

용접선 자동추적장치의 강인성에 관한 연구

A Study on Robustness of Automatic Seam Tracking System

° 강희신*, 조택동**, 양상민*

- * 충남대학교 대학원 기계설계공학과
- ** 충남대학교 기계설계공학과

Abstracts In this research, the robustness of a seam tracking for the automatic welding system is studied. The laser displacement sensor is used as a seam finder. X-Y moving table driven by ac servo motor controls the position and velocity of the torch-and-sensor part. However, dc servo motor is used to control the position and velocity of the torch. The sensor locates ahead of torch to preview the weld line, and brings about the inaccuracy on the torch tracking. To enhance the robustness on this system against the influence of disturbances and model uncertainty, H_{∞} control is applied to the angular motion of torch. The simulation shows that the tracking accuracy improved significantly. Also, experimental results give a good performance of H_{∞} control strategy to the automatic seam tracking system for the welding.

Keywords Welding, Torch, H_{∞} control, Robustness, Tracking

1. 서론

기계가공 분야에서 용접이 차지하는 비중은 새로운 재료의 개발 및 응용분야의 확대와 더불어 증가되었지만 용접의 자동화는 자동차공업의 일반 생산라인의 점용접 공정 외에는 아직 크게 보편화 되지 못하고 있는 실정이다. 그러나 용접작업은 일반 기계가공 공정에 비해 보다 힘들고, 상대적으로 유해한 환경에서 행하여 진다는 점에서 어려운 작업으로 인식되어 있고 사회의 전반적인 생활수준 향상과 더불어 숙련된 용접인력 공급의 문제를 겪게 될 전망이다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 용접공정의 자동화가 필수적이고 이를 위해 용접선을 스스로 감지해 추적하는 장치의 개발은 반드시 선결되어야 하는 문제이다.

용접선을 자동으로 추적하기 위해서는 용접선의 위치와 형상을 독자적으로 인식하여 경로 변화에 대한 정보를 획득할 수 있는 성능 좋은 센서가 요구된다. 본 연구에서는 레이저 변위 센서를 이용하여 용접선을 미리 인식(preview)하고 얻어진 정보를 이용하여 토치로 하여금 용접 경로를 추적하는 실험을 하였다. X-Y 테이블의 각축은 ac 서보 모터에 의해 구동되며 센서의 위치를 제어하며, 센서는 용접 중심선의 위치를 기준으로 하여 궤적을 따라가게 한다. preview 제어 시스템에서 경로 변화에 의한 용접 토치의 오차 발생을 보정하기 위해 dc 서보 모터를 이용하여 토오치의 회전각을 제어함으로써 다양한 용접선의 자동 추적이 가능함을 보였다. 토치의 회전각 제어를 위해 H_{∞} 제어를 적용하여 외란과 잡음이 있는 환경에서 토치가 용접선을 효과적으로 추적하는지의 여부에 초점을 맞추어서 진신평가를 하였다.

2. 용접선 인식 및 용접선 추적의 원리

본 연구에서 용접경로의 추적은 용접선을 인식하기 위한 센서 위치의 제어와 토치의 회전각을 dc 서보 전동기를 이용하여 제어하는 두 부분으로 나누어 수행된다. 추적할 용접선 경로는 V 형으로 되어 있으며 용접선 추적을 위한 기준점을 찾기 위하여 Fig. 1과 같이 용접선의 직각 방향으로 X-Y 테이블을 구동하면

서 레이저 변위 센서에서 경사면까지의 거리를 매 샘플링마다 측정한다. 이때 변위센서로부터 얻어진 정보의 정확도를 용접선의 중앙으로 인식하게 된다. 따라서 V형 용접선의 경우 기준선은 좌우 경사면이 접하는 용접선의 중앙에 위치하며 레이저 변위센서는 측정된 기준선을 따라 경로를 추적하게 된다.

