

벨트 구동 시스템에서의 실시간 반복제어 응용

Application to Real Time Repetitive Control in Belt Drive Systems

유 영 순
(Yeong Soon Ryu)

Abstract : It is the purpose of this paper to make a preliminary study on the use of repetitive control to improve velocity accuracy by eliminating repetitive disturbances caused by machining inaccuracies of the axis of rotation location. If the control system can be intelligent enough to compensate for such machining errors, then one may be able to improve the accuracy of the velocity control, or alternatively, one may maintain the same accuracy and relax the machining tolerances required. This could decrease cost significantly. Experiments are performed testing repetitive control methods on a constant speed rolling operation testbed. The experimental results show very substantial decreases in the tracking error of the system. Spectral data of the output motion are given to demonstrate the attenuation of the disturbance frequencies and harmonics, related to the bandwidth being used. It is seen that the simplest form of repetitive control which is very easily implemented, can produce striking improvement in control system performance in such belt drive rolling operations, and the learning can be accomplished in a short time.

Keywords : repetitive control, belt drive systems, non-causal zero-phase filtering, control period, machining inaccuracy, learning process

I. 서론

벨트 구동 시스템은 제조 공업에 이용되고 있는 기계와 다른 기계 장치에 매우 광범위하게 이용되고 있다. 벨트 구동 시스템의 예로서는 신문인쇄, 판금제조, 종이 제조, mylar와 같은 물질의 제조 등의 고속 회전 작업에 사용된다. 또한 벨트 구동은 로봇과 같은 기계동작 제어 계에도 이용되고 있다. 로봇 응용에서의 벨트 시스템은 모터의 무게나 자중을 로봇의 베이스로 이동시켜 로봇을 고속으로 움직이게 한다. 고속 회전 공정에 있어서의 제어 목적은 회전 공정의 위치나 속도를 정확하게 제어하고 더 나아가 판금의 두께와 같은 다른 변수들도 제어하는데 있다. 신문인쇄(또는 복사)에 있어서 롤러는 크고 무겁지만 고정밀도를 요한다. 이 크기와 정확도를 모두 만족시키기 위해서 현재 고가의 장비를 필요로 한다. 여기에서 발생하는 위치 또는 속도오차는 가공의 부정확성에서 기인한다. 이것을 구체적으로 나열해 보면 롤러의 기하학적 중심축(또는 기어)과 각 회전축(또는 기어)의 불일치, 롤러 베어링과 연결된 요소들과의 가공 오류, 사용한 벨트의 유연성이나 미끄러짐, 타이밍 벨트 경우에서의 이빨의 물림정도 등이 있다.

이러한 외란의 대부분은 주기적이다. 반복제어는 반복된 오류를 제거하도록 설계된 제어기이므로 벨트 구동 시스템에 반복제어의 사용은 당연하다. 학습과 반복제어 분야는 선행 경험으로부터 학습하여 명령이 반복됨에 따라서 0의 경로 오차를 수렴하도록 제어기를 설계한다. 이들 알고리즘의 가장 간단한 형태는 반복 영역에서의

적분 제어 개념을 바탕으로 한다[1]. 반복적인 오차는 각 반복에서의 같은 시간에서 보면 상수 오차와 같고 적분 제어기는 상수 오차를 해결해 준다. 이런 반복제어기에 기초한 적분제어는 참고문헌[1][2]에서 p적분기로 명명되었다. 참고문헌[3]에서는 이 개념을 현대식 학습제어 문제로 정립하였다.

이 논문의 목적은 반복제어[7]-[10]를 사용함으로써 부정확한 기계가공으로 인한 다양한 반복적인 외란[8]-[10]을 제거하여 벨트 구동 시스템에서 일정한 속도 명령을 따르는 정확도를 향상시키기 위한 연구를 하는 것이다. 이 제어 시스템은 지능화되어서 가공 오류를 보상하고 속도제어의 정확도를 향상시키며 여유있는 가공 편차를 가진 부품을 사용하여도 같은 정확도를 얻을 수 있게 할 것이다. 결국 이 논문을 통해서 놀랄만한 가격절감(cost reduction)을 가져올 수 있을 것으로 생각된다. 이 논문에서는 이 문제들을 해결하기 위하여 학습 또는 반복제어 개념의 응용에 있어서 몇 가지 주제를 중심으로 추진하고 있다.

- 적절히 선택된 학습주기의 사용에 의해서 많은 양의 오차 주파수를 해결하기 위한 방법
- 학습 주기 바깥 영역에서의 오차 주파수 학습 과정의 영향
- 학습 과정의 안정도를 보장하기 위한 반복제어 문제에 있어서 비 인과(non-causal) 영상 저주파 통과 필터 사용[4][5]의 실질적 문제.

