하여, 최대 4kHz까지 대응한다. Fig. 3에서와 같이 토치가 용접구조물에 대하여 항상 직각을 유지함에 반하여 센서는 진행방향에 대하여 고정하여 항상 직각을 유지하도록 하였다. 이 경우 접촉식

센서의 특성상 센싱각의 범위는 θ 가 일정 각을 넘지 않는 경우로 제한되지만, 데이터처리를 위한 계산시간이 짧아지며 토치회전부의 구조를 간단히 할 수 있다.

A/D 컨버터에서는 센서로 부터의 데이터를 퓨터에 보낸다. 컴퓨터에서는 칼만 필터 알고리즘을 사용하여 데이터로부터 노이즈를 제거하고, 서보모터에 지령을 주기 위한 거리 및 속도, 가속도를 계산한다. MMC보드에서는 계산된 명령을 각각의 서보모터에 분배하여 좁과 동시에 서보모터로 부터는 현재의 위치를 엔코더(encoder)로부터 읽어들이 계산시에 사용할 수 있게 한다. 최종적으로 서보모터는 변화하는 용접선에 따라 토치의 각을 변화시켜 토치와 모재가 항상 직각을 유지하게 한다.

서보모터 제어용으로 사용된 MMC보드는 PC기반의 슬롯 형태로 확장성이 좋고 다양한 모터의 동작제어가 가능하며 폭넓은 동작 및 I/O 함수를 C-Library형태로 제공한다. 8축용 MMC 보드를 4장 동시에 사용할 경우에는 최대 32축까지의 제어가 가능하며, 현장에서와 같이 복수의 로봇을 사용하는 박스 칼럼의 용접에 확장이 가능하다.

4.2 토치 회전부

Fig. 3에서와 같이 센서 및 토치가 장착된 축은 모재의 변각(變角) θ 가 변하여도 항상 x축에 대하여 평행을 유지하며, θ 각에 따르는 y의 변화량에 대하여 y축 방향으로만 이동한다. 센서 또한 이러한 축에 고정되어 회전 없이 측정을 계속한다. 이에 반해 토치는 곡선부에 대하여 항상 직각을 유지하기 위해 y축에 대하여 변화하는 θ 만큼 움직인다. 이러한 경우 모재의 단위 길이당 용접속도가 달라지게 되어 용접품질의 변화를 가져오게 된다. 그러나 θ 가 작을 때 이러한 변화는 무시할 수 있으므로 본 실험에서는 고려하지 않았다

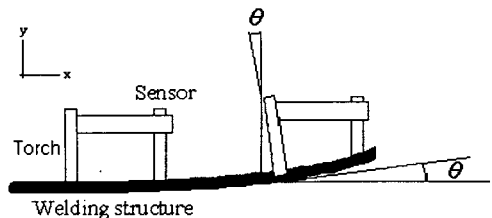


Fig. 3 Torch and Sensor

4.3 실험방법

실험에 사용한 시험편은 일정각을 유지하는 두 직선부의 결합으로 구성하였다. 접촉식 센서는 그 특성상 용접불꽃에 의한 전류 및 전압의 변화에 둔감하므로, 본 실험에서는 실제 용접이 없이 센싱하고, 노이즈를 추가하여 실험하였다.

다음으로 칼만 필터의 변수값들을 변화시켜 가며 각각의 값들이 용접선 추적을 위한 데이터 필터링에 어떤 영향을 끼치는 지를 확인하였다. 실험의 반복을 통해 최적의 값을 찾아내어 이를 최종적인 실제의 경우에 적용하도록 하였다.

이론적으로는 오차추정에 대한 오차의 범위를 알고 변수를 설정하는 것으로 적용이 가능하나, 본 논문의 실험에서는 완전히 예상할 수 없는 경우로 가정하여 실험을 행하였으므로, 실험의 반복을 통하여 최적값을 구하였다.