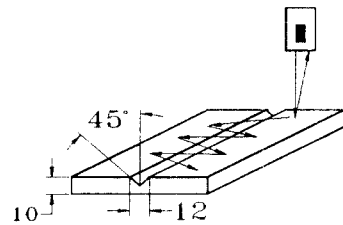


그림 1. 기준점을 찾기 위한 센서의 위빙 동작
Fig. 1. Weaving motion of sensor to search the reference point

토치는 센서가 앞서서 측정(preview)한 용접선의 정보를 이용하여 용접선을 최소의 오차로 추종하기 위해 계산된 정보에 따라 토치의 위치 보정을 해주어야 하는데 이를 위해 토치 고정암을 회전하는 방식을 사용했다. 센서와 토치부가 서로 고정되어 있으면 변화가 있는 용접경로를 추적할 경우 Fig. 2(a)와 같이 경로오차가 생기게 되므로 토치와 센서의 상대적인 위치 이동이 필요하다. 따라서 토치부를 용접 경로의 변화에 따라 회전함으로써 Fig. 2(b)와 같이 용접 경로의 오차 없이 추적할 수 있다. 토치의 회전각은 센서의 위치와 토치가 다음에 이동해야 할 위치와의 회전각의 차이가 된다.

이때 토치 구동부의 회전에 의해 토치 x축의 위치가 감소하며 이러한 오차로 인해 용접경로의 y축 좌표와 토치의 y축 위치의 차는 잘못된 정보를 얻게 되고 이로 인해 토치는 용접경로를 벗어나게 된다. 따라서, 토치부의 회전으로 인한 토치 x축의 위치는 추적하려는 센서의 x축의 위치와 비교하여 한 샘플링 동안의 용접 경로 정보를 수정하여야 한다. 이를 보정하기 위해 다음

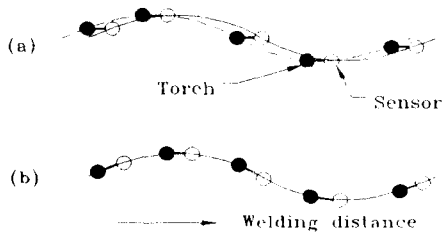


그림 2. 용접 토치에 앞선 센서를 갖는 굽은 용접선의 추적
(a) 고정된 토치 (b) 회전하는 토치
Fig. 2. Tracking of curved line with a sensor ahead of weld torch
(a) Fixed torch (b) Rotated torch

같은 알고리즘을 적용함으로써 용접 경로의 추적은 가능하다. 센서의 x, y축 정보와 토치의 x, y축 정보의 차이를 $X_Error(k)$, $Y_Error(k)$ 라 하면

$$X_Error(k) = X_sensor(k-j) - X_torch(k) \quad (1)$$

$$Y_Error(k) = Y_sensor(k-j) - Y_torch(k) \quad (2)$$

여기서, j는 초기에 레이저 센서와 토치 사이의 거리를 매 샘플링 시간에 이동해야 할 desired weld distance로 나눈 것이며 이는 센서가 j 스텝 앞서서 진행하고 있음을 알 수 있다. 이것은 레이저 센서가 용접 토치에 근접하게 위치하면 용접 아크열이나 스패터의 영향을 받게 되기 때문이다.

측정부의 위치를 기준으로 토치의 위치를 계산하며, 테이블의 y축의 구동입력은 센서가 용접선을 추적하기 위해 제어되고 x축의 구동입력은 용접속도를 일정하게 유지시켜주기 위해 다음 식에 의해 계산된다.

$$\Delta X(k) = \sqrt{L^2 - \Delta Y(k)^2} \quad (3)$$

여기서 L은 desired weld distance이다.