II. 반복제어법의 개발

1. 적분제어 개념을 바탕으로 한 반복제어
여기에서는 반복 영역에서의 가장 간단한 형태인 적분

제어 개념을 바탕으로 한 학습제어기를 개발, 사용하였다. 입력과 반복 외란의 주기가 p 시간 스텝이라고 가정하자[11]. 주기의 $j+1$ 반복(repetition)의 시간 스텝 k' 에서 피드백 제어계의 명령 입력의 추가를 위한 반복제어 신호는 다음과 같다.

$$u_{j+1}(k') = \Phi \sum_{i=1}^j e_i(k'+1) \quad (1)$$

위에서 아래 첨자는 반복 수를 나타내는 것으로, 피드백 제어(feedback control)만이 적용되는 처음 주기인 0에서 시작하고 두 번째 주기에서는 반복 1이 되며 학습제어 조정이 시작된다. Φ 는 학습계인이다. 계산의 간단함을 위해서 순환식이 이용된다. 실 시간 스텝 k 가 j 반복에서의 k' 스텝과 일치하므로 $k = jp + k'$ 로 주어진다. 아래 기입 수를 없애고 시작시간과 관련된 실시간 스텝에서 독립변수를 바꿔 쓰면 아래와 같이 반복 제어 법이 주어진다.

$$u(k+p) = u(k) + \Phi e(k+1) \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

아래에서 논의되는 재시작 사이에서는 반복제어의 영상저주파 통과 필터와 함께 시스템 주기의 재시작과 관련된 수정이 필요하다. 초기 조건의 선택은 처음 주기에서 모든 스텝 k 에 대하여 다음과 같다.

$$u(k) = y^*(k+1) \quad (3)$$

$y^*(k)$ 는 시간 스텝 k 에서 요구되는 출력이다. 이것은 스텝 k 에서 명령에 응답하는 피드백 시스템의 한 스텝 지연을 의미한다. (2)에 z 전달 함수를 취하고 초기조건에 0을 이용한다면 전달함수는 다음과 같다.

$$U(z) = \frac{\Phi z}{z^p - 1} E(z) \quad (4)$$

시스템의 경로 오차에서 이 반복제어의 영향을 분석하기 위해 연속시간 피드백 제어 루프의 입력에 제어를 응용하는 간단한 경우를 고려해 보자. 피드백 제어계의 폐루프 전달함수를 $G(s)$ 로 하고 (2)에서 계산된 입력에 영차홀드(zero-order hold)를 이용하여 z 전달함수를 계산해 보자.

$$G(z) = (1 - z^{-1})Z\left[\frac{G(s)}{s}\right] = \frac{N(z)}{D(z)} \quad (5)$$

$N(z)$ 과 $D(z)$ 는 $G(z)$ 다항식의 분자와 분모를 나타낸다. 우선 주기적인 외란이 없는 주기 명령의 경우를 생각하자. 오차는 다음을 충족시킨다.

$$\begin{aligned} E(z) &= Y^*(z) - Y(z) = Y^*(z) - G(z)U(z) \\ &= Y^*(z) - \frac{\Phi N(z)}{(z^p - 1)D(z)} E(z) \end{aligned} \quad (6)$$

또는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [(z^p - 1)D(z) + \Phi z N(z)]E(z) \\ = D(z)(z^p - 1)Y^*(z) \end{aligned} \quad (7)$$

이것은 i 단계로 바뀌는 표본 영역에서 $z^i E(z)$ 를 인식함으로써 차분 방정식으로 생각할 수 있다. 한편 원하

는 궤도 $Y^*(k)$ 가 주기적이기 때문에 $(z^p - 1)Y^*(z)$ 는 차분 방정식에서 강제(forcing) 함수가 영이 됨을 의미하고 (7)은 표본 시간에서 오차 함수인 해를 가진 제차(homogeneous) 차분 방정식이 된다.

$$(z^p - 1)D(z) + \Phi z N(z) = 0 \quad (8)$$

일반 해는 $n+p$ 선형적 독립 해들의 합으로 쓸 수 있다.

$$e(k) = c_1 \rho_1^k + c_2 \rho_2^k + \dots + c_{n+p} \rho_{n+p}^k \quad (9)$$

임의의 상수 c_i 는 초기 조건에 의해서 결정되고 ρ_i 는 특성 방정식의 $n+p$ 개의 근이다. 이때 (9)는 (8)에서의 모든 근이 각기 서로 다른 경우이다. 그렇지 않으면 k, ρ_i^k 항이 발생한다. 오차 $e(k)$ 의 k 가 커짐으로서 0으로의 수렴은 모든 i 에 대하여 $|\rho_i| < 1$ 을 요구하고 수렴속도는 이 근들의 크기보다 얼마나 더 작아야 하는지에 달려있다.