2개의 센싱데이터에 대한 칼만필터의 알고리즘 처리시간은 약 4ms이며, A/D 컨버터에서 데이터를 처리하는데 걸리는 시간 및 모터에 대한 이송명령 처리시간이 1ms정도다. 실제 본 연구를 적용할 시스템은 최대 6개의 토치회전부 장착을 목적하므로, 최대 알고리즘 처리시간은 30ms 소요됨을 알 수 있다. 따라서, 진행방향으로 최대속도 16.7mm/s의 경우 1mm 진행에 대하여 최소 2번 이상의 센싱이 가능하며, 원하는 용접품질을 얻기에 충분함을 알 수 있다. 실험은 진행방향 최대속도의 3배인 50mm/s속도로 하였으며, 실제적으로 토치를 이송할 때 토치가 이루는 각을 확인 용접선 추적 알고리즘의 신뢰성을 확인하였다.

5. 실험 결과

5.1 입력데이터와 필터링된 데이터의 비교

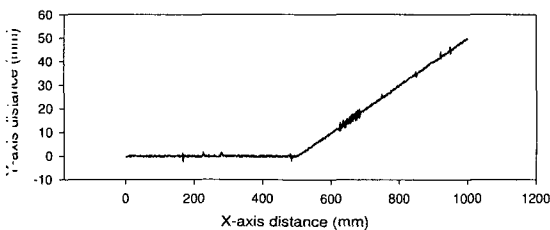


Fig. 4 Input Data

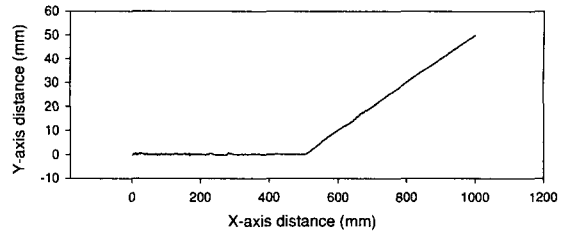


Fig. 5 Filtered Data

Fig. 4는 센서에서 받아들인 데이터이며, Fig. 5은 칼만 필터를 적용한 후의 데이터이다. Fig. 5에서 여전히 얼마간의 노이즈는 포함되어 있으나 그 값은 Fig. 4와 비교할 때 노이즈의 영향이 감소해 있음을 알 수 있다.

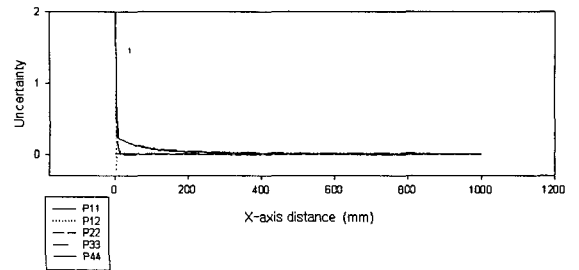


Fig. 6 Uncertainty

Fig. 6에서 나타낸 P는 시스템의 불확실성에 대한 값들로 각각의 값들이 안정되고 있다. P_{11} , P_{12} , P_{22} , P_{33} , P_{44} 는 각각 x_1 , $x_1 * x_2$, x_2 , x_3 , x_4 에 대한 불확실성을 나타내는 값들이다. Fig 7에서와 같이 초기에 심한 불확실성을 나타내나, 모든 값들이 점진적으로 안정됨을 확인할 수 있다. 따라서 노이즈에 의한 불확실성을 최소로 제한하는 시스템을 구할 수 있다.

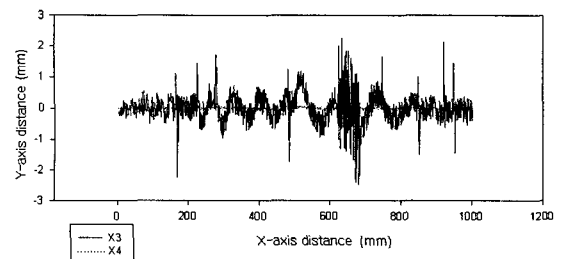


Fig. 7 Noise factor x3, x4

x_3, x_4 는 각각의 시간 정수를 가지는 상호관련 노이즈의 항들로 결과적으로 Fig. 4의 노이즈가 있는 데이터가 필터링을 통하여 Fig. 5의 용접선 데이터와 Fig. 7의 노이즈로 구분되었음을 보인다.

