

비선형 퍼지 PD 제어를 이용한 X-Y 테이블의 경로제어

채창현, 석홍성*, 김희년
 금오공과대학교 대학원 전자제어공학과

Contour Control of X-Y Tables Using Nonlinear Fuzzy PD Controller

Chang-Hyun Chai, Hong-Seong Suk*, Hee-Nyon Kim
 Dept. of Control Eng., KNU

Abstract - This paper describes the fuzzy PD controller using simplified indirect inference method. First, the fuzzy PD controller is derived from the conventional continuous time linear PD controller. Then the fuzzification, control-rule base, and defuzzification using SIIM in the design of the fuzzy controller are discussed in detail. The resulting controller is a discrete time fuzzy version of the conventional PD controller, which has the same linear structure, but are nonlinear functions of the input signals. The proposed controller enhances the self-tuning control capability, particularly when the process to be controlled is nonlinear. As the SIIM is applied, the fuzzy inference results can be calculated with splitting fuzzy variables into each action component and are determined as the functional form of corresponding variables. So the proposed method has the capability of the high speed inference and extending the fuzzy input variables easily. Computer simulation results have demonstrated the superior to the control performance of the one proposed by D. Misir et al. Finally, we simulated the contour control of the X-Y tables with direct control strategies using the proposed fuzzy PD controller.

는 장점 등이 있다. 그러나, 제어입력이 퍼지입력의 조합에 의한 20개의 영역으로 분할되고, 퍼지입력변수의 수가 증가하면 적용하기 어려워 퍼지 PI+D 또는 퍼지 PD+I형의 제어기로 구현되도록 제한된다. 1995년 H. X. Li 등[11]은 가속도 오차를 사용하지 않은 Hybrid 속도형 퍼지 PI/위치형 퍼지 PD 제어를 제안하였으나, 하나의 규칙 테이블에 의해 생성되는 제어입력을 출력 조절계수만으로 퍼지 PI와 퍼지 PD 논리를 조정해야 하므로 성능 향상에 한계가 있다. 1996년 M. Santos 등[12]은 3개의 입력변수(오차, 속도 오차 및 가속도 오차)와 8개의 퍼지규칙을 사용하는 퍼지 PID 제어를 제안하였으나, 입력변수 공간이 48개의 영역으로 분할되어 적용하기 어려운 단점이 있다. A. Otsubo 등[13]은 3개의 입력변수와 6개의 퍼지규칙을 사용하는 퍼지 PID 제어를 간편 간접추론방법(Simplified Indirect Inference Method : SIIM)을 사용하여 설계하고 퍼지 스위칭 제어규칙에 따라 기존의 PID 제어기와 병행 사용하는 Hybrid 퍼지 PID 제어를 제안하였으나, 정상상태에서 동작하는 기존 PID 제어기에 최적 동조해야 하는 문제점이 있다. 1997년 C. Li 등[14]은 3개의 입력변수와 8개의 퍼지규칙을 사용하고 신경망으로 학습하는 자기학습 PID 제어를 설계하였으며 C. Liu 등[15]은 제어입력 공간분할에 의한 퍼지 PID 제어를 설계하였으나, 퍼지제어입력을 구하기 위하여 적분을 수행하여야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 간편 간접추론방법(Simplified Indirect Inference Method : SIIM)을 사용하는 퍼지 PD 제어를 설계하였다. 제안된 제어기는 선형 디지털 PD 제어기의 구조를 사용하였고, 4개의 간단한 퍼지 IF-THEN 규칙으로 구성된다. 제어기의 퍼지화부는 2개의 단조증가 선형함수를 사용하였고, 단조증가 비선형 비퍼지화를 적용한 후 가중치 결합으로 제어입력을 생성한다.

제안된 제어기의 성능을 고찰하기 위하여 선형 플랜트, 시간지연을 가지는 플랜트 및 비선형 플랜트와 X-Y 테이블의 경로제어에 모의실험하여 효용성을 입증하였다.