변화가 있는 용접 경로에 대해 측정부에서 얻어진 x, y축의 좌표를 토치가 추종하기 위해서는 토치는 회전하여야 한다. 토치의 회전에 의해 토치의 x축의 좌표는 추적해야 하는 측정부의 x축 좌표에 대해 오차가 발생한다. 그것은 다음 스텝의 토치의 x축 좌표에 대한 y축의 좌표를 잘못 인식하게 되는 원인이 된다. 따라서, x축 좌표의 변화에 따라 y축의 좌표를 보장하여야 한다. x축의 보정 스텝 m은 다음과 같다.

$$m = X_Error(k) / L \quad (4)$$

$$Y_Error(k) = Y_sensor(k-j-m) - Y_torch(k) \quad (5)$$

이다.

3. 전산모사

3.1 직류 서보 전동기의 모델링

dc 서보 전동기의 위치 및 속도는 회전각 θ 와 각속도 ω 에 비례하므로 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } K_m = \frac{K K_t}{(R_a B_m + K_t K_b)}, \quad T_m = \frac{R_a J_m}{(R_a B_m + K_t K_b)}$$

식 (6)를 dc 서보 전동기의 상태 방정식으로 전환하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\theta(t)}{dt} \\ \frac{d\omega(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_m}{T_m} \end{bmatrix} E_a(t) \quad (7)$$

$$y(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix}$$

식 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (8)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

여기서 A, B, C는 식 (9)와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -125 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 247 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0] \quad (9)$$

3.2 H_∞ 제어 문제의 정식화와 가정

H_∞ 제어기 설계 문제는 Fig. 3에서 플랜트 P(s)에 대한 제어기 K(s)를 구하는 것이다. 여기서 K(s)는 페루프 전달함수 T_{zw} 의 무한대 놈(norm)을 주어진 γ 값보다 작도록 한다.

$$\|T_{zw}\|_\infty \leq \gamma \quad (10)$$

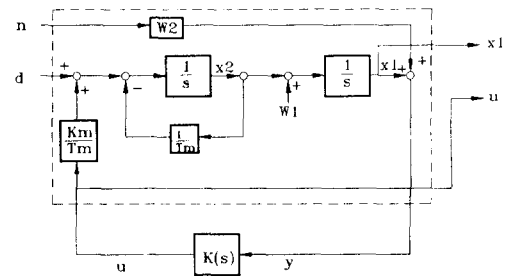


그림 3. H_∞ 제어에 대한 두 포트 블록 선도

Fig. 3. The two port block diagram for H_∞ control

전달행렬 P는 다음과 같은 형태로 구현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) &= C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) &= C_2 x(t) + D_{21} w(t) + D_{22} u(t) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (9)과 (11)에서 dc 서보 전동기의 전달행렬 P는 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -125 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} W_1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 247 \end{bmatrix} \\ C_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_2 = [1 \quad 0] \\ D_{11} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad D_{21} = [0 \quad W_2], \quad D_{22} = [0] \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 W_1 과 W_2 는 가중치이며 설계패키지에 의한 모의 실험을 통하여 결정되었다. 각각 1, 0.07의 값을 갖는다.

3.3 H_∞ 제어의 해

주어진 γ 값에 대하여 $\|T_{zw}\|_\infty \leq \gamma$ 를 만족하는 제어기 K 를 설계하기 위하여 제어기와 측정기의 대수 리카티 방정식의 해를 얻어 각각의 해가 positive definite하고 두 해의 곱의 spectral radius가 γ^2 보다 작음을 확인하는 반복 계산법에 의해 H_∞ norm을 최소화시켰다. 설계패키지를 이용해 구해진 최소의 γ 값과 대수 리카티 방정식의 해는 다음과 같다.

$$\gamma = 1.1$$

$$X_\infty = \begin{bmatrix} 0.582 & 0.005 \\ 0.005 & 0 \end{bmatrix}, \quad Y_\infty = \begin{bmatrix} 0.071 & 0.007 \\ 0.007 & 0.004 \end{bmatrix}$$

위의 경우에 제어기 K 의 상태방정식과 전달함수는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -14 & 1 \\ -281 & -127 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 15 \\ 1.5 \end{bmatrix} y$$

$$u = \begin{bmatrix} -1.122 & -0.009 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$K(s) = \frac{-16.9s - 2115.7}{s^2 + 141.7s + 2119}$$

4. 실험

4.1 실험 장치

용접시편의 두께는 10mm이고 용접선의 폭은 12mm이며 45° 경사진 V형 용접 홈을 가지는 연강을 사용하였다. 용접선은 일정거리 이후 그 방향을 45° 정도 방향 전환하도록 하는 형태로 제작해서 변화가 있는 용접선의 추적실험을 하고자 하였다.