벨트 구동 시스템에서 축의 부정확한 가공과 같은 오차 원인의 영향은 사실 기하학적 관련을 바탕으로 한 비선형적인 영향이다. 이것에 근접하기 위하여 피드백 제어계 $Y(z)$ 의 출력에 부가적인 외란 $V(z)$ 를 고려해 보자. 그때 (6)은 $E(z) = Y^*(z) - G(z)U(z) - V(z)$ 가 되고, 차분 방정식 (7)은 $Y^*(z)$ 를 $Y^*(z) - V(z)$ 로 대치 하므로써 얻을 수 있다. 한편 주기 p 시간 스텝을 가진 주기적인 외란은 역시 제거되고, 이 주기를 가지지 않는 외란은 차분 방정식에 영이 아닌(non-zero) 강제 함수와 오차를 제공한다.

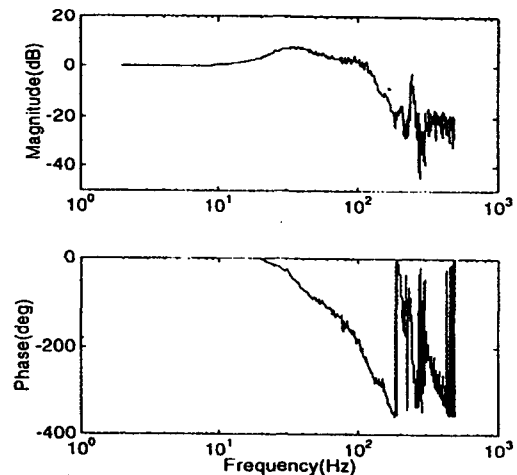


그림 1. 폐루프 시스템 주파수 응답의 크기와 위상각.

Fig. 1. Magnitude and phase of the closed-loop system frequency response.

2. 차단 주파수의 함수로서 학습계인 선택 알고리즘

좋은 과도 현상을 위해서 참고문헌[5]은 오차신호의 주파수 성분이 Nyquist 선도가 +1을 중심으로 한 단위 원내의 점들과 관련된 모든 주파수에서 반복이 증가함에 따라 일률적으로 줄어드는 조건을 (10)과 같이 보여주고 있다. 여기에서 모든 주파수 ω 를 만족하는

$$|1 - \Phi G(e^{i\omega T})| < 1 \quad (10)$$

T 는 표본 시간이다. (10)을 만족하게 하는 범위내의 주파수 범위내 차단 주파수를 결정한다. 크기와 위상에 대하여 전달함수를 쓰면 $G(e^{i\omega T}) = M(\omega) e^{i\theta(\omega)}$ 이고 $M(\omega)$ 와 $\theta(\omega)$ 은 페루프 시스템 주파수 응답의 크기와 위상각이다. 이 실험에서 사용한 이중 감소 타이밍 벨트 실험 장치에 대한 크기와 위상의 보디(Bode)선도는 그림 1에서 주어진다. (10)의 G 의 값을 교체하고 학습계인 Φ 의 값을 구하면 (11)과 같다.

$$\sqrt{(1 - (\Phi(\omega)M\cos\theta)^2 + (\Phi(\omega)M\sin\theta)^2} = 1$$

$$\Phi(\omega) = \frac{2\cos\theta(\omega)}{M(\omega)} \quad (11)$$

이 식은 학습제어기에 사용된 영상 필터 차단 주파수의 함수로서의 학습계인을 구하는데 사용된다. 그림 2에서는 그림 1에서의 실험적인 $M(\omega)$ 와 $\theta(\omega)$ 를 사용하여 (11)의 우변 항을 그린 것이다. 이 그림을 이용하여 적절한 학습계인에 대한 차단 주파수를 선택할 수 있다.

3. 정상상태 주파수응답의 관점에서 본 반복제어

참고문헌[4]-[6]은 학습제어의 주파수 응답 해석을 보여주고 있다. 또 실제적인 안정도 기준(criterion)과 정상상태 주파수 응답으로부터 얻어진 기준사이의 관계에 대해서 논하고 있다. 주파수 응답 안정도 기준은 안정도 경계를 구하는 게 아니라 학습과정 동안에 과도 현상에서의 좋은 행동을 보증하는 기준이다. 여기서 우리는 유사한 생각을 반복 제어문제에 적용한다[5][6]. 예를 들어서 과도현상을 무시한 채 피드백 제어계의 DC 계인을 1, 반복제어 계인을 1로 선택하고, 정상상태 주파수 응답 분석을 위해서 반복제어기에 의해서 한 주기에서 다음 주기로 얻어지는 변화를 실험한다. 그때 첫 주기에서 상수 오차가 있다면 반복제어법은 다음 주기에서 명령으로부터의 상수를 빼고 DC 계인이 1이기 때문에 이 변화는 정상상태에서 오차를 수정한다.