1. 서 론

Zadeh[1] 등에 의해 제안된 퍼지이론이 Mamdani [2]에 의해 제어시스템에 응용된 이래, 퍼지제어기의 설계에 관한 연구는 일반적으로 의미상의 퍼지 PI/PD 제어기 시스템에 대한 연구가 주로 진행되었으나, 퍼지 PI 제어기는 과도상태 성능 향상에 대한 한계가 지적되고 [3], 퍼지 PD 제어기는 정상상태 오차를 줄일 수 없다는 한계가 지적되고 있다[11]. 1993년 Z. Y. Zhao 등 [4]이 퍼지논리에 의한 퍼지 PID 이득 조정기를 제안한 이래 퍼지 PID 제어기에 대한 연구가 급속히 진행되어 1990년 H. Ying 등[5,6]은 2개의 퍼지입력변수와 4개의 퍼지규칙, 비선형 비퍼지화를 적용하여 20개의 제어입력 영역으로 분할되는 비선형 퍼지 PI 제어를 제안하였는데, 1994년 Malki 등[7~10]은 디지털 PID 제어기의 선형 모델을 기초로 Ying 등의 퍼지 PID 제어기를 재 설계하였다. Malki 등의 퍼지 PID 제어기는 선형 디지털 PID 구조에 기초로 선형구조의 비선형 시변 매개변수 이득이 되도록 설계하여, 선형뿐만 아니라 비선형 플랜트에 대해 좋은 제어 성능을 가진다는 것을 입증하였다. 또한 퍼지화부, 퍼지규칙 및 비퍼지화의 전 과정이 최종 퍼지제어입력의 생성에 관한 식으로 표현되어 수행시간(processing time)이 단축되

2. 본 론

2.1 디지털 PD 제어기의 퍼지입출력변수의 결정

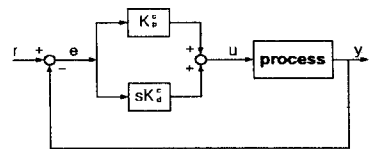


그림 1. 아날로그 PD 제어 시스템

그림 1에서 아날로그 PD 제어기의 출력은 식(1)로 주어진다.

$$U^c(s) = (K_p^c + sK_d^c)E^c(s) \quad (1)$$

여기서 K_p^c 는 아날로그 PD 제어기의 비례이득이고, K_d^c 는 아날로그 PD 제어기의 미분이득이며, $E^c(s)$ 는 오차신호이다.

식(1)의 방정식을 쌍일차 변환($s = \frac{z-1}{Tz+1}$, 샘플링 주기 $T > 0$)하여 이산 PD 제어기의 비례이득과 미분이득을 각각 $K_p = K_p^c$, $K_d = \frac{2}{T} K_d^c$ 로 정의하여 역 z 변환(inverse z-transformation)하면 다음 식(2)와 같다.

$$u(nT) + u(nT-T) = K_p[e(nT) + e(nT-T)] + K_d[e(nT) - e(nT-T)] \quad (2)$$

식(2)의 양변을 T 로 나누어 식(3~5)로 정의하면 식(6)과 같고, 식(3)을 다시 쓰면 식(7)과 같다.

$$\Delta u(nT) = \frac{u(nT) + u(nT-T)}{T} \quad (3)$$

$$d(nT) = \frac{e(nT) + e(nT-T)}{T} \quad (4)$$

$$r(nT) = \frac{e(nT) - e(nT-T)}{T} \quad (5)$$

$$\Delta u(nT) = K_p d(nT) + K_d r(nT) \quad (6)$$

$$u(nT) = -u(nT-T) + T \Delta u(nT) \quad (7)$$

식(6)과 식(7)로 유도된 디지털 PD 제어 알고리즘을 사용하여 퍼지 PD 제어 알고리즘을 구성한다. 식(6)의 우변항으로 주어지는 $K_p d(nT)$ 와 $K_d r(nT)$ 는 퍼지 PD 제어 알고리즘의 입력변수로 사용된다. 식(7)의 $T \Delta u(nT)$ 를 퍼지 PD 제어 알고리즘의 출력 $K_u \Delta u(nT)$ 로 정의하면 식(8)과 같으며, K_u 는 퍼지 PD 제어이득으로 출력 조절계수(output scaling factor)이다.

$$u(nT) = -u(nT-T) + K_u \Delta u(nT) \quad (8)$$

구성된 퍼지 PD 제어시스템은 그림 2와 같다.