5.2 토치 이송각 결정

5.1에서는 얻어진 데이터에서 노이즈의 영향을 최소화한 안정된 데이터를 얻을 수 있었다. 실제 토치가 시험편을 따라서 용접시 급격한 이송각의 변화 및 그 진동이 용접품질에 나쁜 영향을 미치지 않도록 그 회전각을 결정하여야 한다.

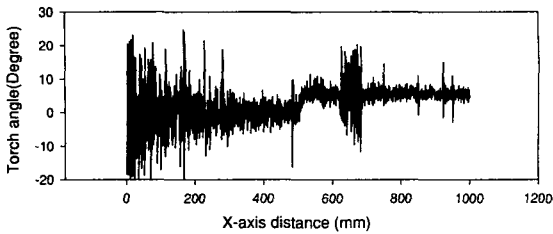


Fig. 8 Angle from Kalman filtered data (from Fig. 5)

Fig. 5의 필터링된 데이터를 각도로 변환하면 Fig. 8과 같이 아주 심한 기복을 보인다. 이는 필터링된 데이터에도 여전히 노이즈의 영향이 남아 있으므로 별도의 필터링을 실시하지 않는한 불가피한 것으로 생각된다. 이러한 각을 토치에 적용하면 토치는 최대 40도의 회전각 변화를 각각의 포인트마다 일으키게 되고 이는 심각한 용접 품질 악화를 가져온다. 또한 Fig. 8의 데이터에 다시 칼만필터를 적용하여도 Fig. 9과 같이 여전히 토치각의 변화가 크게 되어 이러한 적용은 무의미함을 알 수 있다.

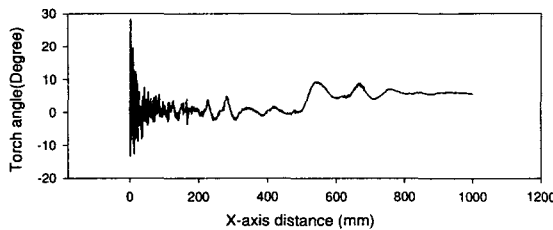


Fig. 9 Kalman filtered angle (from Fig. 8)

Fig. 5의 데이터를 보면 미소한 편차를 보이고

있다. 이러한 데이터의 편차는 Fig. 8에서와 같이 급격한 각도의 편차를 가져온다. 그러나 이러한 각도의 편차는 Fig. 5에의 편차와 마찬가지로 평균값이 일정한 경향을 이루게 됨을 알 수 있다. 즉, 이러한 편차는 노이즈와는 달리 용접선 데이터에 굴곡의 형태로 나타나는 것으로 실제적으로는 아주 미소한 부분에서 급증과 급감이 반복되는 것이다. 그러나 Fig. 8의 데이터에서 토치각의 최대 변화량을 제한하여 급격한 토치 각도의 변화를 억제한 결과 Fig. 10과 같은 결과를 얻었다.

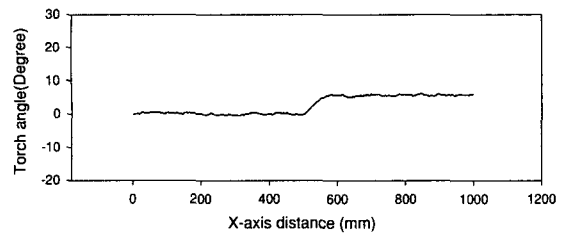


Fig. 10 Angle in limited maximum change

각에 대해서만 생각했을 경우에는 Fig. 4의 필터링하기 전의 데이터 역시 Fig. 8의 방법만으로도 어느 정도 좋은 결과를 얻을 수 있다.