이제 감소되는 출력과 위상차를 가지는 피드백 제어계의 고주파에서의 오차를 고려하자. 우리가 위상차를 무시한다면 감소된 출력의 결과로 반복제어기의 교정 작용이 다음 주기에서 너무 작아 완전하게 오차를 수정할 수 없는 명령의 교정 조정을 한다. 작은 위상차는 유사한 결과를 가져온다. 대부분의 시스템에서 위상차가 180°에 이르는 주파수가 있다. 이때 반복제어기에 의해서 만들어지는 변화는 오차를 감소시키는 대신 오차를 증가시키고 오차 조정에 있어서 잘못된 부호를 조정해 주는 피드백 제어계로서 180°이동 될 것이다. 정상상태 주파수 응답으로서 반복제어작용이 오차를 감소시키거나 증가시키는 경계선은 대략 90°의 위상차에서이다. 정확한 값은 Nyquist 선도가 +1을 중심으로 한 단위 원을 떠날 때의 주파수이다[6]. 참고문헌[4]에서는 학습제어신호에 영상(zero-phase) 저주파 통과 필터를 적용함으로써 학습제어 응용에서의 이러한 어려움을 해결할 수 있었다. 참고문헌[5][6]에서는 더 정교한 학습제어 법칙으로 수렴 전에 좋지 않은 과도 현상 없이 이 한계를 넘어설 수 있게 하였다.

4. 학습제어와 반복제어 사이의 다리

학습제어에서의 초기 조건은 주기의 모든 반복에서 같다. 다시 말해서 그들은 반복 사이에서 리셋(reset)된다. 순수한 반복제어는 주기 사이에서 시스템의 재시작이 없다. 그 결과 과도 현상이 한 주기에서 다음 주기로 전해질 수 있다. 또한 한 주기 동안 제어 동작의 변화는 다음주기의 행동에 영향을 미친다. 이들 두 상황 사이에 놓인 새로운 제어법을 만드는 것이 가능하다[12]. 상술하면 피드백 제어계를 작동시키고 정상상태에 도달할 때까지 충분한 시간을 주고 나서 자료를 얻고 반복제어 교정항을 계산한다(시스템이 작동하고 있을 때 계산할 수 있고, 계산한 후에 시스템을 다시 시작할 수도 있다). 그리고 나서 이 반복제어 신호를 모든 주기에 적용하고 다시 과도현상이 없어질 때까지 기다린다. 이 과정을 오차 자료가 얻어질 때까지 반복한다. 이 절차는 위에서 언급한 과도 영향을 제거한다. 그러나 초기 조건이 반복되지 않기 때문에 반복제어 문제를 학습제어 문제로 정확히 바꿀 수는 없다. 각 경우의 반복에 대한 초기 조건은 차분 방정식에서 주기적인 경계 조건을 제공하는 과도 현상의 영향이 사라진 후에 적용되었다. 그래서 학습제어의 안정도 분석 방법을[3] 여기에 적용할 수는 없다. 반면에 위에서 주어진 정상상태 주파수 독립변수는 직접적으로 응용되고 있고 여기서 이용한 접근법을 정당화시킨다.

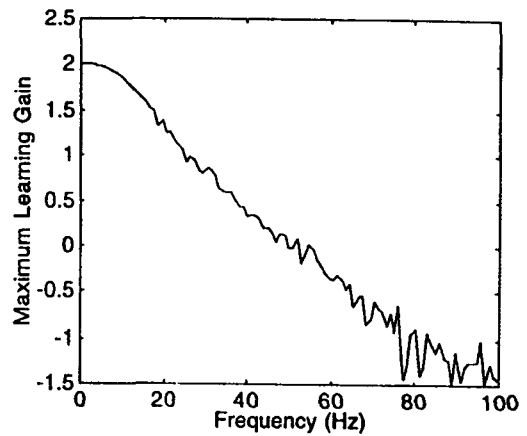


그림 2. 차단 주파수 함수로서 최대 학습계인.
Fig. 2. Maximum learning gain as a function of cutoff frequency.

5. 반복제어에서 영상(zero phase) 저주파 통과 필터 작용 급격한 차단 주파수를 가진 영상 필터는 관심 있는 대역폭(bandwidth) 내에서는 1의 계인을 가지고 그 외 지역에서는 0을 가진, 모든 주파수에서 위상변화가 없는 거의 이상적인 필터이다. 이것은 처음에 상용 저주파 통과 필터를 사용하여 신호를 시간 진행 방향으로 통과하고 여기서 얻어진 자료 배열(sequence)을 같은 필터를 사용하여 반대 방향으로 여과함으로써 얻을 수 있다. 결과적으로 위상 변화가 전혀 없고 원 차수(order)의 두 배가 된 필터가 되었다. 여기에서는 위상 차가 90°에 이르는 것을 피하기 위하여 25Hz의 차단 주파수를 가진 5차 butterworth 필터를 선택한다.