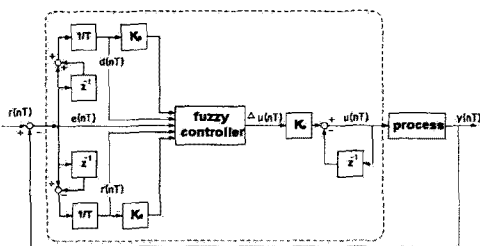


그림 2. 퍼지 PD 제어 시스템

2.2 간편 간접추론방식에 의한 퍼지 PD 제어기

본 논문에서는 A. Otsubo 등[13]이 사용한 SIIM 방법을 PD 알고리즘에 적용한다.

2.2.1 퍼지화(Fuzzification)

식(6)의 퍼지 PD 제어 알고리즘에서 입력변수 $K_p d(nT)$, $K_d r(nT)$ 에 대한 소속함수는 그림 3과 같이 두 개의 단조증가 선형함수의 식(9)로 정의되며, 입력변수의 소속정도(compatibility) ω_i 는 식(10)과 같이 결정된다. 그림 3과 식(9)에서 L 은 설계변수(design variable)로 4장에서 고찰한다.

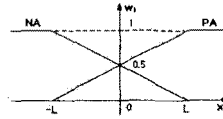


그림 3. 입력 소속함수

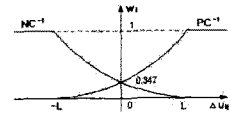


그림 4. 출력 소속함수

$$PA(x_i) = \frac{x_i + L}{2L}, \quad NA(x_i) = \frac{-x_i + L}{2L} \quad (9)$$

$$\omega_i = PA(x_i) \quad \text{또는} \quad \omega_i = NA(x_i) \quad (10)$$

여기서, x_i 는 입력변수로 $K_p d(nT)$ 이거나 $K_d r(nT)$ 이다.

2.2.2 퍼지 제어 규칙(Fuzzy Control Rules)

퍼지 PD 제어 알고리즘에 대한 제어 규칙은 다음과 같다.

(R1) IF $K_p d(nT)$ is PA, THEN Δu_{11} is PC^{-1} .

(R2) IF $K_p d(nT)$ is NA, THEN Δu_{12} is NC^{-1} .

(R3) IF $K_d r(nT)$ is PA, THEN Δu_{21} is PC^{-1} .

(R4) IF $K_d r(nT)$ is NA, THEN Δu_{22} is NC^{-1} .

출력변수 PC 및 NC 에 관한 소속함수는 그림 4와 같은 2개의 단조증가 비선형 함수의 역함수로 식(11)과 같다.

$$PC^{-1} = L[-2 + \sqrt{21.25 - (\omega_i - 4.5)^2}] \quad (11)$$

$$NC^{-1} = L[2 - \sqrt{21.25 - (\omega_i - 4.5)^2}]$$

입력변수 $K_p d(nT)$ 에 관한 입력의 증분은 간편 간접추론방식에 따라 소속정도 ω_1 와 ω_2 의 함수 식(12)에서 결정된다.

$$\Delta u_{11} = PC^{-1}(\omega_1), \quad \Delta u_{12} = NC^{-1}(\omega_2) \quad (12)$$

입력변수 $K_d r(nT)$ 에 관한 입력의 증분은 소속정도 ω_3 와 ω_4 의 함수 식(13)에서 결정된다.

$$\Delta u_{21} = PC^{-1}(\omega_3), \quad \Delta u_{22} = NC^{-1}(\omega_4) \quad (13)$$

2.2.3 비퍼지화(Defuzzification)

식(12)에 의해 구해진 퍼지제어입력의 크기는 가장 많이 사용되고 있는 가중치 결합(weighted combination)의 식(14)를 사용하여 제어입력의 증분 Δu_1 이 결정된다.

$$\Delta u_1 = \frac{\omega_1 \Delta u_{11} + \omega_2 \Delta u_{12}}{\omega_1 + \omega_2} \quad (14)$$

또한 식(13)을 사용하여 식(15)와 같은 제어입력의 증분 Δu_2 가 결정된다.

$$\Delta u_2 = \frac{\omega_3 \Delta u_{21} + \omega_4 \Delta u_{22}}{\omega_3 + \omega_4} \quad (15)$$

식(14) 및 식(15)에 의해 결정된 퍼지 PD 제어 입력의 증분 Δu 는 식(16)과 같다.

$$\Delta u = \frac{1}{2}(\Delta u_1 - \Delta u_2) \quad (16)$$

퍼지 PD 제어입력의 증분 Δu 는 2개의 입력변수에서 구해지므로 식(16)과 같이 2로 나누어진다[13].