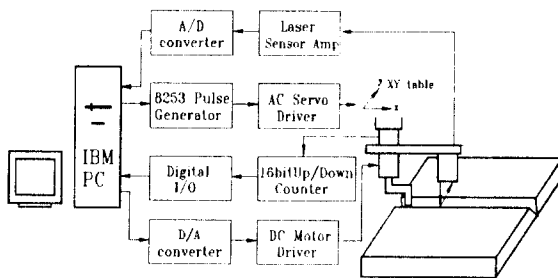


그림 4. 시스템 개략도
Fig. 4. Schematic diagram of the system

Fig. 4은 구성된 시스템의 개략도이며 펜티엄 PC를 제어용 컴퓨터로 이용하였다. X-Y 테이블의 각축에 장착되어 있는 ac 서보 전동기를 구동하는 ac 서보 드라이버는 3상 전류를 입력받고 제어용 입력 신호는 펄스 입력 방식이다. X-Y 테이블의 제어 입력을 위해서 8253 타이머 칩을 이용한 펄스 발진기 회로를 구성하였으며 이 펄스 발진기는 X-Y 테이블의 2축을 독립적으로 동시에 제어할 수 있도록 두 개의 펄스 발생회로를 구성하였으며 각각 독립된 주소를 통하여 접근하게 되어 있다. X-Y 테이블의 각 축은 5mm/rev의 볼 스크류에 의해 회전운동을 직선운동으로 전환하게 되어 100 펄스당 1mm의 거리를 직선운동하게 된다. x축에는 센서와 토치부를 장착할 수 있는 마운팅부가 있다.

용접시편의 거리를 측정하여 용접선의 증앙을 인식하는 센서로서는 레이저 변위센서를 사용하였으며 이 레이저 변위센서는 Keyence사의 LC2320을 사용하였으며 V형 용접선의 기하학적 형상을 검출하기 위해 센서에서 용접시편까지의 거리를 측정하는데 이용된다. 기준측정거리(offset distance)가 ±50mm이며 측정 범위는 ±8mm이다. 이 측정 범위에 상당하는 아날로그 출력(analog output)이 ±4V가 출력된다. 이 아날로그 출력을 A/D 변환하여 거리를 인식하게 된다.

용접 토치가 X-Y 테이블의 구동에 영향을 받지 않고 용접 경로를 추적하기 위해서 토치의 회전각을 제어해야 한다. 따라서 x축 테이블의 중앙에 센서의 토치의 구동을 위한 dc 모터를 장착하였다. 토치는 dc 모터의 축에 연결되어 1자유도 회전을 하게 되어 있으며 회전각은 토치의 회전축과 레이저 센서의 발광부를 잇는 선과 이루는 각도이다.

4.2 실험 방법 및 내용

용접선 추적을 위한 기준점을 찾기 위하여 용접 경로의 직각 방향으로 X-Y 테이블을 구동하면서 레이저 변위 센서로 각 위치에 대한 변위를 측정한다. 이때 변위 센서로부터 얻은 데이터의 최소값을 선택하여 용접선의 초기점으로 선택한다. XY 테이블은 용접선을 y축 방향으로 횡단한 후 선택된 용접선의 초기점으로 이동한다. X-Y 테이블을 용접선에 대하여 y축으로 스캐닝한 후 레이저 변위센서의 거리 정보를 얻는다.