$$F(z) = \frac{a_1 + a_2z^{-1} + a_3z^{-2} + a_4z^{-3} + a_5z^{-4} + a_6z^{-5}}{b_1 + b_2z^{-1} + b_3z^{-2} + b_4z^{-3} + b_5z^{-4} + b_6z^{-5}} \quad (12)$$

25Hz 차단 주파수에 대해서는 필터 출력이 25Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz에 대해서 각각 6.86dB, 18.54dB, 41.77dB, 59.26dB로 줄어든다. 그림 2에서 단위 원을 떠나기 전에 차단되게 하는 각 차단 주파수에 대한 최고 학습게인 값이 주어진다. 필터는 초기 조건을 가지고 있어서 자체의 과도 현상을 가진다. 그리고 이들 초기 조건은 필터 적용법 때문에 자료의 시작과 끝 부분에 영향을 미친다. 이런 영향을 없애기 위해서 여기에서는 필터에 3주기의 데이터를 사용하여 여과된 신호의 가운데 주기를 이용한다. 이것은 진행방향과 역 방향에서의 필터 과도현상을 줄이기 위하여 가운데 한 주기를 선택한 것이다.

III. 이중 감소 타이밍 벨트 실험

1. 실험 구성

이중 감소 타이밍 벨트 시스템으로 구성된 회전 작업에 반복제어 개념을 응용한 실질적인 문제를 연구하기 위해서 그림 3과 같은 실험 기구가 이용되었다. 입력축은 증폭기로 구동되는 모델 FN38 모터로 움직인다. 이 축은 벨트에 의해서 중간 축과 연결되어 있다. 중간축의 다른 끝은 더 큰 회전 반경을 가지고 있고 이 쪽은 두 번째 벨트에 의해서 출력축과 연결되어 있다. 벨트는 이 (teeth)를 가지고 있어서 미끄러지지 않지만 고무와 같은 재질이어서 탄성작용이 있다. 각 벨트의 한쪽 가운데는 장력(tensioning) 도르래(pulley)가 있고, 여기에는 벨트에 힘을 가하는 스프링 부하가 있어 장력을 유지한다. 출력축은 작은 플라이휠(flywheel) 부하를 가지고 있고 1회전당 10800펄스를 제공하는 835회전 증가식 엔코더에 연결되어 있다. 이것은 많은 회전 작업에 이용되고 있는 이중 감소 구동 시스템의 전형적인 예이다.

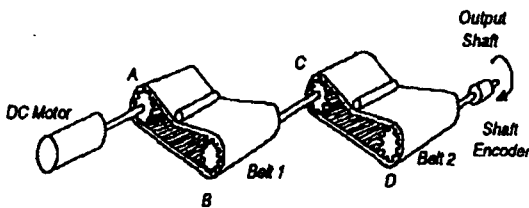


그림 3. 이중 감소 타이밍 벨트 구동 시스템.
Fig. 3. Double reduction timing belt drive system.

벨트에 이용되고 있는 이는 각 축의 공칭(nominal) 동작이 정수비와 관련되어 있음을 나타낸다. 출력축의 매 회전동안 입력축은 9번 회전하고 중간축은 4.5번 회전한다. 실제 회전 비의 미세한 변동은 벨트의 장력 변동과 벨트의 탄성작용에 의하여 나타난다. 입력축에 적용된 모터 토크는 이 축의 일정한 각속도를 얻게 하기 위하여 출력축에 엔코더 측정을 이용한 피드백 제어계에 의해서 조정된다. 피드백 제어기의 게인 조정은 중요하다. 기본 시스템의 원하지 않는 성능을 제거하고 시스템의 안정성을 보장하는데 영향을 끼치기 때문이다. 사용된 피드백

제어법은 두개의 영점(zero)과 두개의 극점(pole)으로 구성되어 있다.

$$a \frac{(s/w_o)^2 + 2\beta_o(s/w_o) + 1}{(s/w_p)^2 + 2\beta_p(s/w_p) + 1} \quad (13)$$

이것은 저주파 영역에서 높은 게인을 얻고, 큰 대역폭을 가지도록 하기 위하여 25°의 위상여유와 100%의 게인여유를 제공하도록 설계되어 있다. 그림 1은 이 피드백 제어계에 백색잡음(white noise)을 입력시켜서 얻은 자료를 스펙트럼한 페루프 주파수 응답의 크기와 위상에 관한 자료이다. 대략 10에서 100Hz 사이의 주파수에서 입력 사인파의 약간의 증폭이 있고 90Hz부근에서 출력의 위상차가 180°에 이르는 것을 알 수 있다.