2.3 모의실험 및 고찰

제안한 퍼지 PD 제어기의 성능을 고찰하기 위하여 선형 플랜트와 시간지연을 가지는 플랜트 및 비선형 플랜트의 예제를 모의실험하여 효율성을 입증하였고, 김 등[16]의 X-Y 테이블의 경로제어에 적용하였다.

2.3.1 선형 플랜트

선형 플랜트의 첫 번째 예는 식(17)의 1차 플랜트이다.

$$H(s) = \frac{1}{s} \quad (17)$$

시행착오법으로 결정된 매개변수를 사용하였을 때의 계단응답은 그림 5와 같다. 제안된 퍼지 PD 제어기는 $L=300$ 에서 오버슈트가 없고, 상승시간이 짧은 매우 우수한 제어성능을 보인다. 그림 5에서 설계변수 L 이 적절히 동조된 설계변수 ($L=300$)보다 작아지면 제어입력의 증분이 작게 되어 상승시간이 길어지게 되고, 동조된 설계변수보다 커지면 비퍼지화 과정에서 최대값으로 포화(saturation)된 제어입력의 증분이 계속적으로 발생되므로 불안정해진다.

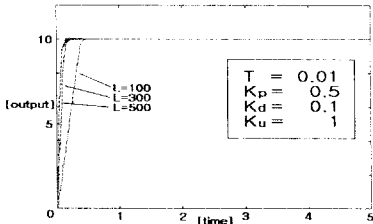


그림 5. 1차 플랜트의 계단응답

선형 플랜트의 두 번째 예는 식(18)의 2차 플랜트이다.

$$H(s) = \frac{1}{s(s+100)} \quad (18)$$

계단응답은 그림 6과 같다.

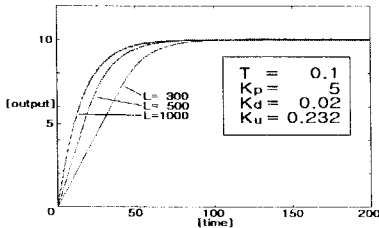


그림 6. 2차 플랜트의 계단응답

선형 플랜트의 세 번째 예는 식(19)의 시간지연(time delay)을 가지는 2차 플랜트이다.

$$H(s) = \frac{1}{s(s+100)} e^{-3s} \quad (19)$$

계단응답은 그림 7과 같다.

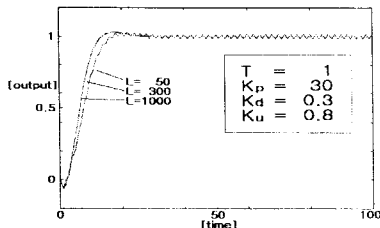


그림 7. 시간지연을 가지는 2차 플랜트의 계단응답

2.3.2 비선형 플랜트

제안된 방법에 의한 비선형 플랜트의 첫 번째 예는 식(20)과 같다.

$$\dot{y}(t) = 0.0001y(t) + u(t) \quad (20)$$

계단응답은 그림 8과 같다.

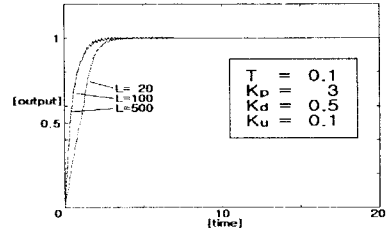


그림 8. 비선형 플랜트 1의 계단응답

비선형 플랜트의 두 번째 예는 식(21)과 같다.

$$\dot{y}(t) = -y(t) + 0.5y^2(t) + u(t) \quad (21)$$

계단응답은 그림 9와 같다.