본 연구는 직선 경로와 직선 경로가 끝나는 점에서 45° 기울어진 사선 부분과 연결되는 V형 용접 홈 경로에 대해 다음과 같은 두가지 경우에 대해 용접 경로의 추적 실험을 하였다. 1) 토치의 회전에 의해 변화되는 x축의 좌표 변화를 고려하지 않고 x축과 y축을 제어하면서 동시에 토치를 회전시키는 실험, 2) 토치의 회전에 의해 변화되는 x축의 좌표 변화를 고려하기 위해 제안된 보정기법을 이용하여 실험을 하였다. x축과 y축을 구동하기 위한 펄스 입력은 기준점에서 벗어난 거리만큼의 오차를 보상하기 위하여 PI 제어를 이용하였다. 토치의 회전각 제어 실험을 위해 PI 제어를 이용했고 용접작업시 발생하는 외란과 잡음에 대한 강인성을 고려하여 전산모사를 통해 H_∞ 제어의 검증을 하였다. 전산모사에서 용접시 발생하는 외란과 용접광, 스페터 등으로 인한 측정 잡음의 영향을 고려하여 설계패키지를 이용 외란과 잡음을 시스템에 인가하였다. 입력으로 스텝 입력을 주었고 기존의 제어인 PI 제어와 비교하였다.

5. 결과 및 고찰

계속적인 외란이 발생하는 스텝입력을 dc 서보 전동기를 회전시키는 구동입력으로 주었을 때의 전산모사 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에서 볼 수 있다. 서보 전동기의 위치 제어에 많이 쓰이는 PI 제어와 앞서 제시한 H_∞ 제어를 실행하였으며 전산모사 결과 과도응답 성능은 PI 제어의 이득값을 높여주면 H_∞ 제어에 비해 빠른 응답성을 보였으나 외란과 잡음을 갖는 시스템에서는 계속적인 오차가 발생했다. 외란과 잡음이 계속적으로 증가한 경우 H_∞ 제어는 오차가 큰 변화가 없었으나 PI 제어의 경우 오차가 많이 발생했다. H_∞ 제어를 적용하였을 경우 외란과 잡음이 있는 시스템에서 기존의 제어에 비해 강인함을 보였다. H_∞ 제어를 본 시스템에서 구성한 용접선 자동추적 시스템의 토치 회전각 제어

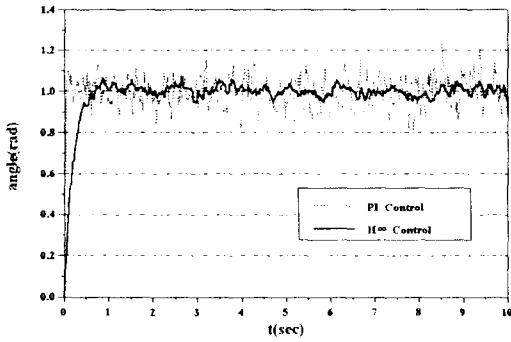


그림 5. 스텝 응답(전산모사)
Fig. 5. Step response(simulation)

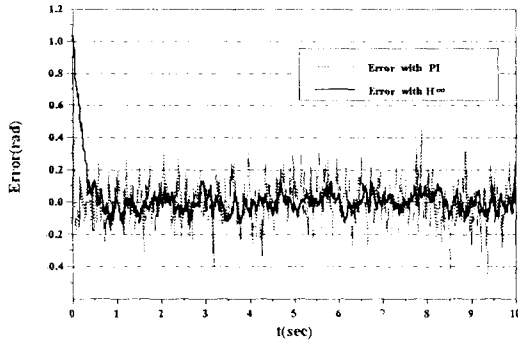


그림 6. 오차(전산모사)
Fig. 6. Error(simulation)

에 적용할 경우 토치와 홈의 중심선과의 경로오차를 최소화하면서 용접선을 추적할 수 있는 가능성을 보였다.

Fig. 7은 x, y축의 속도를 제어하고 토치의 회전에 따른 x축의 좌표 변화를 고려하지 않은 경우로 기울기 변화가 있는 용접 경로에서 offset 에러가 발생하며 이는 변화된 x축에 대한 y축의 좌표의 변화를 고려하지 않았기 때문이다.