2. 반복 외란 환경

안정된 작업 환경에서 출력축의 속도는 작은 변동을 나타낸다. 그림 4에서는 반복되지 않는 요소를 없애고 스펙트럼의 잡음을 제거하기 위하여 8번의 동작을 반복하여 평균한 FFT 데이터이다. 반복제어의 경우 시스템의 반복도에 대한 민감성이 중요하여 시스템의 반복도에 대한 오차가 심한 경우에는 이 제어기를 적용할 수 없는 문제점이 있다. 그러나 실 시스템의 경우에는 환경 변화(습도, 온도, 전기, 진동등)에 대한 영향 때문에 반복도의 정도에 큰 변화를 가져온다. 또한 실제 실험시 30초 작업을 계속해서 수행하지 않고 다음날로 이어서 하거나 또는 약간의 휴식을 한 후에 수행하는 경우도 있다. 이러한 경우에 실제 시스템에 대한 오차와 환경변화 등의 잡음에 의한 오차를 구별 할 수 없다. 주로 이러한 경우에 실 오차를 필터링 하는 방법으로 반복하여 평균하는 방법이 많이 사용된다. 여기에서는 8번의 작업을 평균하여 출력축의 속도오차로 사용하였다. 우리는 가능한 한 많은 오차 주파수 성분을 감소시키기 위하여 반복 제어의 가능성을 조사하고자 한다.

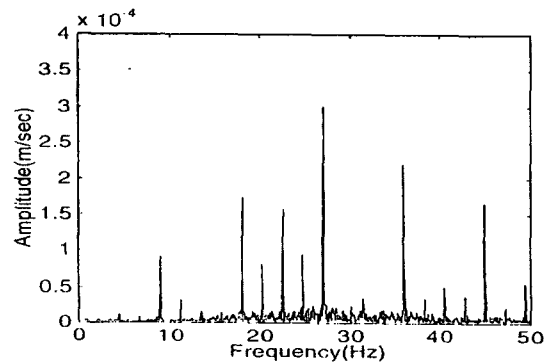


그림 4. 50Hz까지의 피드백 제어 시스템의 오차 스펙트럼.

Fig. 4. Frequency spectrum of the velocity error of the feedback control system through 50Hz.

벨트에 사용된 이 수는 각 축의 회전비와 연관되고 이것은 그림 4에서 관찰된 주파수를 해석하는데 도움을 준다. 출력축은 제어계의 오차 범위 내에서 초당 1회전을 한다. 그래서 이 축의 회전과 관련된 오차는 1Hz의 기본

주파수를 갖는다. 회전에 따른 오차의 조파(harmonics)는 1Hz의 정수배를 제공한다. 입력축은 출력축이 매 회전하는 동안 9번 회전한다. 따라서 이 축의 회전으로부터의 오차는 9Hz의 기본 주파수와 조파로 9Hz의 모든 정수 배를 제공한다. 중간축의 회전으로부터의 오차는 4.5Hz와 그것의 정수 배 주파수를 가진다. 입력벨트의 회전으로부터의 오차는 2.25Hz와 조파이고 출력벨트의 회전으로부터는 9/13Hz의 주파수가 발생한다. 그림 4의 오차 스펙트럼에서 이러한 주파수 스펙트럼의 모든 피크를 볼 수 있다. 피드백 제어기는 5Hz 이하의 오차는 거의 제거하였으나 그림 1의 보다 선도에서 기대되었듯이 높은 주파수 영역에서는 오차를 증가시켰다.

언급된 모든 주파수는 출력축과 1회전 또는 2회전에 의한 오차의 속도와 관련된다. 그림 4에서의 오차 스펙트럼에서처럼 출력축의 속도는 일정하지 않다. 그러므로 속도변동에 의한 주파수 변조로서 1회전 또는 2회전에 의한 오차 피크가 나타난다.

3. 반복제어주기의 선택

출력축의 회전시 인덱스펄스를 가진 하드웨어를 사용함으로, 1초 주기의 사용을 고려해 보자. 출력축의 회전에 의한 오차는 모든 조파와 함께 선택한 주기에 주기적이다. 1Hz에서의 오차는 1초의 주기를 가진다. 게다가 모든 조파 또한 이 주기를 가진다. 입력축은 9Hz의 기본 주파수를 가지므로 기본은 1초에 9주기를 가지고 그 조파는 1초에 이 수의 배를 가질 뿐만 아니라 1초 주기 또한 가지고 있다. 중간축은 1/4.5초의 주기를 가지고 선택한 주기는 이 축의 조파의 절반을 가지며 이 오차 원인의 나머지 조파와 함께 모든 반복에서 위상이 다르게 된다. 주기를 1초에서 2초로 늘리면 4.5Hz신호가 2초에서 9주기를 가지기 때문에 이 문제를 해결할 수 있다. 입력벨트는 1/2.25초의 주기를 가지므로 비슷한 어려움을 겪게된다. 언급한 모든 오차에 대한 가장 짧은 주기는 4초이다. 출력벨트로부터의 오차까지 포함시키면 가장 짧은 주기는 52초로 늘어난다. 이 실험에서는 4초의 반복제어 주기를 사용하였다. 4초 주기의 선택은 출력벨트의 부정확에 의한 오차가 학습하지 않는 주파수에서 얻어진 외란이라는 것을 의미한다. 오차의 다른 원인으로는 축 주기의 약 45%에서 발생하는 베어링으로부터 오차가 있다.