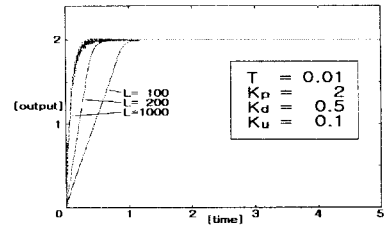


그림 9. 비선형 플랜트 2의 계단응답

2.3.3 X-Y 테이블의 경로제어

X-Y 테이블을 구성하는 각 축이 직류 전동기로 구성되어 있는 경우 직류 전동기의 수학적 모델은 다음과 같다[16].

$$\frac{\Theta(s)}{V_i(s)} = \frac{K_i}{L_a J_m s^3 + (R_a J_m + B_m L_a) s^2 + (K_b K_i + R_a B_m) s} \quad (22)$$

여기서, $\Theta(s)$ 는 전동기의 변위, $V_i(s)$ 는 입력 전압이다. X-Y 테이블의 각 축을 구성하는 전동기는 동일 조건이며 각각의 매개변수는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} V_i(\max) &: 30 [V] & I_a(\max) &: 2 [A] \\ R_a &: 3 [\Omega] & L_a &: 6 [mH] \\ K_i &: 50 \times 10^{-3} [N \cdot m/A] & J_m &: 40 \times 10^{-6} [kg \cdot m^2] \\ B_m &: 35 \times 10^{-6} [kg \cdot m^2/s] \end{aligned}$$

2.3.3.1 X-Y 테이블의 경로계획

X-Y 테이블의 경로에 사용될 입력 패턴은 원과 클로버의 2가지 패턴으로 계획하였으며, 본 모의실험에서는 부하 토크에 의한 영향은 무시한다.

- 패턴 1 : 중심이 (0,0)이고, 반경이 5.026[cm]인 원.
- 패턴 2 : 중심이 (0,0)이고, 최대반경이 6.032[cm]인 클로버.

2.3.3.2 X-Y 테이블의 모의실험 결과 및 고찰

패턴 1의 경우에서 수행한 결과를 그림 10에 도시하였다.

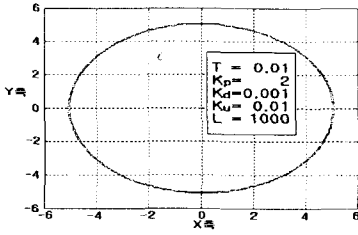


그림 10. 패턴 1의 X-Y 궤적

패턴 2의 경우에서 수행한 결과를 그림 11에 도시하였다.

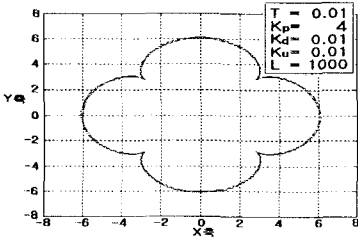


그림 11. 패턴 2의 X-Y 궤적

위에서 관찰한 바와 같이 제안된 퍼지 PD 제어를 선형 플랜트, 시간지연을 가지는 플랜트 및 비선형 플랜트에 적용한 결과, 오버슈트가 없고 상승시간이 짧은 우수한 제어성능을 보인다. 그러나, X-Y 테이블의 경로제어는 작은 오차가 존재하므로 I 제어 알고리즘이나 혼합형(Hybrid) 제어기법 등이 도입되어야 할 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 간편 간접추론방법(Simplified Indirect Inference Method : SIIM)을 사용하는 퍼지 PD 제어를 설계하고, X-Y 테이블의 경로제어에 적용하였다. 제안된 제어기는 선형 디지털 PD 제어를 사용하였고, 퍼지 PD 제어알고리즘에 대해 4개의 간단한 퍼지 IF-THEN 규칙으로 구성된다. 제어기의 퍼지 화부는 2개의 단조증가 선형함수를 사용하였고, 단조증가 비선형 비퍼지화를 적용한 후 가중치 결합으로 제어입력을 생성한다.