Fig. 8는 x, y축의 속도를 제어하고 토치의 회전에 따른 x축의 좌표 변화를 고려한 경우로 토치는 센서에서 얻어진 용접 경로를 잘 추적함을 볼 수 있다.

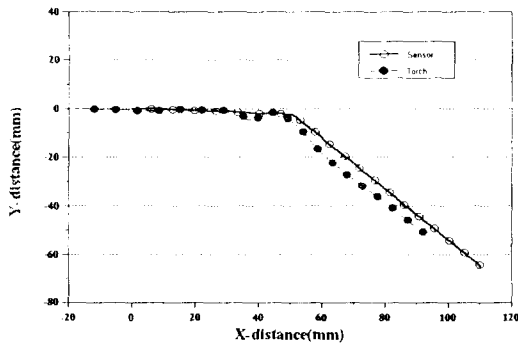


그림 7. 센서와 토치의 궤적
(토치 위치를 제어하지 않음)
Fig. 7 Trace of the sensor and torch:
(without controlling a torch position)

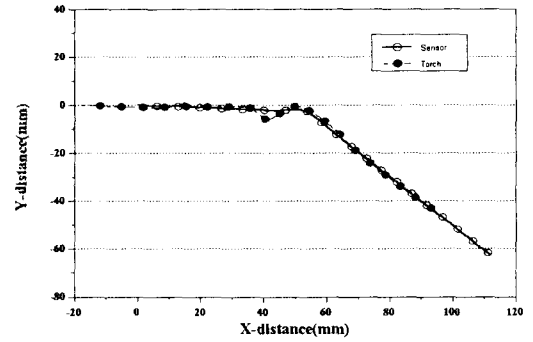


그림 8. 센서와 토치의 궤적
(토치 위치를 제어함)
Fig. 8. Trace of the sensor and torch
(with controlling a torch position)

6. 결론

본 연구에서 제시한 H[∞] 제어를 적용한 dc 서보 전동기의 전산모사 결과와 변화가 있는 용접 경로에 대해 레이저 변위센서를 이용하여 용접 경로를 인식하고 dc 서보 전동기를 이용하여 토치의 회전각을 제어함으로써 용접선 추적실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 외란과 잡음을 지닌 용접선 자동추적 시스템에 H[∞] 제어를 추가할 경우 시스템의 안정도에는 영향을 미치지 않고 외란과 잡음에 강인성을 지닌 시스템을 구성하여 경로오차를 최소화하면서 용접경로를 추적할 수 있음을 전산모사로 확인하였다.
- (2) 토오치의 회전각을 제어할 경우 기울기 변화가 있는 용접 경로에 대해 용접 경로의 추적이 가능함을 보였다.
- (3) 구성된 궤적추적장치는 제시된 알고리즘을 이용하여 용접시 발생하는 용접광, 스파터, 적외선 등의 영향을 어느 정도 막을 수 있다면 실제 용접선의 추적에도 적용될 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

- [1] R. Y. Chiang and M. G. Sdfnov, *Robust Control Toolbox User's Guide*, MathWorks, Natick, 1992.
- [2] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 1990.
- [3] B. Shahian and M. Hassul, *Control System Design Using Matlab*, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- [4] 김대현, 정규홍, "H[∞] 최적제어 이론을 이용한 도립진자의 건설한 보상기 설계에 관한 연구," 한국자동제어학회 논문지, Vol 1 of 2, pp 213-218, 1991.
- [5] 양상민, 조택동, 서송호, "레이저 변위센서를 이용한 용접선 자동추적에 관한 연구," 한국정밀공학회 논문지, pp. 680-684, 1996.
- [6] 조택동, 김성훈, "Preview Algorithm을 이용한 V-홈 궤적의 자동 추적에 관한 연구," 충남대학교 산업기술연구소 논문집, 제 10권 제 2호, pp. 199-206, 1995.