4. 실험결과 및 고찰

그림 5에서는 각 1,2,4,5,6,7의 학습 과정을 거친 오차 스펙트럼을 보여준다. 그림의 각 각을 피드백제어만의 오차와 비교하면 항상 정도를 볼 수 있다. 실제 오차 환경은 훨씬 더 잡음(noise)이 많아서 기대한 것처럼 완전하게 감소하지는 않지만 괄목할 정도로 향상되었음을 볼 수 있다. 7번의 반복에서 여기서 사용한 차단 주파수인 25Hz 이하의 오차 성분은 거의 제거되었다. 사실 차단 주파수 이상의 주파수에 대한 오차도 많이 감소하였다. 실제적으로 필터가 이상적으로 90°의 급격한 차단을 한다면 차단 주파수 이상의 주파수대에서는 크기 값이 완벽하게 줄어들던지 제거될 것이다. 그러나 여기에서 사용한 필터는 5차의 butterworth 필터로 10차의 큰 차단을 가짐에도 불구하고 차단 주파수 이상의 영역에서 완

벽한 결과를 나타내지 못하고 있다. 이것은 차단영역에서의 오차라고 생각한다. 또한 선택된 학습주기가 모든 오차를 제거할 수 있는 주기가 아니라 경제성을 고려하여 우선 중요한 오차를 먼저 제거하기 위한 것이었다. 그림 5는 단 2분여(7번의 작업)의 짧은 학습으로 다음과 같은 진행을 보여주고 있다는 것을 말하고 있다. 반복은 만족할 때까지 계속될 것이고 원하는 결과에서 멈출 것이다. 여기에서 주 관심사는 입력축, 중간축, 입력벨트로부터의 오차이다.

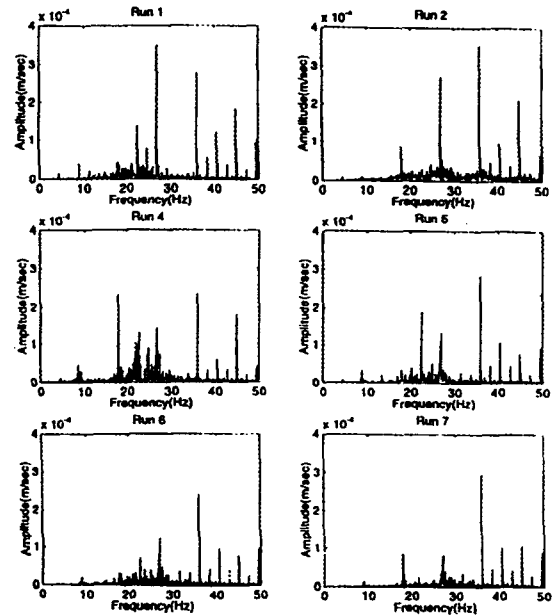


그림 5. 오차 스펙트럼, 피드백 제어와 1,2,4,5,6,7 학습과정.

Fig. 5. Improvement in the error spectrum, over that of feedback control only, resulting from 1,2,4,5,6 and 7 applications of the learning process (25Hz cutoff).

사용한 실험 절차에 대해서 기술하면 반복제어 주기는 4초이고 학습계인은 0.5가 사용되었다. 학습제어 신호는 25Hz 차단 주파수를 이용한 30초 작업 사이에만 개정되었다. 각 반복제어는 계산되어서 8번의 30초 동작 중에 적용된다. 각 반복 사이에 출력축은 2회전 되돌려진다. 이것은 다음 인덱스펄스가 4초 주기를 가지는 오차와 같은 위상을 가지도록 하기 위한 것이다. 10번째에서 26번째 사이 16초 즉 4주기에 해당되는 자료가 저장된다. 3주기에 해당하는 마지막 12초의 평균치가 영상 저주파 통과 필터에 사용되어 통과된 중간 주기가 새로운 반복 제어 신호의 계산을 위한 오차 신호로서 이용된다. 이 계산은 시스템이 작동되는 동안 이루어지며 계산이 끝나면 그것들은 시작되는 다음 4초 주기에 적용된다.

IV. 결론

이중 감소 타이밍 벨트 구동 시스템에서 정밀동작을 얻는데 반복제어를 적용하여 아래와 같은 결론을 지을 수 있다.