그러나 이 경우 y방향으로 변화하는 오차를 줄여줄 수 없으므로 y방향으로 심하게 튀는 현상이 발생한다. 이와 같이 y방향으로 튀는 현상을 칼만 필터가 감소시킴으로써 실제의 노이즈가 적용될 때 중요한 역할을 하게 된다.

Fig. 11의 그래프는 실제 용접을 위한 토치각의 변화를 나타낸 것이다. 시험편의 각도 θ 를 고정하고, 노이즈를 추가하여 실험을 하였다. Fig. 10에서 얻어진 데이터를 적용할 경우 Fig. 11와 같이 급격한 각의 변화에도 토치는 완만한 속도로 회전하여 주어진 각도에 도달하게 된다.

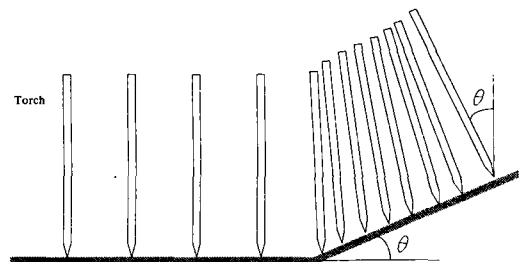


Fig. 11 Torch Angle for welding

6. 결론

박스칼럼 용접자동화를 위한 겐트리 용접 시스템의 기반기술 개발을 위해 3축의 모터와 센서로 구성된 실험을 행하였다. 용접시의 노이즈의 영향을 줄이기 위하여 칼만필터 알고리즘을 사용하였고, 일반적으로 직선용접만이 가능한 박스칼럼 자동용접에서 곡선부 역시 용접하기 위해서 토치부가 회전할 수 있는 구조로 설계하였다.

실험시 센서에서 입력된 데이터에는 실제용접이 이루어지지 않은 상태이므로 상대적으로 노이즈의 영향이 미소하였다. 알고리즘의 신뢰성 확인을 위하여 노이즈를 추가하여 실험을 계속하였다. 또한 실제 용접구조물과 용접토치부가 직각을 이루기 위한 각도 계산에서도 급격한 각도변화없이 원하는 각을 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 실험에서는 센서를 고정함으로 센싱된 데이터의 처리에 필요한 계산과정을 줄일 수 있었으나, 센서가 고정됨으로 인하여 센싱가능한 각의 범위는 제한되었다. 측정각의 제한은 센서를 토치에 장착하여 함께 회전시킴으로 극복할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 경우 그 회전각에 따라서 센싱 포인트의 절대적 좌표값에 대한 계산이 어려워지므로 계산시간이 길어져 결과적으로 센싱포인트의 수를 줄이는 문제점을 계속 연구할 필요가 있다.

후기

이 논문은 1998학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원에 의한 것임

참고문헌

1. Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, "Kalman filtering theory and practice," Prentice Hall, 1993.
2. R.S.Bucy and P.D.Joseph, "Filtering for Stochastic Process, with Application to Guidance," Wiley, 1968.
3. Shinobu kawashima, Kajiro Watanabe and Kazuyuki Kobayashi, "Traffic Monitor by Kalman Filtering of the Laser Radar Signals," 1996' IFAC, pp. 165-169, 1996.
4. Mark E. Campbell, "Identification and Parameter Estimation for Control Design," 1996' IFAC, pp. 209-214, 1996.
5. Lim, Y.N., "The implementation of the realtime visual tracking of moving target by using Kalman filter," Autumn C. of KSPE, pp. 254~258, 1996.
6. Lee, J. S. and Won, J. H., "Modified extended kalman filter technique for car navigation in urban environment with limited GPS visibility," J. of 한국항공, Vol. 25, No. 3, pp. 1225-1348, 1997.
7. Rim, Y.N., "Real-time Target Tracking System by Extended Kalman Filter," J. of KSPE, Vol. 15, No. 7, pp. 175~181, 1998.
8. Robert Grover Brown, "Introduction to Random Signal Analysis and Kalman Filtering," John wiley & Sons Inc., pp. 195~200, 1983.