구성된 제어기는 다음과 같은 장점을 가진다. 첫째, 종래의 선형 디지털 PD 제어를 기초로 속도형 퍼지 PD 제어를 설계하였다. 둘째, 퍼지 PD 제어기의 제어입력이 비선형 함수의 비퍼지화로 결정되므로 선형 및 비선형 플랜트에 우수한 적응능력을 가진다. 셋째, 간편 간접추론방식은 퍼지제어기의 입력변수 별로 추론하므로 고속 추론이 가능하고, 입력변수의 증가에 따른 퍼지규칙의 수가 증가하여도 쉽게 적용이 가능하다. 넷째, 제안된 제어기의 추론결과로 결정되는 제어입력은 H. A. Malki 등(7)의 20개의 영역에서 결정되는 제어입력과 거의 유사한 퍼지입력 공간으로 구성된다. 제안된 제어기의 성능을 고찰하기 위하여 선형 플랜트, 시간지연을 가지는 플랜트 및 H. A. Malki 등이 사용한 비선형 플랜트의 예제를 모의실험하여 효용성을 입증하였고, 직접 제어 방식(direct control strategies)으로 X-Y 테이블의 경로제어에 적용하였다.

추후 연구과제로 제어기의 성능을 향상시키기 위하여 I 제어 알고리즘의 도입과 BIBO 안정도에 관한 연구가 계속되어야 할 것이다.

- [1] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," Information Control, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [2] E. H. Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithm for the Control of Dynamic Plants," Proc. IEE, vol. 12, no. 12, 1974.
- [3] 이지홍, 채창원, 장점환, "퍼지리젯기능을 갖는 PI형 퍼지 제어기," 대한전자공학회 논문지, 제30권, B편, 12호, pp. 87-97, 1993
- [4] Z. Zhao, M. Tomizuka, and S. Isaka, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers," IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybernetics, vol. 23, no. 5, pp. 1392-1398, 1993.
- [5] H. Ying, W. Siler, and J. J. Buckley, "Fuzzy Control Theory : A Nonlinear Case," Automatica, vol. 26, no. 3, pp. 513-520, 1990.
- [6] H. Ying, "The Simplest Fuzzy Controllers using Different Inference Methods are Different Nonlinear Proportional-integral Controllers with Variable Gains," Automatica, vol. 29, no. 6, pp. 1579-1589, 1993.
- [7] H. A. Malki, H. Li, and G. Chen, "New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional-Derivative Control Systems," IEEE Trans. on Fuzzy Syst., vol. 2, no. 4, pp. 245-254, 1994.
- [8] H. A. Malki, D. Misir, D. Feigenpan, and G. Chen, "Fuzzy PID Control of a Flexible Joint Robot Arm with Uncertainties from Time-Varying Loads," IEEE Trans. on Cont. Syst. Tech., vol. 5, no. 3, pp. 371-378, 1997.
- [9] D. Misir, H. A. Malki, G. Chen, "Design and Analysis of a Fuzzy Proportional-Integral-Derivative controller," Fuzzy Sets and Systems, vol 79, pp. 297-314, 1996.
- [10] H. A. Malki and D. Misir, "Determination of the Control Gains of a Fuzzy PID Controller Using Neural Networks," Fifth IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, pp. 1303-1307, 1996.
- [11] H. X. Li and H. B. Gatland, "A New Methodology for Designing a Fuzzy Logic Controller," IEEE Trans. on Syst., Man, and Cyber., vol. 25, no. 3, pp. 505-512, 1995.
- [12] M. Santos, S. Dormido, and J. M. de la Cruz, "Fuzzy-PID Controllers vs. Fuzzy-PI Controllers," Fuzzy Sets and Systems, vol 79, pp. 1598-1604, 1996.
- [13] A. Otsubo, K. Hayashi, S. Murakami, and M. Maeda "Fuzzy Hybrid Control Method Applying Simplified Indirect Inference Method," Fifth IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, pp.283-289, 1996.
- [14] C. Li and R. Priemer, "Self-learning General Purpose PID Controller," J. Franklin Inst. vol. 334B, no. 2, pp. 167-189, 1997.
- [15] C. Liu, J. Xu, and C. C. Hang, "Comparison Between a Fuzzy PID Controller and a Kind of Nonlinear PID Controller," Proc. of the 36th CDC., pp. 2736-2741, 1997.
- [16] S. H. Kim, W. Y. Choi, C. H. Chai, S. J. Lee, and H. G. Choi, "Contour Control of Mechatronic Servo Systems using Chaotic Neural Networks," IEEE ICNN, pp. 2122-2125, 1988.