- 1) 피드백 제어계에서는 많은 주파수들의 속도오차를 발생시킨다. 반복제어장치는 이 오차 주파수들을 분석하여 제거할 수 있는 주기를 찾는다.
- 2) 적분제어에 근거한 학습제어는 시스템내의 180° 위상 차에 의한 오차로 인하여 하드웨어에서 작업이 불가능하다.
- 3) 이런 문제에 대한 해결책으로 영상의 저주파 통과 필터를 사용한다. 반복제어장치가 피드백 제어계에서 90° 위상 차를 가지는 주파수까지 오차를 해결할 수 있고, 더 높은 주파수에서의 오차들은 반복제어장치에 의해 영향을 받지 않는다. 이 실험에서는 25Hz의 차단 주파수가 사용되었다.
- 4) 반복제어 신호를 적용하는데 있어서 오차와의 동기를 시키는데 중요한 하드웨어적 이슈는 출력측에 사용된 인덱스 펄스이다. 인덱스 펄스가 도달할 때마다 새 주기가 시작되며 이것은 주기의 길이가 조금씩 변한다는 것을 의미한다. 이 정보는, 오차 FFT에서 오차 피크의 대략 1/4의 위상에 대한 정보를 확실히 하는데 충분하다. 반복 동안에 새로운 4초 주기의 시작은 펄스를 계산하여 알 수 있다. 그러나 기계가 재시작시 펄스 신호가 첫 번째 주기의 시작인지를 별도의 노력없이 알 수가 없다. 이 실험에서는 동기화를 위해 기어에 펜을 이용하여 표식(mark)을 하였다.
- 5) 이 실험에서 반복제어기를 적용하여 속도 오차를 감소시켰다. 실제로, 반복제어에 의한 오차 감소의 한계는 하드웨어의 반복도 수준과 저주파 통과 필터에서의 대역 폭에 의해 결정되어진다.

참고문헌

- [1] R. H. Middleton, G. C. Goodwin and R. W. Longman, "A method for improving the dynamic accuracy of a robot performing a repetitive task," *International Journal of Robotics Research*, vol. 8, no. 5, pp. 67-74, 1989.
- [2] M. Tomizuka, T. C. Tsao, K. K. Chew, "Analysis and synthesis of discrete-time repetitive controllers," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 111, pp. 353-358, 1989.
- [3] M. Phan and R. W. Longman, "A mathematical theory of learning control for linear discrete multivariable systems," *Proc. of the AIAA/AAS Astrodynamics Conference*, Minneapolis, Minnesota, pp. 740-746, 1988.
- [4] H. Elci, M. Phan, R. W. Longman, J. -N. Juang and R. Ugoletti, "Experiments in the use of learning control for maximum precision robot trajectory tracking," *Proc. of the 1994 Conference on Information Sciences and Systems*, Princeton, NJ, 1994.
- [5] H. Elci, R. W. Longman, M. Phan, J. -N. Juang and R. Ugoletti, "Discrete frequency based learning control for precision motion control," *Proc. of the 1994 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, San Antonio, Texas, 1994.
- [6] H. Elci, M. Phan, R. W. Longman, J. -N. Juang and R. Ugoletti, "Automated learning control through model updating for precision motion control," *1994 ASME Winter Annual Meeting, Adaptive Structures and Material Systems Symposium*, 1994.
- [7] R. W. Longman and E. J. Solcz, "Small gain robustness issues in the P-Integrator repetitive controller," *AIAA/AAS Astrodynamics Conference, A Collection of Technical Papers, Part 2*, Portland, Oregon, pp. 537-551, 1990.
- [8] E. J. Solcz and R. W. Longman, "Disturbance rejection in repetitive controllers," *Proc. of the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference*, Durango, Colorado, 1991.
- [9] E. J. Solcz and R. W. Longman, "Robustness of repetitive controllers to frequency uncertainties," *Proc. of the Conference on Information Sciences and Systems*, Department of Electrical Engineering, Princeton University, 1992.
- [10] E. J. Solcz and R. W. Longman, "Repetitive control in the presence of multiple periodic disturbances," *Proc. of the 1992 AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference*, Hilton Head, South Carolina, 1992.
- [11] R. W. Longman and Y.-C. Huang, "Use of unstable repetitive control for improved tracking accuracy," *ASME Winter Annual Meeting, Adaptive Structures and Material Systems Symposium*, 1994.
- [12] S. C. Lee and R. W. Longman, "Indirect decentralized repetitive control," *Advances in the Astronautical Sciences*, vol. 82, Part 1, pp. 93-109, 1993.

**유 영 순**

1960년 6월 20일생. 1985년 전남대학교 기계공학과 졸업. 1987년 City Univ. of New York 석사과정 졸업. 1987년~1989년 Hinode Corp. 연구원. 1994년 Columbia University 기계공학과 박사. 1994년~1995년 Xerox Corp. 연구원. 1995년~1997년 만도기계 생산기술연구원 책임연구원. 1997년 3월~현재 안동대학교 기계공학과 전임강사. 관심분야는 적응제어, 학습제어와 신경회로망 등의 지능제어 개발 및 응용, 로봇틱스, PC-NC, 메카트로닉스, 시뮬레이션을 이용한 생산 자동화.